

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ**

**Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ  
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»**

---

***В. А. Никамин***

# **ОПТИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ ИНФОРМАЦИИ**

**СПб ГУТ**

**Санкт-Петербург  
2019**

УДК 681.7  
ББК 32.871  
Н 62

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент кафедры телевидения и видеотехники  
*О. В. Украинский,*  
доктор технических наук, профессор кафедры режиссуры мультимедиа  
Санкт-Петербургского гуманитарного университета профсоюзов  
*И. А. Алдошина*

*Рекомендовано к печати  
научно-технической комиссией ученого совета СПбГУТ*

**Никамин, В. А.**

Н 62      Оптическая запись информации : [монография] / В. А. Никамин ;  
СПбГУТ. – СПб., 2019. – 328 с.  
ISBN 978-5-89160-161-1

В книге изложен материал, касающийся оптических методов записи информации. Подробно рассматриваются существующие сегодня на потребительском рынке форматы оптической записи – CD, DVD, BD. Отдельная глава посвящена наиболее распространенным сейчас цифровым звуковым интерфейсам – AES3, AES10 S/PDIF.

Предназначена для специалистов, связанных с системами записи информации, и студентов, обучающихся по специальностям 11.03.01 «Радиотехника», 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», а также для широкого круга читателей, интересующихся системами записи и воспроизведения аудиовизуальных программ.

**Nikamin, V. A.**

Optical Data Recording : [monograph] / V. A. Nikamin ; SPbSUT. – St. Petersburg, 2019. – 328 p.

The book contained material on optical data recording methods. Detail current market formats optical recordings-CD, DVD, BD. A separate chapter is devoted to the most common now digital audio interfaces-AES3, S/PDIF AES10.

It is intended for professionals involved with the system of information recording, and students on specialities «Radio engineering», 11.03.01 11.03.02 «Infocommunication technologies and communication systems», as well as for a wide range of readers, interested in recording and playback systems for audiovisual programmes.

**УДК 681.7  
ББК 32.871**

**ISBN 978-5-89160-161-1**      © Никамин В. А., 2019

© Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Предисловие.....  | 7  |
| 1. История оптической записи информации.....  | 9  |
| 2. Физические основы оптической записи информации.....  | 26 |
| 2.1. Оптическое излучение и его свойства.....   | 26 |
| 2.2. Лазеры.....  | 32 |
| 2.2.1. Полупроводниковый лазер.....   | 34 |
| 2.3. Основные оптические элементы, используемые в системах<br>оптической записи/считывания..... | 37 |
| 2.3.1. Фокусирующая линза.....  | 38 |
| 2.3.2. Коллиматор и согласующая линза.....  | 41 |
| 2.3.3. Поляризационный расщепитель луча.....  | 42 |
| 2.3.4. Четвертьволновая пластинка.....  | 43 |
| 2.3.5. Фотоприемник.....  | 45 |
| 2.4. Технологии оптической записи.....  | 45 |
| 2.4.1. Диски «только для считывания».....   | 46 |
| 2.4.2. Диски для записи.....  | 56 |
| 3. Воспроизведение оптической записи.....   | 62 |
| 3.1. Автофокусировка.....   | 62 |
| 3.1.1. Метод астигматизма пучка.....  | 65 |
| 3.1.2. Метод Фуко.....  | 68 |
| 3.1.3. Метод двух диафрагм.....   | 69 |
| 3.1.4. Метод критического угла.....   | 71 |
| 3.1.5. Конструкция исполнительного механизма автофокуси-<br>ровки.....                          | 75 |
| 3.1.6. Система поиска фокуса.....   | 73 |
| 3.2. Слежение за дорожкой (автотрекинг).....  | 74 |
| 3.2.1. Способ трех лучей.....   | 75 |
| 3.2.2. Дифракционный способ.....  | 76 |
| 3.2.3. Фазовый способ.....  | 78 |
| 3.3. Система управления механизмом перемещения оптическо-<br>го блока.....                      | 82 |
| 3.4. Сервосистема двигателя вращения диска.....   | 83 |
| 3.5. Стабилизация мощности лазерного диода.....   | 87 |
| 4. Выделение цифровых данных из считанного с оптического<br>носителя сигнала .....              | 88 |
| 4.1. Выделение цифрового сигнала и импульсов тактовой син-<br>хронизации .....                  | 88 |
| 4.2. Система цикловой синхронизации.....  | 91 |
| 5. Формат CD-Audio.....   | 94 |
| 5.1. Преобразование информации в формате CD-AUDIO.....  | 95 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.2. Защита от ошибок в формате CD-AUDIO.....                       | 99  |
| 5.2.1. Декодирование кодов C1 и C2.....                             | 107 |
| 5.2.2. Стратегии работы блока коррекции ошибок (декодера CIRC)..... | 110 |
| 5.2.3. Маскирование искаженных отсчетов.....                        | 116 |
| 5.3. Канальное кодирование (модуляция).....                         | 118 |
| 5.4. Служебная информация.....                                      | 126 |
| 5.4.1. Канал P.....   | 128 |
| 5.4.2. Канал Q.....   | 128 |
| 5.5. Проигрыватель компакт-дисков.....                              | 132 |
| 6. Формат CD-ROM и его разновидности.....                           | 136 |
| 6.1. Организация данных в формате CD-ROM.....                       | 136 |
| 6.2. Режимы заполнения данных 00 и 02.....                          | 142 |
| 6.3. CD-ROM/XA.....   | 142 |
| 6.4. Интерактивный диск CD-I.....                                   | 144 |
| 6.5. Гибридные CD-форматы.....                                      | 144 |
| 7. Записываемые форматы CD.....                                     | 145 |
| 7.1. Формат однократной записи CD-R.....                            | 145 |
| 7.2. Реверсивные диски CD-RW.....                                   | 149 |
| 7.3. Магнитооптические диски CD-MO.....                             | 150 |
| 8. ФОРМАТ SACD.....   | 151 |
| 8.1. Конструкция диска SACD.....                                    | 153 |
| 8.2. Формирование потока звуковых данных.....                       | 155 |
| 8.2.1. Принципы работы $\Sigma\Delta$ -модулятора.....              | 155 |
| 8.2.2. Одноразрядные Ц/А-преобразователи.....                       | 161 |
| 8.3. Структура данных на диске SACD.....                            | 164 |
| 8.4. Защита от копирования в SACD.....                              | 168 |
| 9. Формат DVD.....  | 169 |
| 9.1. Конструкция диска DVD.....                                     | 170 |
| 9.2. Структура данных на диске DVD.....                             | 173 |
| 9.2.1. Формирование кадра данных.....                               | 173 |
| 9.2.2. Скремблирование.....   | 176 |
| 9.2.3. Блок коррекции ошибок (ECC).....                             | 178 |
| 9.2.4. Кадр записи.....   | 179 |
| 9.2.5. Канальная модуляция.....                                     | 180 |
| 9.2.6. Физический сектор.....                                       | 196 |
| 9.3. DVD-Video.....   | 198 |
| 9.4. DVD-Audio.....   | 208 |
| 10. Записываемые форматы DVD.....                                   | 211 |
| 10.1. Форматы DVD-R и DVD-RW.....                                   | 211 |
| 10.2. Форматы DVD+R и DVD+RW.....                                   | 214 |
| 10.3. Формат DVD-RAM.....   | 214 |
| 11. Формат BD.....  | 217 |



|  |     |
|--|-----|
| 11.1. Конструкция BD-диска.....  | 219 |
| 11.1.1. Общая структура диска.....   | 219 |
| 11.1.2. Диск BD-ROM.....   | 219 |
| 11.1.3. Записываемые диски BD.....   | 221 |
| 11.1.4. Регистрирующие слои записываемых дисков BD.....                          | 221 |
| 11.2. Некоторые особенности BD-дисков.....                                       | 224 |
| 11.3. Оптические головки.....  | 226 |
| 11.4. Коррекция ошибок в формате BD.....   | 230 |
| 11.5. Канальная модуляция в формате BD.....                                      | 235 |
| 11.6. Формат кодирования адресных данных вобуляцией<br>направляющей дорожки..... | 239 |
| 11.7. Файловая система BD-дисков.....  | 243 |
| 11.8. Структура данных.....  | 248 |
| 11.9. Принципы записи и воспроизведения дисков BD-RE/R....                       | 249 |
| 11.9.1. Диски BD-RE.....   | 249 |
| 11.9.2. Стратегии записи дисков BD-R.....  | 252 |
| 11.10. Изготовление BD-дисков.....   | 256 |
| 11.10.1. Мастеринг BD-дисков.....  | 256 |
| 11.10.2. Тиражирование BD-дисков.....  | 262 |
| 11.11. Коды идентификации диска.....   | 264 |
| 11.11.1. SID-коды.....   | 264 |
| 11.11.2. Код ВСА.....  | 265 |
| 12. Магнитооптическая запись информации.....                                     | 267 |
| 12.1. Физические основы магнитооптической записи.....                            | 268 |
| 12.2. Структура минидиска.....   | 277 |
| 12.3. Компрессия звуковых данных по алгоритму ATRAC.....                         | 280 |
| 12.3.1. Кодер ATRAC.....   | 280 |
| 12.3.2. ATRAC-декодирование.....   | 285 |
| 12.3.3. Версии системы ATRAC.....  | 287 |
| 12.3.4. Алгоритм ATRAC3/MDLP.....  | 288 |
| 12.4. Формат данных.....   | 289 |
| 13. Цифровые звуковые интерфейсы.....  | 293 |
| 13.1. AES3 (AES/EBU).....  | 294 |
| 13.1.1. Формат данных.....   | 295 |
| 13.1.2. Электрические характеристики.....  | 304 |
| 13.2. S/PDIF.....  | 306 |
| 13.2.1. Формат данных.....   | 306 |
| 13.2.2. Соединительные линии интерфейса S/PDIF.....                              | 311 |
| 13.3. AES10 (MADI).....  | 311 |
| 13.3.1. Организация потока данных, передаваемых через ин-<br>терфейс.....        | 312 |
| 13.3.2. Формат субкадра.....   | 313 |
| 13.3.3. Формат передачи данных по каналу.....                                    | 314 |

|   |     |
|---|-----|
| 13.3.4. Частота дискретизации и число передаваемых каналов..... | 316 |
| 13.3.5. Электрические характеристики.....                       | 317 |
| Список литературы.....  | 320 |

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Оптическая запись информации не может похвастаться такой уж долгой и славной историей, как, например, магнитная. Ей всего-то около 40 лет. Магнитная запись опередила ее примерно на столетие. Тем не менее, оптической записи все же есть чем гордиться. Именно оптический компакт-диск формата CD-Audio стал первым цифровым носителем, позволившим донести до массового слушателя высочайшее качество записанных на нем музыкальных программ. Качество это таково, что до сих пор, когда хотят охарактеризовать качество какой-то звуковой аппаратуры или технологии обработки звукового сигнала, говорят, что это звучит как компакт-диск, сравнимо со звучанием компакт-диска! И действительно, качественных характеристик звукового сигнала, записанного на тот самый CD-Audio без всякой компрессии, более чем достаточно для прослушивания в домашних условиях. И даже много, поскольку полностью оценить все его достоинства всегда мешают какие-нибудь ограничивающие факторы: недостаточно качественная звуковоспроизводящая система (особенно акустические системы, которые для такого случая должны быть класса не ниже Hi-End), помещение для прослушивания, не позволяющее получить нужное звучание, расположение громкоговорителей в нем, и т.д. Появившиеся позже носители звуковых программ еще более высокого качества (DVD, SACD, BluRay) массовому потребителю уже не могут дать ничего нового, поскольку в домашних условиях это качество все равно реализовать не удастся – здесь требуется специальное помещение с хорошими акустическими характеристиками, высококачественная звуковоспроизводящая система и оптимальное расположение слушателей в пространстве.

Однако оптические носители уже давно содержат не только звуковые программы. Диски DVD обеспечили возможность домашнего просмотра кинофильмов вещательного качества - как по телевизору! И даже лучше, поскольку здесь просмотр всегда можно прервать, заняться чем-то другим, а потом продолжить, когда захочется. Телевизионную программу прервать не получится – уж если смотришь что-то, то смотри от начала до конца. К тому же на диске DVD нет рекламы, которая так отвлекает и нервирует зрителя!

В XXI веке появился еще более совершенный носитель видеопрограмм – диск формата BluRay (BD). Здесь уже качество видеоматериала может удовлетворить самого взыскательного зрителя – оно соответствует формату HDTV, которое телевизионное вещание в нашей стране обеспечивает крайне редко. К сожалению. Более того, на дисках BD могут быть записаны и 3D-программы, которые так нравятся многим зрителям. Хотя здесь хотелось бы предостеречь энтузиастов трехмерных изображений – они, увы, небезопасны для здоровья. Как психического, так и физического. По крайней мере, те, что доступны для массового потребителя. Современ-

ные технологии не обеспечивают ни требуемого качества таких программ, ни условий для их восприятия. Посмотреть краем глаза, конечно, можно, но делать это часто и подолгу крайне не рекомендуется.

Технологии оптической записи уже были описаны автором в более ранних публикациях: «Форматы цифровой звукозаписи» (изд-во «ЭЛБИ», 1998 г.), «Цифровая звукозапись. Технологии и стандарты» («Наука и техника», 2001 г.), «Формат BluRay» (СПбГУТ, 2010 г.) и т.д. Однако время бежит вперед, технологии развиваются, и пришло время дополнить и уточнить ранее описанное.

Данная книга адресована, прежде всего, специалистам, которые по роду своей деятельности связаны со звуко- и видеозаписью, поскольку именно им приходится иметь дело с различного рода носителями. Многим из них необходимо или хотелось бы ясно представлять, что там происходит «внутри», когда они производят запись или воспроизводят записанное. Кроме того, как показал опыт предыдущих изданий, многим это же самое интересно не только «по долгу службы», а просто потому, что интересно.

В первой главе книги приводится краткая история появления оптической записи, в том числе и описание того, что делалось у нас в стране – с фотографиями. Оказывается, не только Sony и Philips разрабатывали оптические проигрыватели!

Кроме описания физики оптической записи и основных форматов, приводится описание магнитооптических технологий. Потребительский формат магнитооптической записи – MiniDisc уже канул в Лету, вытесненный более совершенными записываемыми форматами, но принципы магнитооптической записи все же живы и могут еще где-то быть нужными, поскольку обладают некоторыми достоинствами, недоступными прочим технологиям записи.

В заключении приводится описание наиболее распространенных цифровых звуковых интерфейсов – двух профессиональных (AES3 и AES10) и одного потребительского - S/PDIF. Понимание того, каким образом организуется взаимодействие цифровой аппаратуры, будет не лишним как профессионалу, так и любителю.

# 1. ИСТОРИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ ИНФОРМАЦИИ

Первые попытки по записи информации на дисковый носитель оптическими методами были сделаны еще в 1961 году в Стэнфордском университете в США. Запись информации здесь осуществлялась фотографическими методами в виде светлых черточек и точек на темном фоне. Воспроизведение такой записи осуществлялось путем просвечивания видеодиска лучом ртутной лампы.

Практическая система записи информации оптическими методами – лазерный видеодиск Laser Vision - была разработана в 1972 году фирмой PHILIPS. Здесь записанный сигнал представлял собой ряд углублений на отражающей поверхности диска, покрытого алюминием. Диск изготавливался из прозрачной пластмассы и считывание его производилось сквозь всю его толщину (около 1 мм). Считывающий луч либо отражался от алюминиевой пленки, либо рассеивался на углублениях, модулируя таким образом отраженный пучок, который и использовался для формирования воспроизведенного сигнала. Система Laser Vision была доведена до промышленного производства и в течение довольно продолжительного времени занимала почетное место на рынке высококачественных видеоносителей.

Аналогичная система была предложена в том же 1972 году фирмой MCA.

В 1973 году французская фирма THOMSON разработала видеодиск, воспроизведение которого осуществлялось не в отраженном, а в проходящем свете. Здесь луч лазера, проходя сквозь диск и расположенную внутри него дорожку, освещал четырехплощадочный фотоприемник, регистрирующий информационный сигнал и сигнал автотрекинга.

Первые цифровые звуковые диски, которые начали появляться с начала 1978 года, были очень похожи на предшествовавшие им видеодиски [1-15].

Среди оптических проигрывателей, производством которых заинтересовались сразу несколько фирм, в том числе - PHILIPS, SONY, HITACHI, MITSUBISHI, SANYO и ряд других - самым похожим на нынешний проигрыватель компакт-дисков был образец фирмы PHILIPS. Диаметр диска для такого проигрывателя составлял 12 см (у всех других – 30 см), время звучания – один час, использовался канальный код EFM и способ воспроизведения с постоянной линейной скоростью.

В июне 1979 года между фирмами PHILIPS и SONY был заключен договор о совместных работах по созданию системы оптической записи звука.

В октябре 1980 года по инициативе Конференции по цифровой звукозаписи была организована выставка, где демонстрировались различные ви-

ды цифровых звуковых проигрывателей, в том числе оптические, механические и емкостные [16, 17].

Стало ясно, что наиболее совершенной из всех оказалась системы с оптическим диском, разработанная совместными усилиями SONY и PHILIPS. Небольшие размеры диска и использование полупроводникового лазера позволяли в будущем создавать малогабаритные аппараты невысокой стоимости. Кроме того, лазерный проигрыватель – единственный из всех, где считывание производится бесконтактным методом. Значит и диск, и считывающий узел при этом не изнашиваются, следовательно, и пластинка будет долговечной. Нельзя не учитывать и психологического воздействия на покупателя красивой, переливающейся всеми цветами радуги, зеркальной поверхности компакт-диска и необычным использованием в бытовой аппаратуре загадочного и непонятного для простого обывателя прибора – лазера. В результате, к маю 1982 года фирмами SONY и PHILIPS был подготовлен проект международного стандарта на систему оптической записи звука «Компакт-Диск». В это же время были завершены работы по созданию необходимых полупроводниковых лазеров и специализированных БИС цифровой обработки сигнала, которые являются основными элементами проигрывателей компакт-дисков [18-22].

К сентябрю того же года контракты на производство проигрывателей CD и самих компакт-дисков подписали уже 44 фирмы (из них только 11 – не японские). В октябре 1982 года стандарт на систему Compact Disc был принят на конференции подкомитета МЭК (Международной Электротехнической Комиссии) и компакт-диск начал свою победную экспансию по рынкам планеты [23].

Работы по созданию системы цифровой лазерной звукозаписи проводились и в нашей стране. В 1975 году в структуре ВНИИРПА им. А.С. Попова с этой целью была сформирована научно-исследовательская лаборатория под руководством Э.И. Вологодина. Основными задачами коллектива были:

- поиск технических решений, позволяющих записывать преобразованную в двоичный код звуковую информацию студийного качества на оптический носитель и в дальнейшем осуществлять ее воспроизведение без потерь вышеупомянутого качества;
- подготовка комплекта документации (в том числе – стандарта) для организации серийного производства лазерных проигрывателей на отечественных предприятиях;
- подготовка рекомендаций для создания технологии тиражирования оптических дисков (термина «компакт-диск» тогда еще не существовало, как и самого компакт-диска).

Поскольку поиск решения этих задач предстояло вести на стыке сразу нескольких наук, то в одном коллективе требовалось собрать специалистов самого разного профиля: химиков, оптиков, математиков, конструкторов-

механиков, разработчиков систем автоматического регулирования, специалистов по кодированию информации, цифровой обработке сигнала и т.д. и т.п. Предстояло решить множество вопросов, которые сейчас показались бы простыми и всем известными, то в то время ведь еще не было никаких CD, DVD, BD, все еще нужно было придумывать, изобретать, ошибаться, искать другие подходы, проверять, переделывать и радоваться, когда что-то получалось.

Прежде всего, требовалось найти оптимальный химический состав фоторезиста, в наибольшей степени согласующегося со свойствами лазерного излучения, а также состав проявляющего раствора, позволяющего получить питы нужной формы с четкими границами. Для этого был оборудован участок вакуумного напыления и химическая лаборатория для обработки экспонированных дисков-оригиналов.

Предстояло разработать оптическую систему для формирования лазерного пучка и его формирования в пятно нужных размеров, а также способ автоматического поддержания в процессе записи требуемого для этих целей расстояния между объективом и поверхностью носителя. Кроме того, требовалось решить проблему радиального перемещения записывающего объектива ровно на один шаг за один оборот диска. Эксперименты по записи дисков проводились в специальном помещении, где поддерживалась идеальная чистота и которое было оборудовано системой очистки воздуха до уровня не более 100 пылинок на 1 м<sup>3</sup> объема (так называемая «чистая комната»).

Предстояло решить целый ряд непростых вопросов, связанных с формированием потока информации перед записью его на носитель – как лучше объединять информацию в блоки, какой помехоустойчивый код и какой способ перемежения лучше использовать для защиты ее от ошибок, каким канальным кодом модулировать цифровой поток, как обеспечить надежную синхронизацию информации по блокам, по символам и по битам.

Во время работы над проигрывателем много усилий было потрачено на поиск оптимальных методов автофокусировки, автотрекинга и управления двигателем вращения диска. Сложность состояла в том, что полупроводниковых лазеров тогда еще не было. Поэтому для считывания пришлось использовать имевшийся в наличии газовый лазер ЛГ-75. Это довольно тяжелая трубка длиной сантиметров 20. В этих условиях конструкция сервосистем проигрывателя в корне отличалась от той, что стала традиционной после появления полупроводниковых лазерных диодов. Лазер был закреплен неподвижно, а диск располагался на подвижной каретке. Луч лазера направлялся к поверхности диска через сложную систему оптических элементов – линз, призм и зеркал. Ошибка слежения за дорожкой отрабатывалась путем перемещения каретки с диском. Сейчас, как известно, все наоборот – диск укреплен на неподвижной панели, а перемещается оптическая головка с лазерным диодом.

Следует заметить, что такое техническое решение (неподвижный лазер и подвижная каретка с диском) спустя 15 лет было заново «изобретено» и широко разрекламировано в своих новейших моделях проигрывателей фирмой SONY как «Fixed Pickup» механизм.

Из-за того, что лабораторные образцы всегда делаются на дискретных элементах (специализированные микросхемы появляются только после того как полностью закончены исследования и отработана схемотехника), они получаются довольно громоздкими. Первый образец отечественного лазерного проигрывателя – «ЛУЧ-001», состоял из двух блоков, расположенных один над другим (рис. 1.1). Верхний блок содержал механизм привода диска, считывающий узел и все контролирующие их работу сервосистемы. Нижний блок – это декодер вместе с системами синхронизации. Он тоже выполнен на обычных серийных микросхемах.

Рис. 1.1. Первая модель отечественного цифрового лазерного проигрывателя «Луч-001» - 1979 г.

Вторая модель проигрывателя – «ЛУЧ-002» (рис. 1.2) демонстрировалась на ВДНХ и была объектом внимания передачи Ленинградского телевидения, специально посвященной теме работы лаборатории. Миллионы телезрителей впервые увидели лазерный проигрыватель и оптический диск (за два года до появления на мировом рынке компакт-диска), а также услышали как этот диск может звучать. Специально для демонстрации на



него записали прекрасную лирическую мелодию вальса Е. Доги из кинофильма «Мой ласковый и нежный зверь» [24-26].

Рис. 1.2. Опытные образцы проигрывателя Луч-002. 1980 г.

Рис. 1.3. Научные сотрудники В.И. Ефимов и Л.Шпигель работают с образцом проигрывателя «Луч-001»



Рис. 1.4. Научные сотрудники В. Коченов и Л.Штутман занимаются настройкой сервосистем лазерного проигрывателя «Луч-001»



Рис. 1.5. М.н.с. Л. Штутман с проигрывателем «Луч-001»

Рис. 1.6. Научные сотрудники В.И. Ефимов и А. Коган с аппаратурой цифрового кодирования звука

Рис. 1.7. Установка записи оптических дисков-оригиналов

К концу 1994 года в технической прессе стали появляться сообщения о том, что известный тандем SONY/PHILIPS, подаривший миру технологию CD, готов представить на суд потребителю еще более совершенный носитель, идеально подходящий для записи информации практически любого характера. Система на основе нового носителя была разработана с учетом самых последних достижений в области прикладной химии, оптики, микроэлектроники, информатики и способна в недалеком будущем прийти на смену всему тому, что было создано на базе CD.

В процессе работы над новым носителем несколько раз менялось его название, отражая основные намерения разработчиков на том или ином этапе:

- MMCD (MultiMediaCD);
- HD-DVD (High Density Digital Video Disc);
- HD-CD (High Density CD).

С целью скорейшего завоевания рынка проигрыватели новой системы планировалось делать совместимыми со всеми существовавшими тогда носителями информации в формате CD. Правда, совместимость могла быть только односторонней – проигрыватели CD и дисководы CD-ROM не смогли бы воспроизводить диски MMCD.

Объяснялось это наличием множества технических новшеств, справиться с которыми CD-устройства были бы не в состоянии. Прежде всего, это двухслойная структура диска MMCD. Кроме обычного отражающего информационного слоя, толщина которого равнялась 0,05 мкм (у CD – 0,1 мкм), над ним располагался еще один информационный слой (0,05 мкм) – полупрозрачный (или полупрозрачающий – как кому больше нравится). Расстояние между этими двумя слоями всего 0,04 мкм. В остальном конструкция диска похожа на CD – подложки из поликарбоната (1,2 мм), защитный лаковый слой со стороны информационного – 10 мкм. Поверх него – этикетка (рис. 1.8).

Но ёмкость каждого информационного слоя должна была быть 3,7 Гбайт – почти в 6 раз больше, чем у CD. А всего на двухслойном диске планировалось разместить 7,4 Гбайт информации.

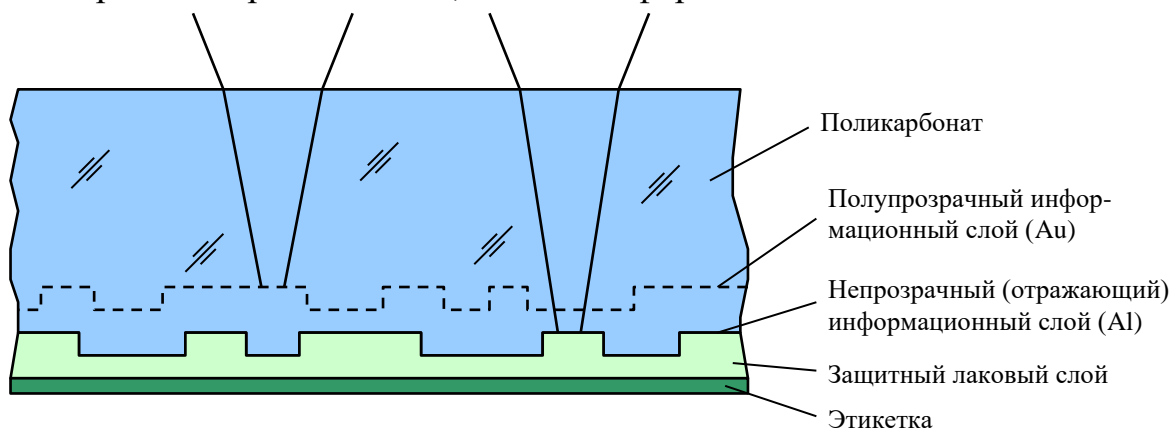


Рис. 1.8. Конструкция диска MMCD

Такая большая ёмкость диска объясняется использованием лазера с более короткой, чем у CD, длиной волны излучения – 0,635 мкм (красный свет), и оптической системы с числовой апертурой 0,52. У CD те же параметры – 0,78 мкм и 0,45 соответственно. Такие усовершенствования позволяют получить световое пятно гораздо меньших размеров, чем у CD, что, в свою очередь, обеспечивает возможность уменьшения более чем в два раза геометрических размеров пит и расстояния между дорожками. При использовании компрессии по стандарту MPEG2 на таком диске можно разместить 135 минут видеозаписи вещательного качества.

Вскоре, однако, выяснилось, что не только SONY и PHILIPS озабочены созданием нового высокоплотного носителя. Группа компаний во главе с японской фирмой TOSHIBA (MATSUSHITA, HITACHI, PIONEER, THOMSON, MCA, TIME WARNER и MGM (UA)) предложила свой стандарт на дисковый носитель, подобный диску MMCD. Даже названия у них были чем-то схожи: SD-DVD (Super Density Digital Video Disc) перекликается с HD-DVD. Другое название – SDD (Super Density Disc) похоже на HD-CD. Совпадают и основные параметры обоих дисков. SD-DVD тоже имеет двухслойную структуру, однако, она несколько иная, чем у MMCD, ибо образуется за счет того, что склеиваются вместе две половинки диска, каждая из которых имеет толщину 0,6 мм (рис. 1.9). Поэтому считывание такого диска должно производиться с обеих сторон. Глубина расположения информационного слоя у SD-DVD получается при этом вдвое меньшей. Зато информационная ёмкость каждой стороны оказывается большей – 5 Гбайт против 3,7 Гбайт у MMCD. Всего на обеих сторонах помещается 10 Гбайт – почти в 15 раз больше, чем у обычного CD. Для записи видеофильмов здесь также предполагалось использование компрессии по стандарту MPEG2 так, чтобы получалось 135 минут видеоизображения вещательного качества. Технические параметры стандарта SD-DVD приведены ниже.

|  |                   |
|--|-------------------|
| - Диаметр диска, мм.....   | 120               |
| - Толщина диска (склеенного из двух половинок), мм.....                            | 1,2               |
| - Информационная ёмкость, Гбайт:   |                   |
| на одной стороне .....   | 5                 |
| на двух сторонах .....   | 0,725             |
| - Длина волны излучения лазера, нм.....  | 650               |
| - Числовая апертура объектива.....   | 0,6               |
| - Коррекция ошибок.....  | код Рида-Соломона |
| - Время записи видеоизображения, мин:  |                   |
| на одной стороне .....   | 135               |
| на двух сторонах.....  | 270               |
| - Средняя скорость потока данных<br>(звук и изображение одновременно), Мбит/с..... | 4,94              |

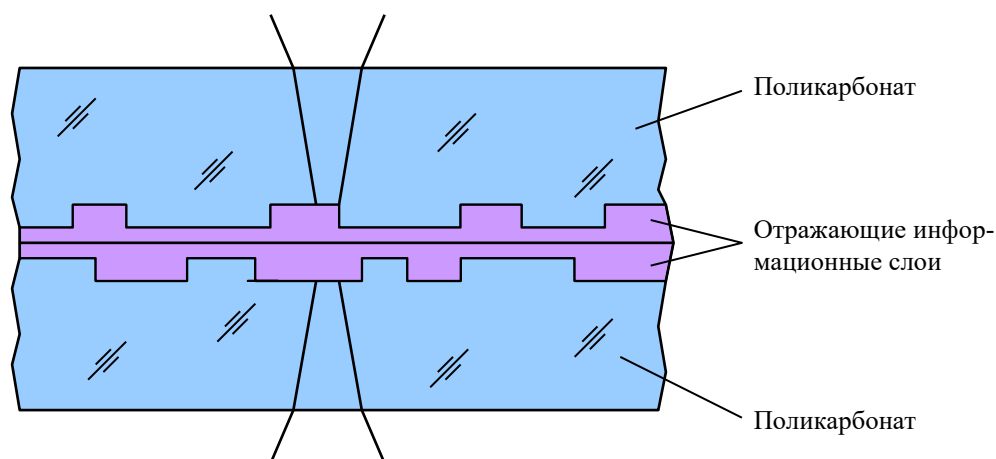


Рис. 1.9. Конструкция диска SD-DVD

Оказалось, что такое сходство стандартов, разработанных разными группами фирм, вовсе не случайно. Обе группы при разработке учли рекомендации, ранее сформулированные для них консорциумом крупнейших представителей индустрии развлечений Hollywood Digital Video Disc Advisory Group, включающего в себя таких гигантов, как Columbia Pictures, MGM, Disney, MGA/Universal, Paramount, Viacom и Warner Brothers. Эта группа подготовила целый ряд предложений, направленных на кардинальное повышение качества видеопродукции и защите авторских прав на неё.

С этой целью летом 1994 года по инициативе консорциума было организовано и проведено широкое обсуждение направлений создания нового носителя совместно с фирмами-изготовителями аппаратуры для цифровой видеозаписи.

Как подчеркивалось в выдвинутых предложениях, неизменными свойствами нового носителя видеозаписи должны быть следующие свойства:

- ◆ возможность записи на один диск полнометражного художественного фильма;
- ◆ качество изображения должно быть лучше, чем у любого существующего видеоаппарата, включая проигрыватель лазерных видеодисков;
- ◆ Новые аппараты должны быть совместимыми со всеми существующими CD-устройствами;
- ◆ Должна быть обеспечена возможность записи звукового сопровождения не менее чем на трех-пяти языках;
- ◆ запись должна быть защищена от пиратского копирования;
- ◆ Должна быть предусмотрена возможность изменения формата записи, т.к. в будущем предполагается расширение рынка широкоэкранных фильмов;
- ◆ должна быть предусмотрена возможность записи на одном диске нескольких версий одного и того же материала с возможностью введения пароля.

После долгого и всестороннего обсуждения двух предложенных вариантов стандарта на систему высокоплотной записи к концу 1995 – началу 1996 года заинтересованные стороны наконец-таки пришли к единому мнению относительно технических параметров нового носителя. Требования эти были сформулированы вначале только для видеозаписи, поскольку основной задачей, поставленной перед разработчиками, было все-таки создание именно видеоносителя. Даже его название – «DVD» вначале означало именно «Digital Video Disc» (вопреки бытующему сейчас мнению) – как и у прототипов (HD-DVD и SD-DVD). Но, поскольку было ясно, что новый носитель годится и для хранения любой другой информации, то название «DVD» надо было поменять на какое-нибудь другое, отражающее его универсальность. Однако название всем нравилось, и менять его никто не хотел. Поэтому решили подыскать для буквы «V» иное, более подходящее значение. Перебрав множество вариантов из словаря, остановились на слове «versatile», которое означает «многопрофильный, разносторонний, легко изменяющийся». Надо заметить - слово не очень удачное в смысле его произношения – и не только для русских, но и для французов, итальянцев, испанцев и немцев – не говоря уж о японцах, китайцах, корейцах и других представителей восточных государств. Но ничего более подходящего на букву «V» найти не удалось. Так и осталось за аббревиатурой «DVD» словосочетание «Digital Versatile Disc» [25, 27-30].

Одновременно с созданием DVD, который изначально позиционировался как видеоноситель, начались работы и над созданием нового, более совершенного в сравнении с CD, носителя звуковых программ. Инициаторами этих работ стали все те же компании Philips и Sony. Для обсуждения аспектов создания такого носителя был сформирован специальный международный подготовительный комитет ISC, куда вошли Американская ассоциация звукозаписывающих компаний *RIAA (Recording Industry Association of America)*, Японская ассоциация звукозаписывающих компаний *RIAJ (Recording Industry Association of Japan)* и международная федерация производителей фонограмм и видеogramм *IFPI (International Federation of the Phonographic Industry)*. Уже к маю 1996 года подготовительный комитет выпустил перечень рекомендаций, касающихся разработки оптического носителя нового формата. Ключевыми положениями этих рекомендаций являются следующие:

- высокое качество звучания и возможность записи многоканальных программ;
- возможность переноса на него архивных записей и записей с мастер-лент без потери качества звучания;
- расширенные функциональные возможности диска, включая запись текстовой информации к музыкальным дорожкам;
- герметичное исполнение (возможность использования без картриджа или футляра);

- предпочтительно одностороннее исполнение диска;
- предпочтительный диаметр 12 см – как у CD;
- износостойчивость – предпочтительно большая, чем у CD;
- совместимость с CD;
- возможность хранения звука, видео и компьютерных данных;
- защита от несанкционированного копирования (anti-piracy measures);
- защита авторских прав (copyright protection);
- наличие активной системы управления копированием (Active Copy Management System, ACMS).

Новый формат получил название SuperAudioCD (SACD) [31].

Первый проигрыватель SACD, удовлетворяющий всем требованиям, сформулированным подготовительным комитетом, в конце 1999 года выпустила фирма Sony (SCD1). Новый формат превосходил обычный компакт-диск (CD), прежде всего, по динамическому диапазону записей (>120 дБ) и диапазону воспроизводимых частот (до 100 кГц) [32]. Достигалось это за счет использования вместо ИКМ-представления звука одностороннего потока бит, сформированного по новой технологии DSD, разработанной фирмой Sony. Эта технология представления звукового сигнала, основанная на принципах сигма-дельта модуляции с использованием очень высокой частоты дискретизации (порядка 2,8 МГц), в наибольшей степени приближала цифровое представление звукового сигнала к его аналоговой форме, и, кроме того, обеспечивала очень простую и дешевую реализацию всей системы преобразования и обработки сигнала [33]. Для ускорения процесса освоения рынка носителей звуковых программ проигрыватели SACD были способны воспроизводить также и обычные CD-диски.

Формат SACD в период своего появления рассматривался как конкурент звуковой версии формата DVD – диска DVD-Audio. Однако в дальнейшем каждый из них нашел своих сторонников (равно как и противников) и существовал каждый в своей экологической нише. Качество звучания обоих носителей одинаково высокое и никаких преимуществ никто из них здесь не имеет.

В начале XXI века началось массовое внедрение цифрового телевидения высокой четкости HDTV (High Definition TV), обусловленное появлением и коммерциализацией плазменных и жидкокристаллических дисплеев. На смену традиционным форматам SDTV (Standard Definition TV) с разрешениями у NTSC (640x480) и у PAL (768x576) приходят широкоформатные HD-форматы 720p (1280x720) и 1080i/p (1920x1080).

В то время уже существовало три стандарта HDTV:

- **720p:** 1280 × 720, прогрессивная развертка, отношение сторон кадра 16:9, частота кадров — 24, 25, 30, 50 или 60 в секунду;
- **1080i:** 1920 × 1080, чересстрочная развертка, отношение сторон кадра 16:9, частота полей — 50 или 60 в секунду;



- **1080p:**  $1920 \times 1080$ , прогрессивная развертка, отношение сторон кадра 6:9, частота кадров — 24, 25 или 30 в секунду.

В связи с этим возникла потребность в новом носителе, способном хранить большие объемы информации и обеспечивать высокие скорости ее считывания. Возможностей существовавшего к тому времени DVD-Video уже было недостаточно. Поэтому компании-производители бытовой электроники, опираясь на достигнутый к тому времени научно-технический и технологический задел, приступили к работам по созданию носителя нового поколения, который отвечал бы современным требованиям как по объему записываемой информации, так и по скорости ее считывания. Одним из таких носителей стал диск, считываемый с помощью синего лазера, получивший впоследствии название «BluRay» или BD-диск. На основе аппарата с таким диском и телевизионного приемника формата HDTV можно формировать домашние развлекательные комплексы совершенно иного качества в сравнении с существующими комплексами стандартного качества в формате SDTV (рис. 1.10).

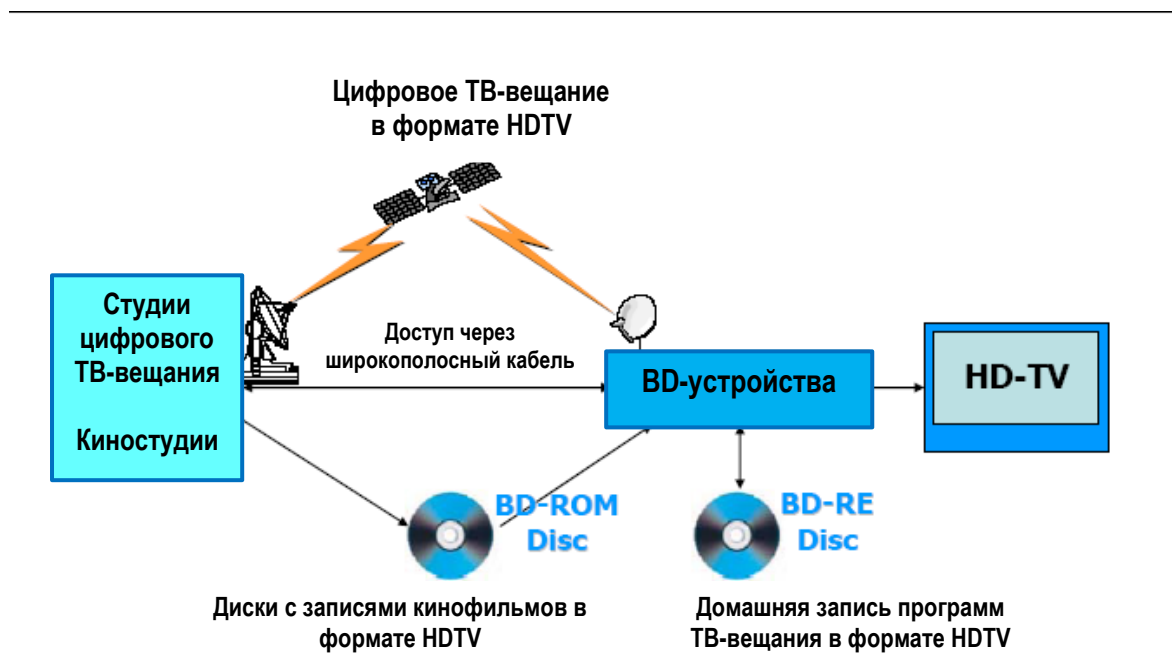


Рис. 1.10. Структурная схема домашнего развлекательного комплекса, построенного на базе BD-устройства и телевизионного приемника формата HDTV, который должен был в будущем заменить существовавшие тогда комплексы в формате SDTV: видеомаягнитофон VHS, DVD-рекордер, телевизионный приемник стандартного разрешения

Первое сообщение о том, что тандем SONY/PHILIPS подготовил новый формат оптической записи, предназначенный для замены DVD, появилось в начале 2002 года. Поскольку для считывания информации с диска предполагалось использовать синий (точнее сине-фиолетовый) лазер с длиной волны излучения 405 нм, то название формата, разумеется, произошло

от словосочетания Blue ray (Синий луч), однако буква «e» сознательно исключена из слова «Blue», для того чтобы можно было зарегистрировать словосочетание «Blu-ray» как торговую марку. Без такого искажения это было бы невозможным, поскольку словосочетание «blue ray» является широко используемым в обиходе и как торговую марку его использовать нельзя [34].

После этого к работе над форматом BD подключилась группа компаний-производителей потребительской электроники (Matsushita (Panasonic), Samsung, LG, Thomson, Hitachi, Sharp и Pioneer), которые в том же 2002 году объединились в Ассоциацию Blu-ray дисков (Blu-ray Disc Association). В дальнейшем к ним присоединилась Apple Computers и группа кинокомпаний: Walt Disney, 20th Century Fox и Universal Music Group [35].

Первые образцы проигрывателя и диски формата Blu-ray были представлены на международной выставке потребительской электроники Consumer Electronics Show (CES), которая прошла в январе 2006 года. На рынке все это появилось весной того же года.

Одновременно с началом работ по созданию технологии BD-диска, группа компаний во главе с фирмой Toshiba, также начала работы по созданию нового высокоплотного носителя, и в том же 2002 году предложила свое видение преемника существующего DVD – Advanced Optical Disc (AOD), впоследствии – 19 ноября 2003 года, на очередном заседании DVD Forum – переименованный в **HD DVD (High-Definition DVD)**. Формат HD-DVD поддержали фирмы NEC, Microsoft, Intel, TEAC, Sanyo и Acer, а также голливудские кинокомпании Paramount Pictures и Universal Studios. Основной замысел разработчиков состоял в том, чтобы попытаться создать такую технологию нового носителя, которая при существенном повышении информационной емкости тем не менее не слишком бы отличалась от технологии его предшественника – DVD. Тогда себестоимость нового продукта не будет чрезмерно высокой и легче будет завоевать рынок. И это им в общих чертах удалось.

Диск HD-DVD действительно был очень похож на DVD – те же размеры, та же конструкция, состоящая из двух половинок толщиной 0,6 мм, та же конструкция оптической системы, даже числовая апертура объектива почти такая же – 0,65 против 0,6 у DVD. Однако лазер здесь использовался уже сине-фиолетовый с длиной волны излучения 405 нм – как и у BluRay. Поэтому информационная емкость одностороннего однослойного HD-DVD – 15 Гб (двухстороннего, или двухслойного, соответственно 30 Гб). Максимальная скорость цифрового потока данных при считывании тоже сопоставима с BluRay – 36,5 Мбит/с.

В HD-DVD использовались те же самые структура данных (сектор, блоки ECC), алгоритмы коррекции ошибок и модуляция, что и у стандартных DVD. Единственное отличие заключалось в том, что блок ECC HD DVD соответствовал по размеру двум блокам ECC DVD, обеспечивая тем

самым более мощную корректирующую способность всей системы защиты от ошибок. Все HD DVD проигрыватели должны были быть обратно совместимы с DVD и CD.

Диски HD-DVD, так же как и обычные диски DVD, планировалось выпускать четырех типов – однослойные односторонние (SSSL), односторонние двухслойные (SSDL), двухсторонние однослойные (DSSL) и двухсторонние двухслойные (DSDL). Кроме того, могут быть 8-сантиметровые варианты всех четырех типов. Емкость их была следующая (табл. 1.1).

Таблица 1.1

**Емкость дисков HD-DVD**

| Физический размер   | Объем одного слоя | Объем двух слоев |
|---------------------|-------------------|------------------|
| 12 см, одна сторона | 15 Гб             | 30 Гб            |
| 12 см, две стороны  | 30 Гб             | 60 Гб            |
| 8 см, одна сторона  | 4.7 Гб            | 9.4 Гб           |
| 8 см, две стороны   | 9.4 Гб            | 18.8 Гб          |

Кроме того, существовало два типа гибридных дисков, содержащих стандартную DVD-Video часть для совместимости со старыми DVD плеерами. *Combo disc* это двухсторонний диск, где на одной стороне DVD, на другой HD DVD. *Twin disc* это односторонний диск, содержащий до трех слоев, где до двух слоев могут быть DVD или HD DVD.

Существовали диски с возможностью однократной записи HD-DVD-R, а также перезаписываемые – HD-DVD-RW, допускавшие более 1000 циклов перезаписи и магнитооптические HD-DVD-RAM, допускавшие до 100000 циклов перезаписи. Кроме того, емкость у дисков HD-DVD была несколько больше, чем у HD-DVD-RW – 20 Гб на один слой, благодаря меньшей длине пита, уменьшенному шагу дорожек (0,34 мкм) и использованию зональной постоянной линейной скорости (ZCLV).

### **Технические характеристики диска HD-DVD**

- Емкость – 15 Гб (один слой)
- Длина волны излучения лазера – 405 нм
- Числовая апертура объектива (NA) – 0,65
- Диаметр светового пятна на уровне 0,5 – 0,38 мкм
- Глубина фокуса - ±0,48 мкм
- Максимальная скорость потока данных – 36,5 Мбит/с
- Толщина диска – 1,2 мм (2x0,6 мм)
- Шаг дорожки записи – 0,4 нм
- Минимальная длина пита – 0,204 нм
- Плотность записи – 16,3 Мбит на мм<sup>2</sup>

- Формат записи изображения – MPEG2, SMPTE VC-1\*, MPEG4 AVC (H.264)
- Формат записи звука – LPCM, Dolby Digital AC3, DTS, Dolby Digital Plus, Dolby True HD, DTS-HD, MPEG1 Layer 2 и пр.
- Формат комбинированного сигнала – MPEG2, MPEG4
- Система защиты информации AACS (Advanced Access Content System)

\*Основан на платформе Microsoft Windows Media 9

Однако формат HD-DVD несколько запоздал со своим появлением и по этой причине не смог выдержать конкуренции с все-таки более прогрессивным форматом BluRay. В результате формат HD-DVD постепенно терял сторонников среди поддерживающих его фирм. И наконец, в феврале 2008 года объявила о свертывании производства и вступлении в Ассоциацию BluRay дисков сама Toshiba – основной автор этого проекта.

В 1992 году на потребительских рынках Японии, Америки и Европы появился новый вид цифровой аудиоаппаратуры – проигрыватель минидисков (MD), разработчиком которой была фирма Sony, хотя выпускались минидисковые аппараты очень многими компаниями (рис. 1.11).

Размеры нового носителя вполне соответствовали его названию – диск был действительно миниатюрным, всего 64 мм в диаметре (рис. 1.12). Но, несмотря на скромные размеры, длительность записанной на нем программы достигала 74 минут – так же, как и у компакт-диска. И даже качество записи соответствовало формату CD – те же 16 разрядов квантования при той же частоте дискретизации 44,1 кГц. Все основные этапы преобразования звукового сигнала в системе «Минидиск» тоже соответствовали формату CD [36,37]. Однако, в отличие от компакт-диска, на минидиск, как правило, можно записывать, причем как аналоговый сигнал, так и цифровой. Последнее означает, что фонограмма с компакт-диска или DAT-кассеты может быть скопирована на новом аппарате практически без потери качества.



Рис. 1.11. Проигрыватель минидисков MD-028 фирмы Tascam

Казалось бы, этот факт должен бы вызвать бурный протест со стороны звукозаписывающих компаний, как это было в случае с магнитофонами формата R-DAT. Но не вызвал. Дело в том, что на минидиск производится запись не точной копии материала, а его версии, полученной путем сжатия исходной информации в 5-6 раз по стандарту ATRAC (Adaptive Transform Acoustic Coding). Именно применением компрессии в основном и объясняется возможность использования столь миниатюрного носителя для записи столь продолжительных программ.



Рис. 1.12. Кассета с минидиском и логотип формата MiniDisc

Сжатие информации по методу ATRAC основано на устранении так называемой психофизической избыточности звукового сигнала, то есть той его части, которую человеческое ухо все равно не воспринимает. Те же принципы лежат в основе сжатия по стандартам MPEG1 и MPEG2, особенно с высоким уровнем компрессии (Layer 3). Удаленная при сжатии избыточность во время воспроизведения не восстанавливается, поэтому записанные на минидиск программы уже не могут считаться точными копиями, а, следовательно, никакого нарушения авторских прав при копировании не происходит.

Несмотря на широкомасштабную рекламу, минидиск широкого распространения в мире так и не получил, пользуясь ограниченным успехом - в основном из-за неоднозначной маркетинговой политики корпорации Sony, хотя пользовался большой популярностью в Японии и Европе.

С появлением записываемых форматов DVD, в том числе и его магнитооптической версии DVD-MO, необходимость в минидисковых аппаратах отпала – емкость новых записываемых носителей была во много раз больше. Поэтому 1 февраля 2013 года компания Sony официально заявила о конце стандарта MiniDisc.

## 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ ИНФОРМАЦИИ

Оптическая запись информации – это запись информации на носитель с помощью оптического (светового) излучения. Однако оптическое излучение при этом используется не какое-нибудь, а удовлетворяющее целому ряду требований. А именно – оно должно быть монохроматическим, когерентным и однонаправленным.

Прибором, который способен формировать такое излучение, является лазер. Поскольку аппаратные средства для оптической записи, и в особенности считывания, должны быть малогабаритными, то лазеры в них используются, в основном, полупроводниковые. За исключением случая записи мастер-дисков в условиях массового производства оптических дисков только для считывания – CD-ROM, DVD-ROM или BD-ROM. Здесь миниатюризации аппаратуры записи не требуется, поэтому чаще всего используются газовые лазеры, которые позволяют получить более высокое качество записи.

Однако рассмотрим все по порядку.

### 2.1. ОПТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО СВОЙСТВА

Оптическое излучение – это электромагнитные колебания в диапазоне видимого света, т.е. излучение с длинами волн в диапазоне  $380 \text{ нм} < \lambda < 780 \text{ нм}$ . Излучение в этом диапазоне длин волн воспринимается человеческим зрением. Весь диапазон видимого света исторически принято делить на семь поддиапазонов, отождествляемых с определенными *спектральными цветами*:

- **Красный**: 625...780 нм;
- **Оранжевый**: 590...625 нм;
- **Желтый**: 565...590 нм;
- **Зеленый**: 500...565 нм;
- **Голубой**: 485...500 нм;
- **Синий**: 440...485 нм;
- **Фиолетовый**: 380...440 нм.

Следует, однако, понимать, что такое деление весьма условно. Идея деления света на семь цветов принадлежит Исааку Ньютону, который одним из первых занялся исследованиями спектра видимого излучения, результаты которых были изложены им в классической монографии «Оптика» (1704). Ньютон поскольку Ньютон искренне считал, что между оттенками цвета, нотами в музыке и днями недели существует связь, поэтому все многообразие цветов свел к семи первичным цветам. Которые, кстати, изначально были несколько другими - красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, индиго и фиолетовый. Однако человеческий глаз плохо раз-

личает оттенки синего цвета и цвет индиго многие путают с голубым или фиолетовым. Поэтому впоследствии в некоторых странах, в том числе в России, индиго был заменен на синий, хотя в западной классификации цветов он присутствует до сих пор. Как бы там ни было, а ньютоновский способ деления спектра на семь цветов прижился и благополучно используется до сих пор.

Свет – это электромагнитная волна, которая представляет собой периодическое изменение в пространстве и во времени электрического и магнитного полей. Любая электромагнитная волна является *поперечной*, то есть направление колебаний характеризующих ее векторов напряженности электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей перпендикулярно направлению распространения волны. Кроме того, колебания векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  происходят строго синхронно и во взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 2.1).

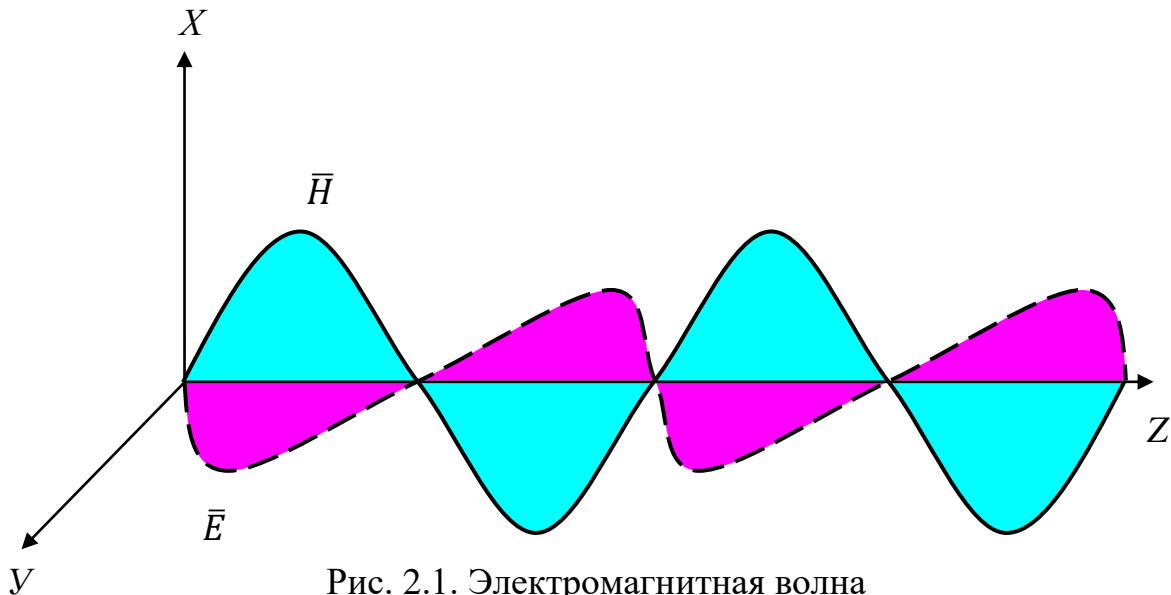


Рис. 2.1. Электромагнитная волна

Таким образом, здесь нужно обратить внимание на два важных обстоятельства, которые пригодятся в дальнейших рассуждениях о природе света. Во-первых, электромагнитная волна является поперечной. Во-вторых, существует однозначная пространственная связь между векторами  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  – положение одного из них полностью определяет положение другого. Поэтому условно принято рассматривать только электрический вектор  $\vec{E}$ , что имеет и определенный физический смысл, так как взаимодействие излучения с веществом определяется, в основном, электрическим, а не магнитным полем [38-45].

Пространственное соотношение между направлением распространения поперечной электромагнитной волны и направлением колебаний ее электрического вектора называется *поляризацией*. По отношению к световым волнам применяется термин «*поляризация света*».

Если выбрать произвольно некоторую систему координат  $XYZ$ , то поперечное электрическое поле волны, распространяющейся вдоль оси  $Z$ , всегда можно разложить на две независимые составляющие  $\vec{E}_x$  и  $\vec{E}_y$ , параллельные осям  $X$  и  $Y$ . Амплитуды и фазы этих составляющих в общем случае будут различны. **Состояние поляризации** гармонической бегущей волны определяется соотношением амплитуд и фаз независимых составляющих  $\vec{E}_x$  и  $\vec{E}_y$ .

Взаимодействие электромагнитной волны с веществом зависит от ее состояния поляризации. Например, если мы найдем вещество, в котором заряженные частицы могут свободно перемещаться в направлении оси  $X$  и неподвижны в направлении оси  $Y$ , то в таком веществе компонента  $\vec{E}_x$  падающей волны будет совершать работу над заряженной частицей, а компонента  $\vec{E}_y$  работу не совершит. Энергия электромагнитного излучения, связанная с  $\vec{E}_x$ , уменьшится (часть ее превратится в кинетическую энергию заряженных частиц и, в конечном счете, из-за столкновений между частицами – в тепло), в то время как амплитуда компоненты  $\vec{E}_y$  от прохождения волны через вещество не изменится.

Существуют вещества, которые могут менять разность фаз компонент  $\vec{E}_x$  и  $\vec{E}_y$  (но не вызывают заметного затухания этих компонент). В результате таких асимметричных (относительно компонент  $\vec{E}_x$  и  $\vec{E}_y$ ) взаимодействий состояние поляризации электромагнитного поля изменяется. Этот факт имеет много важных последствий. Зная, как вещество взаимодействует с излучением, мы можем определить состояние поляризации излучения, и наоборот, наблюдая, как вещество меняет состояние поляризации, мы получаем возможность судить о его свойствах.

В идеально монохроматической световой волне электрическое поле колеблется с определенной частотой, но  $X$ - и  $Y$ -компоненты поля могут колебаться хотя и с одной и той же частотой, но независимо друг от друга. Результат сложения таких колебаний зависит от фаз колебаний компонент  $X$  и  $Y$ . Если сложить колебание в направлении  $X$  и колебание с той же фазой в направлении  $Y$ , то получим в плоскости  $XOY$  колебание в новом направлении.

Проиллюстрируем это следующим примером. Пусть к потолку на длинном шнуре подвешен шарик. Этот шарик может свободно колебаться в горизонтальной плоскости, и колебания эти будут носить синусоидальный характер. Представим себе мысленно оси  $X$  и  $Y$  в горизонтальной плоскости колебаний шарика с началом координат в точке покоя шарика. Выбирая соответствующее начальное смещение и начальную скорость шарика, можно заставить его колебаться по оси  $X$ , по оси  $Y$  или по любому другому направлению в плоскости  $XOY$  с одной и той же частотой, равной частоте колебаний маятника. Эти колебания шарика аналогичны колебаниям электрического вектора, приведенным на рис. 2.2. В каждом случае колебания в направлениях  $X$  и  $Y$  достигают максимума одновременно и, следовательно,



оба колебания находятся в фазе. Применительно к вектору электрического поля  $\vec{E}$  такой случай показан на рис. 2.3, а.

Если колебания электрического вектора  $\vec{E}$  световой волны фиксированы строго в одном направлении, то свет называют **линейно поляризованным**. Он может быть вертикально линейно поляризован, горизонтально линейно поляризован или линейно поляризован по любому другому направлению [46].

Но можно догадаться, что самый общий тип движения шарика – движение по эллипсу – получится тогда, когда колебания в направлениях  $X$  и  $Y$  будут происходить с разными фазами. Этот случай для электрического вектора  $\vec{E}$  показан на рис. 2.3, б.

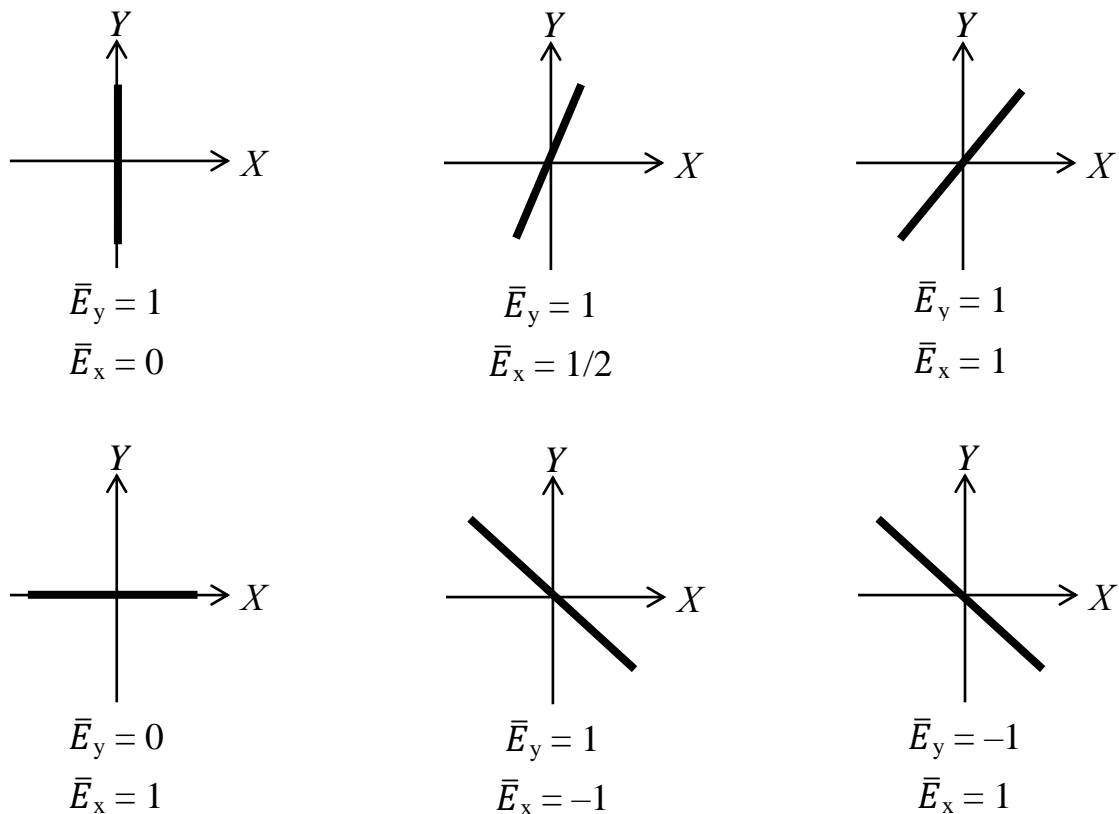


Рис. 2.2. Сложение колебаний в направлениях  $X$  и  $Y$ , когда разность фаз между ними равна нулю

На рис. 2.4 показана зависимость характера поляризации электрического вектора от разности фаз составляющих  $E_x$  и  $E_y$ .

Линейная поляризация – свойство монохроматической волны, то есть волны, длина, период и начальная фаза которой не изменяются со временем. Однако линейная поляризация монохроматической волны наблюдается не только тогда, когда разность фаз  $\varphi$  между составляющими  $X$  и  $Y$  сум-

марного вектора равна нулю (рис. 2.3,а). Аналогичная картина будет иметь место при разности фаз равной  $n\pi$ , где  $n$  – целое число (рис. 2.4). Во всех других случаях конец вектора электрического поля по мере распространения волны вдоль оси  $Z$  будет описывать поверхность эллиптического цилиндра (рис. 2.3,б). Такой случай называется *эллиптической поляризацией*.

Рис. 2.3. Разложение электрического вектора  $\vec{E}$  световой волны при  $\varphi = 0$  (а) и  $\varphi \neq 0$  (б)

Если же разность фаз при одинаковых амплитудах составит  $\pi/2$  или  $(2n-1)\pi/2$ , где  $n$  – целое число, то эллиптический цилиндр станет круговым, а поляризация – *круговой поляризацией* (рис. 2.4). Различают правую и левую поляризацию.

Поляризация называется *правой*, если наблюдателю, смотрящему навстречу световому лучу, кажется, что конец электрического вектора вращается по часовой стрелке, и *левой* – если в противоположном направлении. Такое определение левой и правой поляризаций согласуется с подобными определениями для всех других частиц в современной физике, для которых можно ввести понятие поляризации (например, для электронов). Однако в курсах оптики иногда используются прямо противоположные определения, поэтому следует с осторожностью относиться к терминам левая и правая поляризация.

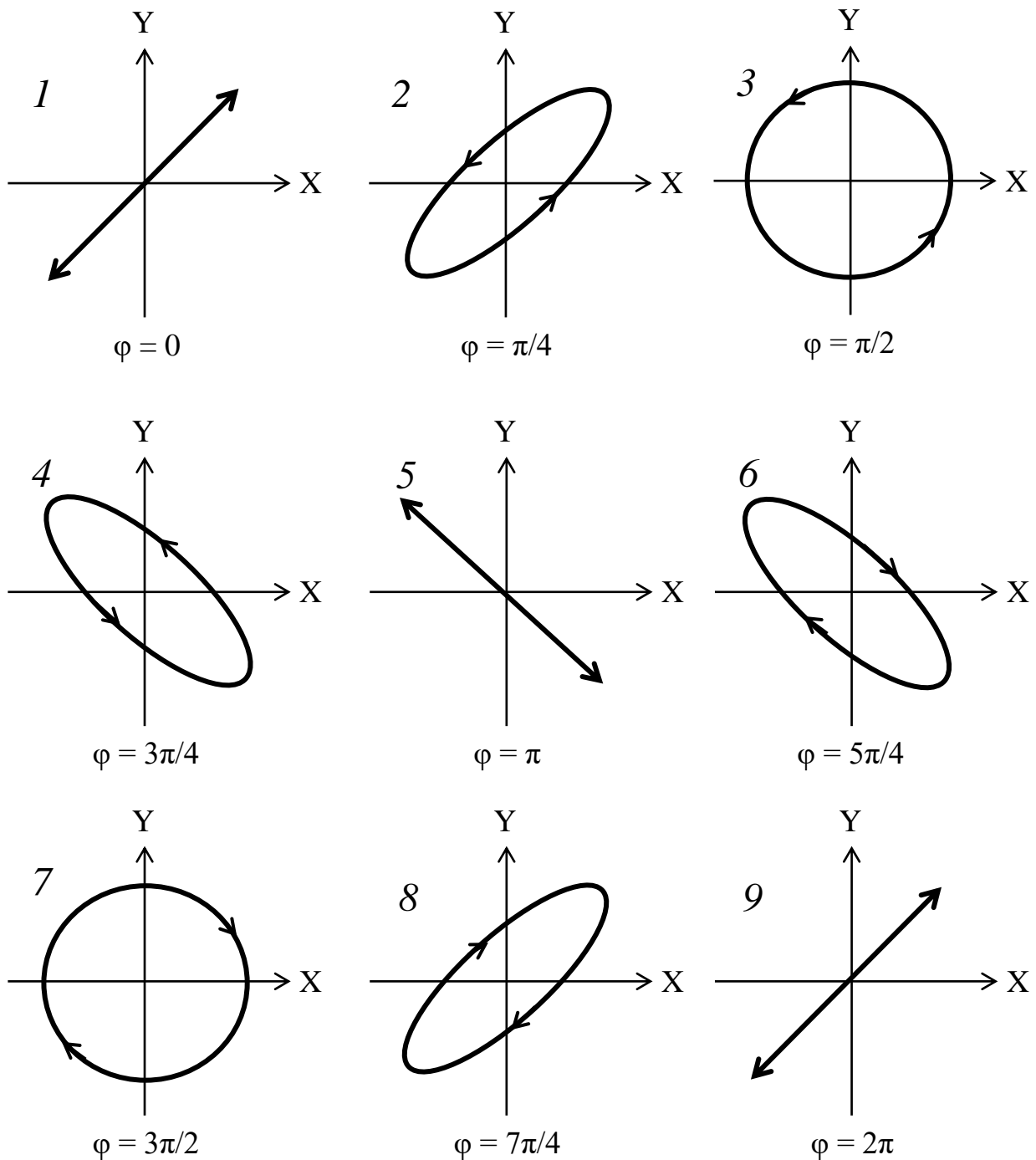


Рис. 2.4. Зависимость поляризации излучения от разности фаз составляющих X и Y: 1,5,9 – линейная; 2,4,6,8 – эллиптическая; 3,7 – круговая.

Если при распространении световой волны направление колебаний электрического вектора бессистемно, хаотически изменяется и, следовательно, любые его направления в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны равновероятны, то такой свет называют **неполяризованным** или **естественным**. Каким же образом может получаться

неполяризованный свет, если известно, что колебания электрического вектора непременно происходят по тому или иному эллипсу?

Возьмем, к примеру, не совсем монохроматический свет, когда сдвиг фаз между  $X$ - и  $Y$ -компонентами непостоянен и электрический вектор колеблется произвольным образом. Тогда поляризация света будет все время меняться. Известно, что один атом излучает свет за  $10^{-8}$  с, и, если все атомы будут излучать свет с разной поляризацией, то поляризация пучка света будет меняться через каждые  $10^{-8}$  с. Когда поляризация света изменяется столь быстро, что ее невозможно измерить, говорят о неполяризованном свете, потому что все эффекты поляризации усредняются и сводятся к нулю. Ни один из интерференционных эффектов при сложении поляризаций не проявляется для неполяризованного света. В то же время само определение неполяризованного света подразумевает, что экспериментально невозможно установить, поляризован свет или нет.

В технологиях оптической записи информации по целому ряду причин, которые будут рассматриваться далее, используется исключительно поляризованный свет, т.е. свет, колебания  $X$ - и  $Y$ -компонентов которого происходят синхронно и с постоянной разностью фаз. Если колебания световой волны в различных точках пространства происходят синхронно и разность фаз колебаний между двумя точками не зависит от времени, то такой свет называется *когерентным*. Источником когерентного излучения является лазер [47].

## 2.2. ЛАЗЕРЫ

Слово «лазер» (*LASER*) – аббревиатура английского выражения *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, которое можно перевести как «усиление света вынужденным излучением». Изначально это слово указывало на способ усиления света, но сегодня оно обозначает оптический квантовый генератор, излучающий свет с определенной длиной волны. Первый лазер (рубиновый) был сконструирован в 1960 году американским физиком Теодором Харальдом Майманом. В 1963 году советским физиком Жоресом Алферовым и немецким физиком Гербертом Кремером (Нобелевская премия по физике 2000 года) была разработана теория полупроводниковых гетероструктур, на основе которой впоследствии были разработаны многие другие типы лазеров – в том числе и полупроводниковые. Еще раньше – в 1954 году, появился первый микроволновый (СВЧ) генератор с похожим названием – «мазер», который излучал сантиметровые волны, и который разработали советские физики Николай Басов и Александр Прохоров и американский физик Чарльз Таунс (Нобелевская премия по физике 1964 года). Мазер – это тоже аббревиатура - *MASER*, где вместо слова *Light* здесь стоит слово *Microwave* - микроволна.

Известно, что атомы любого вещества состоят из ядра и электронов, которые вращаются вокруг ядра по определенным орбитам. Некоторые орбиты находятся ближе к ядру, некоторые – дальше. Чем ближе электроны к ядру, тем с большей скоростью они должны вращаться по орбитам, чтобы не упасть на ядро. Поэтому электроны, движущиеся по разным орбитам, обладают разной энергией. В этом случае говорят, что они находятся на разных *энергетических уровнях*.

В состоянии теплового равновесия большая часть электронов находится на нижних энергетических уровнях. Свойства вещества, составляющего основу квантовой системы, определяются его *энергетическим состоянием*. Внутренняя энергия квантовой системы может принимать строго определенные дискретные значения, которые как раз и определяются энергетическими уровнями электронов его атомов. Переход квантовой системы из одного энергетического состояния в другое происходит только скачкообразно и связан с излучением или поглощением энергии, которая может иметь различные формы: электромагнитную, тепловую или звуковую. Переходы, в результате которых поглощается или излучается электромагнитная энергия, называются *оптическими*.

Если частица (электрон), находящаяся в возбужденном состоянии (на верхнем энергетическом уровне  $E_m$ ), переходит в состояние с меньшей энергией (на нижний энергетический уровень  $E_n$ ), то происходит излучение *кванта энергии (фотона)* с частотой  $\nu_{n,m}$ , которая определяется энергиями начального и конечного состояний:

$$\nu_{n,m} = \frac{E_m - E_n}{h},$$

где  $h = (6,62517 \pm 0,00023) \cdot 10^{-34}$  Дж/с – *постоянная Планка*.

С некоторой долей вероятности такие переходы могут происходить самопроизвольно (*спонтанно*). Но путем воздействия каким-либо внешним возбуждающим фактором (например, светом, электрическим разрядом, химической реакцией, электромагнитным полем на частоте перехода и т.п.), число электронов на верхних энергетических уровнях можно увеличить. Такой процесс называется *инверсией состояния*, а состояние квантовой системы, при которой число возбужденных частиц верхнего энергетического уровня больше числа частиц нижнего энергетического уровня, называется *состоянием с инверсной населенностью* или *инверсным состоянием*. Такое состояние вещества является довольно неустойчивым (*метастабильным*) и вероятность перехода с излучением фотона значительно повышается. Если на возбужденную частицу воздействовать внешним фотоном с энергией  $(h \nu_{n,m})_1$ , равной разности энергий верхнего и нижнего энергетических уровней, то мгновенно произойдет взаимодействие, которое приведет к вынужденному переходу этой частицы в состояние с

меньшей энергией. При этом излучается дополнительный фотон ( $h \nu_{n,m}$ )<sub>2</sub>, который в точности совпадает с фотоном, стимулировавшим этот переход. Они имеют одинаковую частоту, фазу и направление распространения. В результате излучение как бы усиливается.

Принцип получения вынужденного (*стимулированного*) излучения и лежит в основе работы лазера [47,48].

Среда (вещество), в которой может быть получено состояние с инверсной населенностью, называется *активной средой* лазера.

Энергия, с помощью которой осуществляется перевод квантовой системы в инверсное состояние, называется *энергией накачки*.

Однако для получения значительного усиления излучения одной энергии накачки недостаточно. Кроме этого, активную среду нужно поместить в систему двух зеркал – *оптический резонатор*. Одно из зеркал должно быть непрозрачным, а другое – частично прозрачным для вывода излучения наружу. В резонаторе излучение, распространяясь в направлении его оси, многократно отражается от зеркал и проходит среду, стимулируя по пути переходы все новых и новых частиц с верхнего энергетического уровня на нижний. Тем самым обеспечивается эффект усиления.

Полученное таким путем излучение обладает высокой степенью *монохроматичности* (колебания только одной частоты), *пространственной когерентностью* (синфазностью генерируемых колебаний) и *направленностью*.

В зависимости от типа используемой активной среды, лазеры могут быть *твердотельными, газовыми, жидкостными* и *полупроводниковыми*. Формально полупроводниковые лазеры также являются твердотельными, но их традиционно выделяют в отдельную группу, так как они имеют иной механизм накачки. Поскольку в устройствах оптической записи/считывания используются полупроводниковые лазеры на основе арсенида галлия (**GaAs**) или нитрида галлия (**GaN**), то ограничимся рассмотрением только таких лазеров. Полупроводниковые лазеры – это общее название всех лазеров, созданных на основе полупроводниковых материалов.

### 2.2.1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ЛАЗЕР

Типичная структура полупроводникового лазера показана на рис. 2.5.

Снизу располагается слой арсенида галлия **p**-типа с дырочной проводимостью толщиной около 2 мкм. Выше – слой арсенида галлия с замещением части атомов галлия (**x**) на атомы алюминия **Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As** (**x** ~ 0,3) – тоже **p**-типа. Толщина его – несколько микрон. Далее расположен активный слой (**GaAs**) толщиной 0,1...0,2 мкм. Еще выше – слой **Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As** **n**-типа (электронная проводимость), толщиной несколько микрон. И, наконец, пластинка **GaAs** **n**-типа, выполняющая роль подложки. Толщина ее 100...150 мкм.

Сверху и снизу такой структуры располагаются электроды, к которым подводится электрическая энергия. Для лучшего рассеяния тепла все это помещается на теплоотвод.

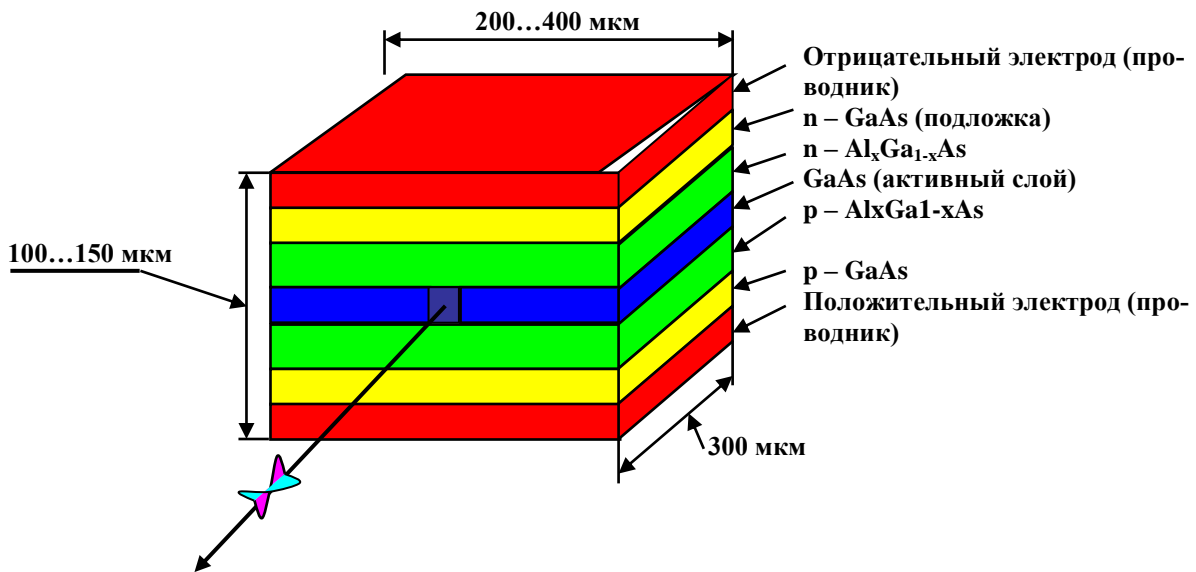


Рис. 2.5. Структура полупроводникового лазера

Три слоя с активным слоем в центре называются *двойной гетероструктурой*.

«Гетеро» означает «другой». Контакт двух различных по химическому составу материалов называют *гетеропереходом*. Комбинацию гетеропереходов называют *гетероструктурой*. Гетероструктуры, состоящие из одного гетероперехода, называют простыми, из большего числа переходов – *мультигетероструктурами*.

Для изготовления гетероперехода на поверхности одного из материалов выращивают слой другого. Чтобы между атомами образовалась прочная связь, подбирают два вещества с близкими кристаллическими решетками.

Если к полупроводниковому лазеру приложить напряжение, то через его структуру потечет ток накачки и возникнет излучение. При небольших значениях тока накачки мощность излучения будет пропорциональна силе тока, и характер его будет некогерентным (естественное излучение), как у обычного светодиода. Но когда ток достигнет некоторого *порогового значения*  $I_{\text{пор}}$ , мощность излучения резко увеличится и начнется *лазерная генерация*. Пороговый ток обычно составляет несколько десятков миллиампер, а мощность лазерного излучения может быть от нескольких милливатт до нескольких ватт. Для того чтобы излучение было стабильным, ток накачки должен быть несколько больше порогового значения – примерно в 1,3 раза. Длина волны излучения определяется свойствами материалов ла-

зерной структуры. В описываемой структуре – количеством примеси алюминия **Al**. Чем алюминия больше, тем длина волны меньше.

Когда к **p**-области лазерной структуры приложен плюс источника тока, а к **n**-области – минус, то в **p**-область инжектируются дырки, а в **n**-область – электроны, идущие по направлению к активному слою. В активном слое почти все электроны и дырки рекомбинируют, излучая свет (фотоны). Из-за высокого показателя преломления активного слоя фотоны не выходят в другие области структуры и усиливаются в нем благодаря вынужденному излучению. При этом роль зеркал оптического резонатора выполняют параллельные друг другу грани полупроводникового кристалла в активной области. Когда сопутствующая этому процессу добавка энергии становится выше потерь, возникает *когерентное лазерное излучение*.

Нежелательным явлением в работе полупроводникового лазера может быть слишком большая площадь активной области. При этом из-за пространственной неоднородности материала полупроводника генерация может возникать в хаотично расположенных по излучающему торцу каналах. Кроме того, для возбуждения активного слоя в этом случае требуется довольно большой ток, а это приводит к разогреву кристалла, нестабильности работы лазера и быстрому выходу его из строя. Поэтому активную область приходится делать достаточно узкой – порядка нескольких микрон. Это достигается путем формирования изолирующих слоев в месте контакта активного слоя с прилегающими слоями и создания определенной закономерности показателя преломления в материале активного слоя [49].

Еще одним недостатком полупроводникового лазера является довольно сильная расходимость излучения. Причем в горизонтальной и вертикальной плоскостях она может быть различной. Например, в горизонтальной плоскости (параллельной **p-n** – переходу) расходимость может быть 10...15 градусов, а в вертикальной плоскости (перпендикулярной **p-n** – переходу) – 30...50 градусов. Использование таких лазеров сопряжено со значительными потерями мощности излучения и необходимостью применения сложных оптических систем. Поэтому в процессе производства полупроводниковых лазеров стараются хотя бы обеспечить симметричность расходимости луча по горизонтали и вертикали.

И наконец, последней проблемой, над которой пришлось потрудиться разработчикам и изготовителям полупроводниковых лазеров для потребительской электроники – это его долговечность при достаточно низкой цене. Срок службы такого лазерного диода должен составлять, по крайней мере, сотни тысяч часов. Для этого кристалл полупроводника не должен содержать никаких дефектов, и его грани, являющиеся зеркалами резонатора, должны быть строго параллельными.

В устройствах оптической записи используются три типа полупроводниковых лазеров:



- с длиной волны излучения 780 нм (на границе красного и инфракрасного диапазонов) на основе арсенида галлия **GaAs** (CD);
- с длиной волны излучения 650 нм (красный свет) - также на основе арсенида галлия **GaAs** (DVD);
- с длиной волны излучения 405 нм (фиолетовый свет) на основе нитрида галлия **GaN** (BD).

### 2.3. ОСНОВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В СИСТЕМАХ ОПТИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ/СЧИТЫВАНИЯ

На рис. 2.6 показано построение простейшей оптической системы, используемой для фокусировки лазерного излучения на дорожке оптического диска. Та же система служит для того, чтобы собрать отраженный пучок и направить его к фотоприемнику – прибору, который преобразует свет в электрический сигнал. Эта схема – всего лишь пример. Подобных схем существует множество – почти каждый изготовитель использует свою собственную. Но она, тем не менее, поможет наглядно представить себе роль каждого из элементов в схеме и логику их соединения.

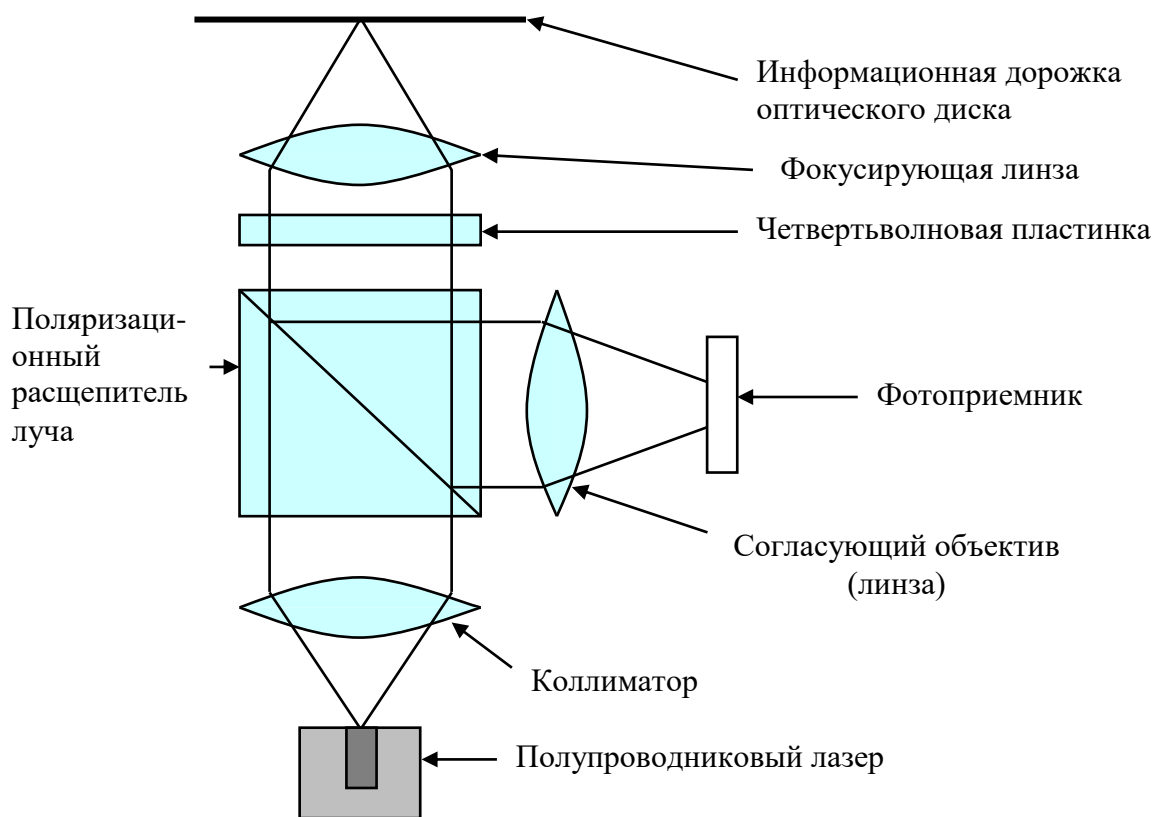


Рис. 2.6. Пример построения оптической системы

### 2.3.1. ФОКУСИРУЮЩАЯ ЛИНЗА

Фокусирующая линза (объектив) является одним из основных элементов оптической системы. От ее характеристик, а также от длины волны излучения лазера, зависит минимальный размер светового пятна, который можно получить в плоскости фокусировки луча, а значит, количество информации, которое можно записать на поверхности диска. Чем меньше пятно, тем меньшим получится элемент записи. Чем меньше элемент записи, тем больше таких элементов можно разместить на одной и той же площади носителя, и тем больше информации можно на ней записать.

Зависимость диаметра  $b$  светового пятна от параметров линзы и длины волны  $\lambda$  излучения лазера выражается формулой

$$b = c \frac{\lambda}{NA}, \quad (2.1)$$

где  $NA$  (*Numerical Aperture*) – числовая апертура фокусирующей линзы, а  $c$  – коэффициент, который зависит от критерия оценки диаметра светового пятна и может принимать значения от 0,61 до 1,22. Дело в том, что интенсивность света в лазерном пучке, прошедшем через зрачок объектива (фокусирующую линзу), распределена неравномерно – в центре светового пятна она максимальна, а ближе к краям уменьшается, причем вокруг центрального пятна образуются еще и дифракционные кольца (рис. 2.7).

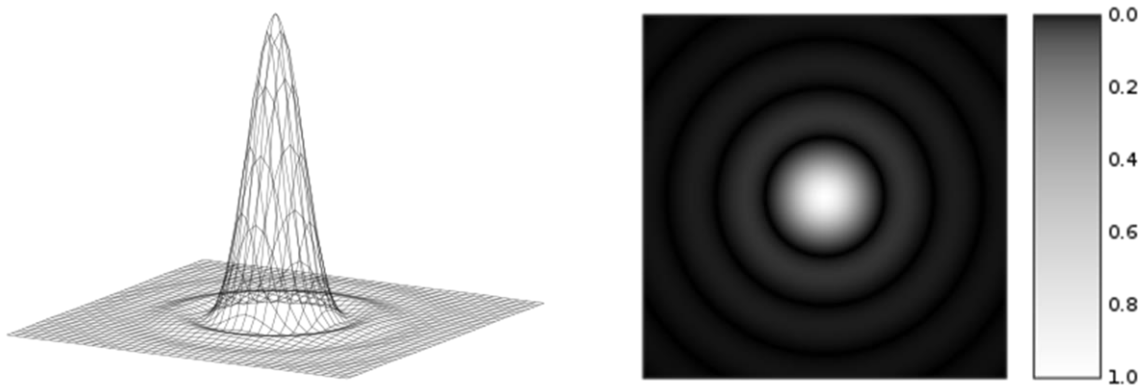


Рис. 2.7. Трёхмерное представление интенсивности *диска Эйри* (слева) и возникающая при этом в фокальной плоскости дифракционная картина – *узор Эйри* (справа). На правом рисунке максимальная интенсивность света принята за 1,0, а минимальная – за 0,0

Световое пятно, которое можно получить при наилучшей фокусировке идеальной оптической линзы с круговой апертурой, называется диском Эйри или узором Эйри. Неточечный характер полученного пятна связан с явлением дифракции света. Строго говоря, *диском Эйри* называется яркая область в центре, внутри которой сосредоточено 84% всей световой энергии

гии, а дифракционный узор в целом, включающий пятно и концентрические яркие кольца вокруг него, известен как *узор Эйри*. Эти явления получили название в честь английского математика и астронома Джорджа Бидделя Эйри, который впервые произвёл полный теоретический анализ распределения света, прошедшего через круговую апертуру, и дал ему объяснение в своей работе 1835 года, которая так и называлась: «О дифракции в объективе с круговой апертурой». Количество дифракционных колец зависит от длины волны света, освещающего круглое отверстие, и диаметра отверстия. Чем меньше диаметр отверстия, тем больше будет дифракционных колец. В нашем случае диаметр фокусирующей линзы достаточно велик в сравнении с длиной волны излучения лазера, поэтому дифракционные кольца выражены очень слабо и практически не влияют на работу оптической системы.

Диаметр светового пятна обычно измеряют по первому темному кольцу Эйри. Для этого случая в формуле (2.1) коэффициент  $c = 1,22$ . Однако иногда диаметр пятна оценивают по уровню интенсивности, равному 0,5. В этом случае коэффициент  $c = 0,61$  (рис. 2.8).

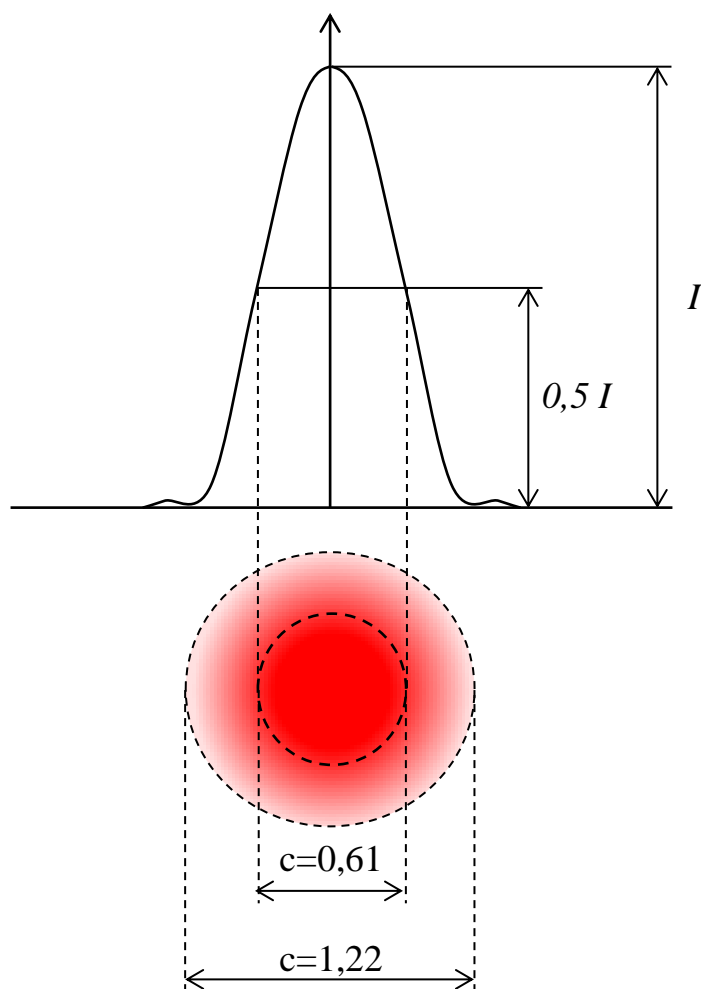


Рис. 2.8. Распределение энергии света в лазерном пучке и методы измерения его диаметра

Другой определяющий параметр в формуле (2.1) – это **числовая апертура** объектива  $NA$  (*Numerical Aperture*). Определяется она выражением:

$$NA = n \sin\theta, \quad (2.2)$$

где  $n$  – показатель преломления среды, в которой распространяется свет;  $\theta$  – угол, под которым виден радиус входного зрачка объектива из точки пересечения его оптической оси с фокальной плоскостью (рис. 2.9).

Показатель преломления воздушной среды  $n = 1$ , поэтому в воздухе

$$NA = \sin\theta. \quad (2.3)$$

Величина угла  $\alpha = 2\theta$ , под которым виден диаметр входного зрачка объектива из той же точки, называется **угловой апертурой**.

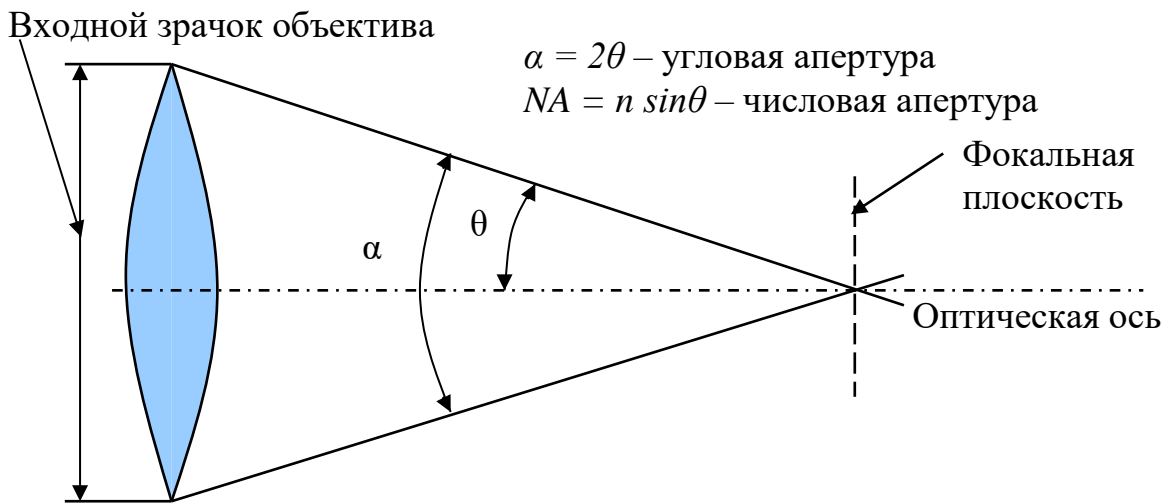


Рис. 2.9. К понятиям числовой и угловой апертуры

Как следует из формулы (2.1), для уменьшения диаметра светового пятна, длину волну лазерного излучения целесообразно уменьшать, а числовую апертуру объектива – увеличивать.

Именно в этом направлении и эволюционировала оптическая запись. В формате CD стандартное значение числовой апертуры объектива – 0,45 (длина волны излучения лазера 0,78 мкм), в формате DVD – 0,6 (длина волны излучения 0,65 мкм), в формате BD – 0,85 (длина волны излучения 0,405 мкм). Размеры светового пятна в разных форматах, измеренные по первому темному кольцу Эйри, показаны на рис. 2.10.

Можно легко показать, как изменение длины волны излучения и числовой апертуры влияет на информационную емкость оптического носителя путем сравнения дисков DVD и BD (BluRay).

Площадь светового пятна, как известно, прямо пропорциональна квадрату его радиуса ( $S = \pi r^2$ ) или диаметра ( $S = \pi d^2/4$ ).

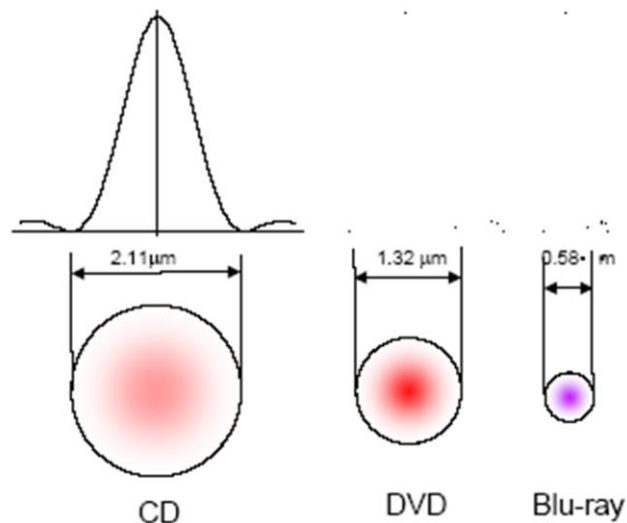


Рис. 2.10. Сравнительные размеры светового пятна для различных длин волн лазерного излучения

Квадрат длины волны излучения фиолетового лазера (BD) меньше квадрата длины волны излучения красного лазера (DVD) примерно в 2,6 раза ( $650^2/405^2 \approx 2,6$ ), следовательно, уменьшение длины волны излучения лазера приводит к уменьшению площади светового пятна примерно в 2,6 раза.

Квадрат апертуры объектива в формате BD больше квадрата апертуры объектива в формате DVD примерно в 2 раза ( $0,85^2/0,6^2 \approx 2$ ), следовательно, увеличение апертуры объектива приводит к уменьшению площади светового пятна еще в 2 раза. Общее уменьшение площади светового пятна составит, таким образом, величину 5,2. Это позволяет уменьшить как ширину дорожек записи, так и расстояние между ними (шаг дорожек на дисках формата BD составляет величину 0,32 нм против 0,74 на дисках формата DVD).

Уменьшение площади светового пятна более чем в 5 раз определяет увеличение информационной емкости однослойного диска BD в сравнении с диском DVD также более чем в 5 раз (25 Гб у диска BD против 4,7 у диска DVD).

### 2.3.2. КОЛЛИМАТОР И СОГЛАСУЮЩАЯ ЛИНЗА

Как уже говорилось выше, излучение лазера является сильно расходящимся. Для того чтобы сформировать из него параллельный пучок, используют специальную линзу, которая называется *коллиматором*. Такое название происходит от искаженного латинского слова *collimo* (правильное

*collineo*) – направляю по прямой линии. Оптический коллиматор – это устройство для получения пучков параллельных световых лучей.

Поскольку в горизонтальной плоскости (параллельной *n-p* – переходу лазерного диода) расхождение пучка в лучшем случае  $10^\circ (\pm 5^\circ)$  относительно центральной оси), а в вертикальной (перпендикулярной *n-p* – переходу лазерного диода) может достигать  $40-50^\circ$ , то для получения пучка, равномерного по амплитуде и фазе в поперечном сечении, обычно используют поток излучения, распространяющийся в круговом конусе с углом между образующей и центральной осью порядка  $5^\circ$  (рис. 2.11). При этом часть выделенной таким образом мощности лазера составляет около 20% от общей мощности. Линзу коллиматора помещают в специальную зачернённую оправу для того чтобы избежать отражений света, который может попасть назад в лазер и вызвать изменение режима генерации.

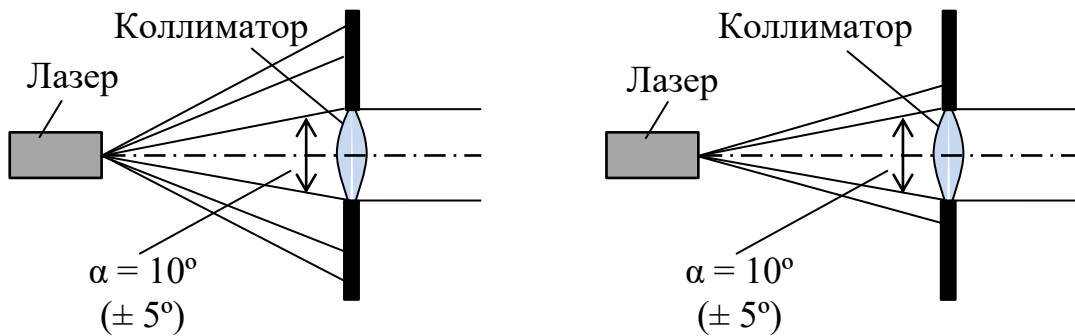


Рис. 2.11. Размещение коллиматора на пути лазерного пучка:  
слева – разрез вертикальной плоскостью;  
справа – разрез горизонтальной плоскостью

**Согласующий объектив** – это обычная линза, подобранная таким образом, чтобы согласовать размеры пучка в оптической системе с размерами фотоприемника. Такой линзы может и не быть, или вместо нее может использоваться какой-то другой элемент. Например, цилиндрическая линза, которая используется в системе автофокусировки по методу астигматизма пучка.

### 2.3.3. ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ РАСЩЕПИТЕЛЬ ЛУЧА

**Поляризационный расщепитель луча** (или **светоделительный кубик**) представляет собой прямоугольную призму, изготовленную из исландского шпата и состоящую из двух треугольных призм, склеенных между собой наклонными плоскостями (рис. 2.12). Такая призма обладает свойством пропускать беспрепятственно только ту составляющую поляризованного света, направление поляризации которой параллельно плоскости падения луча (на рис. 2.12 эта плоскость совпадает с плоскостью чертежа).

Составляющая, направление поляризации которой перпендикулярно плоскости падения луча (плоскости чертежа), отражается наклонными гранями треугольных призм. Состав, находящийся в месте их соединения (канадский бальзам, акриловый клей или льняное масло), усиливает эффект расщепления.

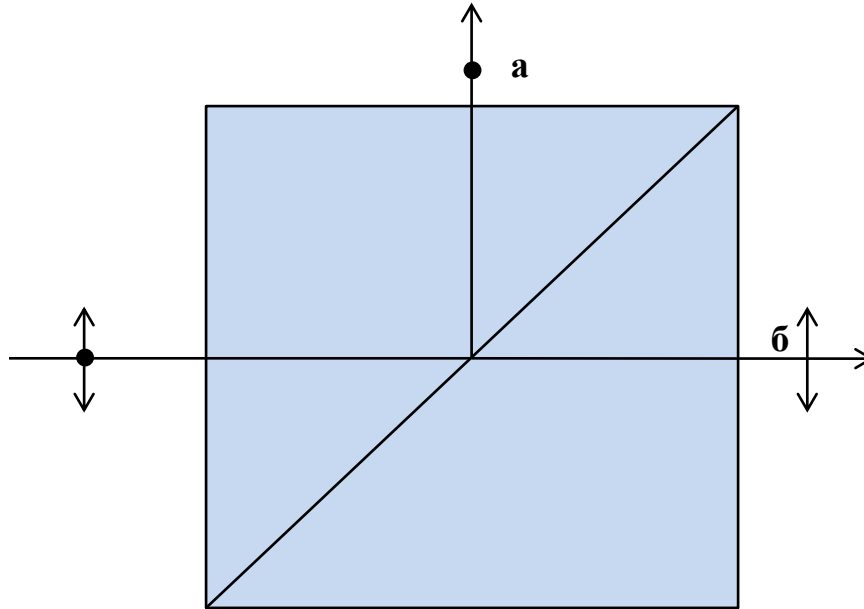


Рис. 2.12. Прохождение света через поляризационный расщепитель:  
 а) направление поляризации перпендикулярно плоскости падения луча;  
 б) направление поляризации параллельно плоскости падения луча  
 (находится в плоскости чертежа)

Поляризационный расщепитель требуется, когда необходимо выделить составляющую светового луча, линейно поляризованную в каком-то определенном направлении. В данном случае для работы в показанной на рис. 2.6 схеме требуется луч, линейно поляризованный в вертикальной плоскости (в плоскости чертежа), который и формируется на выходе расщепителя в точке **б** (рис. 2.12). Выделение только одной составляющей луча необходимо для того, чтобы в дальнейшем можно было отделить пучок, поступающий со стороны лазера, от пучка, отраженного поверхностью компакт-диска.

### 2.3.4. ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВАЯ ПЛАСТИНКА

Встречаются среды, показатель преломления которых различен для света, линейно поляризованного в том или другом направлении. Например, пусть имеется некий материал, состоящий из вытянутых несферических молекул, длина которых больше их ширины. Предположим также, что мо-

лекулы в веществе выстроены так, чтобы их большие оси оказались параллельными. Что произойдет, если на тело подействует осциллирующее поле? Предположим, что такая структура молекул способствует тому, что электроны в материале легче поддаются колебаниям вдоль оси молекулы, чем поперек нее. При таких условиях поляризация света в одном направлении будет вызывать один эффект, а поляризация, направленная под прямым углом к первой, - совсем другой. Назовем направление осей молекул *оптической осью*. Показатель преломления принимает разные значения в зависимости от того, направлена ли поляризация вдоль оптической оси или перпендикулярна ей. Среда с такими свойствами называется *двоякопреломляющей*. Она обладает двумя разными способами преломления, т.е. двумя показателями преломления в зависимости от поляризации света в среде. Нетрудно догадаться, что двоякопреломляющая среда должна иметь некоторое количество ориентированных несферических молекул. Ясно, что кубический кристалл, имеющий симметрию куба, не может быть двоякопреломляющим. А вот длинные иглоподобные кристаллы, безусловно, содержат несимметричные молекулы, и в них легко наблюдать эффект двойного лучепреломления.

Что получится, если направить поляризованный луч на пластинку из двоякопреломляющего материала? Если поляризация параллельна оптической оси, свет пройдет через пластинку с одной скоростью, а если поляризация перпендикулярна, то с другой скоростью. Интересная ситуация возникает, если луч света поляризован, например, под углом  $45^\circ$  к направлению оптической оси (рис. 2.13). Поляризация, как известно, представляется в виде суммы поляризаций в направлении  $X$  и  $Y$  с равными амплитудами и фазами (рис. 2.2). Поскольку лучи с поляризациями вдоль осей  $X$  и  $Y$  движутся в среде с разными скоростями, фазы обеих компонент поля будут расти по-разному.

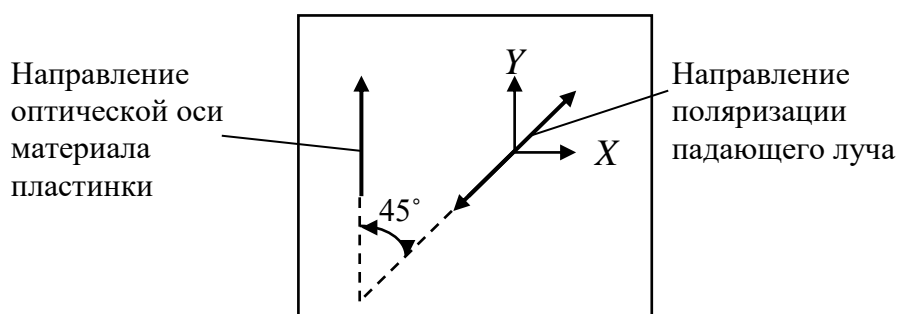


Рис. 2.13. Взаимная ориентация оптической оси четвертьволновой пластинки и направления поляризации падающего луча для получения сдвига фаз между составляющими  $X$  и  $Y$ , равного  $90^\circ$

Таким образом, несмотря на первоначальное совпадение фаз  $X$ - и  $Y$ -компонент, внутри среды между ними образуется разность фаз, пропорци-



ональная глубине проникновения света в среду. Изменение поляризации света по мере прохождения через среду можно проследить по серии диаграмм на рис. 2.4. Если пластинка имеет такую толщину, что разность фаз между  $X$ - и  $Y$ -компонентами на выходе равна  $90^\circ$ , то свет выйдет из пластинки поляризованным по кругу (рис. 2.4, диагр. 3). Пластинки такой толщины называются **четвертьволновыми пластинками**, поскольку после прохождения через них света между  $X$ - и  $Y$ -компонентами появляется разность фаз в одну четверть длины волны.

Четвертьволновую пластинку помещают между поляризационным расщепителем и фокусирующей линзой (рис. 2.6). Тогда линейно поляризованный луч после ее прохождения превратится в поляризованный по кругу.

После этого свет проходит через фокусирующую линзу, модулируется микрорельефом информационного слоя оптического диска и, отражаясь от его поверхности, снова попадает в объектив.

Отраженный пучок также имеет круговую поляризацию, но направление вращения вектора поляризации при отражении меняется на противоположное. После прохождения четвертьволновой пластинки поляризация света вновь станет линейной, но направление ее будет теперь перпендикулярно направлению поляризации исходного луча. Поэтому призматический расщепитель не пропустит отраженного света, а повернет его в сторону фотоприемника.

### 2.3.5. ФОТОПРИЕМНИК

**Фотоприемник** – это прибор, преобразующий световую энергию в электрический сигнал. Для преобразования используется эффект генерации светом электронов и дырок в полупроводнике. Фотоприемники, как правило, имеют несколько изолированных друг от друга светочувствительных площадок. Их число зависит от выбранных методов фокусировки и слежения за дорожкой (автотрекинга).

## 2.4. ТЕХНОЛОГИИ ОПТИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ

Все оптические диски можно разделить на две конструктивно разные группы: диски только для считывания (CD-ROM, DVD-ROM, BD-ROM) и диски, на которые пользователь может самостоятельно записывать информацию (CD-R, DVD-R, BD-R, CD-RW, DVD-RW, BD-RE и их многочисленные разновидности).

На дисках только для чтения информация представлена в виде концентрической спиральной дорожки из углублений (или выпуклостей), которые называются **питами** (pit), на отражающем слое (рис. 2.14). На дисках, предназначенных для записи, информация фиксируется в виде меток с по-

ниженной отражающей способностью (*виртуальными питами*) различной длины.

Диски только для чтения (-ROM) изготавливаются и тиражируются в заводских условиях с помощью довольно сложного и громоздкого оборудования. Запись информации на диски -R, -RW, -RE и пр. производится с помощью обычных компьютерных дисководов или специальных рекордеров (проигрывателях с записью).

Рассмотрим эти два типа дисков поподробнее.

Рис. 2.14. Конструкция оптического диска «только для чтения»:  
1 – защитный слой из прочной пластмассы; 2 – микрорельеф из пиков, металлизированный тонким слоем алюминия; 3 – прозрачная основа диска, сквозь которую производится считывание информации

#### **2.4.1. ДИСКИ «ТОЛЬКО ДЛЯ СЧИТЫВАНИЯ»**

На рис. 2.15 показана конструкция оптического диска CD-ROM, на примере которого удобнее всего познакомиться с конструкцией дисков «только для считывания». Внешние размеры этого диска, указанные на рис. 2.15,а, соответствуют размерам дисков всех форматов (CD, DVD, BD), как только для чтения, так и записываемых. Это сделано для того, чтобы на дисководах новых форматов (DVD, BD) можно было записывать и воспроизводить диски всех предшествующих форматов.

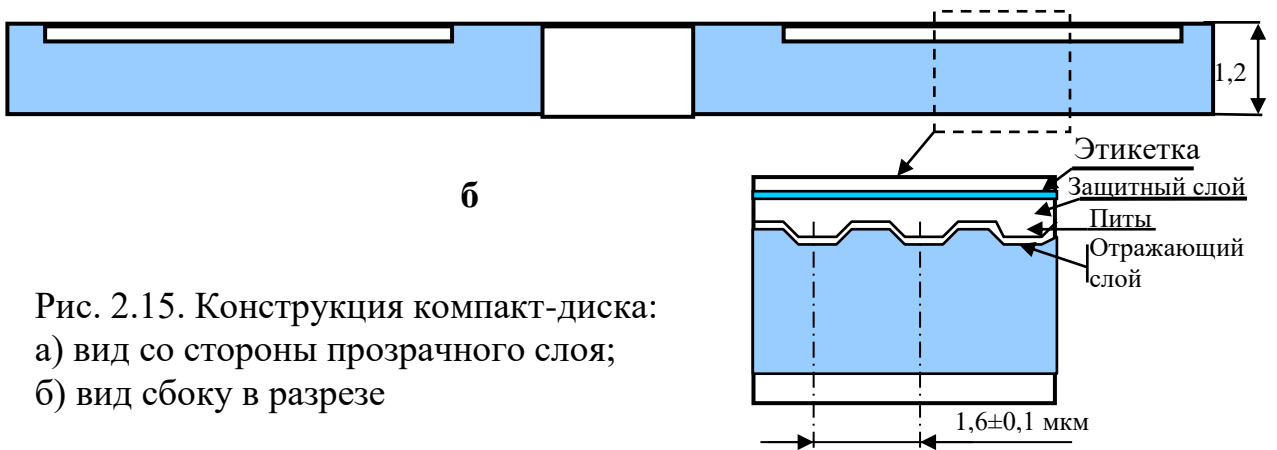
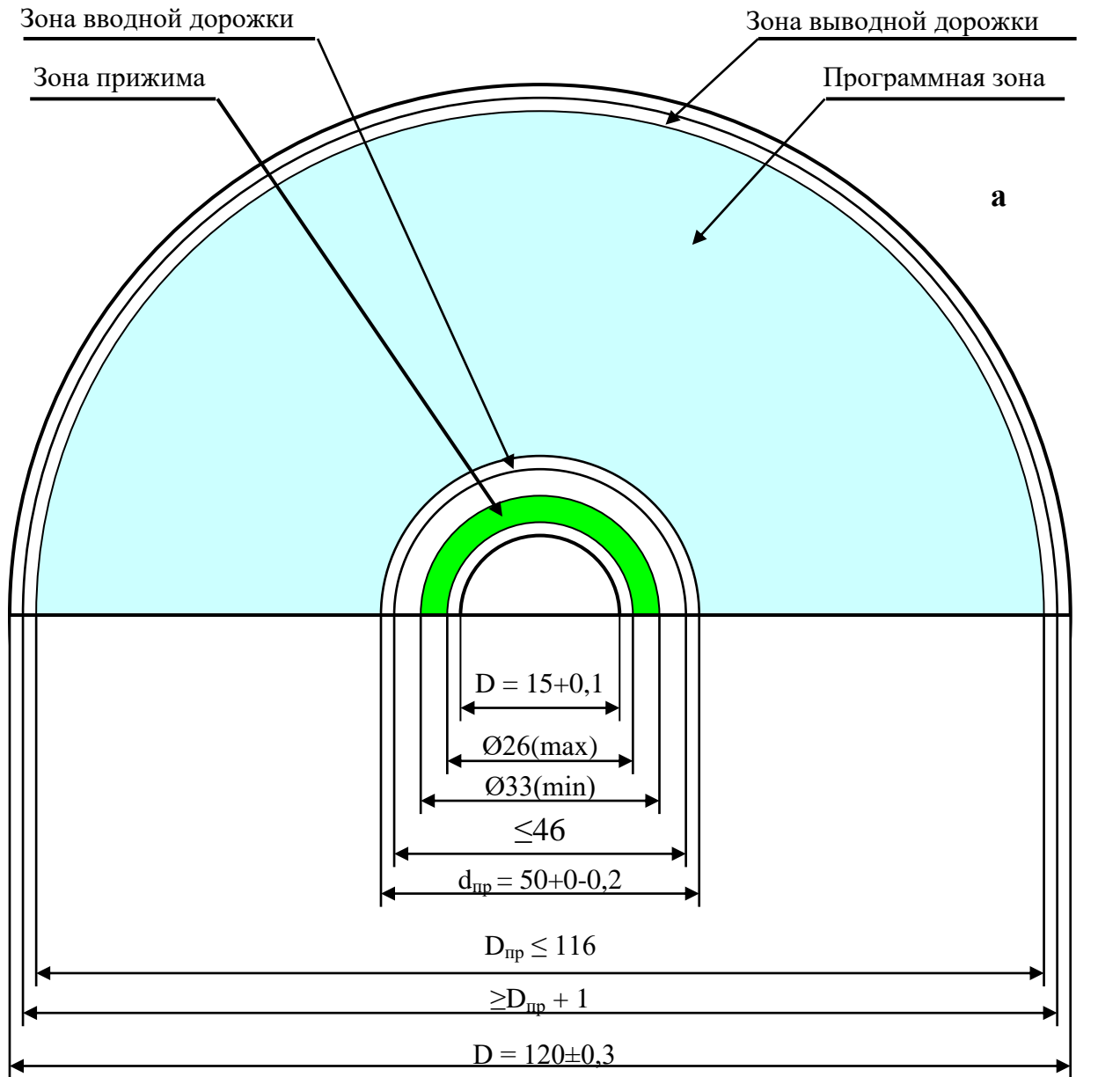


Рис. 2.15. Конструкция компакт-диска:  
 а) вид со стороны прозрачного слоя;  
 б) вид сбоку в разрезе

Однако внутренняя структура у дисков разных форматов, как станет ясно из дальнейшего изложения, разная.

Если посмотреть через микроскоп на зеркальную поверхность компакт-диска (которая и является информационной поверхностью) со стороны прозрачного слоя, то можно увидеть множество концентрических дорожек, состоящих из черточек различной длины. Черточки - это и есть питы, т.е. продолговатые углубления или выпуклости на поверхности металлизированного слоя оптического диска. Слово пит (pit) в переводе с английского - это, вообще говоря, углубление, ямка. Такие углубления образуются на поверхности мастер-диска (диска-оригинала) в зонах, подвергшихся воздействию лазерного луча во время записи мастер-диска, после его обработки в специальном растворе. Их длина есть величина информативная, и отражает длину последовательности двоичных единиц записанного на диск информационного сигнала.

Здесь следует запомнить, что тип пита – ямка или выпуклость, роли не играет, поскольку перед записью информационный сигнал модулируется канальным кодом, в котором «единицы» - это изменения уровня сигнала, а «нули» - отсутствие такого изменения. В какую сторону происходит изменение уровня – от низкого к высокому (от пита к промежутку между ними) или от высокого к низкому (от промежутка к питу) никакого значения не имеет. Кроме того, глубина пита или его высота выбираются с таким расчетом, чтобы разность хода лучей, отраженных от поверхности диска и от пита, составляла примерно половину длины волны лазерного излучения. Тогда при наличии пита в результате интерференции противофазных пучков энергия отраженного пучка будет минимальной. Такую разность фаз можно обеспечить как при питах-углублениях, так и при питах-выпуклостях. А вот длина промежутка между питами - величина информативная и отражает длину последовательности двоичных «нулей». Длина пит, а также промежутков между ними, в формате CD может изменяться от 0,9 до 3,3 мкм. Общая длина дорожки на CD -диске – около 5 км.

Воспроизведение его начинается от центрального отверстия, и производится против часовой стрелки, если смотреть со стороны прозрачного слоя. Дорожка движется относительно считывающего луча с постоянной линейной скоростью.

Постоянная линейная скорость обеспечивается благодаря изменению угловой скорости вращения диска. Когда считывание производится вблизи центрального отверстия диска, он вращается быстрее, а когда ближе к краю, то медленнее. Скорость движения дорожки относительно луча у разных дисков может колебаться в пределах от 1.2 до 1.4 м/с.

Внешний диаметр диска  $D = 120$  мм. Диаметр центрального отверстия  $d = 15$  мм. Толщина диска – 1,2 мм.

Вся поверхность диска разделена на зоны. Зона, где записана непосредственно музыка, называется *программной зоной*. Она располагается

между внешним диаметром  $D_{пр}$  и внутренним  $d_{пр}$ . Максимальное значение внешнего диаметра  $D_{пр} = 116$  мм, внутреннего  $d_{пр} = 50$  мм. К внутреннему диаметру программной зоны примыкает **зона вводной дорожки** или **зона ввода**, ограничена диаметром 46 мм. В этой зоне записано оглавление, т.е. информация о расположении файлов на диске. К внешнему диаметру программной зоны примыкает **зона выводной дорожки** или **зона вывода**, которая должна иметь внешний диаметр не менее чем на 1 мм больше внешнего диаметра программной зоны.

Кроме того, диск имеет еще так называемую **зону прижима**, назначение которой ясно из ее названия. Поверхностью этой зоны компакт-диск соприкасается со шпинделем двигателя вращения и прижимной шайбой. Ее размеры: максимальный внутренний диаметр – 26 мм, минимальный внешний диаметр – 33 мм.

Информация, записанная на диск в виде спиральной дорожки из последовательности пит, располагается в программной зоне, а также в зонах ввода и вывода. Расстояние между соседними витками спирали равно 1,6 мкм.

Основной материал компакт-диска – **поликарбонат**. Это прозрачная пластмасса, устойчивая к короблению и обладающая малым коэффициентом изменения размеров под воздействием влаги. Кроме того, поликарбонат обладает высокой теплостойкостью и высокой ударной вязкостью.

### **Технологии изготовления оптических дисков «только для считывания»**

Процесс производства оптических дисков начинается с изготовления **диска-оригинала (мастер-диска)**. Основа для него выполняется из тщательно отполированного стекла. На поверхность основы диска-оригинала, которая при этом должна быть идеально плоской, наносится тонкий слой светочувствительного материала – **фоторезиста**. Толщина слоя фоторезиста (0,1 мкм) определяет глубину будущих пит, поэтому строго контролируется в процессе производства. На всех стадиях изготовления диск-оригинал тщательно проверяют, поскольку все его дефекты в дальнейшем неизбежно будут перенесены на матрицу и растиражированы.

Структурная схема установки записи диска-оригинала в формате CD показана на рис. 2.16. Поскольку требований к ее миниатюрности не предъявляются, то здесь, как правило, используется либо аргоновый лазер с длиной волны излучения 0,4579 мкм, либо гелий-кадмиевый лазер с длиной волны излучения 0,4416 мкм. Выбор такой длины волны объясняется рядом причин. Во-первых, уменьшенная длина волны излучения позволяет получить световое пятно нужного диаметра с более четкими границами, чем если бы использовался лазер с длиной волны 0,78 мкм, как тот, что применяется для считывания. Во-вторых, такая длина волны лучше согласуется с

характеристиками светочувствительности фоторезиста, что позволяет ограничиться при записи сравнительно небольшой мощностью лазера.

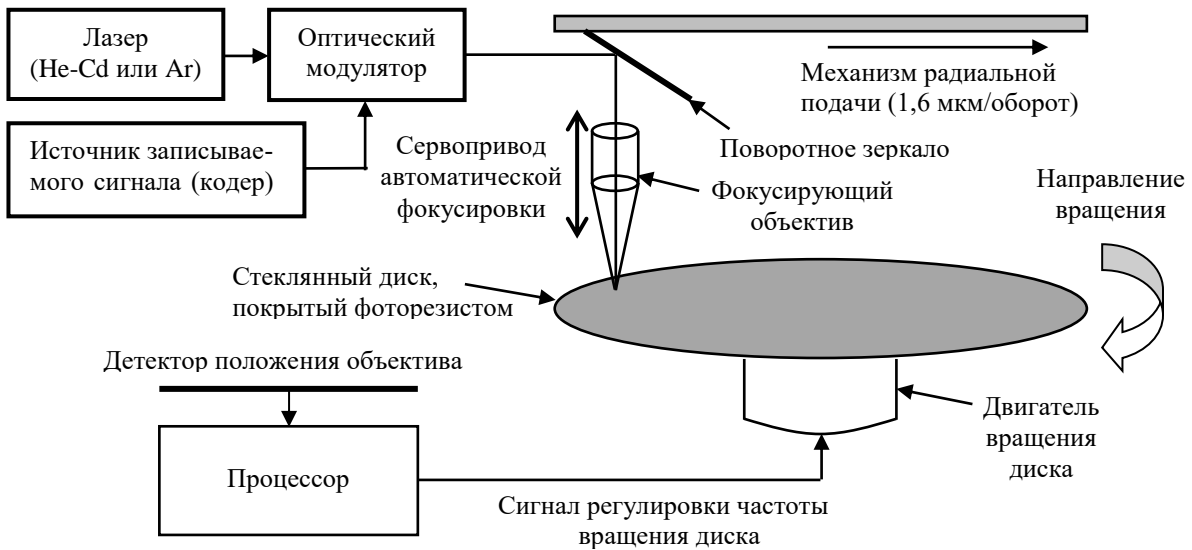


Рис. 2.16. Структурная схема установки записи диска-оригинала

Следует отметить, что воздух в помещении, где производится запись, должен быть тщательно очищен от пыли. Это делается с помощью специальных устройств. Допускается не более 100 пылинок на  $1 \text{ м}^3$  воздуха.

В процессе записи излучение лазера модулируется цифровым сигналом, формируемым аппаратурой кодирования звука в полном соответствии с требованиями стандарта. Излучение лазера воздействует на фоторезист, покрывающий поверхность вращающегося диска-оригинала, и оставляет на нем зоны засветки, соответствующие «единицам» цифрового кода. После окончания записи фоторезистивный слой проявляют в специальном растворе. При этом экспонированные зоны растворяются, и на их месте образуются углубления –питы.

Для модуляции лазерного луча может быть использован *электрооптический эффект Погкельса*, состоящий в том, что под воздействием электрического поля изменяется коэффициент преломления кристалла, не имеющего внутренней симметрии (например, пьезокристалла). В результате луч, проходя через такой кристалл, то попадает на поверхность диска, формируя пит, то отклоняется в сторону, не вызывая засветки фоторезиста.

Также может использоваться *акустооптический эффект*, когда упругие деформации, возникающие при прохождении ультразвука через прозрачный акустооптический материал (кристалл  $\text{PbMoO}_4$ ,  $\text{TeO}_2$ ,  $\text{LiNbO}_3$ , GaP, халькогенидное или теллуговое стекло и пр.), работает как дифракционная решетка, изменяя направление распространения светового луча.

Для того чтобы обеспечить точную фокусировку записываемого луча на фоторезистивном слое диска, используется система контроля расстояния

на основе измерения емкости между слоем фоторезиста и электродом, закрепленным на объективе записывающей оптической головки.

Чтобы обеспечить необходимый шаг между дорожками (1,6 мкм), используется система радиальной подачи с поворотным зеркалом в качестве исполнительного механизма.

Для того чтобы обеспечить постоянство линейной скорости перемещения луча относительно записываемой дорожки, используется система регулирования скорости вращения двигателя, где контролируемым параметром является расстояние от центра диска до записывающего пятна.

После проявления экспонированного лучом лазера диска-оригинала, его поверхность металлизируют слоем серебра. Затем на основе этого диска методом гальванопластики формируют другой оригинал – цельнометаллический. После этого рельеф с него переносится на промежуточные копии, а с промежуточных копий – на матрицы. Матрицы в дальнейшем используются для тиражирования компакт-дисков [49].

Тиражирование может осуществляться тремя способами: методом горячего прессования, литьем под давлением и с помощью фотополимеризации.

### ***Метод горячего прессования***

Поликарбонат, разогретый до температуры, близкой к температуре плавления, помещается в гидравлический пресс на нижнюю половину пресс-формы, подогреваемой горячим паром (рис. 2.17). Матрица размещается на верхней половине пресс-формы. При сжатии пресса из пластмассы формируется диск с рельефом, повторяющим рельеф матрицы.

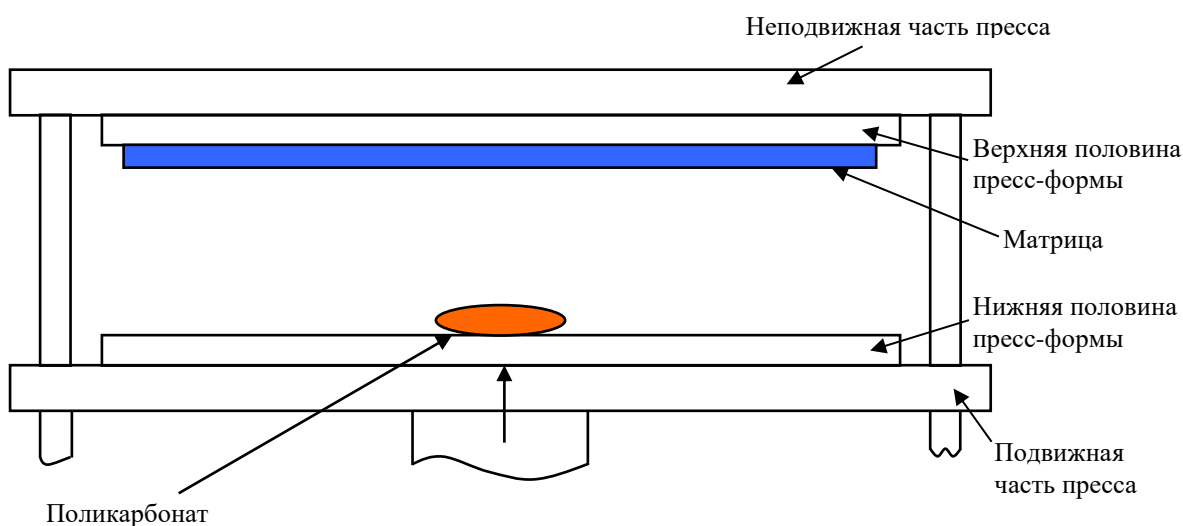
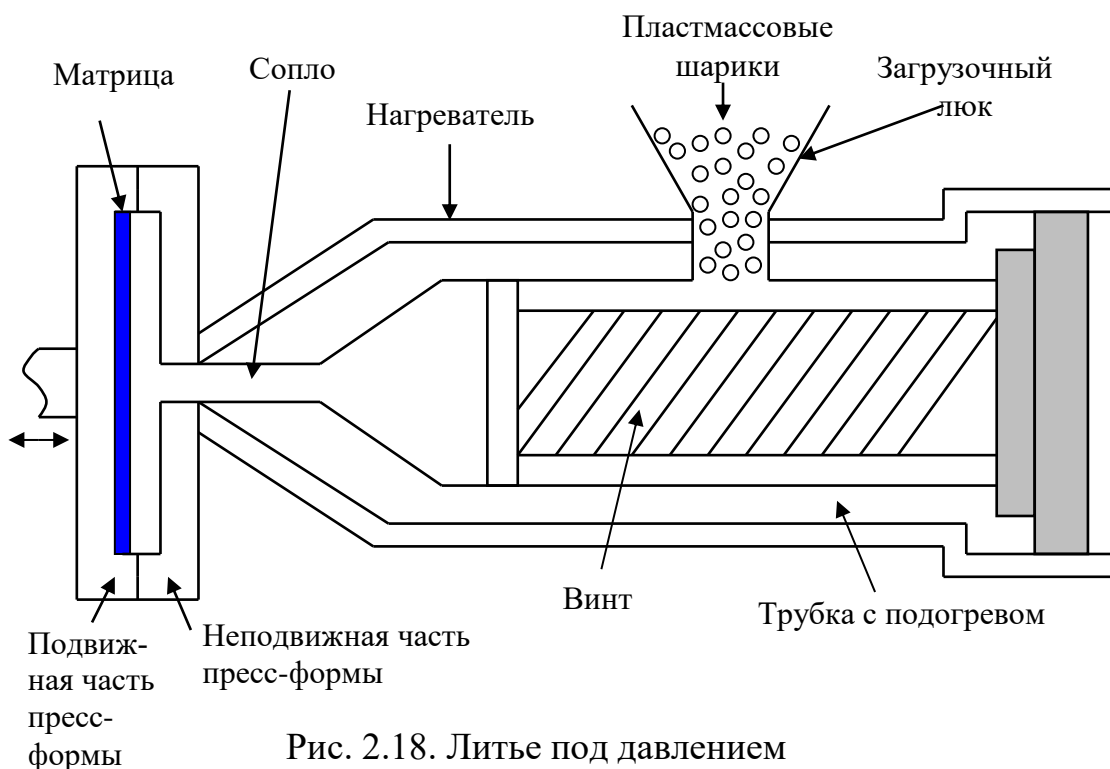


Рис. 2.17. Горячее прессование

### **Метод литья под давлением**

Здесь матрица располагается внутри замкнутой пресс-формы с отверстием для впрыска горячей пластмассы – соплом (рис. 2.18). Когда производится впрыск, расплавленный поликарбонат заполняет пресс-форму, повторяя рельеф на поверхности матрицы. Чтобы компакт-диск получился качественным и на нем не образовывались воздушные пузыри, давление должно быть достаточно высоким.



### **Фотополимеризационный способ**

Здесь размягченный (но не расплавленный) поликарбонат вводится между прозрачным диском (из того же поликарбоната) и матрицей. Диск выполняет роль подвижной части прессы, а матрица – неподвижной (рис. 2.19). Когда диск опускается на матрицу, сжимая размягченную массу поликарбоната, на его поверхности, примыкающей к матрице, формируется рельеф из пит. Чтобы рельеф затвердел, сквозь диск пропускают поток ультрафиолетовых лучей. Затем готовое изделие отделяется от матрицы.

После того как компакт-диск изготовлен по одной из упомянутых технологий, на его поверхность со стороны пит, методом вакуумного напыления наносится отражающий слой из алюминия толщиной 0,1 мкм. Для этого заготовку диска помещают в вакуумную камеру. Туда же в специальную ванночку с вольфрамовым испарителем помещают гранулы алюминия или обрезки алюминиевой проволоки. После откачки из вакуумной камеры газа до абсолютного давления ниже  $10^{-5}$  Па включают ток нагрева вольфрамового испарителя и доводят его температуру, в зависимости от требуемой



технологии, до 1500—2500 °С. При этом алюминий испаряется. В глубоком вакууме атомы алюминия летят по прямым линиям. Когда они ударяются о поверхность напыляемой детали, они прилипают к ней, образуя плёнку.

Далее алюминиевый слой покрывают защитным слоем из прочной пластмассы. Затем обрабатывают и полируют центральное отверстие и внешнюю кромку диска, а на защитном слое формируют этикетку.

Благодаря хорошо продуманной конструкции компакт-диска, информация, содержащаяся на нем в виде пит, надежно защищена от всякого рода повреждений: с одной стороны - прозрачным материалом самого диска, с другой – слоем прочной пластмассы и этикеткой. Так что добраться до нее, не разрушив сам компакт-диск, невозможно.

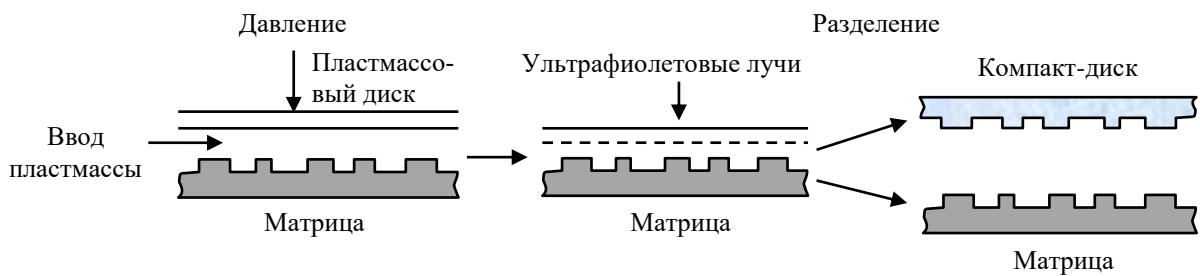


Рис. 2.19. Фотополимеризационный способ тиражирования

Считывание информации осуществляется со стороны прозрачной основы, т.е. сквозь всю толщину диска. Поскольку считывающий луч фокусируется на дорожке, которая находится глубоко внутри компакт-диска, то на его поверхности размеры считывающего пятна еще достаточно велики (около 1 мм) и мелкие пылинки и царапины практически не влияют на величину интенсивности отраженного света. Можно сказать, что считывающий луч их попросту «не видит» (рис. 2.20).

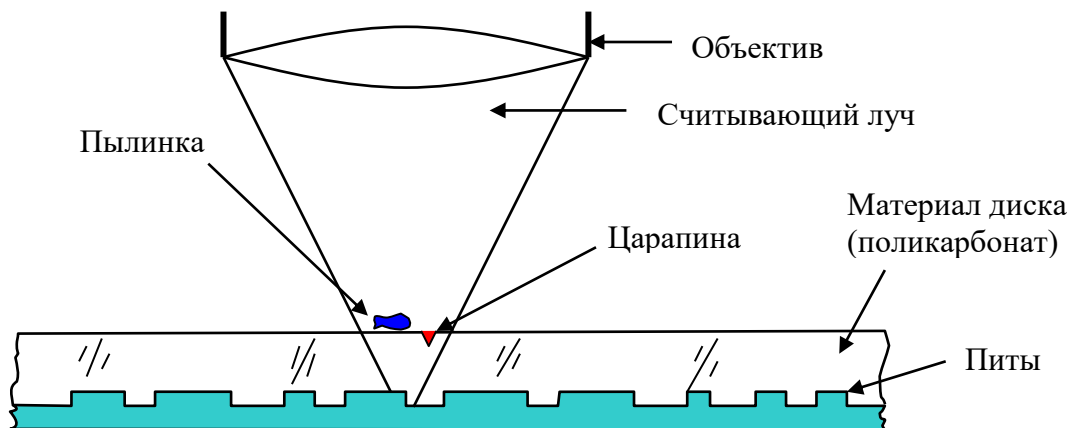


Рис. 2.20. Считывание информации сквозь прозрачный материал основы компакт-диска

Как уже было сказано, для изготовления мастер-диска используют газовые лазеры, имеющие сравнительно малую длину волны излучения. Плоскостность стеклянного диска, который используется для изготовления диска-оригинала, гораздо выше, чем у стандартного тиражированного компакт-диска. Это позволяет использовать для фокусировки объектив с гораздо большей числовой апертурой, чем ее стандартное значение в формате CD  $NA = 0,45$ . Как правило, значение  $NA = 0,7 \div 0,8$ . В этих условиях диаметр диска Эйри также получается небольшим –  $0,5 \div 0,8$  мкм. Высокое значение светочувствительности фоторезиста для этой длины волны позволяет получить ширину пит также равную  $0,5 \div 0,8$  мкм. Если бы использовался лазер с длиной волны  $0,78$  мкм и объектив с  $NA = 0,45$ , то пит с такими размерами получить бы не удалось.

Теперь более подробно о глубине пит. Если рассматривать фазовые соотношения между лучом, отраженным от пита, и лучом, отраженным от плоской поверхности в промежутках между питами, то наибольшую разницу энергий между этими двумя сигналами можно получить, если разность фаз между ними будет, строго говоря, равна  $n\pi$ , где  $n$  – нечетное число. Кроме того, требуется, чтобы диаметр считывающего пятна был гораздо больше, чем ширина пита. При этом энергия света, отражаемого от освещаемой части пита ( $S_1$ ), с учетом неравномерности распределения света внутри диска Эйри, должна быть примерно равна энергии света, отражаемого от его окрестностей ( $S_2$ ) (рис. 2.21). Тогда при наличии пита энергия отраженного пучка будет минимальной из-за того, что два противофазных пучка взаимно скомпенсируют друг друга. Обычно выбирают разность фаз, равную  $\pi$ , что соответствует разности хода луча  $\lambda/2$ . Такая разность хода получится при глубине пит равной  $\lambda/4$ .

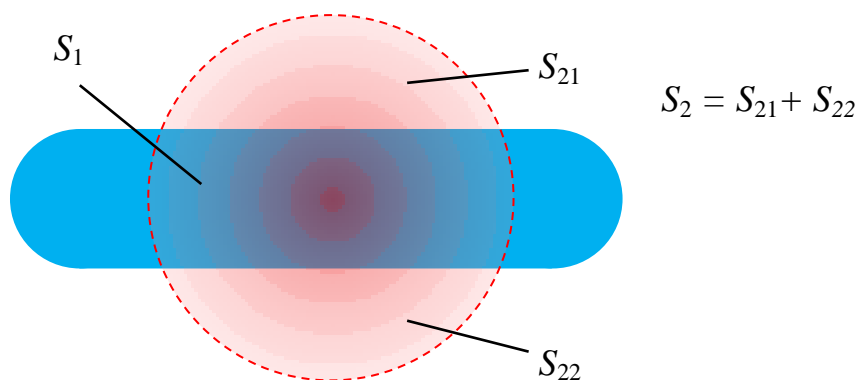


Рис. 2.21. Желательное соотношение площадей диска Эйри и освещаемой части пита

$S_1$  - освещаемая часть пита;

$S_2 = S_{21} + S_{22}$  - освещаемая часть окрестностей пита

Поскольку длина волны полупроводникового лазера, используемого для считывания компакт-диска, равна  $0,78$  мкм, то оптимальная глубина

пит должна быть равна  $\lambda/4 = 0,78/4 = 0,195$  мкм. Однако питы располагаются внутри прозрачного диска из поликарбоната, который имеет показатель преломления около 1,5. Это означает, что свет внутри такого материала движется в 1,5 раза медленнее, чем в воздухе. Поэтому в расчет глубины пит необходимо внести соответствующую поправку, которая приведет к величине  $0,195/1,5 \approx 0,13$  мкм. Таким образом, максимальную разницу уровней сигналов, отраженных от пита и от промежутка (глубина модуляции), следует ожидать при глубине пит, равной 0,13 мкм.

Однако существует еще одно соображение, которое следует учитывать при расчете глубины пит. При использовании для автотрекинга (слежения за дорожкой) дифракционного метода, требуется, чтобы глубина пит была меньше, чем  $\lambda/4$ . При глубине пит, равной  $\lambda/4$  обеспечивается максимальная глубина модуляции отраженного луча, но на двухплощадочном фотоприемнике, который здесь используется, не образуется разностного сигнала, свидетельствующего о наличии ошибки слежения за дорожкой. Светотеневая картина на фотоприемнике получается симметричной, и ось симметрии совпадает с линией раздела фотоприемника на две части. Максимальное значение сигнала ошибки получается при глубине пит, равной  $\lambda/8$ . По этой причине принято решение на дисках CD делать глубину пит равной 0,1 мкм. При таком незначительном изменении глубины пит степень модуляции и уровень воспроизводимого сигнала уменьшаются незначительно. Надо заметить, что и длина волны излучения лазера тоже не всегда равна в точности 0,78 мкм. В зависимости от количества примеси алюминия в арсенид-галлиевом лазере (точнее, в трехэлементном GaAlAs лазере), длина волны его излучения может меняться в пределах  $0,76 \div 0,82$  мкм. Но это, также, как и незначительные изменения глубины пит, не оказывает существенного влияния на уровень воспроизводимого сигнала.

Поскольку модуляция интенсивности лазерного пучка при считывании информации с тиражированного компакт-диска получается за счет разности фаз отраженного от имеющегося на его поверхности микрорельефа света, то такой метод записи называют *рельефно-фазовым*. Хотя сигнал с фотоприемника при этом получается модулированным по амплитуде.

Следует отметить, что из-за неравномерности распределения света в лазерном пучке, края пита не получаются строго вертикальными, как этого хотелось бы для простоты расчета передаточной функции оптической системы (рис. 2.22,а). Реальная форма пита напоминает футбольный стадион, как показано на рис. 2.22,б. Это факт следует учитывать при расчете амплитудно-частотной характеристики воспроизведения.

Еще одним фактором, который следует учитывать, является разброс размеров пит. Реальные размеры пит зависят от энергии светового луча, формирующего их в процессе изготовления мастер-диска, и от времени «проявления» записанного материала, в процессе которого засвеченные участки фоторезиста растворяются и образуется микрорельеф. Даже при

самом тщательном контроле всех параметров на дорожке записи формируется только около 50% пит стандартной длины и ширины. Такой разброс приводит к разбросу длительности воспроизводимых сигналов, который зависит еще и от длины волны воспроизводящего лазера и точности поддержания его мощности [49-52].

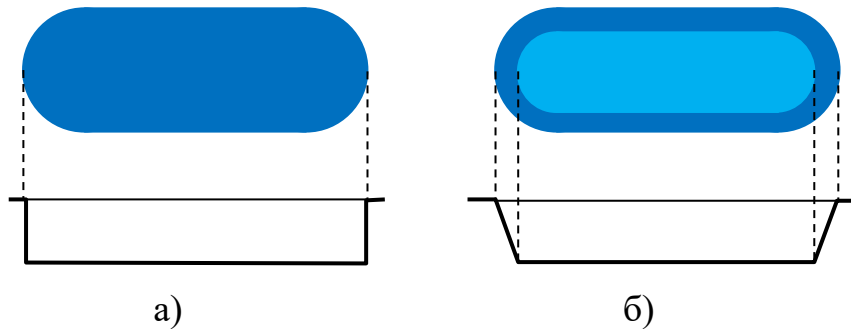


Рис. 2.22. Формы пит: а) идеальная; б) реальная

Однако все неточности в изготовлении микрорельефа оптического диска не так уж и опасны, поскольку, как станет понятно из дальнейшего изложения, в воспроизводящем устройстве их несложно компенсировать разнообразными электронными методами.

## 2.4.2. ДИСКИ ДЛЯ ЗАПИСИ

Диски для записи имеют несколько иную конструкцию в сравнении с дисками только для чтения. Прежде всего, вместо микрорельефа из пит, они имеют регистрирующий слой из специального состава, который позволяет фиксировать записываемую информацию в виде меток с пониженной отражающей способностью («виртуальных» пит). При воспроизведении дорожки с такими питами отраженный луч тоже будет модулироваться по интенсивности – как и в случае реальных пит на дисках –ROM.

Регистрирующий слой дисков с однократной записью (-R) способен изменять свое состояние только один раз. Изменение записанной информации здесь невозможно.

Регистрирующий слой перезаписываемых дисков (-RW, -RE, -RAM) способен изменять свое состояние многократно, поэтому допускает многократную перезапись имеющейся на нем информации.

Однако записываемые диски все-таки имеют микрорельеф, но не в виде дорожек из пит, а в виде *спиральной канавки (groove)*, которая необходима для того, чтобы луч лазера в процессе записи мог следовать по поверхности диска точно по спирали и с заданным шагом (расстоянием между дорожками). Структура диска CD-R показана на рис. 2.23.

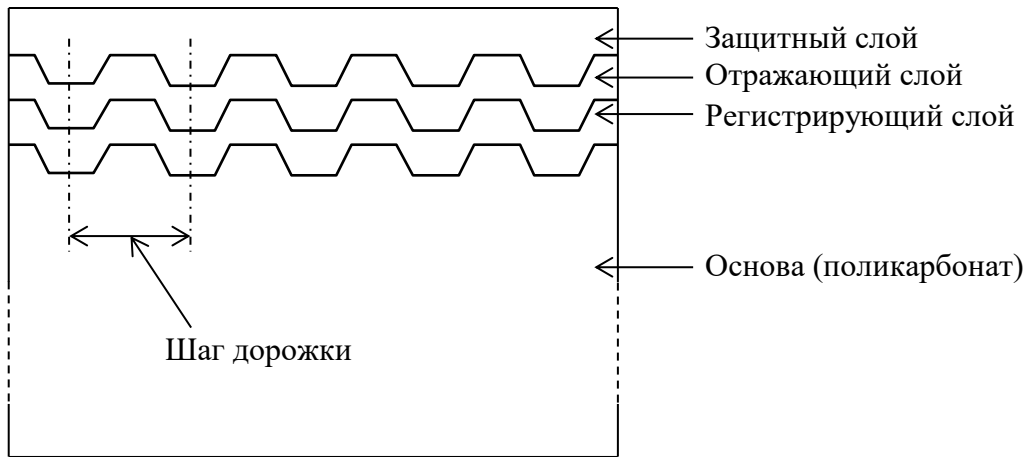


Рис. 2.23. Структура диска CD-R (разрез поперек дорожек)

Кроме того, стенки канавки имеют волнообразную форму (рис. 2.24). Величина колебаний дорожки в радиальном направлении (*вобуляция*) у разных форматов разная. Например, у дисков CD-R,RW она составляет  $\pm 30$  нм, а у дисков BD-R,RE –  $\pm 10$  нм (рис. 2.25). Вобуляция необходима для того, чтобы обеспечить постоянство линейной скорости (CLV – Constant Linear Velocity) при записи диска, а также содержит в себе информацию об адресе каждого конкретного участка дорожки. Длина волны (или частота) вобуляции у разных форматов также разная. У дисков CD она соответствует частоте 22,05 кГц, т.е. половине частоты дискретизации в формате CD 44,1 кГц, в формате BluRay задана длина волны вобуляции – 5 мкм (рис. 2.25). Подробнее об особенностях записываемых дисков разных форматов будет сказано в соответствующих разделах.

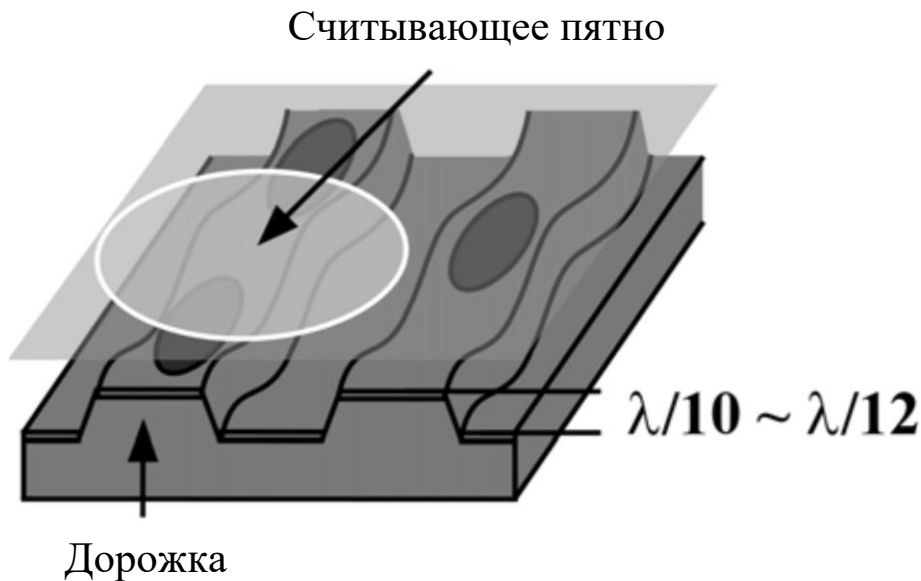


Рис. 2.24. Структура информационного слоя записываемого BD-диска

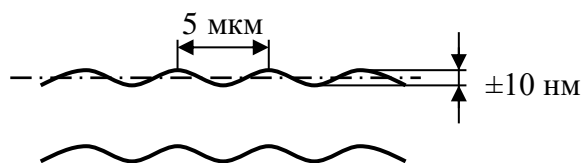


Рис. 2.25. Параметры вобуляции в формате BluRay

Основа записываемого диска выполнена из того же самого поликарбоната, что и у дисков только для чтения. Из того же материала (прочная пластмасса) изготавливается и защитный слой с этикеткой. Спиральный микрорельеф записываемого диска формируется в процессе тиражирования заготовок – также как и микрорельеф из пит у дисков ROM. Шаг дорожки такой же, как и у дисков для считывания данного формата. Например, у дисков CD-R,RW – 1,6 мкм. Затем на заготовки из поликарбоната методом центрифугирования наносится регистрирующий слой, а после него - тем же способом, что и на диски ROM, наносится металлизированный отражающий слой толщиной 50-100 нм. Однако здесь считывающему лучу приходится дважды проходить через регистрирующий слой, который в исходном состоянии хотя и почти прозрачен, но все же менее прозрачен, чем поликарбонат. По этой причине стремятся обеспечить повышенную отражательную способность металлизированного слоя, из-за чего у дисков для однократной записи материалом для него служит не алюминий, а серебро или даже золото (особенно у дисков для профессиональной записи).

Регистрирующие слои у дисков для однократной и многократной записи разные.

У дисков для однократной записи материалом регистрирующего слоя служат, как правило, органические красители: цианин (cyanine), фталоцианин (phthalocyanine) и азокраситель (azo). Все эти материалы обладают максимумом светочувствительности для излучения с длиной волны 780 нм, поэтому широко использовались при изготовлении дисков CD-R.

**Цианиновые** диски со стороны прозрачной основы имеют глубокий синий или сине-зеленый цвет (морская волна). Сам по себе цианин синий. Если отражающий слой выполнен из серебра, то и цвет диска будет синий (кобальтовый). Если отражающий слой выполнен из золота, то желтый цвет золота в сочетании с синим цианином будет выглядеть бирюзовым (сине-зеленым). Регистрирующие слои из цианина отличаются достаточно высокой чувствительностью к излучению лазера, но, вместе с тем, и относительной неустойчивостью, так как со временем разлагаются под воздействием света. Этот недостаток впоследствии был устранен путем введения в цианин добавок специального стабилизирующего вещества, благодаря которому заявленная производителями долговечность их составляет 70 лет. Выпускаются они фирмами BASF, TDK, VITSUBISHI, RICON и др.

**Фталоцианиновые** диски имеют желто-зеленый (салатный) цвет, если отражающий слой выполнен из серебра, поскольку фталоцианин сам по себе желто-зеленый, и золотисто-желтый, если отражающий слой выполнен из золота. Поэтому такие диски иногда в обиходе именуя «золотыми». Существует еще усовершенствованная разновидность фталоцианина, которая имеет аквамариновый (зеленовато-голубой) оттенок. Фталоцианиновые слои более устойчивы к воздействию естественного светового излучения, и срок их службы, как утверждают производители, может достигать 100 лет. Диски с такими слоями лучше других работают при повышенных скоростях записи, когда мощность излучения лазера велика. Выпускаются компаниями KODAK, MITSUI и TOATSU CHEMICALS.

Диски с регистрирующим слоем из **азотокрасителя**, разработанные фирмами MITSUBISHI и VERBATIM, имеют глубокий синий цвет при наличии отражающего слоя из серебра. Если отражающий слой выполнен из золота, то цвет таких дисков будет зеленым. Они хорошо работают при низких скоростях записи – до 4-кратной. Срок их службы – до 100 лет.

Однако относительно срока службы записываемых дисков (любых типов) следует заметить следующее. Предполагаемые сроки (70, 100, а то и 200 лет) рассчитывались производителями с помощью технологий ускоренного старения. Но определяющими здесь являются условия эксплуатации конкретного изделия – температура окружающей среды, влажность, наличие химически активных газов в атмосфере, пребывание изделия на свету (особенно ярком дневном), наличие пыли, царапин, отпечатков пальцев на поверхности носителя и пр. Реальные сроки службы дисков могут очень сильно отличаться от заявленных производителями – вплоть до 2-3 месяцев, а то и меньше. Поэтому, если записанный материал предназначен для длительного хранения, то с носителем следует обращаться очень бережно. И хранить его лучше всего в каком-то затемненном месте в фабричной упаковке.

В процессе записи информации лучом лазера происходит разогрев структуры подложка-слой органического красителя-отражающий слой примерно до 250°C, и она деформируется, образуя питы (рис. 2.26). При считывании свет лазера на таких питах будет рассеиваться, обеспечивая разницу в интенсивности отраженного пучка на деформированных и недеформированных участках дорожки.

**Реверсивные диски** (-RW, -RE, -RAM), допускающие многократную перезапись, конструктивно похожи на диски -R. Однако вместо органического красителя здесь роль регистрирующей среды выполняет слой неорганического вещества (сплав серебра, сурьмы, индия и теллура), способного многократно менять своё состояние из кристаллического в аморфное и обратно. Кроме того, регистрирующий слой с обеих сторон защищается тонкими пленками из диэлектрика (рис. 2.27). Отражающий слой, как и у дисков только для считывания, выполняется из алюминия.

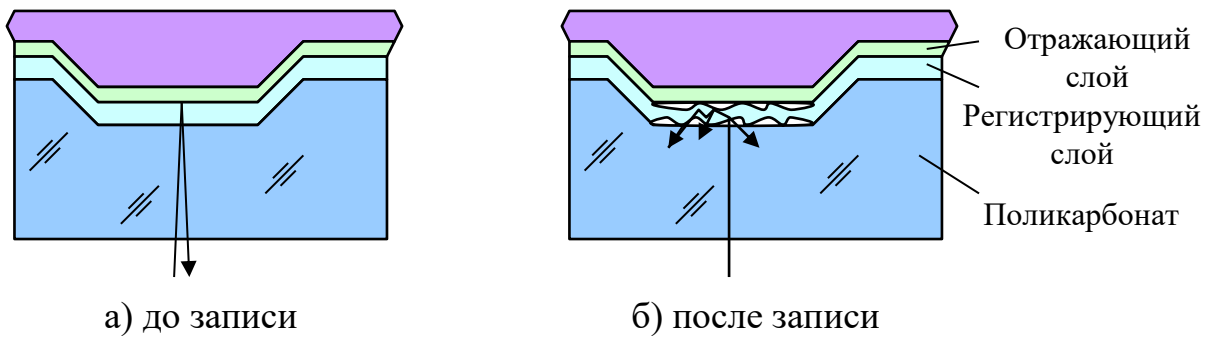


Рис. 2.26. Формирование пита на регистрирующем слое диска CD-R

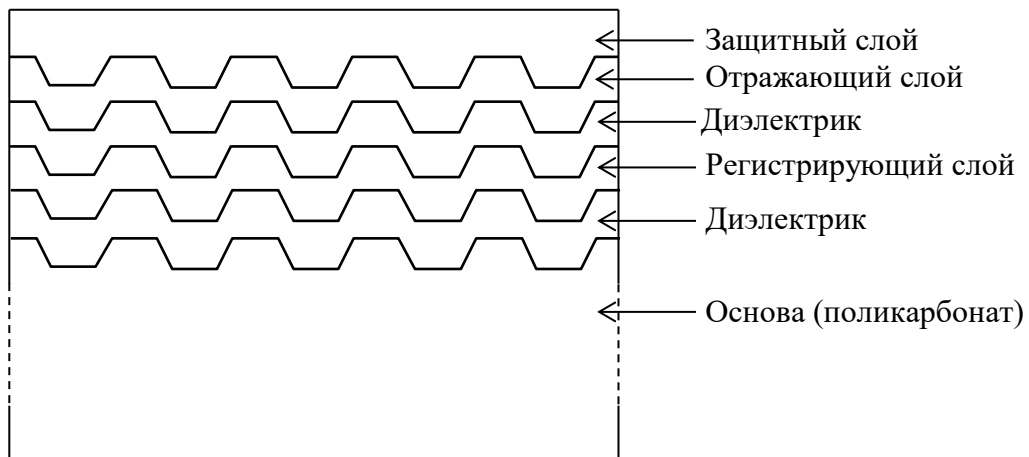


Рис. 2.27. Структура реверсивного диска (разрез поперек дорожек)

Изменение состояния регистрирующего слоя у реверсивных дисков происходит при нагревании до определенных температур: при одной температуре состояние изменяется на кристаллическое, при другой - на аморфное. Исходное состояние регистрирующего слоя у диска без записи – кристаллическое, и свет от него хорошо отражается. При записи луч лазера, мощность которого должна составлять 8-14 мВт, нагревает материал регистрирующего слоя выше температуры плавления (500-700°C). После того как луч смещается, происходит быстрое охлаждение места нагрева и материал переходит в аморфное состояние. В этом состоянии материал будет поглощать часть света, и интенсивность отраженного пучка уменьшится. Разницу в интенсивности участков с кристаллической и аморфной поверхностью легко можно зарегистрировать.

Из двух возможных состояний регистрирующего слоя более стабильным является кристаллическое. Поэтому материал имеет тенденцию самопроизвольно возвращаться к нему и записанная информация со временем может быть разрушена. Этот процесс используют для стирания записи. При этом лазер работает в режиме средней мощности – от 4 до 8 мВт, нагревая материал до температуры примерно 200°C. Постепенное охлаждение возвращает его в исходное кристаллическое состояние.



В отличие от технологии однократной записи на органический краситель, запись на реверсивный неорганический материал нечувствительна к изменению длины волны излучения лазера, здесь важна только температура нагрева.

При записи на регистрирующий слой из органического красителя лазер включается только тогда, когда формируется пит. При записи реверсивных дисков лазер работает постоянно, но переключается из состояния высокой мощности – когда формируется пит, соответствующий аморфному состоянию регистрирующего материала, в состояние средней мощности, когда формируется промежуток между питами, соответствующий кристаллическому состоянию материала.

Слои диэлектрика, окружающие регистрирующий слой, выполняются из различных соединений кремния, кислорода, цинка и серы. Они необходимы для сохранения тепла при нагреве регистрирующего материала, увеличивая эффективность записи, и для предохранения от чрезмерного температурного воздействия соседние материалы - отражающего слоя и поликарбоната.

Отражающая способность реверсивных дисков незначительна – всего 15% у материала в аморфном состоянии и 25% у материала в кристаллическом состоянии. По этой причине в первое время после их появления на рынке не всякое воспроизводящее устройство способно было их считывать. Однако со временем вся вновь выпускаемая воспроизводящая аппаратура была адаптирована к их низкому оптическому контрасту, и такое затруднение было ликвидировано.

Как следует из вышеизложенного, свойства регистрирующих материалов разных дисков (как для однократной записи, так и реверсивных) довольно сильно отличаются. Поэтому все производители записывают рекомендуемые параметры записи на вводной дорожке диска в виде микрорельефа – как у дисков ROM. Это, прежде всего, режим работы (требуемая мощность) лазера при записи пит на диски с однократной записью и мощность лазера при записи пит и промежутков между ними для реверсивных дисков. Кроме того, регламентируется метод записи – на выступе канавки (on groove) или на ее дне (in groove) [49, 52, 53].

### 3. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ

Устройство, которое считывает информацию с дорожки на оптическом диске, называется *оптической головкой*. Оптическая головка состоит из полупроводникового лазера, оптической системы, фотоприемника и различных механических приспособлений, которые обеспечивают точное следование оптической головки по дорожке записи.

Питы на дорожке – как реальные, так и виртуальные, очень маленькие, и для того, чтобы их считать, требуется очень точно поддерживать расстояние между оптической головкой и дорожкой записи – так, чтобы дорожка всегда находилась точно в фокусе считывающего объектива, а также, чтобы центр считывающего пятна постоянно находился на осевой линии дорожки. Для того чтобы обеспечить такое положение головки, в воспроизводящих устройствах предусмотрены системы *автофокусировки* и *автотрекинга* (автоматического слежения за дорожкой). Кроме того, для быстрого перемещения оптической головки по радиусу диска необходима *система автоматического управления позиционером*, т.е. механическим узлом, на котором закреплена оптическая головка.

Процесс считывания информации с оптического диска может осуществляться с некоторой постоянной скоростью, заданной стандартом на данный формат (это касается, в основном, считывания звуковых данных, как, например, в формате CD-Audio), а может осуществляться с переменной скоростью или даже прерывисто – если считываются видеоданные. При записи информации допускается многократное увеличение скорости поступления данных в записывающий узел – в десятки раз. Для обеспечения нужной скорости считывания или записи информации служит *система управления скоростью вращения диска*.

Еще одной системой важной автоматического регулирования является *система управления мощностью лазера*, задача которой поддерживать стабильный уровень излучаемой лазером световой энергии. Если этого не делать, то колебания мощности лазера приведут к сильным искажениям считываемого с диска сигнала или колебаниям размеров формируемых пит при записи.

Рассмотрим эти и некоторые другие системы более подробно.

#### 3.1. АВТОФОКУСИРОВКА

При воспроизведении информации с оптического диска необходимо, чтобы расстояние между фокусирующим объективом и дорожкой записи было равно фокусному расстоянию объектива. Максимально допустимые отклонения от этого положения в ту или иную сторону не должны превышать пределов его глубины резкости.

Глубина резкости объектива  $d$  зависит от его числовой апертуры  $NA$  и от длины волны  $\lambda$  излучения лазера

$$d = \pm \frac{\lambda}{2NA^2} \quad (3.1)$$

Глубина резкости объектива  $d$ , равно как и минимальный диаметр светового пятна  $b$ , определяемый по формуле (2.1), есть проявления физических недостатков реальных линз, известных под общим названием **абберации**. Абберации бывают монохроматические и хроматические.

**Монохроматические абберации** (*сферическая абберация, кома, астигматизм, кривизна поля изображения, дисторсия*) проявляются в той или иной степени всегда, независимо от длины волны и состава излучения.

**Хроматические** или **цветовые абберации** обусловлены дисперсией света и объясняются тем, что показатель преломления оптической среды зависит от длины световой волны. Коэффициент преломления коротких волн больше, чем длинных, т.е. лучи синего цвета преломляются линзами объектива сильнее, чем красного. Как следствие, изображения предмета, формируемые лучами различного цвета, не совпадают друг с другом, что приводит к появлению цветных артефактов в виде окрашенных контуров предметов на фотографиях или телевизионных изображениях. Это и есть хроматические абберации. Поскольку в оптической записи информации используется монохроматическое излучение, то хроматические абберации здесь проявляться не могут.

Кроме того, в силу особенностей использования излучения в оптической записи (распространение излучения вдоль оптической оси объектива, точечный характер отображаемого объекта (пита), перпендикулярность падающего на оптический диск считывающего луча), такими абберациями как кома, кривизна поля изображения и дисторсия, которые характерны для фотографии и видеосъемки, также можно пренебречь. Неприятным явлением остается только сферическая абберация. А такой абберацией как астигматизм, можно даже воспользоваться в своих интересах.

Свет от всякого точечного источника, пройдя через идеальный объектив, должен был бы сформировать бесконечно малую точку на фокальной плоскости. Но на деле этого не происходит, и точка превращается в пятно конечных размеров. Объясняется все причинами вполне понятными. Форма сферической линзы такова, что лучи света, проходящие через линзу вблизи её края, преломляются сильнее, чем приосевые (параксиальные) лучи. Другими словами, изначально параллельные лучи света падают на сферическую поверхность линзы под разными углами. Чем дальше лежит путь луча от оптической оси объектива, тем больше угол его падения, и тем сильнее он преломляется (рис. 3.1). В конечном итоге лучи параллельного пучка после преломления пересекаются не в одной точке, а в нескольких точках, расположенных на главной оптической оси. Наличие сферической абберации затрудняет получение светового пятна достаточно малых размеров.

При этом *продольная сферическая aberrация* определяет глубину резкости  $d$  объектива, а *поперечная сферическая aberrация* - минимальный диаметр светового пятна  $b$ . В пределах глубины резкости диаметр пучка примерно одинаковый. Этот участок пучка иногда называют *перетяжкой*.

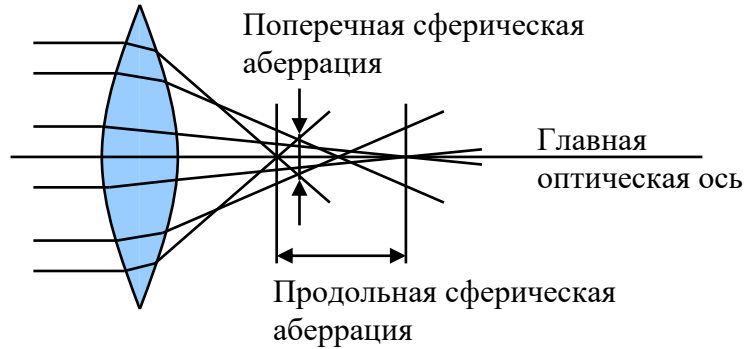


Рис. 3.1. Сферическая aberrация

Величина сферической aberrации зависит от формы линзы, а также от ее положения относительно объекта или плоскости изображения.

Стремление увеличить количество информации, размещаемой на единице площади носителя, заставляет разработчиков оптических систем записи уменьшать длину волны лазерного излучения, а числовую апертуру объектива – увеличивать. Как это следует из формулы (2.1), диаметр светового пятна при этом уменьшается. Однако выражение (3.1) показывает, что при этом уменьшается глубина резкости и, следовательно, ужесточаются требования к точности фокусировки.

Например, длина волны излучения лазера и числовая апертура объектива в формате CD в соответствии со стандартом составляют:  $\lambda = 0,78$  мкм,  $NA = 0,45$ . Поэтому глубина резкости  $d$  оптической системы здесь:

$$d = \pm \lambda / [2(NA)^2] = 0,79 \text{ мкм} / [2 \cdot 0,45^2] = \pm 1,95 \text{ мкм}$$

Однако, максимально допустимые вертикальные биения диска при воспроизведении, которые также определены стандартом, могут достигать  $\pm 0,5$  мм, т.е. могут быть примерно в 250 раз большими.

Для того чтобы в таких условиях обеспечить нужную дистанцию между объективом и дорожкой записи, приходится использовать систему автофокусировки.

Суть ее работы состоит в следующем. Прежде всего, определяется величина и знак ошибки фокусировки и представляется в виде соответствующего электрического сигнала. Затем этот сигнал усиливается до необходимого уровня и управляет исполнительным механизмом, который, перемещая объектив вверх или вниз вдоль оптической оси, компенсирует образовавшуюся ошибку фокусировки.

Известно несколько способов детектирования ошибки фокусировки, которые используются в оптических проигрывателях (CD, DVD, BD).

### 3.1.1. МЕТОД АСТИГМАТИЗМА ПУЧКА

Этот метод, как следует из его названия, основан на использовании уже упоминавшегося ранее явления астигматизма, которое состоит в том, что лучи одного и того же пучка, распространяющиеся в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, после прохождения оптической системы не собираются в одном месте, а имеют разные точки сходимости. Наличие астигматизма делает невозможным получение одновременной резкости вертикальных и горизонтальных линий. Изображение точки В при наличии астигматизма передается в виде горизонтального В' или вертикального В'' отрезка прямой (рис. 3.2), которые к тому же находятся на разных расстояниях от фокусирующей линзы.

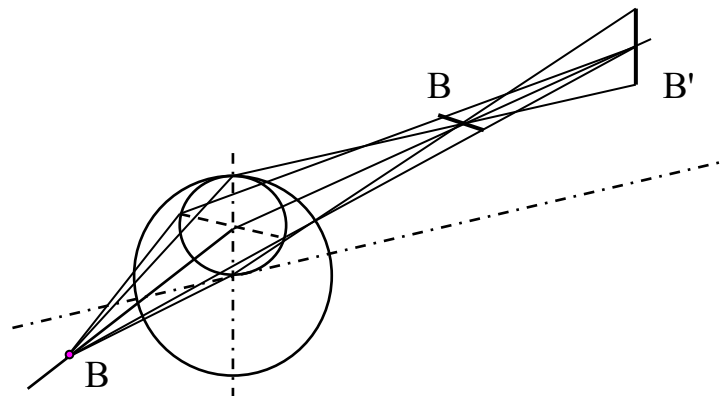


Рис. 3.2. Картина астигматизма при прохождении света через сферическую линзу

Явление астигматизма возникает при недостаточно точной сферичности линзы, но еще сильнее оно проявляется, когда объект находится под углом к ее оптической оси. При этом поверхность линзы для наклонных лучей не будет строго симметричной, что приведет к искажению изображения. Проявление астигматизма очень неприятно для фотографии и видеосъемки, где с ним приходится бороться.

В системах автофокусировки для создания требуемой картины астигматизма отраженный от поверхности компакт-диска пучок намеренно пропускается через специально подобранную цилиндрическую линзу (рис. 3.3). Возникающее при этом распределение света в пучке показано на рис. 3.4. Наибольший интерес здесь представляет отрезок луча между точками А и Е (рис. 3.4,а), который и используется для детектирования ошибки фокусировки.

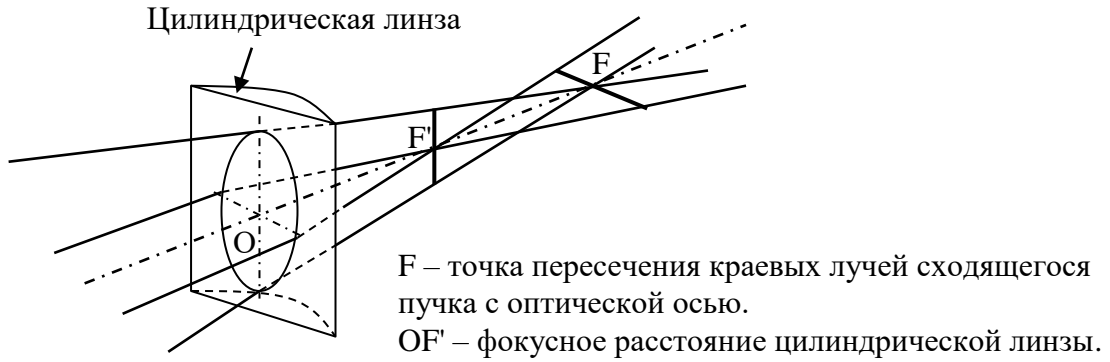


Рис. 3.3. Картина астигматизма при прохождении сходящегося пучка через цилиндрическую линзу

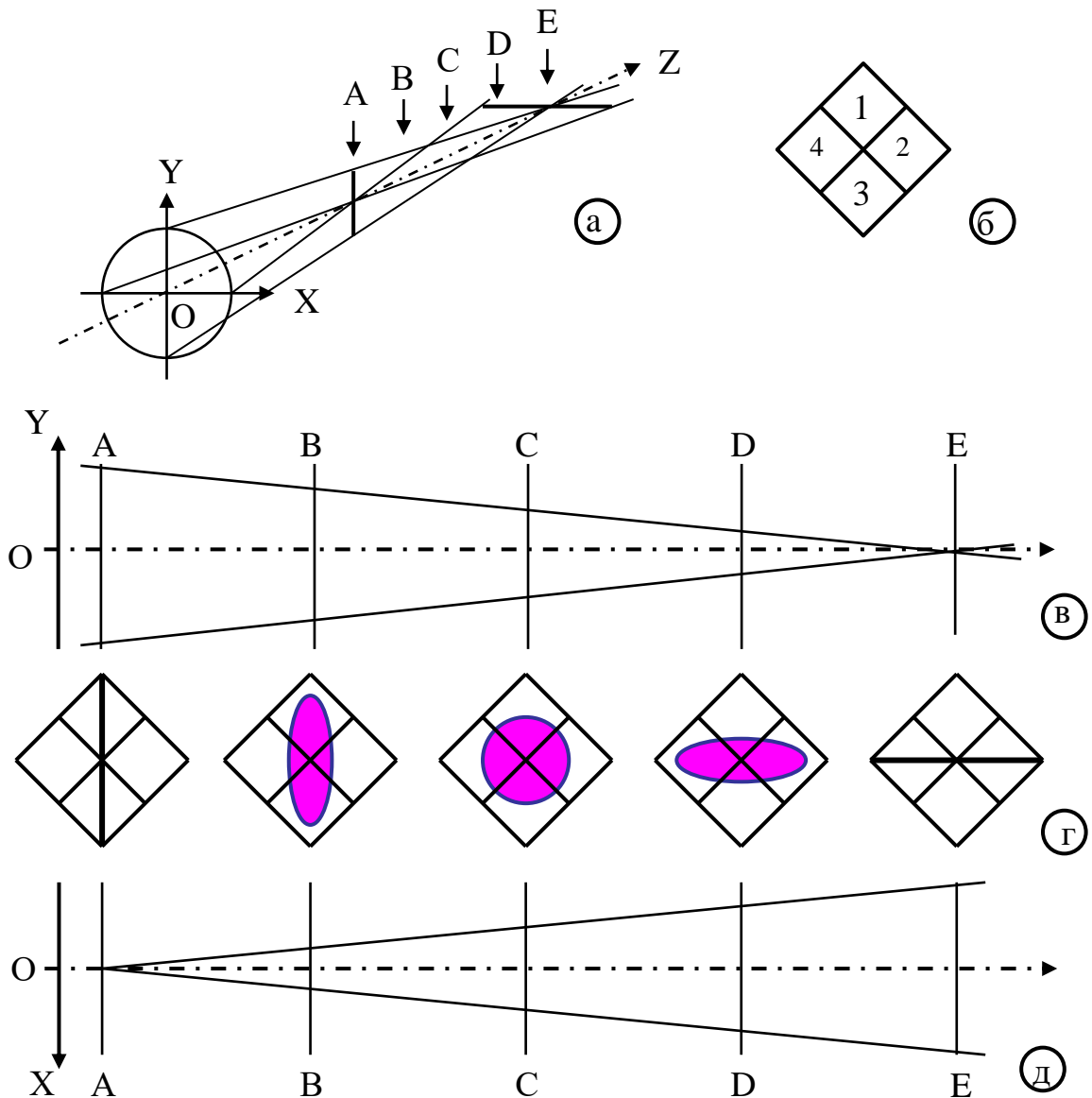


Рис. 3.4. Распределение света в астигматичном пучке:  
 а – общий вид сходящегося пучка; б – четырехплощадочный фотоприемник; в – сечение пучка плоскостью YOZ; г – форма светового пятна в пучке; д – сечение пучка плоскостью XOZ

Если рассматривать сечение пучка продольной вертикальной плоскостью YOZ (рис. 3.4,в), то фокус в этой плоскости соответствует точке E. Если рассматривать сечение того же отрезка луча горизонтальной плоскостью XOZ (рис. 3.4,д), то здесь фокус соответствует точке A, после чего пучок вновь расходится.

Таким образом, если рассматривать теперь сечение пучка плоскостью, перпендикулярной направлению распространения луча, то форма светового пятна в промежутке между точками A и E будет плавно изменяться от вертикальной черты (точка A) до горизонтальной черты (точка E), как показано на рис. 3.4,г. Вначале она принимает форму вертикального эллипса (точка B), который, постепенно расширяясь и уменьшаясь по высоте, превращается в окружность (точка C). Затем окружность начинает вытягиваться по горизонтали и превращается в горизонтальный эллипс (точка D), а он, в свою очередь, в горизонтальную черту (точка E).

Чтобы использовать явление астигматизма для автофокусировки, на пути луча помещают четырехплощадочный фотоприемник, расположение площадок которого подобно показанному на рис. 3.4,б,г. Конструкция оптической системы, реализующей данный метод, представлена на рис. 3.5.

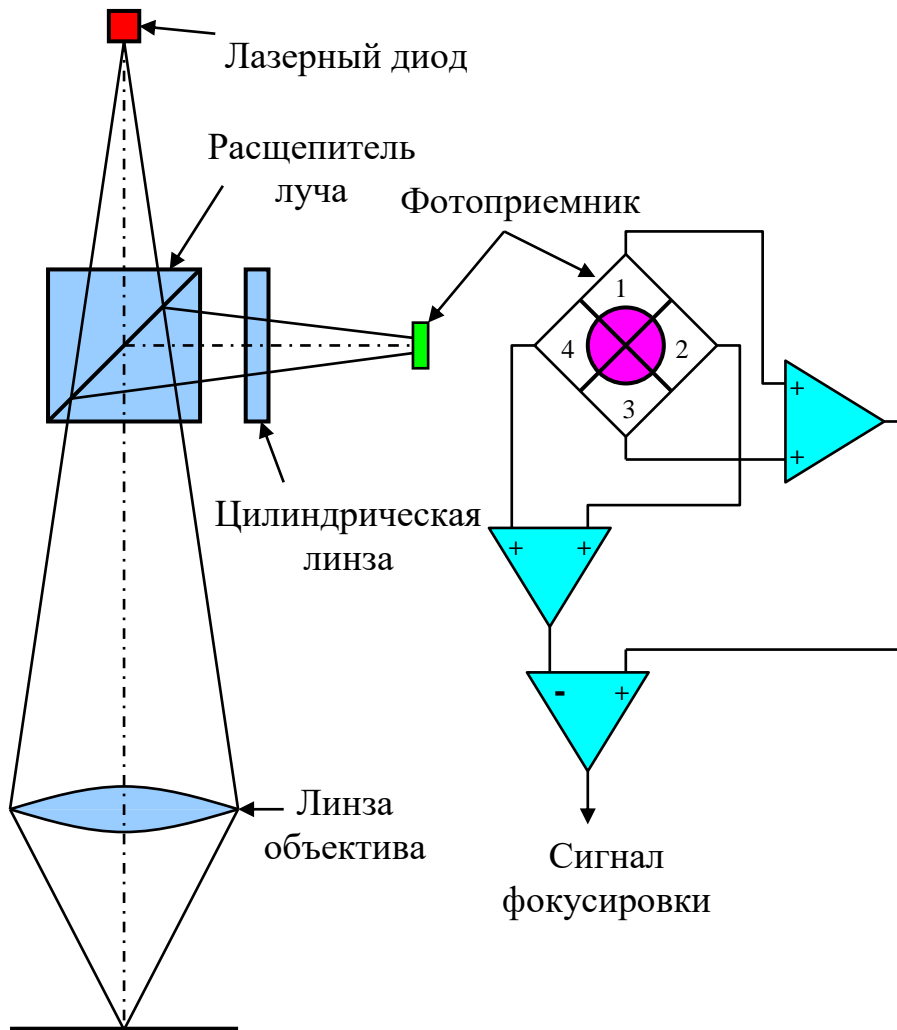


Рис. 3.5. Схема фокусировки по методу астигматизма пучка

Излучение лазерного диода фокусируется линзой объектива на поверхности компакт-диска и, отражаясь от нее, попадает на расщепитель луча. Наклонная грань расщепителя направляет отраженный пучок на фотоприемник. Между расщепителем и фотоприемником размещается цилиндрическая линза.

Расположение фотоприемника в системе выбирается таким образом, что, когда расстояние от объектива до дорожки в точности равно фокусному, световое пятно на его поверхности имеет форму круга, причем центр этого круга должен совпасть с геометрическим центром фотоприемника. Тогда все четыре его площадки выработают одинаковые электрические сигналы (рис. 3.4,г, сечение С).

Если в режиме слежения расстояние между объективом и дорожкой изменится в ту или иную сторону, то круг на поверхности фотоприемника трансформируется в эллипс (рис. 3.4,г). Освещенность пар площадок 1-3 и 2-4 при этом изменится. Одна из пар получит света меньше и выработает меньший электрический сигнал, другая получит света больше и выработает больший электрический сигнал. Если просуммировать такие сигналы и определить разность полученных сумм, то величина и знак такой разности будут соответствовать величине и знаку ошибки фокусировки.

Разностный сигнал используют для управления исполнительным механизмом фокусировки, который и компенсирует ошибку, перемещая объектив в ту или иную сторону по вертикали.

### 3.1.2. МЕТОД ФУКО

Этот метод основан на использовании призмы Фуко, расщепляющей луч лазера на два пучка (рис. 3.6).

Если отраженный от поверхности компакт-диска луч точно сфокусирован на ребре призмы, то, расщепляясь, он образует два одинаковых пучка. Если на пути этих пучков поместить два двухплощадочных фотоприемника, то на каждом из них образуется световое пятно в виде круга. Фотоприемники следует расположить так, чтобы граница между площадками проходила точно через середину круга (рис. 3.6,б). При этом разностный сигнал от пар 2-3 и 1-4, полученный с помощью схемы на рис. 3.6,г, будет равен нулю, что означает точную фокусировку объектива головки на дорожке. При сближении объектива и компакт-диска фокальная плоскость будет приближаться к фотоприемникам. В результате световые пятна переместятся на элементы 1 и 4 (рис. 3.6,а), а разностный сигнал станет отрицательным. Если объектив и компакт-диск удаляются друг от друга, то удаляется и фокальная плоскость от фотоприемников. В результате световые пятна смещаются на элементы 2 и 3 (рис. 3.6,в), а разностный сигнал становится положительным (рис. 3.6,г).



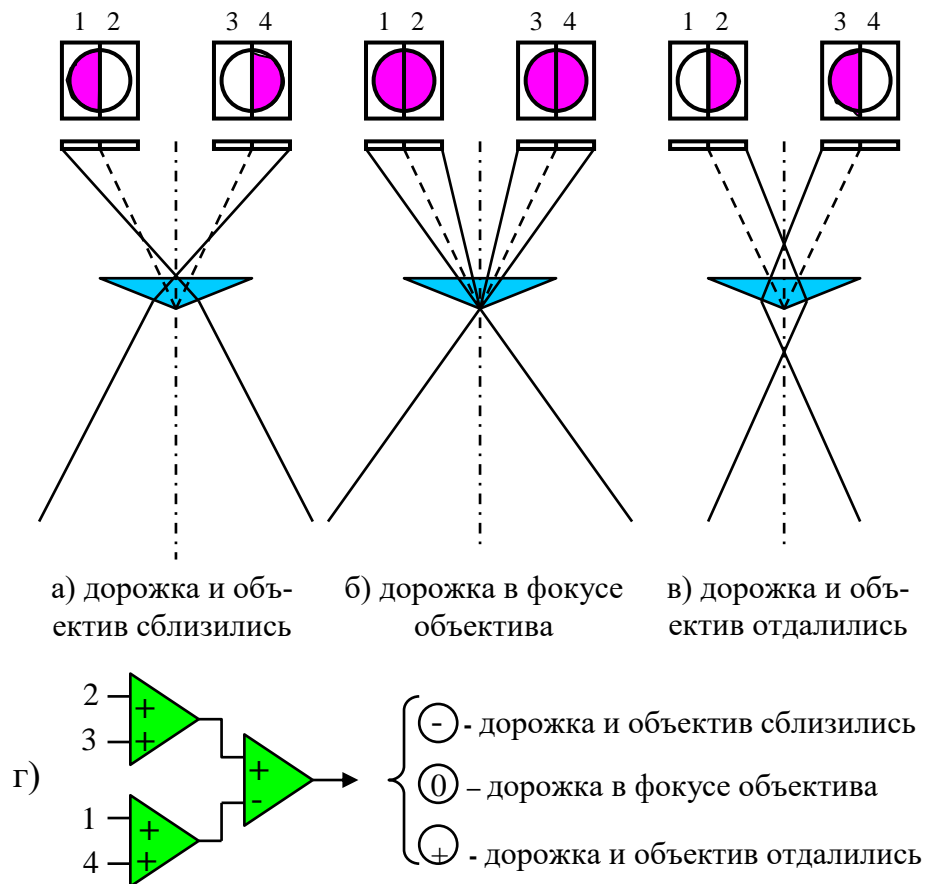


Рис. 3.6. Автофокусировка по методу Фуко

Полученный таким путем сигнал используется для управления исполнительным механизмом фокусировки.

### 3.1.3. МЕТОД ДВУХ ДИАФРАГМ

Схема автофокусировки по этому методу показана на рис. 3.7. Отраженный от поверхности оптического диска пучок разделяется на два с помощью полупрозрачного зеркала ПЗ. Коэффициенты отражения и пропускания зеркала одинаковы и равны 0,5, поэтому одна половина энергии света проходит сквозь него, другая – отражается. Фотоприемники ФП1 и ФП2 располагаются на одинаковом расстоянии от точки пересечения осей падающего и отраженного пучков. Диафрагмы Д1 и Д2 размещаются на одинаковом расстоянии от перетяжек разделенных пучков, но по разные стороны от них. Диафрагма Д1 падающего пучка располагается до перетяжки П1, а диафрагма Д2 отраженного пучка после перетяжки П2. Диаметр отверстия в каждой из диафрагм равен диаметру пучка в месте установки диафрагмы.

Система регулируется таким образом, что когда дорожка на диске находится точно в фокусе считывающего объектива, падающий и отраженный пучки проходят сквозь диафрагмы без перекрытия ею (рис. 3.7,а). В результате, фотоприемники ФП1 и ФП2 получают одинаковое количество световой энергии и вырабатывают одинаковые электрические сигналы. При этом на выходе дифференциального усилителя ДУ будет «0».

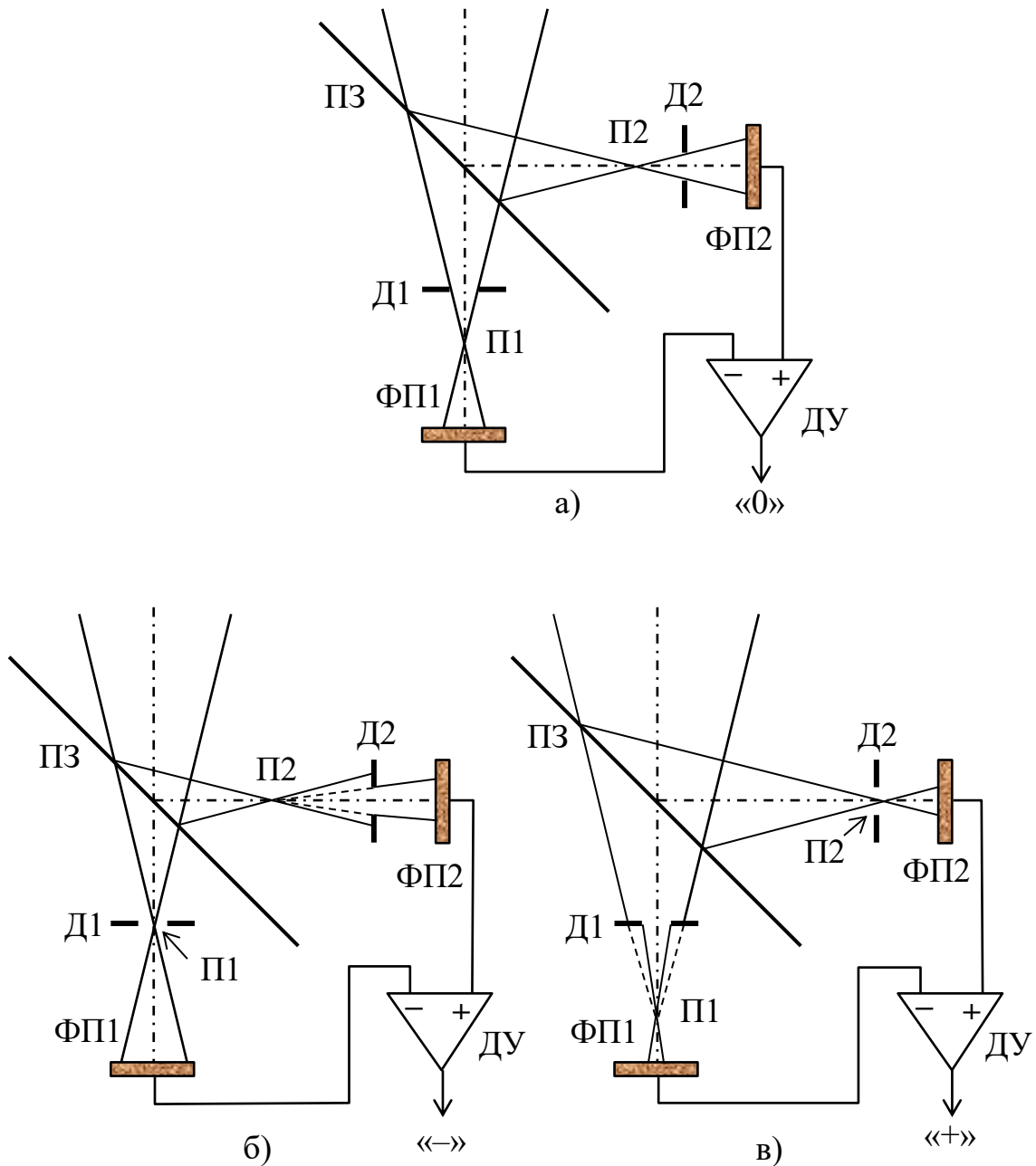


Рис. 3.7. Фокусировка по методу двух диафрагм:

а – дорожка в фокусе объектива; б – дорожка удалилась от объектива; в – дорожка приблизилась к объективу. ПЗ – полупрозрачное зеркало; ФП1 и ФП2 – фотоприемники; Д1 и Д2 – диафрагмы; П1 и П2 – линзы; ДУ – дифференциальный усилитель

Если в процессе считывания поверхность диска (а следовательно, и дорожка записи) удалится от объектива, то перетяжки в схеме автофокусировки переместятся ближе к полупрозрачному зеркалу (рис. 3.7,б). При этом диафрагма Д2 перекроет часть света, поступающего на фотоприемник ФП2. Перемещение же перетяжки П1 в пучке, прошедшем сквозь зеркало, на величину энергии света, падающего на фотоприемник ФП1, никак не повлияет. Поэтому сигнал с фотоприемника ФП1 будет больше, чем сигнал с фотоприемника ФП2, и дифференциальный усилитель ДУ выработает сигнал ошибки. В примере включения, показанном на схеме, он будет отрицательным.

Если поверхность диска (дорожка записи) приблизится к объективу, то перетяжки в схеме автофокусировки удалятся от полупрозрачного зеркала (рис. 3.7,в). Теперь уже диафрагма Д1 перекроет часть пучка, поступающего на фотоприемник ФП1. Отраженный пучок при этом пройдет сквозь диафрагму Д2 без ослабления. В этом случае фотоприемник ФП2 получит световой энергии больше, чем фотоприемник ФП1, и сигнал на выходе дифференциального усилителя ДУ будет положительным.

### 3.1.4. МЕТОД КРИТИЧЕСКОГО УГЛА

Структурная схема устройства, реализующего способ критического угла, показана на рис. 3.8.

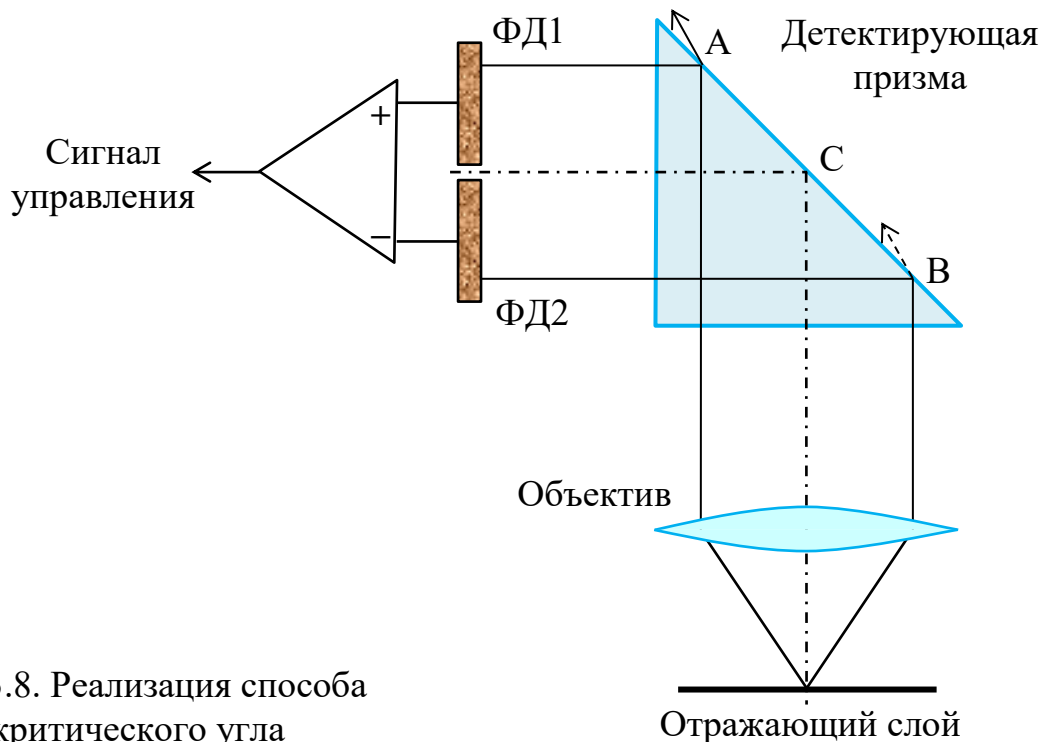


Рис. 3.8. Реализация способа критического угла

Параллельный световой пучок от лазера попадает в объектив и фокусируется на отражающем слое оптического диска. Система регулируется так, что если плоскость отражения находится в фокусе объектива, то отраженный пучок, вторично проходящий через объектив, также будет параллельным (рис. 2.9,а). Он направляется в детектирующую призму, положение которой по отношению к оси падающего пучка выбирается так, чтобы угол его падения на наклонную грань призмы был в точности равен критическому. Тогда преломления света не будет и весь световой пучок, отраженный наклонной гранью призмы, будет также параллелен и на каждую из двух площадок фотоприемника ФД1 и ФД2 попадет одинаковое количество световой энергии. Разностный сигнал, формируемый дифференциальным усилителем, будет равен нулю.

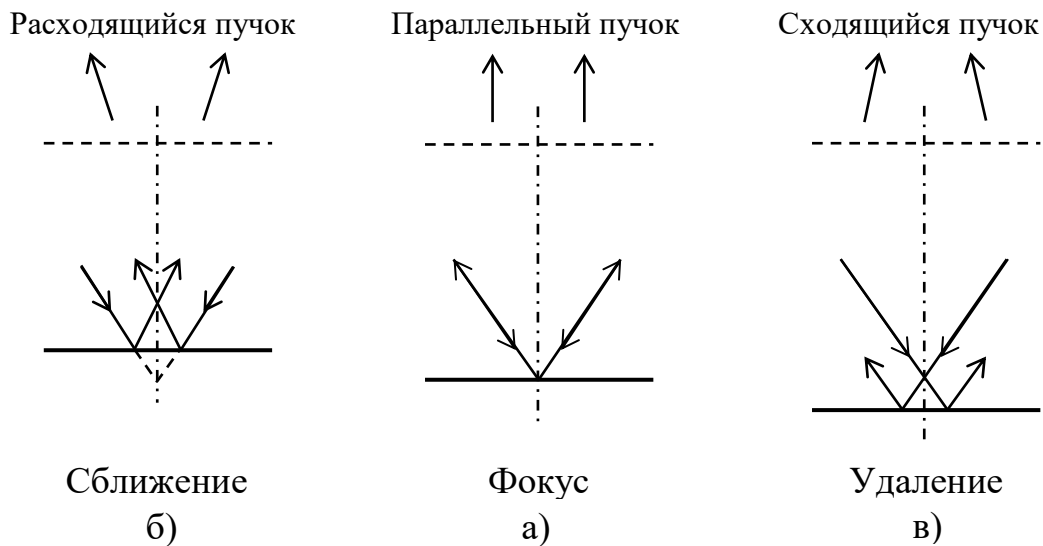


Рис. 3.9. Изменение характера отраженного пучка при разных расстояниях от объектива до отражающей поверхности диска

При приближении диска к объективу отраженный пучок становится расходящимся (рис. 3.9,в). Угол между пучком, падающим на наклонную грань детектирующей призмы на участке от точки С в направлении точки В (вниз по рисунку) станет меньше критического, и часть световой энергии уйдет за счет преломления за пределы призмы. Количество световой энергии, попадающей после отражения от наклонной грани призмы на фотоприемник ФД2, уменьшится, и дифференциальный усилитель выработает положительный сигнал ошибки фокусировки.

Если диск удалится от объектива, то световой пучок становится сходящимся (рис. 3.9,б). В этом случае меньше критического станет угол между пучком, падающим на наклонную грань детектирующей призмы на участке от точки С в направлении точки А (вверх по рисунку), и за счет преломления уменьшится количество световой энергии, попадающей на

фотоприемник ФД1. При этом дифференциальный усилитель выработает отрицательный сигнал ошибки фокусировки.

Разностный сигнал с выхода дифференциального усилителя можно использовать для управления исполнительным механизмом системы автофокусировки.

Кроме вышеописанных, существуют и другие способы автофокусировки, также основанные на свойствах лазерного излучения и особом построении оптической системы [24-26, 49-52, 54-65].

### 3.1.5. КОНСТРУКЦИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА АВТОФОКУСИРОВКИ

Исполнительный механизм фокусировки конструктивно напоминает устройство электродинамического громкоговорителя, только вместо диафрагмы (диффузора) в нем под воздействием электромагнитного поля перемещается линза объектива. Один из вариантов конструкции такого механизма показан на рис. 3.10.

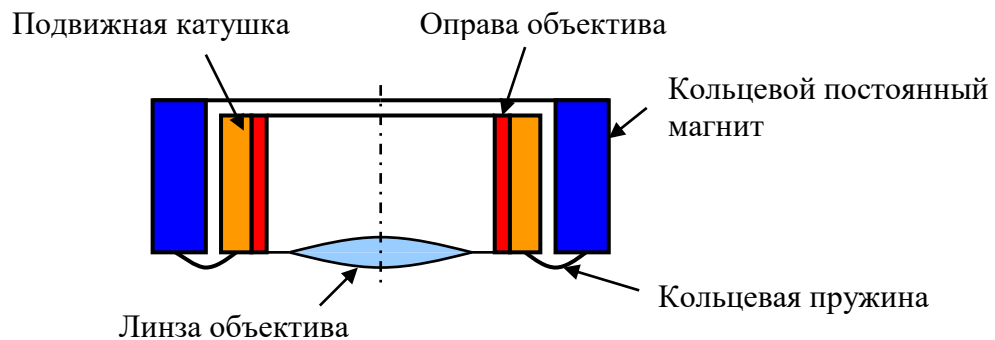


Рис. 3.10. Вариант конструкции привода автофокусировки

Оправа объектива и каркас легкой подвижной катушки соосно закреплены в центре кольцевой пружины. Края пружины закрепляются на торце кольцевого постоянного магнита. Когда через катушку протекает ток того или иного направления, объектив вместе с катушкой перемещается вверх или вниз вдоль вертикальной оси, отслеживая колебания поверхности компакт-диска.

### 3.1.6. СИСТЕМА ПОИСКА ФОКУСА

Когда диск загружается в проигрыватель, расстояние между объективом и диском слишком велико, поэтому сигнал ошибки фокусировки равен нулю, и сервосистема автофокусировки оказывается в неактивном состоянии. Для того чтобы активизировать ее, используется специальная система поиска фокуса, которая медленно приближает оптическую головку к диску по S-образной кривой (рис. 3.11). Суммарный отклик всех четырех площа-

док фотоприемника формирует высокочастотный сигнал, который и содержит в себе информацию, записанную на диск. Когда уровень этого сигнала превысит некоторое заданное значение, система автофокусировки включается, а система принудительного перемещения головки отключается, и начинает работать только система автофокусировки, самостоятельно контролируя положение оптического считывающего узла по нулевому сигналу ошибки фокусировки. Если фокус не будет найден с первой попытки (например, при отсутствии диска в дисковом де), то S-образный сигнал может повториться 3-4 раза, после чего система поиска фокуса отключится.

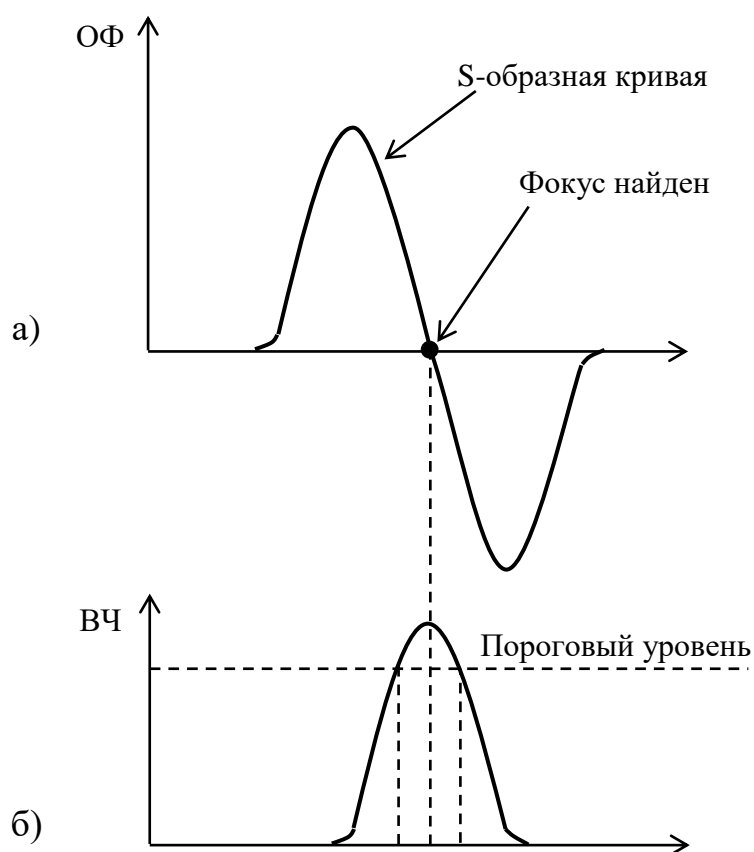


Рис. 3.11. Процедура поиска фокуса:  
 а) ошибка фокусировки (ОФ); б) высокочастотный сигнал (ВЧ)

### 3.2. СЛЕЖЕНИЕ ЗА ДОРОЖКОЙ (АВТОТРЕКИНГ)

При тиражировании оптических дисков неизбежно возникает некоторый эксцентриситет записи, а ширина дорожки записи чрезвычайно мала. Например, предельная величина эксцентриситета компакт-диска формата CD, в соответствии со стандартом, не должна превышать  $\pm 70$  мкм. Величина очень маленькая, однако, для воспроизведения записи и эта цифра слишком велика. Для того, чтобы считывать информацию с дорожки ши-

риной 0,6...0,8 мкм нужно, чтобы сфокусированный луч лазера удерживался на ней с точностью  $\pm 0,1$  мкм. Поэтому требуется применение системы автоматического слежения за дорожкой (автотрекинга) с глубиной регулировки не менее 700. Исполнительный механизм такой системы должен перемещать объектив (или всю оптическую головку) в радиальном направлении, компенсируя влияние эксцентриситета. Существует несколько способов автоматического слежения за дорожкой, использование которых зависит от ряда других обстоятельств.

### 3.2.1. СПОСОБ ТРЕХ ЛУЧЕЙ

Одним из наиболее широко используемых в системах воспроизведения способом автотрекинга является так называемый *способ трех лучей*. Для его реализации, кроме основного считывающего луча, необходимы еще два дополнительных, которые формируются путем расщепления основного [66]. Для формирования дополнительных лучей в качестве светоделиителя с равным успехом могут быть использованы полупрозрачное зеркало, поляризационная призма, фазовая дифракционная решетка или оптические клинья.

Расположение основного и дополнительных световых пятен на дорожке при трехлучевом способе автотрекинга показано на рис. 3.12. Основной луч А располагается посередине, а дополнительные В и С – по обеим сторонам от него вдоль оси дорожки на расстоянии  $Y$ . Кроме того, дополнительные лучи смещены перпендикулярно оси дорожки на некоторую величину  $X$ . Один из них (В) смещен влево, другой (С) – на такую же величину вправо. При этом каждому из трех лучей соответствует свой фотоприемник.

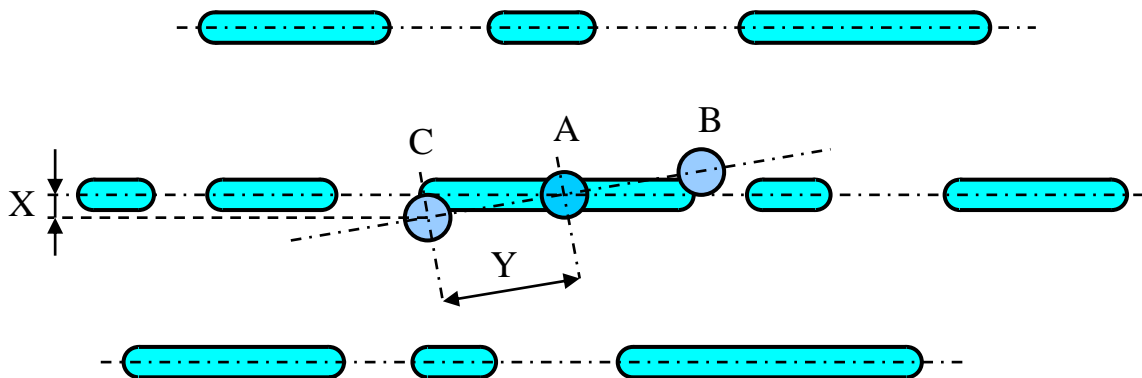


Рис. 3.12. Положение сфокусированных пятен на дорожке при трехлучевом способе автотрекинга

При воспроизведении основной луч А следует точно по центру дорожки, дополнительные лучи В и С только слегка захватывают ее каждый со

своей стороны. Сигналы с фотоприемников дополнительных лучей должны быть при этом одинаковы, а разность их, соответственно, должна быть равна нулю. Если основной луч А смещается в ту или иную сторону, то один из фотоприемников дополнительных лучей начинает получать больше света, а другой – меньше. При их вычитании получается определенная разность, которая и будет характеризовать величину и знак сигнала ошибки.

Из-за своей простоты и устойчивости в работе способ трех лучей получил очень широкое распространение в проигрывателях оптических дисков, хотя и является очень старым, заимствованным еще из системы лазерной видеозаписи LV (Laser Vision).

### 3.2.2. ДИФРАКЦИОННЫЙ СПОСОБ

Этот способ реализуется простой конструкцией с одним лучом лазера, в которой используется двухплощадочный фотоприемник. Основан он, как следует из его названия, на явлении дифракции света, обусловленной наличием микрорельефа регистрирующего слоя оптического диска. Схема его представлена на рис. 3.13.

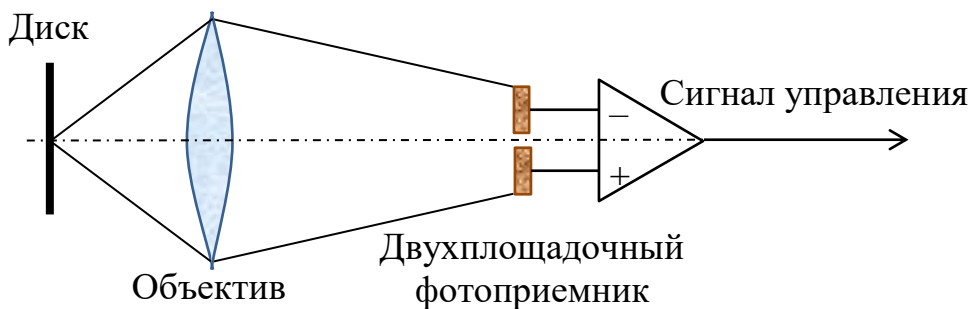


Рис. 3.13. Дифракционный способ автотрекинга

Разностный сигнал обеих площадок фотоприемника используется в качестве сигнала управления исполнительного механизма автотрекинга. Вследствие дифракции, обусловленной питами, размеры которых соизмеримы с длиной волны излучения лазера, распределение энергии отраженного света, попадающего в объектив, изменяется в зависимости от расположения светового пятна и пит. Общая картина такого распределения при глубине пит меньше  $\lambda/4$  представлена на рис. 3.14. При точном расположении считывающего пятна на осевой линии дорожки, световое пятно на фотоприемнике симметрично относительно границы его раздела. При смещении считывающего пятна вправо или влево такая симметрия нарушается, и в зависимости от направления смещения меняется полярность сигнала управления (ошибки слежения).



Сигнал управления получается при соблюдении определенных условий. Если глубина пит равна  $\lambda/4$ , то обеспечивается максимальная глубина модуляции отраженного луча, однако в фотоприемнике не образуется разностный сигнал (см. раздел 2.4.1). Действительно, при глубине пит, равной  $\lambda/4$ , возникает светотеневая картина, представленная на рис. 3.15, с одинаковым по площади распределением света и тени относительно оси симметрии, совпадающей с линией раздела фотоприемника на две части. Следовательно, *первое условие состоит в выборе глубины пит, меньшей  $\lambda/4$ .*

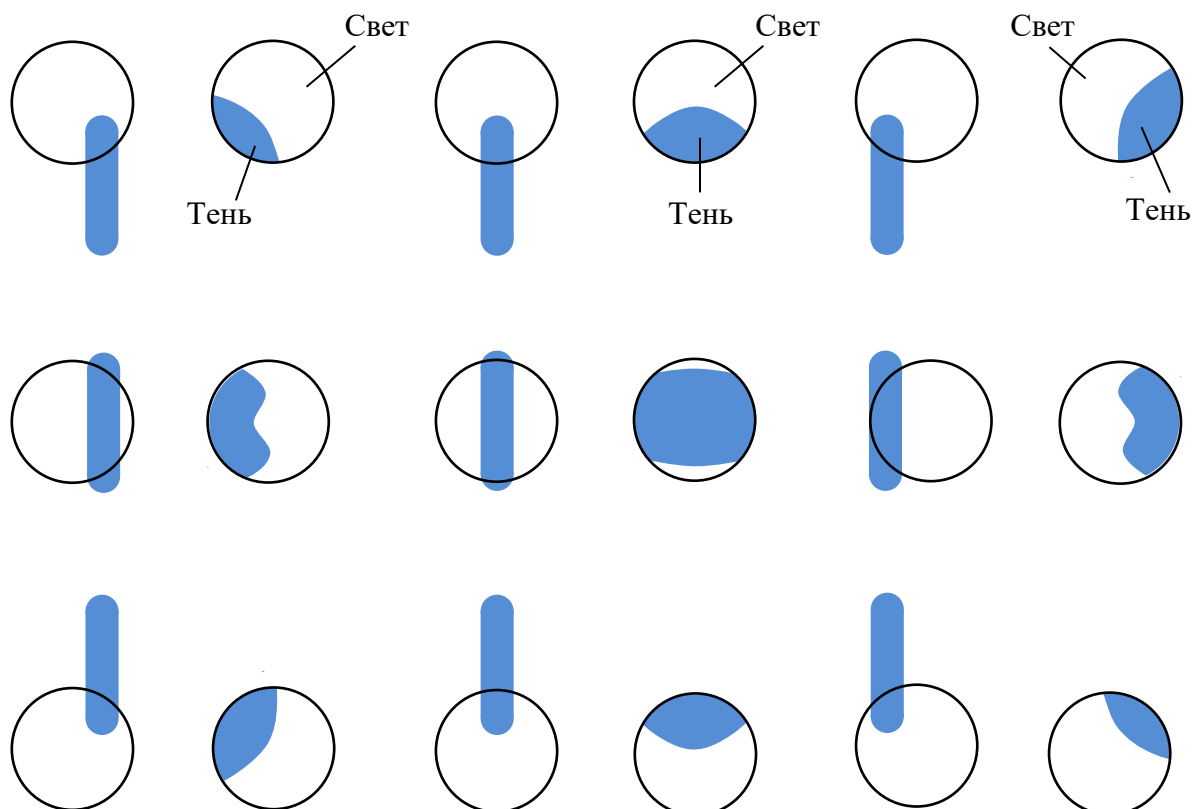


Рис. 3.14. Распределение света и тени на фотоприемнике при различном расположении считывающего пятна относительно осевой линии пита (глубина пит меньше  $\lambda/4$ )

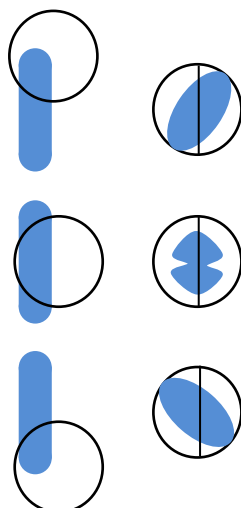


Рис. 3.15. Распределение света и тени на фотоприемнике при различном расположении считывающего пятна и пита (глубина пит равна  $\lambda/4$ )

Вторым условием является надлежащий выбор способа перемещения светового пятна. Если перемещается только линза объектива, то световое пятно сдвигается по фотоприемнику, вызывая появление в разностном сигнале дополнительной постоянной составляющей. А наличие постоянной составляющей вызывает ошибку в установке светового пятна относительно дорожки записи. Поэтому в дифракционном способе желательно перемещать всю оптическую головку.

### 3.2.3. ФАЗОВЫЙ СПОСОБ

Этот способ похож на дифракционный и основан на изменении распределения отраженного света в зависимости от взаимного положения светового пятна и пит. Однако фазовый способ имеет два преимущества по сравнению с дифракционным. Во-первых, разностный сигнал регулирования меньше зависит от глубины пит, в частности может быть получен и при глубине  $\lambda/4$ . Во-вторых, здесь ослаблено влияние сдвига светового пятна по фотоприемнику, что позволяет в оптической системе перемещать только линзу объектива.

Схема реализации фазового способа автотрекинга представлена на рис. 3.16. Распределение света детектируется фотоприемником, разделенным на четыре части:  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$ . Для разделения сигналов применяют следующие операции: высокочастотный информационный сигнал равен сумме сигналов всех четырех площадок фотоприемника  $a + b + c + d$ . Разностный диагональный сигнал равен  $(a + c) - (b + d)$ .

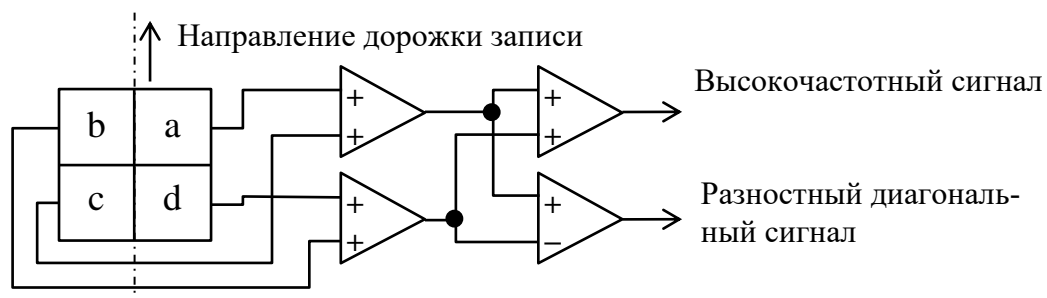


Рис. 3.16. Схема реализации фазового способа автотрекинга

На рис. 3.17,б показано правильное взаимное расположение считывающего светового пятна на дорожке записи, при котором разностный диагональный сигнал равен нулю. При движении диска в направлении стрелки нулевое значение этого сигнала сохраняется. На рис. 3.17 а и в представлены крайние смещенные состояния считывающего пятна относительно дорожки записи. При движении диска в направлении стрелки разностный диагональный сигнал в обоих случаях становится синусоидальным, сдви-

нутым по фазе относительно высокочастотного сигнала  $a + b + c + d$  на  $\pm 90^\circ$ . Детектируя фазу гетеродинным детектором, можно получить двухполярный сигнал управления автотрекингом [67-76].

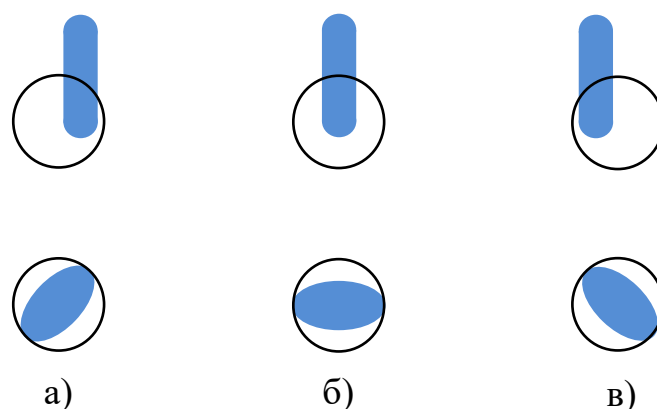


Рис. 3.17. Распределение света и тени на фотоприемнике при различном расположении считывающего пятна относительно осевой линии пит (глубина пит равна  $\lambda/4$ )

Известно три способа реализации автотрекинга:

- перемещение поворотного зеркала;
- перемещение линзы объектива;
- перемещение оптической головки.

Первый способ, который используют в системе автотрекинга аналоговых видеопроекторов, не очень подходит для цифровых проигрывателей. Как видно из рис. 3.18, при повороте зеркала оптическая ось наклоняется, что приводит к появлению aberrаций, ухудшающих амплитудно-частотную характеристику оптического воспроизведения.

При втором способе (рис. 3.19) линза объектива в соответствии с сигналом управления смещается в ту или другую сторону. Оптическая ось остается перпендикулярной к отражающему слою диска, и ухудшения амплитудно-частотной характеристики не происходит. Поскольку при этом используется полная апертура линзы, для нее необходимы более широкие пределы перемещения, чтобы она могла пропускать полный поток падающего луча лазера. Этому способу свойственен один недостаток. так как перемещается только линза, то в процессе управления происходит сдвиг светового пятна, создаваемого отраженным лучом на поверхности фотоприемника, что затрудняет обработку сигнала. Этот недостаток может быть ослаблен, если в системе автотрекинга использовать фазовый способ получения сигнала ошибки.

Третьим способом привода является перемещение всей оптической головки. При этом световое пятно не перемещается по фотоприемнику, что позволяет для формирования сигнала управления использовать более простой дифракционный способ. Масса и габариты головки должны быть, од-

нако, достаточно малы, чтобы получить требуемые характеристики регулирования в системе автотрекинга. Развитие процесса миниатюризации оптических элементов уже позволяет это сделать [24, 25, 49, 52, 67-76].

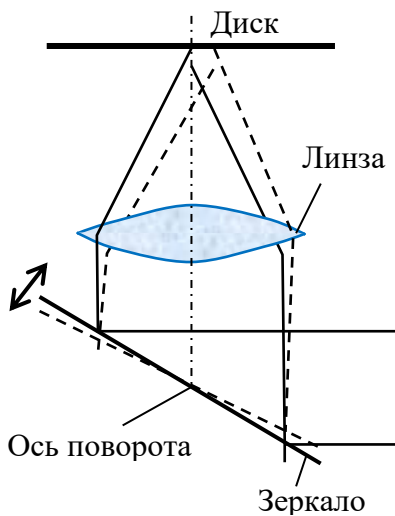


Рис. 3.18. Слежение за дорожкой записи с помощью поворотного зеркала

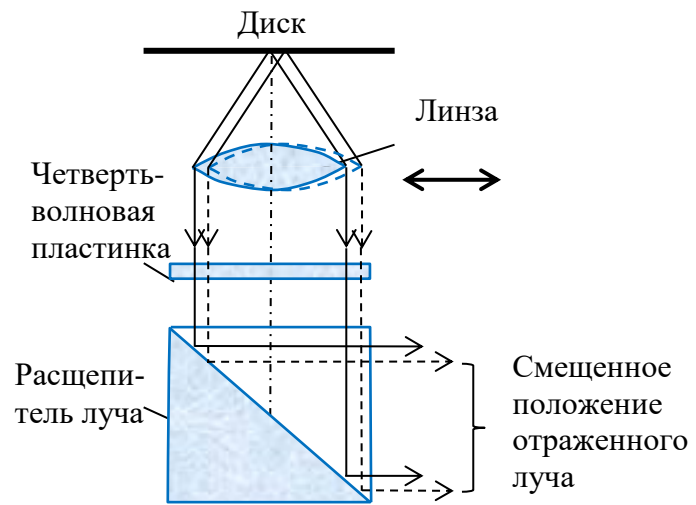


Рис. 3.19. Слежение за дорожкой записи с помощью подвижного объектива

Оптическая головка, изготовленная в соответствии с одним из вышеуказанных способов, должна, кроме того, перемещаться в направлении радиуса диска. Для такого перемещения существуют два способа. Первый – аналогичен повороту тонарма в аналоговом проигрывателе виниловых дисков. Второй – состоит в линейном перемещении оптической головки с помощью специального электродвигателя. Данные о некоторых конструкциях приводов оптических головок представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

**Приводы оптических головок**

| Тип конструкции | Характеристики конструкции |                      |                                       |   |
|-----------------|----------------------------|----------------------|---------------------------------------|---|
|                 | Автофокусировка            | Автотрекинг          | Способ привода в системе автотрекинга | Механизм перемещения оптической головки |
| А               | Способ астигматизма пучка  | Способ трех лучей    | Перемещение линзы                     | Скольльзящий механизм                   |
| В               | Способ Фуко                | Дифракционный способ | Перемещение оптической головки        | Типа тонарма                            |
| С               | Способ критического угла   | Фазовый способ       | Перемещение линзы                     | Скольльзящий механизм                   |
| Д               | Способ астигматизма пучка  | Дифракционный способ | Перемещение оптической головки        | Типа тонарма                            |

Первый способ привода для автотрекинга (способ перемещения зеркала) можно улучшить путем коррекции возникающих при этом aberrаций. Для этого используют объектив, состоящий из нескольких линз, подобный показанному на рис. 3.20. Конечно, такая конструкция приводит к удорожанию объектива и увеличению его веса, что также немаловажно.

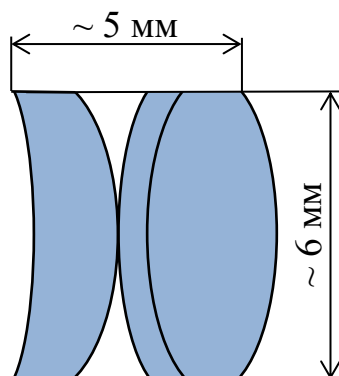


Рис. 3.20. Трехлинзовый объектив, предназначенный для устранения aberrаций, возникающих при перемещении зеркала

Другим способом борьбы с aberrациями является применение асферических линз. При этом составная конструкция из нескольких линз заменяется одной линзой, у которой aberrации скорректированы (рис. 3.21). Однако изготовить такую линзу непросто, поскольку требуется чрезвычайная точность.

Рис. 3.21. Объектив с обычной линзой и объектив с асферической линзой, у которой aberrации скорректированы за счет особой формы

Механизм, обеспечивающий перемещение оптической головки (или линзы объектива) по вертикали - вдоль ее оптической оси (автофокусиров-

ка) и по горизонтали – перпендикулярно оси оптической дорожки (автотрекинг) называется *двухкоординатным позиционером*. Весь же оптический блок размещается на специальной *каретке*, которая в процессе считывания записи или при поиске нужного фрагмента может свободно перемещаться вдоль радиуса диска с помощью двигателя рельсового типа. Управляет кареткой специальная сервосистема.

### 3.3. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО БЛОКА

Пример исполнения механизма перемещения оптической головки вдоль радиуса диска показан на рис. 3.22.

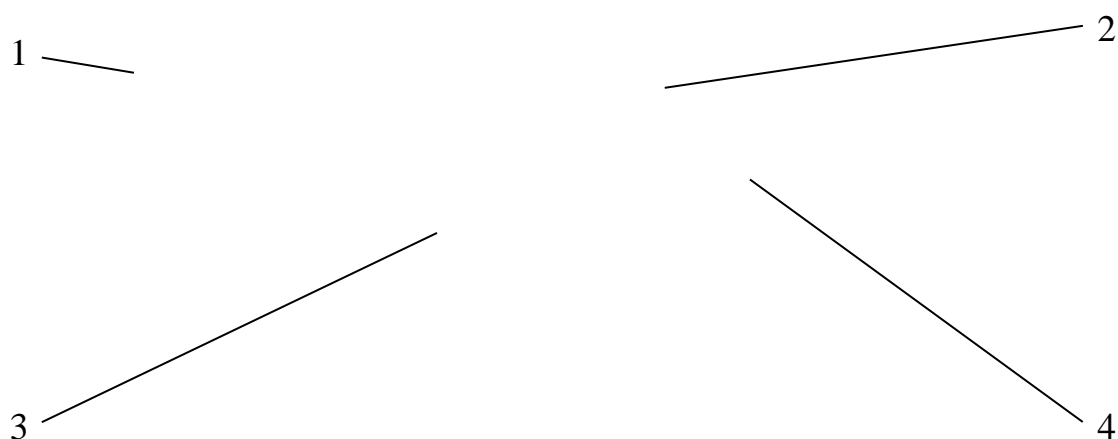


Рис. 3.22. Привод с радиальным перемещением оптической головки: 1 – шпиндель, на котором вращается оптический диск; 2 – линза объектива; 3 – направляющая, по которой перемещается каретка с оптической головкой; 4 – каретка с закрепленной на ней оптической головкой

Исполнительный механизм автотрекинга в составе двухкоординатного позиционера в процессе работы способен перемещать оптическую линзу (или всю головку) только в ограниченных пределах. При считывании записи радиус спиральной дорожки постоянно увеличивается и в какой-то момент времени степени свободы механизма автотрекинга оказывается недостаточно, чтобы отработать ошибку радиального слежения, которая становится слишком велика. Тогда каретка, на которой закреплена оптическая

головка, совершает скачок по направляющей, компенсируя, таким образом, образовавшуюся ошибку [52, 64, 65].

Сервосистема, управляющая двигателем каретки, использует тот же самый сигнал ошибки радиального слежения, который используется для автотрекинга. Следует отметить, что выходной сигнал сервосистемы двигателя каретки, в отличие от сервосистемы автотрекинга, который линейно зависит от сигнала ошибки, имеет внутренний гистерезис – двигатель перемещения оптического блока запускается только в том случае, когда сигнал ошибки слежения превышает некоторый фиксированный пороговый уровень (рис. 3.23).

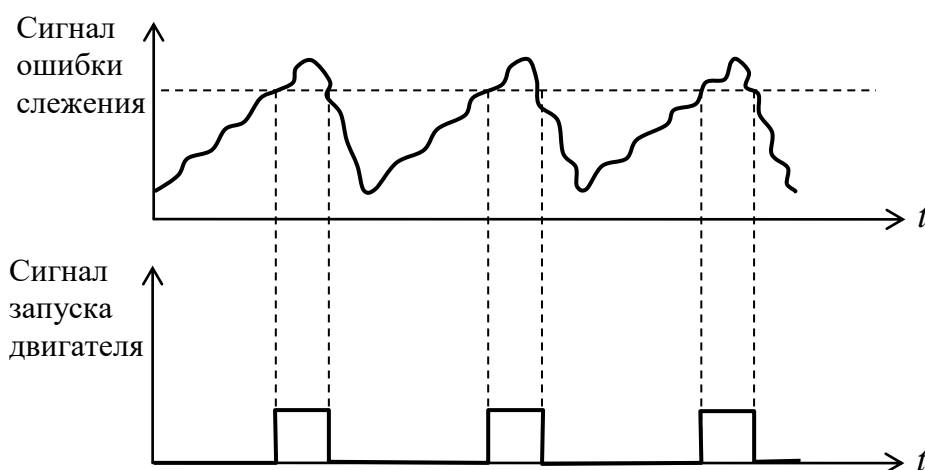


Рис. 3.23. Сигнал ошибки слежения и выходной сигнал запуска двигателя перемещения оптического блока

### 3.4. СЕРВОСИСТЕМА ДВИГАТЕЛЯ ВРАЩЕНИЯ ДИСКА

При воспроизведении оптической записи скорость вращения диска в большинстве случаев должна быть такой, чтобы обеспечивалось постоянство скорости потока считываемых данных, т.е. постоянство линейной скорости перемещения дорожки носителя относительно считывающего светового пятна. Такая система вращения обозначается аббревиатурой *CLV* – *Constant Linear Velocity*. Например, в формате CD это 1,2 – 1,4 м/с. Здесь имеется в виду, что скорость у разных дисков может находиться в этих пределах, но для каждого конкретного диска линейная скорость перемещения носителя должна быть строго постоянной, к примеру, 1,2 м/с. Для этого скорость вращения двигателя нужно соответствующим образом контролировать. Считывание оптических дисков осуществляется от центра, где радиус дорожек записи мал, к краю, где радиус дорожек увеличивается более чем в 2 раза. Чтобы линейная скорость считывания была постоянной, угловая скорость вращения диска должна постепенно уменьшаться – для фор-

мата CD это от 500 об/с в области ввода вблизи центрального отверстия диска до 200 об/с в области вывода у внешнего края диска.

Для того чтобы контролировать линейную скорость перемещения носителя, можно воспользоваться скоростью потока считанных данных и поддерживать ее вблизи некоторого заданного значения. Например, в формате CD это стандартная скорость 4,3218 Мбит/с. Однако это слишком высокая скорость для того чтобы иметь с ней дело при управлении хотя и маленьким, но достаточно массивным для таких целей вращающим узлом.

В цифровых системах информация всегда организована в какие-то массивы постоянной стандартной длины – блоки, кадры, секторы и пр., состоящие из большего или меньшего количества бит данных. Границы этих массивов обозначаются специальными синхронизирующими комбинациями - *синхрогруппами*. Для того чтобы правильно декодировать данные, необходимо, прежде всего, распознать эти синхрогруппы, т.е. определить границы обозначаемых ими массивов. Частоту следования синхрогрупп как раз и используют для контроля скорости перемещения носителя, сравнивая ее с такой же частотой, но сформированной стабильным кварцевым генератором.

В формате CD для этого можно воспользоваться частотой следования блоков данных, которая здесь равна 75 Гц.

Схема формирования сигнала управления двигателем показана на рис. 3.24, а временные диаграммы ее работы – на рис. 3.25.

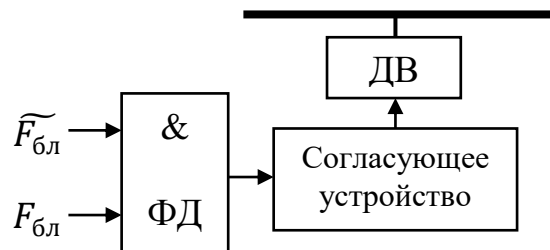


Рис. 3.24. Схема регулирования скорости вращения диска ДВ – двигатель вращения; ФД – фазовый дискриминатор

На один из входов *фазового дискриминатора ФД*, в качестве которого использован обычный элемент И, подается сигнал частоты следования блоков, который формируется на основе тактовой частоты  $\tilde{F}_T$ , выделяемой из воспроизводимого потока информации. Поскольку этот сигнал нестабилен и зависит от скорости вращения диска, т.е. отражает линейную скорость перемещения носителя, он обозначается символом  $\tilde{F}_{бл}$ .

На другой вход ФД поступает сигнал блочной частоты  $F_{бл} = 75$  Гц, полученный делением сигнала  $F_T = 4,3218$  МГц, формируемого кварцевым генератором. Для этого тактовую частоту делят на число бит в кадре (588), а полученный результат делят на 98 - число кадров в блоке:

$$F_{бл} = F_T / 588 / 98 = 4,3218 \text{ МГц} / 588 / 98 = 75 \text{ Гц.}$$



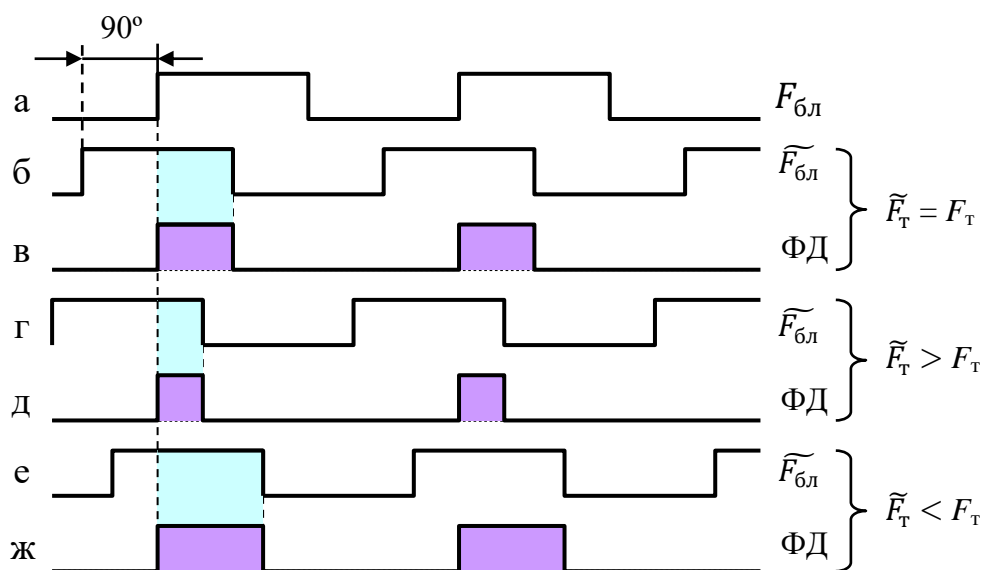


Рис. 3.25. Временные диаграммы работы схемы регулирования скорости вращения диска

Система отрегулирована так, что  $\tilde{F}_T = F_T$  при сдвиге фаз между сигналами  $\tilde{F}_{бл}$  и  $F_{бл}$ , равном  $90^\circ$  (рис. 3.25,а,б,в). Тогда на его выходе будут формироваться импульсы шириной в четверть периода частоты  $F_{бл}$ .

Если двигатель начнет вращаться слишком быстро, то  $\tilde{F}_{бл}$  сдвинется относительно  $F_{бл}$ , на угол больший, чем на  $90^\circ$ . При этом ширина импульсов на выходе ФД уменьшится, что заставит двигатель снизить обороты (рис. 3.25,а,г,д).

Если скорость вращения станет слишком мала, то  $\tilde{F}_{бл}$ , окажется сдвинутой относительно  $F_{бл}$ , на угол меньший чем  $90^\circ$ . Ширина импульсов на выходе ФД при этом увеличится и двигатель начнет вращаться быстрее (рис. 3.25,а,е,ж).

Согласующее устройство в соответствии со своим названием служит для согласования выходного сигнала ФД с рабочими характеристиками используемого двигателя.

Следует отметить, что для контроля за скоростью потока считанных данных в проигрывателях формата CD, т.е. линейной скоростью перемещения носителя относительно считывающего луча может использоваться и частота следования кадров  $F_k = F_T / 588 = 4,3218 \text{ МГц} / 588 = 7,35 \text{ кГц}$  (нередко так и бывает).

Наличие такой системы регулирования позволяет предельно снизить требования к двигателю. Никакой точности и стабильности вращения от него не требуется, лишь бы подходил по габаритам и мощности. А тот факт, что считанный сигнал нестабилен во времени, никакой роли не играет, так как для борьбы с этим явлением используется очень эффективное

средство – буферное запоминающее устройство или буферная память, которая реализуется на основе *ЗУПВ (запоминающее устройство с произвольной выборкой)*. В буферную память информация записывается по мере ее поступления от демодулятора, т.е. с неравномерной скоростью, а считывается с помощью сигналов, сформированных кварцевым генератором – строго равномерно.

Благодаря наличию буферной памяти проигрыватель компакт-дисков (так же, впрочем, как и любой другой цифровой источник звуковых программ) избавлен от извечного недостатка аналоговой записи, связанного с неравномерностью вращения (перемещения) носителя – *детонации*, т.е. более или менее заметного на слух «плаванья» звука.

Из-за того что блок управления двигателем, вращающим диск, поддерживает скорость потока считанной с него информации вблизи 4,3218 Мбит/с, количество символов, поступающих на вход ЗУПВ, колеблется с некоторым рассогласованием вокруг величины, равной количеству символов, считываемых с его выхода. Допустимая величина упомянутого рассогласования зависит от объема ЗУПВ. Чем больше объем памяти, тем большие отклонения скорости вращения от номинальной допустимы.

В первых моделях CD-проигрывателей, выпускавшихся в начале 80-х годов, использовалась память объемом всего 2-4 кбайт. Микросхемы большей емкости были тогда чересчур дорогими. К концу 90-х годов ситуация изменилась. Память значительно подешевела и поэтому некоторые производители стали позволять себе применение ЗУПВ объемом в несколько мегабайт. Причем, что казалось интересным – в относительно недорогих переносных моделях. Такая, на первый взгляд, неоправданная роскошь имеет свой глубокий смысл. Благодаря такому большому объему памяти появилась возможность организовать на ее основе системы восстановления процесса воспроизведения фонограммы, прерванного из-за механического воздействия на работающий проигрыватель. Такие системы известны как *системы электронной защиты от ударов*. Смысл защиты состоит в том, что если оптическая головка потеряла считываемую дорожку в результате удара, то за время, пока из памяти извлекается информация, записанная туда до срыва, головка успевает заново найти нужное место и продолжить воспроизведение. После этого, чтобы восполнить израсходованный за время поиска запас информации в ЗУПВ, скорость вращения в несколько раз увеличивается до тех пор, пока память не заполнится до половины своего объема.

Многие фирмы-производители разрабатывают свои собственные варианты такой защиты, отличающиеся как способом поиска нужного места на дорожке, так и способом сопряжения информационного потока в месте разрыва. Поэтому и системы электронной защиты в их изделиях часто имеют свои собственные «фирменные» названия. Например, у фирмы SONY она называется ESP (Electronic Shock Protection), у фирмы MATSU-

SHITA (TECHNICS, PANASONIC) – ASM (Antishock Memory), у фирмы PHILIPS – ESA (Electronic Shock Absorbtion).

### 3.5. СТАБИЛИЗАЦИЯ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ДИОДА

Для того чтобы воспроизводимый с диска сигнал был качественным, необходимо поддерживать мощность излучения лазера на некотором заданном уровне. Для стабилизации мощности лазера предусматривается специальная схема автоматического контроля мощности лазера (ALPC – Automatic Laser Power Control). Упрощенный пример ее исполнения показан на рис. 3.26.

Мощность излучения лазерного диода зависит от величины протекающего через него тока. Даже очень малые вариации тока могут привести к резкому увеличению мощности излучения и выходу лазера из строя. Кроме того, характеристики лазера очень сильно зависят от температуры, причем зависимость эта отрицательная – при повышении температуры мощность излучения падает. Колебания температуры окружающей среды также могут вызвать настолько сильное увеличение выходного сигнала, что лазер разрушится. Поэтому для питания лазера всегда используют источник стабильного тока. Элементом, позволяющим контролировать мощность излучения, является встроенный в корпус лазера LD фотодиод-монитор PD (рис. 3.26). Требуемое значение тока питания лазера, которое обычно составляет величину порядка 50 мА, устанавливается подстроечным резистором  $R_{\text{п}}$ .

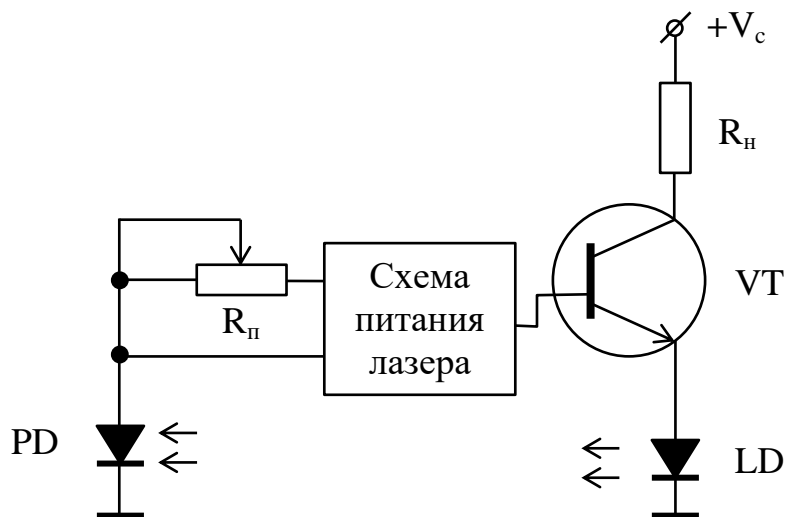


Рис. 3.26. Схема стабилизации мощности лазера (ALPC)

## 4. ВЫДЕЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДАННЫХ ИЗ СЧИТАННОГО С ОПТИЧЕСКОГО НОСИТЕЛЯ СИГНАЛА

Информационный сигнал, считанный с оптического диска, имеет форму, далекую от той, что он имел при записи на диск-оригинал. Этот сигнал – аналоговый и называется он *высокочастотным информационным сигналом* (рис. 4.1). Цифровой сигнал, пригодный для дальнейшей обработки и декодирования содержащихся в нем данных, нужно еще получить.

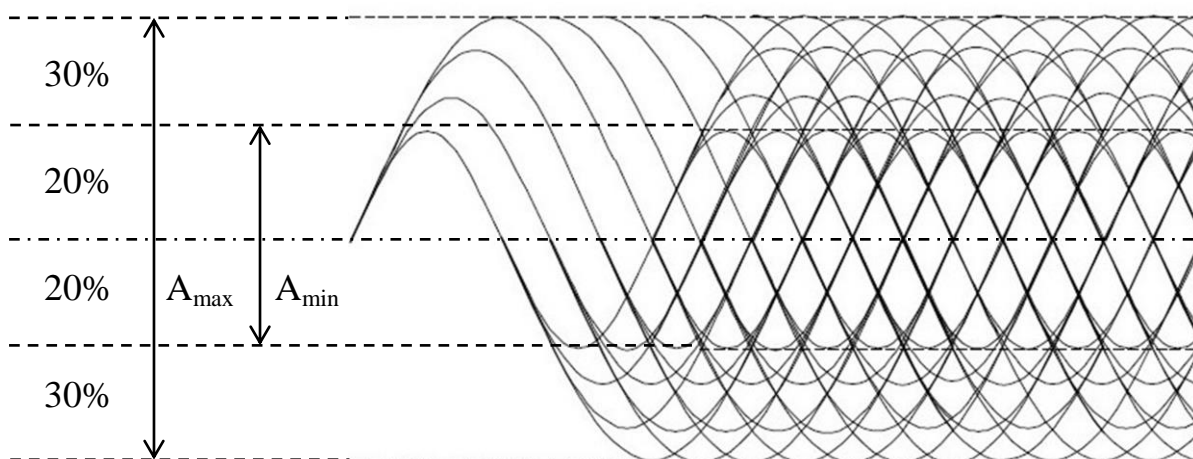


Рис. 4.1. Высокочастотный информационный сигнал

### 4.1. ВЫДЕЛЕНИЕ ЦИФРОВОГО СИГНАЛА И ИМПУЛЬСОВ ТАКТОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Информация, представленная при записи в некотором канальном коде, например, в формате CD – в коде EFM, содержится в промежутках между границами двухуровневого сигнала, формируемого в процессе канального кодирования. Поэтому для того, чтобы декодировать воспроизведенный поток данных, высокочастотный сигнал, прежде всего, нужно преобразовать в последовательность прямоугольных импульсов, длина которых кратна периоду следования канальных бит. В формате CD это период тактовой частоты  $F_T = 4,3218$  МГц. Осуществляется такое преобразование путем сравнения величины тока фотоприемника (фототока)  $I_f$  с некоторым усредненным уровнем  $I_{cp}$ . Такая операция называется *компарированием*. Рис. 4.2 иллюстрирует процесс преобразования фототока  $I_f$  в двухуровневый цифровой сигнал.

Однако в силу целого ряда причин при компарировании может возникнуть ошибка ( $\Delta\tau$ ) в положении перепада уровня (*фронта*). Среди таких причин можно назвать следующие:

- нестабильность мощности записывающего лазера, вызывающая разброс размеров (длины и ширины) формируемых пит;
- нестабильность мощности воспроизводящего лазера;
- ограниченность и нелинейность амплитудно-частотной характеристики тракта оптического воспроизведения;
- нелинейность фазочастотной характеристики тракта;
- неравномерность распределения мощности света в пределах пятна;
- наличие дифракции на питах;
- ограниченность апертуры входного зрачка объектива;
- неравномерность толщины прозрачного слоя диска;
- интерференция падающего и отраженного пучков.

Список искажающих факторов можно было бы продолжить, включив в него еще и разнообразные причины появления самих искажающих факторов [77]. На практике каждый фронт в той или иной степени является искаженным. Поэтому, перед тем как подавать полученный цифровой сигнал на демодулятор EFM, его следует откалибровать по длительности так, чтобы расстояние между любыми двумя его фронтами было кратным периоду тактовой частоты  $F_T$ .

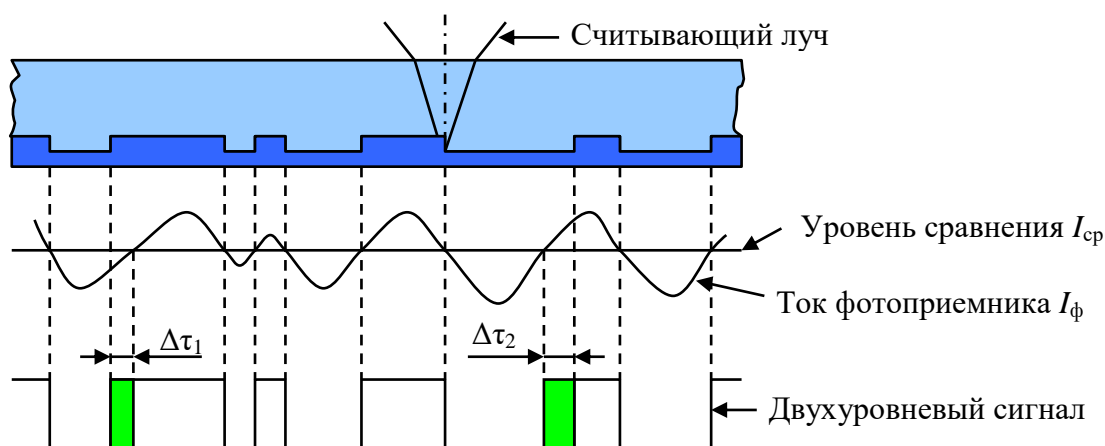


Рис. 4.2. Считывание информации с диска лучом лазера и преобразование ее в двухуровневый сигнал

Для этого используется так называемое *устройство тактовой синхронизации (УТС)*, построенное на основе петли *фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ)*. Схема такого устройства показана на рис. 4.3, а временные диаграммы его работы – на рис. 4.4.

Роль определителя ошибки синхронизации здесь выполняет *фазовый дискриминатор ФД*. На один из его входов поступает тактовая частота  $F_T$ , вырабатываемая генератором, управляемым напряжением (ГУН) (на схеме – ее инверсия  $\bar{F}_T$ ). На другой вход ФД поступают короткие импульсы, сформированные по фронтам воспроизведенного сигнала EFM<sub>B</sub>. В соответствии с величиной и знаком ошибки  $\varphi$  ФД вырабатывает управляющее

напряжение  $U(\varphi)$ , которое вынуждает ГУН изменить свою частоту так, чтобы ее период приблизился к длительности канального бита воспроизведенного сигнала  $EFM_B$ . Чтобы устранить искажения фронтов сигнала  $EFM_B$ , он идентифицируется (*стробируется*) в середине тактового интервала с помощью обычного D-триггера. Полученный сигнал  $EFM_C$  далее поступает на демодулятор.

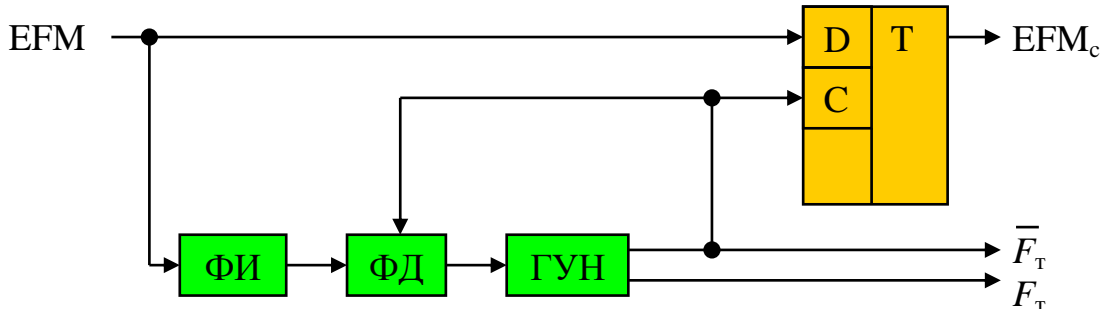


Рис. 4.3. Схема УТС с петлей ФАПЧ.

ФИ – формирователь импульсов; ФД – фазовый дискриминатор;  
 ГУН – генератор, управляемый напряжением

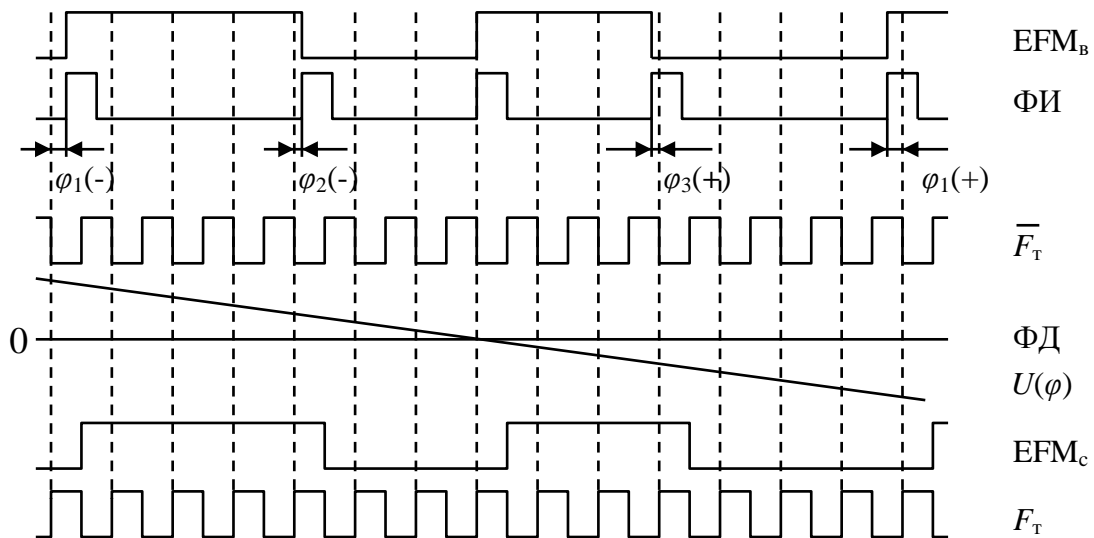


Рис. 4.4. Временные диаграммы работы УТС

Промежуток времени, в пределах которого может находиться искаженный фронт сигнала  $EFM_B$  без риска быть неправильно идентифицированным при стробировании, называется *окном детектирования*. Окно детектирования равно расстоянию от одного стробирующего фронта до другого, т.е. длительности тактового интервала  $F_T$ .

Схем реализации УТС существует достаточно много – как аналоговых, так и цифровых. Однако любое УТС должно удовлетворять следующим требованиям [78, 86-95]:

- синхронизация сигнала EFM и тактовых импульсов должна сохраняться и при наличии достаточно длительных выпадений – порядка нескольких символов;
- изменение частоты ГУН производится не по каждому фронту сигнала EFM, а исходя из некоторой усредненной величины ошибки ( $\Delta\phi_{cp}$ ), то есть должна быть обеспечена инерционность к временным дрожаниям воспроизведенного сигнала;
- если из-за наличия очень длинных выпадений или сбоя систем слежения за дорожкой синхронизация все же нарушена, то при появлении сигнала должно обеспечиваться ее быстрое восстановление.

Кроме стробирования, выделенная из считанного сигнала тактовая частота используется при формировании хронизирующих последовательностей для канального декодера (декодера EFM в формате CD) и буферной памяти воспроизводящего устройства.

## 4.2. СИСТЕМА ЦИКЛОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Сформированный по уровням и по фронтам информационный сигнал далее должен поступать на демодулятор и далее на декодер, где из него будут выделены исходные цифровые данные.

Однако для того, чтобы правильно декодировать информацию, организованную в некоторые характерные для данного формата стандартные массивы (блоки, субблоки, кадры, субкадры и пр.), необходимо знать, где такой массив начинается и где заканчивается, а также где начинается и где заканчивается каждый символ. В противном случае декодер может начать декодирование с середины кодового слова и, тем самым, будет фиксировать кодовые слова, не соответствующие действительным.

Как уже говорилось ранее, начало каждого стандартного массива отмечается путем введения в него специальной синхрогруппы, имеющей вполне определенную конфигурацию. Такой вид синхронизации в системах передачи данных называется *цикловой синхронизацией* и имеет исключительно важное значение, так как нарушение синхронизации по циклам приводит к полному искажению всей информации [79-82].

Структурная схема устройства цикловой синхронизации показана на рис. 4.5. Работает она следующим образом.

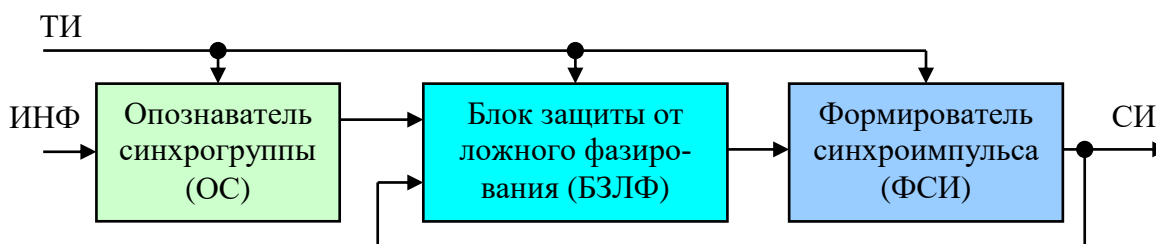


Рис. 4.5. Структурная схема устройства цикловой синхронизации

Анализируемый поток двоичной информации вначале поступает на вход *опознавателя синхрогруппы ОС*, в памяти которого хранится ее конфигурация. Оознаватель синхрогруппы – это параллельно-последовательный регистр сдвига, на последовательный вход которого поступают биты информации, считанные с диска, и перемещаются по его ячейкам памяти с помощью тактовых импульсов (ТИ), а последовательный выход подключен к устройству сравнения, которое сравнивает содержимое регистра с хранящейся в его памяти конфигурацией синхрогруппы. Число ячеек памяти регистра равно числу бит в синхрогруппе. При совпадении содержимого регистра с конфигурацией синхрогруппы опознаватель вырабатывает на своем выходе короткий импульс.

Первый же момент дешифрирования комбинации, совпадающей по форме с синхрогруппой, фиксируется как возможное начало цикла (в формате CD – кадра или блока). Однако, из-за наличия выпадений в считанной информации, может получиться так, что за синхрогруппу будет ошибочно принята какая-то другая комбинация, ставшая похожей на нее в результате искажения. В этом случае устройство цикловой синхронизации должно сначала убедиться в том, что это действительно синхрогруппа, а не случайное сочетание нулей и единиц. Для этого служит *блок защиты от ложного фазирования БЗЛФ*, который проверяет наличие дешифрованной синхрокомбинации на той же самой позиции еще в одном или нескольких циклах. С этой целью он отсчитывает от предполагаемой позиции синхроимпульса столько тактов, сколько бит информации содержится в цикле (например, в формате CD число бит в кадре равно 588). Если синхрокомбинация обнаруживается два или более раз подряд, то БЗЛФ принимает решение об истинности найденной позиции и устанавливает соответствующим образом *формирователь синхроимпульсов ФСИ*, который представляет собой счетчик-делитель на число, равное числу бит в цикле, с принудительной установкой в некоторое состояние, например, в «0» (сброс). Число появлений синхрокомбинации на одной и той же позиции, необходимое для принятия решения об ее истинности, называется *коэффициентом по входу в синхронизм*  $N_{вх}$  и определяется при разработке устройства цикловой синхронизации исходя из требований к его помехозащищенности. Обычно  $N_{вх}$  невелико и выбирается равным 2 или 3.

После того, как ФСИ сфазирован, он начинает вырабатывать синхроимпульсы уже самостоятельно на той позиции, которая ему была определена БЗЛФ даже в том случае, если синхрогруппа из-за искажений не будет зарегистрирована опознавателем ОС.

Однако БЗЛФ в течение всей работы устройства постоянно проверяет и другие позиции в цикле, где по каким-то причинам сформировалась комбинация, дешифрованная опознавателем как синхрогруппа. И если она повторилась на одной и той же позиции  $N_{вх}$  раз, то ФСИ немедленно пере-



страивается, поскольку это будет означать, что произошел сбой цикловой синхронизации и предыдущая позиция уже не соответствует истинной.

Могут применяться и другие меры по повышению эффективности и помехозащищенности систем цикловой синхронизации [80, 82-85].

По описанному выше принципу построена не только система кадровой синхронизации в формате CD, но и система блочной синхронизации, т.е. система выделения синхронизации служебных данных, которые так же, как и звуковые данные, организованы в блоки по 98 символов в каждом, а также системы цикловой синхронизации во всех прочих форматах записи информации на какой-либо носитель [96-108].

## 5. ФОРМАТ CD-AUDIO

Формат CD-Audio, или CD-DA (Compact Disc Digital Audio), как он стал называться позже, был первым потребительским цифровым форматом, предназначенным для записи звуковых программ. О том, что впоследствии на компакт-диск будут записывать и всякую другую информацию, тогда еще никто не думал. Даже его геометрические размеры и продолжительность записываемой программы выбирались исходя именно из этого предположения.

Длительность большинства симфонических музыкальных произведений или их отдельно исполняемых частей колеблется вблизи 60 минут. К примеру, продолжительность Девятой симфонии Бетховена составляет 70-74 минуты, Четвертой симфонии Балакирева – 65-66 минут, «Зимнего путешествия» Шуберта – примерно 72 минуты. Поэтому длительность проигрывания цифровой граммпластинки – будущего компакт-диска, разработчики стремились сделать равной 60-70 минутам. С другой стороны, если принять во внимание вопросы сбыта нового носителя, то общую длительность проигрывания не стоило делать чересчур большой. Во-первых, пропорционально времени проигрывания будут возрастать гонорары исполнителям и стоимость авторских прав. Во-вторых, слишком длинная программа может содержать произведения, которые покупатель слушать не желает, а это может затруднить реализацию компакт-дисков.

Размеры диска являются производными от линейной плотности записи (количеством информации на единицу длины дорожки) и расстоянием между дорожками. Для удобства обращения желательно, чтобы размеры упаковки для хранения компакт-диска были небольшими так, чтобы она помещалась в средней величины карман. Поэтому было принято решение ограничиться диаметром диска в 12 см. При максимальном диаметре программной зоны диска 11,6 см и скорости воспроизведения 1,4 м/с длительность программы получается равной 65 минутам, а при скорости воспроизведения 1,2 м/с – 74,7 мин, что как раз хватает для записи Девятой симфонии Бетховена [49].

Международный стандарт на первую систему оптической звукозаписи CD («Компакт-диск») был принят в октябре 1982 года, и это событие ознаменовало собой начало наступления новой эры в истории записи информации – переходу к цифровым источникам программ [23].

Одним из решающих преимуществ цифровых методов записи в сравнении с аналоговыми является то, что звуковую информацию, преобразованную в двоичный код, можно как угодно перемешивать, уплотнять и вписывать в нее любые служебные отметки. Именно поэтому проигрыватель компакт-дисков может работать по заданной слушателем программе, воспроизводя музыкальные дорожки в любой желаемой последовательности.

Такие потребительские качества обеспечиваются тщательно продуманным построением системы и использованием в ней последних достижений мировой науки, техники и технологии.

Таблица 5.1

**Технические параметры формата CD**

| Параметры   | Значения  |
|---|---|
| Диаметр диска, мм   | 120   |
| Толщина диска, мм   | 1,2   |
| Диаметр центрального отверстия, мм                              | 15  |
| Материал диска  | Поликарбонат  |
| Способ воспроизведения информации                               | Постоянная линейная скорость<br>1,2...1,4 м/с           |
| Шаг дорожки записи, мкм   | 1,6   |
| Минимальная длина пита, мкм                                     | 0,83  |
| Длина волны лазера, нм  | 780   |
| Частота дискретизации, кГц                                      | 44,1  |
| Число разрядов,<br>характеристика квантования                   | 16, линейная  |
| Скорость считывания звуковой информации, Мбит/с                 | 1,4112  |
| Общая скорость считывания информации, Мбит/с                    | 1,9404  |
| Канальная скорость считывания, Мбит/с                           | 4,3218  |
| Канальная модуляция   | EFM(преобразование 8-14)                                |
| Коррекция ошибок  | CIRC (двойной код Рида-Соломона с тройным перемежением) |
| Максимальная продолжительность записи, мин                      | 74  |
| Максимальный объем звуковой информации, записанной на диске, Гб | 0,78  |

## 5.1. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ В ФОРМАТЕ CD-AUDIO

Аналоговый музыкальный сигнал, предназначенный для записи, поступает на два входа (L и R) блока аналого-цифрового преобразования. Варианты построения таких блоков и различные методы А/Ц преобразования известны, и в дополнительных пояснениях необходимости нет. Следует отметить только, что, поскольку сигнал стереофонический, то внутри пока-

занного на рис. 5.1 блока АЦП должно быть два одинаковых канала А/Ц преобразования. Причем, если сам преобразователь достаточно быстродействующий, то он может быть один и обрабатывать попеременно оба канала, подключаясь то к УВХ (устройству выборки и хранения) левого канала, то к УВХ правого канала. Но это касается только многоразрядных АЦП. Преобразователи на основе сигма-дельта модуляции могут обрабатывать только один канал, поэтому в блоке АЦП на рис. 5.1 их должно быть два.

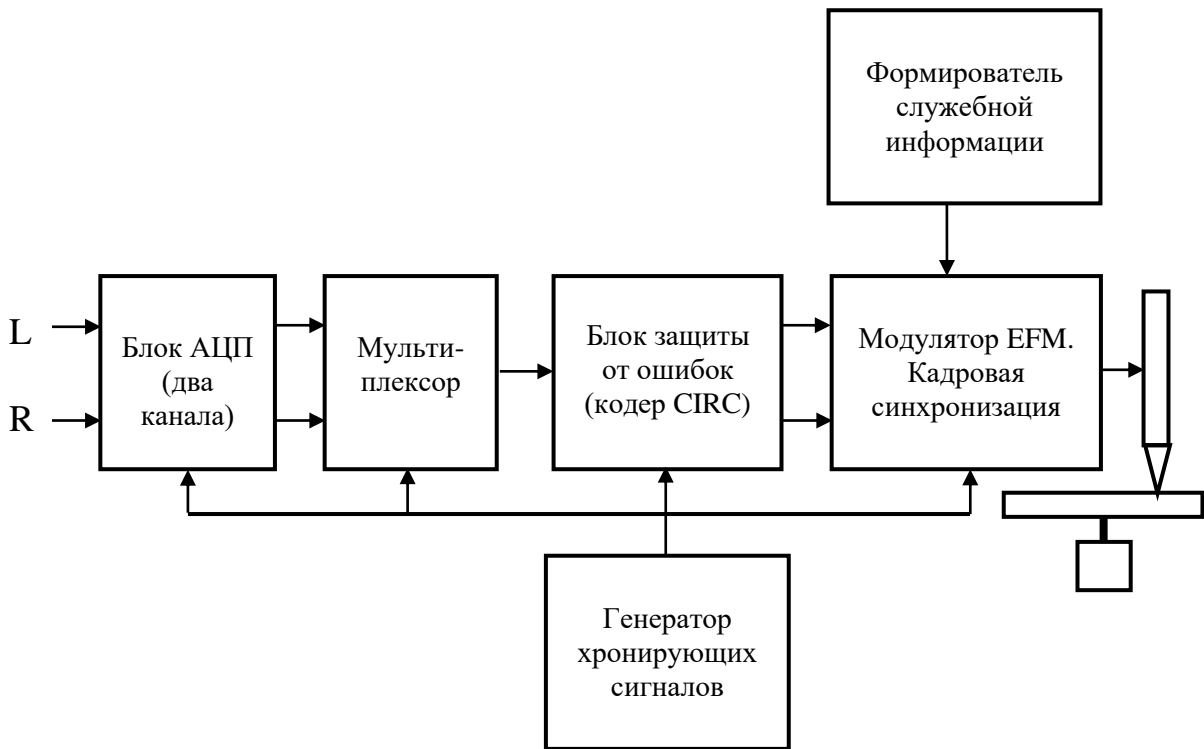


Рис. 5.1. Структурная схема тракта преобразования звукового сигнала в формате CD-Audio

Работа аппаратуры цифрового кодирования управляется высокостабильным генератором хранимых сигналов, который формирует все синхронизирующие последовательности, необходимые для функционирования каждого блока. Генератор стабилизирован кварцевым резонатором, рабочая частота которого равна или кратна основной тактовой частоте  $f_T$  в формате CD – 4,3218 МГц. В частности, на АЦП подается сигнал частоты дискретизации  $f_d = 44,1$  кГц, который получается путем деления основной тактовой частоты 4,3218 МГц на 98.

Выходными сигналами блока АЦП (при двухканальном преобразовании) будут две последовательности 16-разрядных отсчетов, следующих с частотой дискретизации, равной в формате CD 44,1 кГц (рис. 5.2.а,б). С помощью *мультиплексора* (рис. 5.1) эти две последовательности объединяются в одну, после чего частота следования отсчетов увеличивается вдвое и становится равной 88,2 кГц. Кроме того, непрерывная последова-

тельность делится на блоки – по 6 отсчетов левого и 6 отсчетов правого стереоканала в каждом. Такие блоки называются *кадрами*. Частота следования кадров ( $f_{\text{кадр}}$ ) равна:

$$f_{\text{кадр}} = 44,1 \text{ кГц}/6 = 88,2 \text{ кГц}/12 = 7,35 \text{ кГц}.$$

И наконец, каждый 16-разрядный отсчет делится пополам – старшие разряды (А) отдельно, младшие (В) – отдельно. В результате получается последовательность 8-разрядных групп (байтов), называемых здесь *символами*, частота следования которых ( $f_{\text{симв}}$ ) равна:

$$f_{\text{симв}} = 88,2 \text{ кГц} \times 2 = 176,4 \text{ кГц}.$$

В каждом кадре при этом окажется по 24 символа (рис. 5.2,в).

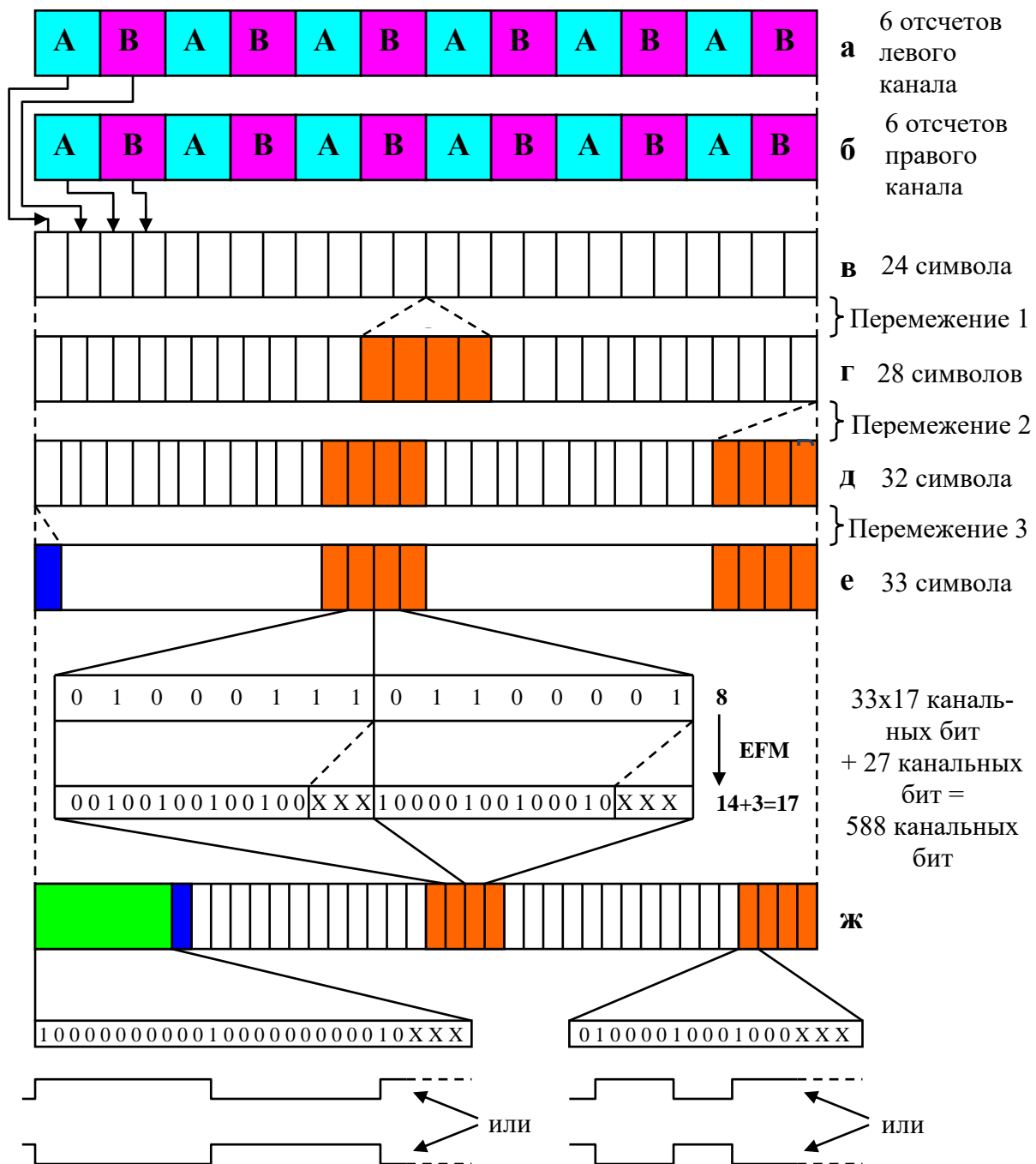


Рис. 5.2. Формирование кадра информации

Полученная последовательность далее поступает на вход *блока защиты от ошибок*, включающего в себя две ступени *помехоустойчивого кодирования информации* кодами Рида-Соломона и три ступени *перемежения*.

*Помехоустойчивое кодирование* необходимо для того, чтобы при считывании информации с носителя можно было обнаружить искаженные символы и исправить их или, по крайней мере, сделать незаметными на слух. Если таких мер не предпринимать, то из-за сплошного треска слушать воспроизведенную музыку будет невозможно.

*Перемежение* – это способ изменения положения символов в информационном потоке, после которого каждые два соседних символа оказываются на некотором расстоянии друг от друга. Это нужно для того, чтобы преобразовать редко встречающиеся продолжительные искажения, которые не поддаются коррекции кодами Рида-Соломона, во множество коротких искажений, с которыми декодер легко справляется.

Используемая в формате CD система защиты от ошибок часто обозначается аббревиатурой *CIRC* (*Cross Interleave Reed-Solomon Code – код Рида-Соломона с перекрестным перемежением*). Поэтому блок защиты от ошибок можно еще назвать *кодером CIRC*. Подробно о нем будет рассказано несколько позже – в соответствующей главе. Сейчас же можно отметить только то, что после каждого этапа помехоустойчивого кодирования кодами Рида-Соломона к информационным символам, содержащимся в каждом кадре, добавляются еще четыре проверочных символа. После первого этапа кодирования кодером Q (C2) в кадре получается 28 символов (рис. 5.2,г), а после второго этапа кодирования кодером P (C1) – 32 символа (рис. 5.2,д). Перемежение производится перед каждым этапом кодирования и после второго (C1).

Далее последовательность 32-символьных кадров поступает на *канальный модулятор*. Туда же поступает еще один символ – 33-й (рис. 5.2,е). Этот символ содержит в себе информацию о характере записанной на диск программы – количестве музыкальных произведений (дорожек), продолжительности каждого из них, наличии или отсутствии предисказаний (преимфазиса), сигнал «музыка/пауза» и прочую информацию, необходимую для реализации в проигрывателе различных потребительских функций – программирования, повтора, поиска и т.д. Этот дополнительный символ называется *служебным*. Формируется он в соответствующем блоке (рис. 5.1). О нем также будет подробно рассказано ниже.

*Модулятор* нужен для того, чтобы преобразовать полученную цифровую последовательность к виду, наиболее подходящему для записи на оптический носитель с высокой плотностью, а также обеспечивающему наилучшие условия для ее безошибочного считывания при воспроизведении. Этим условиям отвечает используемый для модуляции *канальный код EFM* (*Eight to Fourteen Modulation – модуляция 8-14*). В основе EFM-преобразования лежит замена исходных 8-разрядных символов 14-

разрядными канальными. Кроме того, между каждыми двумя смежными 14-разрядными символами вставляются еще три соединительных разряда. Эти разряды сами по себе никакой информации не несут и нужны лишь для того, чтобы придать формируемой последовательности необходимые свойства. Дело в том, что по правилам кодирования EFM между двумя соседними «единицами» должно быть не больше 10, но не меньше двух «нулей». Если бы не было этих вспомогательных разрядов, то при соединении двух 14-разрядных символов требование на ограничение серий последовательных «нулей» могло быть нарушено. Их наличие позволяет вставить в один из них дополнительную «единицу», если расстояние между последней «единицей» предшествующего символа и первой последующего получилось бы больше 10 или, наоборот, создать необходимый интервал, когда последняя «единица» предшествующего символа и первая последующего оказались рядом или ближе, чем через два «нуля».

И, наконец, для того, чтобы в непрерывном потоке информации можно было отделить один кадр от другого, в начало каждого из них вставляется так называемая *кадровая синхрогруппа* из 24 канальных разрядов (рис. 5.2,ж). Синхрогруппа имеет вполне определенную конфигурацию, не встречающуюся в информационном потоке – два подряд следующих максимальных интервала (по 10 «нулей» между двумя «единицами»).

После этого полученная последовательность преобразуется таким образом, что «единицам» кода соответствует изменение уровня сигнала, а «нулям» - отсутствие такого изменения. Тем самым обеспечивается независимость информации от полярности сигнала.

Сформированный сигнал (рис. 5.2,ж) подается затем на управляющий вход оптического модулятора, который с помощью лазерного луча производит запись информации на мастер-диск [24, 25, 49, 52].

## 5.2. ЗАЩИТА ОТ ОШИБОК В ФОРМАТЕ CD-AUDIO

Для того, чтобы ошибки, возникающие в потоке считанной с диска информации, не вызывали ухудшения качества звучания фонограмм, в формате CD используется комплексная система защиты от ошибок, получившая название CIRC. Она включает в себя две ступени кодирования кодами Рида-Соломона C1[32,28] и C2[28,24], и три ступени перемежения данных [109-112]. Общий вид ее, без учета других блоков, показан на рис. 5.3, а подробные схемы – на рис. 5.4 и 5.5.

Параметры кодов C1[32,28] и C2[28,24] определены стандартом. Код C1 называется еще кодом P, а код C2 – кодом Q.

Первая цифра в квадратных скобках означает, что общее число  $n$  символов в кодовом слове для C1 равно 32, а для C2 – 28. Вторая цифра в квадратных скобках – это число информационных символов  $k$ . Для C1  $k = 28$ , для C2  $k = 24$ . Остальные  $n-k$  символов – проверочные. Проверочные сим-

волы после их вычисления содержат в себе информацию обо всех других символах кодового слова. Для обоих кодов C1 и C2 число проверочных символов одинаково и равно четырем.

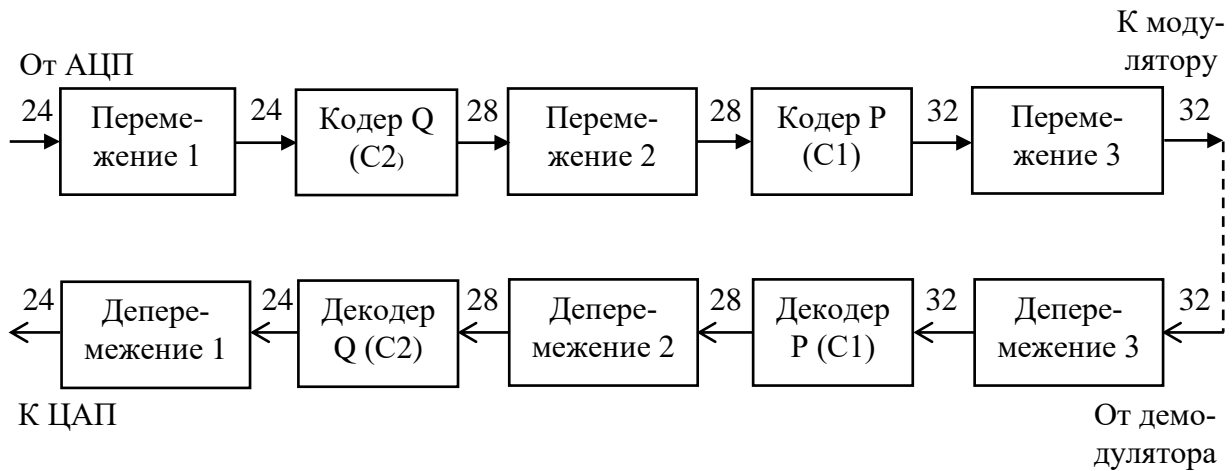


Рис. 5.3. Система защиты от ошибок CIRC

Кодовому слову кода C2 сопоставляются те 28 символов, которые получают после того, как кодер Q вычисляет четыре проверочных символа по 24 информационным, отображающим 6 отсчетов левого стереоканала и 6 отсчетов правого стереоканала.

Эта совокупность из 28 символов служит информационными символами для кодера P, который, вычисляя по ним еще четыре проверочных символа, образует кодовое слово кода C1, состоящее уже из 32 символов.

Коды C1 и C2 заданы в стандарте проверочными матрицами  $H_p$  и  $H_q$  соответственно, а расположение символов в кодовых словах – вектор-столбцами  $V_p$  и  $V_q$  (рис. 5.6).

Символами кодов C1 и C2 являются элементами поля Галуа  $GF(2^8)$ .

Поле  $GF(2^8)$  получено путем расширения поля  $GF(2)$  с помощью неприводимого многочлена  $F(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$ . В качестве примитивного элемента поля  $GF(2^8)$  использован корень многочлена  $F(x)$   $\alpha = [00000010]$ .

Из теории помехоустойчивого кодирования известно, что для коррекции  $t$  ошибок код должен иметь не менее  $2t$  проверочных символов (**граница Синглтона**). Коды C1 и C2 имеют по четыре проверочных символа. Значит, каждый из них может исправить не более двух ошибок с неизвестной позицией [113-120].

Известно также, что максимальное число гарантированно обнаруживаемых ошибок равно числу проверочных символов кода. Следовательно, каждый из кодов C1 и C2 может гарантированно обнаружить до четырех ошибок.



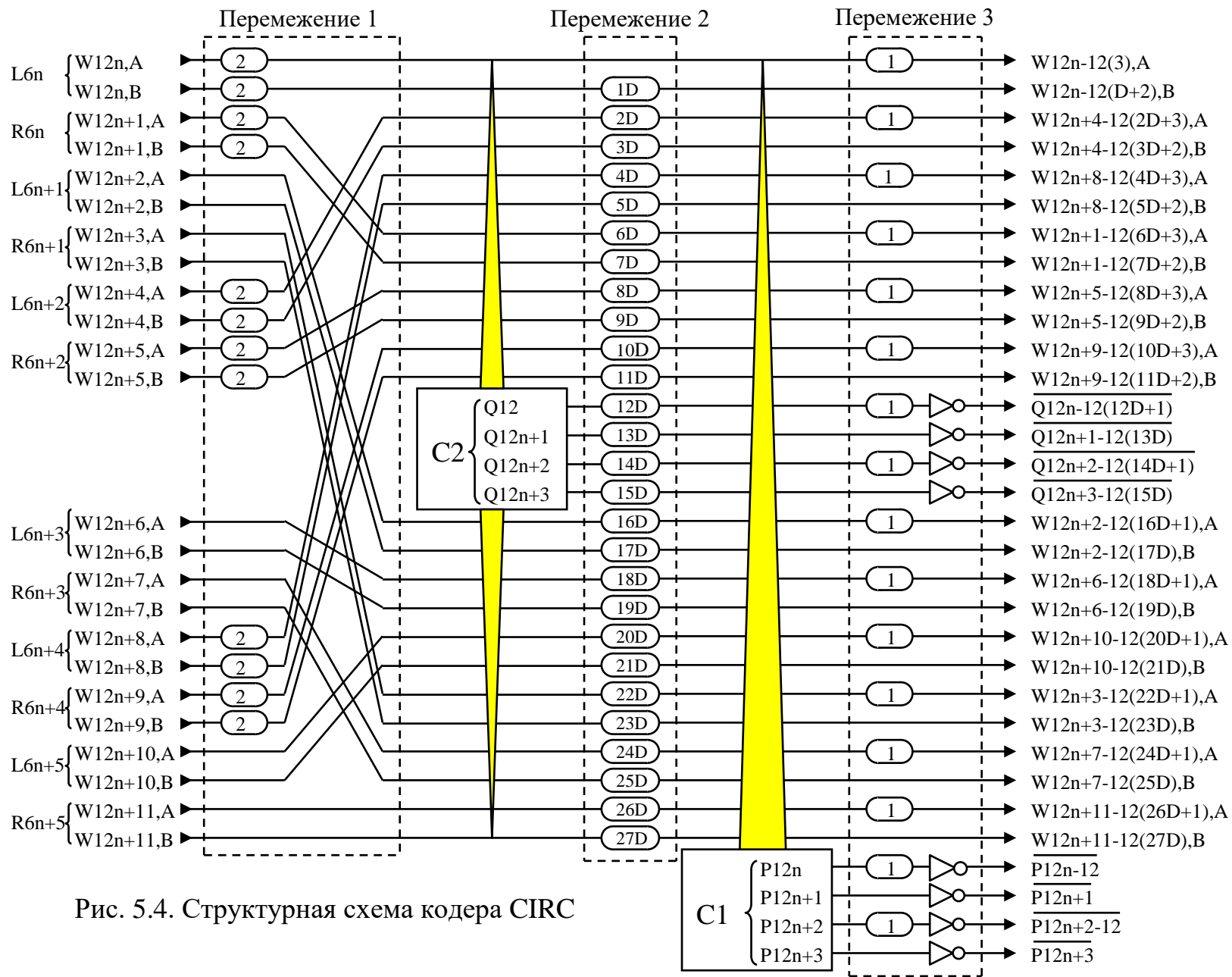


Рис. 5.4. Структурная схема кодера CIRC

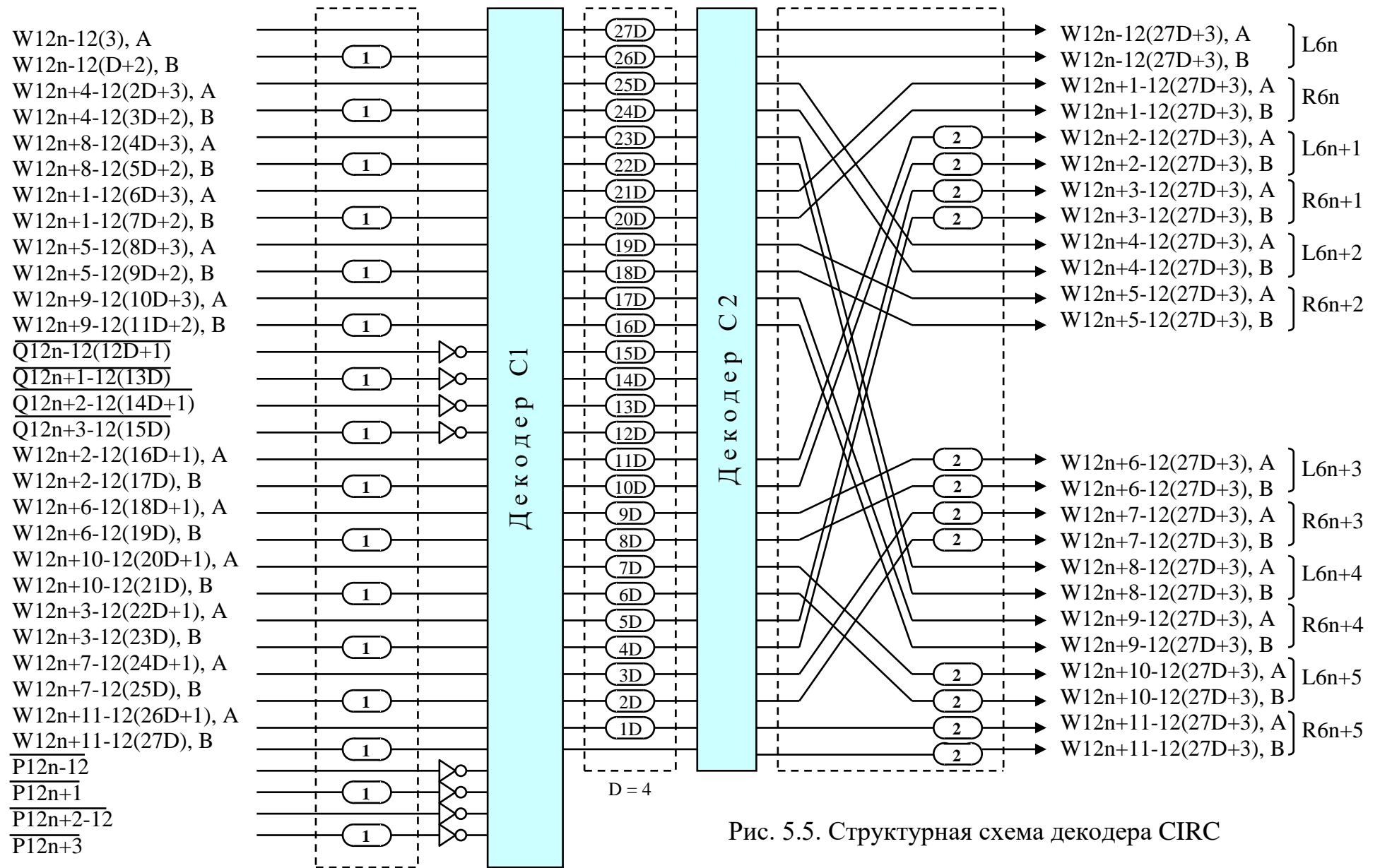


Рис. 5.5. Структурная схема декодера CIRC

$$\begin{aligned}
H_p &= \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \alpha^{31} & \alpha^{30} & \alpha^{29} & \alpha^{28} & \alpha^{27} & \dots & \alpha^4 & \alpha^3 & \alpha^2 & \alpha^1 & 1 \\ \alpha^{62} & \alpha^{60} & \alpha^{58} & \alpha^{56} & \alpha^{54} & \dots & \alpha^8 & \alpha^6 & \alpha^4 & \alpha^2 & 1 \\ \alpha^{93} & \alpha^{90} & \alpha^{87} & \alpha^{84} & \alpha^{81} & \dots & \alpha^{12} & \alpha^9 & \alpha^6 & \alpha^3 & 1 \end{vmatrix} \\
H_q &= \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \alpha^{27} & \alpha^{26} & \alpha^{25} & \alpha^{24} & \alpha^{23} & \dots & \alpha^4 & \alpha^3 & \alpha^2 & \alpha^1 & 1 \\ \alpha^{54} & \alpha^{52} & \alpha^{50} & \alpha^{48} & \alpha^{46} & \dots & \alpha^8 & \alpha^6 & \alpha^4 & \alpha^2 & 1 \\ \alpha^{81} & \alpha^{78} & \alpha^{75} & \alpha^{72} & \alpha^{69} & \dots & \alpha^{12} & \alpha^9 & \alpha^6 & \alpha^3 & 1 \end{vmatrix} \\
V_p &= \begin{vmatrix} V_{p0} \\ V_{p1} \\ V_{p2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V_{p26} \\ V_{p27} \\ P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{vmatrix} \\
V_q &= \begin{vmatrix} V_{q0} \\ V_{q1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V_{q11} \\ Q_0 \\ Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ V_{q12} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V_{q23} \end{vmatrix}
\end{aligned}$$

Рис. 5.6. Проверочные матрицы ( $H_p$  и  $H_q$ ) и вектор-столбцы ( $V_p$  и  $V_q$ ) кодов  $C_1$  и  $C_2$  соответственно

Говоря об обнаруживающей способности кодов, следует иметь в виду, что при этом обнаруживается лишь сам факт их наличия, но не положение. Определение положения ошибки равнозначно возможности ее коррекции. Следовательно, число ошибок, которое можно локализовать, равно числу ошибок, которое код может исправить. Для кодов  $C_1$  и  $C_2$  оно равно двум.

Но, с другой стороны, если положение ошибок известно, то код может исправить их столько, сколько способен обнаружить. Ошибка, позиция ко-

торой известна, называется *стиранием*. Таким образом, каждый из кодов C1 и C2 может исправить до четырех стираний.

Под ошибками здесь следует понимать искаженные символы. Коды Рида-Соломона исправляют целиком восьмиразрядный символ, а не отдельные разряды в нем. Этим-то они и удобны для использования в системах записи информации на носитель.

В цифровой звукозаписи распределение ошибок характеризуется как различной вероятностью их появления, так и различной длиной, обусловленной разными причинами их появления. Дефекты, возникающие в процессе изготовления компакт-диска и во время тиражирования, имеют малые размеры (до одного символа), но высокую вероятность появления. Дефекты, вызванные наличием глубоких царапин и сильного загрязнения поверхности диска, являются причиной появления длинных искажений. Такой же эффект вызывают и кратковременные сбои систем синхронизации и сервосистем автофокусировки и автотрекинга.

По традиции, берущей начало в магнитной записи, когда ошибки возникали, в основном, из-за повреждения магнитного слоя ленты, такие искажения часто называют *выпадениями*.

Короткие выпадения являются причиной появления *случайных ошибок*, а длинные – *пакетов ошибок*.

Из вышесказанного следует, что сами по себе коды C1 и C2 хорошо подходят для коррекции случайных ошибок. Но, для того, чтобы бороться с пакетами ошибок, которые могут иметь длину до десятков и сотен символов, нужны какие-то дополнительные меры.

В качестве таких мер в цифровой записи информации используются различные схемы перемежения данных, когда символы одного кодового слова перемещаются на другие позиции в потоке данных – между символами других кодовых слов, перераспределяясь при этом на достаточно длинном участке дорожки так, чтобы даже очень продолжительные выпадения не могли исказить более одного-двух его символов [121-125].

Структурная схема перемежения, используемого в стандарте CD, представлена на рис. 5.4, где изображен кодер CIRC.

Буквами L и R в левой части схемы обозначены 16-разрядные отсчеты левого и правого стереоканалов, содержащиеся в одном кадре (кодовом слове). Буква  $n$  в индексе – это порядковый номер данного кадра ( $n = 0, 1, \dots, \infty$ ).

Каждый отсчет делится на два восьмиразрядных символа, которые на схеме обозначены буквами W. Символ со значком A – это старшие разряды отсчета, символ со значком B – младшие разряды.

Прямоугольник с обозначением C2 – это кодер Q (C2[28.24]). Такой же прямоугольник с обозначением C1 – кодер P (C1[32.28]). Овалы с цифрами внутри означают задержку символов. Если внутри овала цифра 2, то соответствующий символ должен быть задержан на два кадра. Буквой D

обозначена задержка сразу на четыре кадра. Поэтому если внутри овала стоит 20D, то это означает, что данный символ должен быть задержан на  $20 \cdot 4 = 80$  кадров.

Очевидно, что перемежение второго этапа вносит наибольший вклад в величину участка дорожки, на котором размещаются символы одного кодового слова. После этого этапа каждое кодовое слово растягивается на 109 кадров, что соответствует примерно 17,5 мм длины дорожки. Примерно – потому что линейная скорость перемещения считывающего пятна относительно дорожки для одного диска может отличаться от той же величины для другого диска в пределах от 1,2 до 1,4 м/с.

Особую роль в повышении помехоустойчивости информации, записанной на диск, играет перемежение первого этапа. Если внимательно всмотреться в его схему, то можно заметить определенную логику в изменении позиций символов внутри кодового слова.

Пары символов четных отсчетов левого канала ( $L_{6n}$ ,  $L_{6n+2}$  и  $L_{6n+4}$ ) после изменения позиций оказываются сгруппированы в верхней части схемы (в начале кодового слова). Под ними, чуть ниже, группируются пары символов четных отсчетов правого канала ( $R_{6n}$ ,  $R_{6n+2}$  и  $R_{6n+4}$ ). В нижней части схемы группируются пары символов нечетных отсчетов. Сначала символы трех отсчетов левого канала ( $L_{6n+1}$ ,  $L_{6n+3}$  и  $L_{6n+5}$ ), затем – трех отсчетов правого канала ( $R_{6n+1}$ ,  $R_{6n+3}$  и  $R_{6n+5}$ ).

Такая перегруппировка приведет к тому, что после выполнения перемежения второго этапа четные отсчеты левого канала окажутся в первой четверти интервала из 109 последовательных кадров, четные отсчеты правого канала – во второй четверти, нечетные отсчеты левого канала – в третьей четверти и нечетные отсчеты правого канала – в четвертой четверти. Таким образом, обеспечивается максимально возможное удаление четных отсчетов каждого из каналов от нечетных отсчетов того же канала.

Смысл такого перераспределения состоит в следующем. Дело в том, что кроме коррекции ошибок кодами Рида-Соломона, в формате CD предусмотрено еще и маскирование неоткорректированных отсчетов с помощью интерполяции. Поскольку интерполяция – это замена величины искаженного отсчета средним арифметическим от величин двух соседних неискаженных отсчетов (рис. 5.7), то желательно, чтобы четные и нечетные отсчеты находились в зонах, которые трудно повредить одновременно. Это и достигается перемещением четных и нечетных отсчетов на разные участки дорожки. Теперь, если длинный пакет ошибок исказит, скажем, несколько четных отсчетов подряд, то интерполяция все равно будет возможна, поскольку нечетные отсчеты, расположенные вдали от четных, при этом не пострадают.

Интерполяция, в отличие от коррекции ошибок декодером Рида-Соломона, – приблизительный метод. Тем не менее, она способна вполне эффективно маскировать ошибки, делая их незаметными на слух. Не зря

ведь на раннем этапе развития цифровой звукотехники считалось, что применение корректирующих кодов – слишком большая роскошь для бытовой аппаратуры, достаточно и одной интерполяции.

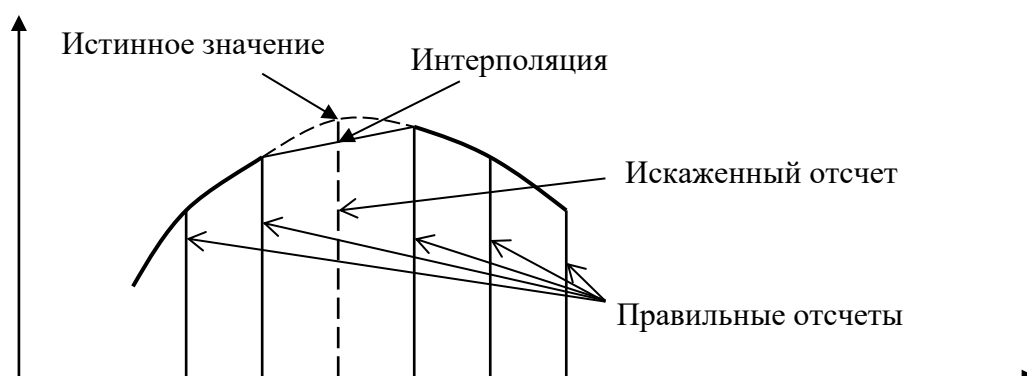


Рис. 5.7. Интерполяция

Перемежение третьего этапа в кодере CIRC предназначено для борьбы с самыми многочисленными ошибками – случайными. Такие ошибки, как правило, в длину не превышают одного символа. Наихудшая ситуация при воздействии случайной ошибки возникает в том случае, когда она попадает на границу двух соседних символов. Оба они при этом оказываются искаженными. Чтобы уменьшить число ошибок в одном кодовом слове и облегчить работу декодера, четные символы задерживаются на один кадр. Теперь, если искажены два смежных символа, то после деперемежения они оказываются в разных кодовых словах.

Что касается инвертирования проверочных символов на заключительном этапе, то оно предназначено для того, чтобы при декодировании можно было отличить кодированную паузу (когда все символы кодового слова – нули) от неисправности в тракте воспроизведения (отсутствия сигнала вообще). Если проверочные символы не инвертировать, то отличить первое от второго будет невозможно.

Если же проверочные символы инвертировать, то в случае кодированной паузы они превратятся в единицы. На входе декодера эти символы еще раз инвертируются, приобретая свое истинное значение. Если после этого кодовое слово будет состоять из одних «нулей», то декодер определит кодированную паузу. Если же проверочные символы окажутся «единицами», то это укажет на неисправность в тракте воспроизведения.

После того, как выполнены все процедуры, обеспечивающие защиту информации от ошибок, поток данных поступает на каналный модулятор.

Подробная схема деперемежения ясна из рис. 5.5. Все операции здесь обратны тем, что производились при выполнении перемежения.

### 5.2.1. ДЕКОДИРОВАНИЕ КОДОВ C1 И C2

Способы декодирования кодов C1 и C2 стандартом на формат CD не регламентируются. Поэтому здесь возможно использование любого алгоритма по желанию разработчика.

Существует несколько алгоритмов декодирования кодов Рида-Соломона, однако не все они подходят для использования в системах записи информации из-за того, что требуют слишком много времени для вычислений и процедуру затруднительно реализовать в реальном времени.

Ниже рассматривается один из относительно несложных методов [126,127], подходящий для использования в процедуре декодирования кодов C1 и C2.

Процесс декодирования в большинстве случаев начинается с вычисления так называемого синдрома  $S$ , содержащего в себе информацию о наличии, количестве и позициях ошибок.

$$S = H \cdot V^T = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}$$

Задача декодера состоит в том, чтобы по вычисленным значениям  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$  определить, существуют ли в рассматриваемом кодовом слове ошибки, сколько их и на каких позициях они располагаются. При этом  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$  принадлежат полю  $GF(2^8)$ .

Если ошибок нет, то должно выполняться условие ортогональности

$$H \cdot V^T = 0$$

$$\text{и } S_0 = S_1 = S_2 = S_3 = 0.$$

Если в кодовом слове есть ошибки, то

$$H \cdot V^T = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \neq 0$$

а вектор кодового слова  $V$  в этом случае можно представить как

$$V = (\hat{w}_{n-1}, \hat{w}_{n-2}, \dots, \hat{w}_1, \hat{w}_0)$$

где

$$\hat{w}_i = w_i + e_i$$

а  $e_i$  – значение ошибки на  $i$ -й позиции.

#### Коррекция одной ошибки

Если в кодовом слове имеется одна ошибка  $e_i$ , то

$$S_0 = e_i, S_1 = \alpha^i e_i, S_2 = \alpha^{2i} e_i, S_3 = \alpha^{3i} e_i$$

Таким образом, можно записать

$$\begin{cases} S_1 = \alpha^i S_0; \\ S_2 = \alpha^i S_1; \\ S_3 = \alpha^i S_2. \end{cases}$$

или

$$\frac{S_1}{S_0} = \frac{S_2}{S_1} = \frac{S_3}{S_2} = \alpha^i \quad (5.1)$$

Проверив выполнение условия (5.1), декодер принимает решение о количестве ошибок. Если условие (5.1) выполняется, то существует всего одна ошибка, если не выполняется, то ошибок больше, чем одна.

Установив, что имеется одна ошибка, декодер корректирует ее. Значение ошибки  $e_i = S_0$ , а ее положение ( $i$ ) легко находится из (5.1) по значению  $\alpha^i$ .

### Коррекция двух ошибок

Если в кодовом слове имеются две ошибки  $e_i$  и  $e_j$ , то

$$\begin{cases} S_0 = e_i + e_j; \\ S_1 = \alpha^i e_i + \alpha^j e_j; \\ S_2 = \alpha^{2i} e_i + \alpha^{2j} e_j; \\ S_3 = \alpha^{3i} e_i + \alpha^{3j} e_j. \end{cases} \quad (5.2)$$

В системе уравнений (5.2) неизвестными являются  $e_i$ ,  $e_j$ ,  $\alpha^i$  и  $\alpha^j$ . Пользуясь первым уравнением, можно заменить  $e_j$  на  $S_0 + e_i$  и тогда получается система трех уравнений

$$\begin{cases} \alpha^i S_0 + S_1 = (\alpha^i + \alpha^j) e_i; \\ \alpha^i S_1 + S_2 = \alpha^i (\alpha^i + \alpha^j) e_i; \\ \alpha^i S_2 + S_3 = \alpha^{2i} (\alpha^i + \alpha^j) e_i. \end{cases} \quad (5.3)$$

Исключая  $e_i = \frac{\alpha^j S_0 + S_1}{\alpha^i + \alpha^j}$ , получим

$$\begin{cases} \alpha^i (\alpha^j S_0 + S_1) = \alpha^j S_1 + S_2; \\ \alpha^i (\alpha^j S_1 + S_2) = \alpha^j S_2 + S_3. \end{cases} \quad (5.4)$$

Если соотношения (5.4) выполняются, то число ошибок равно двум. Их положения находятся в результате решения системы (5.4), а значения — из (5.3) и (5.2):

$$e_i = \frac{S_0 + \alpha^{-j} S_1}{1 + \alpha^{i-j}}; \quad e_j = \frac{S_0 + \alpha^{-i} S_1}{1 + \alpha^{j-i}}.$$



### Коррекция трех стираний

Если в слове имеются три ошибочных символа  $e_i$ ,  $e_j$  и  $e_k$ , то

$$\left\{ \begin{array}{l} S_0 = e_i + e_j + e_k; \\ S_1 = \alpha^i e_i + \alpha^j e_j + \alpha^k e_k; \\ S_2 = \alpha^{2i} e_i + \alpha^{2j} e_j + \alpha^{2k} e_k; \\ S_3 = \alpha^{3i} e_i + \alpha^{3j} e_j + \alpha^{3k} e_k. \end{array} \right. \quad (5.5)$$

Исключая  $e_k$  в (5.5) получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha^k S_0 + S_1 = (\alpha^i + \alpha^k) e_i + (\alpha^j + \alpha^k) e_j; \\ \alpha^k S_1 + S_2 = \alpha^i (\alpha^i + \alpha^k) e_i + \alpha^j (\alpha^j + \alpha^k) e_j; \\ \alpha^k S_2 + S_3 = \alpha^{2i} (\alpha^i + \alpha^k) e_i + \alpha^{2j} (\alpha^j + \alpha^k) e_j. \end{array} \right. \quad (5.6)$$

Исключая в (5.6)  $e_j$ , получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha^j (\alpha^k S_0 + S_1) + (\alpha^k S_1 + S_2) = (\alpha^i + \alpha^j) (\alpha^i + \alpha^k) e_i; \\ \alpha^j (\alpha^k S_1 + S_2) + (\alpha^k S_2 + S_3) = \alpha^i (\alpha^i + \alpha^j) (\alpha^i + \alpha^k) e_i. \end{array} \right. \quad (5.7)$$

Наконец, исключая  $e_i$ , получим:

$$\alpha^i [\alpha^j (\alpha^k S_0 + S_1) + (\alpha^k S_1 + S_2)] = \alpha^j (\alpha^k S_1 + S_2) + (\alpha^k S_2 + S_3).$$

Если условие (5.8) выполняется, то количество ошибочных символов в кодовом слове принимается равным трем, причем необходимо, чтобы  $S_0 \neq 0$ ;  $S_1 \neq 0$  и  $S_2 \neq 0$ .

Значения соответствующих ошибок  $e_i$ ,  $e_j$  и  $e_k$  при этом определяются из следующих выражений:

$$\begin{aligned} e_i &= \frac{S_0 + (\alpha^{-j} + \alpha^{-k}) S_1 + \alpha^{-j-k} S_2}{(1 + \alpha^{i-j})(1 + \alpha^{j-k})}; \\ e_j &= \frac{S_0 + (\alpha^{-k} + \alpha^{-i}) S_1 + \alpha^{-k-i} S_2}{(1 + \alpha^{j-i})(1 + \alpha^{j-k})}; \\ e_k &= \frac{S_0 + (\alpha^{-i} + \alpha^{-j}) S_1 + \alpha^{-i-j} S_2}{(1 + \alpha^{k-i})(1 + \alpha^{k-j})}. \end{aligned} \quad (5.9)$$

Разумеется, коррекция трех ошибок возможна только в том случае, если они являются стираниями, т.е. их позиции  $(i, j, k)$  известны.

### Коррекция четырех стираний

Если в кодовом слове имеются четыре ошибочных символа  $e_i, e_j, e_k$  и  $e_l$ , то

$$\begin{cases} S_0 = e_i + e_j + e_k + e_l; \\ S_1 = \alpha^i e_i + \alpha^j e_j + \alpha^k e_k + \alpha^l e_l; \\ S_2 = \alpha^{2i} e_i + \alpha^{2j} e_j + \alpha^{2k} e_k + \alpha^{2l} e_l; \\ S_3 = \alpha^{3i} e_i + \alpha^{3j} e_j + \alpha^{3k} e_k + \alpha^{3l} e_l. \end{cases} \quad (5.10)$$

Преобразуя эти уравнения подобно предыдущим, получим выражения значений ошибок:

$$\begin{aligned} e_i &= \frac{S_0 + (\alpha^{-j} + \alpha^{-k} + \alpha^{-l})S_1 + (\alpha^{-j-k} + \alpha^{-k-l} + \alpha^{-l-j})S_2 + \alpha^{-j-k-l}S_3}{(1 + \alpha^{i-j})(1 + \alpha^{j-k})(1 + \alpha^{i-l})}; \\ e_j &= \frac{S_0 + (\alpha^{-k} + \alpha^{-l} + \alpha^{-i})S_1 + (\alpha^{-k-l} + \alpha^{-l-i} + \alpha^{-i-k})S_2 + \alpha^{-k-l-i}S_3}{(1 + \alpha^{j-i})(1 + \alpha^{j-k})(1 + \alpha^{j-l})}; \\ e_k &= \frac{S_0 + (\alpha^{-l} + \alpha^{-i} + \alpha^{-j})S_1 + (\alpha^{-l-i} + \alpha^{-i-j} + \alpha^{-j-l})S_2 + \alpha^{-k-i-j}S_3}{(1 + \alpha^{k-i})(1 + \alpha^{k-j})(1 + \alpha^{k-l})}; \\ e_l &= \frac{S_0 + (\alpha^{-i} + \alpha^{-j} + \alpha^{-k})S_1 + (\alpha^{-i-j} + \alpha^{-j-k} + \alpha^{-k-i})S_2 + \alpha^{-i-j-k}S_3}{(1 + \alpha^{l-i})(1 + \alpha^{l-j})(1 + \alpha^{l-k})}. \end{aligned} \quad (5.11)$$

Так же, как и в предыдущем случае, коррекция четырех ошибок возможна, если только позиции ошибок  $i, j, k$  и  $l$  отмечены указателями стирания.

Несмотря на то, что описанный алгоритм относительно прост, для его реализации требуется сложное вычислительное устройство и много времени для вычислений, так как необходимо последовательно проделать все операции: проверку на наличие ошибок вообще, проверку на наличие только одной ошибки и проверку на наличие только двух ошибок.

### **5.2.2. СТРАТЕГИИ РАБОТЫ БЛОКА КОРРЕКЦИИ ОШИБОК (ДЕКОДЕРА CIRC)**

Описанные выше алгоритмы обнаружения и коррекции ошибок кодами C1 и C2 (или любой другой подходящий алгоритм) могут лежать в основе построения схемы декодера CIRC в целом. Как уже говорилось, декодер CIRC включает в себя оба декодера кодов Рида-Соломона и три ступе-

ни депережежения (рис. 5.5). При этом возможности декодеров C1 и C2 могут полностью и не использоваться. В то же время в процедуре декодирования второго этапа (C2) всегда используется информация от декодера первого этапа (C1) – указатели стирания.

Совокупность операций, производимых каждым из декодеров системы CIRC с учетом указателей стирания от предыдущей ступени, называется *стратегией работы* или *стратегией декодирования*. Рассмотрим некоторые из них.

### Упрощенная стратегия

Одной из самых простых стратегий, когда-либо использовавшихся в проигрывателях CD, является стратегия, разработанная фирмой Philips для своих первых аппаратов и заложенная в схемотехнику специализированной БИС SAA7020 [128]. Алгоритм ее представлен на рис. 5.8.

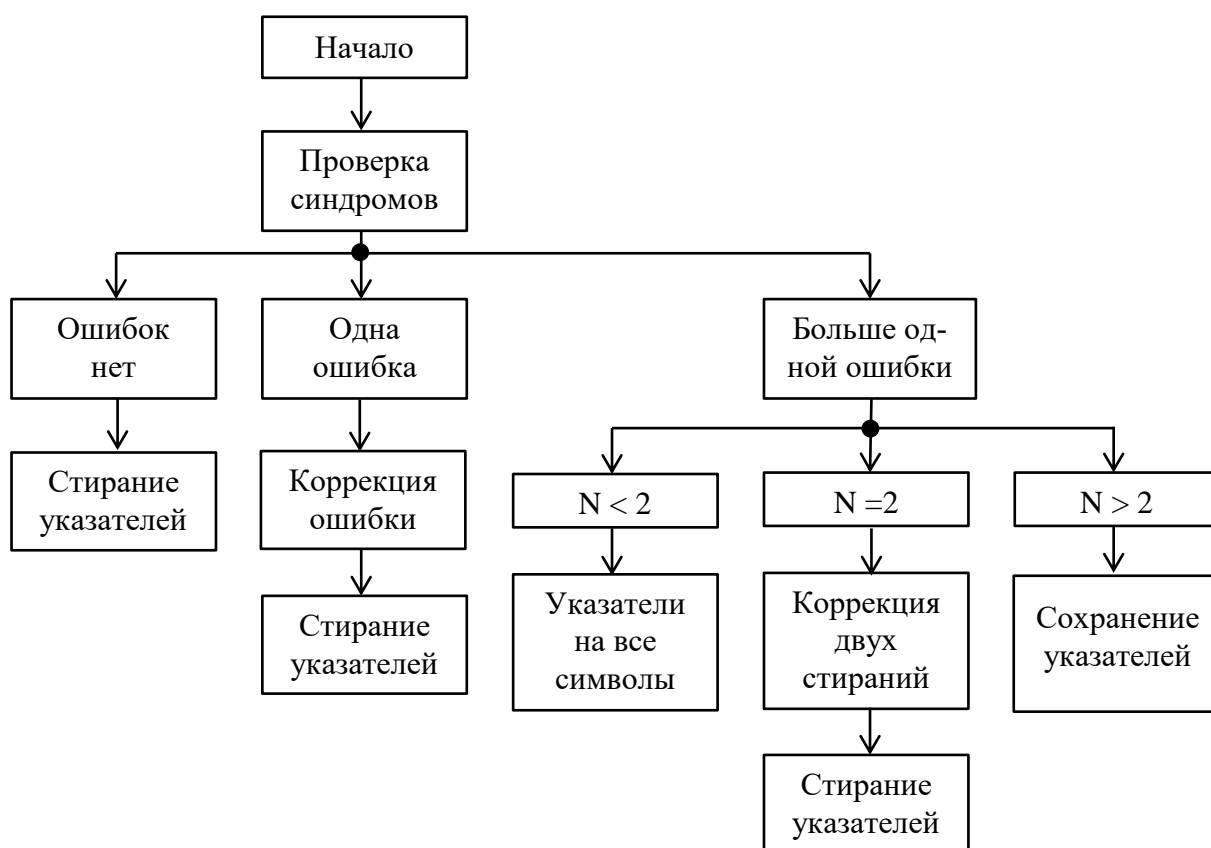


Рис. 5.8. Упрощенная стратегия декодирования (C2)

Здесь декодер C1 предназначен для коррекции только одного ошибочного символа, и обнаружения двух и более ошибочных символов.

Декодер C2 предназначен для коррекции одного ошибочного символа или двух стираний.

Кодовое слово из 32-х символов, поступившее на вход декодера C1, проверяется сначала на наличие в нем ошибок вообще. Для этого вычис-

ляются синдромы  $S_0-S_3$ . Если все они равны нулю, то декодер принимает решение об отсутствии ошибок, и 28 информационных символов передаются для дальнейшей обработки неизменными. Четыре проверочных символа  $P_0-P_3$  при этом отбрасываются.

Если  $S_0 \neq 0$ ,  $S_1 \neq 0$ ,  $S_2 \neq 0$ ,  $S_3 \neq 0$ , то проверяется выполнение условия (5.1), и если оно выполняется, то считается, что имеется одна ошибка и производится ее коррекция.

Если условие (5.1) не выполняется, то считается, что количество ошибок больше одной и коррекция не производится, а все символы кодового слова отмечаются указателями стирания.

Как говорилось выше, декодер С1 в принципе способен исправить и две обнаруженные ошибки, но, из соображений упрощения его схемотехники и сокращения времени на вычисления, эта возможность в данном случае не используется.

Декодер С2 в случае отсутствия ошибок или наличия одной ошибки, производит те же операции, что и декодер С1. Кроме того, если условие (5.1) не выполняется, но имеются до двух указателей стирания, производит коррекцию стертых символов. Однако, если в этом случае указателей стирания нет, то существует вероятность, что ошибок на самом деле больше, чем может обнаружить декодер, и поэтому, чтобы исключить пропуск ошибки, все 24 информационных символа кодового слова отмечаются указателями стирания. Если количество указателей  $N > 2$ , то они сохраняются, а символы передаются без изменений. При этом, как и в случае декодера С1, проверочные символы  $Q_1-Q_3$  отбрасываются.

Здесь декодер С2, так же, как и декодер С1, не до конца использует свои потенциальные возможности. А именно: коррекция трех и четырех стираний, а также коррекция двух ошибок здесь не производится.

### **Полная стратегия**

Стратегия декодирования, полностью использующая возможности кодов С1 и С2, реализуется следующим образом (рис. 5.9).

Декодер С1, вычислив значения синдромов  $S_0-S_3$ , определяет, есть ли в принятом кодовом слове ошибки. Если  $S_0=S_1=S_2=S_3=0$ , то ошибок нет.

Если это не так, то проверяется выполнение условия (5.1). Если оно выполняется, то существует всего одна ошибка, и декодер ее корректирует – как и в случае упрощенной стратегии.

Если условие (5.1) не выполняется, то проверяется выполнение условия (5.4) наличия двух ошибок. Если оно выполняется, то в кодовом слове две ошибки и обе они декодером корректируются.

Если же не выполняется и условие (5.4), то считается, что количество ошибок больше, чем две, и все 28 информационных символов кодового слова отмечаются указателями стирания, а четыре проверочных символа  $P_0-P_3$  отбрасываются.

Поскольку стирания на декодер С1 в данной стратегии поступать не могут, то на этом возможности его исчерпываются и процедура декодирования продолжается уже в декодере С2.

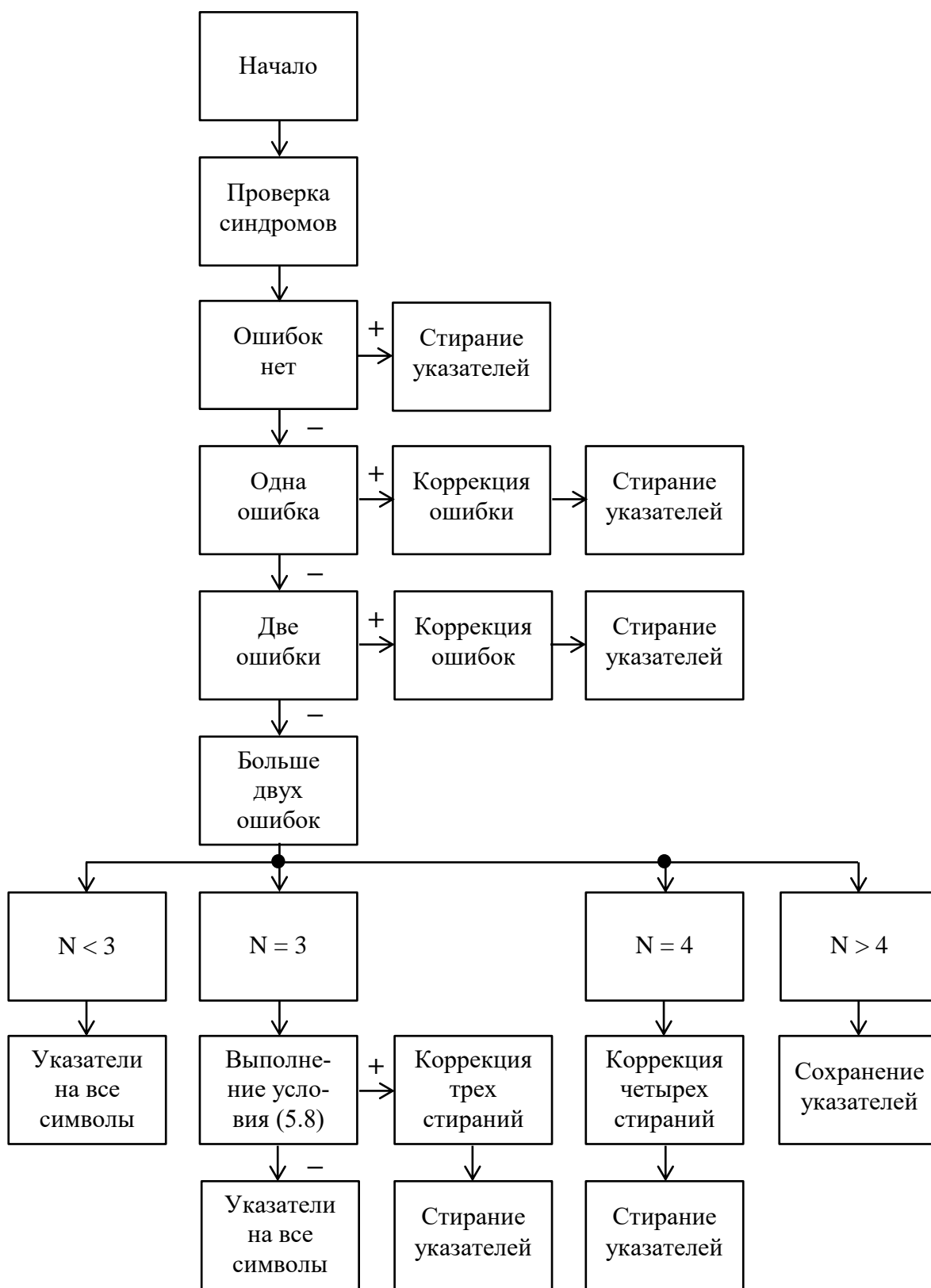


Рис. 5.9. Алгоритм работы декодера С2 при полной стратегии

Декодер С2, также, как и декодер С1, способен обнаружить и исправить не более двух ошибок. Такую процедуру он и продельывает в первую очередь – независимо от наличия или отсутствия указателей стирания. И лишь после того, как определено, что ошибок больше двух (не выполняется ни условие (5.1), ни условие (5.4)), декодер С2 принимает во внимание указатели стирания от декодера С1.

Если декодер С2 обнаружил, что ошибок больше двух, а указателей стирания нет ( $N=0$ ), то он сам отмечает такими указателями все 24 информационных символа кодового слова – кроме четырех проверочных символов  $Q$ , которые отбрасываются. Локализовать и исправить три и более ошибок декодер С2 не может. Точно такие же действия он производит в случае, если имеется всего один или два указателя стирания ( $N=1,2$ ).

Если же имеется три указателя стирания ( $N=3$ ), то декодер проверяет выполнение условия (5.8) наличия трех ошибок в кодовом слове, используя при этом полученные указатели. Если условие (5.8) выполняется, значит, ошибок действительно три и декодер корректирует их с помощью соотношений (5.9).

Если условие (5.8) не выполняется, то это означает, что либо имеется еще одна или несколько ошибок, не отмеченных указателями, либо ошибок все-таки три, но один или несколько указателей не соответствуют истинному положению ошибок. В этом случае декодер локализовать необозначенную ошибку уже не может и, чтобы исключить возможность пропуска этой ошибки, отмечает указателями стирания все 24 информационных символа в кодовом слове.

Если обнаружено, что ошибок больше двух и имеются четыре указателя стирания ( $N=4$ ), то декодер С2 корректирует эти стирания, используя соотношения (5.11).

Если обнаружено, что ошибок больше двух, а указателей стирания больше четырех ( $N > 4$ ), то декодер С2 сохраняет эти указатели, расставленные декодером С1, на прежних местах, коррекция их не производится, а информационные символы передаются для дальнейшей обработки.

### *Другие стратегии*

В ходе работ по повышению надежности системы обнаружения и коррекции ошибок было установлено, что и процедура, подобная только что описанной, где возможности декодеров С1 и С2 используются полностью, не может считаться предельно эффективной. Здесь возможна, хотя и маловероятна, ситуация, когда четыре и более ошибок вместе создают такую же картину, что и одна ошибка. Это приведет к тому, что один из символов кодового слова (правильный) будет ошибочно «скорректирован», а истинные ошибки пройдут незамеченными.

Аналогичная ситуация может возникнуть при обнаружении трех ошибочных символов и более как двух ошибок. Вероятность последнего события даже несколько выше, чем первого [129-130].

Чтобы избежать подобных неприятностей, а также повысить вероятность обнаружения различных картин ошибок, была разработана эффективная стратегия декодирования, получившая в свое время известность как «*суперстратегия*», с использованием указателей стирания трех типов (двух- и трехразрядных) [131-137]. Этими указателями декодер С1 отмечает все символы кодового слова в зависимости от того, какая операция была над ними произведена.

Если декодер С1 обнаружил и исправил одну ошибку, то все информационные символы кодового слова отмечаются им указателями первого типа (01 или 001).

Если обнаружено и исправлено две ошибки, то ставится указатель второго типа (10 или 010).

Если обнаружено, что ошибок больше двух, то используются указатели третьего типа (11 или 100).

Разумеется, когда ошибок не обнаружено, то указатели будут 00 или 000.

Декодер С2 в рамках этой стратегии производит сложный анализ получающейся картины ошибок с использованием всех типов указателей, которые к нему поступают. Причем разные символы одного и того же кодового слова могут иметь указатели разных типов, поскольку из-за наличия перемежения второго этапа они поступают из разных кодовых слов предыдущего кода С1.

Еще более сложная стратегия была разработана фирмой Philips в 1988 году и использована в схемотехнике БИС SAA7310 [138, 139] и последующих ее модификациях.

Здесь уже и декодер EFM расставляет указатели стирания, отмечая ими те символы, искажение 14-разрядной формы которых привело к тому, что им не нашлось соответствующего 8-разрядного символа в таблице преобразования и это явно указывает на их ошибочность.

В этой стратегии оба декодера С1 и С2 работают со стираниями, до конца используя свои потенциальные возможности.

Другими словами, каждый из декодеров выполняет следующие операции (табл. 5.2):

|                |  |
|----------------|--|
| $t = 2$        | Обнаружение и коррекция двух ошибок с неизвестным положением                                     |
| $e = 1, t = 1$ | Коррекция одного стирания, а также обнаружение и коррекция одной ошибки с неизвестным положением |
| $e = 2, t = 1$ | Коррекция двух стираний, а также обнаружение и коррекция одной ошибки с неизвестным положением   |
| $e = 3$        | Коррекция трех стираний  |

**Режимы работы декодеров C1 и C2**

|  |       | Коррекция стираний (e) |       |       |       |       |
|--|-------|------------------------|-------|-------|-------|-------|
|  |       | e = 0                  | e = 1 | e = 2 | e = 3 | e = 4 |
| Коррекция ошибок<br>с неизвестным положением (t) | t = 0 | +                      | +     | +     | +     | +     |
|  | t = 1 | +                      | +     | +     |       |       |
|  | t = 2 | +                      |       |       |       |       |

Такая стратегия известна среди специалистов как *адаптивная*.

**5.2.3. МАСКИРОВАНИЕ ИСКАЖЕННЫХ ОТСЧЕТОВ**

После того, как декодер CIRC свою задачу по коррекции ошибок выполнил, информация вновь приобретает вид последовательности 16-разрядных символов, т.е. восьмиразрядные символы, с которыми оперировал декодер CIRC, вновь объединяются в 16-разрядные отсчеты, а те, в свою очередь, разделяются на две последовательности – правого и левого стереоканалов. Теперь их можно подавать на ЦАП для преобразования в аналоговую форму. Но те из отсчетов, которые включают в себя символы, отмеченные указателями стирания, сразу направлять в ЦАП не стоит, так как в звучании фонограммы могут быть слышны потрескивания и щелчки. Чтобы избежать подобной ситуации, такие отсчеты заменяются интерполяциями – средним арифметическим от значений соседних неискаженных отсчетов (рис.9). В большинстве случаев значение интерполяции очень близко к истинному значению искаженного отсчета и на слух незаметно. Только на высоких частотах серии интерполяций могут ощущаться людьми с хорошим слухом как едва уловимые искажения.

Интерполяция бывает разная. Та, которая используется для маскирования ошибок в цифровой звукотехнике, называется *интерполяцией первого порядка*. При ее вычислении принимаются во внимание только по одному отсчету, соседнему с искаженным (рис. 5.7 и 5.10). Но интерполяция может быть и более высоких порядков. Например, если используется *интерполяция N-го порядка*, то при расчете величины искаженного отсчета будут учитываться N предшествующих ему правильных отсчетов и N следующих за ним. Конечно, здесь вычисленное значение будет более точным, чем при интерполяции первого порядка.

Подобные способы маскирования эффективны только при наличии одиночных ошибок. Однако нередки случаи, когда искаженными оказываются несколько отсчетов подряд. Интерполяцией их маскировать нельзя. Если оставить все как было, то в этом месте фонограммы будет слышен громкий треск. Если заменить искажения «нулями», то будут слышны два громких щелчка – в начале и в конце серии. В первых экспериментальных моделях проигрывателей CD для маскирования таких серий использовался



еще один вид интерполяции – **интерполяция нулевого порядка**, когда взамен искаженных значений вставлялось значение последнего правильного отсчета, а последний искаженный вычислялся по методу линейной интерполяции (рис. 5.10). Такой способ маскирования еще называется **удержанием**.

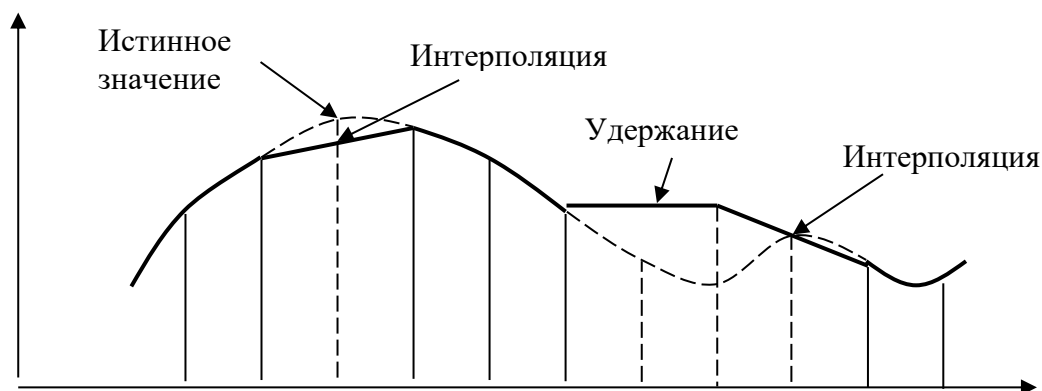


Рис. 5.10. Интерполяция первого порядка и удержание

Однако способ этот чересчур уж неточный. Поэтому впоследствии для подобных случаев был разработан другой способ маскирования – **приглушение (muting)**. Если искаженными оказываются много отсчетов подряд, то они заменяются значением последнего правильного плавно уменьшающегося до нуля по косинусоидальному закону (рис. 5.11). При достаточно длинных сериях искажений для этого отводится 128 периодов частоты дискретизации. После этого, за 128 периодов до первого правильного отсчета, сигнал начинает плавно возрастать по тому же косинусоидальному закону до величины этого неискаженного отсчета. Если количество искажений меньше 256, то на уменьшение и увеличение отводится по половине их общего числа.

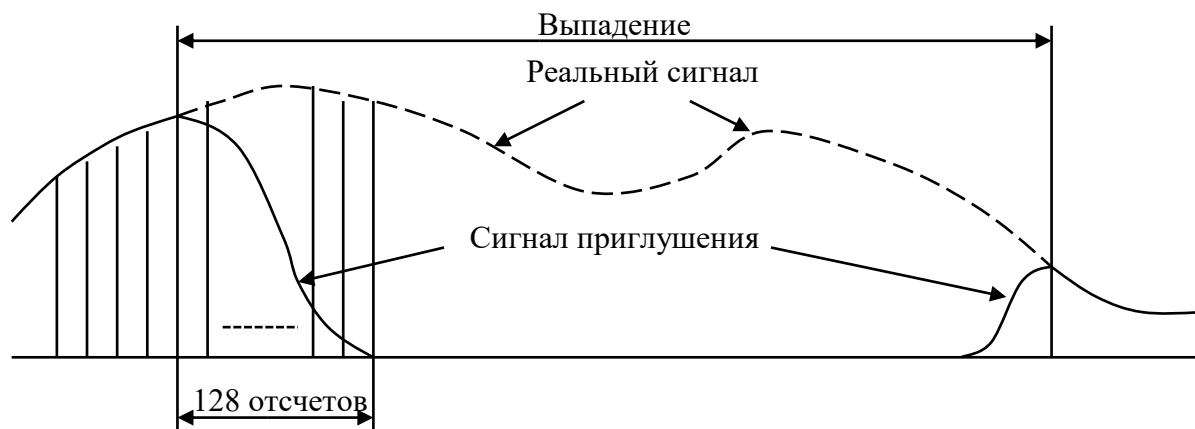


Рис. 5.11. Маскирование длинных выпадов методом приглушения

На слух такие плавные переходы, даже при достаточно большой их длине, воспринимаются как кратковременные замирания звука, без неприятных ощущений в виде тресков и щелчков. Короткие же не ощущаются вовсе в силу инерционности человеческого слуха.

С помощью технологии приглушения плавно уменьшается уровень сигнала в конце каждой звуковой дорожки на диске, а также увеличивается в ее начале. Кроме приглушения, для этих целей могут использоваться также механизмы общего масштабирования, замирания и ослабления.

**Общее масштабирование** состоит в том, что уровень сигнала после последнего правильного отсчета начинает уменьшаться по линейному закону до уровня 0 дБ. Также по линейному закону уровень сигнала возрастает до нормального перед первым правильным отсчетом.

**Замирание** аналогично приглушению и общему масштабированию, но здесь в течение 128 тактов масштаб сигнала уменьшается или увеличивается на 0,07 дБ за каждый такт.

**Ослабление** сигнала состоит в уменьшении общего уровня сигнала на -12 дБ.

### 5.3. КАНАЛЬНОЕ КОДИРОВАНИЕ (МОДУЛЯЦИЯ)

После того, как информация защищена от искажений системой CIRC, поток данных поступает на каналный модулятор.

Для модуляции в формате CD используется упоминавшийся выше каналный код **EFM** (*Eight to Fourteen Modulation – модуляция 8-14*), разработанный учеными фирмы PHILIPS специально для лазерной записи информации [23, 110, 111, 140-142].

В соответствии с правилами кодирования EFM, каждый 8-разрядный символ заменяется однозначно ему соответствующим 14-разрядным символом из специальной таблицы преобразования (табл. 5.3) [23].

Количество исходных 8-разрядных символов, очевидно, равно  $2^8=256$ . А 14-разрядных символов может быть  $2^{14}=16384$ . Но из этого множества 14-разрядных комбинаций подобрано 256 таких, у которых между двумя соседними единицами не меньше двух, но не больше 10 «нулей». На самом деле, символов, удовлетворяющим таким требованиям на ограничение последовательности «нулей», чуть больше – 267, но 11 оказались уже лишними.

Кроме того, к каждому полученному в результате преобразования 14-разрядному символу добавляются еще 3 соединительных разряда. Эти соединительные разряды никакой информации не несут и нужны только для того, чтобы при сопряжении двух символов, один из которых заканчивается «единицей», а другой с нее начинается, создать между ними интервал в три бита, а в случае, если при сопряжении возникнет последовательность «нулей» больше десяти, вставить в один из них «единицу».

Таблица 5.3-1

Таблица преобразования 8-14 кода EFM

| №п/п | Информационное слово | Кодовое слово  | №п/п | Информационное слово | Кодовое слово  |
|------|----------------------|----------------|------|----------------------|----------------|
| 0    | 00000000             | 01001000100000 | 32   | 00100000             | 00000000100000 |
| 1    | 00000001             | 10000100000000 | 33   | 00100001             | 10000100001000 |
| 2    | 00000010             | 10010000100000 | 34   | 00100010             | 00001000100000 |
| 3    | 00000011             | 10001000100000 | 35   | 00100011             | 00100100100000 |
| 4    | 00000100             | 01000100000000 | 36   | 00100100             | 01000100001000 |
| 5    | 00000101             | 00000100010000 | 37   | 00100101             | 00000100001000 |
| 6    | 00000110             | 00010000100000 | 38   | 00100110             | 01000000100000 |
| 7    | 00000111             | 00100100000000 | 39   | 00100111             | 00100100001000 |
| 8    | 00001000             | 01001001000000 | 40   | 00101000             | 01001001001000 |
| 9    | 00001001             | 10000001000000 | 41   | 00101001             | 10000001001000 |
| 10   | 00001010             | 10010001000000 | 42   | 00101010             | 10010001001000 |
| 11   | 00001011             | 10001001000000 | 43   | 00101011             | 10001001001000 |
| 12   | 00001100             | 01000001000000 | 44   | 00101100             | 01000001001000 |
| 13   | 00001101             | 00000001000000 | 45   | 00101101             | 00000001001000 |
| 14   | 00001110             | 00010001000000 | 46   | 00101110             | 00010001001000 |
| 15   | 00001111             | 00100001000000 | 47   | 00101111             | 00100001001000 |
| 16   | 00010000             | 10000000100000 | 48   | 00110000             | 00000100000000 |
| 17   | 00010001             | 10000010000000 | 49   | 00110001             | 10000010001000 |
| 18   | 00010010             | 10010010000000 | 50   | 00110010             | 10010010001000 |
| 19   | 00010011             | 00100000100000 | 51   | 00110011             | 10000100010000 |
| 20   | 00010100             | 01000010000000 | 52   | 00110100             | 01000010001000 |
| 21   | 00010101             | 00000010000000 | 53   | 00110101             | 00000010001000 |
| 22   | 00010110             | 00010010000000 | 54   | 00110110             | 00010010001000 |
| 23   | 00010111             | 00100010000000 | 55   | 00110111             | 00100010001000 |
| 24   | 00011000             | 01001000010000 | 56   | 00111000             | 01001000001000 |
| 25   | 00011001             | 10000000010000 | 57   | 00111001             | 10000000001000 |
| 26   | 00011010             | 10010000010000 | 58   | 00111010             | 10010000001000 |
| 27   | 00011011             | 10001000010000 | 59   | 00111011             | 10001000001000 |
| 28   | 00011100             | 01000000010000 | 60   | 00111100             | 01000000001000 |
| 29   | 00011101             | 00001000010000 | 61   | 00111101             | 00001000001000 |
| 30   | 00011110             | 00010000010000 | 62   | 00111110             | 00010000001000 |
| 31   | 00011111             | 00100000010000 | 63   | 00111111             | 00100000001000 |

Таблица 5.3-2

Таблица преобразования 8-14 кода EFM (продолжение)

| №п/п | Информационное слово | Кодовое слово   | №п/п | Информационное слово | Кодовое слово   |
|------|----------------------|-----------------|------|----------------------|-----------------|
| 64   | 01000000             | 01001000100100  | 96   | 01100000             | 01001000100010  |
| 65   | 01000001             | 10000100100100  | 97   | 01100001             | 10000100100010  |
| 66   | 01000010             | 10010000100100  | 98   | 01100010             | 10010000100010  |
| 67   | 01000011             | 10001000100100  | 99   | 01100011             | 10001000100010  |
| 68   | 01000100             | 01000100100100  | 100  | 01100100             | 01000100100010  |
| 69   | 01000101             | 00000000100100  | 101  | 01100101             | 00000000100010  |
| 70   | 01000110             | 00010000100100  | 102  | 01100110             | 01000000100100  |
| 71   | 01000111             | 00100100100100  | 103  | 01100111             | 00100100100010  |
| 72   | 01001000             | 01001001000100  | 104  | 01101000             | 01001001000010  |
| 73   | 01001001             | 100000001000100 | 105  | 01101001             | 100000001000010 |
| 74   | 01001010             | 10010001000100  | 106  | 01101010             | 10010001000010  |
| 75   | 01001011             | 10001001000100  | 107  | 01101011             | 10001001000010  |
| 76   | 01001100             | 010000001000100 | 108  | 01101100             | 010000001000010 |
| 77   | 01001101             | 000000001000100 | 109  | 01101101             | 000000001000010 |
| 78   | 01001110             | 00010001000100  | 110  | 01101110             | 00010001000010  |
| 79   | 01001111             | 001000001000100 | 111  | 01101111             | 001000001000010 |
| 80   | 01010000             | 10000000100100  | 112  | 01110000             | 10000000100010  |
| 81   | 01010001             | 100000100000100 | 113  | 01110001             | 10000010000010  |
| 82   | 01010010             | 100100100000100 | 114  | 01110010             | 10010010000010  |
| 83   | 01010011             | 00100000100100  | 115  | 01110011             | 00100000100010  |
| 84   | 01010100             | 010000100000100 | 116  | 01110100             | 01000010000010  |
| 85   | 01010101             | 000000100000100 | 117  | 01110101             | 00000010000010  |
| 86   | 01010110             | 000100100000100 | 118  | 01110110             | 00010010000010  |
| 87   | 01010111             | 001000100000100 | 119  | 01110111             | 00100010000010  |
| 88   | 01011000             | 010010000000100 | 120  | 01111000             | 01001000000010  |
| 89   | 01011001             | 100000000000100 | 121  | 01111001             | 00001001001000  |
| 90   | 01011010             | 100100000000100 | 122  | 01111010             | 10010000000010  |
| 91   | 01011011             | 100010000000100 | 123  | 01111011             | 10001000000010  |
| 92   | 01011100             | 010000000000100 | 124  | 01111100             | 01000000000010  |
| 93   | 01011101             | 000010000000100 | 125  | 01111101             | 00001000000010  |
| 94   | 01011110             | 000100000000100 | 126  | 01111110             | 00010000000010  |
| 95   | 01011111             | 001000000000100 | 127  | 01111111             | 00100000000010  |

Таблица преобразования 8-14 кода EFM (продолжение)

| №п/п | Информаци-<br>онное<br>слово | Кодовое слово  | №п/п | Информаци-<br>онное<br>слово | Кодовое слово  |
|------|------------------------------|----------------|------|------------------------------|----------------|
| 128  | 1000000                      | 01001000100001 | 160  | 10100000                     | 00001000100001 |
| 129  | 10000001                     | 10000100100001 | 161  | 10100001                     | 10000100001001 |
| 130  | 10000010                     | 10010000100001 | 162  | 10100010                     | 01000100010000 |
| 131  | 10000011                     | 10001000100001 | 163  | 10100011                     | 00000100100001 |
| 132  | 10000100                     | 01000100100001 | 164  | 10100100                     | 01000100001001 |
| 133  | 10000101                     | 00000000100001 | 165  | 10100101                     | 00000100001001 |
| 134  | 10000110                     | 00010000100001 | 166  | 10100110                     | 01000000100001 |
| 135  | 10000111                     | 00100100100001 | 167  | 10100111                     | 00100100001001 |
| 136  | 10001000                     | 01001001000001 | 168  | 10101000                     | 01001001001001 |
| 137  | 10001001                     | 10000001000001 | 169  | 10101001                     | 10000001001001 |
| 138  | 10001010                     | 10010001000001 | 170  | 10101010                     | 10010001001001 |
| 139  | 10001011                     | 10001001000001 | 171  | 10101011                     | 10001001001001 |
| 140  | 10001100                     | 01000001000001 | 172  | 10101100                     | 01000001001001 |
| 141  | 10001101                     | 00000001000001 | 173  | 10101101                     | 00000001001001 |
| 142  | 10001110                     | 00010001000001 | 174  | 10101110                     | 00010001001001 |
| 143  | 10001111                     | 00100001000001 | 175  | 10101111                     | 00100001001001 |
| 144  | 10010000                     | 10000000100001 | 176  | 10110000                     | 00000100100000 |
| 145  | 10010001                     | 10000010000001 | 177  | 10110001                     | 10000010001001 |
| 146  | 10010010                     | 10010010000001 | 178  | 10110010                     | 10010010001001 |
| 147  | 10010011                     | 00100000100001 | 179  | 10110011                     | 00100100010000 |
| 148  | 10010100                     | 01000010000001 | 180  | 10110100                     | 01000010001001 |
| 149  | 10010101                     | 00000010000001 | 181  | 10110101                     | 00000010001001 |
| 150  | 10010110                     | 00010010000001 | 182  | 10110110                     | 00010010001001 |
| 151  | 10010111                     | 00100010000001 | 183  | 10110111                     | 00100010001001 |
| 152  | 10011000                     | 01001000000001 | 184  | 10111000                     | 01001000001001 |
| 153  | 10011001                     | 10000010010000 | 185  | 10111001                     | 10000000001001 |
| 154  | 10011010                     | 10010000000001 | 186  | 10111010                     | 10010000001001 |
| 155  | 10011011                     | 10001000000001 | 187  | 10111011                     | 10001000001001 |
| 156  | 10011100                     | 01000010010000 | 188  | 10111100                     | 01000000001001 |
| 157  | 10011101                     | 00001000000001 | 189  | 10111101                     | 00001000001001 |
| 158  | 10011110                     | 00010000000001 | 190  | 10111110                     | 00010000001001 |
| 159  | 10011111                     | 00100010010000 | 191  | 10111111                     | 00100000001001 |

Таблица 5.3-4

## Таблица преобразования 8-14 кода EFM (продолжение)

| №п/п | Информационное слово | Кодовое слово  | №п/п | Информационное слово | Кодовое слово  |
|------|----------------------|----------------|------|----------------------|----------------|
| 192  | 11000000             | 01000100100000 | 224  | 11100000             | 01000100000010 |
| 193  | 11000001             | 10000100010001 | 225  | 11100001             | 00000100000010 |
| 194  | 11000010             | 10010010010000 | 226  | 11100010             | 10000100010010 |
| 195  | 11000011             | 00001000100100 | 227  | 11100011             | 00100100000010 |
| 196  | 11000100             | 01000100010001 | 228  | 11100100             | 01000100010010 |
| 197  | 11000101             | 00000100010001 | 229  | 11100101             | 00000100010010 |
| 198  | 11000110             | 00010010010000 | 230  | 11100110             | 01000000100010 |
| 199  | 11000111             | 00100100010001 | 231  | 11100111             | 00100100010010 |
| 200  | 11001000             | 00001001000001 | 232  | 11101000             | 10000100000010 |
| 201  | 11001001             | 10000100000001 | 233  | 11101001             | 10000100000100 |
| 202  | 11001010             | 00001001000100 | 234  | 11101010             | 00001001001001 |
| 203  | 11001011             | 00001001000000 | 235  | 11101011             | 00001001000010 |
| 204  | 11001100             | 01000100000001 | 236  | 11101100             | 01000100000100 |
| 205  | 11001101             | 00000100000001 | 237  | 11101101             | 00000100000100 |
| 206  | 11001110             | 00000010010000 | 238  | 11101110             | 00010000100010 |
| 207  | 11001111             | 00100100000001 | 239  | 11101111             | 00100100000100 |
| 208  | 11010000             | 00000100100100 | 240  | 11110000             | 00000100100010 |
| 209  | 11010001             | 10000010010001 | 241  | 11110001             | 10000010010010 |
| 210  | 11010010             | 10010010010001 | 242  | 11110010             | 10010010010010 |
| 211  | 11010011             | 10000100100000 | 243  | 11110011             | 00001000100010 |
| 212  | 11010100             | 01000010010001 | 244  | 11110100             | 01000010010010 |
| 213  | 11010101             | 00000010010001 | 245  | 11110101             | 00000010010010 |
| 214  | 11010110             | 00010010010001 | 246  | 11110110             | 00010010010010 |
| 215  | 11010111             | 00100010010001 | 247  | 11110111             | 00100010010010 |
| 216  | 11011000             | 01001000010001 | 248  | 11111000             | 01001000010010 |
| 217  | 11011001             | 10000000010001 | 249  | 11111001             | 10000000010010 |
| 218  | 11011010             | 10010000010001 | 250  | 11111010             | 10010000010010 |
| 219  | 11011011             | 10001000010001 | 251  | 11111011             | 10001000010010 |
| 220  | 11011100             | 01000000010001 | 252  | 11111100             | 01000000010010 |
| 221  | 11011101             | 00001000010001 | 253  | 11111101             | 00001000010010 |
| 222  | 11011110             | 00010000010001 | 254  | 11111110             | 00010000010010 |
| 223  | 11011111             | 00100000010001 | 255  | 11111111             | 00100000010010 |

После этого полученная последовательность преобразуется по способу NRZI (Non Return to Zero Inverted – без возвращения к нулю инвертированный). При этом каждая «единица» соответствует изменению уровня сигнала, а «нуль» - его отсутствию (рис. 5.12).

Таким образом, минимальная длина последовательности одного уровня для кода EFM составляет три канальных разряда или  $8/17 \cdot 3 = 1,41$  исходного разряда. Эта величина в канальном кодировании называется **минимальной длиной пробега** ( $T_{min}$ ) и характеризует степень повышения плотности записи за счет применения данного кода. В самом деле, если раньше самый короткий пит содержал в себе одну единицу информации, то теперь, за счет применения кода EFM, такой пит может содержать в себе уже 1,41 единицы этой информации. Плотность записи при этом повышается в 1,41 раза и объем информации, которую можно разместить на единице площади (или длины) носителя увеличивается в 1,41 раза.

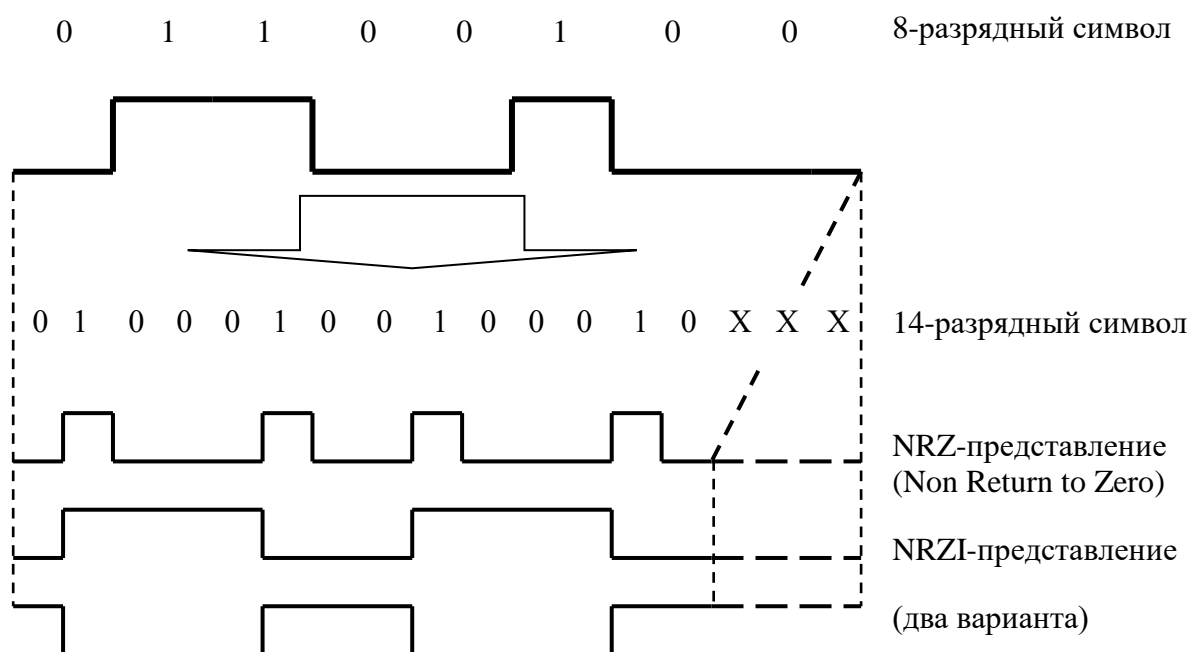


Рис. 5.12. EFM-преобразование

Ограничение длины последовательности одного уровня сверху (до 11 канальных разрядов), необходимо для того, чтобы обеспечить **самосинхронизируемость** кода. Синхронизирующая информация при воспроизведении записи извлекается из перепадов уровня, и если их долго не будет, то система тактовой синхронизации может выйти из полосы удержания.

С величиной минимальной длины пробега связана величина **минимальной длины волны записи**  $\lambda_{min}$ . Она равна длине совокупности минимальной длины пробега одного уровня и другого уровня и характеризует длину волны первой гармоники такой совокупности (рис. 5.13). Для кода

EFM минимальная длина волны записи равна  $6T_{\text{кан}}$ , а частота  $F_{\text{max}}$ , ей соответствующая,

$$F_{\text{max}} = 4,3218 \text{ МГц}/6 = 720 \text{ кГц.}$$

Соответственно, **максимальная длина волны записи**  $\lambda_{\text{max}}$  равна  $22T_{\text{кан}}$  и минимальная частота  $F_{\text{min}}$  в спектре сигнала записи (рис. 5.14)

$$F_{\text{min}} = 4,3218 \text{ МГц}/22 = 196 \text{ кГц.}$$

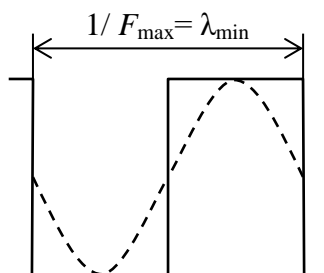


Рис. 5.13. Связь минимальной длины волны записи с максимальной частотой в спектре сигнала

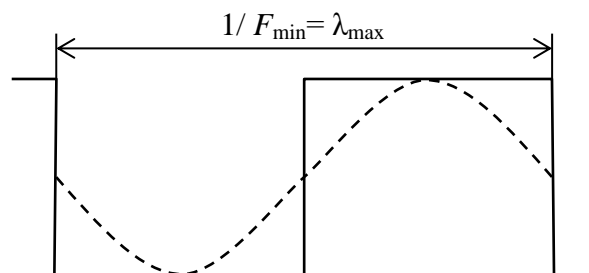


Рис. 5.14. Связь максимальной длины волны записи с минимальной частотой в спектре сигнала

Если посмотреть на спектр мощности информационной последовательности, модулированной по правилам EFM, то видно, что основная энергия находится в промежутке между двумя этими частотами (рис. 5.15).

Однако в области низких частот наблюдается довольно высокий уровень составляющих спектра, которые могут затруднить работу сервосистем проигрывателя – автофокусировки и автотрекинга. Текущие изменения в спектре информационного сигнала могут быть восприняты как ошибки позиционирования оптической головки [141, 143].

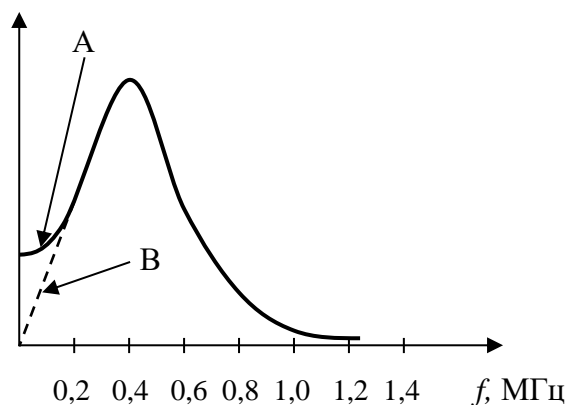


Рис. 5.15. Спектр кода EFM

А – без контроля уровня постоянной составляющей с помощью DSV;  
 В – с контролем DSV

Для борьбы с низкочастотными составляющими спектра в правилах кодирования EFM предусмотрена следующая процедура. Для ее реализа-



ции вводится понятие величины числовой суммы *DSV* (*Digital Sum Value*), которая равна разности между числом разрядов высокого уровня и числом разрядов низкого уровня. Каждый разряд высокого уровня вносит в нее +1, а каждый разряд низкого уровня –1.

При формировании соединительных разрядов между двумя последовательными канальными символами рассматриваются четыре варианта с разными значениями *DSV*. Один из них – когда «единица» в соединительные разряды не вставляется, и три варианта – с формированием «единицы» на одной из трех возможных позиций. Из них выбирается тот, при котором величина *DSV* минимальна. Из рассмотрения исключаются только те варианты, когда нарушаются требования на ограничение длины пробега снизу или сверху.

В примере на рис. 5.16 текущая величина *DSV* в конце предыдущего канального символа, закончившегося в момент времени  $t_0$  равна +3. Последний его разряд – низкого уровня. Следующий символ, расположенный во временном промежутке между  $t_1$  и  $t_2$ , имеет  $DSV = +4$ . Если в соединительных разрядах, располагающихся между ними нет «единицы», то их  $DSV = -3$ . Общая числовая сумма такого варианта равна  $+3-3+4 = +4$ . Наглядно текущее изменение *DSV* от разряда к разряду показано на рисунке.

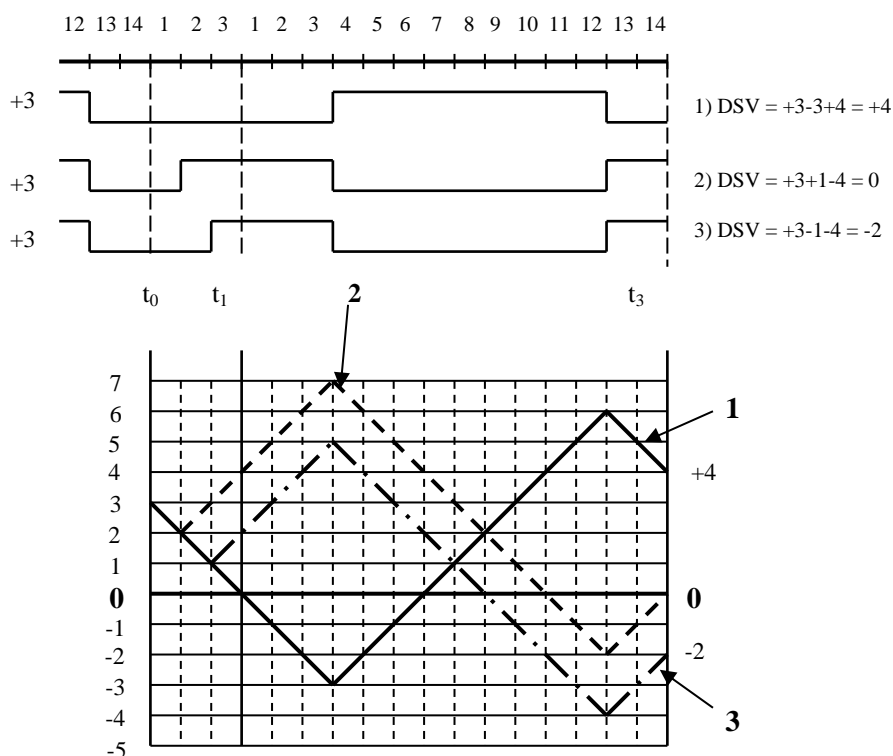


Рис. 5.16. Учет *DSV* при формировании соединительных разрядов

Следующий вариант, когда «единица» формируется в первом соединительном разряде, исключается, так как при этом длина последовательно-

сти «нулей» получается равной двум, что меньше минимально допустимой в три разряда.

А во второй соединительный разряд «единицу» вставлять можно. При этом их DSV будет равна +1, а величина DSV следующего за ними символа инвертируется и превратится из +4 в -4. Общая числовая сумма при этом станет равной  $+3+1-4 = 0$ .

Последний вариант – с «единицей» в третьем соединительном разряде – даст  $DSV = -2$ .

Очевидно, что минимальная абсолютная величина DSV, равная 0, получается при формировании «единицы» во втором соединительном разряде. Значит, именно этот вариант и будет использован.

Следует заметить, однако, что стратегия формирования соединительных разрядов по минимуму абсолютной величины DSV в конце рассматриваемого канального символа не является единственно возможной. Кроме нее могут использоваться и другие стратегии, например, по критерию максимального числа пересечений нулевой линии DSV. В этом случае вариант 1 был бы предпочтительнее, так как тут два пересечения против одного у остальных двух. Также может использоваться критерий минимального удаления изломов линии DSV от оси. Здесь предпочтительнее вариант 3, где наиболее удаленный от нулевой линии излом расположен на уровне +5, против +6 и +7 у первого и второго вариантов соответственно.

Эти и другие стратегии могут использоваться в различных сочетаниях друг с другом и с разными приоритетами. Как правило, так и делается, потому что одна стратегия в некоторых случаях может дать два одинаковых результата. Чтобы выяснить, какой из них предпочтительнее, прибегают к другой стратегии с более низким приоритетом [24, 25, 144, 145].

Контроль DSV помогает устранить из спектра кода EFM постоянную составляющую и существенно снизить уровень примыкающих к ней низкочастотных компонент.

В процессе модуляции в начало каждого кадра вставляется кадровая синхрогруппа и сформированная таким образом последовательность подается на устройство оптической записи.

## 5.4. СЛУЖЕБНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Как отмечалось ранее, в каждый кадр информации при записи вставляется особый символ, не имеющий отношения к музыке, но играющий очень важную роль при воспроизведении записи. Этот символ называется *служебным* или *символом субкода*. Как и все прочие символы, он состоит из восьми двоичных разрядов. Каждый из этих разрядов обозначается определенной буквой – P, Q, R, S, T, V и W (рис. 5.17). Последовательности, состоящие из определенных разрядов служебного символа, представляют собой отдельные служебные каналы, в каждом из которых содержит-

ся своя информация. Последовательность служебных символов, а значит и все входящие в нее служебные каналы, делятся на блоки. В каждом блоке содержится по 98 последовательных символов. Таким образом, частота следования служебных блоков в 98 раз ниже частоты кадров, которая, как известно, равна 7,35 кГц.

$$F_{\text{бл}} = F_{\text{кадр}}/98 = 7,35 \text{ кГц}/98 = 75 \text{ Гц}$$

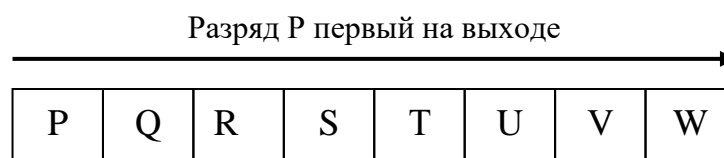


Рис. 5.17. Служебный символ

Для отделения одного блока от другого здесь также используются синхрогруппы – по две на каждый блок (S0 и S1). Они представляют собой 14-разрядные группы строго определенной конфигурации и располагаются на первых двух позициях в блоке (рис.2). После них так же, как и после всех прочих символов, преобразованных по правилам кодирования EFM, следуют по три соединительных разряда. Синхрогруппы не являются информационными символами и поэтому в восьмиразрядной форме не существуют, так же как и кадровая синхрогруппа. Информация содержится в оставшихся 96 символах.

В формате CD-Audio из всех служебных каналов используются только P и Q. Другие каналы используются в других разновидностях формата CD и заполнение их в каждом из вариантов свое.

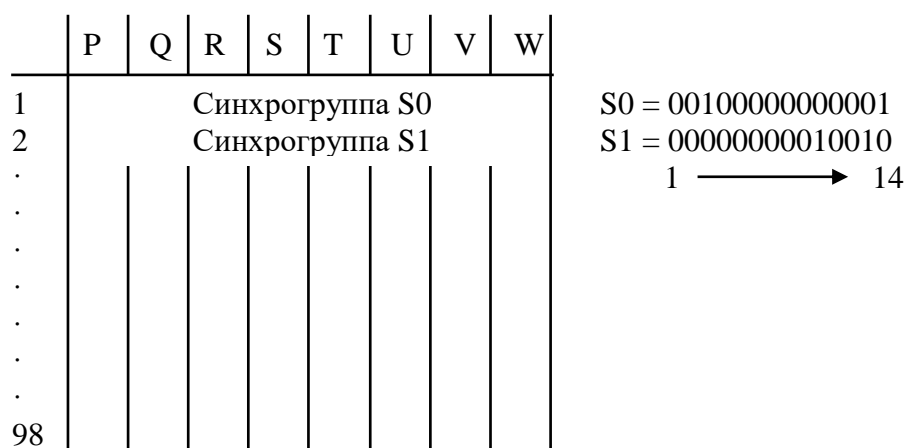


Рис. 5.18. Расположение синхрогрупп S0 и S1 в структуре блока и их конфигурации

### 5.4.1. КАНАЛ P

Канал P является по существу индикатором пауза/музыка. Во время паузы  $P = 1$ , а когда на дорожке присутствует запись музыкального фрагмента,  $P = 0$ .

Продолжительность паузы, когда  $P = 1$ , должна быть, как минимум, 2 секунды. Если он больше, то и  $P = 1$  должно быть, соответственно, больше.

Кроме того, во время считывания вводной дорожки, где записано оглавление, также  $P = 0$ , как и во время считывания музыкального фрагмента. После чего между вводной дорожкой и первым музыкальным фрагментом тоже должна быть пауза 2-3 секунды, когда  $P = 1$ .

Завершает программу, записанную на диске, выводная дорожка, которая начинается сразу же после окончания последнего музыкального фрагмента. Канал P за 2-3 секунды до начала выводной дорожки (когда музыка еще не закончилась) должен переключиться в 1, как при паузе, а в момент начала этой паузы снова стать нулем. Спустя еще 2-3 секунды канал P должен начать периодически переключаться из 0 в 1 и обратно с частотой  $2 \text{ Гц} \pm 2\%$ . Таких циклов должно быть примерно 50 ( $\pm 10\%$ ).

Всякое изменение уровня P осуществляется только после синхронизирующих групп, т.е. в начале очередного блока.

### 5.4.2. КАНАЛ Q

Канал Q содержит данные хронирования содержимого диска и нужен для обеспечения функций поиска заданного фрагмента, повтора, воспроизведения по программе, а также обеспечивает возможность индикации текущего времени как на диске в целом, так и на каждой дорожке в отдельности. Кроме того, он содержит и другие данные о характере записанного материала. Структура блока канала Q, включая два разряда, занимаемые синхрогруппами, показана на рис.3.

Четыре бита «Управление» предназначены для характеристики записи на диске – числа каналов и наличия/отсутствия преимфазиса\*. Кодированы они следующим образом:

0000 – двухканальная запись без преимфазиса;

0001 – двухканальная запись с преимфазисом;

1000 – четырехканальная запись без преимфазиса;

1001 – четырехканальная запись с преимфазисом.

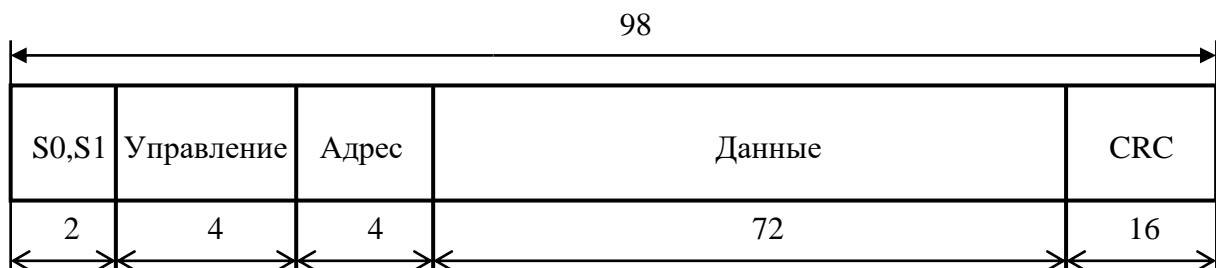


Рис. 5.19. Структура блока данных канала Q в режиме 1

\***Преимфазис** – это предискажение аналогового сигнала с целью увеличения в его спектре уровня высоких частот, которое иногда выполняется перед процедурой аналого-цифрового преобразования звукового сигнала и состоит в том, что сигнал пропускается через специальный фильтр со стандартной частотной характеристикой (рис. 5.20). Если оно производилось, то для восстановления исходного баланса частот воспроизводящее устройство после цифро-аналогового преобразования должно подключить к выходу ЦАП фильтр **деимфазиса** с обратной характеристикой. Информация об этом и содержится в служебном символе.

Общее название прямой и обратной процедур – **имфазис**. В формате CD используется имфазис с характеристикой 50/15 мкс.

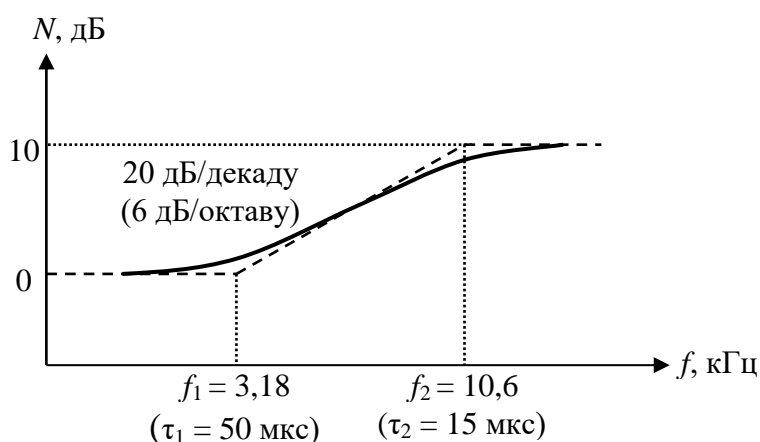


Рис. 5.20. Характеристика преимфазиса 50/15

Эти данные используются управляющим процессором проигрывателя для автоматического включения соответствующего режима обработки данных и подключения, если это необходимо, цепей деимфазиса.

Четыре бита «Адрес» обозначают режим заполнения данных канала Q, т.е. содержимого той части блока, которая обозначена словом «Данные» (72 бита).

И, наконец, последние 16 бит, обозначенные как CRC, представляют собой остаток от деления многочлена, коэффициентами которого являются все предыдущие биты блока, кроме двух, относящихся к синхрогруппам, на порождающий многочлен кода проверки на четность:

$$P(X) = X^{16} + X^{12} + X^5 + 1$$

Полученный остаток должен быть инвертирован.

Эта операция производится для того, чтобы при воспроизведении можно было проверить полученные данные на четность и определить, есть ли в них ошибки. Для этого воспроизведенные данные еще раз делятся на порождающий многочлен  $P(X)$  и полученный остаток после инвертирования сравнивается с тем, что содержится в принятом блоке. Если остатки совпадают, то ошибок нет. Если не совпадают, то ошибки есть и все дан-

ные блока игнорируются как неправильные. Исправления ошибок здесь не производится. В этом нет необходимости, так как блоки много раз повторяются с очень небольшими изменениями.

Как говорилось выше, содержание данных канала Q определяется кодом адреса.

Чаще всего присутствует адрес 0001, определяющий режим 1 заполнения данных. Но и внутри режима 1 возможны два варианта заполнения.

**Первый вариант режима 1** используется на вводной дорожке. В нем отображается оглавление. Структура данных этого варианта представлена на рис. 5.21.



Рис. 5.21. Структура данных первого варианта режима 1 (вводная дорожка)

В этом варианте восемь бит номера дорожки (музыкального фрагмента) являются нулями, что означает вводную дорожку.

В графе «Точка» записываются по порядку номера всех дорожек (музыкальных фрагментов), присутствующих на диске. Каждый номер повторяется трижды (в трех последовательных блоках).

Одновременно с этим в графе «Начало дорожки» записывается время, соответствующее началу очередного музыкального фрагмента – в минутах, секундах и блоках (одна секунда + 75 блокам, номера от 00 до 74) по шкале времени, исчисляемому от начала программной зоны диска (начало первого музыкального фрагмента) до ее (зоны) конца (конец последнего музыкального фрагмента).

В графе «Текущее время на дорожке» отображается текущее время на вводной дорожке – минуты, секунды и блоки.

Все отображаемые числа в двоично-десятичном коде, т.е. восемь рядов соответствуют двум десятичным числам от 00 до 99. Графа «0» заполняется нулями (00).

Таким образом, во время воспроизведения вводной дорожки управляющий процессор считывает с нее себе в память данные оглавления. После этого проигрыватель готов к работе в любом режиме, заданном пользователем. Он уже все о диске «знает».

**Второй вариант режима 1** используется в программной зоне диска. Структура данных этого варианта показана на рис. 5.22.

| Номер дорожки | Индекс | Минуты                   | Секунды | Блоки | 0 | Минуты                 | Секунды | Блоки |
|---------------|--------|--------------------------|---------|-------|---|------------------------|---------|-------|
|               |        | Текущее время на дорожке |         |       |   | Текущее время на диске |         |       |
| 8             | 8      | 8                        | 8       | 8     | 8 | 8                      | 8       | 8     |
| 72            |        |                          |         |       |   |                        |         |       |

Рис. 5.22. Структура данных второго варианта режима 1 (программная зона)

В этом варианте в графе «Номер дорожки» фиксируется номер той дорожки, которая воспроизводится в данный момент.

В графе «Индекс» фиксируется номер части музыкального фрагмента. Их может быть до 99.

В графе «Текущее время на дорожке» присутствует время, исчисляемое от начала каждой конкретной дорожки до ее конца.

В графе «0» - все нули.

В графе «Текущее время на диске» присутствует время, исчисляемое от начала программной зоны диска до ее конца.

Режим 1 заполнения данных должен присутствовать по крайней мере в каждых 9 из 10 блоков.

**Режим 2** (адрес 0010) используется для записи кода данного диска по международному каталогу, который представляет интерес только для изготовителя диска. Поскольку информация эта постоянная для всего диска, то этот режим должен присутствовать в канале Q, по крайней мере, один раз на 100 последовательных блоков. Структура блока в режиме 2 показана на рис. 5.23. Она похожа на структуру блока в режиме 1, однако есть и отличия. Полубайты N1 – N13 – это 13 цифр двоично-десятичного кода в соответствии со стандартом каталога UPC/EAN ( $13 \times 4 = 52$  бита). В графе «0» здесь не 8, а 12 нулей. В графе «Блок» номер того блока, который следует за предыдущим блоком в режиме 1. Остальное – то же, что и в режиме 1.

| S0,S1 | Управление | Адрес | N1 N2 N3 N4 ... N12 N13 | 0  | Блок | CRC |
|-------|------------|-------|-------------------------|----|------|-----|
| 2     | 4          | 4     | 52                      | 12 | 8    | 16  |

Рис. 5.23. Структура блока данных канала Q в режиме 2

Следует отметить, что каталожный номер диска может и отсутствовать. В этом случае все полубайты N1 – N13 будут иметь нулевые значения или слова субкода в режиме 2 могут не появиться вообще.

**Режим 3** (адрес 0111) используется для назначения каждому музыкальному фрагменту уникального идентификационного номера в соответствии с 12-символьным Международным стандартным кодом записи ISRC (International Standard Recording Code), определенным стандартом DIN-31-621. Так же, как и режим 2, он присутствует в канале Q, по крайней мере, один раз на 100 последовательных блоков.

Структура блока в режиме 3 показана на рис. 5.24. Она похожа на структуру блока в режиме 2. Отличия, в основном, в значащей части блока.

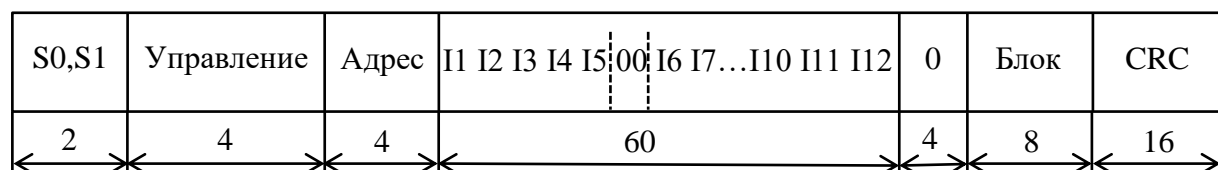


Рис. 5.24. Структура блока данных канала Q в режиме 3

В графе, где располагаются символы I1 - I12 (60 бит) располагается 12-символьный ISRC-номер музыкального фрагмента (дорожки). Символы I1 и I2 обозначают код страны. Символы I3 – I5 обозначают код владельца записи. Символы I6 и I7 указывают год записи (последние две цифры года). Символы I8 – I12 определяют серийный номер записи. Два нуля в середине этой последовательности символов и на самом деле являются двумя нулевыми битами. Они разделяют символы, которые кодируются по-разному.

Символы I1 – I5 кодируются в 6-разрядном формате в соответствии с табл. 5.4, а символы I6 - I12 являются 4-разрядными цифрами двоично-десятичного кода.

В графе «0» здесь 4 нулевых бита. Остальные графы имеют то же самое содержание, что и в режиме 2.

ISRC-номер музыкального фрагмента должен изменяться сразу же после изменения номера дорожки в режиме 1 в программной зоне.

Если музыкальному фрагменту ISRC-номер не присвоен, то слова субкода в режиме 3 отсутствуют. В зонах ввода и вывода слова субкода в режиме 3 также не используются [23].

## 5.5. ПРОИГРЫВАТЕЛЬ КОМПАКТ-ДИСКОВ

После знакомства со всеми этапами преобразования звукового сигнала перед записью не трудно будет разобраться с принципами работы и построением проигрывателя CD или дисководом CD, поскольку здесь все вышеописанные процедуры реализуются в обратном порядке. Структурная



схема проигрывателя компакт-дисков показана на рис. 5.24. Так устроен любой аппарат независимо от его конструкции, размеров, набора сервисных функций – как стационарный, так и переносной.

Таблица 5.4

**Формат символов I1 – I5 в ISRC-коде**

| Символ | Двоичный код | Восьмеричный код | Символ | Двоичный код | Восьмеричный код |
|--------|--------------|------------------|--------|--------------|------------------|
| 0      | 000000       | 00               | I      | 011001       | 31               |
| 1      | 000001       | 01               | J      | 011010       | 32               |
| 2      | 000010       | 02               | K      | 011011       | 33               |
| 3      | 000011       | 03               | L      | 011100       | 34               |
| 4      | 000100       | 04               | M      | 011101       | 35               |
| 5      | 000101       | 05               | N      | 011110       | 36               |
| 6      | 000110       | 06               | O      | 011111       | 37               |
| 7      | 000111       | 07               | P      | 100000       | 40               |
| 8      | 001000       | 10               | Q      | 100001       | 41               |
| 9      | 010001       | 11               | R      | 100010       | 42               |
| A      | 010010       | 21               | S      | 100011       | 43               |
| B      | 010011       | 22               | T      | 100100       | 44               |
| C      | 010100       | 23               | U      | 100101       | 45               |
| D      | 010101       | 24               | V      | 100110       | 46               |
| E      | 010110       | 25               | W      | 100111       | 47               |
| F      | 010111       | 26               | X      | 101000       | 50               |
| G      | 010000       | 27               | Y      | 101001       | 51               |
| H      | 011000       | 30               | Z      | 101010       | 52               |

Сигнал, считанный с диска оптической головкой, подается на **блок выделения цифрового сигнала и тактовой частоты и сервосистемы** воспроизводящего устройства.

Содержащий информацию ВЧ-сигнал от соответствующих площадок фотоприемника поступает на формирователь цифрового сигнала и схему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), которые находятся в блоке выделения цифрового сигнала и тактовой частоты. Здесь формируется поток цифровых данных в коде EFM, который поступает затем на демодулятор, и канальная тактовая частота  $f_T = 4,3218$  МГц, которая используется для управления работой демодулятора, формирования сигналов записи в буферную память, обработки данных субкода (служебная группа) и других целей.

Сигналы с дополнительных площадок фотоприемника используются для работы систем автофокусировки и автотрекинга.

В *демодуляторе* производится декодирование кода EFM, т.е. преобразование 14-разрядных канальных символов в 8-разрядные символы кодовых слов кода Рида-Соломона, которые подаются затем на декодер CIRC. Здесь же выделяется сигнал кадровой синхронизации, т.е. импульсы, соответствующие моментам появления в потоке данных кадровых синхрогрупп. Этот сигнал используется для распознавания границ кадров и выделения 32-х символов звуковой информации, которые подаются на декодер CIRC, и 33-го служебного символа (данных субкода), который подается на блок обработки служебной информации.

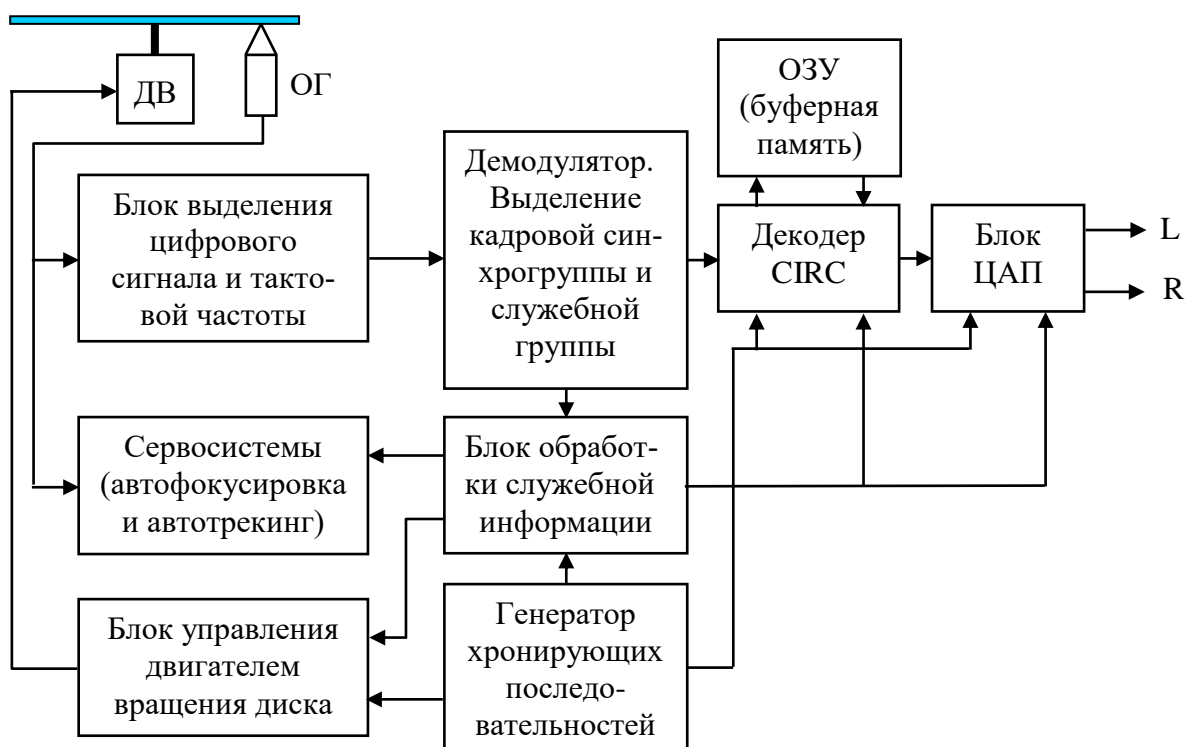


Рис. 5.1. Структурная схема проигрывателя компакт-дисков:  
ОГ – оптическая головка; ДВ – двигатель вращения

В *блоке обработки служебной информации* декодируются данные канала P, которые используются для определения границ имеющихся на диске звуковых дорожек и пауз между ними, и данных канала Q, которые используются для распознавания режима и характеристик записи, индикации времени на дорожках и диске целиком, и при поиске нужных фрагментов записи (совместно с сервосистемами). Здесь же выделяется сигнал блочной синхронизации (75 Гц), который используется как для определения границ служебных блоков, так и для управления скоростью вращения диска при сравнении его со стабильным сигналом той же частоты, формируемым генератором хронизирующих последовательностей (в блоке управления скоростью вращения диска).

*Декодер CIRC* выполняет операции, обратные тем, что производились в кодере. Данные в виде 32-х символов 8-разрядных символов (байт), поступающие с демодулятора, прежде всего, подвергаются деперемежению 3-го этапа, которое здесь выполняется первым. Для этого поступающие данные записываются в буферную память с той скоростью, с которой они были считаны с диска – т.е. сигналы записи в ОЗУ формируются на основе тактовой частоты, выделенной из потока данных в коде EFM, а вот сигналы считывания из ОЗУ (в нужном для осуществления деперемежения порядке) формируются из тактовой частоты, которая вырабатывается высокостабильным кварцевым генератором хронизирующих сигналов. Поэтому детонации, присущие всякому перемещающемуся с помощью механических средств носителю (в нашем случае – диску), при этом исчезают. Вся дальнейшая обработка звукового сигнала также выполняется с помощью сигналов, сформированных кварцевым генератором.

После первого деперемежения данные поступают на декодер С1, который обнаруживает и по мере возможности корректирует ошибочные символы в кодовых словах из 32-х символов. Неоткорректированные символы отмечаются им указателями стирания.

После декодера С1 данные подвергаются деперемежению второго этапа – тем же способом, что и на предыдущем этапе – путем последовательной записи символов в ОЗУ и последующем считывании из него – но уже в другом порядке, в соответствии со схемой деперемежения данного этапа.

После этого данные поступают на декодер С2, который так же, как и декодер С1, обнаруживает и исправляет имеющиеся в кодовых словах ошибки. При этом он использует указатели стирания, установленные декодером С1. Если все ошибки исправлены, то указателей стирания на выходе декодера С2 уже нет. Если ошибки и здесь не удалось откорректировать полностью, то указатели стирания будут присутствовать.

После этого выполняется процедура деперемежения последнего этапа и данные подаются на блок цифроаналогового преобразования (ЦАП).

В *блоке ЦАП* пары 8-разрядных символов объединяются в 16-разрядные отсчеты, а последовательность отсчетов разделяется в демультимплексоре на две – последовательность левого и последовательность правого стереоканалов L и R. Если в отчетах имеются символы, помеченные указателями стирания, то такие отсчеты считаются ошибочными и их значения вычисляются с помощью одной из процедур маскирования – чаще всего методами линейной интерполяции. В заключении последовательности цифровых отсчетов преобразуются в два аналоговых сигнала L и R.

## 6. ФОРМАТ CD-ROM И ЕГО РАЗНОВИДНОСТИ

Когда компакт-диск впервые появился на потребительском рынке, то это был исключительно звуковой носитель. Ни о каком другом его применении речи тогда не шло. Даже название стандарта на него звучало как «Compact Disc Digital Audio System», т.е. «Цифровая звуковая система Компакт-диск».

Однако значительная по тем временам информационная ёмкость нового носителя (740 Мбайт) навела специалистов на мысль использовать его в качестве элемента постоянной памяти для хранения архивных данных. Такая версия компакт-диска была разработана в 1983 году и получила название (Read Only Memory – память только для чтения). На рынке CD-ROM появился в 1985 году. Спецификация на него была принята в 1989 году на международном уровне как ISO/IEC 10149 (ISO – International Standard Organization / IEC – International Electrotechnical Commission), а также на европейском уровне – как ECMA 130 (European Computer Manufacturers Association) [146].

Поскольку диск CD-ROM предстояло использовать в составе вычислительных комплексов различной сложности, то для него был разработан специальный дисковод, легко вписывающийся в архитектуру компьютера. Пришлось изменить и структуру данных, записываемых на диск, так как точный фактографический материал и компьютерные программы уже не допускали использования интерполяции и приглушения. Ошибки надо было исправлять только точно – с помощью корректирующих кодов. Для этого были добавлены ещё три дополнительные ступени помехоустойчивого кодирования на уровне блоков (1 блок = 98 кадров). Достоверность воспроизведения информации при этом возросла на 3...5 порядков.

### 6.1. ОРГАНИЗАЦИЯ ДАННЫХ В ФОРМАТЕ CD-ROM

Дополнительное кодирование в CD-ROM производится до того, как данные поступают на кодер CIRC, точно такой же, как в системе защиты от ошибок формата CD-Audio. Для этого данные, содержащиеся в каждом 98 последовательных кадрах, объединяются в блок. Иногда этот массив данных называют сектором (рис. 6.1). Каждый кадр, как уже описывалось в главе 5, содержит в себе 24 исходных информационных символа (байта). В формате CD-Audio эти 24 символа представляют собой 12 поделенных пополам 16-разрядных отсчета звукового стереосигнала: 6 отсчетов левого канала и 6 отсчетов правого канала (рис. 5.2). В формате CD-ROM эти 24 символа являются обезличенными и могут содержать в себе какую угодно информацию, лишь бы она была преобразована в двоичную форму и организована в байты. Всего в секторе содержится  $24 \times 98 = 2352$  символа.

Однако если в CD-Audio все эти символы содержали исходную (звуковую) информацию, то в CD-ROM такую информацию содержат только 2048 символов (рис. 6.2.а). Остальные  $2352 - 2048 = 304$  – избыточные и нужны для того, чтобы обеспечить дополнительные степени защиты информационным символам. Из-за наличия этой избыточности диск CD-ROM имеет меньшую информационную ёмкость (до 650 Мбайт) в сравнении с CD-Audio (до 740 Мбайт), зато информация эта гораздо лучше защищена. Такой ситуацией пользуются за рубежом для хранения архивных фонограмм. Там их записывают не на CD-Audio, как у нас в России, а на CD-ROM. Экономия места в таком деле ни к чему, а материал защищен куда надёжнее!

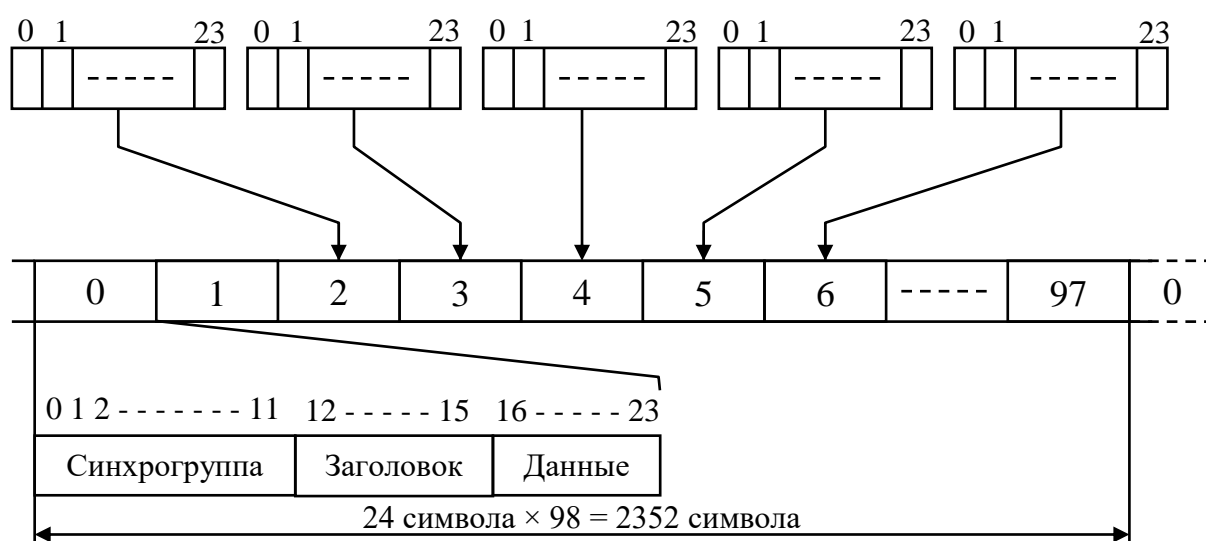


Рис. 6.1. Формирование блока данных в CD-ROM

Как всякий ограниченный массив данных, сектор имеет свою синхронизирующую группу. Она состоит из 12-ти последовательных байт и располагается в начале сектора. Структура её показана на рис. 6.2,б. Символы 0 и F – это цифры шестнадцатеричного кода, двоичное отображение которого показано на рис. 6.2,г. Следующие за синхрогруппой четыре байта – это заголовок, в котором отражен адрес данного сектора в минутах, секундах и секторах, прошедших с момента окончания вводной зоны диска, и идентификатор режима заполнения данных (рис. 6.2,в). Таких режимов в CD-ROM три – 00, 01 и 02). На рис. 6.2,а показан основной режим 01.

В графе МИН адреса к числу минут нужно прибавить A0, т.е. значение минут «03» будет выглядеть как «A3».

После заголовка следуют непосредственно сами данные – 2048 байт. После них – четыре проверочных байта кода обнаружения ошибок **EDC** (**Error Detection Code**). Затем – восемь нулевых байт. И, наконец, проверочные байты двух кодов коррекции ошибок **ECC** (**Error Correction Code**) – 172 байта кода P и 104 байта кода Q.

Код EDC в соответствии с названием используется только для обнаружения ошибок. Он относится к числу CRC-кодов (*Cyclic Redundancy Check Code – CRCC*), которые способны только зафиксировать факт наличия ошибок, но исправить их не в состоянии. Чтобы обнаружение стало возможным, информационное слово, включающее в себя 2048 байт исходной информации, 4 байта заголовка, 8 нулевых байт, побитно делится на порождающий полином кода CRC:

$$G(X) = X^{32} + X^{31} + X^{16} + X^{15} + X^4 + X^3 + X + 1$$

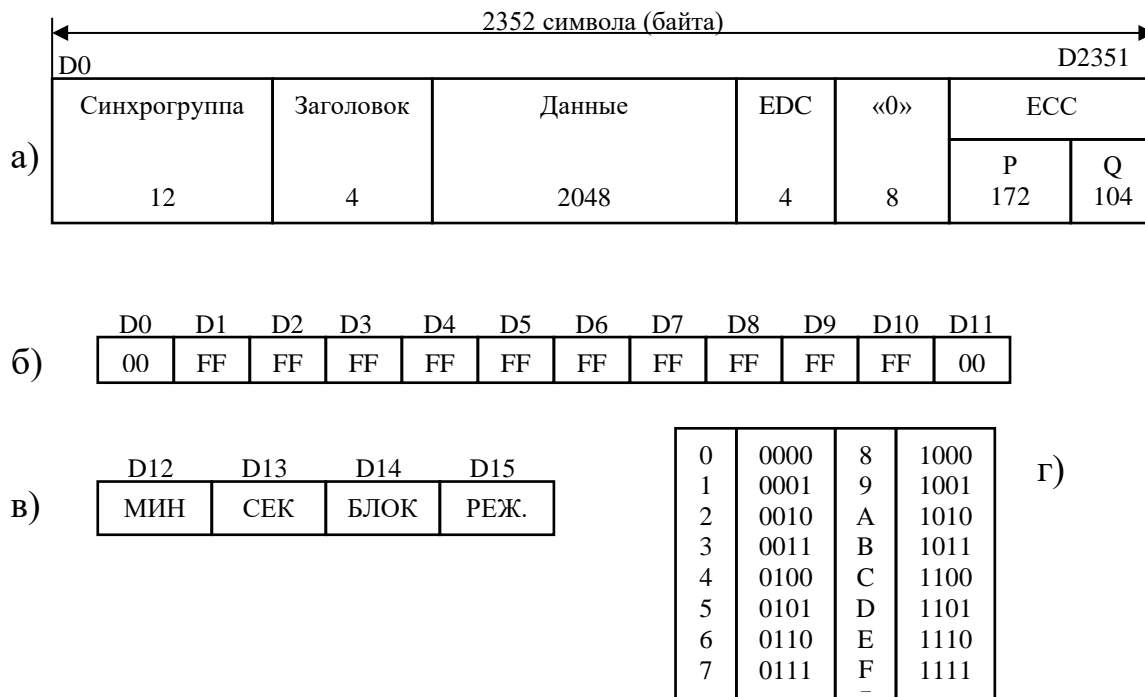


Рис. 6.2. Структура данных диска CD-ROM (режим 01):  
а – блок данных (сектор); б – синхрогруппа; в – заголовок;  
г – таблица соответствия десятичного и шестнадцатеричного кодов

Полученный 32-разрядный остаток ( $32/8 = 4$  байта) записывается на соответствующей позиции в блоке данных, обозначенной аббревиатурой EDC и используется при декодировании для обнаружения ошибок. С этой целью производится та же операция деления, что и во время кодирования. Если полученный остаток совпадает с вычисленным ранее, то ошибок нет. Если не совпадает, то ошибки присутствуют, и их следует исправлять. Но исправлять ошибки код CRC не может. Для этого используются коды ECC.

Коды ECC – P[26.24.3] и Q[45.43.3] так же как аналогичные коды системы CIRC, являются кодами Рида-Соломона и способны как обнаруживать, так и исправлять ошибки. Причем, не битовые, как CRCC, а символьные. Каждый из них способен исправить одну ошибку или два стирания.

Кодирование этими кодами производится довольно хитроумным способом. Процедура кодирования показана на рис. 6.3.

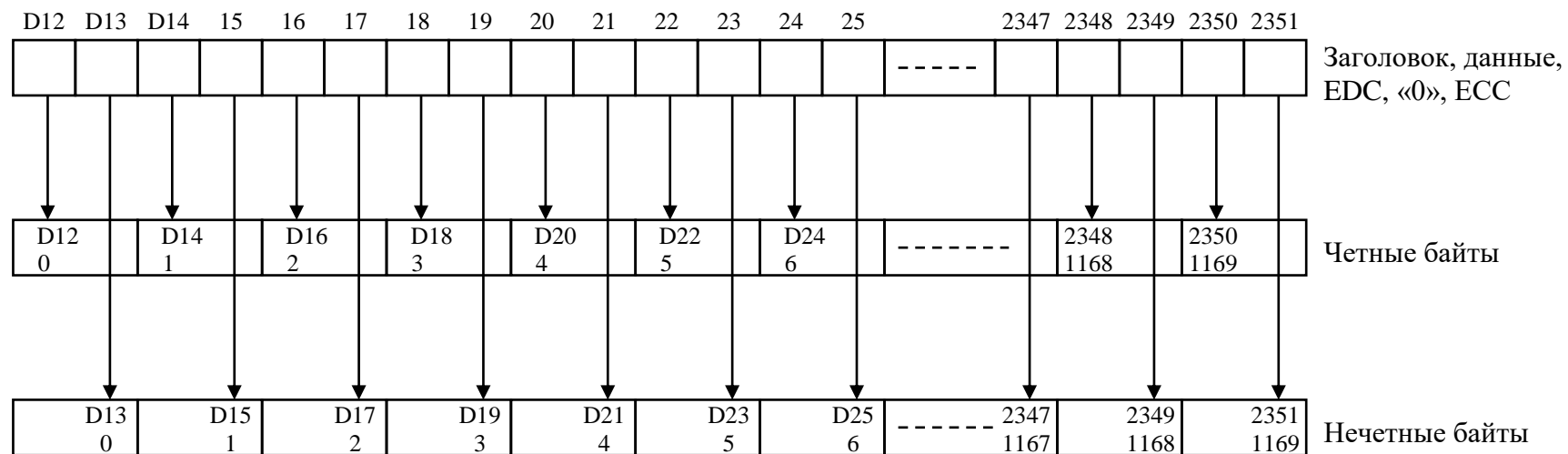


Рис. 6.3. Формирование массивов данных для ECC-кодирования

Прежде всего, данные, содержащиеся в каждом секторе (без синхро- группы), делятся на два равных массива, как показано на рис. 6.3 – четные байты отдельно, нечетные отдельно. Данные каждого массива кодируются независимо друг от друга сначала кодом Р, затем кодом Q. Заметим, что до кодирования в исходном массиве значимыми являются только 1032 символа – заголовков, информация, EDC и нули. Остальные – те, которые должны содержать проверочные символы кодов ECC – пока пустые.

Каждое кодовое слово кода P[26.24.3] содержит 26 информационных и два проверочных символа. Информационные символы выбираются из общего массива не подряд, а по определенному закону, который иллюстрируется рис. 6.4. Каждый столбец в таблице – это кодовое слово кода Р. Верхние 24 символа – информационные, два нижних – проверочные, полученные путем вычисления.

После завершения кодирования кодом Р, значимых символов в массиве станет уже 1118 (вместе с вычисленными проверочными символами).

|    | 0    | 1    | 2    | .    | .    | 40   | 41   | 42   |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0  | 0000 | 0001 | 0002 | .... | .... | 0040 | 0041 | 0042 |
| 1  | 0043 | 0044 | 0045 | .... | .... | 0083 | 0084 | 0085 |
| 2  | 0086 | 0087 | 0088 | .... | .... | 0126 | 0127 | 0128 |
| .  | .... | .... | .... | .... | .... | .... | .... | .... |
| .  | .... | .... | .... | .... | .... | .... | .... | .... |
| .  | .... | .... | .... | .... | .... | .... | .... | .... |
| 22 | 0946 | 0947 | 0948 | .... | .... | 0986 | 0987 | 0988 |
| 23 | 0989 | 0990 | 0991 | .... | .... | 1029 | 1030 | 1031 |
| 24 | 1032 | 1033 | 1034 | .... | .... | 1072 | 1073 | 1074 |
| 25 | 1075 | 1076 | 1077 | .... | .... | 1115 | 1116 | 1117 |

Рис. 6.4. Образование кодовых слов кода P[26,24,3]

Далее полученный массив кодируется кодом Q[45.43.3], который содержит 43 информационных и два проверочных символа. Информационные символы выбираются из массива по закону, который иллюстрируется рис. 6.5. Здесь кодовое слово – это строка в таблице. Слева – 43 информационных символа, справа – два вычисленных по ним проверочных.

На последнем этапе все байты сектора, кроме синхрогруппы, т.е. с 12-го по 2351, подвергаются процедуре скремблирования. Для этого они побитно суммируются по модулю 2 с псевдослучайной последовательностью, формируемой регистром с обратными связями длины 15, построенному в соответствии с неприводимым полиномом 15-й степени  $X^{15} + X + 1$  (рис. 6.6). Регистр инициализируется каждый раз в начале сектора путем записи в его ячейки «единицы» в младший разряд и «нулей» во все остальные разря-



ды. Запись инициализирующей комбинации производится сигналом синхронизации сектора.

|    | 0    | 1    | 2    | .    | .    | 40   | 41   | 42   | 43   | 44   |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0  | 0000 | 0044 | 0088 | .... | .... | 0642 | 0686 | 0730 | 1118 | 1144 |
| 1  | 0043 | 0087 | 0131 | .... | .... | 0685 | 0729 | 0773 | 1119 | 1145 |
| 2  | 0086 | 0130 | 0174 | .... | .... | 0728 | 0772 | 0816 | 1120 | 1146 |
| .  | .... | .... | .... | .... | .... | .... | .... | .... | .... | .... |
| 9  | 0387 | 0431 | 0475 | .... | .... | 1029 | 1073 | 1117 | 1127 | 1153 |
| .  | .... | .... | .... | .... | .... | .... | .... | .... | .... | .... |
| 23 | 0989 | 1033 | 1077 | .... | .... | 0513 | 0557 | 0601 | 1141 | 1167 |
| 24 | 1032 | 1076 | 0002 | .... | .... | 0556 | 0600 | 0644 | 1142 | 1168 |
| 25 | 1075 | 0001 | 0045 | .... | .... | 0599 | 0643 | 0687 | 1143 | 1169 |

Рис. 6.5. Образование кодовых слов кода Q[45,43,3]

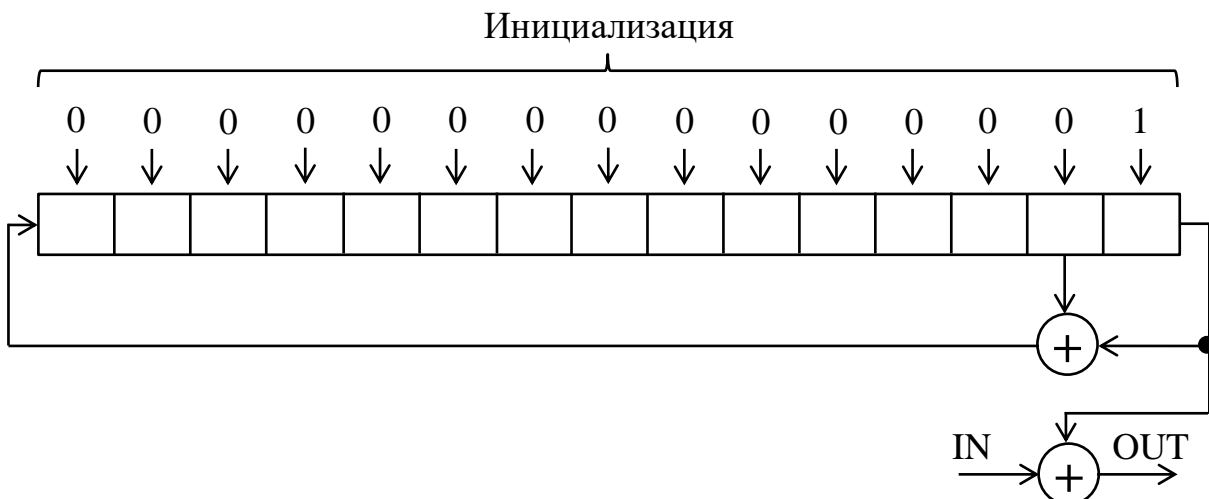


Рис. 6.6. Регистр сдвига с обратными связями, соответствующий неприводимому полиному  $X^{15} + X + 1$ , используемый для скремблирования данных сектора

После скремблирования из байтов сектора формируются кадры, состоящие из 24 байт – такие же, как в формате CD-Audio. Всего получается 98 кадров на сектор. Эти кадры подаются на кодер CIRC, который продолжает процедуру кодирования данных в формате CD-ROM.

Такая система кодирования и перемежения в формате CD-ROM позволяет практически свести к нулю вероятность появления неисправленной ошибки и надёжно защитить записанную на диск информацию.

Поскольку кодирование данных в формате CD-ROM включает в себя как необходимый атрибут, кодирование по стандарту CD-Audio, то все дисководы CD-ROM способны считывать диски CD-Audio и нуждаются только в наличии звуковой платы, которая преобразует цифровой код в звуковой

сигнал. Проигрыватели же CD-Audio воспроизвести диски CD-ROM не в состоянии (даже если там записана звуковая информация), поскольку их процессоры не рассчитаны на декодирование кодов EDC и ECC, равно как и осуществление других операций, заложенных в основу формата CD-ROM.

Информация о том, что данный компакт-диск является диском CD-ROM, записана в служебных данных канала Q. Четырехразрядная группа «Управление» в этом случае будет выглядеть как 01X0 (X зависит от типа CD-ROM и может принимать значение как 0, так и 1).

## 6.2. РЕЖИМЫ ЗАПОЛНЕНИЯ ДАННЫХ 00 И 02

Кроме основного режима заполнения данных 01, формат CD-ROM предусматривает еще два дополнительных – 00 и 02 (рис. 6.7). В этих режимах дополнительная защита информации кодами EDC и ECC не предусмотрена. Поэтому данные защищаются только системой CIRC, как и в формате CD-Audio.

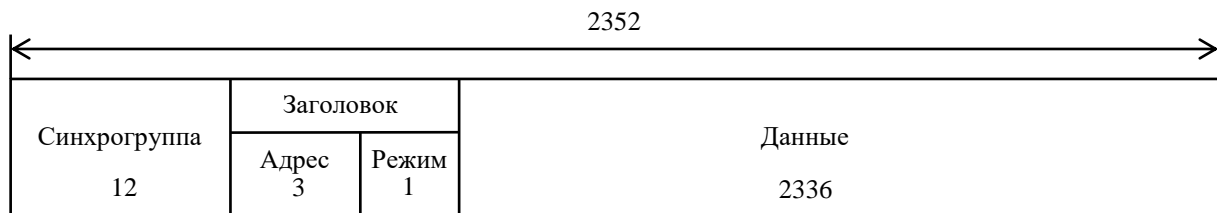


Рис. 6.7. Структура сектора данных в режимах 00 и 02

Когда присутствует режим заполнения 00, то все 2336 байт данных равны 00. Другими словами, в этих секторах ничего не записано.

Когда присутствует режим заполнения 02, то все 2336 байт данных являются данными пользователя. Их в этом случае будет на 14% больше, чем в основном режиме 01, хотя и защищены они будут хуже. Этот режим используется довольно редко – в основном для записи компрессированного звука в формате MP3, компрессированного видео, различного рода текстовой информации и пр.

## 6.3. CD-ROM/XA

Существует расширение формата CD-ROM - формат **CD-ROM/XA** (*eXtended Architecture*), которое квалифицируется как разновидность CD-ROM режим 2. Отличается от обычного CD-ROM наличием дополнительного заголовка (*subheader* – «субзаголовок»), который определяет содержание блока данных на диске - компьютерные программы, компрессированный звук или видео, а также неподвижные изображения. Существуют две формы блоков данных в формате CD-ROM/XA (рис. 6.8 и 6.9). Эти две формы могут одно-

временно присутствовать на одном и том же диске, перемежаясь в зависимости от его содержания. Форма 1 предназначена для размещения разного рода компьютерных данных, а форма 2 – для компрессированного звука и видео. Данные с дисков CD-Audio не могут быть размещены на дорожках диска CD-ROM/XA. Структура субзаголовка показана на рис. 6.10.



Рис. 6.8. Структура сектора данных диска CD-ROM/XA в форме 1

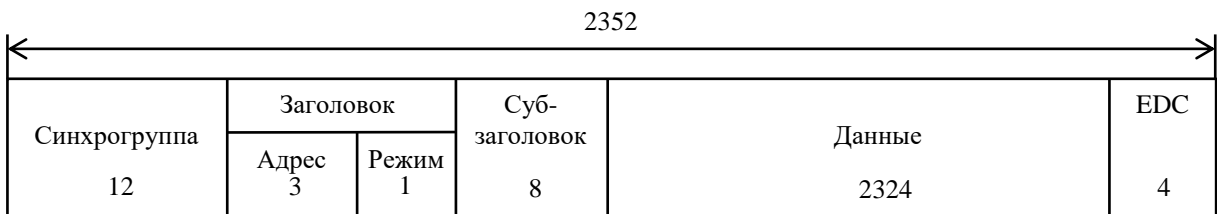


Рис. 6.9. Структура сектора данных диска CD-ROM/XA в форме 2

|      |       |           |            |
|------|-------|-----------|------------|
| Файл | Канал | Суб-режим | Тип данных |
| 2    | 2     | 2         | 2          |

Рис. 6.10. Структура субзаголовка

В книге стандартов на CD-диски различные его разновидности отделены друг от друга цветными закладками. Поэтому различные CD-форматы часто сопоставляются с цветами соответствующих им закладок. Например, описание формата CD-Audio (CD-DA) начинается с красной закладки, поэтому его именуют **Red Book** – Красная книга. Формату CD-ROM соответствует желтая закладка, поэтому он – **Yellow Book** – Желтая книга. А вот формат CD-ROM/XA – это уже **White Book** – Белая книга. К этому формату относятся диски Video CD и Photo CD. Не все дисководы CD-ROM могут воспроизводить диски CD-ROM/XA, поскольку для этого нужен специальный декодер, а также требуется специальный интерфейс. Однако большинство современных дисководов уже адаптировано к этому формату.

## 6.4. ИНТЕРАКТИВНЫЙ ДИСК CD-I

Следует упомянуть еще один тип CD-дисков – интерактивный *CD-I (Interactive)*, описание которого *Green Book* (Зеленая книга - опубликованная в 1986 году) имеет свою собственную закладку в книге стандартов. По сути – это еще одно расширение формата CD-ROM режим 2. Предназначен для хранения различного рода обучающих программ и компьютерных игр, т.е. может содержать звук (как в формате PCM, так и в формате ADPCM), видео со сжатием по стандарту MPEG1, графику и тексты. При этом способен воспроизводить звук, графику и изображение одновременно в реальном времени. Например, интерактивный словарь на CD-I может содержать слова и их перевод на другой язык, произношение, картинки, дополнительный каталог синонимов, антонимов, словосочетания с другими словами и т.д.

Для работы с дисками CD-I необходим специальный проигрыватель. Однако, несмотря на широкую рекламу, формат CD-I у потенциальных потребителей особым успехом не пользовался, поэтому незаметно исчез из поля зрения.

## 6.5. ГИБРИДНЫЕ CD-ФОРМАТЫ

Существуют разнообразные гибридные форматы, такие как *CD Extra* (ранее *CD Plus*), *Enhanced CD* и пр., в которых на одном диске присутствуют данные, представленные в различных разновидностях CD-формата (таких как CD-DA и CD-ROM/XA). Например, диск CD Extra имеет в первой сессии (фрагменте) запись в формате CD-DA Red Book, а во второй – в формате Yellow Book CD-ROM/XA форма 1. В каждой индивидуальной сессии должны использоваться данные одного типа. Проигрыватель CD-Audio воспроизводит только данные первой сессии, но не воспроизводит второй. Привод CD-ROM воспроизведет обе сессии – как звуковые данные, так и незвуковые.

Enhanced CD является мультисессионным записываемым диском, где для каждой сессии должна быть предусмотрена вводная и выводная дорожки. Предназначен для записи материала с дисков CD Extra, которые должны содержать файл авторинга, чтобы обеспечить правильное размещение мультимедийного материала на диске-копии. Там должны присутствовать название диска, имя исполнителя, название записывающей фирмы, номер диска по международному каталогу, названия отдельных дорожек и пр. Диски CD Extra относятся к *Синей книге* (Blue Book), которая была опубликована в 1995 году.

## 7. ЗАПИСЫВАЕМЫЕ ФОРМАТЫ CD

### 7.1. ФОРМАТ ОДНОКРАТНОЙ ЗАПИСИ CD-R

Диски **CD-R (Recordable)** обеспечивают возможность однократной записи на них звуковых программ или другой цифровой информации. Стандарт на них был опубликован в 1988 году и именовались они тогда CD-WO (Write-Once). В книге стандартов их описание присутствует за оранжевой закладкой, поэтому известны как **Orange Book**.

На диск CD-R можно записать до 700 Мбайт информации, в том числе до 80 минут музыки. Если на диск CD-R записана звуковая программы в формате CD-DA Red Book, то его можно воспроизводить на обычном проигрывателе CD-Audio. Однако следует помнить, что отражение света от такого диска гораздо меньше, чем от тиражированного диска CD-Audio только для считывания.

Все данные пользователя, т. е. звуковые данные, записываются на регистрирующий слой диска CD-R в зоне, где расположены предварительно сформированные канавки, начиная от радиуса 23 мм. Но внутри этой (программной) зоны перед вводной дорожкой формата CD-Audio (от 22.35 мм до 23.00 мм) размещаются еще два типа данных. Обычный CD-проигрыватель их не считывает (рис. 7.1).

Ближайшей к программной зоне является зона PMA (Programm Memory Area), где размещаются данные, описывающие дорожки, оглавление и хронометраж диска. Эта зона начинается примерно на 13 с раньше, чем программная зона (точнее – 00:13:25), если принять ее начало за 0 с. При записи, когда процесс заканчивается, в эту зону заносятся данные, соответствующие записанной программе. Правда, данные эти диски для однократной записи в дальнейшем не используют.

Еще ближе к центру диска размещается зона данных PCA (Power Calibration Data) – зона калибровки параметров записи. Начинается она на 35 с (точнее – 00:35:65) раньше, чем программная зона. Наличие этой зоны позволяет выполнить автоматическую калибровку мощности записывающего лазера (OPC – Optimal Power Calibration). Зона PCA содержит тестовую зону и зону расчета. В зоне расчета содержится эталонная дорожка, доступная для сравнения с питами, формируемыми лазером в тестовой зоне. Лазер формирует питы, используя, к примеру, 15 ступеней мощности, затем считывает их, величина отклика преобразуется в аналоговую форму и сравнивается с откликами от эталонных пит. При совпадении соответствующий уровень мощности запоминается и в дальнейшем используется для записи всего диска. В некоторых приводах, особенно современных, мощность лазера контролируется и подстраивается постоянно, используя для этого метод, известный как **Running OPC** (Текущая калибровка оптимальной мощности).

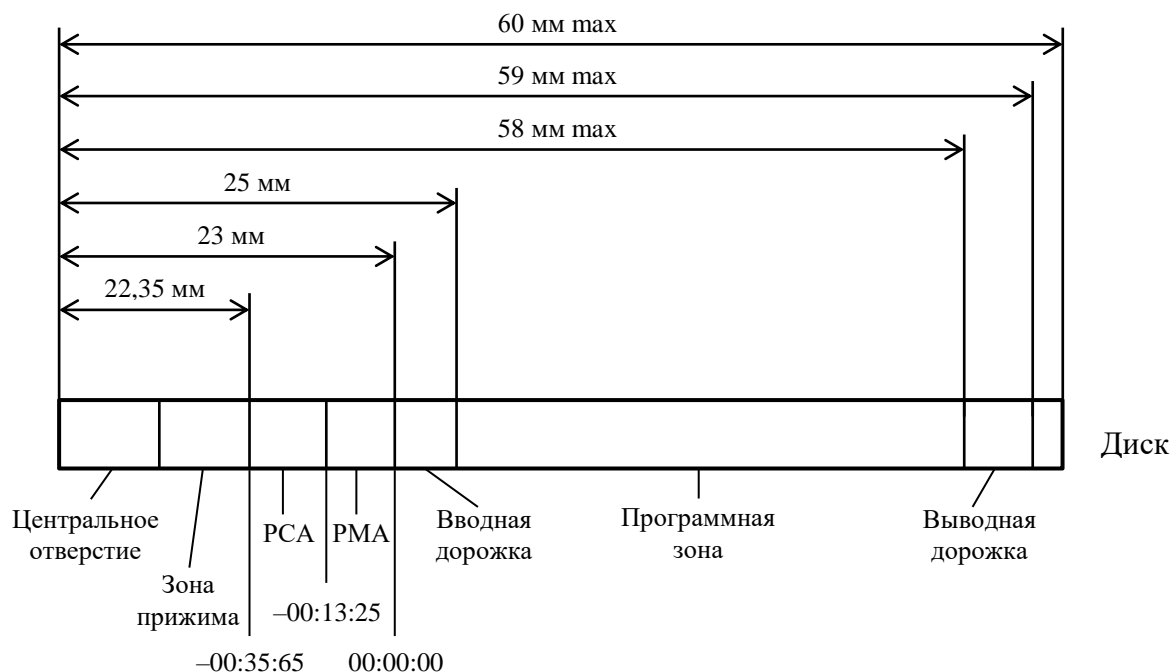


Рис. 7.1. Расположение различных зон на диске CD-R

Информация о длительности записываемых дорожек, их номере, начале и окончании каждой из них, содержащаяся в вобуляции канавок, запоминается и затем записывается в оглавление на вводной дорожке перед началом программной зоны. Запись диска считается завершенной, когда записаны данные на вводной дорожке, в программной зоне и на выводной дорожке. На каждый диск можно записать до 99 дорожек.

Как уже говорилось в разделе 2.4.2, запись информации на диски CD-R производится на дне предварительно сформированной канавки шириной 0,6 мкм. Стенки канавки имеют волнообразную форму (вобуляция). Амплитуда колебаний стенок канавки у записываемых CD-форматов составляет 0,03 мкм. При номинальной скорости воспроизведения или записи это соответствует частоте 22,05 кГц (половина частоты дискретизации 44,1 кГц). Наличие вобуляции позволяет записывающему узлу (оптической головке) контролировать скорость перемещения носителя, которая должна поддерживаться постоянной (режим CLV – Constant Linear Velocity). Кроме того, частота вобуляции модулируется в пределах  $\pm 1$  кГц, что позволяет записывать на диск абсолютное время, истекшее с начала программной зоны, называемое *ATIP (Absolute Time In Pregroove)*. Данные ATIP определяют начало выводной дорожки на диске, соответствующее заданной емкости. Скорость перемещения луча по дорожке также соответствует емкости данного диска. Например, на диске для записи 63-минутной программы скорость перемещения луча относительно дорожки должна быть 1,4 м/с, на диске для записи 74-минутной программы – 1,2 м/с.

Механизм записи информации на диск состоит в изменении теплового режима в области регистрирующего слоя. Излучение лазера используется для создания такой температуры, которая изменяет состояние регистрирующей среды. Например, свет лазера при мощности его излучения 8 мВт, сфокусированный в пятно диаметром 1 мкм, создает на поверхности регистрирующего слоя плотность мощности, соответствующую  $10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>. Температура поверхности при этом увеличивается в сотни раз в течение микросекунды. Регистрирующий слой представляет собой светочувствительный материал, который поглощает тепловую энергию записывающего лазера. При записи данных с однократной (номинальной) скоростью достаточно мощности лазера в 4-8 мВт. При записи с повышенными скоростями мощность лазера должна быть увеличена. Например, при 50-кратной скорости она должна составлять примерно 40 мВт. Свет с длиной волны 780 нм (на самом деле длина волны может находиться в пределах от 775 до 795 нм) проходит через подложку из поликарбоната и нагревает органический краситель регистрирующего слоя примерно до температуры 250°C, вызывая его плавление и/или химическое разложение, что приводит к образованию меток с уменьшенной отражательной способностью. Например, от исходной отражательной способности 75% до 25%. В процессе считывания такой дорожки тем же самым лазером, но работающим в режиме мощности 0,5 мВт, изменение отражательной способности дорожки регистрируется как биты записанной информации.

В качестве материала регистрирующего слоя используются цианин, фталоцианин и азотокраситель (раздел 2.4.2).

Стандарт Orange Book определяет две стратегии записи дисков: *односессионную* (обычную) и *мультисессионную* (гибридную). Под *сессией* понимается сеанс записи с формированием вводной дорожки, программной зоны и выводной дорожки.

При односессионной записи, которую иногда называют стратегией *DAO (Disc-at-Once)*, диск записывается весь целиком за один раз – без прерываний. Рекордер сразу записывает и содержание (*TOC – Table of Content*) на вводной дорожке, и дорожки с данными в программной зоне, и выводную дорожку. Такие диски могут считываться любым стандартным CD-проигрывателем. Запись мастер-дисков для тиражирования CD-Audio Red Book (премастеринг) выполняется именно таким способом. Дорожки могут быть записаны впритык, без зазора, а переход от одной дорожки к другой может быть выполнен с помощью кроссфейдинга, т.е. одна дорожка будет плавно переходить в другую. При записи по методу DAO рекомендуется сначала определить образ диска, т.е. записать файл, в котором будут содержаться все записываемые данные.

Альтернативой стратегии DAO является стратегия *TAO (Track-at-Once)*, которая позволяет записать за одну сессию всего одну или несколько дорожек. Является наиболее распространенной стратегией записи. Здесь по-

сле того как записаны дорожки в программной зоне, рекордер записывает содержание (ТОС) на вводной дорожке и выводную дорожку. Но после записи каждой дорожки записывающий лазер выключается, формируя зазор между ними. Частично записанный диск может быть прочитан рекордером, но его нельзя будет воспроизвести стандартным проигрывателем CD-Audio до тех пор, пока в финальной сессии не будет окончательно сформировано содержание и выводная дорожка. Большинство рекордеров позволяют отмечать и потом удалять нежелательные дорожки из содержания – так, что проигрыватель CD-Audio будет пропускать их при воспроизведении диска. Рекордеры, способные производить запись в соответствии со стратегией TAO, также способны производить запись в соответствии со стратегией DAO.

Стандарт Orange Book определяет также мультисессионную (гибридную) стратегию записи, позволяющую записывать одну или несколько сессий одновременно. Однако дорожки могут быть записаны хотя и одновременно, но независимо друг от друга. Запись может прекращаться после каждой дорожки или группы дорожек, и каждая такая дорожка или группа дорожек будет представлять собой обособленную программную зону, т.е. будет иметь свою собственную вводную дорожку и свою собственную выводную дорожку с собственным содержанием (ТОС) (рис. 7.2). Такая сессионная структура позволяет проигрывателю CD-Audio считывать одну сессию как отдельный диск.

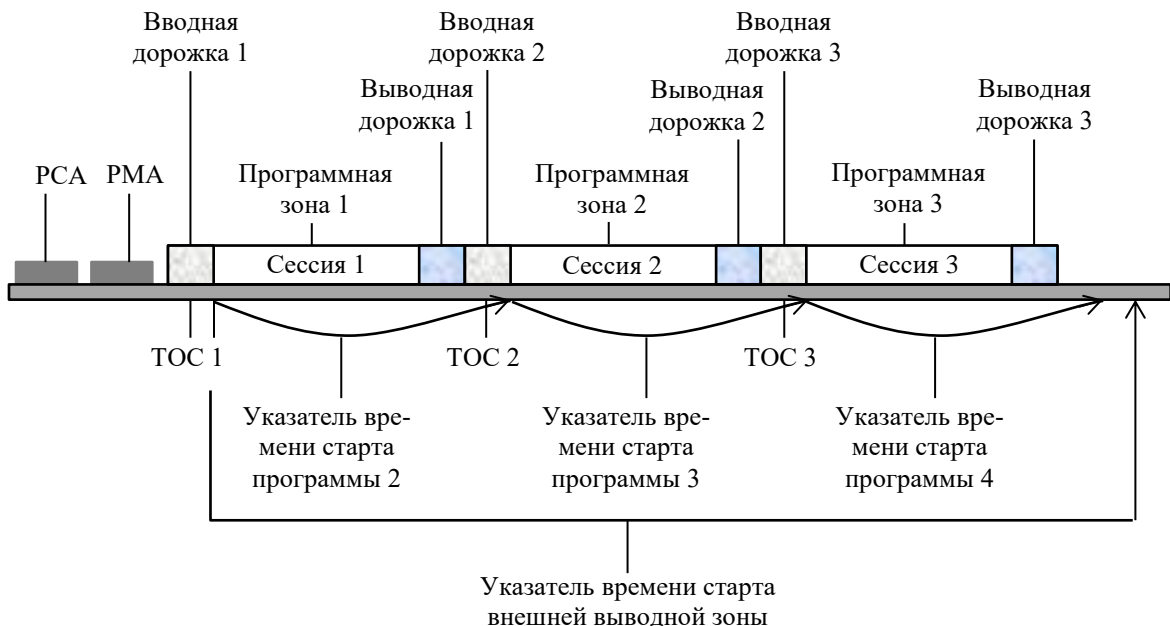


Рис. 7.2. Структура записи на мультисессионный CD-R. Каждая из сессий, расположенных по всей поверхности диска, имеет свою вводную дорожку, программную зону и выводную дорожку PCA (Power Calibration Data); PMA (Programm Memory Area)



## 7.2. РЕВЕРСИВНЫЕ ДИСКИ CD-RW

Формат *CD-RW* (*Compact Disc ReWritable* – перезаписываемый компакт-диск) позволяет записывать, считывать, стирать и переписывать информацию). Этот формат, изначально называвшийся CD-E (Erasable - стираемый) и описанный в части III Оранжевой книги, был опубликован в 1996 году. Приводы CD-RW способны считывать, записывать и стирать диски CD-RW, считывать и записывать диски CD-R, а также считывать диски CD-ROM и CD-Audio. Диски CD-RW могут содержать компьютерные программы, тексты, неподвижные изображения, а также аудио-, видео- и прочую информацию. Емкость дисков CD-RW – 700 Мбайт. Структура таких дисков и материалы, используемые для регистрирующих слоев, были описаны в разделе 2.4.2. Однако технология записи информации на диски CD-RW отличается от технологии записи дисков CD-R. Если при записи на CD-R лазер включался только на время формирования пита, то при записи на CD-RW лазер работает постоянно, но мощность его меняется (рис. 7.3). Когда записывается пит, то лазер формирует короткие (~15 нс) импульсы повышенной мощности, нагревая материал регистрирующего слоя выше температуры плавления. После чего следует его охлаждение ниже температуры кристаллизации. В результате кристаллизации не происходит и материал переходит в аморфное состояние, формируя таким образом пит с пониженной отражающей способностью.

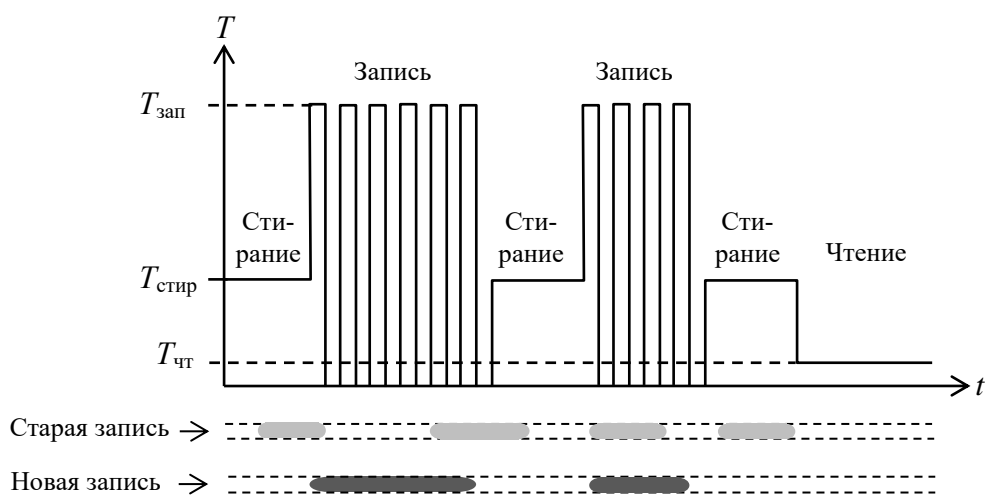


Рис. 7.3. Многоимпульсная технология записи дисков CD-RW  
Используются три уровня мощности лазера: высокая (8-14 мВт) для обеспечения температуры  $T_{\text{зап}}$  (500-700°C); средняя (4-8 мВт) для обеспечения температуры стирания  $T_{\text{стир}}$  (~200°C) и пониженная (~0,5 мВт) для чтения информации ( $T_{\text{чт}}$ ). Длительность импульсов записи ~15 нс

Для стирания старой информации необходимо вернуть материал регистрирующего слоя в кристаллическое состояние. Для этого лазер нагревает

регистрирующий слой вместе с участками в аморфном состоянии до некоторой температуры  $T$ , которая меньше температуры плавления, но больше температуры кристаллизации ( $T_{\text{крист}} < T < T_{\text{плавл}}$ ).

При перезаписи диска стирание старой информации и запись новой производится одновременно, как показано на рис. 7.3. Но если необходимо просто удалить какой-либо файл, то стирать всю дорожку не требуется – достаточно только удалить информацию о нем в данных субкода. Дорожка при этом как бы перестает существовать и рассматривается как пустая.

По физической структуре диски CD-RW ничем не отличаются от дисков CD-R и все, что касается односессионных и мультисессионных стратегий записи, описанных выше для дисков CD-R, также относится и к дискам CD-RW [147-150].

### 7.3. МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ДИСКИ CD-MO

Существуют еще и магнитооптические *диски CD-MO*, описание которых также приведено в части I книги стандартов Orange Book. Информацию на эти диски можно записывать, с них считывать и стирать. Стандартом определены два типа таких дисков: диски с предварительной записью в виде пит, как и на дисках CD-ROM, плюс зона записи с помощью магнитооптических технологий, и диски, полностью предназначенные только для записи. Поскольку диски CD-MO используют принципы воспроизведения, основанные на изменении угла поворота плоскости поляризации отраженного пучка, то обычные приводы CD-ROM, CD-R и CD-RW, а также проигрыватели CD-Audio, такие диски воспроизводить не могут, хотя приводы CD-MO воспроизводят и диски CD-R, и CD-Audio. С другой стороны, проигрыватели CD-Audio способны воспроизводить зоны с предварительной записью на дисках CD-MO [151].

Эволюцией CD-MO стал звуковой формат MiniDisc, который будет рассматриваться ниже – в соответствующей главе.

## 8. ФОРМАТ SACD

Формат цифровой звукозаписи *SuperAudioCD (SACD)* является детищем тандема SONY/PHILIPS, и разрабатывался этими авторитетными фирмами в качестве альтернативы звуковой версии формата DVD – диска DVD-Audio.

Формат SACD коренным образом отличается от всех прочих цифровых звуковых форматов (CD, DAT, MD, DVD-Audio) тем, что запись материала на носитель здесь производится не в форме линейных ИКМ-отсчетов, а в виде непрерывного цифрового потока, полученного путем одноразрядного квантования аналогового звукового сигнала со скоростью 2, 8224 МГц [167-169]. Следует заметить, что технология одноразрядного (или малоразрядного – 3-5 разрядов) квантования используется сейчас и для преобразования звука в других форматах, однако там полученный малоразрядный поток, в конце концов, все-таки приводится к последовательности многоразрядных отсчетов (16-, 20-, 24-разрядных) и в дальнейшем все операции по формированию потока данных перед записью на носитель производятся уже с ними. В формате SACD ничего подобного не делается. Полученный в результате квантования непрерывный цифровой поток делится, конечно, на байты, байты организуются в блоки, над ними выполняются все операции по защите информации, добавляется служебная и синхронизирующая информация и т.д. Но первоначальное деление на байты никак не связано с отсчетами звукового сигнала, которых нет – если не считать отсчетами биты, полученные после одноразрядного квантования. Такая технология названа разработчиками *Direct Stream Digital (DSD)*.

Поскольку частота дискретизации здесь высока (2, 8224 МГц), то основная энергия извечного врага цифровой звукозаписи – шума квантования – концентрируется в области неслышимых частот и легко отфильтровывается при воспроизведении записи, не требуя для этого сложных аппаратных средств.

Вследствие этого технические характеристики SACD отличаются очень высокими показателями, а проигрыватели – простотой реализации. Динамический диапазон и отношение сигнал/шум в звуковом диапазоне достигают 120 дБ и выше, а амплитудно-частотная характеристика получается линейной вплоть до частоты 100 кГц. Хотя здесь надо сделать оговорку – такая характеристика отнюдь не означает, что отношение сигнал/шум в 120 дБ сохраняется до 100 кГц.

С целью скорейшего продвижения SACD на рынке, его создатели предусмотрели совместимость нового диска с проигрывателями CD. Для этого на диске SACD, кроме версии материала в форме DSD, записывается версия того же материала в обычном формате CD-Audio Red Book. Одним словом, диск SACD может воспроизводиться на любом из существующих ныне CD-проигрывателей или CD-дисководов. Такая совместимость зало-

жена в конструкции диска SACD. Неясно, правда, зачем владельцу обычного CD-проигрывателя покупать дорогой диск SACD, если он все рано не сможет услышать его «более дорогое» звучание? Но это уже, видимо, вопрос философский.

В табл. 8.1 приведены технические характеристики формата SACD. Здесь же для сравнения приводятся аналогичные параметры формата CD.

Таблица 8.1

**Технические параметры формата SACD**

| <b>Параметр</b>  | <b>DVD</b>                                   | <b>CD</b>            |
|--|--|----------------------|
| Диаметр диска, мм  | 120  | 120                  |
| Толщина диска, мм  | 1,2 (0,6×2)                                  | 1,2                  |
| Число рабочих сторон   | Одна   | Одна                 |
| Число типов диска  | 3 (однослойный, двух-<br>слойный, гибридный) | 1                    |
| Длина волны излучения лазера,<br>нм  | 650  | 780                  |
| Числовая апертура объектива  | 0,6  | 0,45                 |
| Минимальный диаметр<br>считывающего пятна, мкм                             | 0,4  | 0,83                 |
| Шаг дорожки, мкм   | 0,74   | 1,6                  |
| Минимальная длина питов, мкм   | 0,40   | 0,833                |
| Максимальная длина питов, мкм  | 2,13   | 3,56                 |
| Частота дискретизации  | 2,8224 МГц                                   | 44,1 кГц             |
| Квантование  | 1-разрядное, DSD                             | 16-разрядное,<br>ИКМ |
| Диапазон воспроизводимых<br>частот   | 0-100 кГц                                    | 20-20000 Гц          |
| Динамический диапазон  | Более 120 дБ                                 | 96 дБ                |
| Коррекция ошибок   | CIRC Plus                                    | CIRC                 |
| Канальная модуляция  | EFM Plus<br>(8-16)                           | EFM<br>(8-14)        |
| Максимальное число логических<br>дорожек                                   | 255  | 99                   |
| Средняя скорость перемещения<br>луча относительно дорожки на<br>диске, м/с | 3,49   | 1,2-1,4              |
| Максимальное время записи<br>(мин)   | Примерно 110<br>(2 канала, один слой)        | 74                   |
| Информационная емкость диска,<br>Гбайт                                     | 4,7(однослойный);<br>8,54 (двухслойный)      | 0,78                 |
| Дополнительные функции   | Текст, графика, видео                        | Текст                |

## 8.1. КОНСТРУКЦИЯ ДИСКА SACD

Размеры диска SACD такие же, как у CD и DVD – диаметр 120 мм, толщина 1,2 мм. Но в силу того, что для записи и считывания информации здесь используется излучение лазера с длиной волны 650 нм, а числовая апертура линзы объектива NA – 0,6, плотность записи на диске SACD гораздо выше: минимальная длина пиков получается 0,4 мкм (у CD – 0,83 мкм), а расстояние между дорожками записи (шаг дорожки) – 0,74 мкм вместо 1,6 мкм у CD). Таким образом, информационный слой может содержать до 4,7 Гб звуковых данных- столько же, сколько и однослойный диск DVD.

Стандартом на SACD определены три типа дисков:

- однослойный диск (single layer, SL). Содержит один слой высокой плотности (high-density, HD), который имеет максимальную информационную емкость 4,7 Гб. Конструкция его такая же, как у одностороннего однослойного диска DVD SSSL (см. раздел 9.1, рис. 9.1);
- двухслойный диск (dual layer, DL). Содержит два слоя высокой плотности для того, чтобы увеличить время воспроизведения. Конструкция его и максимальная информационная емкость (8,5 Гб) такие же, как у одностороннего двухслойного диска DVD SSDL (см. раздел 9.1, рис. 9.3);
- гибридный диск (рис. 8.1). Физическая структура такого диска представляет собой нечто среднее между обычным диском CD и односторонним двухслойным DVD (SSDL) (см. раздел 9.1, рис. 9.3).

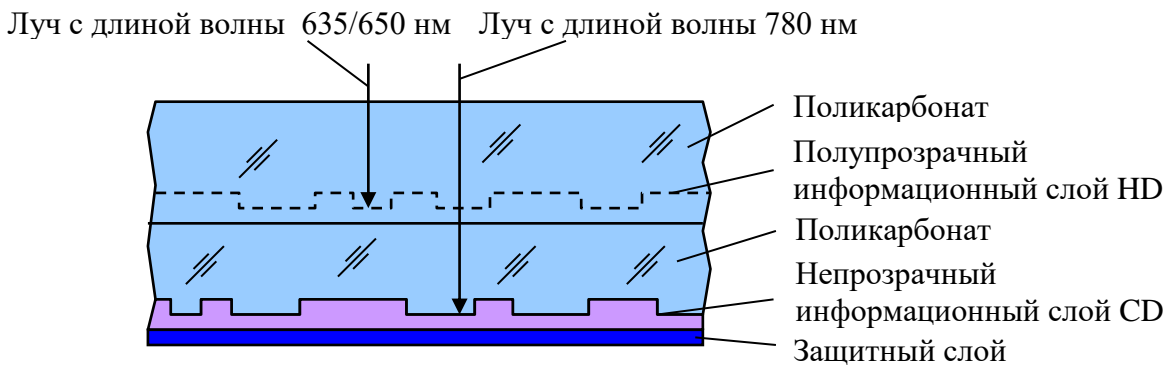


Рис. 8.1. Конструкция гибридного диска SACD

Так же, как диск DVD, гибридный диск SACD состоит из двух склеенных вместе подложек толщиной 0,6 мм каждая. Так же как у диска SSDL, внешняя (для считывающего луча) подложка содержит в себе полупрозрачный информационный слой высокой плотности (4,7 Гбайт), образованный путем напыления тончайшей пленки золота. Этот слой является носителем данных DSD и считывается оптической головкой с числовой апертурой 0,6 лучом лазера с длиной волны излучения 650 нм. Однако второй информационный слой с непрозрачным алюминиевым покрытием располагается не вблизи места склейки подложек (как у диска SSDL), а у противоположной

поверхности – той, которая покрыта защитным слоем из прочной пластмассы. Этот информационный слой содержит в себе версию материала в стандарте CD-Audio (16 разрядов при частоте дискретизации 44,1 кГц) и доступен только для считывания оптической головкой обычного CD-проигрывателя или дисководом с числовой апертурой 0,45 и длиной волны излучения лазера 780 нм. Расстояние от этого слоя до внешней поверхности диска получается таким же, как и у CD – около 1,2 мм. Таким образом, достигается полная совместимость, как дисков, так и проигрывателей CD и SACD.

Информационный слой DSD позволяет записать на нем до 74 минут музыки в стереозвучании или с использованием технологии сжатия Direct Stream Transfer, разработанной фирмой PHILIPS, к стереоварианту добавляется еще и шестиканальный вариант (в формате 5.1).

Информационный слой CD Red Book содержит версию того же материала, полученную путем понижения частоты дискретизации в 64 раза с помощью разработанного фирмой SONY алгоритма Super Bit Mapping Direct. Может, конечно, присутствовать и оригинальная запись, изначально сделанная в формате CD-Audio.

Коэффициент отражения металлизированного информационного слоя у однослойного диска SL – 60-85%. Поскольку у двухслойных дисков DL верхний информационный слой должен быть полупрозрачным, то коэффициент отражения у него, разумеется, меньше, чем у непрозрачного – 18-30%. У гибридного диска коэффициент отражения у верхнего информационного слоя высокой плотности (HD) – 15-30%, а у нижнего непрозрачного (CD) – более 70%.

Для распознавания типа диска, установленного в проигрыватель, определяется разница в отражающей способности слоев и расстояния между ними (если их больше одного).

При считывании отраженного сигнала фокусирующий объектив перемещается от самого дальнего от поверхности диска положения в сторону сближения с ней. В процессе движения точка фокусировки лазерного луча сканирует диск по толщине. Когда эта точка достигает поверхности диска, фотодетектор регистрирует небольшой отраженный сигнал, что вызывает появление импульса на ВЧ-входе схемы усиления. Этот импульс запускает таймер микропроцессора, формируя точку отсчета. В дальнейшем в зависимости от величины промежутка времени между этим и следующим импульсом, а также от величины отраженного сигнала (соответствующего величине коэффициента отражения), система поиска распознает имеющиеся на диске информационные слои. Поскольку у двухслойного диска высокой плотности оба слоя – полупрозрачный и отражающий - расположены в непосредственной близости друг от друга, то распознаются они исключительно по величине коэффициента отражения.

## 8.2. ФОРМИРОВАНИЕ ПОТОКА ЗВУКОВЫХ ДАННЫХ

Формирование потока звуковых данных в формате SACD, как уже говорилось, производится путем одноразрядного квантования аналогового звукового сигнала с помощью технологии *DSD (Direct Stream Digital)*, основанной на принципах сигма-дельта модуляции (СДМ). Такая технология, прежде всего, очень проста в реализации и не требует применения большого количества таких дорогих, громоздких и высокоточных элементов как многоразрядные ИКМ АЦП, ЦАП, устройства выборки и хранения (УВХ), а также антиэлайсинговых аналоговых фильтров высокого порядка. Благодаря высокой скорости преобразования аналогового сигнала в цифровой, побочные продукты такого преобразования в виде шума квантования образуются далеко за пределами полосы слышимых частот и легко отфильтровываются простейшими фильтрами невысоких порядков. Поэтому результирующий звуковой сигнал после его восстановления в аналоговую форму получается с очень высоким качеством – как с точки зрения динамического диапазона и отношения сигнал/шум, так и с точки зрения линейности амплитудно-частотной характеристики в очень широкой полосе частот. Рассмотрим технологию сигма-дельта преобразования чуть более подробно.

### 8.2.1. ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ $\Sigma\Delta$ -МОДУЛЯТОРА

Для того, чтобы яснее представить себе достоинства и недостатки преобразователей с применением  $\Sigma\Delta$ -модуляции, рассмотрим простейшую схему одноконтурного  $\Sigma\Delta$ -модулятора, представленную на рис. 8.2, и познакомимся с основными принципами его работы [152-154]. Более наглядно структура такого модулятора показана на функциональной схеме, представленной на рис. 8.3.

Пусть на вход модулятора поступает аналоговый сигнал  $X_n$ , амплитуда которого изменяется в пределах от  $-V$  до  $+V$ , а полоса частот ограничена сверху величиной  $f_v$ . В результате преобразования на выходе модулятора должен сформироваться одноразрядный поток данных, отражающий форму входного аналогового сигнала. Если бы преобразование осуществлялось с помощью обычного многоразрядного АЦП, быстродействие которого весьма ограничено, дискретизацию пришлось бы производить со скоростью, чуть большей, чем скорость Найквиста  $F_n = 2f_v$ , а для предотвращения интермодуляционных искажений на входе устройства пришлось бы разместить сложный аналоговый ФНЧ.

В силу особенностей  $\Sigma\Delta$ -модулятора преобразование с его помощью может осуществляться с частотой в десятки и сотни раз превышающей  $F_n$ , а для предварительной фильтрации вполне достаточно простого фильтра 2–3-го порядка.

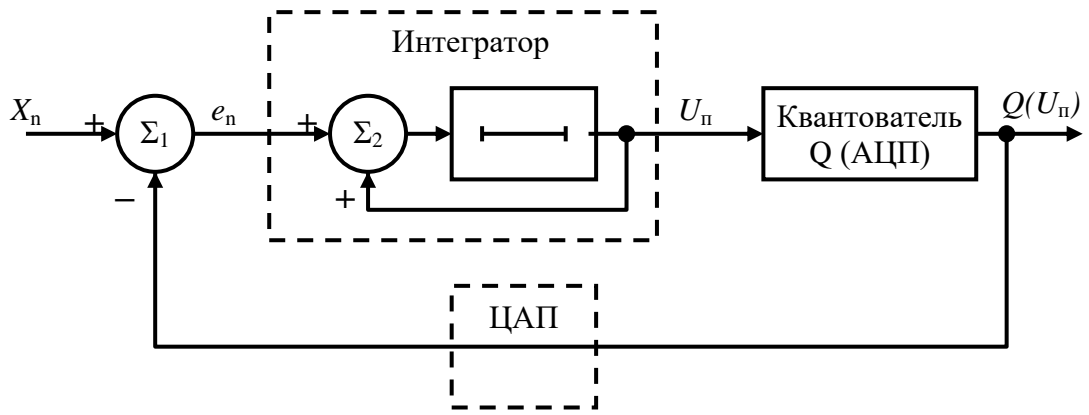


Рис. 8.2. Сигма-дельта модулятор 1-го порядка

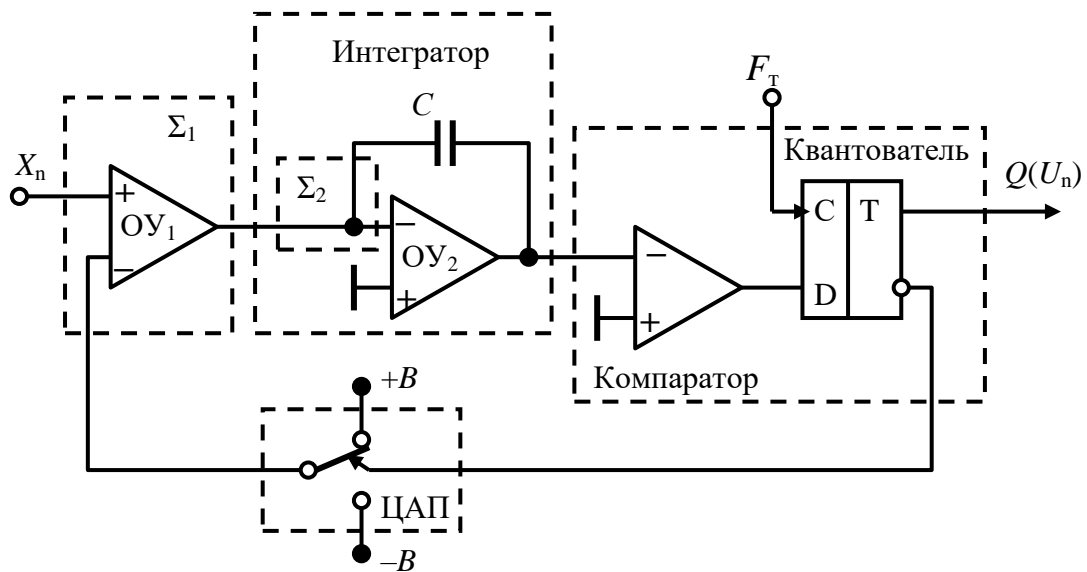


Рис. 8.3. Функциональная схема сигма-дельта модулятора 1-го порядка

**Интегратор** – это активный аналоговый ФНЧ с высоким усилением в полосе частот входного сигнала и подавлением частотных составляющих, лежащих вне этой полосы. **Квантователь** – это, в первом приближении, компаратор с порогом срабатывания, равным «0», выход которого может переключаться из состояния «-В» в состояние «+В», и который подключен ко входу синхронизируемого тактовой частотой (частотой дискретизации) элемента памяти, сохраняющего это состояние в течение тактового интервала. Если предположить, что на выходе этого элемента памяти, который является одновременно и выходом модулятора, должен формироваться цифровой сигнал с уровнями, соответствующими уровням логического «нуля» и «единицы» (АЦП), то таким элементом памяти может служить обычный D-триггер. Правда, в петле обратной связи при этом понадобится отдельное переключающее устройство, выполняющее функции ЦАП (на рис. 8.2 пока-



зан пунктиром), которое управляется цифровым сигналом, а на выходе формирует либо «-В», либо «+В».

Для нормальной работы  $\Sigma\Delta$ -модулятора требуется, чтобы выход квантователя (или ЦАП), подключенный к сумматору  $\Sigma_1$ , был способен обеспечивать его стабильным калиброванным током того или иного направления от источников «-В» или «+В». Сумматор  $\Sigma_1$  – это в общем случае операционный усилитель, на инвертирующий вход которого подается входной сигнал  $X_n$ , а инвертирующий подключен к выходу ЦАП, т.е. к переключаемому сигналом с выхода квантователя двум источникам эталонного напряжения «-В» и «+В».

Пусть в исходном состоянии на выходе интегратора присутствует сигнал  $U_0$ , а на выходе сумматора  $\Sigma_1$  – сигнал ошибки  $e_n = V$ . Из структурной схемы на рис. 8.2 видно, что

$$e_n = X_n - Q(U_n), \quad (8.1)$$

$$U_n = e_{n-1} + U_{n-1}. \quad (8.2)$$

Тогда базовые уравнения, описывающие работу  $\Sigma\Delta$ -модулятора можно записать следующим образом:

$$U_n = \begin{cases} U_0 & \text{при } n = 0; \\ U_{n-1} + e_{n-1} = U_{n-1} + X_{n-1} - Q(U_{n-1}) & \text{при } n = 1, 2, \dots, \end{cases} \quad (8.3)$$

где  $n$  – моменты времени, определяемые импульсами частоты дискретизации;

$$X_n \in [-B, B];$$

$$Q(U_n) = \begin{cases} +B & \text{при } U \geq 0; \\ -B & \text{при } U < 0. \end{cases}$$

Тогда последовательность значений ошибки  $e_n$ :

$$e_n = \begin{cases} B & \text{при } n = 0 \\ Q(U_n) - U_n = X_n - U_{n+1} & \text{при } n = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (8.4)$$

Работа модулятора базируется на следующем принципе. Схема его построена таким образом, что на входе интегратора (инвертирующий вход операционного усилителя ОУ2, соединенный с емкостью С) (рис. 8.3) поддерживается потенциал, равный нулю. Этот вход находится под воздействием суммарного потенциала от аналогового входа модулятора и выхода квантователя (или ЦАП), т.е. на выходе ОУ1 должен быть «0». Идеальная ситуация, к созданию которой стремится схема – сделать так, чтобы напряжение аналогового входа по модулю было в точности равно напряжению на выходе ЦАП, но знак его при этом был противоположным. Тогда на выходе сумматора  $\Sigma_1$  (на входе интегратора) будет нулевой потенциал (ошибка  $e_n = 0$ ). Однако такая ситуация практически невозможна, по крайней мере в течение

любого, даже самого короткого интервала времени, поскольку ЦАП способен находиться только в двух состояниях - «-В» и «+В» (крайние пределы изменения входного сигнала), а во избежание перегрузки модулятора эти состояния для входного сигнала, как правило, запрещены. В нормальном же рабочем режиме, когда входной сигнал изменяется в диапазоне от «-В» до «+В», потенциал на входе интегратора может быть равен нулю только в те моменты, когда потенциал с выхода ЦАП либо «обгоняет» модуль потенциала входа при его переключении из одного положения в другое, либо уменьшается при переключении в противоположное состояние, когда накопленная интегратором ошибка имеет полярность, противоположную полярности выхода ЦАП. Таким образом, на выходе сумматора  $\Sigma_1$  всегда присутствует некоторая ошибка  $e_n$ , имеющая тот или иной знак. Если знак ошибки положителен (из-за увеличения уровня входного сигнала), и присутствует она достаточно долго для того, чтобы успела перезарядиться емкость  $C$  интегратора, то изменится и полярность сигнала  $U_n$  на его выходе. В момент перехода  $U_n$  через «0» (порог срабатывания компаратора) компаратор квантователя изменит свое состояние. Это состояние будет зафиксировано синхронизируемым элементом памяти (D-триггером) в момент прихода очередного импульса тактовой частоты и будет сохраняться им вплоть до прихода следующего импульса. В результате на выходе квантователя (выходе модулятора) сформируется сигнал «высокого» уровня.

Поскольку от состояния квантователя зависит состояние ЦАП, то последний также изменит свое состояние из «-В» в «+В», и калиброванный ток с его выхода через вычитающий вход сумматора  $\Sigma_1$  будет стремиться скомпенсировать нарастание заряда на емкости  $C$  интегратора, вызванное увеличением уровня входного сигнала. Как только ток эталонного источника превысит ток от входного сигнала, или входной сигнал начнет уменьшаться по уровню, емкость  $C$  интегратора начнет разряжаться, а вместе с ней начнет уменьшаться модуль величины ошибки  $e_n$ . Когда заряд емкости и ошибка  $e_n$  пересекут уровень «нуля» и станут отрицательными, изменит знак и напряжение  $U_n$  на выходе интегратора. Соединенный с ним компаратор квантователя изменит свое состояние, а ближайший по времени импульс тактовой частоты зафиксирует его по крайней мере на один период  $T = 1/F_T$ . В соответствии с этим обстоятельством, напряжение на выходе ЦАП также поменяет полярность с «-В» на «+В». Ток на вычитаемом входе сумматора  $\Sigma_1$  изменит свое направление и вновь станет противоположным току на входе (+), компенсируя возрастание потенциала на емкости  $C$  интегратора.

Таким образом, каким бы ни был по величине входной сигнал  $X_n$ , сигнал с выхода ЦАП, зависящий от состояния квантователя, будет стремиться скомпенсировать изменение потенциала на емкости  $C$  интегратора. При этом на выходе квантователя, который одновременно является и выходом модулятора, будет формироваться поток данных, содержащих в себе информацию о входном аналоговом сигнале  $X_n$ .

Для более полного представления о способах осуществления сигма-дельта модуляции, рассмотрим еще одну схему (рис. 8.4), которая является сугубо практической и реализована по интегральной 3-микронной КМОП-технологии [155]. Эта схема отличается от предыдущей тем, что цикл ее работы складывается из двух этапов, каждый из которых занимает около половины периода тактовой частоты (рис. 8.5).

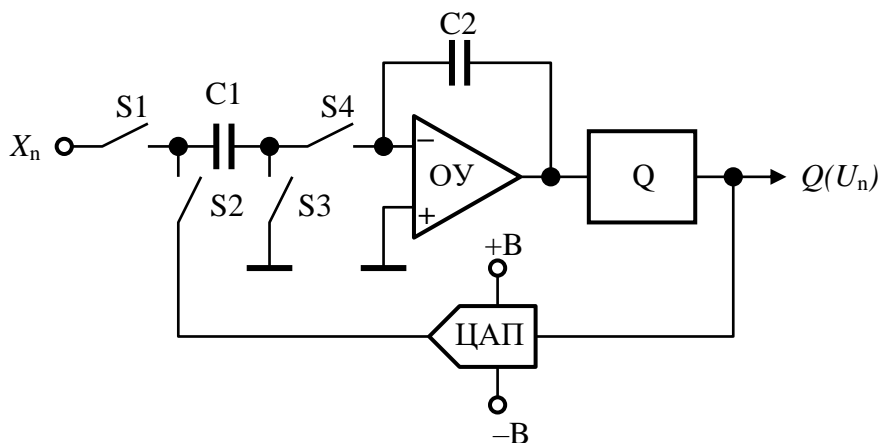


Рис. 8.4. Структурная схема сигма-дельта модулятора с двухэтапным режимом работы

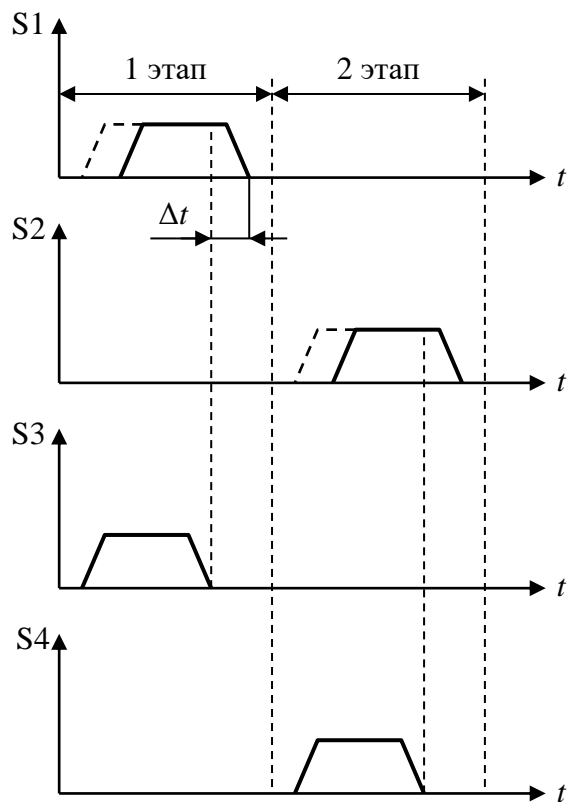


Рис. 8.5. Временные диаграммы работы сигма-дельта модулятора с двухэтапным режимом работы

Работой модулятора здесь управляют всего два неперекрывающихся по времени сигнала S3 и S4. Другие два (S1 и S2) получаются путем задержки сигналов S3 и S4 на величину  $\Delta t$ .

В течение первой фазы ключи S1 и S3 замкнуты и конденсатор C1 заряжается от входного сигнала  $X_n$ . Во время второй фазы ключи S1 и S3 размыкаются, а ключи S2 и S4 замыкаются и заряд, содержащийся в C1 переносится на емкость C2. В то же самое время происходит компенсация заряда интегратора эталонным током ЦАП.

Задержка сигналов S1 и S2 относительно S3 и S4 предусмотрена для предотвращения инжекции в схему заряда переключения. Ключи S3 и S4 соединены с «землей» непосредственно (S3) или «виртуально» (S4) и не могут быть причиной инжекции заряда переключения [156]. С момента же размыкания S3 или S4 и о момента замыкания одного из них состояние C1 не изменяется. Таким образом, размыкание S1 или S2 в то время, когда S3 и S4 разомкнуты, не приведет к инжекции заряда в C2.

На временных диаграммах, показанных на рис. 8.5, переключатели считаются замкнутыми, когда управляющие сигналы имеют высокий уровень. Импульсы управления обеих фаз не должны перекрываться, чтобы не было взаимного проникновения зарядов.

Фактически сигма-дельта модуляцию можно рассматривать как разновидность частотно-импульсной модуляции (ЧИМ) или как разновидность широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Отличие только в том, что при сигма-дельта модуляции длительность интервалов как «единичного», так и «нулевого» уровней, обязательно должна быть кратна периоду тактовой частоты  $F_T$  (рис. 8.6).

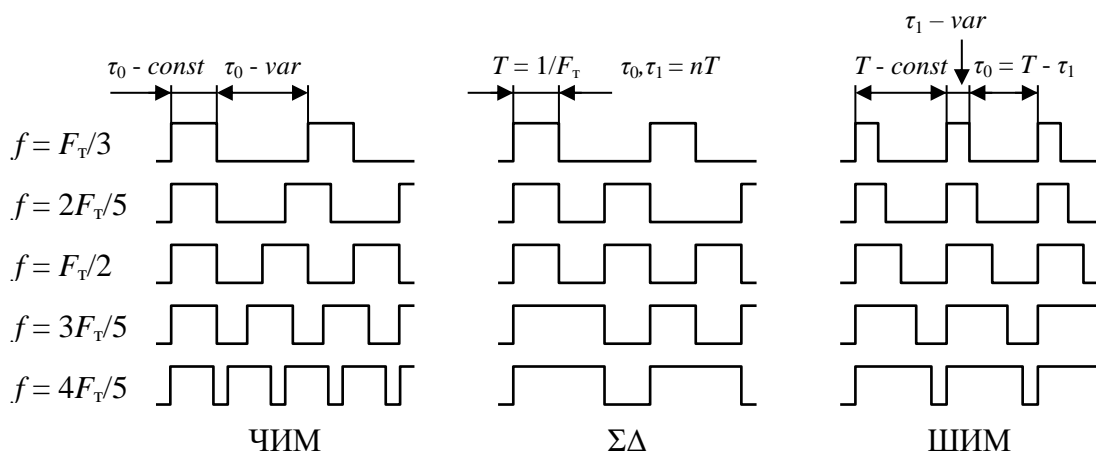


Рис. 8.6. Структуры импульсных последовательностей при различных способах модуляции входного сигнала

Поскольку рабочая частота сигма-дельта модулятора выбирается много выше верхней частоты преобразуемого сигнала ( $F_T \gg f_B$ ), то последний можно восстановить с достаточной степенью точности самым простым спо-

собом – пропустив полученный одноразрядный поток данных через ФНЧ, полоса пропускания которого соответствует полосе частот исходного аналогового сигнала. При этом степень подобия восстановленного сигнала исходному будет зависеть от качества фильтрации и может быть очень высокой. Однако в реальных устройствах для выделения аналогового сигнала используют другие, более точные методы. О них будет сказано ниже.

На практике результат аналого-цифрового преобразования чаще всего требуется получить в виде последовательности  $N$ -разрядных отсчетов, следующих с частотой  $F_d$  чуть большей, чем скорость Найквиста. Поэтому одноразрядный поток приходится тем или иным способом преобразовывать в  $N$ -разрядные отсчеты с одновременным понижением частоты дискретизации.

### 8.2.2. ОДНОРАЗРЯДНЫЕ Ц/А-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Преобразование одноразрядного цифрового потока в аналоговый сигнал значительно проще, чем А/Ц-преобразование. Как уже говорилось, такую операцию можно осуществить, пропустив одноразрядную последовательность через фильтр низких частот. С точки зрения ФНЧ такая последовательность будет эквивалентна широтномодулированному сигналу.

Однако если требуется получить высокую точность преобразования, то в качестве сигма-дельта ЦАП используют интегрирующие схемы с переключаемыми конденсаторами. Такие схемы, как правило, очень просты и не требуют прецизионных элементов, поскольку все, что от них требуется, это обеспечить добавление некоторого дискретного заряда  $\Delta q$  к заряду емкости интегратора, когда на входе ЦАП присутствует «высокий» уровень, и вычитание такого же дискретного заряда  $\Delta q$ , когда на входе ЦАП «низкий» уровень.

Один из простейших вариантов подобной схемы показан на рис. 8.7, а временные диаграммы ее работы – на рис. 8.8.

Основным элементом схемы является интегратор, построенный на операционном усилителе ОУ в инвертирующем включении и конденсаторе  $C_2$ . Конденсатор  $C_1$ , предназначенный для формирования дискретного заряда  $\Delta q$ , с помощью ключей  $S_1$  и  $S_2$  может подключаться либо к источнику опорного напряжения  $+V$ , либо к источнику опорного напряжения  $-V$ , а с помощью ключа  $S_3$  – ко входу интегратора. Величина его емкости должна быть весьма малой, а соотношение между  $C_1$  и  $C_2$  должно соответствовать требуемой разрешающей способности ЦАП. Если необходимо получить разрешающую способность, эквивалентную  $m$  двоичным разрядам, то при биполярном выходном сигнале емкость  $C_2$  должна быть по крайней мере в  $2^{m-1}$  раз меньше емкости  $C_1$ . Однако с целью уменьшения шумов квантования и с учетом того, что тактовая частота  $F_T$ , на которой работает сигма-дельта ЦАП, во много раз выше скорости Найквиста  $F_N$ , это соотношение, в

принципе, может быть увеличено еще в  $K$  раз, где  $K = F_T/F_H$  - коэффициент передискретизации (сверхдискретизации).

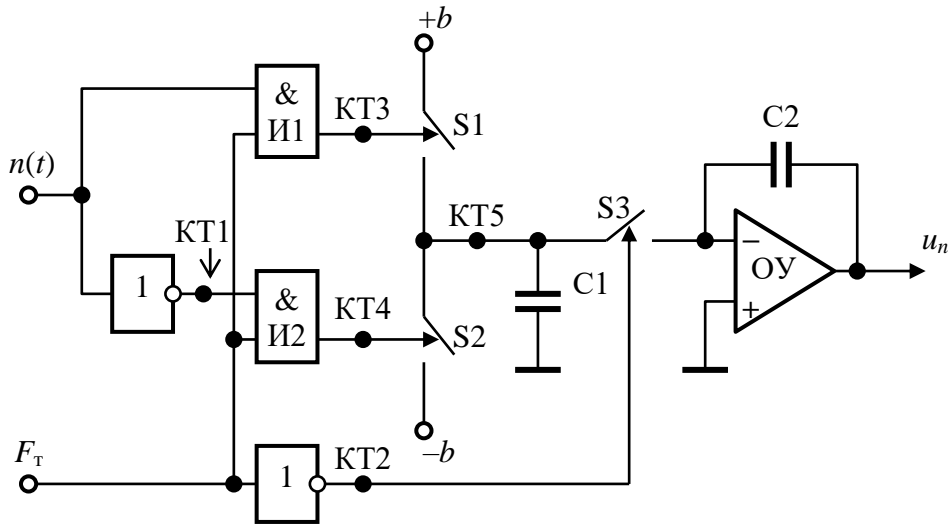


Рис. 8.7. Одноразрядный сигма-дельта ЦАП с переключаемыми конденсаторами

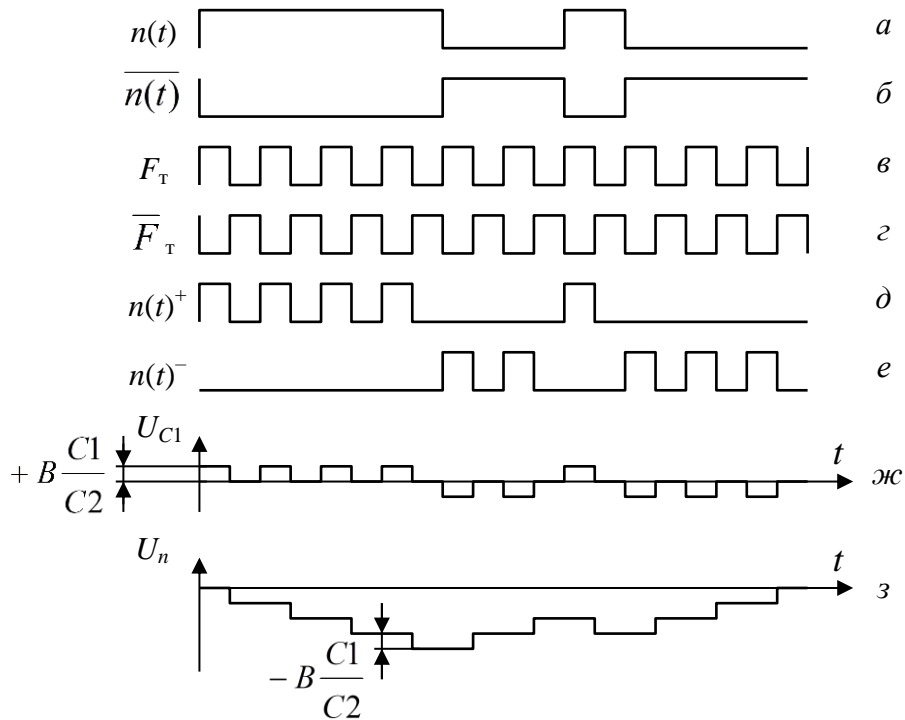


Рис. 8.8. Временные диаграммы работы одноразрядного сигма-дельта ЦАП с переключаемыми конденсаторами, показанного на рис. 8.7

Очевидно, что соотношение  $C2/C1$  в данном случае можно интерпретировать как методическую погрешность преобразования, характеризующую разрешающую способность, т.е. отношение сигнал/шум. Получается оно очень большим. Однако все было бы прекрасно, если бы не существовало инструментальных погрешностей. Они-то и портят картину, не позволяя даже приблизиться к величине методической погрешности. Среди них – шумовые характеристики всех элементов тракта Ц/А-преобразования – как самого ЦАП, так и сопутствующих ему схем. Кроме того, не стоит забывать и о характеристиках исходного сигнала – как аналогового, так и его цифрового эквивалента, поступающего на вход ЦАП. Поэтому выбор соотношения между величинами  $C1$  и  $C2$  остается за разработчиком и определяется исходя из конкретных особенностей схемы и характеристик входных и выходных сигналов. Тем не менее, в общем виде можно записать

$$\frac{C2}{C1} = \gamma \cdot 2^{m-1}, \quad (8.5)$$

где  $\gamma \in \{1, K\}$ .

Работа схемы, показанной на рис. 8.7, включает в себя всего два этапа. На первом этапе (первая половина периода тактовой частоты  $F_T$ ) замыкается один из ключей  $S1$  или  $S2$  и происходит заряд конденсатора  $C1$  от одного из источников опорного напряжения – либо до величины  $+B$ , либо до величины  $-B$ . Ключ  $S3$  в это время разомкнут и емкость  $C1$  отключена от входа интегратора. Если информационный сигнал  $n(t) = 1$ , то после его суммирования в схеме И1 с тактовой частотой  $F_T$  получится сигнал  $n(t)^+$  (контрольная точка КТ3), который замкнет ключ  $S1$  и конденсатор  $C1$  зарядится от источника опорного напряжения до величины  $+B$ . Поскольку величина емкости  $C1$  невелика в сравнении с величиной емкости  $C2$ , то заряд происходит почти мгновенно.

Если информационный сигнал  $n(t) = 0$ , то после его суммирования с  $F_T$  в схеме И2 сформируется сигнал  $n(t)^-$  (контрольная точка КТ4), который замкнет ключ  $S2$  и конденсатор  $C1$  зарядится от источника опорного напряжения до величины  $-B$ .

На втором этапе (вторая половина периода тактовой частоты  $F_T$ ) замыкается ключ  $S3$  (ключи  $S1$  и  $S2$  в это время разомкнуты). Поскольку неинвертирующий вход ОУ подключен к «земле», то на инвертирующем его входе образуется так называемая «виртуальная земля» и весь заряд конденсатора  $C1$  перейдет на конденсатор  $C2$  интегратора (рис. 8.8 ж). Если принять исходный заряд конденсатора  $C2$  равным нулю, а коэффициент  $\gamma = 1$ , то на нем образуется потенциал, равный  $-B (C1/C2)$  (рис. 8.8 з).

После этого ключ  $S3$  размыкается и весь цикл начинается заново. На первом его этапе конденсатор  $C1$  вновь зарядится от одного из источников опорного напряжения, а на втором – этот заряд передаст конденсатору  $C2$  интегратора. Если входной сигнал  $n(t)$  будет по-прежнему иметь «высокий» уровень, то напряжение на выходе интегратора будет увеличиваться; если

$n(t)$  примет значение логического «нуля», то заряд на емкости  $C1$  будет иметь знак, противоположный знаку заряда на емкости  $C2$ , и при замыкании ключа  $S3$  произойдет вычитание элементарного заряда  $\Delta q$  из суммы заряда на конденсаторе  $C2$  интегратора.

Таким образом, на выходе интегратора (выходе ЦАП) образуется ступенчатый аналоговый сигнал, величина ступенек которого очень мала, а частота их следования очень велика. Шум квантования, обусловленный их наличием, также невелик и находится далеко за пределами полосы рабочих частот. Такой шум можно легко подавить даже с помощью очень простого ФНЧ 2-3 порядка. Чаще всего первым звеном такого фильтра является сам интегратор.

Схемы с переключаемыми конденсаторами не требуют точного соблюдения номиналов элементов. Даже величины емкостей  $C1$  и  $C2$  в определенных пределах не играют решающей роли, поскольку влияют только на величину выходного сигнала ЦАП, которую легко отрегулировать либо с помощью обычных подстроечных резисторов, либо с помощью АРУ (автоматическая регулировка усиления).

### 8.3. СТРУКТУРА ДАННЫХ НА ДИСКЕ SACD

Аналоговый звуковой сигнал преобразуется в цифровой поток данных DSD со скоростью 2,2884 МГц в каждом из каналов, затем данные всех каналов делятся на байты и объединяются в единый цифровой поток, скорость которого для двухканальной записи равна

$$2 \times 2,28224 = 5,6448 \text{ Мбит/с} = 705,6 \text{ кбайт/с.}$$

В сравнении с обычным компакт-диском, у которого скорость потока звуковых данных равна  $44,1 \times 2 \times 2 = 176,4$  кбайт/с, эта скорость ровно в 4 раза выше. Далее этот поток данных делится на блоки по 2016 байт в каждом, к каждому блоку добавляется дополнительная информации (текст, графика, видео) и заголовок (всего 32 байта) и, таким образом, формируются блоки основных данных из 2048 байт.

К каждому блоку основных данных добавляются 4 байта идентификатора (ID), 2 байта (IED), представляющие собой сумму по модулю два первых двух байтов идентификатора ID и последних двух байтов, необходимую для обнаружения ошибок в идентификаторе, и 4 байта кода обнаружения ошибок (EDC) во всем блоке данных. Кроме того, в блок включены 6 резервных байт. Таким образом, формируется *сектор данных* из 2064 байта (табл. 8.2).

Из каждых 16 секторов данных формируется *блок кода коррекции ошибок (ECC-блок)* путем организации из этих данных матрицы, содержащей 192 строки и 172 столбца (рис. 8.9). Затем данные каждой строки матрицы кодируются кодом Рида Соломона RS[182,172]. При этом вычисляются



ся 10 проверочных символов кода, которые записываются в последние 10 столбцов матрицы (байты P1).

Таблица 8.2

**Содержание сектора данных**

|   |           |
|---|-----------|
| Идентификатор (ID)                              | 4 байта   |
| Проверка идентификатора на наличие ошибок (IED) | 2 байта   |
| Резервные байты                                 | 6 байт    |
| Основные данные                                 | 2048 байт |
| Код обнаружения ошибок в секторе                | 4 байта   |

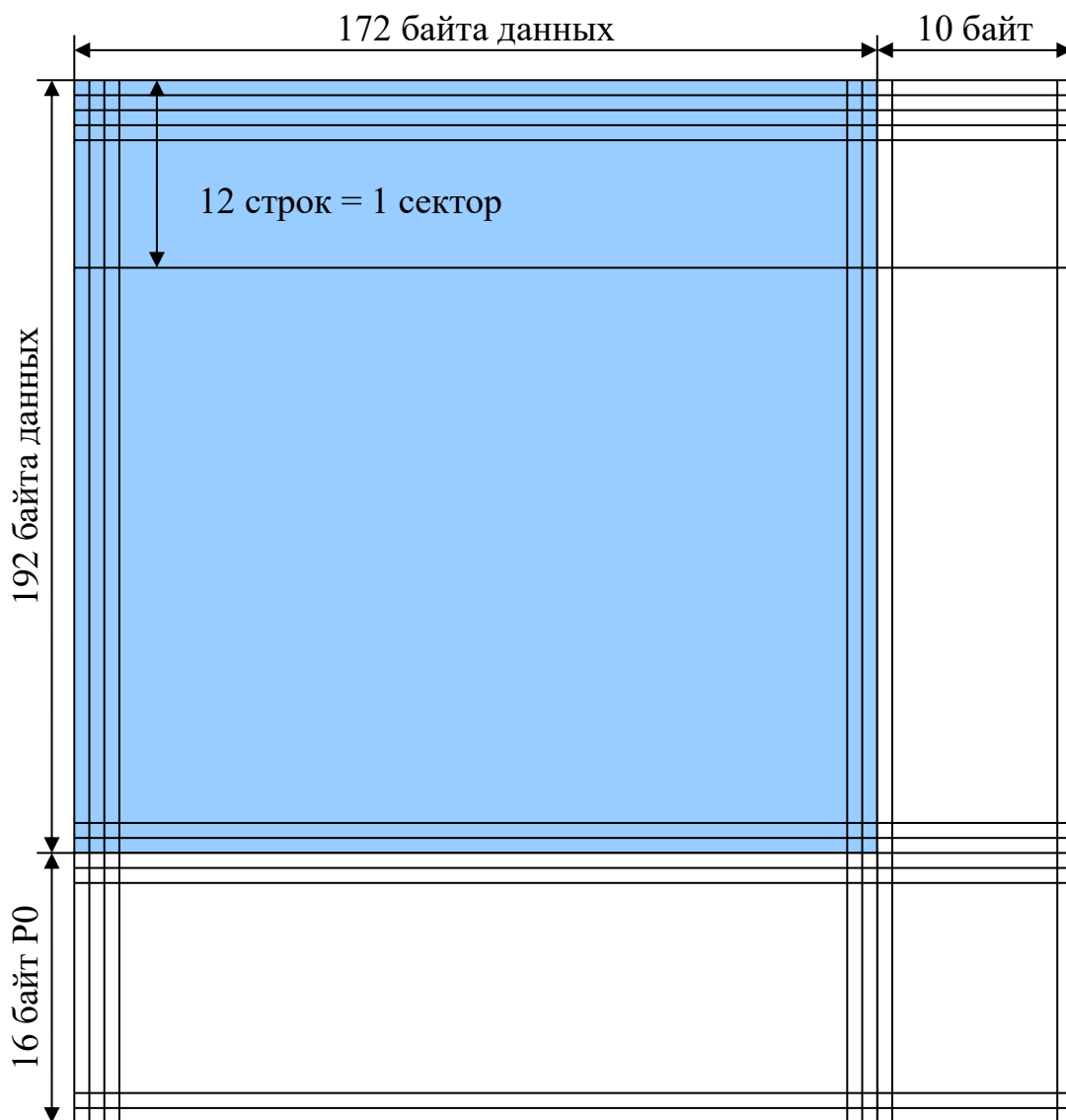


Рис. 8.9. Блок ECC

После этого данные каждого столбца кодируются кодом Рида-Соломона RS[208,192]. Полученные при этом 16 проверочных символов ко-

да записываются в нижние 16 строк матрицы (байты P0). Такая система кодирования называется *Reed-Solomon Product Code (RSPC)*. Она способна скорректировать по меньшей мере 5 ошибочных байт на каждую строку и 8 ошибочных байт на каждый столбец. Путем выполнения нескольких последовательных вычислений можно исправить даже большее количество ошибочных байт.

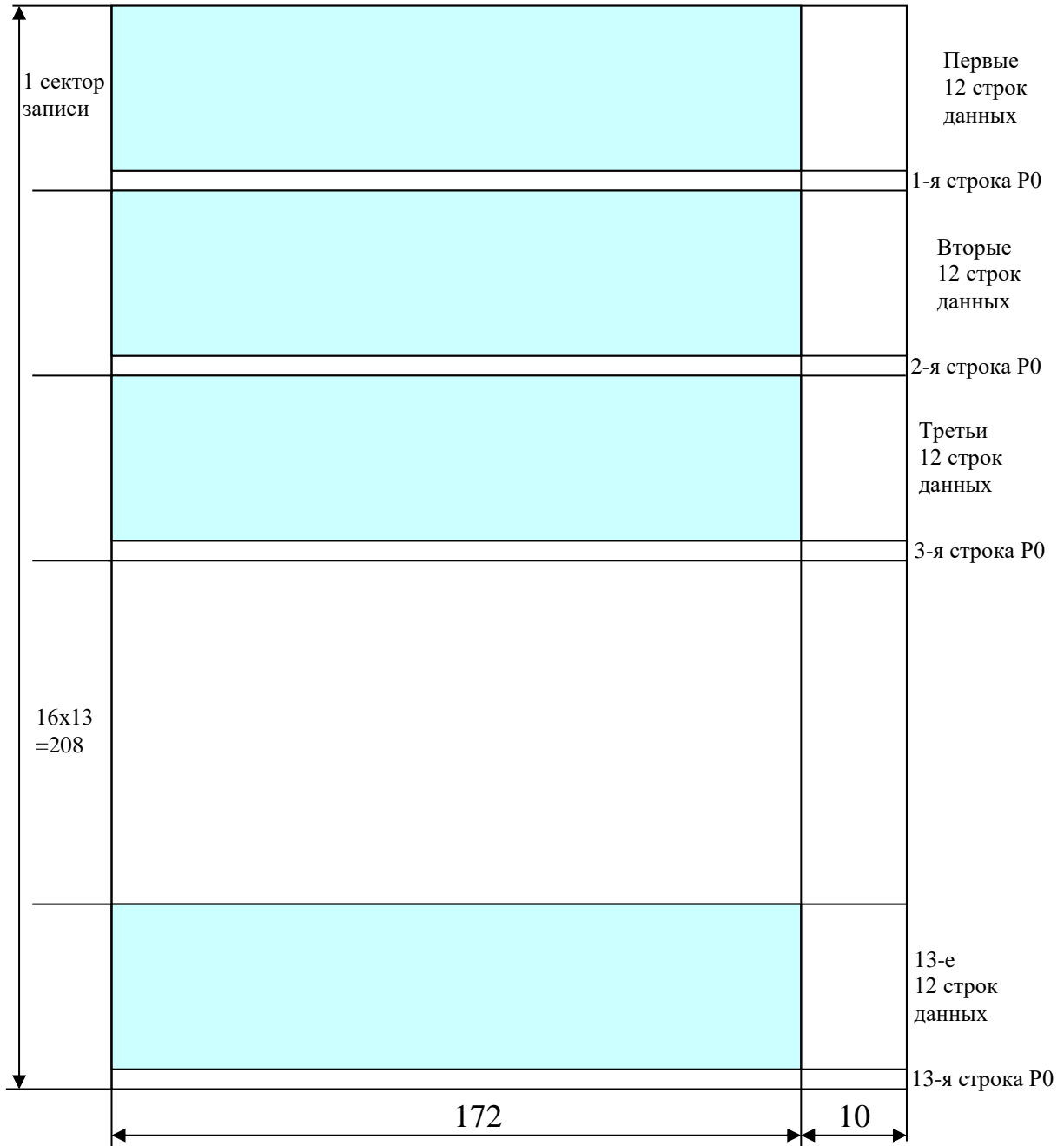


Рис. 8.10. Формирование физического сектора из секторов записи

После выполнения операций кодирования кодами Рида-Соломона, из данных блока ЕСС формируются 16 *секторов записи*. Для этого каждые 12 строк матрицы с исходными данными (*сектор данных*) объединяются с од-

ной из строк проверочных данных P0, как показано на рис. 8.10. Фактически один сектор записи содержит информацию одного сектора данных (12 строк или 2064 байта) + 12 строк по 10 байт P1 (120 байт) + 182 байта P0 – всего 2366 байт. Совокупность полученных при этом секторов записи образует **физический сектор**.

После этого каждая строка сектора записи делится на две равные части (91 + 91 байт), выполняется процедура модуляции каждого байта кодом EFM+ и к каждой части добавляется 32-разрядная синхрогруппа, образуя, таким образом, **кадры записи**. Синхрогруппы разных кадров имеют разную структуру и добавляются к полученным кадрам физического сектора в определенной логической последовательности, обеспечивая тем самым правильную работу декодеров при воспроизведении (рис. 8.11).

- SYNC0 – начало физического сектора,
- SYNC1 – SYNC4 – начало нечетного кадра,
- SYNC5 – SYNC7 – начало четного кадра.

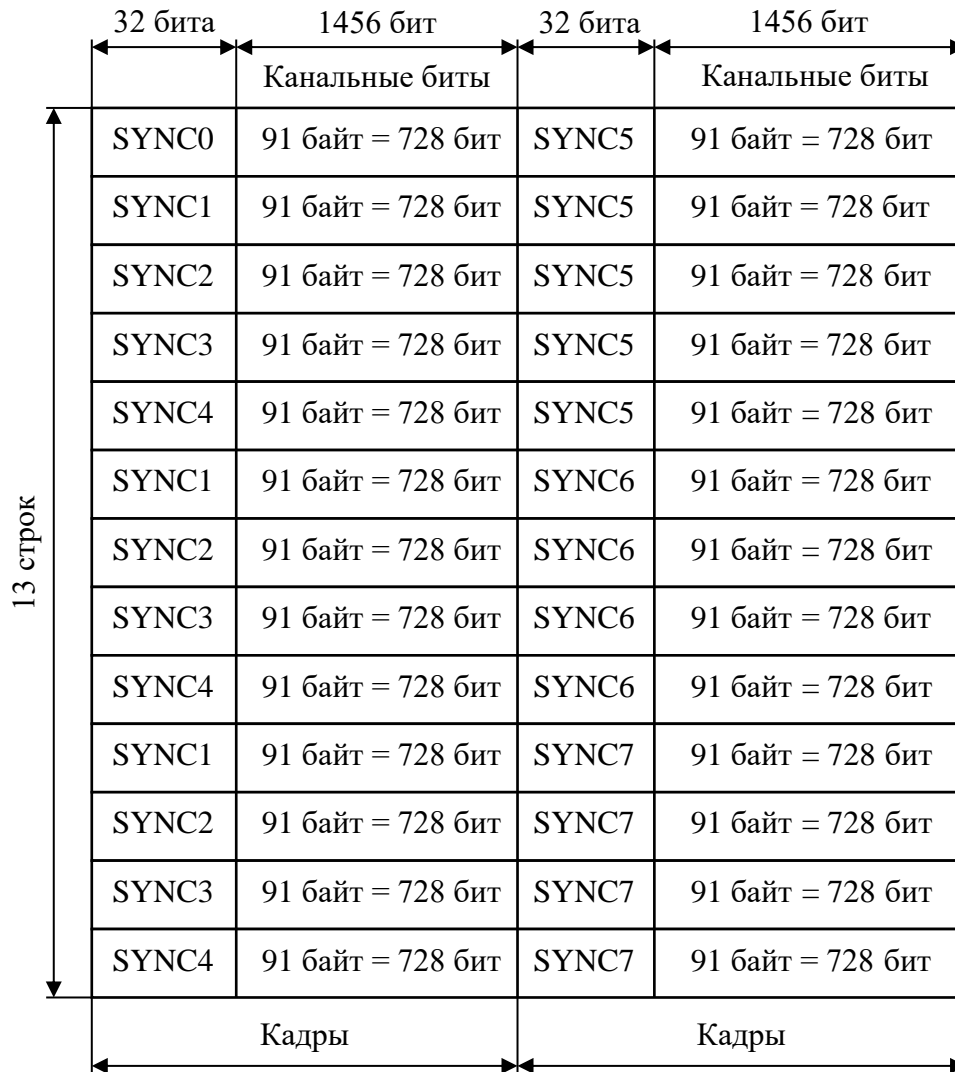


Рис. 8.11. Распределение кадров в физическом секторе

Результирующая скорость потока данных при записи/считывании в SACD для двухканальной записи составляет 6,5536 Мбит/с. Однако если использовать те же самые преобразования для многоканальной записи, то скорость потока данных превысит считывающие возможности оптической системы. Поэтому для записи многоканальных звуковых программ используется специальный вид компрессии – *Direct Stream Transfer (DST)*. С использованием сжатия по методу DST результирующая скорость потока данных для 5.1-канальной записи получается равной 14,99136 Мбит/с.

#### 8.4. ЗАЩИТА ОТ КОПИРОВАНИЯ В SACD

Для защиты материала, записанного на диск SACD, от копирования разработчики предусмотрели так называемую систему PSP – Pit Signal Processing. Суть ее заключается в следующем.

В процессе изготовления мастер-диска к потоку данных подмешивается специальный идентификационный сигнал, который записывается на диск.

Кроме того, ширина записываемых пит модулируется по определенному закону, создавая дополнительную степень защиты информации. Причем, этот вид защиты невозможно скопировать никаким известным способом. Оба вида защиты находятся во взаимном соответствии и дополняют друг друга. Такое соответствие проверяется специальным анализатором проигрывателя SACD. Если оно отсутствует, что неизбежно произойдет при перезаписи, то выход проигрывателя блокируется [52].

На рис. 8.12 показан внешний вид проигрывателя дисков SACD фирмы Philips и футляр с диском.



Рис. 8.12. Внешний вид проигрывателя SACD SCD2000 фирмы Philips и диска с логотипами формата

## 9. ФОРМАТ DVD

Первая версия стандарта на *DVD (Digital Versatile Disc)* была принята в сентябре 1995 года. Первые диски и проигрыватели DVD появились в начале только в Японии - в конце 1996 года, а в начале 1997 года – в США и Европе [25-30].

Правом вносить изменения и дополнения в спецификации на DVD обладает так называемый *DVD Forum* – добровольное объединение более чем 230 компаний и частных лиц, сформированное в 1997 году на основе первоначально существовавшего с 1995 года объединения 10 фирм-основателей технологии DVD (Toshiba, Matsushita (Panasonic), Sony, Philips, Pioneer, JVC, Hitachi, Mitsubishi, Thomson, Warner Brothers), и которое именовалось ранее *DVD консорциумом (DVD Consortium)*.

Первоначальное и основное назначение технологии DVD – обеспечить возможность записи на оптический диск полнометражных фильмов вещательного качества. А также обеспечить защиту содержимого таких дисков от пиратского копирования.

После обсуждения двух прототипов нового носителя MMCD и SD-DVD, участники DVD консорциума стороны приняли решение об окончательных параметрах формата DVD. В табл. 9.1 для сравнения приводятся аналогичные параметры формата CD.

Таблица 9.1

### Технические параметры формата DVD

| Параметр   | DVD             | CD          |
|--|-----------------|-------------|
| Диаметр диска, мм  | 120             | 120         |
| Толщина диска, мм  | 1,2 (0,6×2)     | 1,2         |
| Длина волны излучения лазера, нм   | 650/635         | 780         |
| Числовая апертура объектива  | 0,6             | 0,45        |
| Минимальный диаметр считывающего пятна, мкм                                      | 0,4             | 0,83        |
| Шаг дорожки, мкм   | 0,74            | 1,6         |
| Минимальная длина питов, мкм   | 0,40-0,44       | 0,833-0,972 |
| Максимальная длина питов, мкм  | 1,87-2,13       | 3,054-3,560 |
| Коррекция ошибок   | CIRC Plus       | CIRC        |
| Канальная модуляция  | EFM Plus (8-16) | EFM (8-14)  |
| Средняя скорость перемещения луча относительно дорожки на диске, м/с             | 3,49-3,84       | 1,2-1,4     |
| Максимальная скорость потока данных пользователя (видео, звук, субтитры), Мбит/с | 9,8             | 1,4112      |
| Информационная емкость диска, Гбайт  | 4,7-17          | 0,65-0,78   |

## 9.1. КОНСТРУКЦИЯ ДИСКА DVD

В конструкции диска DVD отразились технические решения обеих групп разработчиков (MMCD и SD-DVD) – диск может быть односторонним однослойным, односторонним двухслойным, двухсторонним однослойным и двухсторонним двухслойным, т.е. может иметь до четырех информационных слоев.

В конце концов, получили распространение четыре конструктивно различных типа дисков, имеющих от одного до четырех информационных слоёв. С учетом того, что кроме 120-миллиметрового диска выпускается еще и 80-миллиметровый, всего получается 8 наименований, отличающихся своей информационной ёмкостью. Их данные приведены в таблице 9.2.

Таблица 9.2

*Характеристики основных типов дисков DVD*

| Конструктивный тип диска | 80 мм          |              | 120 мм         |              |
|--------------------------|----------------|--------------|----------------|--------------|
|                          | Ёмкость, Гбайт | Наименование | Ёмкость, Гбайт | Наименование |
| SSSL                     | 1,46           | DVD-1        | 4,7            | DVD-5        |
| SSDL                     | 2,66           | DVD-2        | 8,54           | DVD-9        |
| DSSL                     | 2,92           | DVD-3        | 9,4            | DVD-10       |
| DSDL                     | 5,32           | DVD-6        | 17,08          | DVD-17       |

Цифры в названиях типов дисков отражают их примерную емкость (DVD-5, DVD-9, DVD-10 и т.д.).

Рассмотрим эти типы дисков подробнее [157].

**Однослойный односторонний – SSSL (Single Sided Single Layer)** (Тип А) (рис. 9.1). Представляет собой две склеенные подложки толщиной 0,6 мм каждая. Одна из них – та, на которой имеется информационный слой, изготовлена из прозрачного поликарбоната. Другая изготовлена из непрозрачной пластмассы. На ней, разумеется, информационного слоя нет, и предназначена она только для того, чтобы обеспечить нужную толщину диска. На нее наносится этикетка. Информационный слой металлизирован слоем алюминия толщиной 0,05 мкм.

**Двухсторонний однослойный (флиппер-диск) – DSSL (Double Sided Single Layer)** (Тип В) (рис. 9.2). Аналогичен SSSL, но информационный слой имеется на каждой из двух подложек. Отсюда – общая емкость диска в два раза больше, чем у SSSL. Неудобен тем, что в проигрывателях с одной считывающей головкой при просмотре фильма приходится извлекать его из дисковода и переворачивать.

**Односторонний двухслойный – SSDL (Single Sided Double Layer)** (Тип С) (рис. 9.3). Так же, как и DSSL, имеет информационный слой на каждой подложке, но считывается, в отличие от него, с одной и той же стороны. Дело в том, что информационный слой на одной из подложек

(той, сквозь которую осуществляется считывание) металлизирован не алюминием, а тончайшим полупрозрачным слоем золота или кремния. При считывании луч лазера может фокусироваться либо на поверхности полупрозрачного слоя, либо на поверхности непрозрачного слоя, металлизированного алюминием. При склеивании двух подложек между ними вводится расплавленный прозрачный фотополимер, который затем подвергается облучению потоком ультрафиолетовых лучей и затвердевает. Толщина его составляет доли микрона. Поскольку уровень шумов носителя здесь значительно выше, а уровень полезного сигнала ниже, чем у SSSL и DSSL, питы приходится делать гораздо крупнее стандартных и информационная ёмкость диска получается меньше, чем у DSSL, который тоже имеет два информационных слоя.

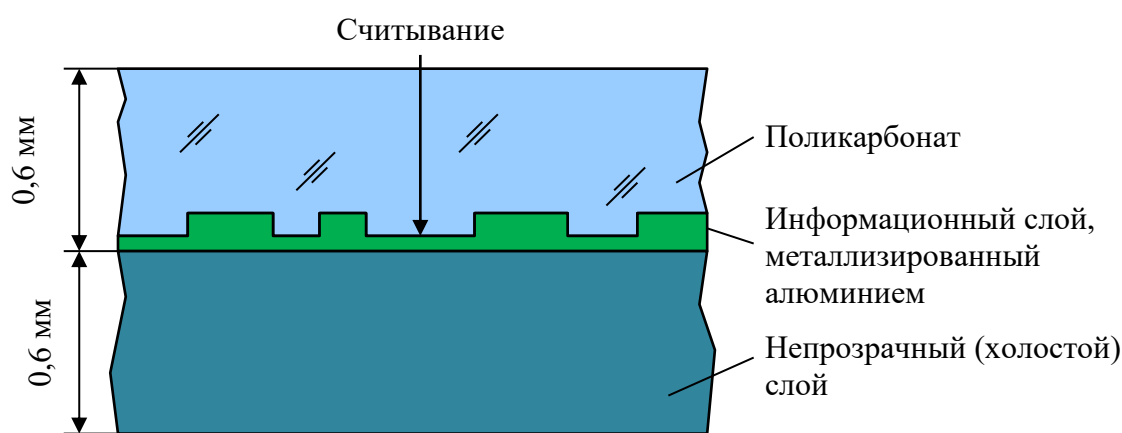


Рис. 9.1. Конструкция диска SSSL

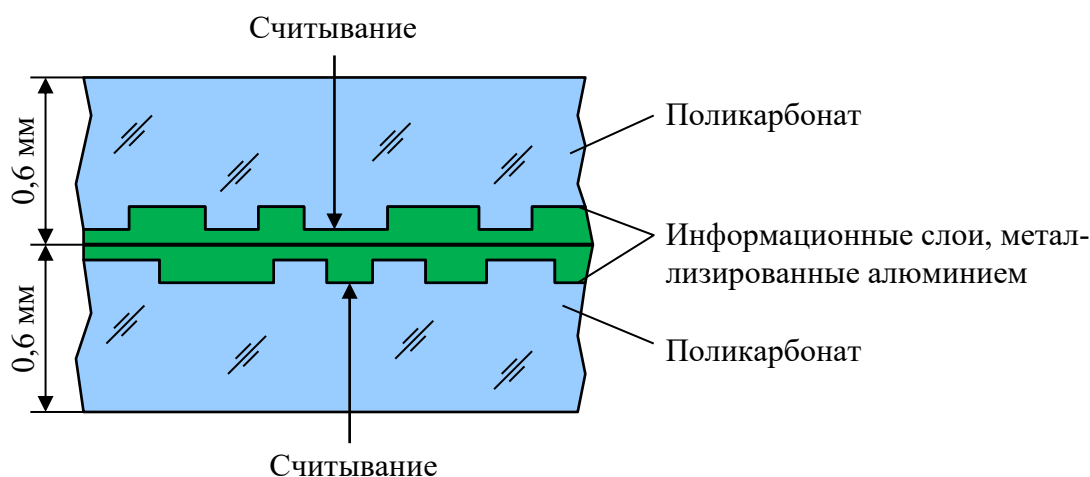


Рис. 9.2. Конструкция диска DSSL

Особенностью диска SSDL является то, что если на нем записан DVD-Video или DVD-Audio, то первый слой (полупрозрачный) считывается как обычно – от центра к краю, а вот второй (непрозрачный) – от края к центру. Такая технология называется OTP (Opposite Track Path - противополо-

ложное направление дорожек) (рис. 9.4,а). Это делается для того, чтобы во время перехода от одного слоя к другому программа, записанная на нем, не прерывалась. Однако если диск SSDL представляет собой DVD-ROM, то оба слоя считываются от центра к краю. Такая технология называется РТР (Parallel Track Path - параллельное направление дорожек) (рис. 9.4,б).

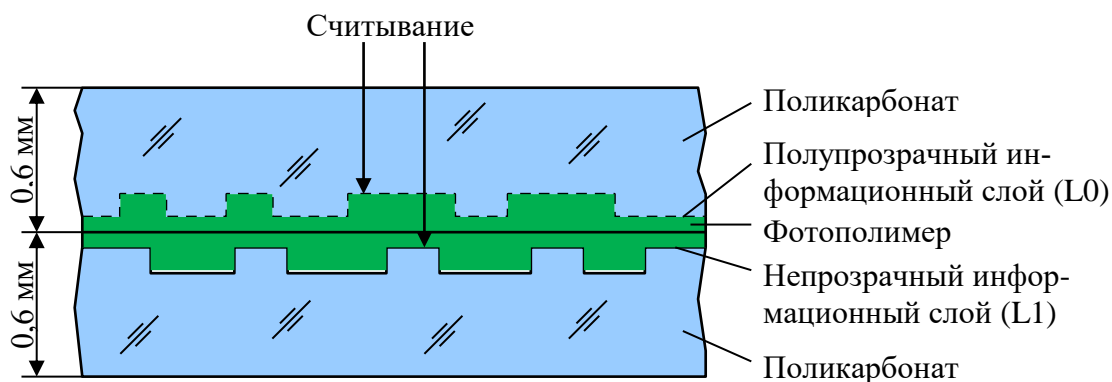


Рис. 9.3. Конструкция диска SSDL

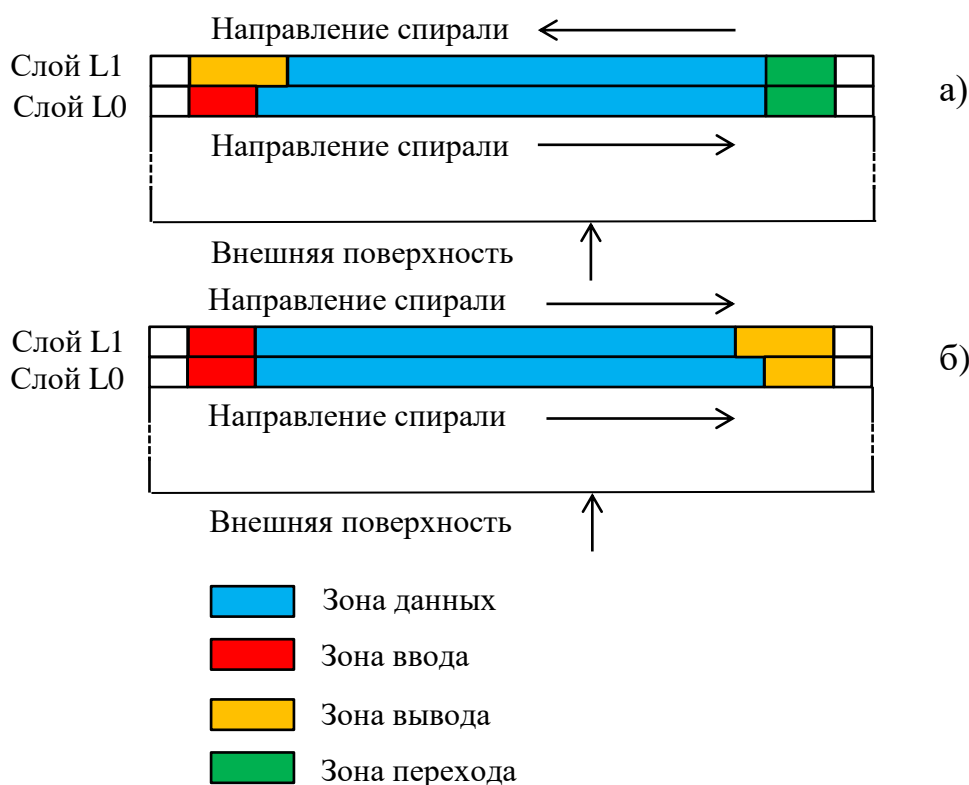


Рис. 9.4. Технологии считывания дорожек на двухслойном диске DVD  
а) Opposite Track Path (OTP); б) Parallel Track Path (PTP)

**Двухсторонний двухслойный – DSDL (Double Sided Double Layer) (Тип D)** (рис. 9.5). Диск с двумя информационными слоями на каждой из подложек. При изготовлении таких подложек один информационный слой покрывают полупрозрачным слоем золота или кремния, после чего нано-



сят жидкий фотополимер и прикладывают матрицу с рельефом второго информационного слоя. После отвердевания фотополимера под воздействием ультрафиолетовых лучей, на получившийся рельеф напыляют слой алюминия. Две подложки склеивают вместе и получают диск с четырьмя информационными слоями. Емкость его в два раза больше, чем у SSDL.

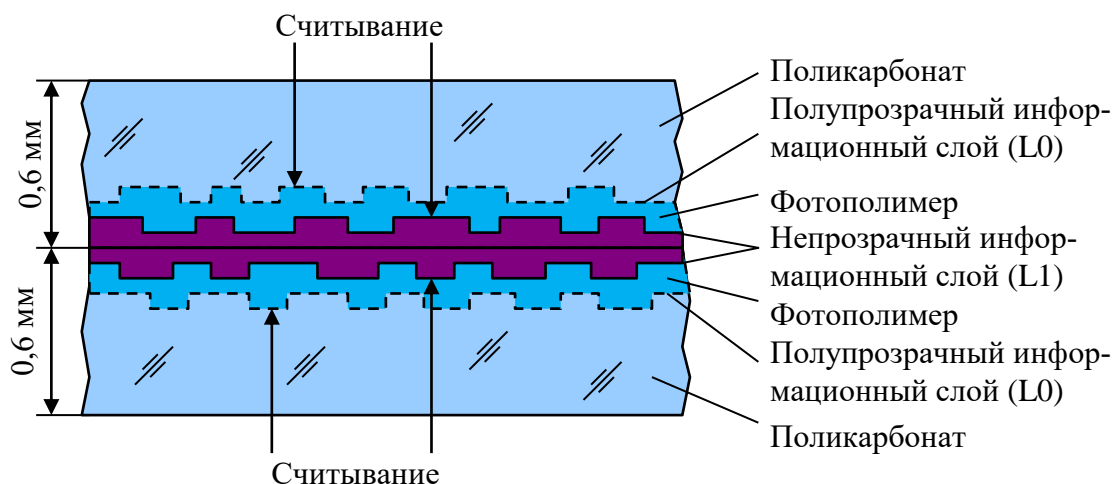


Рис. 9.5. Конструкция диска DSDL

Цифры в названиях типов дисков (табл. 9.2) отражают их примерную емкость (DVD-5, DVD-9, DVD-10 и т.д.).

По характеру записанной информации диски можно разделить на три типа – DVD-Video, DVD-Audio и DVD-ROM.

На DVD-Video записываются видеопрограммы. DVD-Audio служит источником высококачественных звуковых программ. На DVD-ROM, как правило, записываются компьютерные программы, текстовая, графическая и прочая информация, в том числе может быть записан звук или видео. В этом отношении DVD-ROM, кроме гораздо большей информационной емкости, ничем не отличается от CD-ROM.

## 9.2. СТРУКТУРА ДАННЫХ НА ДИСКЕ DVD

Данные, размещаемые на диске DVD, организованы в сектора, подобно данным на диске CD-ROM. Первоначально данные представляются в виде кадра, который можно представить в виде таблицы из 12 строк по 172 байта в каждой строке (рис. 9.6). В дальнейшем эти данные подвергаются ряду преобразований для формирования физического сектора, который и записывается на диск.

### 9.2.1. ФОРМИРОВАНИЕ КАДРА ДАННЫХ

В исходном кадре данных содержится 2064 байта. Из них 2048 байт – это данные пользователя (основные данные) и, кроме того, 12 байт заго-

ловка и 4 проверочных байта кода обнаружения ошибок в основных данных EDC (Error Detection Code).

Заголовок включает в себя 4 байта *идентификатора сектора (ID)*, 2 *проверочных байта (IED)*, необходимых для обнаружения ошибок в идентификаторе, и 6 байт *кода управления копированием CPR\_MAI (Copyright Management Information)*.

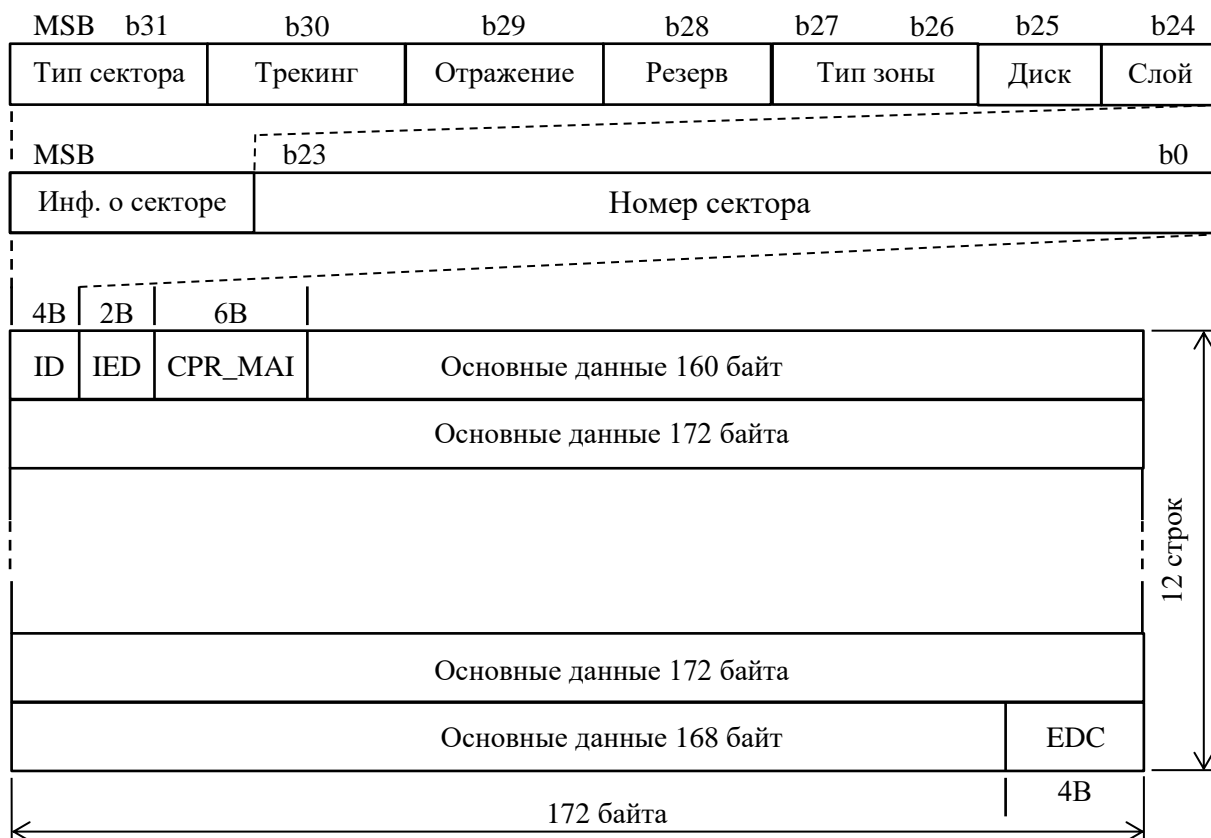


Рис. 9.6. Структура сектора данных  
 b – бит; В – байт; MSB – Most Significant Bit (старший разряд)

**Идентификатор сектора ID** включает в себя байт информации о секторе (биты b24-b31) и 3 байта номера сектора (b0-b23).

Бит **b24** идентификатора содержит информацию о номере слоя, к которому принадлежит сектор.

- если сектор относится к слою L0 двухслойного диска (тип С или D), то  $b24 = 0$ ;

- если сектор относится к слою L1 двухслойного диска (тип С или D), то  $b24 = 1$ ;

- если это сектор однослойного диска (тип А или В), то  $b24 = 0$ .

Бит **b25** идентификатора характеризует тип данных сектора.

- если это данные только для считывания, то  $b25 = 0$ ;

- если это перезаписываемый диск, то  $b25 = 1$ .

Биты **b26** и **b27** идентификатора характеризуют тип зоны, к которой принадлежит сектор.

- если это зона данных, то  $b26, b27 = 00$ ;
- если это вводная зона, то  $b26, b27 = 01$ ;
- если это выводная зона, то  $b26, b27 = 10$ ;
- если это переходная зона, то  $b26, b27 = 11$ .

Бит **b28** всегда устанавливается в 0.

Бит **b29** характеризует отражательную способность диска.

- если отражательная способность более 40%, то  $b29 = 0$ ;
- если отражательная способность не более 40%, то  $b29 = 1$ ;

Бит **b30** всегда устанавливается в 0, что говорит о слежении за дорожкой из пит.

Бит **b31** устанавливается в 0, что говорит о том, что это диск только для считывания в режиме с постоянной линейной скоростью CLV (Constant Linear Velocity).

**Три байта, предназначенные для номера сектора** (биты b0-b23), содержат 6 символов в шестнадцатеричном коде – от 0 до F. Вводная дорожка заканчивается сектором с номером 02FFFF, зона данных начинается сектором с номером 030000.

Когда структура сектора данных сформирована, то все байты сектора можно представить как некоторые коэффициенты  $C_{i,j}$ , где  $i = 0, 1, 2, \dots, 11$  – это номер строки,  $j = 0, 1, 2, \dots, 171$  – это номер символа в строке или, что то же самое, номер столбца в таблице (рис. 9.6). Эти коэффициенты можно поставить в соответствие элементам поля Галуа  $GF(2^8)$ , построенного по модулю порождающего полинома  $P(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$ .

Символы идентификатора сектора ID при этом будут иметь значения от  $C_{0,0}$  до  $C_{0,3}$ , а символы проверочных байт идентификатора IED - значения  $C_{0,4}$  и  $C_{0,5}$ .

Идентификатор ID можно представить в виде многочлена  $I(x)$  степени 3 с коэффициентами  $C_{0,0} \dots C_{0,3}$ :

$$I(x) = \sum_{j=0}^3 C_{0,j} x^{3-j}.$$

Если байты идентификатора использовать как информационные символы кода Рида-Соломона [6,4], то проверочные байты идентификатора IED можно вычислить как остаток от деления многочлена  $I(x)$ , умноженного предварительно на  $x^2$ , на порождающий многочлен кода Рида-Соломона

$$G_E(x) = \prod_{k=0}^1 (x + \alpha^k) = (x - 1)(x - \alpha),$$

где  $\alpha$  – примитивный элемент поля Галуа  $GF(2^8)$ , т.е. корень примитивного полинома  $P(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$ , образующего поле  $GF(2^8)$ .

Другими словами, **проверочные байты идентификатора IED** есть результат выполнения операции

$$IED(x) = \sum_{j=4}^5 C_{0,j} x^{5-j} = I(x)x^2 \bmod G_E(x).$$

Значения 6 байт **кода управления копированием CPR\_MAI (Copyright Management Information)** зависят от применения диска, например, для записи видеоприложений. Если спецификацией их значения не оговариваются, то все они устанавливаются в 0.

Байты **кода обнаружения ошибок EDC (Error Detection Code)** вычисляются как остаток от побитного деления многочлена степени 16511, коэффициентами которого являются биты всех байт сектора, на порождающий многочлен кода  $G(x) = x^{32} + x^{31} + x^4 + 1$ . Таким образом, код EDC – это обычный циклический код, относящийся к классу CRCC (Cyclic Redundancy Check Code).

Всего в секторе 2064 байта или 16512 бит. Их нумерация начинается с 0 и заканчивается числом 16511. Старшим коэффициентом  $b_i$  многочлена,  $I(x)$  подлежащего делению на  $G(x)$ , будет считаться самый первый бит первого байта идентификатора ID ( $b_{31}$  на рис.9.6) ( $i = 16511$ ). Младшим коэффициентом ( $i = 32$ ) – последний бит последнего байта поля данных, непосредственно предшествующий первому биту первого байта кода EDC. Многочлен  $I(x)$  можно записать следующим образом:

$$I(x) = \sum_{i=16511}^{32} b_i x^i.$$

Тогда 32-битовый (4-байтовый) остаток от деления  $I(x)$  на  $G(x)$  получается путем выполнения следующей операции:

$$EDC(x) = \sum_{i=31}^0 b_i x^i = I(x) \bmod G(x).$$

### 9.2.2. СКРЕМБЛИРОВАНИЕ

Основные данные кадра (2048 байт) должны быть подвергнуты процедуре скремблирования с помощью регистра сдвига с обратными связями, показанного на рис. 9.7.

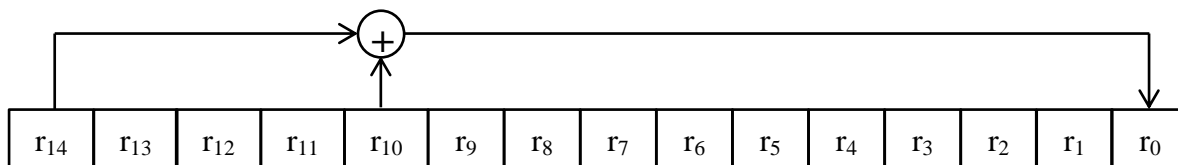


Рис. 9.7. Регистр сдвига с обратными связями, предназначенный для скремблирования основных данных кадра

Перед началом процедуры скремблирования в ячейки  $r_{14}-r_0$  регистра записывается инициализирующая комбинация из табл. 9.3, указанная в шестнадцатеричном коде. Ее номер определяется значением четырех бит от  $b_7$  (MSB) до  $b_4$  (LSB) номера сектора в идентификаторе сектора ID. Это значение, очевидно, будет изменяться (увеличиваться) через каждые 16 кадров. Вместе с ним через каждые 16 кадров будет изменяться и инициализирующая комбинация, записываемая в регистр в соответствии с табл. 9.3. После каждых 16 групп по 16 кадров вся процедура будет повторяться.

Таблица 9.3

**Инициализирующие комбинации**

| Номер инициализирующей комбинации | Инициализирующая комбинация | Номер инициализирующей комбинации | Инициализирующая комбинация |
|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| 0                                 | 0001                        | 8                                 | 0010                        |
| 1                                 | 5500                        | 9                                 | 5000                        |
| 2                                 | 0002                        | A                                 | 0020                        |
| 3                                 | 2A00                        | B                                 | 2001                        |
| 4                                 | 0004                        | C                                 | 0040                        |
| 5                                 | 5400                        | D                                 | 4002                        |
| 6                                 | 0008                        | E                                 | 0080                        |
| 7                                 | 2800                        | F                                 | 0005                        |

Часть инициализирующей комбинации  $S_0$ , содержащаяся в ячейках  $r_7-r_0$  скремблирующего регистра сдвига, выполняет роль скремблирующего байта  $S_{00}$ . Скремблированный байт основных данных  $D'_k$  получается путем суммирования по модулю 2 скремблирующего байта  $S_{jk}$  и байта основных данных  $D_k$ .

$$D'_k = D_k \oplus S_{jk}$$

где  $j = 0 \dots F$  – номер инициализирующей комбинации  $k = 0 \dots 2047$  – номер байта основных данных в кадре.

После суммирования байта  $D_0$  основных данных со скремблирующим байтом  $S_{00}$ , производится сдвиг содержимого регистра на одну ячейку влево, и следующий байт основных данных  $D_1$  суммируется с полученным в результате сдвига содержимым ячеек  $r_7-r_0$ , которое будет выполнять роль скремблирующего байта  $S_{01}$ . Эта процедура будет продолжаться 2047 раз до тех пор, пока не изменится значение четырех бит от  $b_7 \dots b_4$  номера сектора в идентификаторе сектора ID и в ячейки  $r_{14}-r_0$  регистра сдвига не запишется следующая инициализирующая комбинация  $S_1$ , соответствующая этому значению.

### 9.2.3. БЛОК КОРРЕКЦИИ ОШИБОК (ЕСС)

Из каждых 16 последовательных скремблированных кадров формируется блок коррекции ошибок (ЕСС – Error Correction Code) в виде, который содержит изначально 192 строки по 172 байта в каждой, т.е. 172 столбца. Затем к 192 символам каждого из 172 столбцов добавляются по 16 проверочных байт внешнего кода P0. После этого к каждому 172 байтам 208 полученных строк добавляются по 10 проверочных байтов внутреннего кода P1. Таким образом формируется матрица блока ЕСС, состоящая из 208 строк по 192 байта в каждой (рис. 9.8). Байты блока ЕСС обозначаются символами  $V_{i,j}$ , где  $i$  – это номер строки, а  $j$  – номер столбца матрицы.

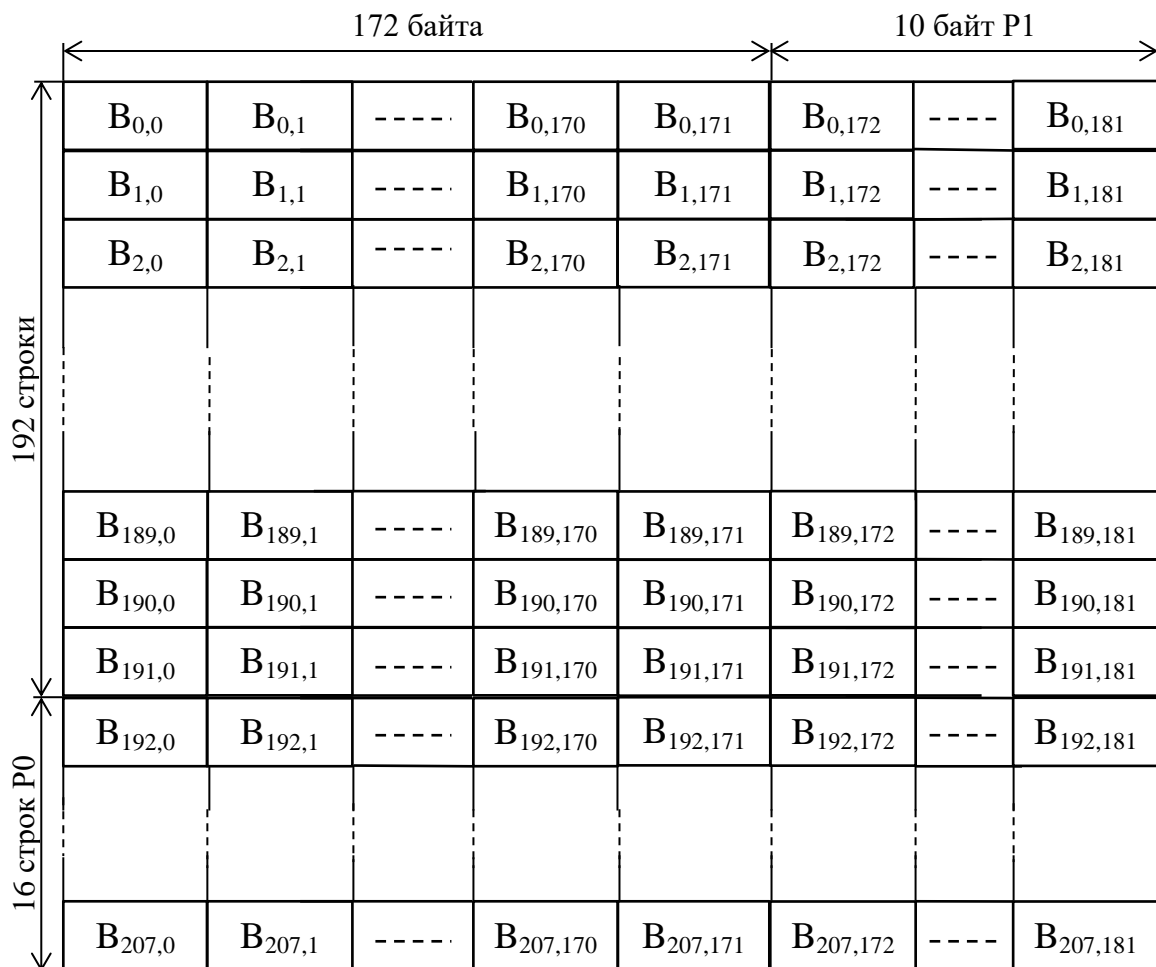


Рис. 9.8. Структура блока ЕСС

Проверочные байты P0 и P1 формируются следующим образом. В каждом из столбцов с номерами  $j = 0 \dots 171$  байты P0 являются проверочными символами внешнего кода Рида-Соломона [208,192] построенного над полем  $GF(2^8)$  с порождающим полиномом  $P(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$ , и вычисляются как остаток от деления полинома  $R_j(x)$  207-й степени, коэф-

коэффициентами которого являются байты соответствующего столбца, на порождающий полином  $G_{P0}(x)$  этого кода.

$$R_j(x) = \sum_{i=192}^{207} B_{i,j} x^{207-i} = I_j(x)x^{16} \bmod G_{P0}(x)$$

где

$$I_j(x) = \sum_{i=0}^{191} B_{i,j} x^{191-i}$$

$$G_{P0}(x) = \prod_{k=0}^{15} (x - \alpha^k)$$

В каждой из строк с номерами  $i = 0 \dots 207$  байты P1 являются проверочными символами внутреннего кода Рида-Соломона [182,172] построенного над тем же полем  $GF(2^8)$  с порождающим полиномом  $P(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$ , и вычисляются как остаток от деления полинома  $R_i(x)$  181-й степени, коэффициентами которого являются байты соответствующего столбца, на порождающий полином  $G_{P1}(x)$  этого кода.

$$R_i(x) = \sum_{j=172}^{181} B_{i,j} x^{181-j} = I_i(x)x^{10} \bmod G_{P1}(x)$$

где

$$I_i(x) = \sum_{j=0}^{171} B_{i,j} x^{171-j}$$

$$G_{P1}(x) = \prod_{k=0}^9 (x - \alpha^k)$$

Здесь  $\alpha$  – примитивный элемент поля Галуа  $GF(2^8)$ , т.е. корень примитивного полинома  $P(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$ , образующего поле  $GF(2^8)$ .

#### 9.2.4. КАДР ЗАПИСИ

Следующей операцией является формирование из данных блока ЕСС шестнадцати кадров записи. Для этого к каждому 12 последовательным строкам блока ЕСС добавляется одна строка с проверочными байтами P0 (рис. 9.9). Таким образом, байты  $B_{i,j}$  блока ЕСС становятся байтами  $B_{m,n}$  кадра записи:

$$m = i + \text{int}[i / 12] \text{ и } n = j \text{ для } i \leq 191$$

$$m = 13(i - 191) - 1 \text{ и } n = j \text{ для } i \geq 192,$$

где  $\text{int}[x]$  – наибольшее целое число, не большее, чем  $x$ .

В результате из 37856 байт блока ECC получается 16 кадров записи по 2366 байт в каждом. Каждый кадр записи состоит из 13 строк по 182 байта в каждой строке.

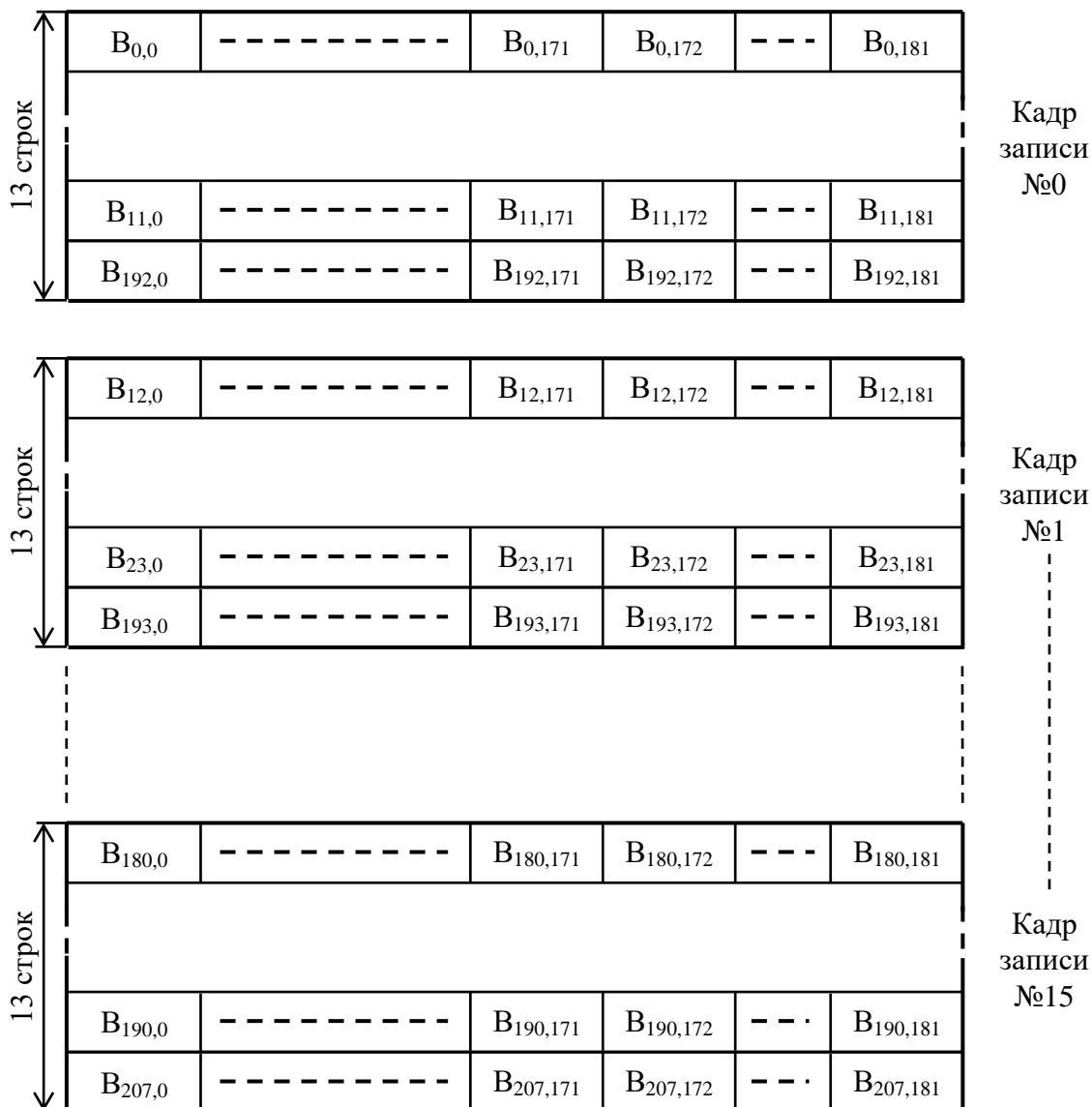


Рис. 9.9. Формирование кадров записи

## 9.2.5. КАНАЛЬНАЯ МОДУЛЯЦИЯ

Следующей процедурой является модуляция байт данных в соответствии с правилами кодирования канальным кодом EFM Plus (8-16). Как



следует из обозначения данного кода, он является усовершенствованным вариантом кода EFM (8-14), используемого в формате CD, и был разработан в середине 90-х годов для записи информации на оптический носитель (один из прототипов DVD) – мультимедийный компакт-диск – MMCD (MultiMedia Compact Disc) [158, 159].

**Основные параметры кода EFM Plus** те же, что и у его предшественника – кода EFM: минимальное расстояние между двумя соседними «единицами»  $d = 2$ , максимальное  $k = 10$ , а следовательно  $T_{min} = 3$  и  $T_{max} = 11$ . Однако алгоритмы кодирования и декодирования довольно сильно отличаются. Если в коде EFM каждому входному 8-разрядному символу однозначно соответствовал один выходной (кодový), то в коде EFM Plus такого соответствия нет. Одному и тому же входному символу могут соответствовать по меньшей мере четыре выходных, выбираемых из четырех столбцов таблицы преобразования по определенному закону. Кроме того, для первых 88 символов (от 0 до 87) существует еще альтернативная таблица, из которой могут быть выбраны выходные символы. Эта таблица используется для того, чтобы уменьшить уровень низкочастотных составляющих (значение DSV) в результирующей выходной последовательности. Выходные (кодový) слова в коде EFM Plus – 16-разрядные, а не 14-разрядные, как в коде EFM. Соединительные разряды здесь не используются. Поэтому другое название кода EFM Plus – код 8-16. В некотором смысле аббревиатура EFM (Eight to Fourteen Modulation) здесь совершенно не соответствует сути преобразования (правильнее было бы назвать этот код ESM – Eight to Sixteen Modulation), и является лишь указанием на своего предшественника.

**Стратегия кодирования** кодом EFM Plus состоит в следующем. Общее число 16-разрядных слов, удовлетворяющих условиям на ограничение расстояния между двумя соседними «единицами»  $d = 2$  и  $k = 10$ , и, следовательно, пригодных для использования в качестве кодových слов кода EFM Plus, равно 351. Семь из них исключены из этого числа, поскольку они могут стать причиной образования ложных синхрогрупп (о синхрокombинациях, используемых в потоке данных, модулированных кодом EFM Plus, будет рассказано несколько позже). Остается, таким образом,  $351 - 7 = 344$  слов. Для кодирования 256 исходных 8-разрядных информационных символов, в принципе, достаточно такого же количества 16-разрядных кодových символов. Поэтому оставшиеся  $344 - 256 = 88$  символов можно использовать в качестве альтернативных основному множеству символов для минимизации низкочастотных составляющих в спектре формируемой последовательности.

Для того чтобы в процессе кодирования при каскадном соединении двух соседних 16-разрядных символов не произошло нарушения заданных ограничений на минимальное и максимальное расстояние между двумя соседними «единицами» ( $d = 2, k = 10$ ), каждое очередное кодový слово вы-

бирается из четырех возможных вариантов, т.е. однозначного соответствия между входным 8-разрядным символом и 16-разрядным кодовым, как уже говорилось выше, в методе EFM Plus нет (в отличие от его предшественника – кода EFM). Для того чтобы обеспечить такую свободу выбора, из 256 кодовых слов основного множества образованы четыре группы, каждая из которых сама содержит 256 16-разрядных кодовых символов. Очевидно, что для этого каждое 16-разрядное кодовое слово должно входить в такие группы неоднократно – в среднем четыре раза. И действительно, один и тот же кодовый символ может, как входить в разные группы, соответствующие одному и тому же входному 8-разрядному символу, так и в одну и ту же группу, но соответствовать при этом разным входным символам. Группы символов формируются следующим образом.

В **1-ю группу** входят кодовые слова, которые могут следовать за словами, заканчивающимися «единицей» или одним «нулем». То есть в начале слов этой группы может быть не менее 2 и не более 9 «нулей». Состояние кодера, когда очередное кодовое слово выбирается из 1-й группы, называется состоянием 1.

Во **2-ю группу** входят кодовые слова, которые могут следовать за словами, у которых в конце от 2 до 5 «нулей». Кроме того, у всех слов 2-й группы 1-й и 13-й биты равны «нулю». Состояние кодера, когда очередное кодовое слово выбирается из 2-й группы, называется состоянием 2.

Во **3-ю группу** входят кодовые слова, которые, также как и слова 2-й группы, могут следовать за словами, у которых в конце от 2 до 5 «нулей». Однако, у всех слов 3-й группы, в отличие от слов 2-й группы, либо 1-й, либо 13-й биты, не равны «нулю». Состояние кодера в этом случае соответствует состоянию 3.

В **4-ю группу** входят кодовые слова, которые могут следовать за словами, у которых в конце от 6 до 9 «нулей». То есть в начале слов этой группы может быть не более 1-го «нуля» (или слово должно начинаться с «единицы»). Состояние кодера в этом случае соответствует состоянию 4.

Заметим, что 1-я и 4-я группы не могут иметь общих слов, хотя слова как 1-й, так и 4-й группы могут также входить во 2-ю и 3-ю группы.

Описание работы кодера будет более понятным, если воспользоваться следующими обозначениями:

$x_t$  – кодовое слово, сформированное кодером и переданное на выход в момент времени  $t$ ;

$b_t$  – входной информационный символ (слово источника), поступивший на вход кодера в момент времени  $t$ , в результате чего кодер сформировал на своем выходе кодовое слово  $x_t$ ;

$s_t$  – состояние кодера в момент времени  $t$ , когда на его вход поступил информационный символ  $b_t$  и когда он сформировал на своем выходе отклик  $x_t$ ;

$h(b_t, s_t)$  – функция, которая описывает состояние выхода кодера и которая указывает на то, что это состояние зависит от значения входного информационного символа  $b_t$  и от состояния кодера  $s_t$  в момент времени  $t$ ;

$g(b_t, s_t)$  – функция следующего состояния кодера, которая, так же как и функция  $h(b_t, s_t)$ , зависит от значения входного информационного символа  $b_t$  и от состояния кодера  $s_t$  в момент времени  $t$ .

Таким образом, можно записать

$$\begin{aligned} x_t &= h(b_t, s_t); \\ s_{t+1} &= g(b_t, s_t), \end{aligned}$$

где  $s_{t+1}$  – состояние кодера в момент времени  $t+1$ , т.е. сразу после завершения формирования и передачи на выход очередного кодового слова.

Для кодирования входного потока данных, представленного в виде последовательности 8-разрядных информационных символов ( $b_t$ ), используется специальная таблица (табл. 9.4). Эта таблица содержит четыре столбца, каждый из которых включает в себя 256 16-разрядных кодовых слов, обозначенных функцией состояния выхода  $h$ , и указанных рядом значений следующего состояния кодера  $g$ , в которое он должен перейти после формирования и передачу на выход данного кодового символа. Входные информационные символы обозначены их порядковыми номерами  $i$  ( $i = 0 \dots 255$ ). Физически процедура кодирования реализуется с помощью памяти с произвольным доступом, объемом  $256 \times 4 = 1024$  18-разрядных слов (рис. 9.10). В каждую 18-разрядную ячейку записывается значение 16-разрядного кодового символа ( $b_t$ ) из соответствующего столбца таблицы и 2-разрядное значения одного из четырех состояний кодера ( $s_t$ ), в которое кодер должен перейти сразу же после того, как очередной символ передан на его выход (т.е. в момент времени  $t + 1$ ).

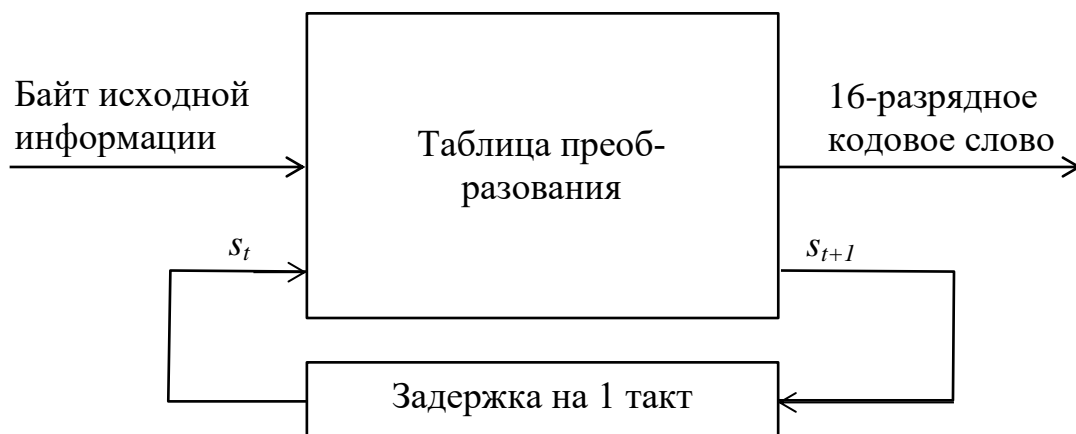


Рис. 9.10. Схема, поясняющая принцип образования кодовых слов в кодере EFM+

В качестве примера, иллюстрирующего работу кодера, рассмотрим процесс кодирования информационных символов с номерами 8, 3 и 4. Пусть исходным состоянием кодера будет состояние 1. Откликом на вход-

ное воздействие «8» (информационный символ с номером  $i = 8$ ) при наличии состояния 1 кодера будет значение функции выхода  $h(8, 1) = 0010000010010000$ .

Таблица 9.4-1

Основная таблица кодирования кодом EFM Plus

| $i$ | Группа 1            | Группа 2            | Группа 3            | Группа 4            |
|-----|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|     | $h(i,1), g(i,1)$    | $h(i,2), g(i,2)$    | $h(i,3), g(i,3)$    | $h(i,4), g(i,4)$    |
| 0   | 001000000001001, 1  | 0100000100100000, 2 | 001000000001001, 1  | 0100000100100000, 2 |
| 1   | 0010000000010010, 1 | 0010000000010010, 1 | 1000000100100000, 3 | 1000000100100000, 3 |
| 2   | 0010000100100000, 2 | 0010000100100000, 2 | 1000000000010010, 1 | 1000000000010010, 1 |
| 3   | 0010000001001000, 2 | 0100010010000000, 4 | 0010000001001000, 2 | 0100010010000000, 4 |
| 4   | 0010000010010000, 2 | 0010000010010000, 2 | 1000000100100000, 2 | 1000000100100000, 2 |
| 5   | 0010000000100100, 2 | 0010000000100100, 2 | 1001001000000000, 4 | 1001001000000000, 4 |
| 6   | 0010000000100100, 3 | 0010000000100100, 3 | 1000100100000000, 4 | 1000100100000000, 4 |
| 7   | 0010000001001000, 3 | 0100000000010010, 1 | 0010000001001000, 3 | 0100000000010010, 1 |
| 8   | 0010000010010000, 3 | 0010000010010000, 3 | 1000010010000000, 4 | 1000010010000000, 4 |
| 9   | 0010000100100000, 3 | 0010000100100000, 3 | 1001001000000001, 1 | 1001001000000001, 1 |
| 10  | 0010010010000000, 4 | 0010010010000000, 4 | 1000100100000001, 1 | 1000100100000001, 1 |
| 11  | 0010001001000000, 4 | 0010001001000000, 4 | 1000000010010000, 3 | 1000000010010000, 3 |
| 12  | 0010010010000001, 1 | 0010010010000001, 1 | 1000000010010000, 2 | 1000000010010000, 2 |
| 13  | 0010001001000001, 1 | 0010001001000001, 1 | 1000010010000001, 1 | 1000010010000001, 1 |
| 14  | 0010000001001001, 1 | 0100000000100100, 3 | 0010000001001001, 1 | 0100000000100100, 3 |
| 15  | 0010000100100001, 1 | 0010000100100001, 1 | 1000001001000001, 1 | 1000001001000001, 1 |
| 16  | 0010000010010001, 1 | 0010000010010001, 1 | 1000000010010001, 1 | 1000000010010001, 1 |
| 17  | 0010000000100010, 1 | 0010000000100010, 1 | 1000001001000000, 4 | 1000001001000000, 4 |
| 18  | 0001000000001001, 1 | 0100000010010000, 2 | 0001000000001001, 1 | 0100000010010000, 2 |
| 19  | 0010000000010001, 1 | 0010000000010001, 1 | 1001000100000000, 4 | 1001000100000000, 4 |
| 20  | 0001000000010010, 1 | 0001000000010010, 1 | 1000100010000000, 4 | 1000100010000000, 4 |
| 21  | 0000100000000010, 1 | 0000100000000010, 1 | 1000000010010001, 1 | 1000000010010001, 1 |
| 22  | 0000010000000001, 1 | 0000010000000001, 1 | 1000000001001001, 1 | 1000000001001001, 1 |
| 23  | 0010001000100000, 2 | 0010001000100000, 2 | 1000000001001000, 2 | 1000100010000000, 2 |
| 24  | 0010000100010000, 2 | 0010000100010000, 2 | 1000000001001000, 3 | 1000000001001001, 3 |
| 25  | 0010000010001000, 2 | 0100000000100100, 2 | 0010000010001000, 2 | 1000000001001001, 2 |
| 26  | 0010000001000100, 2 | 0010000001000100, 2 | 1000000000100010, 1 | 1000000000100010, 1 |
| 27  | 0001000100100000, 2 | 0001000100100000, 2 | 1000000000010001, 1 | 1000000000010001, 1 |
| 28  | 0010000000001000, 2 | 0100000010010000, 3 | 0010000000001000, 2 | 0100000010010000, 3 |
| 29  | 0001000010010000, 2 | 0001000010010000, 2 | 1001001000000010, 1 | 1001001000000010, 1 |
| 30  | 0001000001001000, 2 | 0100000010010000, 3 | 0001000001001000, 2 | 0100000010010000, 3 |
| 31  | 0001000000100100, 2 | 0001000000100100, 2 | 1001000100000001, 1 | 1001000100000001, 1 |

## Основная таблица кодирования кодом EFM Plus

| <i>i</i> | Группа 1            | Группа 2            | Группа 3            | Группа 4            |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|          | $h(i,1), g(i,1)$    | $h(i,2), g(i,2)$    | $h(i,3), g(i,3)$    | $h(i,4), g(i,4)$    |
| 32       | 000100000000100, 2  | 000100000000100, 2  | 1000100100000010, 1 | 1000100100000010, 1 |
| 33       | 000100000000100, 3  | 000100000000100, 3  | 1000100010000001, 1 | 1000100010000001, 1 |
| 34       | 0001000000100100, 3 | 0001000000100100, 3 | 1000000000100100, 2 | 1000000000100100, 2 |
| 35       | 0001000001001000, 3 | 0100001001000000, 4 | 0001000001001000, 3 | 0100001001000000, 4 |
| 36       | 0001000010010000, 3 | 0001000010010000, 3 | 1000000000100100, 3 | 1000000000100100, 3 |
| 37       | 0001000100100000, 3 | 0001000100100000, 3 | 1000010001000000, 4 | 1000010001000000, 4 |
| 38       | 0010000000001000, 3 | 0100100100000001, 1 | 0010000000001000, 3 | 0100100100000001, 1 |
| 39       | 0010000001000100, 3 | 0010000001000100, 3 | 1001000010000000, 4 | 1001000010000000, 4 |
| 40       | 0010000010001000, 3 | 0100010010000001, 1 | 0010000010001000, 3 | 0100010010000001, 1 |
| 41       | 0010000100010000, 3 | 0010000100010000, 3 | 1000010010000010, 1 | 1000010010000010, 1 |
| 42       | 0010001000100000, 3 | 0010001000100000, 3 | 1000001000100000, 2 | 1000001000100000, 2 |
| 43       | 0010010001000000, 4 | 0010010001000000, 4 | 1000010001000001, 1 | 1000010001000001, 1 |
| 44       | 0001001001000000, 4 | 0001001001000000, 4 | 1000001000100000, 3 | 1000001000100000, 3 |
| 45       | 0000001000000001, 1 | 0100010001000000, 4 | 1000001001000010, 1 | 0100010001000000, 4 |
| 46       | 0010010010000010, 1 | 0010010010000010, 1 | 1000001000100001, 1 | 1000001000100001, 1 |
| 47       | 0010000010001001, 1 | 0100001001000001, 1 | 0010000010001001, 1 | 0100001001000001, 1 |
| 48       | 0010010001000001, 1 | 0010010001000001, 1 | 1000000100010000, 2 | 1000000100010000, 2 |
| 49       | 0010001001000010, 1 | 0010001001000010, 1 | 1000000010001000, 2 | 1000000010001000, 2 |
| 50       | 0010001000100001, 1 | 0010001000100001, 1 | 1000000100010000, 3 | 1000000100010000, 3 |
| 51       | 0001000001001001, 1 | 0100000100100001, 1 | 0001000001001001, 1 | 0100000100100001, 1 |
| 52       | 0010000100100010, 1 | 0010000100100010, 1 | 1000000100100010, 1 | 1000000100100010, 1 |
| 53       | 0010000100010001, 1 | 0010000100010001, 1 | 1000000100010001, 1 | 1000000100010001, 1 |
| 54       | 0010000010010010, 1 | 0010000010010010, 1 | 1000000010010010, 1 | 1000000010010010, 1 |
| 55       | 0010000001000010, 1 | 0010000001000010, 1 | 1000000010001001, 1 | 1000000010001001, 1 |
| 56       | 0010000000100001, 1 | 0010000000100001, 1 | 1000000001000010, 1 | 1000000001000010, 1 |
| 57       | 0000100000001001, 1 | 0100000010010001, 1 | 0000100000001001, 1 | 0100000010010001, 1 |
| 58       | 0001001001000001, 1 | 0001001001000001, 1 | 1000000000100001, 1 | 1000000000100001, 1 |
| 59       | 0001000100100001, 1 | 0001000100100001, 1 | 0100000001001001, 1 | 0100000001001001, 1 |
| 60       | 0001000010010001, 1 | 0001000010010001, 1 | 1001001000010010, 1 | 1001001000010010, 1 |
| 61       | 0001000000100010, 1 | 0001000000100010, 1 | 1001001000001001, 1 | 1001001000001001, 1 |
| 62       | 0001000000010001, 1 | 0001000000010001, 1 | 1001000100000010, 1 | 1001000100000010, 1 |
| 63       | 0000100000010010, 1 | 0000100000010010, 1 | 1000000001000100, 2 | 1000000001000100, 2 |

Таблица 9.4-3

## Основная таблица кодирования кодом EFM Plus

| <i>i</i> | Группа 1            | Группа 2            | Группа 3            | Группа 4            |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|          | $h(i,1), g(i,1)$    | $h(i,2), g(i,2)$    | $h(i,3), g(i,3)$    | $h(i,4), g(i,4)$    |
| 64       | 0000010000000010, 1 | 0000010000000010, 1 | 0100000001001000, 2 | 0100000001001000, 2 |
| 65       | 0010010000100000, 2 | 0010010000100000, 2 | 1000010000100000, 2 | 1000010000100000, 2 |
| 66       | 0010001000010000, 2 | 0010001000010000, 2 | 1000001000010000, 2 | 1000001000010000, 2 |
| 67       | 0010000100001000, 2 | 0100000000100010, 1 | 0010000100001000, 2 | 0100000000100010, 1 |
| 68       | 0010000010000100, 2 | 0010000010000100, 2 | 1000000100001000, 2 | 1000000100001000, 2 |
| 69       | 0010000000010000, 2 | 0010000000010000, 2 | 1000000010000100, 2 | 1000000010000100, 2 |
| 70       | 0001000010001000, 2 | 0100001000100000, 2 | 0001000010001000, 2 | 0100001000100000, 2 |
| 71       | 0001001000100000, 2 | 0001001000100000, 2 | 0100000010001000, 2 | 0100000010001000, 2 |
| 72       | 0001000000001000, 2 | 0100000010001000, 2 | 0001000000001000, 2 | 0100000010001000, 2 |
| 73       | 0001000100010000, 2 | 0001000100010000, 2 | 1000000001000100, 3 | 1000000001000100, 3 |
| 74       | 0001000001000100, 2 | 0001000001000100, 2 | 0100000001001000, 3 | 0100000001001000, 3 |
| 75       | 0000100100100000, 2 | 0000100100100000, 2 | 1000010000100000, 3 | 1000010000100000, 3 |
| 76       | 0000100010010000, 2 | 0000100010010000, 2 | 1000001000010000, 3 | 1000001000010000, 3 |
| 77       | 0000100001001000, 2 | 0100000001000100, 2 | 0000100001001000, 2 | 0100000001000100, 2 |
| 78       | 0000100000100100, 2 | 0000100000100100, 2 | 1000000100001000, 3 | 1000000100001000, 3 |
| 79       | 0000100000000100, 2 | 0000100000000100, 2 | 1000000010000100, 3 | 1000000010000100, 3 |
| 80       | 0000100000000100, 3 | 0000100000000100, 3 | 0100000010001000, 3 | 0100000010001000, 3 |
| 81       | 0000100000100100, 3 | 0000100000100100, 3 | 1000100001000000, 4 | 1000100001000000, 4 |
| 82       | 0000100001001000, 3 | 0100000001000100, 3 | 0000100001001000, 3 | 0100000001000100, 3 |
| 83       | 0000100010010000, 3 | 0000100010010000, 3 | 1000000010001000, 3 | 1000000010001000, 3 |
| 84       | 0000100100100000, 3 | 0000100100100000, 3 | 1001001001001000, 2 | 1001001001001000, 2 |
| 85       | 0001000000001000, 3 | 0100000100010000, 3 | 0001000000001000, 3 | 0100000100010000, 3 |
| 86       | 0001000001000100, 3 | 0001000001000100, 3 | 1001001000100100, 2 | 1001001000100100, 2 |
| 87       | 0001000010001000, 3 | 0100001000100000, 3 | 0001000010001000, 3 | 0100001000100000, 3 |
| 88       | 0001000100010000, 3 | 0001000100010000, 3 | 1001001001001000, 3 | 1001001001001000, 3 |
| 89       | 0001001000100000, 3 | 0001001000100000, 3 | 1001000010000001, 1 | 1001000010000001, 1 |
| 90       | 0010000000010000, 3 | 0010000000010000, 3 | 1000100100010010, 1 | 1000100100010010, 1 |
| 91       | 0010000010000100, 3 | 0010000010000100, 3 | 1000100100001001, 1 | 1000100100001001, 1 |
| 92       | 0010000100001000, 3 | 0100000000010001, 1 | 0010000100001000, 3 | 0100000000010001, 1 |
| 93       | 0010001000010000, 3 | 0010001000010000, 3 | 1000100010000010, 1 | 1000100010000010, 1 |
| 94       | 0010010000100000, 3 | 0010010000100000, 3 | 1000100001000001, 1 | 1000100001000001, 1 |
| 95       | 0000001000000010, 1 | 0100100100000010, 1 | 1000010010010010, 1 | 0100100100000010, 1 |

Таблица 9.4-4

## Основная таблица кодирования кодом EFM Plus

| <i>i</i> | Группа 1            | Группа 2            | Группа 3            | Группа 4            |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|          | $h(i,1), g(i,1)$    | $h(i,2), g(i,2)$    | $h(i,3), g(i,3)$    | $h(i,4), g(i,4)$    |
| 96       | 0000000100000001, 1 | 0100100010000001, 1 | 1000010010001001, 1 | 0100100010000001, 1 |
| 97       | 0010010010001001, 1 | 0100010000100000, 2 | 0010010010001001, 1 | 0100010000100000, 2 |
| 98       | 0010010010010010, 1 | 0010010010010010, 1 | 1001001000000100, 2 | 1001001000000100, 2 |
| 99       | 0010010001000010, 1 | 0010010001000010, 1 | 1001001000100100, 3 | 1001001000100100, 3 |
| 100      | 0010010000100001, 1 | 0010010000100001, 1 | 1000010001000010, 1 | 1000010001000010, 1 |
| 101      | 0010001001001001, 1 | 0100010010000010, 1 | 0010001001001001, 1 | 0100010010000010, 1 |
| 102      | 0010001000100010, 1 | 0010001000100010, 1 | 1000010000100001, 1 | 1000010000100001, 1 |
| 103      | 0010001000010001, 1 | 0010001000010001, 1 | 1000001001001001, 1 | 1000001001001001, 1 |
| 104      | 0010000100010010, 1 | 0010000100010010, 1 | 1000001000100010, 1 | 1000001000100010, 1 |
| 105      | 0010000010000010, 1 | 0010000010000010, 1 | 1000001000010001, 1 | 1000001000010001, 1 |
| 106      | 0010000100001001, 1 | 0100001000010000, 2 | 0010000100001001, 1 | 0100001000010000, 2 |
| 107      | 0010000001000001, 1 | 0010000001000001, 1 | 1000000100010010, 1 | 1000000100010010, 1 |
| 108      | 0001001001000010, 1 | 0001001001000010, 1 | 1000000100001001, 1 | 1000000100001001, 1 |
| 109      | 0001001000100001, 1 | 0001001000100001, 1 | 1000000010000010, 1 | 1000000010000010, 1 |
| 110      | 0001000100100010, 1 | 0001000100100010, 1 | 1000000001000001, 1 | 1000000001000001, 1 |
| 111      | 0001000100010001, 1 | 0001000100010001, 1 | 0100000010001001, 1 | 0100000010001001, 1 |
| 112      | 0001000010010010, 1 | 0001000010010010, 1 | 1001001001001001, 1 | 1001001001001001, 1 |
| 113      | 0001000001000010, 1 | 0001000001000010, 1 | 1001001000100010, 1 | 1001001000100010, 1 |
| 114      | 0001000010001001, 1 | 0100010000100000, 3 | 0001000010001001, 1 | 0100010000100000, 3 |
| 115      | 0001000000100001, 1 | 0001000000100001, 1 | 1001001000010001, 1 | 1001001000010001, 1 |
| 116      | 0000100100100001, 1 | 0000100100100001, 1 | 1001000100010010, 1 | 1001000100010010, 1 |
| 117      | 0000100010010001, 1 | 0000100010010001, 1 | 1001000100001001, 1 | 1001000100001001, 1 |
| 118      | 0000100001001001, 1 | 0100010001000001, 1 | 0000100001001001, 1 | 0100010001000001, 1 |
| 119      | 0000100000100010, 1 | 0000100000100010, 1 | 1000100100100100, 2 | 1000100100100100, 2 |
| 120      | 0000100000010001, 1 | 0000100000010001, 1 | 1000100100000100, 2 | 1000100100000100, 2 |
| 121      | 0000010000001001, 1 | 0100001001000010, 1 | 0000010000001001, 1 | 0100001001000010, 1 |
| 122      | 0000010000010010, 1 | 0000010000010010, 1 | 1000100000100000, 2 | 1000100000100000, 2 |
| 123      | 0010010010000100, 2 | 0010010010000100, 2 | 1000010010000100, 2 | 1000010010000100, 2 |
| 124      | 0010010000010000, 2 | 0010010000010000, 2 | 1000010000010000, 2 | 1000010000010000, 2 |
| 125      | 0010001000001000, 2 | 0100001000100001, 1 | 0010001000001000, 2 | 0100001000100001, 1 |
| 126      | 0010001001000100, 2 | 0010001001000100, 2 | 1000001001000100, 2 | 1000001001000100, 2 |
| 127      | 0001000100001000, 2 | 0100000100100010, 1 | 0001000100001000, 2 | 0100000100100010, 1 |

Таблица 9.4-5

## Основная таблица кодирования кодом EFM Plus

| <i>i</i> | Группа 1              | Группа 2              | Группа 3              | Группа 4              |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|          | <i>h(i,1), g(i,1)</i> | <i>h(i,2), g(i,2)</i> | <i>h(i,3), g(i,3)</i> | <i>h(i,4), g(i,4)</i> |
| 128      | 0010000100100100, 2   | 0010000100100100, 2   | 1000001000001000, 2   | 1000001000001000, 2   |
| 129      | 0000100010001000, 2   | 0100000100010001, 1   | 0000100010001000, 2   | 0100000100010001, 1   |
| 130      | 0010000100000100, 2   | 0010000100000100, 2   | 1000000100100100, 2   | 1000000100100100, 2   |
| 131      | 0010000000100000, 2   | 0010000000100000, 2   | 1001001000000100, 3   | 1001001000000100, 3   |
| 132      | 0001001000010000, 2   | 0001001000010000, 2   | 1000100100100100, 3   | 1000100100100100, 3   |
| 133      | 0000100000001000, 2   | 0100000010010010, 1   | 0000100000001000, 2   | 0100000010010010, 1   |
| 134      | 0001000010000100, 2   | 0001000010000100, 2   | 1000100000100000, 3   | 1000100000100000, 3   |
| 135      | 0001000000001000, 2   | 0001000000001000, 2   | 1000010010000100, 3   | 1000010010000100, 3   |
| 136      | 0000100100001000, 2   | 0000100100001000, 2   | 1000010000010000, 3   | 1000010000010000, 3   |
| 137      | 0000100001000100, 2   | 0000100001000100, 2   | 1000001001000100, 3   | 1000001001000100, 3   |
| 138      | 0000010001001000, 2   | 0100000001000010, 1   | 0000010001001000, 2   | 0100000001000010, 1   |
| 139      | 0000010010010000, 2   | 0000010010010000, 2   | 1000001000001000, 3   | 1000001000001000, 3   |
| 140      | 0000010000100100, 2   | 0000010000100100, 2   | 1001000010000010, 1   | 1001000010000010, 1   |
| 141      | 0000010000000100, 2   | 0000010000000100, 2   | 1000000100000100, 2   | 1000000100000100, 2   |
| 142      | 0000010000000100, 3   | 0000010000000100, 3   | 1000000100100100, 3   | 1000000100100100, 3   |
| 143      | 0000010000100100, 3   | 0000010000100100, 3   | 1000000100000100, 3   | 1000000100000100, 3   |
| 144      | 0000010001001000, 3   | 0100000010000100, 2   | 0000010001001000, 3   | 0100000010000100, 2   |
| 145      | 0000010010010000, 3   | 0000010010010000, 3   | 1001000001000000, 4   | 1001000001000000, 4   |
| 146      | 0000100000001000, 3   | 0100000000010000, 2   | 0000100000001000, 3   | 0100000000010000, 2   |
| 147      | 0000100001000100, 3   | 0000100001000100, 3   | 1000000000100000, 2   | 1000000000100000, 2   |
| 148      | 0000100010001000, 3   | 0100000010000100, 3   | 0000100010001000, 3   | 0100000010000100, 3   |
| 149      | 0000100100001000, 3   | 0000100100001000, 3   | 1000000000100000, 3   | 1000000000100000, 3   |
| 150      | 0001000000010000, 3   | 0001000000010000, 3   | 0100000100001000, 3   | 0100000100001000, 3   |
| 151      | 0001000010000100, 3   | 0001000010000100, 3   | 1000000001000000, 4   | 1000000001000000, 4   |
| 152      | 0001000100001000, 3   | 0100001000010000, 3   | 0001000100001000, 3   | 0100001000010000, 3   |
| 153      | 0001001000010000, 3   | 0001001000010000, 3   | 1001000001000001, 1   | 1001000001000001, 1   |
| 154      | 0010000000100000, 3   | 0010000000100000, 3   | 0100000100001000, 2   | 0100000100001000, 2   |
| 155      | 0010000100000100, 3   | 0010000100000100, 3   | 1001000100100100, 3   | 1001000100100100, 3   |
| 156      | 0010000100100100, 3   | 0010000100100100, 3   | 1000100100100010, 1   | 1000100100100010, 1   |
| 157      | 0010001000001000, 3   | 0100000000100001, 1   | 0010001000001000, 3   | 0100000000100001, 1   |
| 158      | 0010001001000100, 3   | 0010001001000100, 3   | 1000100100000100, 3   | 0100100100000000, 4   |
| 159      | 0010010000010000, 3   | 0010010000010000, 3   | 1001001001000100, 2   | 1001001001000100, 2   |



## Основная таблица кодирования кодом EFM Plus

| <i>i</i> | Группа 1              | Группа 2              | Группа 3              | Группа 4              |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|          | <i>h(i,1), g(i,1)</i> | <i>h(i,2), g(i,2)</i> | <i>h(i,3), g(i,3)</i> | <i>h(i,4), g(i,4)</i> |
| 160      | 0010010010000100, 3   | 0010010010000100, 3   | 1001001000001000, 2   | 1001001000001000, 2   |
| 161      | 0000001000010010, 1   | 0100000000010000, 3   | 1000100100010001, 1   | 0100000000010000, 3   |
| 162      | 0000001000001001, 1   | 0100100100100100, 2   | 1000100010010010, 1   | 0100100100100100, 2   |
| 163      | 0000000100000010, 1   | 0100100100100100, 3   | 1000100010001001, 1   | 0100100100100100, 3   |
| 164      | 0000000010000001, 1   | 0100100100010010, 1   | 1000100001000010, 1   | 0100100100010010, 1   |
| 165      | 0010010010010001, 1   | 0010010010010001, 1   | 1001000100100100, 2   | 1001000100100100, 2   |
| 166      | 0010010000100010, 1   | 0010010000100010, 1   | 1001000100000100, 2   | 1001000100000100, 2   |
| 167      | 0010010001001001, 1   | 0100100100000100, 2   | 0010010001001001, 1   | 0100100100000100, 2   |
| 168      | 0010010000010001, 1   | 0010010000010001, 1   | 1001001001000100, 3   | 1001001001000100, 3   |
| 169      | 0010001000010010, 1   | 0010001000010010, 1   | 1000100000100001, 1   | 1000100000100001, 1   |
| 170      | 0010000100000010, 1   | 0010000100000010, 1   | 1000010010010001, 1   | 1000010010010001, 1   |
| 171      | 0010001000001001, 1   | 0100100000100000, 3   | 0010001000001001, 1   | 0100100000100000, 3   |
| 172      | 0010000010000001, 1   | 0010000010000001, 1   | 1000010001001001, 1   | 1000010001001001, 1   |
| 173      | 0001001000100010, 1   | 0001001000100010, 1   | 1000010000100010, 1   | 1000010000100010, 1   |
| 174      | 0001001000010001, 1   | 0001001000010001, 1   | 1000010000010001, 1   | 1000010000010001, 1   |
| 175      | 0001000100010010, 1   | 0001000100010010, 1   | 1000001000010010, 1   | 1000001000010010, 1   |
| 176      | 0001000010000010, 1   | 0001000010000010, 1   | 1000001000001001, 1   | 1000001000001001, 1   |
| 177      | 0001001001001001, 1   | 0100100010000010, 1   | 0001001001001001, 1   | 0100100010000010, 1   |
| 178      | 0001000001000001, 1   | 0001000001000001, 1   | 1000000100000010, 1   | 1000000100000010, 1   |
| 179      | 0000100100100010, 1   | 0000100100100010, 1   | 1000000010000001, 1   | 1000000010000001, 1   |
| 180      | 0000100100010001, 1   | 0000100100010001, 1   | 0100100100001001, 1   | 0100100100001001, 1   |
| 181      | 0001000100001001, 1   | 0100100000100000, 2   | 0001000100001001, 1   | 0100100000100000, 2   |
| 182      | 0000100010010010, 1   | 0000100010010010, 1   | 0100010010001001, 1   | 0100010010001001, 1   |
| 183      | 0000100001000010, 1   | 0000100001000010, 1   | 0100001001001001, 1   | 0100001001001001, 1   |
| 184      | 0000100010001001, 1   | 0100010010000100, 3   | 0000100010001001, 1   | 0100010010000100, 3   |
| 185      | 0000100000100001, 1   | 0000100000100001, 1   | 1001000000100000, 2   | 1001000000100000, 2   |
| 186      | 0000010010010001, 1   | 0000010010010001, 1   | 1000100100001000, 2   | 1000100100001000, 2   |
| 187      | 0000010000100010, 1   | 0000010000100010, 1   | 1000100010000100, 2   | 1000100010000100, 2   |
| 188      | 0000010001001001, 1   | 0100100001000001, 1   | 0000010001001001, 1   | 0100100001000001, 1   |
| 189      | 0000010000010001, 1   | 0000010000010001, 1   | 1000100000010000, 2   | 1000100000010000, 2   |
| 190      | 0000001001001000, 2   | 0100010010000100, 2   | 1000010010001000, 2   | 0100010010000100, 2   |
| 191      | 0000001000100100, 2   | 0100010000010000, 2   | 1000010001000100, 2   | 0100010000010000, 2   |

Таблица 9.4-7

## Основная таблица кодирования кодом EFM Plus

| <i>i</i> | Группа 1            | Группа 2             | Группа 3            | Группа 4             |
|----------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
|          | $h(i,1), g(i,1)$    | $h(i,2), g(i,2)$     | $h(i,3), g(i,3)$    | $h(i,4), g(i,4)$     |
| 192      | 000000100000100, 2  | 0100001001000100, 2  | 1000010000001000, 2 | 0100001001000100, 2  |
| 193      | 0010010010001000, 2 | 01000100000010000, 3 | 0010010010001000, 2 | 01000100000010000, 3 |
| 194      | 0010010001000100, 2 | 0010010001000100, 2  | 1000001001001000, 2 | 1000001001001000, 2  |
| 195      | 0010010000001000, 2 | 0100010010010010, 1  | 0010010000001000, 2 | 0100010010010010, 1  |
| 196      | 0010001000100100, 2 | 0010001000100100, 2  | 1000001000100100, 2 | 1000001000100100, 2  |
| 197      | 0010001000000100, 2 | 0010001000000100, 2  | 1000001000000100, 2 | 1000001000000100, 2  |
| 198      | 0010001001001000, 2 | 0100010001000010, 1  | 0010001001001000, 2 | 0100010001000010, 1  |
| 199      | 0001001001000100, 2 | 0001001001000100, 2  | 0100001000001000, 2 | 0100001000001000, 2  |
| 200      | 0001000100100100, 2 | 0001000100100100, 2  | 1001000000100000, 3 | 1001000000100000, 3  |
| 201      | 0001000100000100, 2 | 0001000100000100, 2  | 1000100100001000, 3 | 1000100100001000, 3  |
| 202      | 0001001000001000, 2 | 0100010000100001, 1  | 0001001000001000, 2 | 0100010000100001, 1  |
| 203      | 0001000000100000, 2 | 0001000000100000, 2  | 1000100010000100, 3 | 1000100010000100, 3  |
| 204      | 0000100010000100, 2 | 0000100010000100, 2  | 1000010010001000, 3 | 1000010010001000, 3  |
| 205      | 0000100000001000, 2 | 0000100000001000, 2  | 1000010001000100, 3 | 1000010001000100, 3  |
| 206      | 0000100100001000, 2 | 0100001000100010, 1  | 0000100100001000, 2 | 0100001000100010, 1  |
| 207      | 0000010010001000, 2 | 0100001000010001, 1  | 0000010010001000, 2 | 0100001000010001, 1  |
| 208      | 0000010001000100, 2 | 0000010001000100, 2  | 1000001000100100, 3 | 1000001000100100, 3  |
| 209      | 0000010000001000, 2 | 0100000100010010, 1  | 0000010000001000, 2 | 0100000100010010, 1  |
| 210      | 0000001000000100, 3 | 0100000010000010, 1  | 1000010000001000, 3 | 0100000010000010, 1  |
| 211      | 0000001000100100, 3 | 0100000100100100, 2  | 1000001001001000, 3 | 0100000100100100, 2  |
| 212      | 0000001001001000, 3 | 0100000100000100, 2  | 1000001000000100, 3 | 0100000100000100, 2  |
| 213      | 0000010000001000, 3 | 0100000001000001, 1  | 0000010000001000, 3 | 0100000001000001, 1  |
| 214      | 0000010001000100, 3 | 0000010001000100, 3  | 0100001000001000, 3 | 0100001000001000, 3  |
| 215      | 0000010010001000, 3 | 0100000000100000, 2  | 0000010010001000, 3 | 0100000000100000, 2  |
| 216      | 0000100000001000, 3 | 0000100000001000, 3  | 1001001000001000, 3 | 1001001000001000, 3  |
| 217      | 0000100010000100, 3 | 0000100010000100, 3  | 1001000100000100, 3 | 1001000100000100, 3  |
| 218      | 0000100100001000, 3 | 0100000100000100, 3  | 0000100100001000, 3 | 0100000100000100, 3  |
| 219      | 0001000000100000, 3 | 0001000000100000, 3  | 0100000100001001, 1 | 0100000100001001, 1  |
| 220      | 0001000100000100, 3 | 0001000100000100, 3  | 1001001000001000, 2 | 1001001000001000, 2  |
| 221      | 0001000100100100, 3 | 0001000100100100, 3  | 1001000100001000, 2 | 1001000100001000, 2  |
| 222      | 0001001000001000, 3 | 0100000100100100, 3  | 0001001000001000, 3 | 0100000100100100, 3  |
| 223      | 0001001001000100, 3 | 0001001001000100, 3  | 1001001000001000, 3 | 1001001000001000, 3  |

## Основная таблица кодирования кодом EFM Plus

| $i$ | Группа 1            | Группа 2            | Группа 3            | Группа 4            |
|-----|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|     | $h(i,1), g(i,1)$    | $h(i,2), g(i,2)$    | $h(i,3), g(i,3)$    | $h(i,4), g(i,4)$    |
| 224 | 0010001000000100, 3 | 0010001000000100, 3 | 1000100000010000, 3 | 1000100000010000, 3 |
| 225 | 0010001000100100, 3 | 0010001000100100, 3 | 1001001001000010, 1 | 1001001001000010, 1 |
| 226 | 0010001001001000, 3 | 0100001001000100, 3 | 0010001001001000, 3 | 0100001001000100, 3 |
| 227 | 0010010000001000, 3 | 0100100100000100, 3 | 0010010000001000, 3 | 0100100100000100, 3 |
| 228 | 0010010001000100, 3 | 0010010001000100, 3 | 1001000100001000, 3 | 1001000100001000, 3 |
| 229 | 0010010010001000, 3 | 0100000000100000, 3 | 0010010010001000, 3 | 0100000000100000, 3 |
| 230 | 0010000001000000, 4 | 0010000001000000, 4 | 1001001000100001, 1 | 1001001000100001, 1 |
| 231 | 0000001001001001, 1 | 0100100100100010, 1 | 1001000100100010, 1 | 0100100100100010, 1 |
| 232 | 0000001000100010, 1 | 0100100010000100, 2 | 1001000100010001, 1 | 0100100010000100, 2 |
| 233 | 0000001000010001, 1 | 0100100000010000, 2 | 1001000010010010, 1 | 0100100000010000, 2 |
| 234 | 0000000100010010, 1 | 0100000001000000, 4 | 1001000010001001, 1 | 0100000001000000, 4 |
| 235 | 0000000100001001, 1 | 0100100100010001, 1 | 1001000001000010, 1 | 0100100100010001, 1 |
| 236 | 0000000010000010, 1 | 0100100010010010, 1 | 1001000000100001, 1 | 0100100010010010, 1 |
| 237 | 0000000001000001, 1 | 0100100001000010, 1 | 1000100100100001, 1 | 0100100001000010, 1 |
| 238 | 0010010000010010, 1 | 0010010000010010, 1 | 1000100010010001, 1 | 1000100010010001, 1 |
| 239 | 0010001000000010, 1 | 0010001000000010, 1 | 1001000010000100, 3 | 1001000010000100, 3 |
| 240 | 0010010000001001, 1 | 0100100010000100, 3 | 0010010000001001, 1 | 0100100010000100, 3 |
| 241 | 0010000100000001, 1 | 0010000100000001, 1 | 1001000010000100, 2 | 1001000010000100, 2 |
| 242 | 0001001000010010, 1 | 0001001000010010, 1 | 1000000010000000, 4 | 1000000010000000, 4 |
| 243 | 0001000100000010, 1 | 0001000100000010, 1 | 1000100001001001, 1 | 1000100001001001, 1 |
| 244 | 0001001000001001, 1 | 0100100000100001, 1 | 0001001000001001, 1 | 0100100000100001, 1 |
| 245 | 0001000010000001, 1 | 0001000010000001, 1 | 1000100000100010, 1 | 1000100000100010, 1 |
| 246 | 0000100100010010, 1 | 0000100100010010, 1 | 1000100000010001, 1 | 1000100000010001, 1 |
| 247 | 0000100010000010, 1 | 0000100010000010, 1 | 1000010000010010, 1 | 1000010000010010, 1 |
| 248 | 0000100100001001, 1 | 0100010010010001, 1 | 0000100100001001, 1 | 0100010010010001, 1 |
| 249 | 0000100001000001, 1 | 0000100001000001, 1 | 1000010000001001, 1 | 1000010000001001, 1 |
| 250 | 0000010010010010, 1 | 0000010010010010, 1 | 1000001000000010, 1 | 1000001000000010, 1 |
| 251 | 0000010001000010, 1 | 0000010001000010, 1 | 1000000100000001, 1 | 1000000100000001, 1 |
| 252 | 0000010010001001, 1 | 0100010000100010, 1 | 0000010010001001, 1 | 0100010000100010, 1 |
| 253 | 0000010000100001, 1 | 0000010000100001, 1 | 0100100010001001, 1 | 0100100010001001, 1 |
| 254 | 0000001001000100, 2 | 0100010000010001, 1 | 1001000000010000, 2 | 0100010000010001, 1 |
| 255 | 0000001000001000, 2 | 0100001000010010, 1 | 1000100100010000, 2 | 0100001000010010, 1 |

Следующим состоянием кодера должно стать состояние  $g(8, 1) = 3$ . Поэтому откликом на следующее входное воздействие «3» (информационный символ с номером  $i = 3$ ) при наличии состояния кодера 3 будет значение функции выхода  $h(3, 3) = 0010000001001000$ . При этом следующим со-

стоянием кодера должно стать состояние  $g(3, 3) = 2$ . В состоянии «2» при наличии входного воздействия «4» (информационный символ с номером  $i = 4$ ) кодер сформирует отклик  $h(4, 2) = 0010000010010000$ , а также определит свое следующее состояние  $g(4, 2) = 2$ . Отметим, что отклики  $h(8, 1)$  и  $h(4, 2)$  совершенно одинаковы и равны  $0010000010010000$ . Также одинаковы и отклики  $h(7, 1)$  и  $h(3, 1)$  ( $0010000001001000$ ), т.е. отклики одной и той же группы, но на разные входные воздействия. Таким образом, налицо некоторая двусмысленность, которую предстоит разрешать при декодировании. В связи с этим здесь следует обратить на то, что после кодирования входного слова «7» кодер переходит в состояние «3», а после кодирования слова «3» - в состояние «2». Очевидно, этот факт и будет служить указателем декодеру на тот символ, который был закодирован.

В общем виде операция декодирования может быть записана следующим образом:

$$b_t = h^{-1}(x_t, s_t),$$

из чего следует, что для правильного декодирования на приемном конце необходимо знать состояние кодера в момент формирования данного кодового слова. В упомянутом выше случае, когда слова «7» и «3» имеют одно и то же кодовое отображение, это делается путем анализа предыдущего кодового символа, который во время кодирования следовал за рассматриваемым. Если предыдущий символ принадлежал ко 2-й группе кодовых слов, то рассматриваемый символ «3», если к 3-й – то это «7». Как говорилось выше, у кодовых слов 2-й группы 1-й и 13-й биты всегда «нули», а у слов 3-й группы – один из этих бит должен быть равным «единице», что легко проверить и, таким образом, декодировать данный символ единственным образом. Другими словами, для декодирования требуется выполнить операцию:

$$b_t = h^{-1}(x_t, x_{t+1,1}, x_{t+1,13}).$$

Как уже говорилось, для кодирования с помощью представленной выше таблицы используются только 256 из 344 16-разрядных кодовых слов, удовлетворяющих условиям ограничения  $d = 2$ ,  $k = 10$ . Оставшиеся 88 слов используются для минимизации энергии сигнала на низких частотах. Для этого из «лишних» 88 слов образована таблица замещения, слова из которой используются в качестве альтернативного канального представления слов источника 0...88. Таким образом, полное описание кодера включает в себя две таблицы – главную (табл. 9.4) и похожую на нее вспомогательную (таблицу замещения) из 88 слов (табл. 9.5 и рис. 9.11).

Подавление низкочастотных компонент, т.е. контроль постоянной составляющей в коде EFM Plus осуществляется теми же методами, что и в обычном коде EFM, а именно – путем контроля текущего значения числовой суммы DSV (Digital Sum Value). Таблицы (главная и таблица замещения) составлены таким образом, что вклад первых 88 символов главной таблицы в текущее значение DSV является преимущественно отрицатель-

ным, а вклад соответствующих символов из таблицы замещения – преимущественно положительный. Для слов источника 0...87 кодер выбирает такой вариант представления из главной таблицы и таблицы замещения, который позволяет минимизировать абсолютную величину DSV.

Таблица 9.5-1

**Вспомогательная таблица кодирования кодом EFM Plus**

| <i>i</i> | Группа 1              | Группа 2              | Группа 3              | Группа 4              |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|          | <i>h(i,1), g(i,1)</i> | <i>h(i,2), g(i,2)</i> | <i>h(i,3), g(i,3)</i> | <i>h(i,4), g(i,4)</i> |
| 0        | 0000010010000000, 4   | 0000010010000000, 4   | 0100100001001000, 2   | 0100100001001000, 2   |
| 1        | 0000100100000000, 4   | 0000100100000000, 4   | 0100100001001000, 3   | 0100100001001000, 3   |
| 2        | 0001001000000000, 4   | 0001001000000000, 4   | 0100100000001001, 1   | 0100100000001001, 1   |
| 3        | 0000001001000000, 4   | 0100010000000001, 1   | 1000001000000000, 4   | 0100010000000001, 1   |
| 4        | 0000000100100000, 3   | 0100100000000010, 1   | 1001000000000100, 3   | 0100100000000010, 1   |
| 5        | 0000000010010000, 3   | 0100001000000000, 4   | 1001000000100100, 3   | 0100001000000000, 4   |
| 6        | 0000000001001000, 3   | 0100100000000100, 2   | 1001000001001000, 3   | 0100100000000100, 2   |
| 7        | 0000000001001000, 2   | 0100000100000000, 4   | 1001000000000100, 2   | 0100000100000000, 4   |
| 8        | 0000000001001000, 2   | 0100100010010000, 3   | 1001000000100100, 2   | 0100100010010000, 3   |
| 9        | 0000000010010000, 2   | 0100100000100100, 2   | 1001000001001000, 2   | 0100100000100100, 2   |
| 10       | 0000010001000000, 4   | 0000010001000000, 4   | 1001001001000000, 4   | 1001001001000000, 4   |
| 11       | 0000100010000000, 4   | 0000100010000000, 4   | 1000100001001000, 3   | 1000100001001000, 3   |
| 12       | 0001000100000000, 4   | 0001000100000000, 4   | 0100010001001000, 3   | 0100010001001000, 3   |
| 13       | 0010001000000000, 4   | 0010001000000000, 4   | 1000100000000100, 3   | 1000100000000100, 3   |
| 14       | 0000001000100000, 3   | 0100100000000100, 3   | 1001000010010000, 3   | 0100100000000100, 3   |
| 15       | 0000000100010000, 3   | 0100100010010000, 2   | 1001000100100000, 3   | 0100100010010000, 2   |
| 16       | 0000000010001000, 3   | 0100001000000001, 1   | 0100100000001000, 3   | 0100001000000001, 1   |
| 17       | 0000000001000100, 3   | 0100010000000010, 1   | 0100100010001000, 3   | 0100010000000010, 1   |
| 18       | 0000000001000100, 2   | 0100100000100100, 3   | 1001000010010000, 2   | 0100100000100100, 3   |
| 19       | 0000000010001000, 2   | 0100100100100000, 3   | 1001000100100000, 2   | 0100100100100000, 3   |
| 20       | 0000000010001000, 2   | 0100100100100000, 2   | 0100010001001000, 2   | 0100100100100000, 2   |
| 21       | 0000001000100000, 2   | 0100100000010010, 1   | 0100100000001000, 2   | 0100100000010010, 1   |
| 22       | 0000010010000001, 1   | 0000010010000001, 1   | 1000100000100100, 3   | 1000100000100100, 3   |
| 23       | 0000100100000001, 1   | 0000100100000001, 1   | 1000100010010000, 3   | 1000100010010000, 3   |
| 24       | 0001001000000001, 1   | 0001001000000001, 1   | 0100100010001000, 2   | 0100100010001000, 2   |
| 25       | 0010010000000001, 1   | 0010010000000001, 1   | 1000100000000100, 2   | 1000100000000100, 2   |
| 26       | 0000000001001001, 1   | 0100010000000100, 3   | 1000010000000001, 1   | 0100010000000100, 3   |
| 27       | 0000000010010001, 1   | 0100000100000001, 1   | 1000100000000010, 1   | 0100000100000001, 1   |
| 28       | 0000000010010000, 1   | 0100010000000100, 2   | 1001000000001001, 1   | 0100010000000100, 2   |
| 29       | 0000001001000001, 1   | 0100001000000010, 1   | 1001000000010010, 1   | 0100001000000010, 1   |
| 30       | 0000100001000000, 4   | 0000100001000000, 4   | 1000100000100100, 2   | 1000100000100100, 2   |
| 31       | 0001000010000000, 4   | 0001000010000000, 4   | 1000100001001000, 2   | 1000100001001000, 2   |

Таблица 9.5-2

## Вспомогательная таблица кодирования кодом EFM Plus

| <i>i</i> | Группа 1            | Группа 2            | Группа 3            | Группа 4            |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|          | $h(i,1), g(i,1)$    | $h(i,2), g(i,2)$    | $h(i,3), g(i,3)$    | $h(i,4), g(i,4)$    |
| 32       | 0010000100000000, 4 | 0010000100000000, 4 | 0100010000001001, 1 | 0100010000001001, 1 |
| 33       | 0000010000100000, 3 | 0000010000100000, 3 | 0100100001001001, 1 | 0100100001001001, 1 |
| 34       | 0000001000010000, 3 | 0100010000010010, 1 | 1000100100100000, 3 | 0100010000010010, 1 |
| 35       | 0000000100001000, 3 | 0100100000010001, 1 | 1001000000001000, 3 | 0100100000010001, 1 |
| 36       | 0000000010000100, 3 | 0100000010000000, 4 | 1001000001000100, 3 | 0100000010000000, 4 |
| 37       | 0000010000100000, 2 | 0000010000100000, 2 | 1000001000000001, 1 | 1000001000000001, 1 |
| 38       | 0000000010000100, 2 | 0100010000100100, 3 | 1000100010010000, 2 | 0100010000100100, 3 |
| 39       | 0000000100001000, 2 | 0100010000100100, 2 | 1000100100100000, 2 | 0100010000100100, 2 |
| 40       | 0000001000010000, 2 | 0100100000100010, 1 | 1001000000001000, 2 | 0100100000100010, 1 |
| 41       | 0000010001000001, 1 | 0000010001000001, 1 | 1000010000000010, 1 | 1000010000000010, 1 |
| 42       | 0000010010000010, 1 | 0000010010000010, 1 | 1000000100000000, 4 | 1000000100000000, 4 |
| 43       | 0000100010000001, 1 | 0000100010000001, 1 | 1001000001000100, 2 | 1001000001000100, 2 |
| 44       | 0000100100000010, 1 | 0000100100000010, 1 | 1000100000001001, 1 | 1000100000001001, 1 |
| 45       | 0001000100000001, 1 | 0001000100000001, 1 | 1001000010001000, 3 | 1001000010001000, 3 |
| 46       | 0001001000000010, 1 | 0001001000000010, 1 | 1001000100010000, 3 | 1001000100010000, 3 |
| 47       | 0010001000000001, 1 | 0010001000000001, 1 | 1000100000010010, 1 | 1000100000010010, 1 |
| 48       | 0010010000000010, 1 | 0010010000000010, 1 | 0100010000001000, 3 | 0100010000001000, 3 |
| 49       | 0000000001000010, 1 | 0100100010010001, 1 | 1001000000010001, 1 | 0100100010010001, 1 |
| 50       | 0000000010001001, 1 | 0100100001000100, 3 | 1001000000100010, 1 | 0100100001000100, 3 |
| 51       | 0000000010010010, 1 | 0100010010010000, 3 | 1001000001001001, 1 | 0100010010010000, 3 |
| 52       | 0000000100010001, 1 | 0100010010010000, 2 | 1001000010010001, 1 | 0100010010010000, 2 |
| 53       | 0000000100100010, 1 | 0100100001000100, 2 | 1001000100100001, 1 | 0100100001000100, 2 |
| 54       | 0000001000100001, 1 | 0100100100100001, 1 | 1001001001000001, 1 | 0100100100100001, 1 |
| 55       | 0000001001000010, 1 | 0100100100010000, 3 | 0100001000001001, 1 | 0100100100010000, 3 |
| 56       | 0001000001000000, 4 | 0001000001000000, 4 | 1001001000100000, 3 | 1001001000100000, 3 |
| 57       | 0010000010000000, 4 | 0010000010000000, 4 | 1001000010001000, 2 | 1001000010001000, 2 |
| 58       | 0010010010010000, 3 | 0010010010010000, 3 | 1001000100010000, 2 | 1001000100010000, 2 |
| 59       | 0010010001001000, 3 | 0100100100010000, 2 | 0010010001001000, 3 | 0100100100010000, 2 |
| 60       | 0010010000100100, 3 | 0010010000100100, 3 | 1001001000100000, 2 | 1001001000100000, 2 |
| 61       | 0010010000000100, 3 | 0010010000000100, 3 | 0100001001001000, 2 | 0100001001001000, 2 |
| 62       | 0001001001001000, 3 | 0100000010000001, 1 | 0001001001001000, 3 | 0100000010000001, 1 |
| 63       | 0001001000100100, 3 | 0001001000100100, 3 | 0100001001001000, 3 | 0100001001001000, 3 |

Таблица 9.5-3

## Вспомогательная таблица кодирования кодом EFM Plus

| <i>i</i> | Группа 1             | Группа 2             | Группа 3             | Группа 4             |
|----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|          | $h(i,1), g(i,1)$     | $h(i,2), g(i,2)$     | $h(i,3), g(i,3)$     | $h(i,4), g(i,4)$     |
| 64       | 0001001000000100, 3  | 0001001000000100, 3  | 0100010010001000, 3  | 0100010010001000, 3  |
| 65       | 0000100100100100, 3  | 0000100100100100, 3  | 0100100100001000, 3  | 0100100100001000, 3  |
| 66       | 00001001000000100, 3 | 00001001000000100, 3 | 10000100000000100, 3 | 10000100000000100, 3 |
| 67       | 0000100000100000, 3  | 0000100000100000, 3  | 1000010000100100, 3  | 1000010000100100, 3  |
| 68       | 0000010010000100, 3  | 0000010010000100, 3  | 1000010001001000, 3  | 1000010001001000, 3  |
| 69       | 0000010000010000, 3  | 0000010000010000, 3  | 1000010010010000, 3  | 1000010010010000, 3  |
| 70       | 0000001001000100, 3  | 01000010000000100, 2 | 1000100000001000, 3  | 01000010000000100, 2 |
| 71       | 0000001000001000, 3  | 0100100000010000, 3  | 1000100010001000, 3  | 0100100000010000, 3  |
| 72       | 0000000100100100, 3  | 0100010001000100, 3  | 1000100100010000, 3  | 0100010001000100, 3  |
| 73       | 0000000100000100, 3  | 0100001000100100, 3  | 1001000000010000, 3  | 0100001000100100, 3  |
| 74       | 0000010000010000, 2  | 0000010000010000, 2  | 1000100001000100, 3  | 1000100001000100, 3  |
| 75       | 0001001001001000, 2  | 01000010000000100, 3 | 0001001001001000, 2  | 01000010000000100, 3 |
| 76       | 0000010010000100, 2  | 0000010010000100, 2  | 0100010000001000, 2  | 0100010000001000, 2  |
| 77       | 0000100000100000, 2  | 0000100000100000, 2  | 0100010010001000, 2  | 0100010010001000, 2  |
| 78       | 0010010001001000, 2  | 0100000100000010, 1  | 0010010001001000, 2  | 0100000100000010, 1  |
| 79       | 0000100100000100, 2  | 0000100100000100, 2  | 0100100100001000, 2  | 0100100100001000, 2  |
| 80       | 0000100100100100, 2  | 0000100100100100, 2  | 10000100000000100, 2 | 10000100000000100, 2 |
| 81       | 00010010000000100, 2 | 00010010000000100, 2 | 1000010000100100, 2  | 1000010000100100, 2  |
| 82       | 0001001000100100, 2  | 0001001000100100, 2  | 1000010001001000, 2  | 1000010001001000, 2  |
| 83       | 00100100000000100, 2 | 00100100000000100, 2 | 1000010010010000, 2  | 1000010010010000, 2  |
| 84       | 0010010000100100, 2  | 0010010000100100, 2  | 1000100000001000, 2  | 1000100000001000, 2  |
| 85       | 0010010010010000, 2  | 0010010010010000, 2  | 0100010001001001, 1  | 0100010001001001, 1  |
| 86       | 00000001000000100, 2 | 0100001000100100, 2  | 1000100001000100, 2  | 0100001000100100, 2  |
| 87       | 0000000100100100, 2  | 0100010001000100, 2  | 1000100010001000, 2  | 0100001000100100, 2  |

Следует отметить, что для принятия решения здесь необходимо выполнить не более двух вычислений и сравнений для каждого кодового слова, в то время как в обычном коде EFM для этого должны быть выполнены не более четырех вычислений и сравнений (существует не более четырех возможных вариантов формирования соединительных разрядов). То обстоятельство, что только к 88 из 256 слов источника может быть применена технология контроля DSV, делает систему чувствительной к «наихудшему случаю» на выходе. Однако это не так опасно, как может показаться, поскольку аналогичные трудности могут возникать и при кодировании кодом EFM, который, тем не менее, работает вполне удовлетворительно. Компьютерное моделирование показало, что уровень низкочастотных компонент у кода EFM Plus примерно на 3 дБ выше, чем у кода EFM.



Рис. 9.11. Структура таблиц кодера EFM Plus

После замены исходных байт на 16-разрядные канальные символы, полученная последовательность, так же как и в коде EFM, должна быть перед записью на диск преобразована из формы NRZ в форму NRZI.

### 9.2.6. ФИЗИЧЕСКИЙ СЕКТОР

Структура физического сектора показана на рис. 9.12. Он состоит из 16 строк, каждая из которых включает в себя два так называемых *синхрокадра (Sync Frame)*. Каждый синхрокадр состоит из 1456 канальных бит, полученных в результате преобразования байт половины одной строки кадра записи (рис. 9.9), и одной из 32-разрядных синхрогрупп SY0-SY7, конфигурации которых представлены в табл. 9.6. Одна строка кадра записи содержит 182 байта, значит, половина строки – это 91 байт. После преобразования 91 8-разрядного байта в 16-разрядные символы кода EFM Plus получается как раз 1456 канальных бит ( $91 \times 16 = 1456$ ). Всего в синхрокадре, таким образом, будет  $1456 + 32 = 1488$  канальных бит. Первая строка физического сектора получается из первой строки кадра записи, вторая строка физического сектора – из второй строки кадра записи и т.д.

Запись начинается с первого синхрокадра первой строки физического сектора, после него следует второй синхрокадр первой строки того же физического сектора и так далее строка за строкой.

Для того чтобы минимизировать содержание низкочастотных составляющих в сигнале записи, при формировании физических секторов - также как и в процессе кодирования данных, используется технология контроля значения DSV (Digital Sum Value) (см. раздел 5.3). Для этого кодер EFM Plus формирует две последовательности – одну с использованием первичной синхрогруппы (левая колонка табл. 9.6), другую – с использованием вторичной синхрогруппы (правая колонка табл. 9.6).



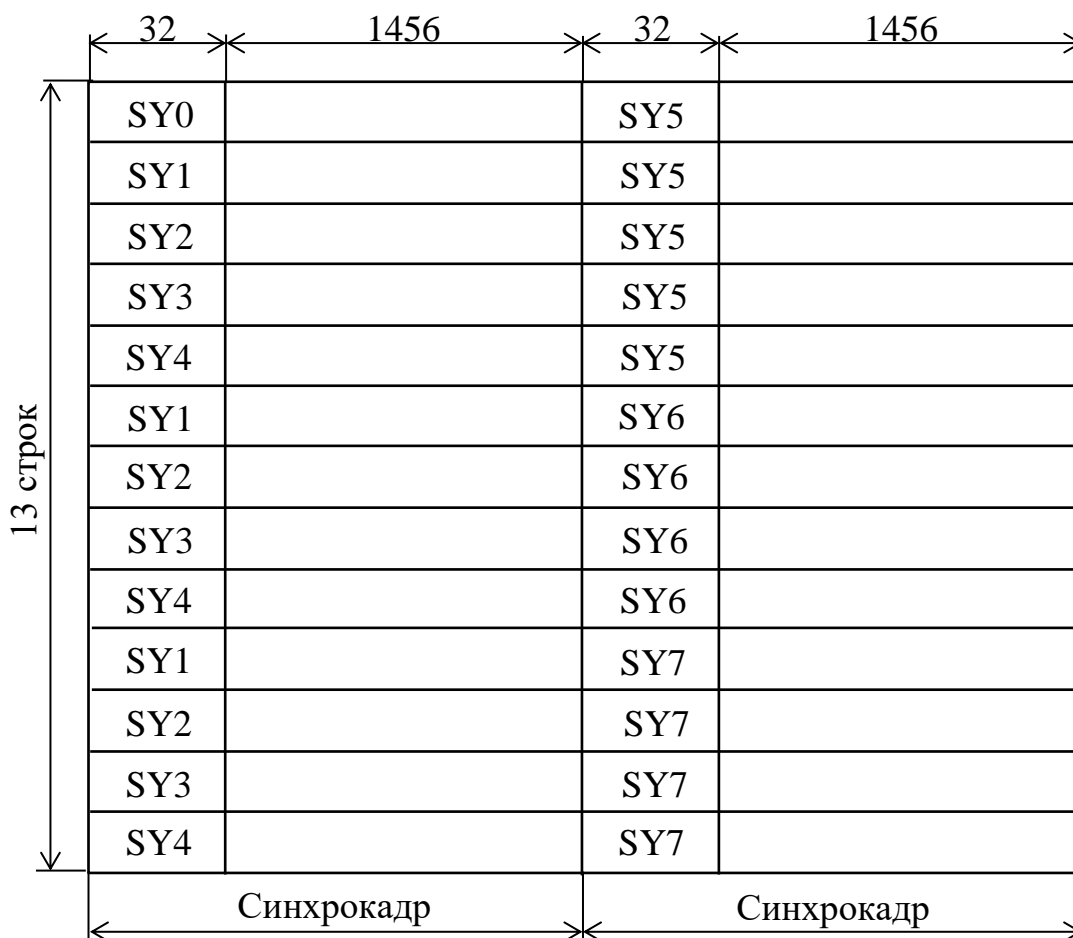


Рис. 9.12. Физический сектор

Таблица 9.6

**Синхрогруппы**

| Для состояния 1 и состояния 2          |  |
|--|--|
| <i>Первичная синхрогруппа</i>          | <i>Вторичная синхрогруппа</i>          |
| SY0 = 0001001001000100 000000000010001 | SY0 = 0001001000000100 000000000010001 |
| SY1 = 0000010000000100 000000000010001 | SY1 = 0000010001000100 000000000010001 |
| SY2 = 0001000000000100 000000000010001 | SY2 = 0001000001000100 000000000010001 |
| SY3 = 0000100000000100 000000000010001 | SY3 = 0000100001000100 000000000010001 |
| SY4 = 0010000000000100 000000000010001 | SY4 = 0010000001000100 000000000010001 |
| SY5 = 0010001001000100 000000000010001 | SY5 = 0010001000000100 000000000010001 |
| SY6 = 0010010010000100 000000000010001 | SY6 = 0010000010000100 000000000010001 |
| SY7 = 0010010001000100 000000000010001 | SY7 = 0010010000000100 000000000010001 |
| Для состояния 3 и состояния 4          |  |
| <i>Первичная синхрогруппа</i>          | <i>Вторичная синхрогруппа</i>          |
| SY0 = 1001001000000100 000000000010001 | SY0 = 1001001001000100 000000000010001 |
| SY1 = 1000010001000100 000000000010001 | SY1 = 1000010000000100 000000000010001 |
| SY2 = 1001000001000100 000000000010001 | SY2 = 1001000000000100 000000000010001 |
| SY3 = 1000001001000100 000000000010001 | SY3 = 1000001000000100 000000000010001 |
| SY4 = 1000100001000100 000000000010001 | SY4 = 1000100000000100 000000000010001 |
| SY5 = 1000100100000100 000000000010001 | SY5 = 1000000100000100 000000000010001 |
| SY6 = 1001000010000100 000000000010001 | SY6 = 1000000010000100 000000000010001 |
| SY7 = 1000100010000100 000000000010001 | SY7 = 1000000010000100 000000000010001 |

Перед началом процедуры модуляции исходное значение DSV устанавливается в 0. В конце каждого синхрокадра значения DSV двух последовательностей, полученных при использовании первичной и вторичной синхрогрупп, сравниваются по абсолютной величине. Последовательность с меньшим значением DSV используется, а последовательность с большим значением - игнорируется. В случае равенства обоих значений, здесь так же, как и при кодировании основных данных, принимается во внимание возможность замены символов основной таблицы (табл. 9.4) на символы таблицы замещения (табл. 9.5) [157].

### 9.3. DVD-VIDEO

Диск DVD-Video, как следует из его названия, является носителем видеопрограмм. Программы, записанные на нем, имеют качество, приближенное к вещательному. Кроме того, благодаря большому объему содержащейся на диске служебной информации, проигрыватели DVD-Video обеспечивают пользователю множество разнообразных сервисных возможностей.

Видеоинформация, в том числе субтитры и прочие графические элементы изображения, записываются на диск, как правило, с использованием технологии сжатия данных по стандарту MPEG2. Такая технология предполагает неравномерность скорости потока информации, считываемой с диска. В процессе воспроизведения скорость потока зависит от динамики видеосюжета – если в кадре много движения, то скорость потока увеличивается, если картинка статична или в ней мало движения, то снижается. Средняя скорость общего потока данных (видео, звук, субтитры и пр.) – 4,69 Мбит/с. Максимальная же может достигать 9,8 Мбит/с. Разрешение видеоизображения при таком способе сжатия получается 720 пикселей на 480 строк, а продолжительность фильма, который можно записать на один информационный слой диска – до 135 минут.

Кроме того, видеоизображение может быть записано со сжатием по стандарту MPEG1, который предполагает фиксированную скорость кодирования потока данных. Картинка при этом получается менее качественной, с разрешением всего 352 пикселя на 240 строк.

Одной из экзотических особенностей DVD является то, что при наличии соответствующего материала на диске пользователь может рассматривать происходящее на экране телевизора в нескольких различных ракурсах, свободно переходя от одного к другому по своему усмотрению. Для этого ему достаточно нажимать кнопку «Изменение угла зрения» на пульте дистанционного управления проигрывателем. Такая возможность обеспечивается за счет того, что фильмы для записи на DVD могут быть сняты несколькими камерами, видеопотоки от которых мультиплексируются и записываются на диск. Число камер может быть от одной до девяти. Здесь

всё зависит как от замысла режиссера, так и от продолжительности фильма. Если фильм длинный и его продолжительность приближается к максимальной (135 минут), то суммарная скорость потока данных, который получается при совмещении нескольких видеопотоков и потока звуковых данных, может оказаться настолько большой, что превысит возможности системы DVD. Тогда количество ракурсов придется ограничить. Если же фильм достаточно короткий, то число ракурсов определяется только возможностями съемки и замыслом режиссера. Следует отметить, что при одновременной записи видеопотоков от большого количества камер, максимальную скорость данных внутри каждого из них приходится ограничивать, и качество изображения получается несколько хуже. Тем не менее, оно все еще остается достаточно высоким.

Еще одной особенностью DVD является то, что фильмы здесь можно смотреть в нескольких вариантах формата – в том числе в стандартном формате с соотношением сторон 4:3 и широкоэкранным – 16:9. Однако записывается на диск только один вариант – стандартный 4:3. Но декодер MPEG2 может трансформировать изображение в широкоэкранный.

Очень примечательно звуковое сопровождение фильмов на DVD-Video. Оно может быть в четырех вариантах.

Первый соответствует стандарту CD-Audio, а если уж быть точным, то стандарту R-DAT – 16 бит/48 кГц. Компрессия здесь не используется. С точки зрения качества – это самый лучший вариант. Записанный таким способом звук может быть перекодирован в объемный по системе Dolby Surround.

Второй вариант – многоканальный звук по системе Dolby Digital (AC-3). Этот вариант обеспечивает шесть звуковых каналов – пять основных (передние – правый, центральный и левый; тыловые – правый и левый) с полосой частот 3...20000 Гц и один дополнительный – низкочастотный с полосой частот 3...120 Гц. Такая система известна как 5.1-канальная. Разрешение здесь может быть от 16 до 24 разрядов при частоте дискретизации 48 кГц, но со сжатием. Поскольку воспроизведение такого звука предполагает наличие соответствующего усилителя и акустических систем, то при их отсутствии предусмотрено преобразование звукового сопровождения либо в моно, либо в двухканальное стерео.

Третий вариант – с использованием компрессии по стандарту MPEG1 Audio либо по стандарту MPEG2 Audio. Такой вариант звукового сопровождения чаще всего используется в Европе.

И, наконец, четвертый вариант – это тоже шестиканальный (5.1-канальный) цифровой объемный звук мастер-класса в стандарте DTS (Digital Theatre Systems). Этот вариант – самый лучший с точки зрения эмоционального восприятия.

Что же касается речевого сопровождения, то оно может быть записано на восьми языках (хотя может быть и меньше). Пользователь может выбрать любой из них по своему усмотрению.

Кроме того, изображение может сопровождаться субтитрами на 32-х языках мира, в том числе самых экзотических. Пользователь также может выбрать один из них или убрать субтитры с экрана. Для этого на пульте ДУ предусмотрены кнопки «Субтитры. Вкл./Выкл.» и «Изменение субтитров». Однако, количество каналов речевого сопровождения, так же как и каналов с субтитрами, зависит только от желания создателей фильма и их может быть гораздо меньше и даже может не быть совсем.

Еще одной новинкой, использованной в системе DVD-Video, является так называемый «родительский код». Этот код не позволяет детям до определенного возраста просматривать содержимое некоторых дисков или определенных фрагментов на них. Возможность введения «родительского кода» закладывается еще на стадии изготовления диска. Если кодируются фрагменты фильма, то предусматриваются их варианты с более «мягким» содержанием. Родители имеют возможность подтвердить запрет введением своего кода в проигрыватель. После того как подтверждающий код введен, просмотреть запрещенный можно только после введения соответствующего пароля, который могут знать только те, кому его сообщили. В противном случае будет воспроизводиться другой вариант фрагмента, на который запрет не распространяется. Такого рода кодирование нашло своих сторонников в основном в США. В Европе же особым успехом не пользуется.

Обеспечив пользователя широким набором сервисных возможностей, разработчики и производители DVD-продукции вместе с тем создали для него еще и ряд серьезных ограничений. К числу таких ограничений относятся региональное кодирование и системы защиты от копирования.

Как было заявлено с самого начала, целью введения регионального кодирования является защита рынков сбыта видеопродукции путем ограничения импорта. Для этого диски DVD и DVD-проигрыватели снабжаются региональным кодом, который позволяет считывать содержимое дисков только аппаратами своего региона. Весь мир поделен на шесть географических зон, каждой из которых присвоен свой код:

- 1 – США и Канада;
- 2 – Япония, Западная Европа, ЮАР, Турция и Средний Восток;
- 3 – Юго-Восточная Азия;
- 4 – Австралия, Новая Зеландия, Океания и Латинская Америка;
- 5 – Россия, страны СНГ, Африка, Центральная Азия и Северная Корея;
- 6 – Китай.

Идея введения регионального кода принадлежит Голливуду и направлена, судя по всему, в первую очередь на защиту своей собственной про-

дукции. Опыт уже первых нескольких лет существования DVD показал, что, как и ожидалось с самого начала, такая идея, ничего, кроме массы неудобств, пользователю не принесла. Зато производители видеофильмов сполна воспользовались ею в своих интересах, устанавливая цены с большой разницей на одну и ту же продукцию в разных регионах. В Европе и в Японии региональное кодирование успешно не используется, поэтому производимые там диски не всегда имеют региональный код, а конструкция проигрывателей DVD позволяет потребителю тем или иным способом обойти это неудобство.

Однако самым главным неудобством для потребителя были разнообразные системы запрета копирования, с помощью которых производители дисков пытались охранять свои права, препятствуя размножению видеопрограмм путем их перезаписи. К счастью, все эти системы себя не оправдали, поскольку грамотный потребитель быстро научился их взламывать. Поэтому они и не прижились.

На рис. 9.13 представлена структурная схема проигрывателя DVD-Video.

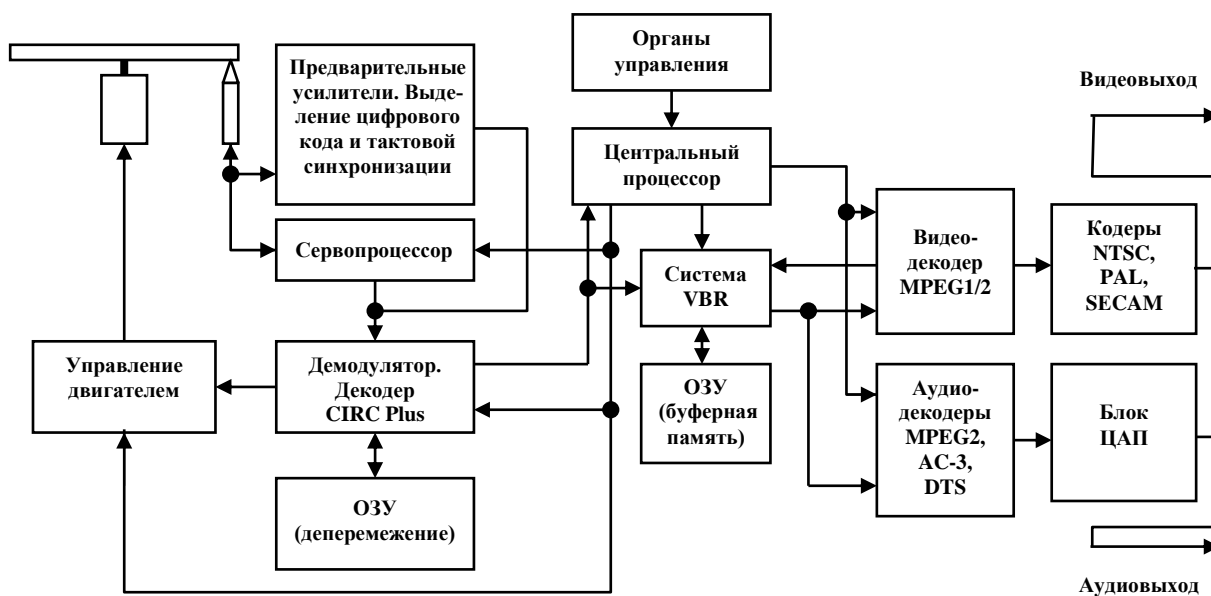


Рис. 9.13. Структурная схема проигрывателя DVD-Video

Работает данная схема следующим образом.

Сигнал, считанный с диска оптической головкой, поступает на блок предварительных усилителей, после чего из него формируется цифровой код и выделяются импульсы тактовой синхронизации. Кроме того, сигнал с оптической головки поступает на сервопроцессор, который выделяет и обрабатывает возникающие при воспроизведении диска ошибки фокусировки и автотрекинга.

Информационный сигнал и тактовые импульсы поступают на демодулятор и блок защиты от ошибок (декодер CIRC Plus). В качестве модулирующего кода в DVD используется канальный код 8-16 (EFM Plus), который ставит в соответствие каждому байту информации 16-разрядную канальную группу. Соединительные разряды здесь, в отличие от простого EFM-кода, не используются, поскольку устранение постоянной составляющей и соблюдение ограничений на минимальный и максимальный интервалы обеспечивается другими способами – путем выбора одной из нескольких возможных 16-разрядных комбинаций.

После демодуляции (обратного преобразования 16-разрядных групп в исходные байты информационного потока) из него выделяются служебные данные и направляются в центральный процессор, управляющий работой всех систем проигрывателя. А видео- и аудиоданные обрабатываются декодером CIRC Plus, который осуществляет депережевание и коррекцию обнаруженных ошибок. Здесь же происходит выделение сигнала управления двигателем, вращающим диск, и сигналов блочной, кадровой и прочих видов синхронизации.

После этого информационные данные поступают на систему VBR (Variation Bit Rate), которая управляет потоком данных для видеodeкодера MPEG2. Поскольку его работа предполагает неравномерную скорость этого потока, зависящую от динамики видеосюжета, то система VBR выполняет роль буфера, накапливающая в ОЗУ данные, считываемые с диска, и передающего их декодеру MPEG2 в ответ на его запрос.

Видеodeкодер, кроме того, может работать с данными, компрессированными по технологии MPEG1, которая предполагает постоянную скорость потока данных.

После декомпрессии видеoinформация преобразуется в тот или иной телевизионный формат (NTSC, PAL, SECAM) и поступает на выход проигрывателя (вход телевизора).

Звуковая информация поступает на блок аудиodeкодеров (MPEG2, AC-3, DTS), где, в зависимости от способа ее представления на диске, технических возможностей проигрывателя и желания пользователя, происходит ее декодирование или перекодирование. Полученная в результате последовательность отсчетов либо преобразуется в аналоговую форму с помощью внутренних ЦАП, либо поступает на выход в цифровой форме для преобразования во внешнем декодере.

Работой всех систем проигрывателя управляет центральный процессор, который, в свою очередь, управляется пользователем либо с пульта дистанционного управления (ДУ), либо с помощью органов управления на передней панели проигрывателя. У DVD-дисководов роль органов управления выполняет соответствующий драйвер компьютера.

**Система VBR (Variation Bit Rate)**, которая является непременным атрибутом схем, вынужденных работать с переменной скоростью потока данных, заслуживает особого внимания.

Для выполнения компрессии видеоданных по стандарту MPEG2, последовательность видеок кадров разбивается на группы, которые обозначаются аббревиатурой **GOP (Groupe of Pictures)**, и включают в себя кадры (или макроблоки) трех типов:

- **I-кадр (Intra frame)** – начальный (ключевой, опорный) кадр группы, который содержит полную не компрессированную (или независимо сжатую) информацию о всех деталях изображения;

- **P-кадр (Predictive frame)** – вычисляемый кадр, который содержит информацию только об изменениях в сравнении с предыдущими I- и P-кадрами. Это кадр с наибольшей степенью компрессии, который служит для восстановления B-кадра;

- **B-кадр (Bi-directional frame)** – кадр, использующий для своего восстановления при воспроизведении информацию, как о предыдущем, так и о последующем кадрах.

Группа кадров, как правило, состоит из 15 кадров и имеет вид: I-B-B-P-B-B-P-B-B-P-B-B-I. Последний I-кадр начинает новую группу. Наиболее полную информацию содержит I-кадр. B- и P-кадры получаются в предположении, что различие между двумя соседними I-кадрами не очень значительно, и содержат информацию только о тех пикселях изображения, которые претерпели изменения, т.е. кадры B и P описывают изменения изображения между соседними I-кадрами. На практике встречаются достаточно динамичные сюжеты, которые приходится кодировать более короткими группами во избежание резкого снижения качества изображения. Кроме того, при каждом монтажном стыке приходится добавлять I-кадр, поскольку на стыке изображение полностью изменяется.

Количество бит данных, которые включаются в каждую GOP, зависит от сложности изображения. Сложными считаются изображения, содержащие много мелких деталей, шумов и быстрые изменения содержания. Таким образом, степень сжатия, позволяющая передать изображения с минимально возможной потерей качества, для каждой GOP изменяется в зависимости от сложности изображения. И на диск записываются только действительно значимые данные (рис. 9.14). При воспроизведении данные каждой GOP восстанавливаются с соответствующим интервалом, как и показано на рис. 9.14, и декомпрессируются в видеоизображение в реальном масштабе времени [160, 161].

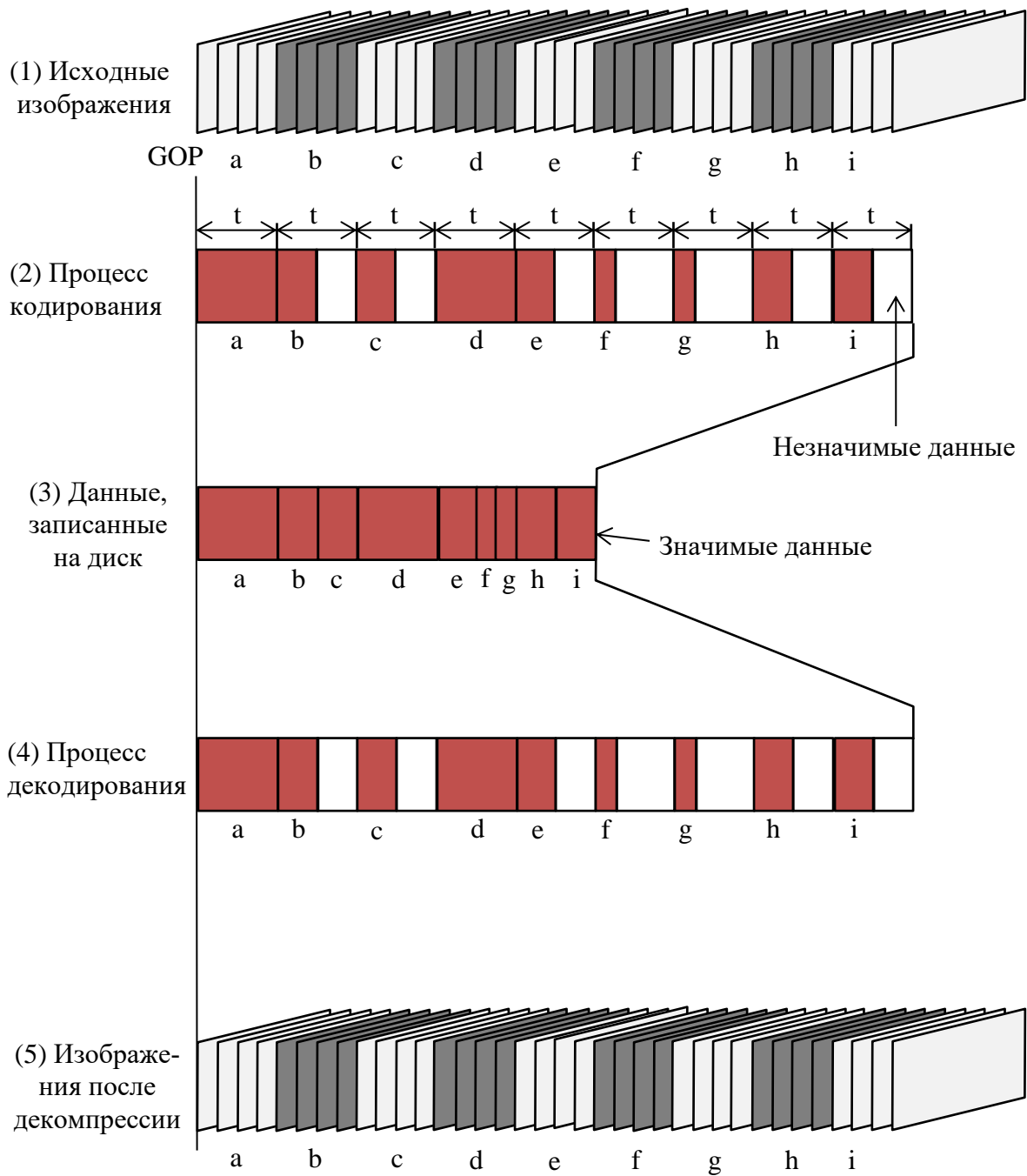


Рис. 9.14. Принципы работы системы VBR

На рис. 9.15 показана разница в процессах кодирования с постоянной скоростью бит в потоке данных и переменной скоростью. Случай (1) – это постоянная скорость бит максимальной величины. Здесь для кодирования видеоизображения используется максимальная скорость бит  $b_2$  (бит/с). Количество данных, записанных на диск, можно выразить величиной, равной  $b_2 \times t_1$  (бит). Если объем данных, которые можно записать на диск, ограничен этой величиной, то качество изображения будет максимально высоким, но время записи будет ограничено величиной  $t_1$ .



В случае (2) для кодирования видеоизображения используется постоянная скорость средней величины  $b_1$  (бит/с). Количество данных, записанных на диск, выразится здесь величиной  $b_1 \times t_2$  (бит), которая должна быть равна, как и в случае (1) величине  $b_2 \times t_1$  (бит). В этом случае время записи увеличится, но качество сложных изображений значительно ухудшится.

Случай (3) иллюстрирует переменную скорость бит. Поскольку высокая скорость бит соответствует сложному изображению, а низкая скорость бит – простому изображению, то можно добиться времени воспроизведения  $t_2$  со скоростью бит до  $b_2$ . Таким образом, достигается продолжительное время воспроизведения без ухудшения качества изображения.

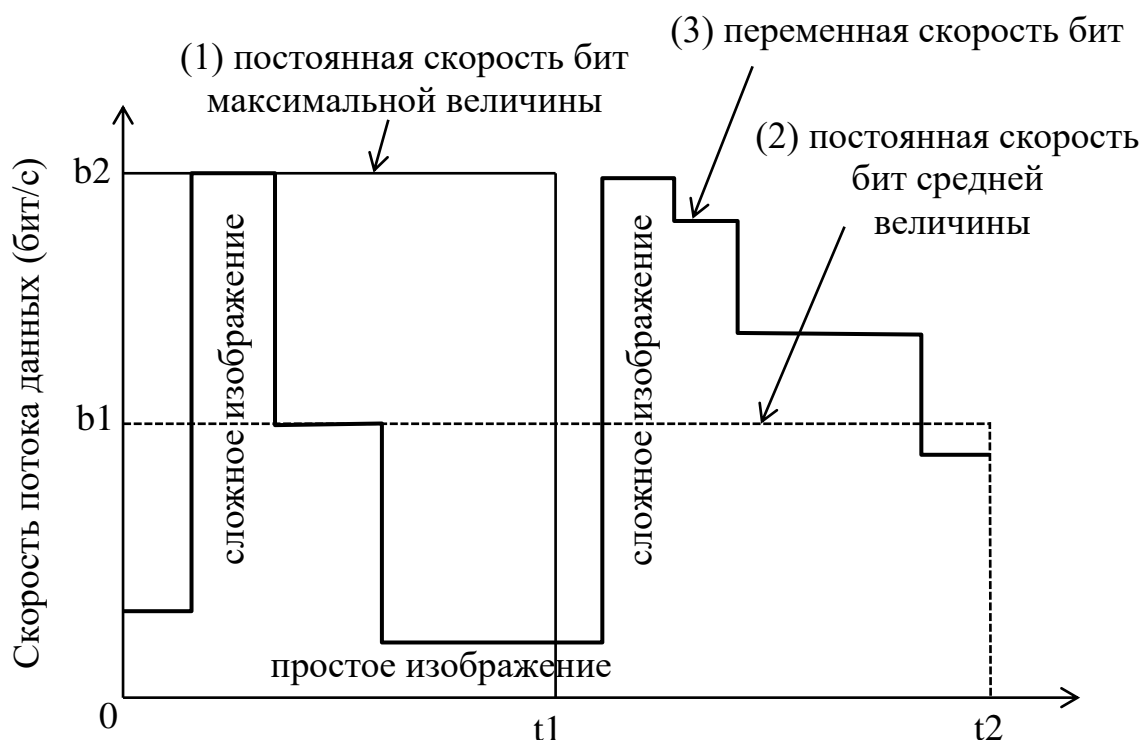


Рис. 9.15. Сравнение кодирования с постоянными скоростями бит и с переменной скоростью бит

На рис. 9.16 показана блок-схема системы VBR. Основными элементами ее являются память, генератор адреса записи, генератор адреса считывания и компаратор адреса. Память используется для того, чтобы восстановить ту скорость бит, которая была при кодировании изображения. Генератор адреса считывания формирует адреса считывания из памяти в соответствии с командами запроса данных от декодера MPEG2. Компаратор адреса формирует команду паузы для цепи управления оптической головкой, чтобы временно прервать процесс воспроизведения.

На рис. 9.17 показан метод управления оптической головкой, системой VBR и декодером MPEG2. Основные операции здесь состоят в следующем:

- данные передаются из памяти системы VBR к декодеру MPEG2 исходя из двух критериев – переполнение памяти системы VBR и команды запроса от декодера MPEG2;

- команда «пауза» подается от системы VBR к цепи управления оптической головкой при наличии переполнения памяти системы VBR.

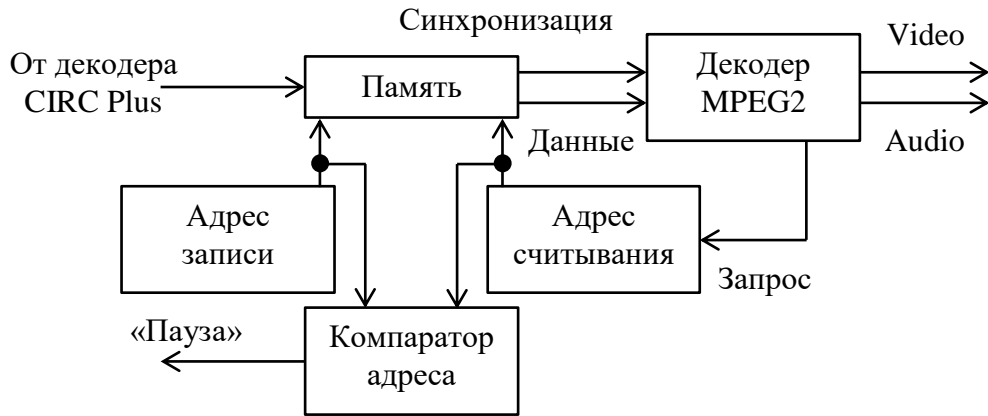


Рис. 9.16. Блок-схема системы VBR

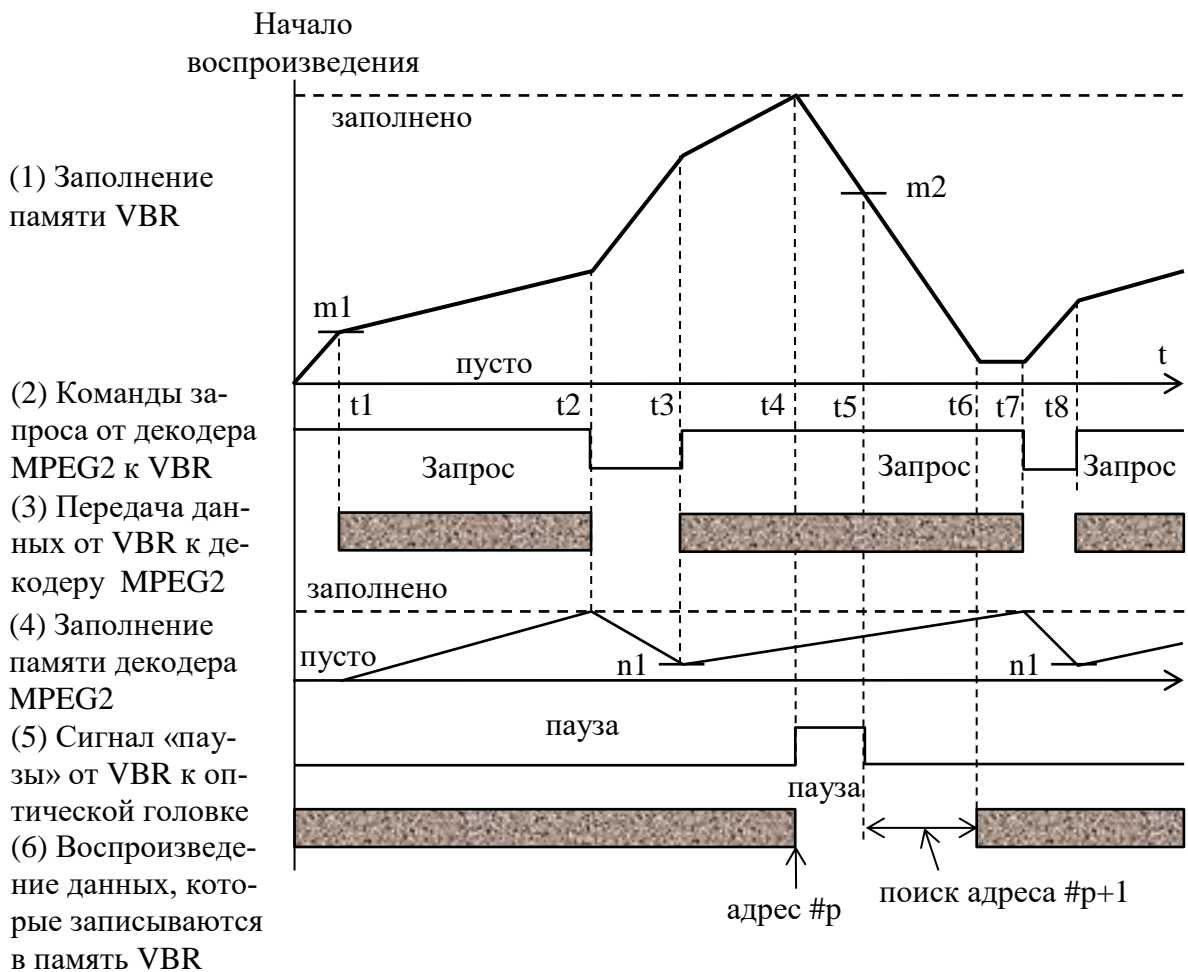


Рис. 9.17. Принципы взаимодействия системы VBR, декодера MPEG2 и оптической головки

Диаграмма (1) иллюстрирует процесс заполнения памяти системы VBR, диаграмма (2) – обстоятельства появления команды «запрос» для системы VBR от декодера MPEG2, а диаграмма (3) – порядок передачи данных от системы VBR к декодеру MPEG2. Система VBR начинает извлекать данные из памяти, когда их объем достигает значения  $m_1$  в момент времени  $t_1$ .

Диаграмма (4) иллюстрирует процесс заполнения памяти декодера MPEG2. Поскольку данные от системы VBR подаются на декодер MPEG2 с максимальной скоростью бит, то память декодера MPEG2 полностью заполняется к моменту времени  $t_2$ . После этого декодер MPEG2 переводит команду «запрос» в «0». Таким образом, объем данных в памяти декодера MPEG2 начинает уменьшаться. Когда остаток данных в момент времени  $t_3$  достигает значения  $n_1$ , декодер MPEG2 снова формирует команду «запрос» в виде логической «1». Когда компаратор адреса в момент времени  $t_4$  обнаруживает, что память системы VBR заполнилась, система VBR формирует команду «пауза» для схемы управления оптической головкой и на время прерывает запись данных к себе в память. Таким образом, объем данных в памяти системы VBR начинает уменьшаться. Когда остаток данных становится равным величине  $m_2$  в момент времени  $t_5$ , система VBR снова отменяет команду «пауза», формируя «0». Генератор адреса записи в это время ищет последний адрес  $\#p$  и возобновляет запись данных в память системы VBR, начиная с адреса  $\#p+1$ .

Когда на схему управления оптической головкой поступает команда «пауза», световое пятно перемещается на соседнюю дорожку в направлении к центру диска, т.е. на предыдущую дорожку. Такой режим действует до тех пор, пока не будет отменена команда «пауза». Когда команда «пауза» отменена, возобновляется считывание данных с диска в нормальном режиме.

К настоящему времени выпущено огромное количество моделей DVD-проигрывателей – как стационарных, так и переносных, отличающихся друг от друга объемом сервисных функций, способностью декодировать многоканальный звук, количеством оптических головок (1 или 2), совместимостью с другими разновидностями дисков DVD и CD, качеством воспроизводимого изображения и звука и прочими особенностями.

Что касается совместимости с другими носителями, то здесь неукоснительно выполняется только одно условие – все DVD-проигрыватели способны воспроизводить диски CD-Audio и CD-Video. По отношению к CD-R, CD-RW, а также к DVD-R и DVD-RW такого требования нет, поэтому проигрыватели DVD их могут и не воспроизводить или воспроизводить без гарантии качества. Причем последнее относится только к проигрывателям с двумя головками, одна из которых укомплектована лазером с длиной волны излучения 635/650 нм, другая – с длиной волны излучения 780 нм (как у проигрывателей CD). Как говорилось в главе 7, записывае-

мые диски имеют цветную отражающую поверхность, и свет красного лазера DVD-проигрывателя ею частично поглощается.

## 9.4. DVD-AUDIO

Требования к звуковой версии DVD в общих чертах были сформулированы еще в середине июня 1998 года, однако массовое производство дисков и проигрывателей долгое время сдерживалось из-за неясности ситуации с защитой от копирования [162-163].

Основным требованием, обеспечивающим сверхвысокое качество звуковых программ, записанных на DVD-Audio, является использование линейного кодирования материала (без компрессии) со следующими характеристиками:

Частота дискретизации, кГц.....44,1; 88,2; 176,4 и 48; 96; 192

Разрядность квантования, бит.....16, 20, 24

Число независимых каналов.....от 1 до 6 (5.1)

Таким образом, даже наихудший из всех возможных вариантов должен обладать качественными показателями, аналогичными CD-Audio (16 бит/44,1 кГц). Следовало бы предположить, что наилучшим будет шестиканальный звук (5.1-канальный) с параметрами кодирования в каждом из каналов 24 бита/196 кГц. Однако этот вариант, к сожалению, невозможен, поскольку скорость потока данных, которая потребовалась бы для считывания такого объема информации в реальном масштабе времени должна приближаться к значению 27,6 Мбит/с. Максимальная же величина этого параметра у DVD – 9,8 Мбит/с. Поэтому звук с параметрами 24 бит/192 кГц (а также 24 бит/178,4 кГц) возможен только в двух- или одноканальном вариантех (стерео или моно).

С учетом этого обстоятельства, стандартом предусмотрены различные комбинированные варианты с разным разрешением в разных каналах при шестиканальной записи. Наивысший приоритет в таких вариантах отдается правому и левому фронтальным каналам, за ними могут следовать либо центральный, либо угловые тыловые каналы и, наконец, низкочастотный. Пример распределения уровней разрешения и времени звучания однослойного диска при 24-разрядном квантовании приведен в табл. 9.7.

Более того, шестиканальное звучание с параметрами 24 бит/96 кГц (скорость потока данных 13,8 Мбит/с) возможно только с использованием специального вида компрессии (все-таки компрессия!) – MLP (Meridian Lossless Packing – упаковка «без потерь», разработанная фирмой MERIDIAN). Правда, этот вид компрессии обеспечивает полное восстановление данных после декодирования – как будто никакой компрессии и не было. Именно поэтому он и допустим в DVD-Audio. Степень сжатия в MLP невелика – объем данных уменьшается всего на 25...55%. Тем не менее, это-

го достаточно, чтобы данный вариант кодирования можно было воспроизводить в реальном масштабе времени.

Таблица 9.7

**Возможное распределение уровней разрешения и времени звучания однослойных дисков DVD при 24-разрядном квантовании**

| Система                | Частота дискретизации, кГц | Без компрессии (мин) | С компрессией MLP (мин) |
|------------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------|
| 2 канала               | 48                         | 258                  | 344                     |
| 2 канала               | 192                        | 64                   | 86                      |
| 6 каналов              | 96                         | 43                   | 74                      |
| 5 каналов (две группы) | 3 канала – 96<br>+         | 64                   | 111                     |
|                        | 2 канала - 48              |                      |                         |

Программы с шестиканальным звучанием могут быть записаны на диск с применением компрессии с потерями - либо по технологии Dolby Digital (AC-3), либо по технологии DTS (Digital Theatre Systems), либо по технологии MPEG2 AAC или MPEG4 AAC. Тем не менее, с учетом того, что большинство воспроизводящих систем домашнего пользования являются все-таки стереофоническими, предусмотрено, что в проигрывателях DVD-Audio шестиканальный звук может воспроизводиться как двухканальное стерео. Для этого аппарат должен включать в себя систему автоматического сведения шести каналов в два. Такая система называется SMART – System Managed Audio Resource Technique (техника системного управления звуковыми ресурсами). В отдельных случаях двухканальный стереовариант может быть записан на диске вместе с шестиканальным. Тогда проигрыватель должен выбрать воспроизведение именно этого варианта, поскольку всякое автоматическое сведение всегда хуже оригинальной записи, сделанной звукорежиссером. Если же двухканальный вариант отсутствует, то будет воспроизводиться шестиканальный и перекодироваться в двухканальное стерео с помощью системы SMART.

Учитывая то, что емкость диска DVD хотя и велика, но не беспредельна, стандартом предусмотрены различные комбинированные варианты с разным разрешением в разных каналах при шестиканальной записи. Наивысший приоритет в таких вариантах отдается правому и левому фронтальным каналам, за ними могут следовать либо центральный, либо угловые тыловые каналы и, наконец, низкочастотный.

Впоследствии стандарт на DVD-Audio был дополнен, и теперь он предусматривает возможность записи на диск кроме звукового сигнала еще и элементов видеoinформации – мультимедийного и текстового со-

провожения музыки. Таким образом, в будущем, вместе с проигрывателями DVD-Audio и DVD-Video, все большее число моделей будет обладать универсальными функциями, т.е. воспроизводить как диски DVD-Audio, так и диски DVD-Video.

Кроме того, планируется, что проигрыватели DVD-Audio в дальнейшем смогут воспроизводить и диски SuperAudioCD с одноканальным кодированием DSD (Direct Stream Digital). Но об этом – чуть позже.

Структурная схема проигрывателя DVD-Audio показана на рис. 9.17. Она значительно проще схемы проигрывателя DVD-Video и больше похожа на схему проигрывателя CD-Audio. Работа ее понятна без пояснений.

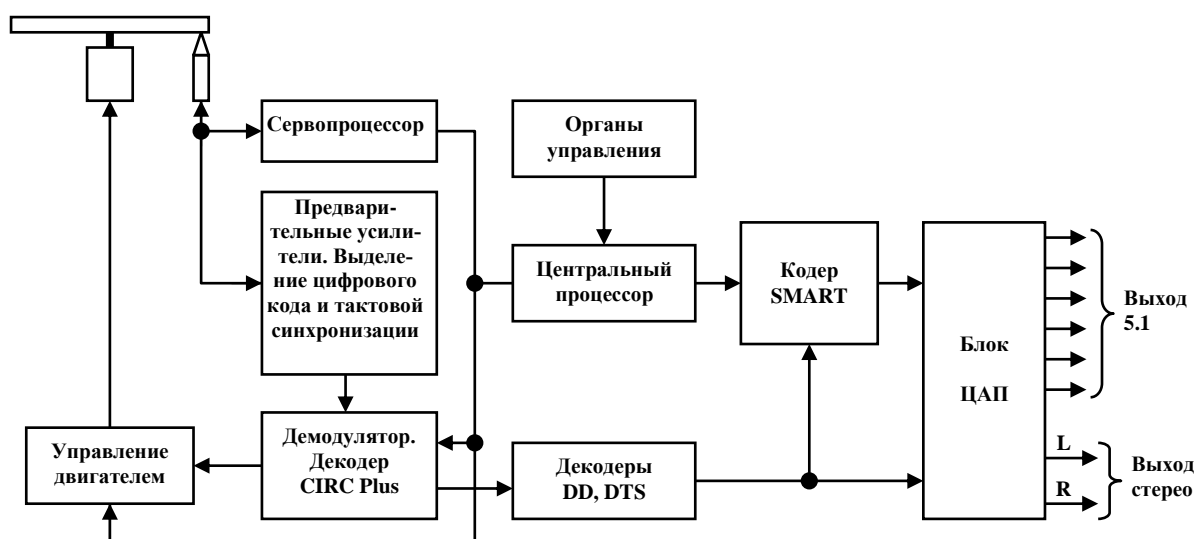


Рис. 9.17. Структурная схема проигрывателя DVD-Audio

## 10. ЗАПИСЫВАЕМЫЕ ФОРМАТЫ DVD

Записываемые и перезаписываемые диски формата DVD (DVD-R и DVD-RW соответственно) были разработаны в 1997 году усилиями фирмы Pioneer. По своей структуре и по технологии записи на них информации они имеют много общего с аналогичными дисками CD (CD-R и CD-RW). Однако между ними есть и некоторые отличия. Кроме того, существуют еще и их версии, которые обозначаются как DVD+R и DVD+RW, а также формат DVD+RAM, отличающийся особой организацией данных на диске, что обеспечивает более высокую защиту записанной информации от повреждений и большую долговечность самого носителя. Рассмотрим эти форматы более подробно.

### 10.1. ФОРМАТЫ DVD-R И DVD-RW

Спецификации на диски DVD-R и DVD-RW поддержаны форумом DVD. Диски DVD записываемых форматов могут хранить разные типы данных, тем не менее, для некоторых типов данных существуют вполне определенные спецификации. Для записи программ с дисков DVD-Video определена спецификация DVD-VR (DVD Video Recording), для записи программ с дисков DVD-Audio – спецификация DVD-AR (DVD Audio Recording), для записи потоков данных от прочих цифровых источников (какордеров, приемников цифрового эфирного и кабельного вещания) – DVD-SR (DVD Stream Recording).

Записываемый формат DVD-VR является взаимосвязанным с форматом DVD-Video. Он предназначен для записи видео в реальном времени, стерео-ИКМ-аудио, а также изображений, и пользователь в этом случае может сам формировать для себя собственную программу (плейлист). После записи программы пользователь может записать меню для обеспечения быстрого доступа к элементам программы. Формат DVD-VR обладает хорошей совместимостью с другими форматами.

Формат DVD-AR связан с форматами DVD-Video и DVD-Audio. Обеспечивает запись звука в реальном времени, а также запись изображений и текста. Звуковые программы можно записывать в форме ИКМ с различными частотами дискретизации, а также в форматах Dolby Digital и MPEG. Пользователю так же предоставляется возможность самому формировать плейлист для быстрого доступа к содержимому диска.

Диск DVD-R, так же как и диск CD-R, является диском для однократной записи. Его разновидность DVD-R(A) предназначена для использования в профессиональной работе над авторингом других дисков DVD. Формат DVD-R(G) общего назначения используется как для работы, так и для потребительских целей. Поскольку для записи дисков DVD-R(A) необходим лазер с длиной волны излучения 635 нм, а для записи дисков DVD-R

(G) – лазер с длиной волны излучения 650 нм, то эти два носителя не являются совместимыми по записи. Тем не менее, воспроизведение обоих типов дисков возможно с помощью приводов с лазером любой длины волны излучения.

Диски DVD-R состоят из двух подложек из прозрачного поликарбоната толщиной около 0,6 мм, склеенных вместе. У одностороннего диска только одна из подложек имеет микрорельеф в виде направляющей канавки с вобуляющей стенкой, шагом 0,74 мкм и нанесенным на него регистрирующим слоем (рис. 10.1). Микрорельеф располагается на той стороне, которая находится вблизи места склейки. Вторая подложка ни микрорельефа, ни регистрирующего слоя не имеет и используется как эквивалент – только для того, чтобы обеспечить требуемую общую толщину диска – 1,2 мм. Глубина направляющей канавки у дисков DVD-R – около 180 нм. Частота вобуляции стенок канавки – 140,6 кГц.

При изготовлении подложки, предназначенной для записи, на микрорельеф последовательно наносятся: регистрирующий слой органического красителя, отражающий слой и защитный лаковый слой (рис. 10.1). Подложка-эквивалент покрывается декоративным отражающим слоем и защитным лаковым слоем. Для того чтобы обеспечить формирование опорного сигнала, необходимого для управления двигателем вращения диска с постоянной линейной скоростью (CLV – Constant Linear Velocity), а также для работы систем автотрекинга и автофокусировки, на выступе направляющей канавки формируется дорожка из питов (*land pre-pits, LPP*). Путем модуляции длины питов и промежутков между ними, на диск записывается информация об абсолютном времени, истекшем с начала диска, о необходимой для выполнения записи мощности лазера и синхронизирующая информация. Несмотря на то, что считывающий луч лазера движется по дну канавки, его периферическая часть захватывает и выступы. За счет этого отраженный пучок в некоторой степени модулируется записанными на выступах питами, образуя вторичный сигнал, который может быть выделен из основного сигнала.

Как и в случае CD-R, при записи информации на диск DVD-R импульсы лазерного излучения формируют на слое органического красителя метки с более низким коэффициентом отражения, чем на участках дорожки, где воздействия лазерного излучения не было. Однако стратегия записи DVD-R отличается от стратегии записи CD-R. При записи питов на диск CD-R лазер просто включался, когда формировался пит и выключался, когда формировался промежуток между питами. При записи DVD-R питы формируются с помощью пакетов коротких импульсов, внутри которых мощность лазера модулируется по уровню от мощности, соответствующей записи до мощности, соответствующей считыванию, как показано на рис. 10.2. Длительности импульсов записи и промежутков между ними, величины сдвигов импульсов записи относительно переднего и заднего края



пита, необходимая величина мощности лазера у дисков разных производителей отличаются друг от друга, поэтому каждый производитель записывает всю необходимую информацию в виде пит на вводной дорожке диска на выступе направляющей канавки. Рекордер считывает эту информацию и выбирает оптимальную стратегию записи. Отражающая способность дисков DVD-R – от 45 до 85%.

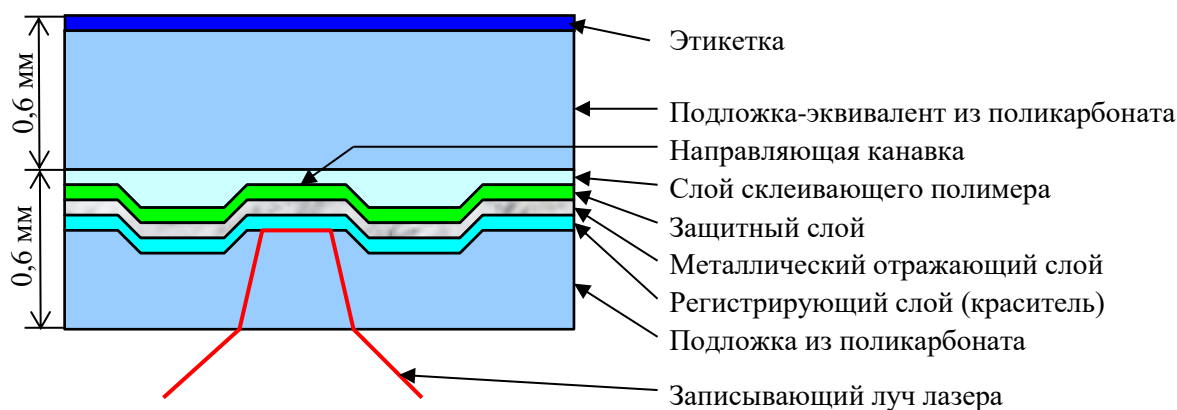


Рис. 10.1. Структура диска DVD-R

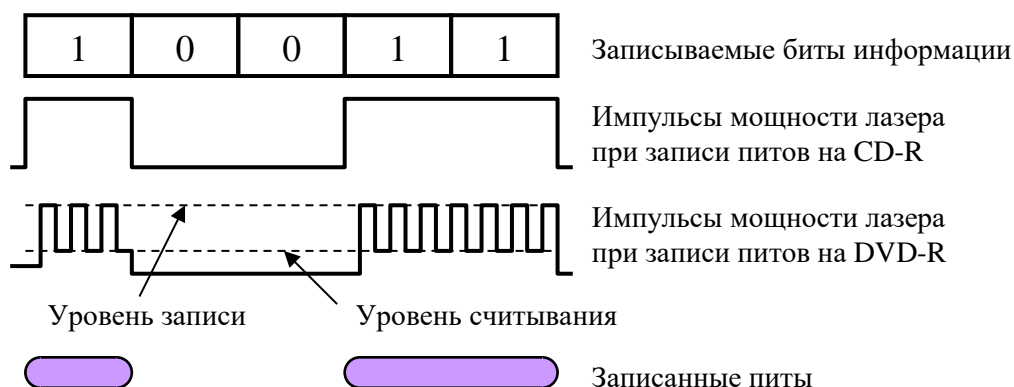


Рис. 10.2. Стратегии записи дисков CD-R и DVD-R

Диски DVD-RW, в отличие от DVD-R, все одинаковы и подходят как для профессиональной записи, так и для потребительской в домашних условиях. Регистрирующий слой таких дисков, подобно регистрирующему слою дисков CD-RW, способен изменять свое состояние от кристаллического к аморфному и обратно, и содержит различные соединения серебра, индия, сурьмы и теллура. Такие слои выдерживают до 1000 циклов перезаписи. Кроме того, в отличие от регистрирующих слоев из органических красителей у дисков CD-R, здесь процесс записи нечувствителен к длине волны излучения лазера - важна только температура нагрева. Отражающая способность дисков DVD-RW – от 18 до 30%, т.е. ниже, чем у дисков DVD-R. Глубина направляющей канавки у DVD-RW меньше, чем у DVD-

R – всего 30 нм. Каждый регистрирующий слой диска DVD-RW может содержать до 4,37 Гб информации [164, 165].

## 10.2. ФОРМАТЫ DVD+R И DVD+RW

Диски этих форматов были разработаны организацией DVD+RW Alliance, в которую вошли несколько известных компаний (Sony, Philips и др.). Спецификации на эти диски появились только в 2001 (RW) и 2002 (R) годах, т.е. значительно позже дисков DVD-R(RW). Это позволило их разработчикам создать технически более совершенные носители. Однако форматом DVD они не поддерживаются [165].

Основное различие между форматами «+» и «-» состоит в способе размещения на диске служебной информации (данных хронирования). На дисках DVD+R(W) она содержится в изменении фазы сигнала вобуляции, а не в пиках на выступе дорожки. Известно, что метод относительной фазовой модуляции более устойчив к шумам и искажениям, чем метод амплитудной модуляции. Поэтому с этой точки зрения диски DVD+R(W) более надежны. Более того, с ростом скорости записи считывание информации с дорожки LPP становится сложнее, чем определение изменения фазы сигнала вобуляции. Кроме того, на дисках DVD+R(W) используется более высокая частота вобуляции 817,4 кГц. Такой метод записи служебной информации называется ADIP (ADress In Pre-groove).

Диски DVD+RW допускают запись информации в несколько приемов (мультисессийная запись) – без предварительного стирания уже имеющегося содержимого (для DVD-RW необходимо вначале целиком стереть имеющуюся запись).

Диски DVD+R(W), предназначенные для записи данных с помощью компьютера, допускают запись в режиме как с постоянной линейной скоростью (CLV), так и с постоянной угловой скоростью (CAV – Constant Angular Velocity). Диски для записи звука и видеопрограмм с помощью рекордера записываются в режиме CLV. Такие диски можно воспроизводить с помощью обычного проигрывателя.

Номинальная емкость дисков DVD+R(W), записанных в режиме CLV – 4,7 Гб. Существуют и двухслойные диски DVD+R(W), которые имеют емкость до 8,5 Гб.

## 10.3. ФОРМАТ DVD-RAM

Формат DVD-RAM (Random Access Memory), как и DVD-RW, является перезаписываемым. Запись осуществляется путем изменения фазы регистрирующего материала. Однако структура поверхности диска здесь несколько иная. Запись информации производится на обе плоские поверхности канавки – как на дне ее, так и на выступе (рис. 10.3).

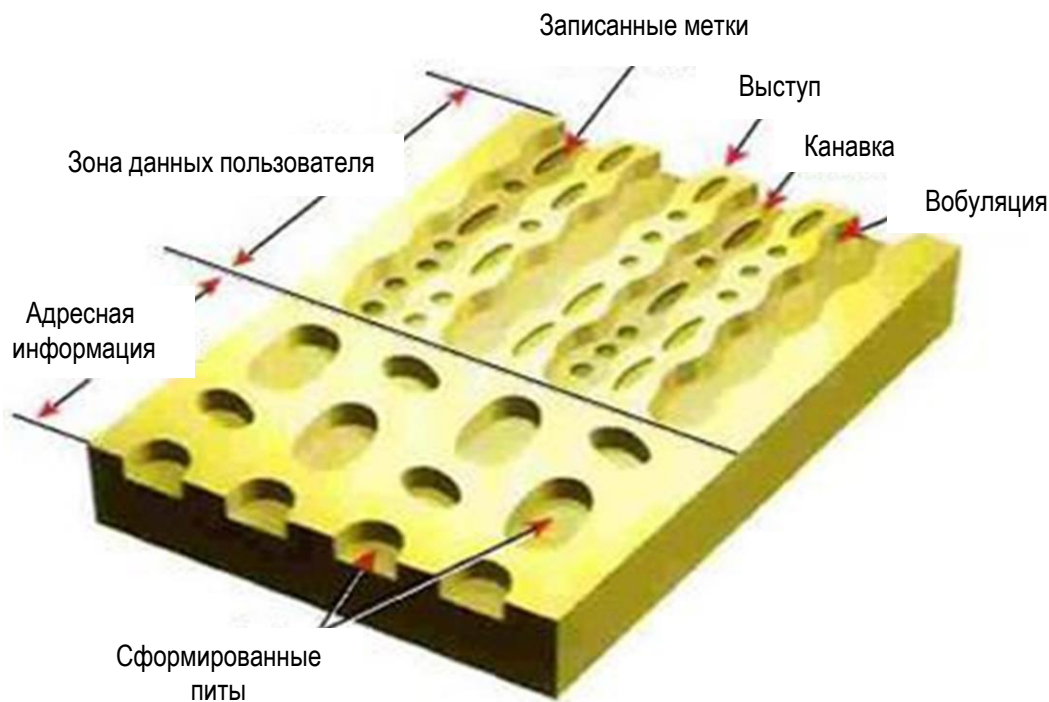


Рис. 10.3. Структура поверхности диска DVD-RAM

Подобная технология записи обеспечивает удвоение емкости диска, однако здесь необходимо переключение режима слежения за дорожкой (выступ-канавка) после каждого оборота диска, как при записи, так и при считывании. Кроме того, чтобы уменьшить влияние интерференции, обусловленной близким расположением соседних информационных дорожек на дне канавки и на выступе, канавки приходится делать более глубокими в сравнении с канавками на реверсивных дисках DVD-RW – 70 нм (у DVD-RW – 30 нм).

Новшеством является и организация данных – она сходна с организацией данных на жестком диске, т.е. при форматировании DVD-RAM организуется таблица содержания FAT32 с секторами размером 2 кбайта. Это позволяет изменять информацию произвольно – в любом месте диска (так же, как на жестком диске). Перед каждым сектором имеется зона адресных данных, сформированная еще при изготовлении диска в виде микрорельефа из физических пит – как на дисках DVD-ROM (рис. 10.3). Кроме того, так же, как на жестком диске, предусмотрена локализация поврежденных секторов и замена их резервными. Вследствие этого диски DVD-RAM использовались для организации систем резервного копирования информации на компьютерах – пока не появились более совершенные системы на базе флеш-памяти.

На дисках DVD-RAM используется зонная структура поддержания постоянной линейной скорости записи/считывания (Zoned Constant Linear Velocity – ZCLV). Поверхность всего диска (имеется в виду диск диаметром 120 мм) поделена на 35 зон, в каждой из которых используется свое

значение постоянной линейной скорости. Но внутри каждой такой зоны скорость поддерживается с очень высокой точностью. Поскольку диаметр дорожек увеличивается от центра к краю, то и количество секторов записи последовательно увеличивается по мере перемещения луча от центра диска к краю - во внутренних зонах секторов меньше, чем во внешних. Зона вблизи внутреннего диаметра диска (самая маленькая) содержит 39200 секторов, самая большая зона (внешняя) – 105728 секторов. Именно такая организация данных на дисках DVD-RAM и позволяет использовать их совместно с компьютерными системами.

Полезная емкость одностороннего диска DVD-RAM – 4,37 Гб, двухстороннего – 8,74 Гб.

Диски DVD-RAM заключены в специальный картридж, поэтому, как правило, требуют специального загрузочного механизма. Однако диск можно извлечь из картриджа и работать с ним, используя обычный привод DVD-ROM.

Существуют DVD-приводы, которые обозначаются как *DVD Multi*. Но это не какой-то специальный DVD-формат. Такое обозначение указывает на совместимость внутри семейства DVD. Если обозначение DVD Multi имеет привод только для считывания, то с его помощью можно считывать диски DVD-ROM, DVD-R, DVD-RW и DVD-RAM. Если обозначение DVD Multi имеет привод с функцией записи, то на нем можно записывать диски DVD-R, DVD-RW и DVD-RAM.

Гарантийный срок хранения данных на DVD-RAM – до 30 лет, а число циклов перезаписи – до 100000, т.е. в 100 раз больше, чем у DVD-RW. Недостатком дисков DVD-RAM является их высокая стоимость и невозможность считывания на большинстве обычных DVD-проигрывателях (не всех, тем не менее). Однако диски DVD-RAM изначально разрабатывались для профессиональной работы (авторинга, пост-продакшн и пр.), а не для обычного потребителя, поэтому в этой сфере их стоимость существенной роли не играет.

Формат DVD-RAM поддерживается форумом DVD.

## 11. ФОРМАТ BD

Диск формата BluRay имеет те же физические размеры, что и диск DVD, но в перспективе может содержать до 8 и более регистрирующих слоев емкостью до 27 Гб каждый. Основное назначение формата – хранение движущихся изображений высокой четкости с разрешением  $1920 \times 1080$  точек. Тем не менее на один регистрирующий слой диска BD можно записать до 13 часов видеoinформации с качеством VHS (сжатие данных по стандарту MPEG-2 со скоростью потока данных до 3.8 Мбит/с) или же 2 часа видео в распространенном сейчас в Японии формате HDTV (телевидение высокого разрешения до  $1600 \times 1200$  точек с 32-разрядным разрешением по цвету, со сжатием по стандарту MPEG-2 и скоростью потока данных от 8 Мбит/с и выше).

Основными элементами, которые позволили более чем в 5 раз увеличить емкость диска BluRay в сравнении с его непосредственным предшественником – диском DVD, являются новый полупроводниковый лазер на основе нитрида галлия GaN (вместо лазера на основе арсенида галлия GaAs, который использовался как в формате DVD, так и в формате CD), излучающий синий свет с длиной волны  $\lambda = 405$  нм, и фокусирующий объектив с числовой апертурой  $NA = 0,85$  [170-180].

Расстояние между смежными регистрирующими слоями диска – всего 25 мкм. Поэтому с каждой стороны диска можно разместить несколько слоев.

Содержимое диска BluRay защищено от копирования стандартом *Advanced Access Content System* (AACCS). Стандарт разработан концерном *AACCS Licensing Administrator*, состоящим из компаний Disney, Intel, Microsoft, Matsushita (Panasonic), Warner Brothers, IBM, Toshiba и Sony. Преимуществом AACCS перед CSS, используемым в DVD, является возможность блокирования отдельного устройства воспроизведения в случае, если криптографические ключи были скомпрометированы.

Диски BD снабжаются региональным кодом, причем разбивка по регионам достаточно сильно отличается от таковой для DVD: в регион 1 попадают Северная и Южная Америка, а также Восточная Азия (за исключением Китая). Второй регион – Европа и Африка, третий – Россия, Китай и все остальные страны (табл. 11.1).

Таблица 11.1

### Региональное кодирование дисков BD

| Код      | Регион   |
|----------|--|
| 1, или А | Америка, Восточная и Юго-Восточная Азия (кроме Китая)        |
| 2, или В | Европа, Океания, Африка, Ближний Восток, Гренландия          |
| 3, или С | Центральная и Южная Азия, Монголия, Россия, Казахстан, Китай |

Первоначально предполагалось размещать BD-диск в картридж с габаритными размерами 129x131x7 мм, однако потом от него отказались в связи с тем, что фирмой TDK был разработан более прочный (хотя и значительно более дорогой) материал (DURABIS2) для изготовления прозрачной основы диска. Прочность его в 100 раз выше, чем у обычного традиционного поликарбоната.

Реально выпускаются, в основном, диски BD с одним или двумя слоями (ёмкость 25 и 50 Гб, соответственно), хотя ещё в конце 2008 года японская компания Pioneer демонстрировала 16- и 20-слойные диски на 400 и 500 ГБ, способные работать с тем же самым 405-нм лазером, что и обычные BD-плееры. В октябре 2009 года японская корпорация TDK сообщила о создании записываемого десятислойного BD-диска ёмкостью 320 Гб, который полностью совместим с существующими приводами.

### *Технические характеристики диска BD*

- Емкость – 25/27 Гб
- Длина волны излучения лазера – 405 нм
- Числовая апертура объектива (NA) – 0,85
- Диаметр светового пятна на уровне 0,5 – 0,29 мкм
- Глубина фокуса -  $\pm 0,28$  мкм
- Максимальная скорость потока данных – 36 Мбит/с
- Толщина диска – 1,2 мм (наружный прозрачный защитный слой – 0,1 мм)
- Шаг дорожки записи – 0,32 нм
- Минимальная длина пита – 0,149/0,138 нм
- Плотность записи – 27,3 Мбит на квадратный миллиметр
- Формат записи изображения – MPEG2, SMPTE VC-1\*, MPEG4 AVC (H.264)
- Формат записи звука – LPCM, Dolby Digital AC3, DTS (обязательные), Dolby Digital Plus, Dolby True HD, DTS-HD (необязательные, на усмотрение производителя)
- Формат комбинированного сигнала – MPEG2, MPEG4
- Система защиты информации AACS (Advanced Access Content System)

\*Основан на платформе Microsoft Windows Media 9

Существуют BD-диски для однократной записи (BD-R) и для многократной перезаписи – BD-RE (Erasable).

## 11.1. КОНСТРУКЦИЯ BD-ДИСКА

### 11.1.1. ОБЩАЯ СТРУКТУРА ДИСКА

Основной материал BD-диска – тот же самый поликарбонат, что и у CD и DVD. Однако регистрирующий слой у BD-диска находится гораздо ближе к внешней поверхности (той, через которую осуществляется считывание), чем у CD и DVD – на расстоянии всего 100 мкм от нее (у CD это расстояние равно 1,1 мм, у DVD – 0,6 мм). По этой причине BD-диск более чувствителен к царапинам и отпечаткам пальцев на внешней поверхности. Для того чтобы защитить его от повреждений, диски первых поколений размещали в специальных картриджах с габаритными размерами 129x131x7 мм, подобно минидискам. Затем от картриджа оказались и попытались покрывать поверхность диска тонким слоем акриловой смолы, отверждаемой потоком ультрафиолетовых лучей. Такое покрытие уже применялось ранее для защиты поверхности дисков DVD-RW. Но этого показалось недостаточно, и поиски материала, пригодного для использования в качестве защитного слоя для дисков BD, продолжились. Вскоре фирмой TDK был разработан еще один прозрачный материал (DURABIS2 – полимер на основе коллоидного кремнезема), прочность которого оказалась в 100 раз выше, чем прочность традиционного поликарбоната (хотя и стоимость его также оказалась значительно выше стоимости поликарбоната). Полимеризация нового материала и приобретение им высокой прочности также происходит под воздействием ультрафиолетовых лучей. Слоем такого материала толщиной всего 2 мкм и покрывается внешняя поверхность BD-диска (рис. 11.1).

Если диск является двухслойным, то второй информационный слой (L1) располагается на расстоянии 25 мкм от первого слоя (L0) ближе к внешней поверхности (рис. 2.1б). Между этими двумя информационными слоями также находится разделительный слой поликарбоната.

### 11.1.2. ДИСК BD-ROM

Если диск является диском BD-ROM (тиражированный диск только для считывания), то информационный слой содержит в себе спиральную дорожку из пит – как и у CD-ROM и DVD-ROM. Дорожка формируется на внешней поверхности основы из поликарбоната и затем покрывается отражающим слоем из алюминия у однослойных дисков и у нижнего слоя двухслойных, и из золота или кремния у верхнего слоя двухслойных.

Если диск однослойный, то питы, как правило, представляют собой углубления на внешней (если смотреть со стороны считывания) поверхности основы. Глубина их, как и у диска DVD, примерно равна  $\lambda/4$ , т.е. 405

нм/4  $\approx$  100 нм. Однако если для диска DVD величина  $\lambda/4$  должна выдерживаться достаточно точно из-за того, что наибольшая глубина модуляции отраженного пучка по интенсивности получается именно при такой глубине пит, то для BD-диска, благодаря высокой апертуре считывающего объектива (0,85), это не столь критично – глубина пит может быть как больше, так и меньше значения  $\lambda/4$ .

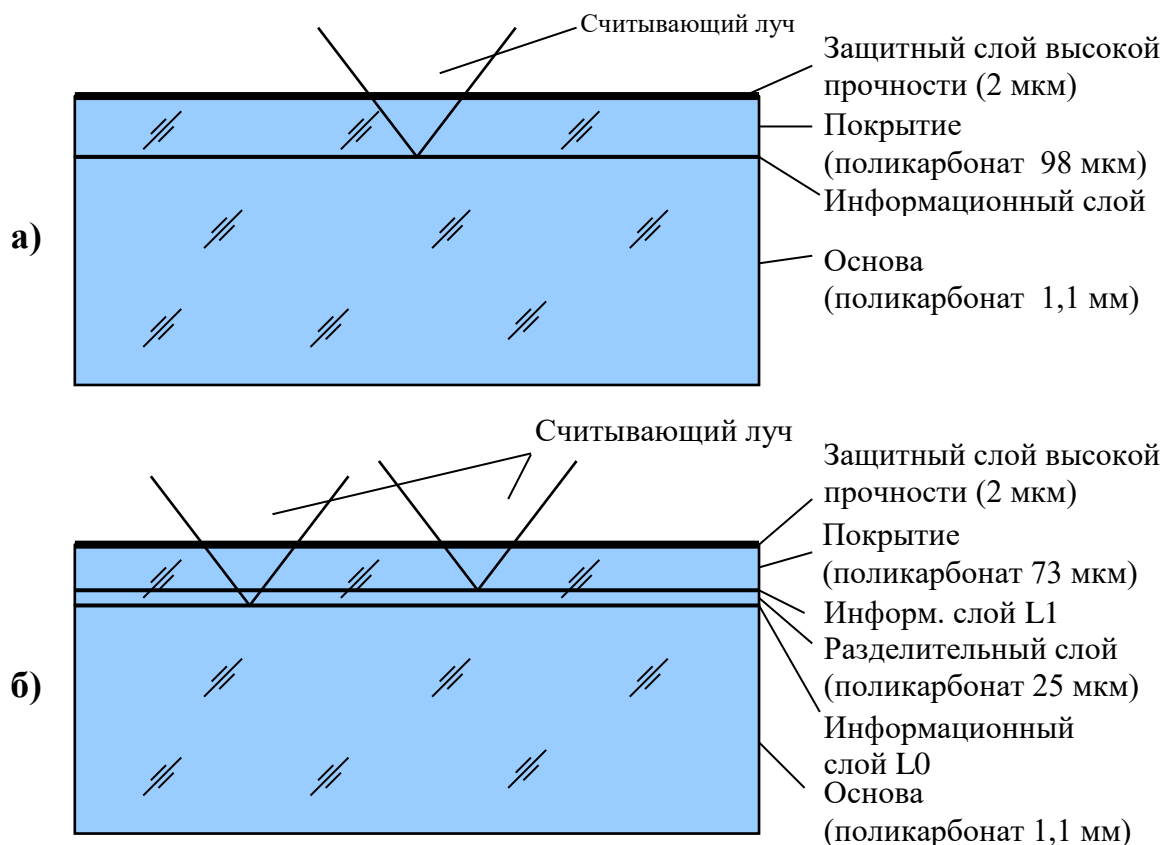


Рис. 11.1. Конструкция BD-диска:  
а) однослойного; б) двухслойного

Если диск двухслойный, то вышесказанное справедливо только для внутреннего информационного слоя L0. При формировании внешнего информационного слоя L1 могут быть использованы два способа. Первый способ состоит в формировании пит на внешней поверхности разделительного слоя. Питы при этом также будут представлять собой углубления. Такая технология называется «*in pit*» (рис. 11.2). При втором способе питы формируются на внутренней поверхности покрытия, и в этом случае будут представлять собой выпуклости (если смотреть со стороны считывания). Такая технология называется «*on pit*» (рис. 11.2).

Коэффициент отражения у однослойных дисков в соответствии со спецификацией может принимать два диапазона значений: от 0,35 до 0,70 (отражается от 35 до 70% световой энергии) и от 0,12 до 0,28 (отражается



от 12 до 28% световой энергии). У двухслойных дисков коэффициент отражения должен быть в диапазоне от 0,12 до 0,28 – для обоих слоев.

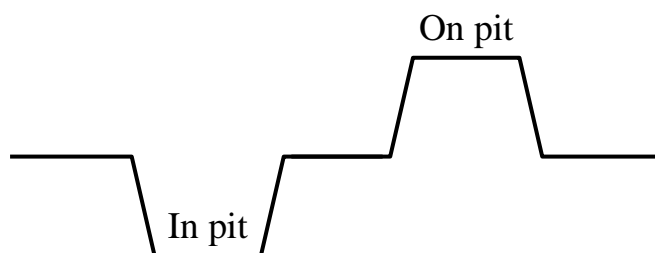


Рис. 11.2. Технологии «In pit» и «On pit»

### 11.1.3. ЗАПИСЫВАЕМЫЕ ДИСКИ BD

Если диск является записываемым BD-R (R – Recordable – для однократной записи) или BD-RE (E – Erasable («стираемый») – для многократной перезаписи), то на месте информационного слоя формируется направляющая дорожка (groove), которая имеет волнообразную форму. Шаг дорожки – 0,32 мкм. Величина колебаний дорожки в радиальном направлении (*вобуляция*) составляет  $\pm 10$  нм (рис. 2.24). Вобуляция необходима для того, чтобы обеспечить слежение за дорожкой при записи диска, а также содержит в себе информацию об адресе каждого конкретного участка дорожки. Длина волны вобуляции в общем случае равна 5 мкм (рис. 2.25).

Информация формируется на выступе дорожки (on groove). В период разработки рассматривалось два варианта размещения информации – на выступе дорожки (on groove) и на дне канавки (in groove) (рис. 11.3). Исследования показали, что при записи на дне канавки считывающий луч заметно рассеивается в радиальном направлении (рис. 11.3). Поэтому вначале было принято решение производить запись информации только на выступе дорожки (on groove). Впоследствии, однако, это решение было пересмотрено, и, несмотря на некоторое снижение оптического контраста, запись стали производить как на выступе дорожки (on groove), так и на дне канавки (in groove). Для получения наибольшего оптического контраста, высота выступа должна находиться в пределах  $\lambda/10 \div \lambda/12$ . Поскольку длина волны излучения лазера в системе BD равна 405 нм, то это соответствует величине  $40,5 \div 33,75$  нм.

### 11.1.4. РЕГИСТРИРУЮЩИЕ СЛОИ ЗАПИСЫВАЕМЫХ ДИСКОВ BD

Регистрирующим слоем у дисков BD-R могут служить два типа покрытий: органический краситель – как у всех прочих дисков для однократной записи (CD-R или DVD-R) и специальный состав из неорганических

веществ, разработанный не так давно – уже в XXI веке в процессе работы над новым оптическим носителем.

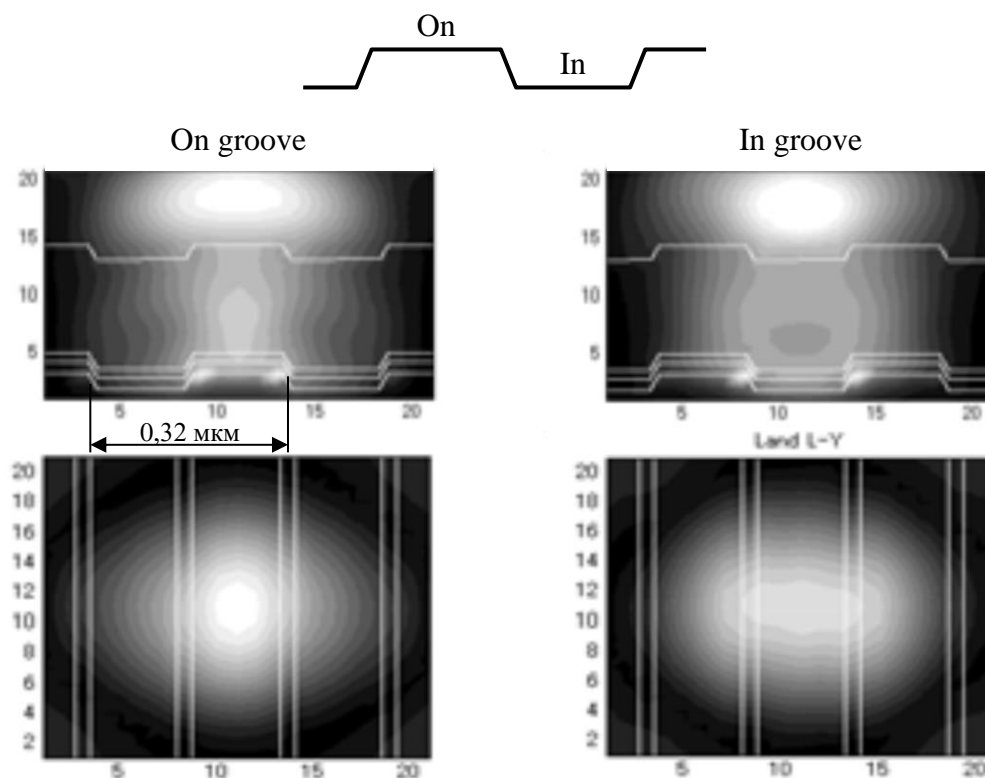


Рис. 11.3. Два способа записи информации: «on groove» (слева) и «in groove» (справа)

Фирма Fuji предложила и продемонстрировала регистрирующий слой из органического красителя, который под воздействием лазерного излучения способен изменять (уменьшать) отражательную способность (рис. 11.4,б).

Фирма TDK разработала неорганическое покрытие, которое состоит из двух слоев: верхний слой – кремний (Si), нижний – медный сплав (Cu), точный состав которого фирма не разглашает (рис. 11.4,а). При записи под воздействием лазерного излучения повышенной мощности оба слоя плавятся и смешиваются, образуя сплав CuSi, который обладает меньшим коэффициентом отражения, чем исходная поверхность. На рис. 11.5 представлена структура двухслойного диска BD-R, изготовленного по технологии фирмы TDK.

Оптические свойства верхнего регистрирующего слоя L1 таковы, что сквозь него проходит не менее 50% световой энергии считывающего пучка. Когда производится запись информации на нижний регистрирующий слой L0, то верхний слой L1 находится вне фокуса считывающего пучка и плотности энергии света недостаточно, чтобы повредить записанную на нем информацию.

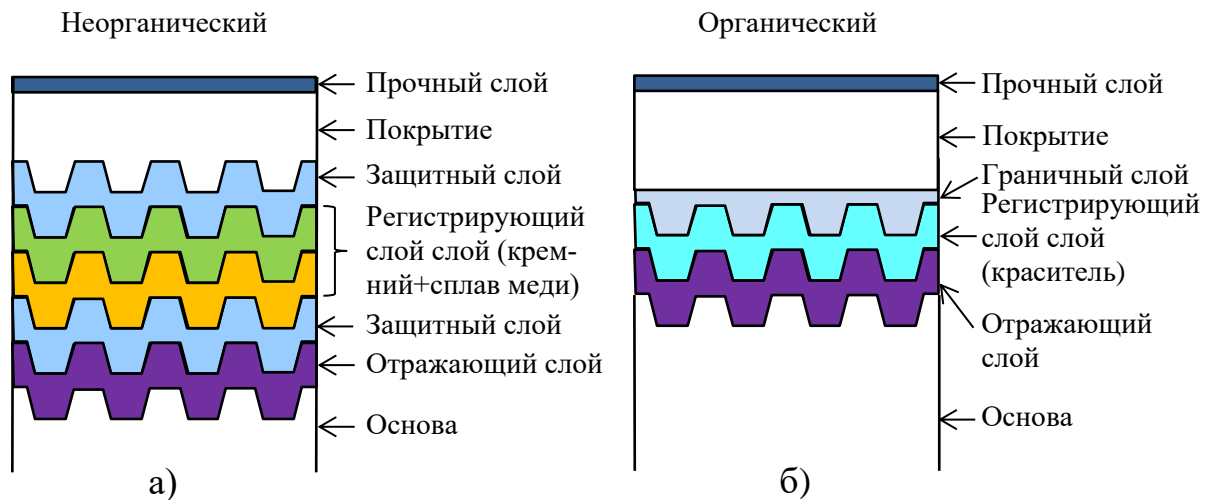


Рис. 11.4. Структура диска BD-R с регистрирующим слоем из неорганического (а) и органического (б) материала

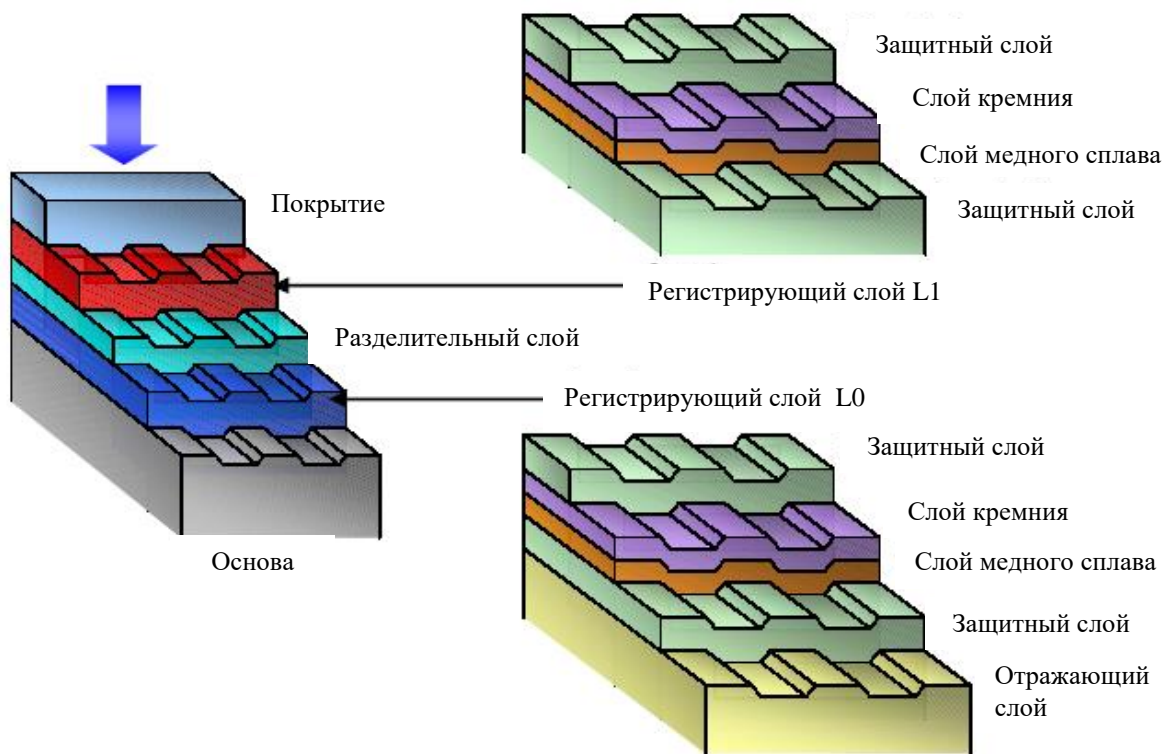


Рис. 11.5. Структура двухслойного диска BD-R с регистрирующими слоями из неорганического материала (технология фирмы TDK)

В качестве регистрирующего слоя также могут использоваться неорганические материалы, способные однократно изменять свою фазу из аморфной в кристаллическую.

Регистрирующим слоем перезаписываемых дисков BD-RE также служит неорганический материал с изменяемым фазовым состоянием, но способный изменять фазу многократно.

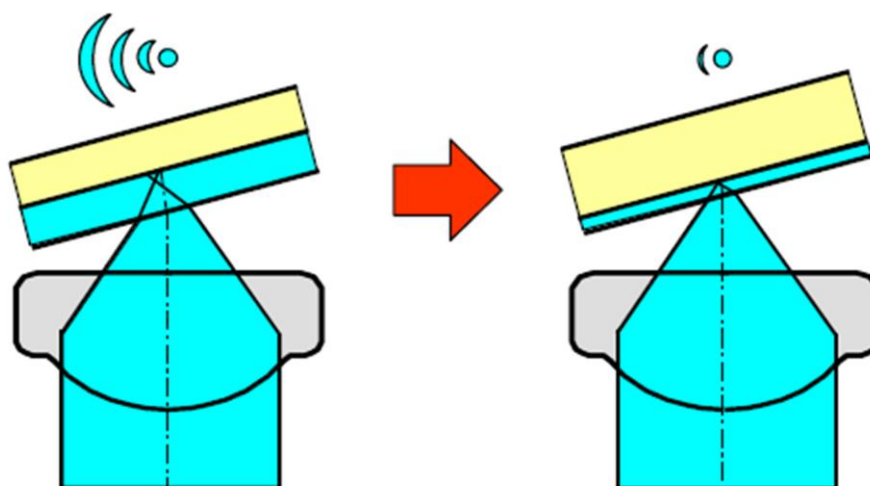
Спецификация на диск BD-R диаметром 120 мм предусматривает два варианта его информационной емкости: 25 и 27 Гб для однослойного диска и 50 и 54 Гб для двухслойного диска того же диаметра. При этом изменяется только линейная плотность записи: у дисков емкостью 25 (или 50) Гб минимальная длина записываемого пита (равная  $2T$  – двум периодам канальной тактовой частоты) составляет 0,149 мкм, а у дисков емкостью 27 (или 54) Гб – 0,138 мкм. Шаг дорожки при этом не изменяется – 0,32 мкм.

Следует отметить, что минимальная длина пита – это длина двух канальных бит ( $2T$ ). Если минимальная длина пита равна, скажем, 0,149 мкм (для диска емкостью 25 Гб), то длина канального бита составит  $0,149/2 = 0,0745$  мкм = 74,5 нм. Если же пересчитать канальные биты в информационные, то длина информационного бита составит 111,75 нм.

Для диска диаметром 80 мм определен только один вариант информационной емкости: 7,8 Гб для однослойного диска и 15,6 Гб для двухслойного.

## 11.2. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ BD-ДИСКОВ

Отрицательным следствием применения в формате BluRay высокоапертурного объектива ( $NA = 0,85$ ) можно считать то, что информационный слой здесь приходится размещать в непосредственной близости от внешней поверхности диска. Если бы он находился на том же расстоянии, что и у дисков DVD, то искажения светового пятна, вызванные наклонами поверхности диска, были бы чрезмерно велики даже при очень небольших значениях величины таких наклонов (рис. 11.6).



Искажения светового пятна при толщине защитного слоя 0,6 мм

Искажения светового пятна при толщине защитного слоя 0,1 мм

Рис. 11.6. Искажения формы светового пятна, вызванные наклоном поверхности диска при разной толщине защитного слоя

Величина таких искажений пропорциональна кубу числовой апертуры ( $NA^3$ ) и толщине защитного слоя. Поскольку допустимые спецификацией отклонения отраженного пучка от вертикали могут достигать значения  $\pm 1,6^\circ$  (угол  $\alpha$  на рис.11.7), то толщину защитного слоя у диска BD в 100 мкм можно считать величиной вполне достаточной.

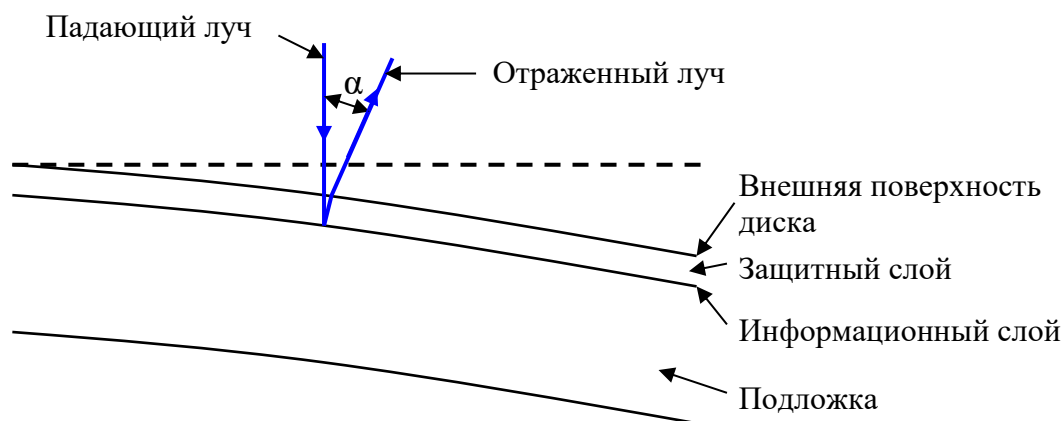


Рис. 11.7. Отклонение отраженного луча от вертикали, вызванное наклоном поверхности диска

Поскольку толщина покрытия у диска BD составляет всего 100 мкм или 0,1 мм (у DVD – 0,6 мм), то, несмотря на высокую числовую апертуру считывающего объектива  $NA = 0,85$  (у DVD  $NA = 0,6$ ), диаметр светового пятна на его внешней поверхности составляет всего 138 мкм (у DVD – 520 мкм) (рис. 11.8). Поэтому он гораздо более чувствителен к наличию пылинок, царапин и отпечатков пальцев на поверхности диска.

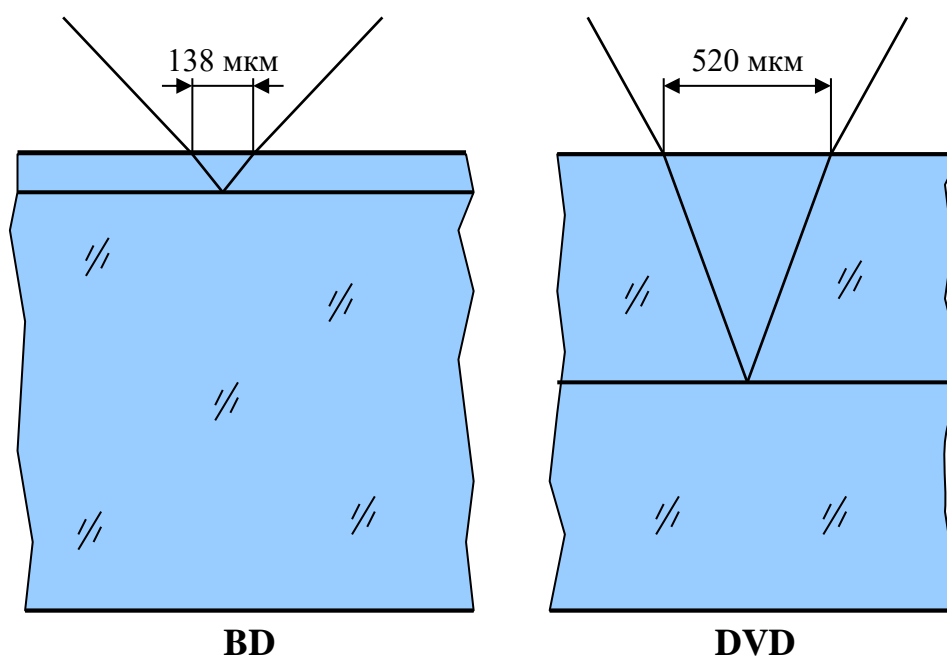


Рис. 11.8. Диаметр светового пятна на поверхности диска у BD и DVD

Вероятность появления царапин снижается за счет использования прочного защитного слоя, а вот бороться с пылинками и отпечатками пальцев приходится электронными методами – за счет применения более мощной системы помехоустойчивого кодирования. Блок коррекции ошибок ECC (Error Correction Code) у BD-диска составляет 64 кб против 32 у DVD. А число проверочных байт (проверочных символов кодового слова кода Рида-Соломона) – 32 против 16 у DVD.

### 11.3. ОПТИЧЕСКИЕ ГОЛОВКИ

Для того чтобы обеспечить совместимость BD-приводов с дисками DVD и CD, фирмы-производители предприняли усилия по поиску технических решений для такой оптической головки, которая позволяла бы считывать информацию с дисков всех трех упомянутых форматов. Задача эта непростая, поскольку большинство оптических элементов адаптировано, как правило, для работы с излучением только одной длины волны. В лучшем случае совместимость достигалась для красного (650 нм) и инфракрасного (780 нм) излучения. Предстояло преодолеть три основные проблемы.

Во-первых, необходимо было обеспечить приемлемое рабочее расстояние объектива при любой длине волны излучения.

**Рабочим расстоянием** называется расстояние от наиболее выступающей части объектива (внешней поверхности оправы объектива либо внешней поверхности линзы) до фокальной плоскости, т.е. до считываемой дорожки.

Во-вторых, обеспечить компенсацию сферических aberrаций – также при любой длине волны излучения.

В-третьих, обеспечить изменение числовой апертуры объектива в зависимости от длины волны проходящего через него света.

Фирма **LG Electronics** предложила оптическую головку с единственной асферической линзой и с тремя лазерными диодами, каждый из которых генерирует излучение только одной длины волны – инфракрасный – 780 нм (CD), красный – 650 нм (DVD) и синий – 405 нм (BD). Упрощенная оптическая схема такой головки (некоторые элементы на этой схеме отсутствуют) показана на рис. 11.9. Определяющими элементами здесь являются двухслойное наклонное зеркало, отражающее излучение всех трех длин волн и поляризационный *голографический оптический элемент* (**HOE – Holographic Optical Element**), способный изменять геометрию фронта проходящего через него пучка в зависимости от длины волны излучения. Рабочее расстояние объектива такой головки при  $NA = 0,85$  и излучении с длиной волны  $\lambda = 405$  нм составило 0,54 мм.

Для изготовления голографического оптического элемента использован материал, обладающий двойным лучепреломлением. Этот материал,

который помещен между двумя полимерными подложками, для излучения с некоторым определенным направлением колебания вектора поляризации обладает тем же самым коэффициентом преломления, что и материал подложки. Но для излучения с направлением колебания вектора поляризации перпендикулярным первому, коэффициент преломления такого материала будет другим. Голографический оптический элемент сконструирован так, что не изменяет фронта волны излучения длины 405 нм, но излучение с длиной волны 650 нм (DVD) и 780 нм (CD) подается на него таким образом, что направление колебаний вектора поляризации будет перпендикулярным направлению колебаний вектора поляризации излучения с длиной волны 405 нм, и, следовательно, коэффициент преломления материала с двойным лучепреломлением для него будет уже другим, и фронт волны изменит свою геометрию, как показано на рис. 11.10, т.е. примет сферическую форму.

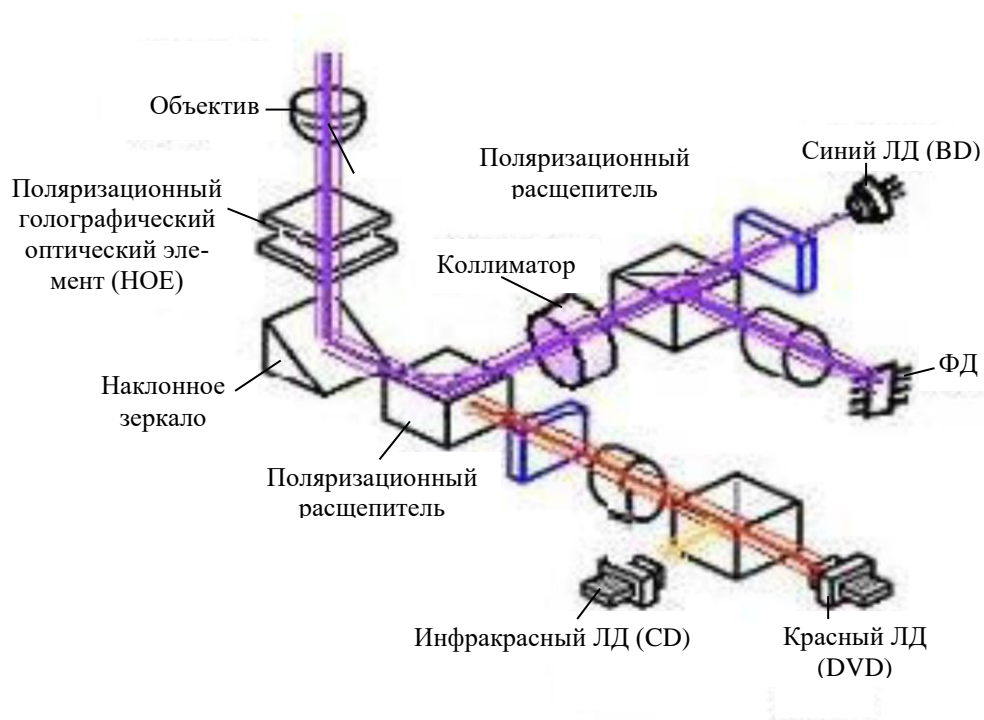


Рис. 11.9. Оптическая схема комбинированной оптической головки с тремя лазерными диодами (ЛД), разработанной фирмой LG Electronics

Голографический оптический элемент обладает еще целым рядом свойств, обеспечивающих контроль распределения фаз падающего пучка на входном зрачке объектива при считывании дисков DVD и CD. Он также способен компенсировать сферические aberrации, возникающие из-за того, что информационные слои у дисков DVD и CD располагаются на разных расстояниях от его внешней поверхности (имеют разную толщину защитного слоя). Для того чтобы можно было регулировать числовую

апертуру в зависимости от длины волны падающего пучка и, таким образом, уменьшить дифракционные шумы за пределами эффективного диаметра зрачка объектива, здесь используется апертурный фильтр дифракционного или оптического типа.

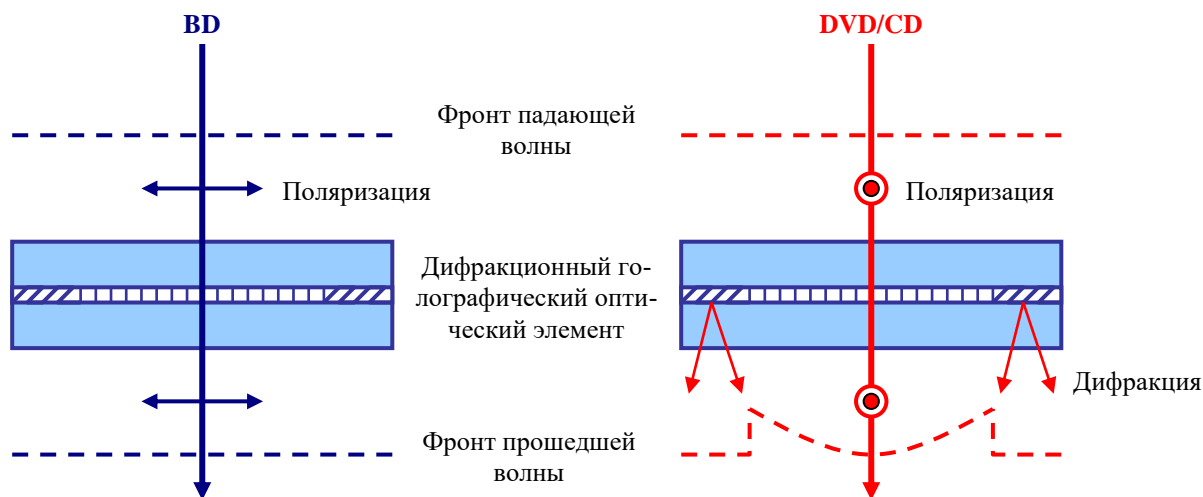


Рис. 11.10. Структура голографического оптического элемента (НОЕ) и принцип его действия

**Фирма SONY** разработала оптическую головку, в которой используется всего один лазерный диод, но этот диод представляет собой комбинацию из трех лазерных диодов и способен генерировать излучение трех различных длин волн – 405 нм (BD), 650 нм (DVD) и 780 нм (CD). Кроме того, здесь используется многолинзовый объектив, также способный фокусировать излучение упомянутых трех длин волн. С помощью такой головки можно осуществлять считывание и запись дисков всех трех форматов – BD, DVD и CD. Оптическая схема этой головки приведена на рис. 11.11.

Конструкция комбинированного лазерного диода, изготовленного путем размещения на поверхности синего лазера (405 нм) гетероструктур с активными зонами для формирования красного (650 нм) и инфракрасного (780 нм) излучения, показана на рис. 11.12, а изображение, поясняющее его функционирование – на рис. 11.13.

Следует отметить, что, несмотря на совмещенное конструктивное исполнение комбинированного лазера, в каждый конкретный момент времени может работать только одна его активная зона и соответственно формироваться излучение только одной длины волны. Как видно из рис. 11.12, все три гетероструктуры размещены на общем теплоотводе, и одновременная работа двух или трех лазеров одновременно (если бы такой режим для чего-то потребовался) привела бы к перегреву всей конструкции и к выходу из строя ее элементов. Тем не менее мощности лазеров вполне достаточно, чтобы производить запись даже при повышенных скоростях



вращения записываемого диска. Мощность синего лазера – до 120 мВт в импульсе, красного – до 150 мВт, инфракрасного – до 200 мВт.

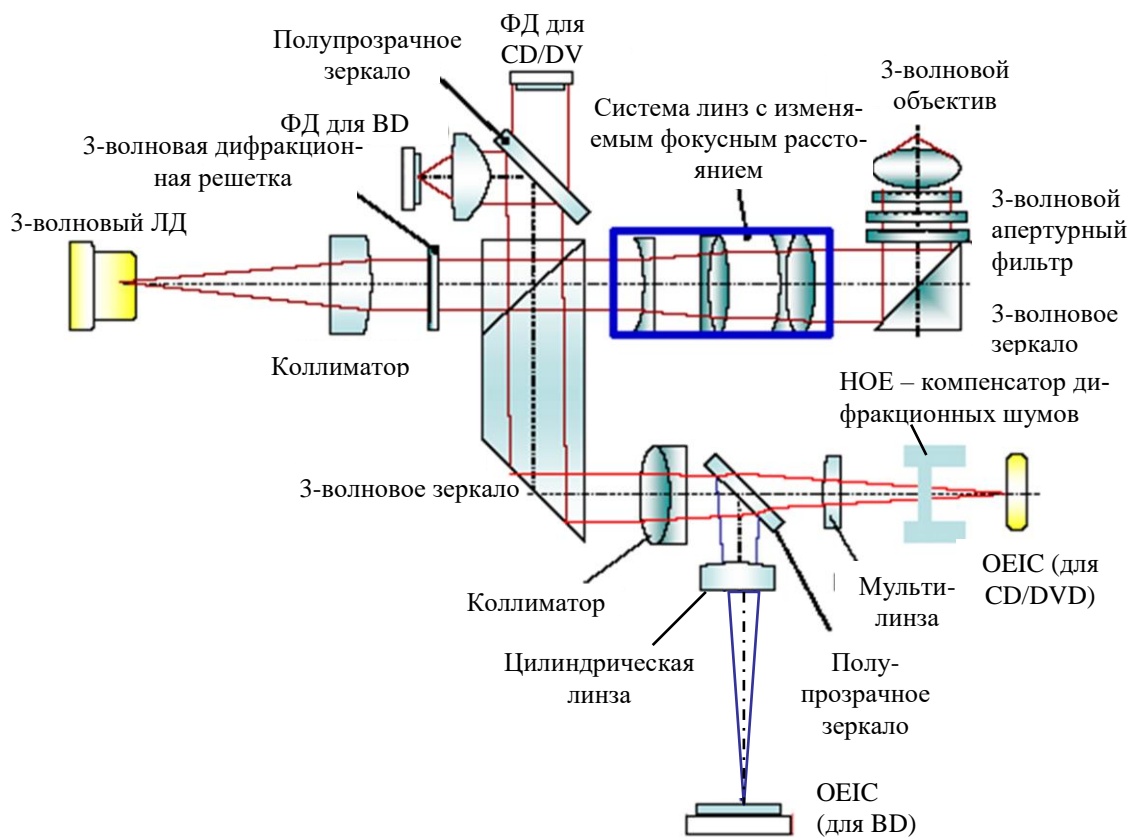


Рис. 11.11. Оптическая схема головки фирмы SONY с 3-волновым лазерным диодом

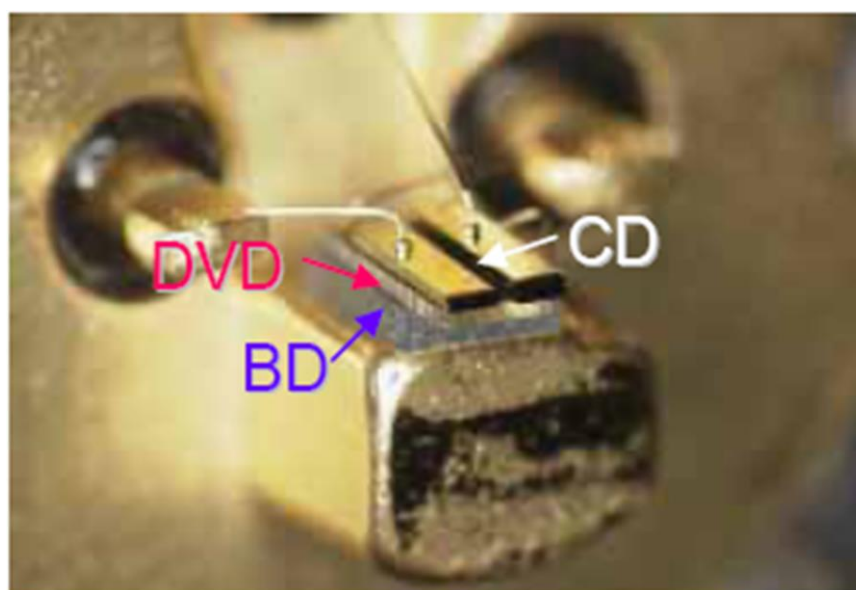


Рис. 11.12. Конструкция комбинированного лазерного диода

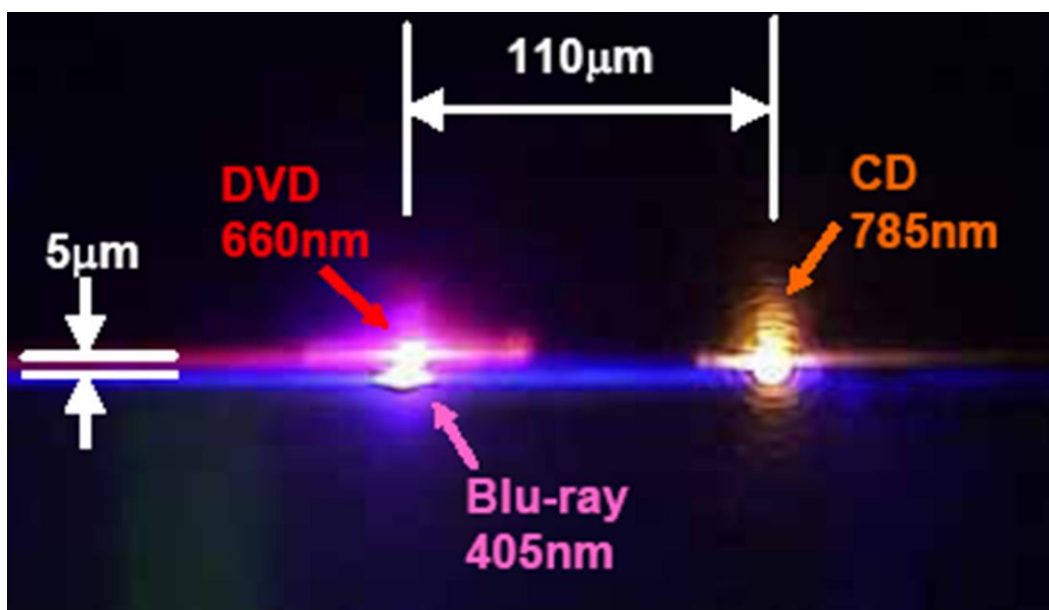


Рис. 11.13. Расположение активных зон, генерирующих излучение разных длин волн, в конструкции комбинированного лазерного диода фирмы SONY

Объектив представляет собой комбинацию из стеклянной асферической линзы и голограммной линзы, подобранных таким образом, чтобы скорректировать сферические aberrации, соответствующие излучению каждой из используемых длин волн.

#### 11.4. КОРРЕКЦИЯ ОШИБОК В ФОРМАТЕ BD

Защита информации от ошибок в формате BluRay осуществляется следующим образом. Последовательность информационных байт делится на массивы по 64 кб в каждом (1 кб равен 1024 байтам, следовательно, 64 кб =  $1024 \times 64 = 65536$  байт). Из этого массива данных формируется **блок коррекции ошибок** или **ECC-блок** (**ECC – Error Correction Code**). Для образования кодовых слов весь массив данных делится на 304 группы из 216 байт. Эти 216 байт являются информационными символами кодового слова кода Рида-Соломона [248,216,32]. По этим 216 символам кодер рассчитывает 32 проверочных символа, формируя, таким образом, кодовое слово из 248 байт. Затем над полученными кодовыми словами производится операция перемежения, в результате которой из них формируется таблица, показанная на рис. 11.14. Физически такая таблица реализуется как область оперативной памяти с соответствующей адресацией.

Последовательность кодовых слов размещается по столбцам таблицы, по два кодовых слова в столбце. В крайнем левом столбце верхние 216

ячеек занимают информационные символы первого кодового слова (первый байт – самый верхний, второй на строчку ниже и т.д.). Следующие 216 ячеек занимают информационные символы второго кодового слова. Еще ниже располагаются 32 проверочных символа первого кодового слова, а под ними – 32 проверочных символа второго кодового слова. Таким же образом заполняется второй столбец таблицы: верхние 216 ячеек занимают информационные символы третьего кодового слова, под ними – 216 информационных символов четвертого кодового слова, ниже – 32 проверочных символа третьего кодового слова, еще ниже – 32 проверочных символа четвертого кодового слова. Подобным же образом заполняются и оставшиеся 150 столбцов.

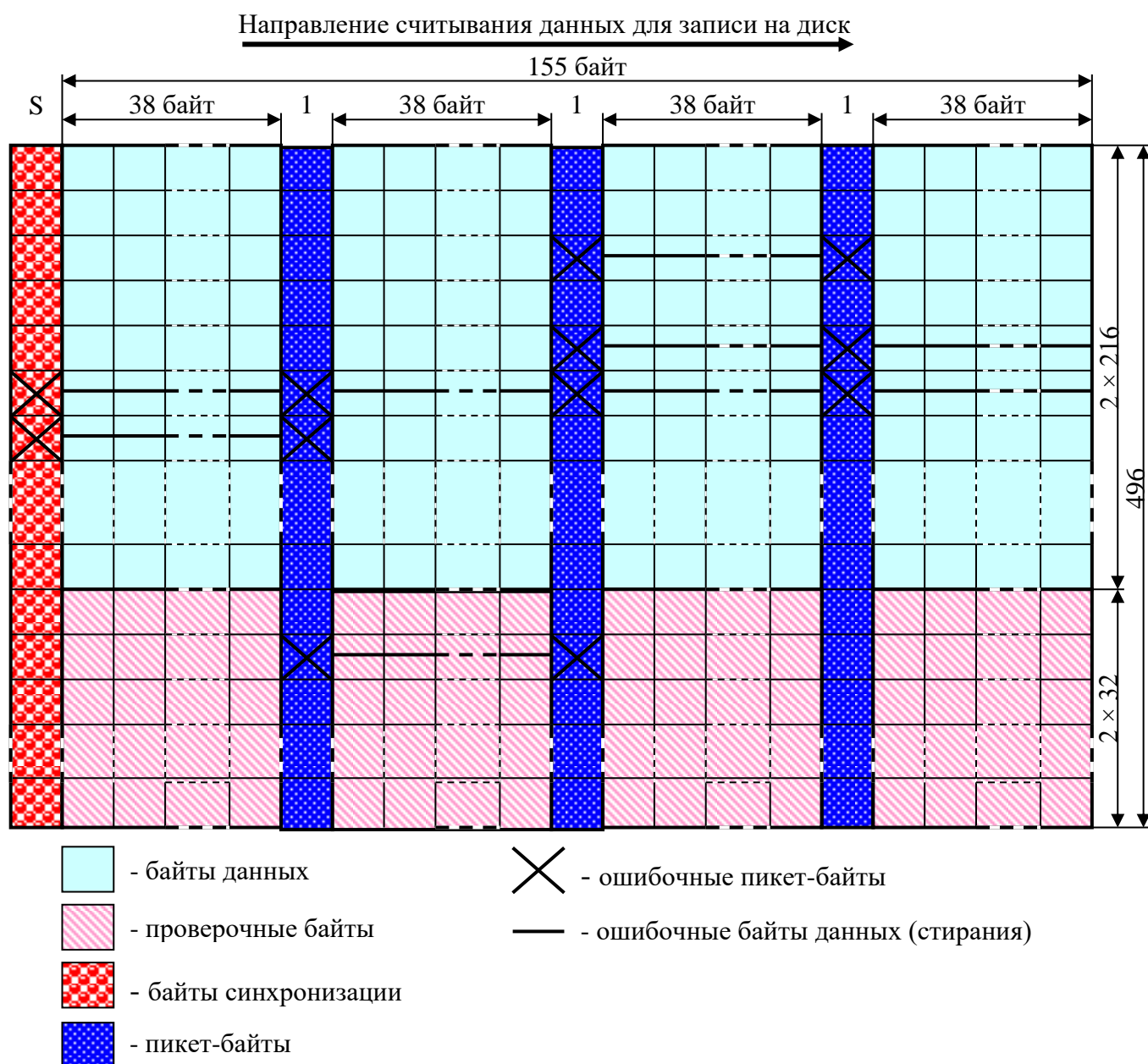


Рис. 11.14. Структура блока ECC в формате BluRay

Считывание информации для кодирования канальным кодом и дальнейшей записи на диск производится по строкам таблицы. Поэтому в результате перемежения символы (байты) одного и того же кодового слова оказываются равномерно распределены на интервале в 65536 байт. Это означает, что при записи на диск они окажутся равномерно распределены на достаточно длинном участке дорожки, благодаря чему достигается очень хорошая защита информации от повреждения при наличии на поверхности диска царапин, пылинок или отпечатков пальцев.

Код Рида-Соломона [248,216,32] относится к классу *кодов с большим минимальным расстоянием*, или *кодам LDC (Long Distance Code)*. Он способен гарантированно обнаружить 32 ошибки, и гарантированно исправить 16 ошибок с неизвестными позициями или 32 ошибки, позиции которых известны заранее (стирания).

Ошибки бывают двух типов: *случайные ошибки*, длина которых редко превышает один символ, и *пакеты ошибок*, длина которых может достигать нескольких десятков и даже сотен символов. Случайные ошибки вызваны в основном дефектами тиражирования или мелкими пылинками и встречаются намного чаще пакетов ошибок. Такие ошибки, несмотря на их многочисленность, неопасны, поскольку легко исправляются кодами Рида-Соломона. Пакеты ошибок возникают при наличии крупных царапин или отпечатков пальцев на поверхности диска. И хотя встречаются они достаточно редко, исправлять их гораздо труднее, поскольку используемый код Рида-Соломона способен исправить только 16 ошибок в кодовом слове. Для того чтобы облегчить работу декодера, в системе BluRay, как и в любой другой системе записи информации, используется перемежение данных, благодаря чему, как говорилось выше, символы одного кодового слова равномерно распределяются на большом участке дорожки записи и никакая, даже самая глубокая и длинная царапина или отпечаток пальца, не смогут стать причиной искажения более чем нескольких символов одного кодового слова.

Тем не менее, для того чтобы можно было обнаружить длинные пакеты ошибок, в системе BluRay используется еще один прием. Между каждыми 38 столбцами байт данных вставляются столбцы из так называемых *пикет-байт* (см. рис. 11.14). Эти пикет-байты также кодируются кодом Рида-Соломона [62,30,32], который называется *BIS-кодом (BIS – Burst Indicator Subcode)* или *пикет-кодом*. Кодовые слова BIS-кода содержат по 30 информационных и 32 проверочных символа в каждом слове. Таким образом, в одном столбце из 496 символов содержится 8 кодовых слов BIS-кода ( $62 \times 8 = 496$ ). Кроме того, над символами BIS-кода также выполняется операция перемежения – эти символы перераспределяются по определенному закону между тремя столбцами. Следует отметить, что и BIS-код и основной код имеют по 32 проверочных символа, что позволяет при декодировании использовать один и тот же декодер.

Самый левый столбец содержит *байты синхронизации*, которые обозначают начало каждой строки таблицы и, также как и пикет-байты, могут использоваться для обнаружения пакетов ошибок.

При воспроизведении диска пикет-код декодируется первым, и если при этом обнаруживается картина ошибок, подобная той, что показана на рис. 11.14, то считается, что символы основных данных в строках между ошибочными пикет-байтами также ошибочны, и в дальнейшем эти символы корректируются как стирания. Если байт синхронизации не опознается, то считается, что он также содержит ошибку и используется как ошибочный пикет-байт. Это позволяет вдвое увеличить корректирующую способность основного кода Рида-Соломона.

Информационные символы BIS-кода содержат адресные данные. Они также кодируются кодом Рида-Соломона [9,5,4], т.е. кодовое слово этого кода содержит 5 информационных символов и 4 проверочных. Эти данные декодируются независимо от данных ECC.

Таким образом, помехоустойчивое кодирование с большой конструктивной длиной вместе с эффектом расфокусировки светового луча на поверхности диска образуют мощную систему защиты информации, содержащейся на диске, от воздействия пыли и грязи (рис. 11.15).

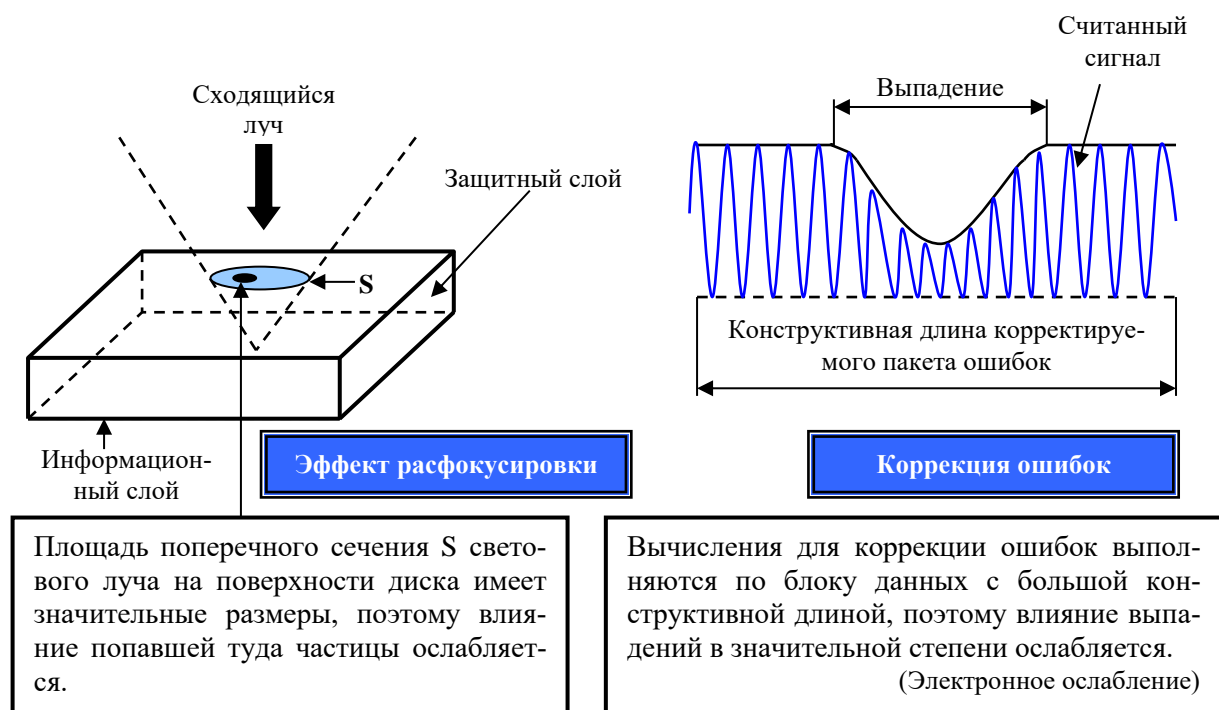


Рис. 11.15. Защитный слой диска играет роль оптического средства ослабления влияния частиц грязи и пыли на поверхности диска, а коррекция ошибок – роль электронного средства ослабления этого влияния. Оба этих средства взаимно дополняют друг друга

На рис. 11.16 приведены сравнительные характеристики блоков ECC в форматах BD и DVD в предположении, что информационный слой у диска DVD, так же, как и у диска BD, находится на расстоянии 0,1 мм от внешней поверхности. Диаметр светового пятна на поверхности диска в обоих случаях будет одинаков – 138 мкм. Размер дефекта, показанный на рисунке, всего 30 мкм, и влияние его на интенсивность отраженного пучка незначительно.

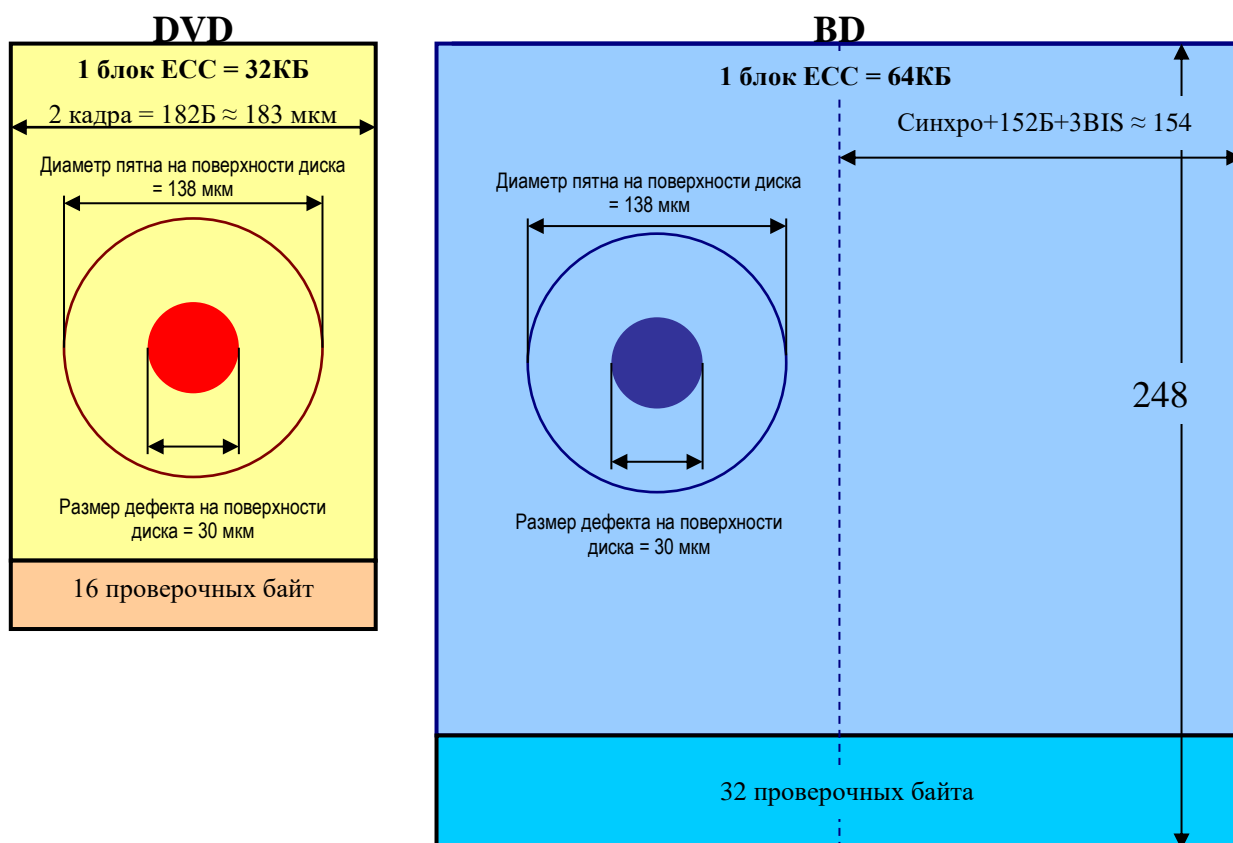


Рис. 11.16. Сравнение блоков ECC BD и DVD в предположении, что толщина защитного слоя у диска DVD также равна 0,1 мм

Размер блока ECC в формате BD в 2 раза больше размера блока ECC в формате DVD – 64 кБ против 32, соответственно. К тому же количество проверочных байт в каждом кодовом слове кода РС формата BD (32) в 2 раза больше количества проверочных байт в кодовом слове кода РС формата DVD (16). В процессе кодирования информационные байты в формате BD дважды подвергаются процедуре перемежения внутри большого блока ECC, поэтому после воспроизведения и выполнения обратной процедуры деперемежения, пакеты ошибок, возникающие из-за наличия крупных дефектов, преобразуются в небольшое число случайных ошибок, которые легко корректируются кодами Рида-Соломона.

## 11.5. КАНАЛЬНАЯ МОДУЛЯЦИЯ В ФОРМАТЕ BD

В оптической записи модуляция физического сигнала определяется двумя различными состояниями поверхности оптического носителя, которые, как правило, связаны с двумя различными значениями (высокое и низкое) отражательной способности *меток* (или пит) и промежутков между ними. Одно из этих физических состояний может быть поставлено в соответствие каналному биту со значением логической «единицы», другое – каналному биту со значением логического «нуля».

Данные в оптической записи обычно представлены в NRZI-форме, когда логической «единице» соответствует изменение уровня сигнала, а «нулю» – сохранение прежнего уровня. Такое представление эквивалентно представлению потока данных в обычной NRZ-форме (логическая «единица» – бит высокого уровня, логический «нуль» – бит низкого уровня), при этом логическая «единица» соответствует началу новой метки или началу нового промежутка между «метками», а логический «нуль» – продолжению метки или промежутка. Канальный поток данных в NRZI-форме можно разделить на последовательность так называемых *пробегов (runs)*, каждый из которых, в свою очередь, состоит из ряда последовательных канальных битов одного уровня. Количество битов в «пробеге» называется *длиной пробега (runlength)*. Небольшая часть дорожки на диске показана на рис. 11.17. Физические метки и промежутки между ними чередуются вдоль всей дорожки на диске, при этом их длина всегда кратна длительности одного канального бита T.

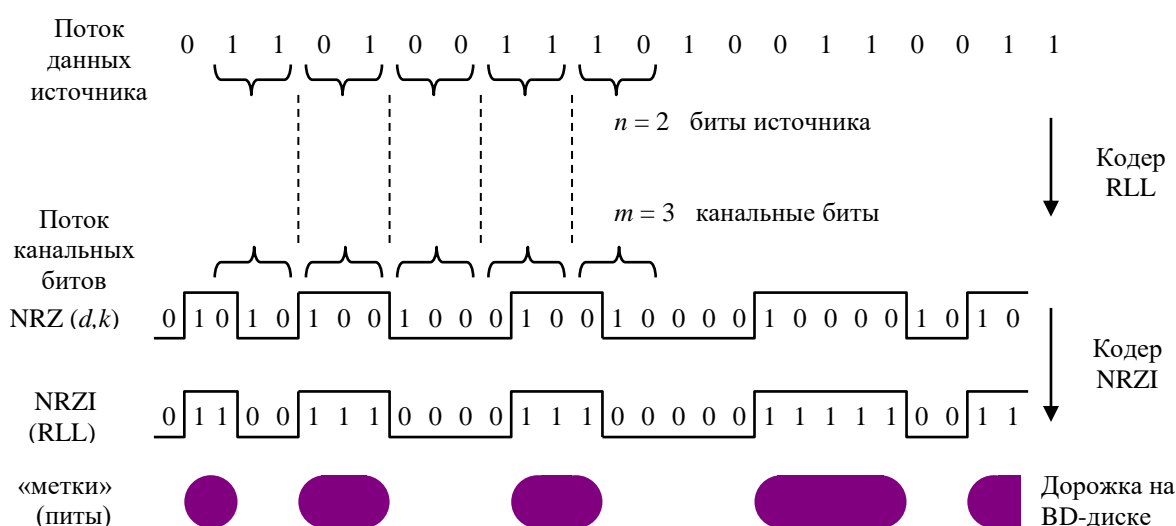


Рис. 11.17. Кодирование с ограничением длины пробега (RLL) для оптической записи на BD-диск

Очень короткие пробеги приведут к уменьшению амплитуды считанного с диска сигнала и, таким образом, к появлению в нем большего коли-



чества ошибок, вызванных воздействием помех. С другой стороны, слишком длинные пробеги приведут к затруднениям при выделении тактового синхросигнала с помощью петли фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), которая регенерирует канальную тактовую частоту, подстраивая ее по перепадам уровня в считанном сигнале. Если перепады уровня будут следовать чересчур редко, то это может привести к потере состояния синхронизма. Для того чтобы устранить слишком короткие и слишком длинные пробеги, используют *канальные коды с ограниченной длиной пробега* или *RLL-коды (RunLength-Limited Codes)*. Такие коды предполагают ограничение количества «нулей» между двумя последовательными «единицами» в NRZ-представлении параметрами  $d$  и  $k$ . Величина  $d$  указывает минимальное количество «нулей», величина  $k$  – максимальное. Следовательно, минимальная длина пробега RLL-кода будет составлять величину  $d+1$ , максимальная –  $k+1$ . Минимальная длина пробега обозначается  $T_{min}$ , максимальная –  $T_{max}$ .

С этими величинами связаны *минимальная длины волны записи  $\lambda_{min}$*  (соответствующая *максимальной частоте  $f_{max}$*  в спектре записываемого сигнала), которая сопоставляется двум последовательным минимальным «пробегам», состоящим из битов разного уровня (рис. 11.18), и аналогично ей *максимальная длины волны записи  $\lambda_{max}$*  (соответствующая *минимальной частоте  $f_{min}$*  в спектре записываемого сигнала), которая сопоставляется двум последовательным максимальным пробегам, состоящим из битов разного уровня.

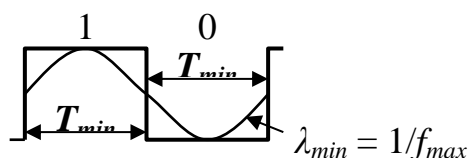


Рис. 11.18. Минимальная длина волны записи

В исходном потоке информационных битов ничто не мешает «единицам» располагаться рядом ( $d=0$ ), а «нулям» – образовывать бесконечно длинные последовательности ( $k=\infty$ ). Для того чтобы можно было обеспечить выполнение требований на ограничение длины пробега, необходимо исходные группы из некоторого числа  $n$  битов источника (информационные слова) преобразовать в группы (кодовые слова) с большим их числом  $m$ . Если  $m$  достаточно велико, то из общего множества  $2^m$  слов всегда можно выбрать  $2^n$  кодовых слов, таких, что заданные ограничения на длину пробега будут выполняться. Отношение  $n/m$  принято называть *скоростью кода  $R$* . Поскольку  $n$  всегда меньше  $m$ , скорость кода  $R$  всегда меньше 1.

Все RLL-коды, используемые в оптической записи, относятся к категории кодов *DC-free*, т.е. кодов, которые не имеют постоянной составляющей



щей в спектре сигнала записи и почти не содержат низкочастотных составляющих. Если считать, что каждый канальный бит  $b_i$  может принимать всего два значения – «+1» и «-1», то последовательность  $b_1, b_2, \dots, b_i$  будет принадлежать к категории *DC-free*, если текущая величина числовой суммы (DSV – Digital Sum Value)

$$DSV_i = \sum_{j=-\infty}^i b_j$$

принимает только ограниченное число значений вблизи 0.

Ограничение уровня низкочастотных составляющих в спектре кодированного сигнала необходимо по ряду причин.

Во-первых, для отделения информационного сигнала от низкочастотных шумов, вызванных наличием пыли и отпечатков пальцев на поверхности диска.

Во-вторых, для того, чтобы обеспечить корректное формирование уровней ограничения считанного с диска высокочастотного сигнала при выделении из него цифрового информационного сигнала и сигнала тактовой синхронизации.

В-третьих, для обеспечения корректной работы сервосистем воспроизводящего устройства (автофокусировки и автотрекинга). Поскольку эти системы оперируют с сигналами ошибок позиционирования в области частот, соизмеримых со скоростью вращения диска, то присутствие в информационном сигнале низкочастотных составляющих может быть воспринято ими как ошибка позиционирования.

Непрерывный контроль значения DSV позволяет управлять уровнем постоянной составляющей в спектре записываемого сигнала. Для этого могут быть предусмотрены различные методы. Одним из таких методов является выбор кодовой комбинации из нескольких альтернативных вариантов, имеющих разное значение DSV. Другой метод состоит в том, что между двумя соседними кодовыми словами предусматриваются один или несколько соединительных разрядов, которые сами по себе информации не содержат, но обеспечивают минимизацию текущего значения DSV путем формирования, при необходимости, на одной из позиций логической «единицы». Как следует из вышесказанного, после модуляции сформированной последовательности по методу NRZI, каждая «единица» инвертирует существующий уровень сигнала, а вместе с ним и DSV последующего кодового слова. Если, к примеру, значение DSV в конце очередного кодового слова равно +3, а DSV следующего за ним слова +4, то при их объединении значение DSV по окончании этого слова станет равным +7. Если же между этими словами вставить ничего не значащую «единицу», то значение следующего слова изменится с +4 на -4, и суммарное DSV в конце последнего слова станет равным -1, что, разумеется, будет способствовать уменьшению уровня постоянной составляющей в спектре кодированного сигнала.

Для модуляции данных, записываемых на диск BD, используется специально разработанный для этого код **17PP**. Обозначение 17PP (**Parity preserve Prohibit**) должно указывать на то, что код имеет не менее одного «нуля» между двумя соседними «единицами» ( $d = 1$ ) и не более семи ( $k = 7$ ). Затем кодированная последовательность модулируется по способу NRZI, что позволяет получить значение минимальной длины пробега  $T_{min} = 2$ , максимальной –  $T_{max} = 8$ .

Такие ограничения длины пробега обеспечивают хорошую самосинхронизируемость кодированной последовательности и повышение плотности записи информации примерно на треть. Коэффициент повышения плотности записи, полученный за счет использования канального кода 17PP,  $K = (d+1) \cdot n/m = (1+1) \cdot 2/3 = 4/3 = 1,33$ . Минимальная длина волны записи  $\lambda_{min} = 4T_k$ , максимальная  $\lambda_{max} = 16T_k$ . Окно детектирования  $t_w = 2/3 T = \pm 1/3 T$ .

По сути, код 17 PP является кодом 2/3 ( $n = 2, m = 3$ ), однако здесь одновременно могут кодироваться (подвергаться преобразованию) не только пары исходных информационных бит, но и четверки, шестерки и даже восьмерки бит ( $i = 1, 2, 3$  и  $4$ ). Для минимизации постоянной составляющей используется контроль текущего значения DSV, и все замены производятся исходя из того, чтобы значение DSV было возможно ближе к нулю. Основной алгоритм замены показан в табл. 11.2.

Таблица 11.2

**Алгоритм кодирования кодом 17 PP**

| Информационные слова | Кодовые слова   |
|----------------------|-----------------|
| $i = 1$              |                 |
| 11                   | *0*             |
| 10                   | 001             |
| 01                   | 010             |
| $i = 2$              |                 |
| 00 11                | 010 100         |
| 00 10                | 010 000         |
| 00 01                | 000 100         |
| $i = 3$              |                 |
| 00 00 11             | 000 100 100     |
| 00 00 10             | 000 100 000     |
| 00 00 01             | 010 100 100     |
| 00 00 00             | 010 100 000     |
| $i = 4$              |                 |
| 00 00 10 00          | 000 100 100 100 |
| 00 00 00 00          | 010 100 100 100 |

Синхрогруппа, используемая в формате BluRay, содержит два под-ряд следующих интервала между соседними перепадами уровня, равных

$9T_k$ , т.е. превышающих максимально возможный в потоке кодированных данных ( $8T_k$ ) и имеет конфигурацию, показанную на рис. 11.19. Наличие таких нестандартных интервалов облегчает опознание синхрокомбинации блоком цикловой синхронизации при наличии искажений.

Обозначение \*0\* говорит о том, что если предыдущее кодовое слово оканчивается на «1» (xx1), то \*0\* = 000, а если на «0» (xx0), то \*0\* = 101.

Символ, обозначенный как «х» имеет значение «1», если предыдущее кодовое слово заканчивается «нулем», и значение «0», если предыдущее кодовое слово заканчивается «единицей».

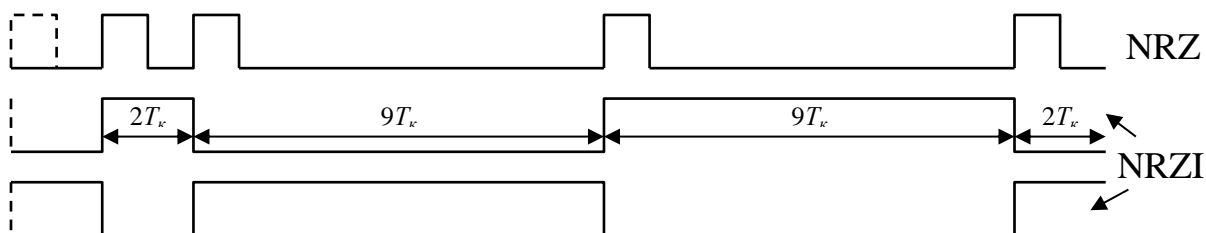


Рис. 11.19. Конфигурация синхрогруппы в формате BluRay

Итак, код 17PP имеет следующие технические характеристики:

- минимальная длина волны записи  $\lambda_{min} = 4T_{кан}$ ;
- максимальная длина волны записи  $\lambda_{max} = 16T_{кан}$ ;
- минимальное количество «нулей» между двумя соседними «единицами»  $d = 1$ ;
- максимальное количество «нулей» между двумя соседними «единицами»  $k = 7$ ;
- минимальная длина пробега  $T_{min} = 2$ ;
- максимальная длина пробега  $T_{max} = 8$ ;
- скорость кода  $R = 2/3$ ;
- коэффициент повышения плотности записи  $K = 1,33$  (плотность записи увеличилась);
- окно детектирования  $t_w = 2/3 T = \pm 1/3 T$ .

## 11.6. ФОРМАТ КОДИРОВАНИЯ АДРЕСНЫХ ДАННЫХ ВОБУЛЯЦИЕЙ НАПРАВЛЯЮЩЕЙ ДОРОЖКИ

Записываемый диск BD-R и перезаписываемый диск BD-RE имеют один и тот же формат данных, которые содержатся в законе вобуляции направляющей дорожки и формируются еще при изготовлении диска.

Направляющая дорожка с вобуляцией ее краев необходима, прежде всего, для того чтобы во время записи луч лазера мог следовать по поверхности диска точно по спирали с заданным шагом и с заданной линейной скоростью, формируя дорожку записи. Кроме того, модулируя закон вобуляции, можно заносить на диск дополнительные данные, необходимые как

для идентификации фрагментов записываемого материала, так и для идентификации самого диска. В формате BluRay вобуляция содержит адресные данные, позволяющие точно определять местонахождение любого участка дорожки от зоны ввода до зоны вывода, а также дополнительные данные, характеризующие конкретный диск.

Записываемые на VD-диск питы очень маленькие, а их длина является величиной информативной. Поэтому и при их записи, и при воспроизведении системы привода оптического блока должны работать с чрезвычайно высокой точностью, чтобы временные соотношения между размерами пит не нарушались. Для этого вобуляция на основной частоте на протяжении всего диска должна быть одинаковой и непрерывной. Поскольку запись данных всегда выполняется синхронно с колебаниями вобуляции, размеры пит всегда пропорциональны ее периоду. По этой причине емкость диска естественным образом зависит от периода колебаний вобуляции и таким способом задается. Например, у однослойного диска емкостью 25 Гб длина периода вобуляции составляет 5,14 мкм, а у однослойного диска емкостью 27 Гб – 4,47 мкм. При этом в одном периоде вобуляции укладывается ровно 69 периодов канальной тактовой частоты (69 канальных бит).

Очевидно, что модуляция основной частоты вобуляции для записи дополнительных данных должна осуществляться очень деликатными методами, чтобы при этом не нарушался синхронизм с записываемыми данными. Кроме того, модуляция должна быть устойчива к различным типам искажений, присущих оптическим дискам и системам для их воспроизведения. Существует четыре типа таких искажений.

1. **Шум.** Обусловлен неровностями направляющей канавки, наличием на ней регистрирующего слоя и записанной на этом регистрирующем слое информацией.

2. **Сдвиг вобуляции.** Это явление наблюдается, когда на этапе завершения процедуры поиска считывающий блок вобуляцию искомой дорожки уже обнаруживает, но все еще находится несколько в стороне от своей нормальной позиции (на осевой линии дорожки).

3. **Биения вобуляции.** Биения вобуляции – это результат взаимодействия с соседними дорожками. Поскольку периферийная часть считывающего луча (там, где энергия светового пучка уже очень мала, но все-таки не равна нулю) попадает на соседние дорожки, между вобуляцией основной дорожки и вобуляцией соседних дорожек возникают биения (перекрестные искажения).

4. **Дефекты поверхности.** Локальные дефекты, обусловленные наличием пылинок или царапин на поверхности диска.

После проведения многочисленных исследований и экспериментов, метод модуляции, устойчивый к характерным искажениям оптической записи, был найден. В качестве метода модуляции было принято решение использовать комбинацию двух технологий: *модуляции минимальным*

*сдвигом переключения MSK (Minimum-Shift-Keying) и вобуляции пилообразной формы STW (Saw-Tooth-Wobble).*

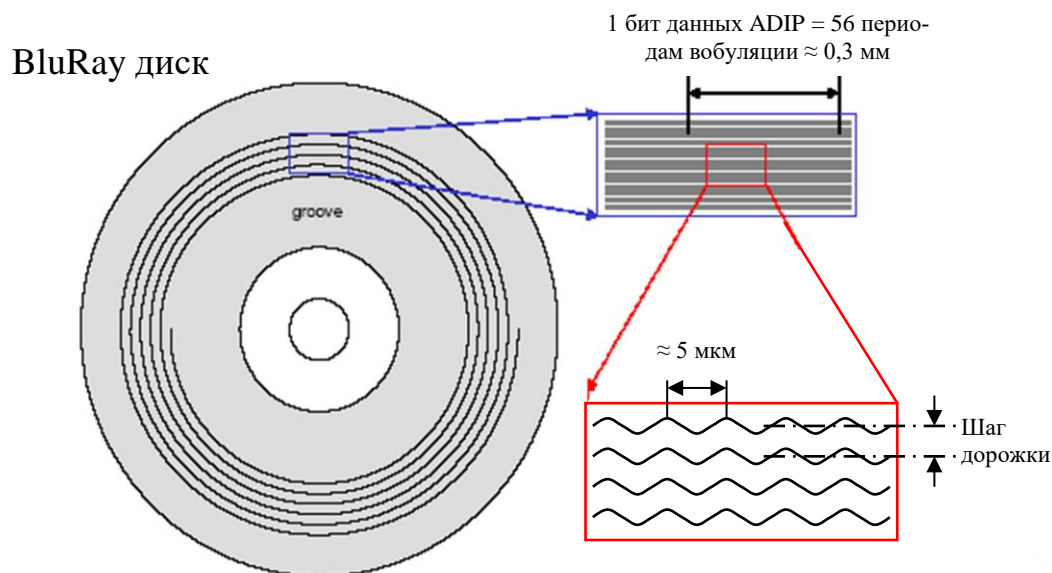


Рис. 11.20. Формирование данных ADIP на поверхности BluRay диска

Направляющую дорожку с вобуляцией, имеющую вид спирали, можно рассматривать как последовательность элементарных фрагментов, соответствующих битам данных адресной информации, которые называются **данными ADIP (ADdress-In-Pre-groove)**, как показано на рис. 11.20. Одному биту данных ADIP соответствуют 56 периодов вобуляции. На рис. 11.21 показаны диаграммы элементарных фрагментов, соответствующих «0» и «1» данных ADIP.

Вобуляция MSK-типа состоит из трех колебаний. Средняя из трех волн имеет инвертированную полярность в сравнении с основным косинусоидальным колебанием  $\cos(\omega t)$ . Эта волна вставлена между двумя колебаниями с увеличенной в 1,5 раза частотой –  $\cos(1,5\omega t)$  (рис. 11.21). Такое сочетание колебаний обеспечивает непрерывность волны и легко детектируется при воспроизведении. Поскольку вобуляция MSK-типа всегда одинакова, то значение бита данных ADIP определяется выбором ее позиции.

Вобуляция STW-типа бывает двух типов. Форма волны, соответствующая «0» данных ADIP имеет крутой спад в направлении к внешней стороне диска (той, откуда движется луч) и пологий в направлении к внутренней стороне диска (той, куда движется луч). Форма волны, соответствующая «1» данных ADIP, наоборот, имеет крутой спад в направлении к внутренней стороне диска и пологий – к внешней его стороне (см. рис. 11.21)

Математически STW-колебание выражается как сумма основной косинусоидальной волны  $\cos(\omega t)$  и ее второй гармоники  $\cos(2\omega t)$  с уменьшенной в 4 раза амплитудой. Полярность второй гармоники определяет принадлежность STW-колебания к логической «1» или «0» данных ADIP.

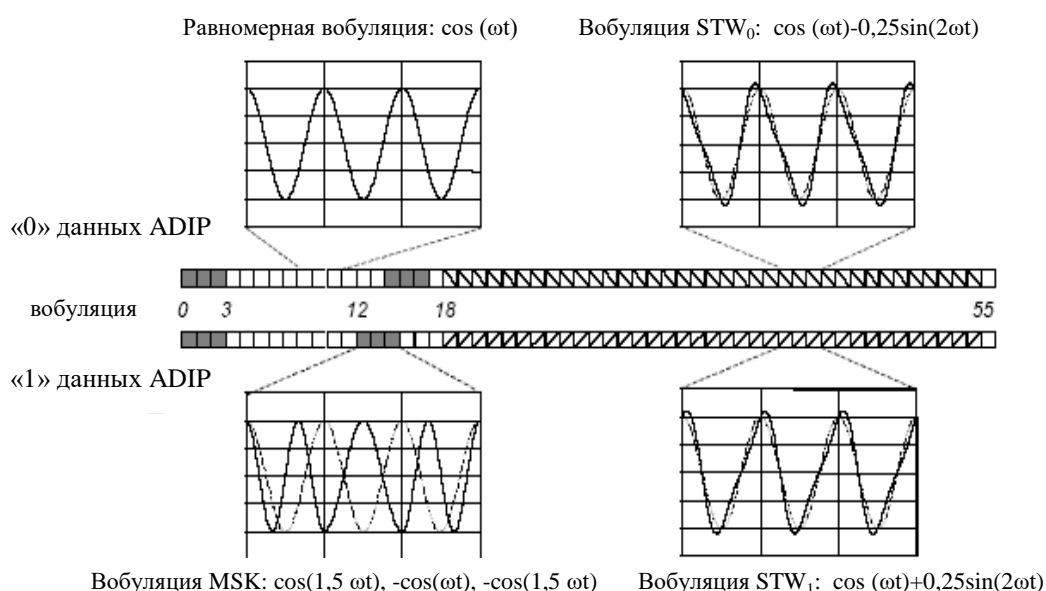


Рис. 11.21. Диаграммы элементарных фрагментов из 56 периодов модуляции, соответствующих «0» и «1» данных ADIP

Логическому «нулю» соответствуют: 3 первых периода модуляции MSK, 11 периодов равномерной модуляции, 3 периода модуляции MSK, один период равномерной модуляции, 37 периодов модуляции STW<sub>0</sub> и 1 период равномерной модуляции. Логической «единице» соответствуют: 3 первых периода модуляции MSK, 9 периодов равномерной модуляции, 3 периода модуляции MSK, 3 периода равномерной модуляции, 37 периодов модуляции STW<sub>1</sub> и 1 период равномерной модуляции

Каждый бит данных ADIP начинается с группы колебаний MSK-типа, которая в этом случае выполняет роль синхрокомбинации и служит для идентификации начала бита данных ADIP. Разница в положении второй группы MSK указывает на то, является ли данный бит «единицей» или «нулем». Между первой (синхронизирующей) и второй группой MSK расположена последовательность колебаний основной формы – 11 в случае, если данный бит является «нулем», и 9 – если «единицей». Колебания с 18 по 54 модулируются по методу STW<sub>0</sub> или STW<sub>1</sub>.

Последовательность из 83 бит данных ADIP образует слово данных адреса ADIP. Несмотря на то, что сигналы MSK и STW существенно различны, их детектирование может выполняться с помощью одной и той же

схемы. Например, с помощью схемы, показанной на рис. 11.22. При этом сигналы MSK и STW могут детектироваться как независимо друг от друга, так и одновременно.

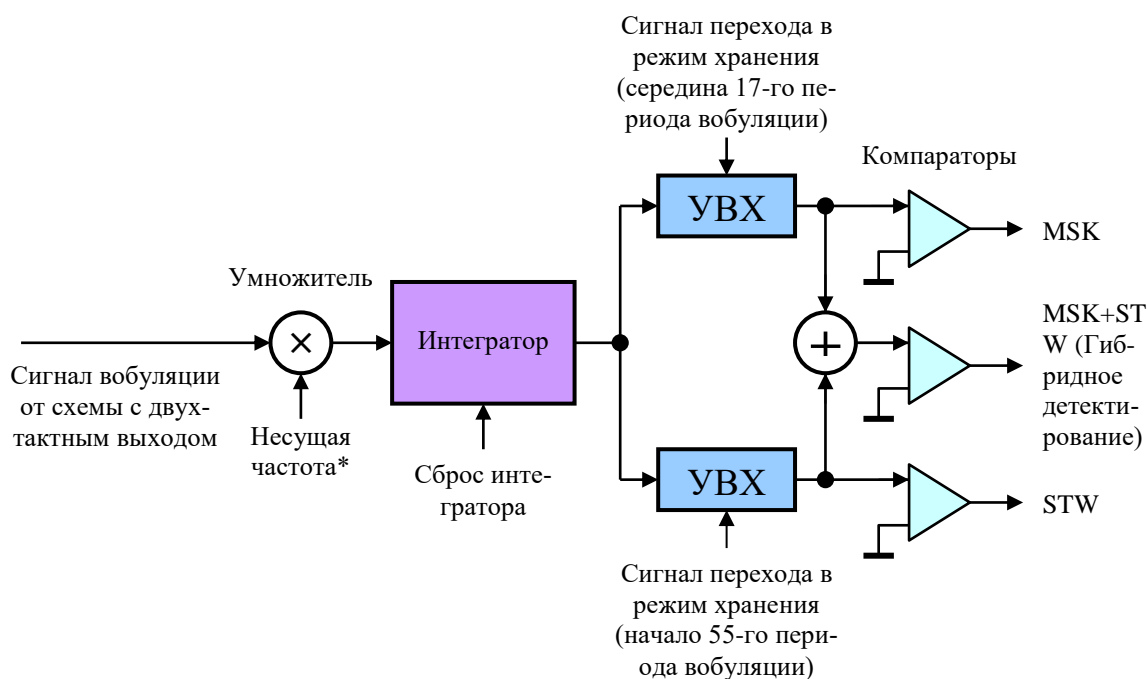


Рис. 11.22. Схема детектирования сигналов MSK и STW

\* Когда детектируется сигнал MSK, то несущей служит первая гармоника основного колебания возбуждения (957 кГц), а когда детектируется сигнал STW – его вторая гармоника (1913 кГц)

## 11.7. ФАЙЛОВАЯ СИСТЕМА ВД-ДИСКОВ

Файловая система дисков BluRay полностью соответствует стандартному формату **UDF (Universal Disc Format)**, установленному для оптических дисковых носителей информации.

Спецификация на формат UDF, реализующий Международный стандарт ISO/IEC 13346, была разработана Ассоциацией по технологиям оптических накопителей OSTA (Optical Storage Technology Association) для того, чтобы устранить зависимость структуры данных на оптических дисках от типа используемого носителя, платформы и операционной системы компьютера и таким образом обеспечить совместимость данных на оптических дисках с наиболее распространенными операционными системами ПК – в первую очередь корпораций Microsoft (Windows) и Apple (Macintosh).

Формат UDF, прежде всего, ориентирован на перезаписываемые варианты оптических носителей (CD-RW, DVD-RW, DVD+RW, DVD-RAM, BD-RE), но в силу того, что у носителей последних поколений (DVD, BD) файловые системы одинаковы у всех разновидностей дисков (ROM, R,

RW, RE), он также относится и к носителям только для считывания (ROM). Исключения составляют диски CD-ROM (а также записанные в том же формате диски CD-R/RW), файловая система которых была разработана раньше формата UDF и поэтому соответствует более раннему стандарту ISO 9660.

Следует отметить, что UDF – это не один формат, а, скорее, семейство форматов, которое постоянно развивается и совершенствуется вместе с развитием и совершенствованием операционных систем. Первая версия формата – UDF 1.0 совместима с Windows 98 и ранними версиями ОС корпорации Apple, а последние UDF 2.5, UDF 3.0 – с Windows Vista и MAC OS X 10.5.

Версия UDF 2.5 была разработана специально для использования с носителями большой емкости последнего поколения и предусматривает дублирование файлов вспомогательных данных (метаданных). Вместо одного массива метаданных (Metadata File), как в более ранних версиях UDF-формата, здесь при записи формируется еще и их дубликат (Metadata Mirror File). В первую очередь это позволяет повысить устойчивость метаданных к повреждениям, поскольку обращение к ним производится гораздо чаще (как при считывании информации, так и при ее перезаписи), чем к основным данным (данным пользователя), и в зоне, где они располагаются на диске, могут со временем появиться дефекты, вызванные частым воздействием лазерного излучения. Кроме того, удвоение метаданных обеспечивает более быстрый поиск нужного фрагмента, сканирование диска и выполнение таких утилит, как самопроверка диска.

Таким образом, версия UDF 2.5 обеспечивает сближение технического исполнения и систем управления компьютерных дисководов BluRay и бытовых рекордеров.

**Метаданные** – это «данные о данных», т.е. разнообразная информация о том, где на диске находится то, что пользователь (или компьютерная программа, управляющая считывающим устройством) хочет в данный момент отыскать (файлы доступа и директории). Метаданные аналогичны по содержанию служебной группе (субданным) в формате CD-Audio. Однако, поскольку на перезаписываемых дисках последнего поколения отдельные файлы могут быть разбросаны по всему диску (как на жестком диске компьютера), в метаданных содержится еще и информация о местонахождении каждого из фрагментов таких файлов.

Расположение на диске BluRay зон записи различных типов файлов показано на рис. 11.23.

В соответствии со спецификацией UDF, информация на любом диске BluRay организована в логические сектора размером в 2 кб и блоки коррекции ошибок ECC размером в 64 кб. Таким образом, каждый блок ECC содержит 32 логических сектора.



Тем не менее требования UDF к размерам файлов и к их структуре для каждого из типов носителей (BD-RE, BD-R, BD-ROM) несколько отличаются.

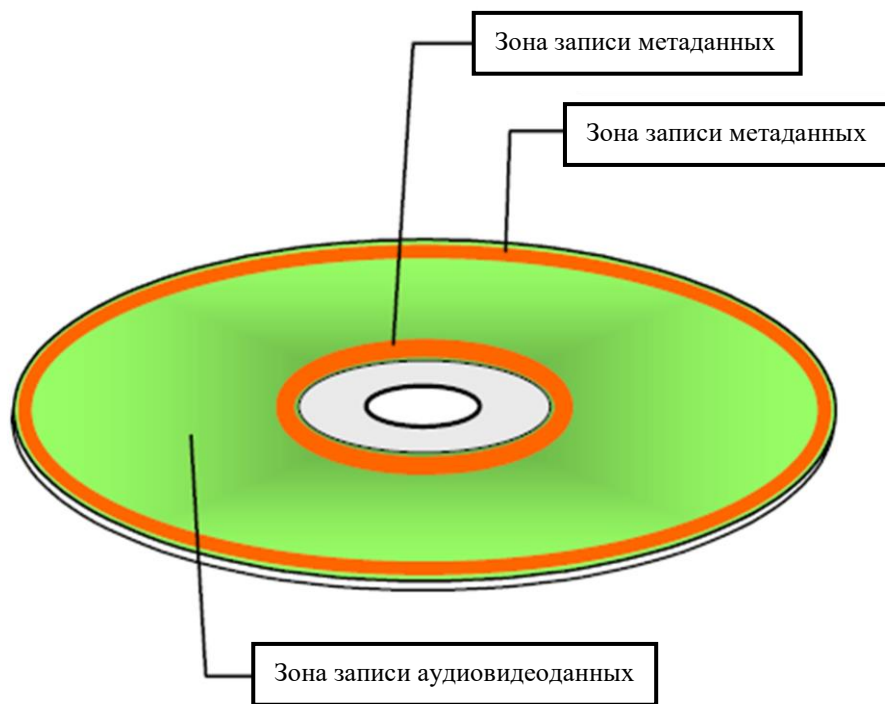


Рис. 11.23. Расположение зон записи различных видов данных на диске

В соответствии со спецификацией UDF, информация на любом диске BluRay организована в логические сектора размером в 2 кб и блоки коррекции ошибок ECC размером в 64 кб. Таким образом, каждый блок ECC содержит 32 логических сектора.

Тем не менее требования UDF к размерам файлов и к их структуре для каждого из типов носителей (BD-RE, BD-R, BD-ROM) несколько отличаются.

Основным назначением диска BD-RE является запись аудиовизуальных программ с качеством, соответствующим формату HDTV. Правила размещения данных на поверхности носителя играют ключевую роль в обеспечении процесса записи и перезаписи таких программ на диск BD-RE. Эти данные делятся на два типа: данные, относящиеся непосредственно к записываемой аудиовидеоинформации (данные пользователя), и данные о размещении данных пользователя на поверхности диска (метаданные). Метаданные обеспечивают размещение данных пользователя на свободной площади носителя при записи и поиск нужных фрагментов при воспроизведении.

Файловая система оперирует данными на уровне логических секторов и обеспечивает выполнение функций записи и считывания информации.

Объемы аудиовидеоданных и метаданных очень сильно отличаются по размерам – если объем первых может достигать гигабайта и более, то объемом соответствующих ему метаданных может составлять от нескольких килобайт до нескольких мегабайт. Однако при воспроизведении какой-то конкретной программы, поток аудиовидеоданных в течение какого-то определенного временного интервала будет непрерывным, а вот обращение к метаданным при этом будет гораздо более частым, во-первых, потому что необходимо постоянно считывать данные для контроля процесса воспроизведения и для визуализации на дисплее, во-вторых, потому что фрагменты одной видеопрограммы могут размещаться в разных местах дискового пространства. Еще более сложной ситуация будет, если требуется воспроизводить диск по заранее заданной программе. Некоторая информация, характеризующая процедуры обращения к данным пользователя и метаданным, приведена в табл. 11.3.

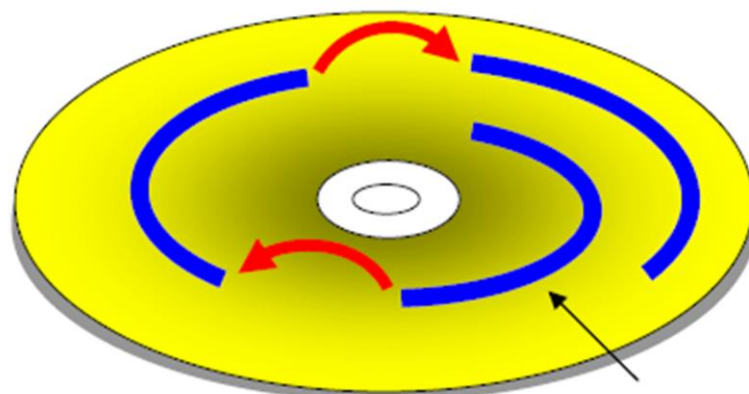
Таблица 11.3

**Разница между файлами основных и вспомогательных данных**

| Данные   | Аудиовидеоданные   | Метаданные   |
|--|--|--|
| Размер файла   | Большой (от нескольких мегабайт до нескольких гигабайт)  | Небольшой (от нескольких килобайт до нескольких мегабайт)  |
| Частота обращения                                    | Малая  | Большая  |
| Временные характеристики процессов записи/считывания | В реальном масштабе времени  | Соответствие реальному масштабу времени не требуется   |
| Влияние ошибок                                       | Влияние ошибок второстепенно. Соответствие реальному масштабу времени является более важным, чем выполнение процедуры устранения ошибок, даже когда они присутствуют | Дублирование записи и процедура устранения ошибок очень важны, поскольку наличие ошибок может привести к серьезным проблемам |
| Зона размещения                                      | В средней части диска  | У внешнего и внутреннего диаметров диска. Данные дублируются   |

Многokrатно выполняемые процедуры записи, стирания и редактирования данных приводят к тому, что на диске могут образовываться небольшие зоны незаполненного пространства, разбросанные по всему диску. Эти зоны могут быть использованы при записи очередного файла. В результате такой файл, который с точки зрения пользователя представляет собой единое целое и должен воспроизводиться непрерывно в реальном масштабе времени, будет, тем не менее, состоять из большого числа отдельных фрагментов, расположенных в разных местах на диске.

При воспроизведении такого файла считывающий узел (оптическая головка) будет вынужден совершать скачки от одного фрагмента дорожки к другому, перемещаясь вдоль радиуса диска (рис. 11.24). Будет при этом также изменяться скорость вращения диска. Во время выполнения скачка поток считываемых с диска данных неизбежно будет прерываться. Однако это никак не должно отражаться на процессе декодирования и воспроизведения видеопрограммы – она при этом прерываться не должна.



Фрагмент дорожки

Рис. 11.24. Воспроизведение файла, записанного на фрагментах дорожки

Считываемая с диска информация, как известно, вначале записывается в буферную память. Для того чтобы обеспечить непрерывность воспроизведения видеопрограммы, данных в буферной памяти должно быть столько, чтобы при выполнении скачка они не успели закончиться до того момента, когда воспроизведение вновь возобновится. Для этого скорость заполнения буферной памяти  $R_{UD}$  должна быть выше, чем скорость  $R_{MAX}$  потока считываемых из нее данных (рис. 11.25, 11.26). Кроме того, спецификация на файловую систему BluRay (UDF) оговаривает минимальный размер фрагмента дорожки, на который еще можно производить запись.

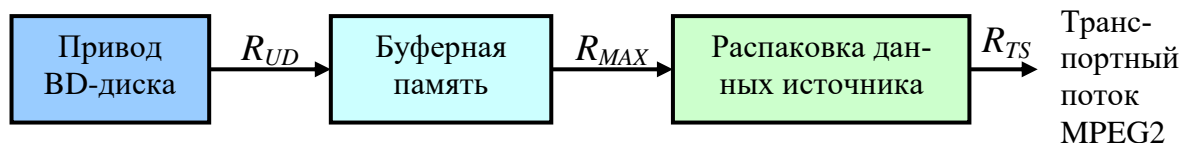


Рис. 11.25. Использование буферной памяти при считывании данных с BD-диска

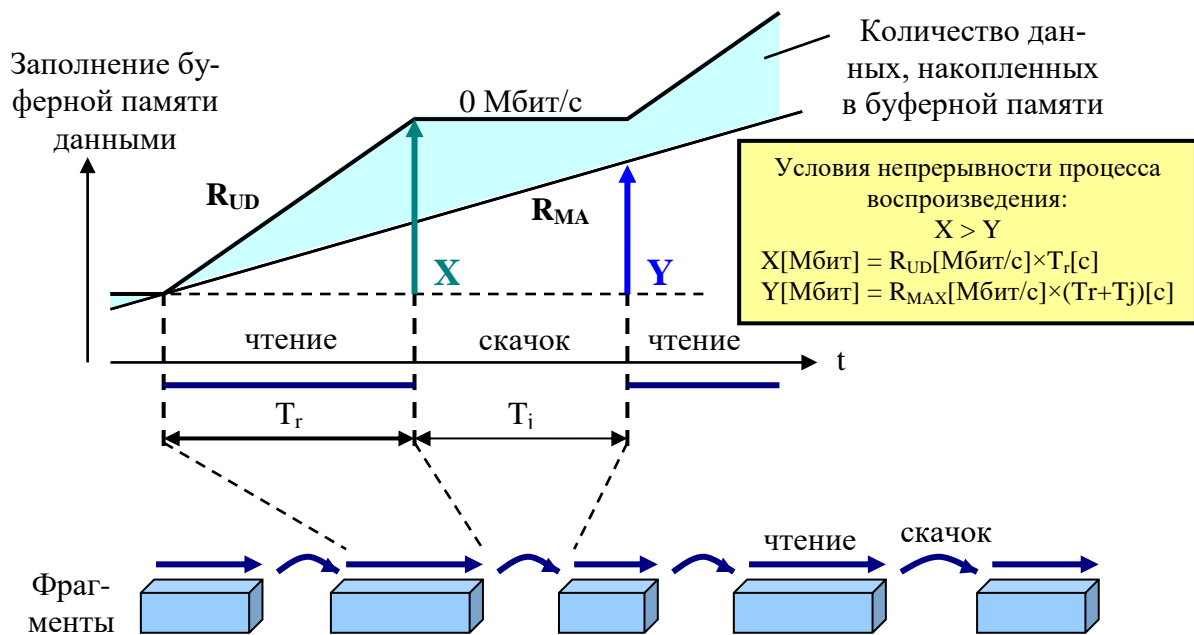


Рис. 11.26. Процесс считывания файла аудиовидеоданных, записанного на фрагментах дорожки, и условие непрерывности процесса воспроизведения

## 11.8. СТРУКТУРА ДАННЫХ

На дисках CD-ROM и DVD-ROM, а также на CD-R/RW и DVD-R/RW отдельные блоки данных записывались без промежутка, а в CD-Audio еще и с наложением, т.е. невозможно выделить отдельный, не связанный с другими блоками, массив данных. При записи дисков CD-R/RW и DVD-R/RW это затрудняло формирование программ из отдельных, не связанных друг с другом фрагментов. В формате BD этот недочет решили исправить. Здесь отдельные блоки данных по 64 кбайт (блок ECC) разделены промежутками, равными по длине двум кадрам, которые сопоставляются одной строке блока ECC. Всего таких кадров в блоке данных 496. Новая структурная единица в формате BluRay называется **физическим кластером**. Размер физического кластера 498 кадров.

Промежутки между блоками необходимы для того, чтобы при записи отдельных фрагментов программы на записываемые диски (BD-R, BD-RE) системы слежения и синхронизации могли подготовиться к очередному циклу записи. При этом предполагается, что диск может быть уже частично записан, и запись нового фрагмента должна производиться на свободные места, в обход уже записанных.

Промежуток между блоками на записываемых дисках состоит из двух частей – вводной, размер которой составляет 1,43 кадра, и выводной, размер которой 0,57 кадра, сумма их как раз и равна двум кадрам (рис. 11.27).

Разметка физического кластера выполняется вобуляцией направляющей дорожки.

Дискам BD-ROM промежутки между блоками не требуются, однако для того, чтобы согласовать временные соотношения с дисками BD-R/RE, здесь также предусмотрены интервалы между блоками данных, равные интервалам на записываемых дисках – те же самые два кадра. Этот интервал и выполнен как два обычных кадра в зоне данных, каждый из которых имеет в начале точно такие же синхрогруппы, как и все прочие кадры.

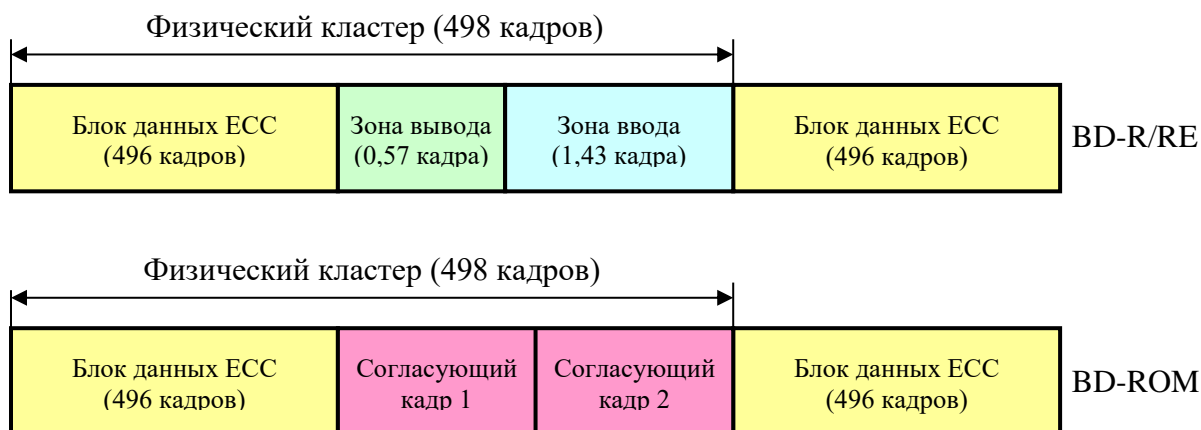


Рис. 11.27. Структура данных на дисках BD-R/RE и BD-ROM

## 11.9. ПРИНЦИПЫ ЗАПИСИ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ДИСКОВ BD-RE/R

### 11.9.1. ДИСКИ BD-RE

Блок-схема устройства записи/воспроизведения дисков BD-RE показана на рис. 11.28. Цифровой сигнал, кодированный по правилам 17PP, в NRZI-представлении поступает на вход формирователя импульсов записи, где в соответствии с определенными правилами, которые будут рассмотрены ниже, формируются последовательности импульсов с необходимыми характеристиками. Этими импульсами модулируется мощность лазера, излучение которого через оптическую систему направляется на регистрирующий слой диска. В результате воздействия модулированного лазерного излучения на диске формируются метки и промежутки между ними, длина которых соответствует импульсам кода 17PP. Конструкция оптической головки обеспечивает компенсацию сферических aberrаций, которые могут возникать при записи информации на двухслойный диск.

При воспроизведении считанный сигнал вначале поступает на эквалайзер, который выравнивает его по уровню и затем направляет подготовленный таким образом сигнал на компаратор и в петлю фазовой автоподстройки частоты (ФАП). С помощью петли ФАП производится выделение

канальной тактовой частоты, которая также подается на соответствующий вход компаратора. Компаратор сравнивает уровень входного сигнала с уровнем его постоянной составляющей и формирует двухуровневые импульсы, длина которых кратна периоду выделенной с помощью петли ФАП тактовой частоты. Далее последовательность импульсов поступает на вход схемы коррекции длины импульсов по максимуму правдоподобия (PRML – Partial Response Maximum Likelihood), которая способна корректировать длительности полученных импульсов в случае, когда после компарирования получаются комбинации, не соответствующие правилам кодирования кода 17PP, что однозначно указывает на наличие ошибки. Такие комбинации чаще всего возникают, когда регистрируется импульс длиной в один тактовый интервал, что невозможно, поскольку минимальный интервал в коде 17PP равен двум тактовым интервалам.

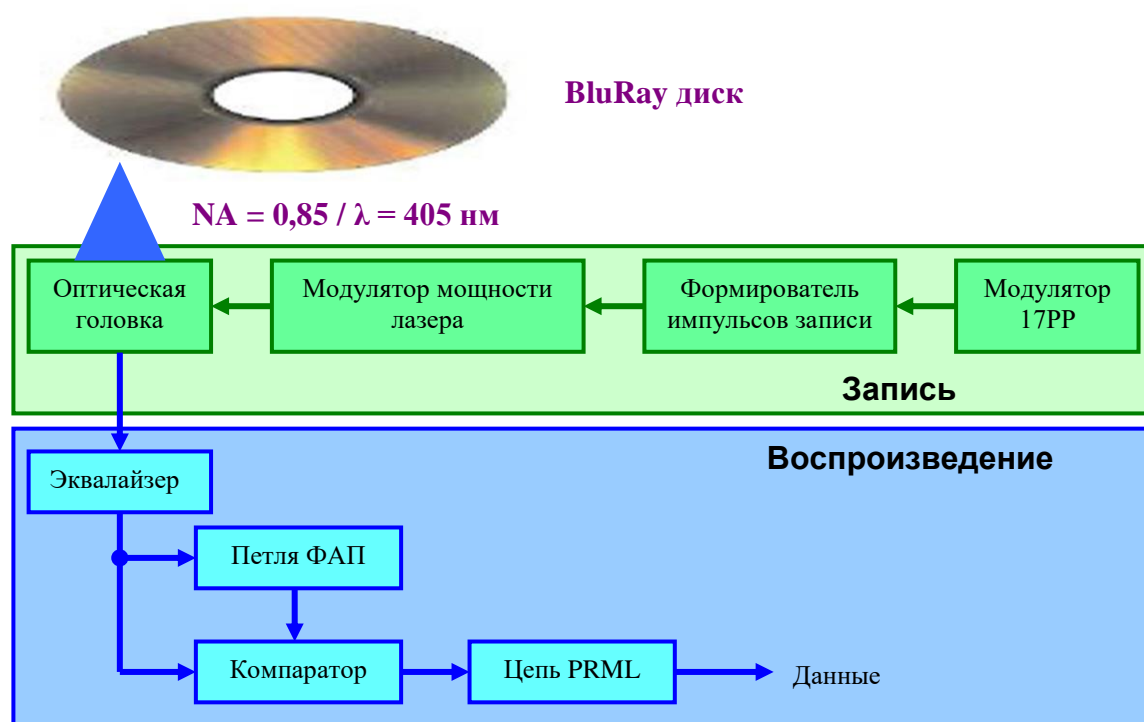


Рис. 11.28. Блок-схема привода BluRay диска

Регистрирующим слоем диска BD-RE служит неорганический материал, способный при разных температурах нагрева изменять свое фазовое состояние из кристаллического в аморфное и наоборот. Формирование на таком материале меток, длина которых должна соответствовать импульсам цифрового кода в 2T, 3T, ... , 8T, производится следующим образом. При воздействии на материал регистрирующего слоя лазерного излучения повышенной мощности, в месте воздействия и его окрестностях образуются участки с аморфным фазовым состоянием (рис. 11.29). Такие участки соответствуют пикам на дисках BD-ROM. В местах воздействия излучения

среднего уровня мощности образуются участки с кристаллическим фазовым состоянием, которые соответствуют отсутствию пит (промежуткам между питами) на дисках BD-ROM. Уровень такого излучения называется *стирающим*, поскольку ранее сделанная запись в виде участков с аморфным фазовым состоянием при этом переходит в кристаллическое состояние, т.е. стирается. При считывании дорожки диска BD-RE, образованной участками с различными фазовыми состояниями, отраженный луч будет модулироваться по интенсивности, поскольку коэффициент отражения у них разный. При этом участки с различной отражающей способностью будут соответствовать импульсам записанного на диске двоичного кода.

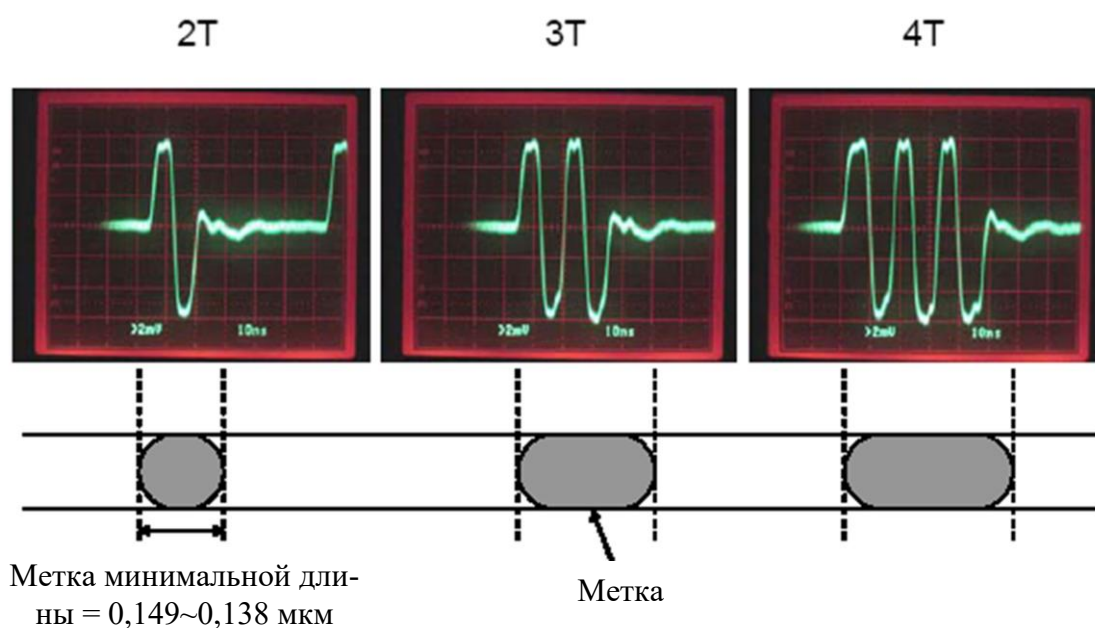


Рис. 11.29. Форма импульсов записи и полученные при этом метки длиной 2Т, 3Т и 4Т

Для того чтобы произвести запись метки, формируется сигнал в виде серии импульсов, длительность, уровень мощности и временные характеристики которых зависят от требуемой длины метки и от характеристик материала регистрирующего слоя. На рис. 11.30 показана форма сигнала записи, который необходим для записи метки, соответствующей импульсу канального кода длиной в 4 тактовых интервала. Как видно из рисунка, в структуре сигнала записи присутствуют три уровня мощности излучения лазера:  $P_W$ ,  $P_E$  и  $P_{BW}$ . Уровень мощности  $P_W$  соответствует температуре нагрева регистрирующего слоя, при которой он переходит в аморфное состояние, уровень мощности  $P_E$  соответствует переходу материала регистрирующего слоя в кристаллическое состояние, а уровень мощности  $P_{BW}$  не оказывает влияния на его состояние. Промежуток времени  $T_{top}$  – это длительность первого импульса записи, величина  $dT_{top}$  – это сдвиг перед-



него фронта первого импульса записи,  $T_{MP}$  – это ширина каждого из последующих импульсов записи и  $dT_E$  – это сдвиг заднего фронта последнего импульса низкого уровня мощности (т.н. охлаждающего импульса). Величина сдвигов  $dT_{top}$  и  $dT_E$  момента начала первого импульса записи и конца последнего соответственно зависит от длительности метки ( $2T$ ,  $3T$  или  $\geq 4T$ ), которую требуется записать, и постоянно контролируется в процессе записи. Для метки, длина которой равна  $4T$  (рис. 11.30), величина этих сдвигов равна 1 нс. Данные сдвиги необходимы для того, чтобы границы метки точно соответствовали заданной длине.

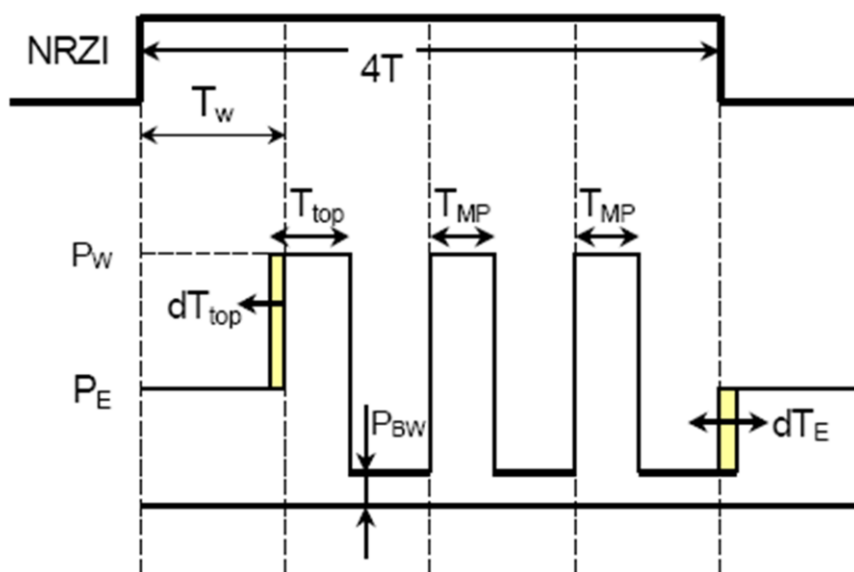


Рис. 11.30. Форма сигнала записи метки длиной  $4T$

Величины  $P_w$ ,  $P_E$ ,  $P_{BW}$ ,  $T_{top}$  и  $T_{MP}$  зависят от характеристик материала регистрирующего слоя конкретного диска и его информационной емкости, поэтому каждый производитель дисков BD-RE заранее определяет эти параметры и записывает их величины в зоне пит в виде микрорельефа (как на дисках BD-ROM). Привод BD-RE перед началом записи считывает эти данные и корректирует параметры режима записи.

### 11.9.2. СТРАТЕГИИ ЗАПИСИ ДИСКОВ BD-R

Для записи дисков BD-R определены две стратегии:

- стратегия N-1, которая применяется для дисков, требующих одного импульса записи для формирования метки длиной  $2T$  и по одному дополнительному импульсу на каждый канальный тактовый интервал свыше  $2T$ ;
- стратегия N/2, которая применяется для дисков, требующих одного импульса записи для формирования меток длиной  $2T$  или  $3T$  и по одному до-



полнительному импульсу на каждую пару канальных тактовых интервалов свыше  $3T$  (2 импульса для интервалов  $4T$  и  $5T$  и т.д.).

### Стратегия N-1

На рис. 11.31 показана форма сигнала записи метки длительностью  $4T$ , соответствующего стратегии N-1. Этот сигнал представляет собой модулированный импульсами различной длины интервал длительностью  $4T$  в форме NRZI. При этом используются четыре различных уровня мощности:  $P_W$ ,  $P_S$ ,  $P_{SW}$  и  $P_C$ .

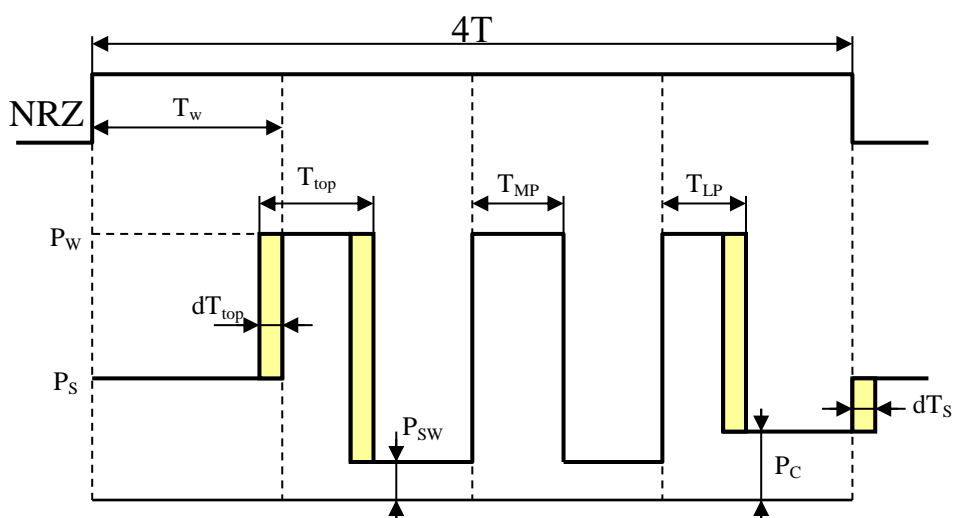


Рис. 11.31. Стратегия N-1

Первый импульс записи имеет длительность  $T_{top}$ , а величина  $dT_{top}$  отражает сдвиг переднего фронта этого импульса от своей номинальной позиции. Все последующие импульсы записи, кроме самого последнего, имеют длительность  $T_{MP}$ . Последний импульс имеет длительность  $T_{LP}$ . Величина  $dT_S$  отражает сдвиг заднего фронта охлаждающего импульса с уровнем мощности  $P_C$  со своей номинальной позиции.

Сдвиги фронтов  $dT_{top}$  и  $dT_S$ , а также длительности первого  $T_{top}$  и последнего  $T_{LP}$  импульсов могут изменяться в процессе записи в пределах величины  $T/16$  для получения более точного соответствия границ меток интервалам, кратным  $T$ .

Величины  $P_W$ ,  $P_S$ ,  $P_{SW}$ ,  $P_C$ ,  $T_{top}$ ,  $T_{LP}$ ,  $T_{MP}$  и зависят от характеристик материала регистрирующего слоя конкретного диска и его информационной емкости, поэтому каждый производитель дисков BD-RE заранее определяет эти параметры и записывает их величины в форме ВЧ-модуляции краев направляющей канавки.

При записи со скоростями, превышающими однократную скорость, уровень мощности  $P_{SW}$  увеличивается и может достигать значений, больших  $P_S$ , но меньших  $P_W$ . Такой случай показан на рис. 11.32.

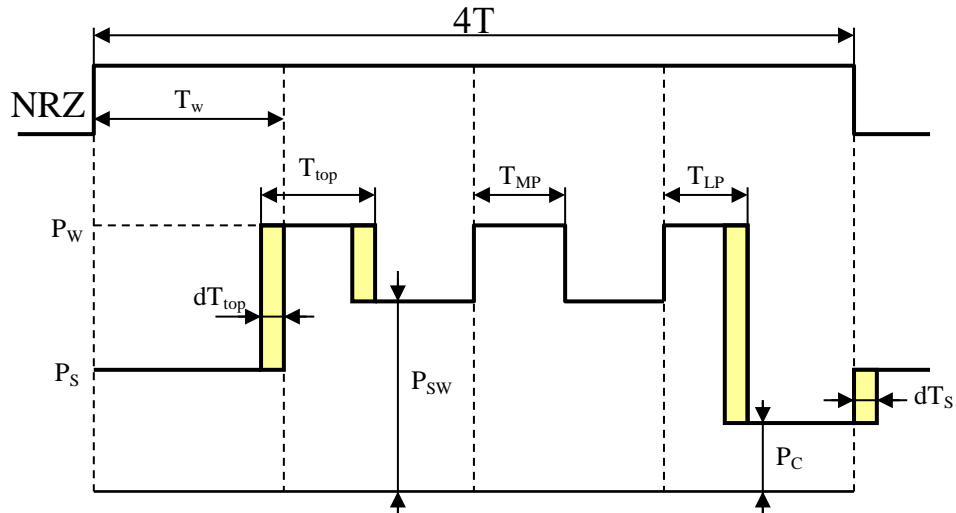


Рис. 11.32. Уровни мощности в стратегии N-1 при высоких скоростях записи

### Стратегия N/2

На рис. 11.33 показана форма сигнала записи метки длительностью  $6T$ , соответствующего стратегии N/2. Этот сигнал представляет собой модулированный импульсами различной длины интервал длительностью  $6T$  в форме NRZI. При этом, так же как и в случае стратегии N-1, используются четыре различных уровня мощности:  $P_w$ ,  $P_s$ ,  $P_{sw}$  и  $P_c$ .

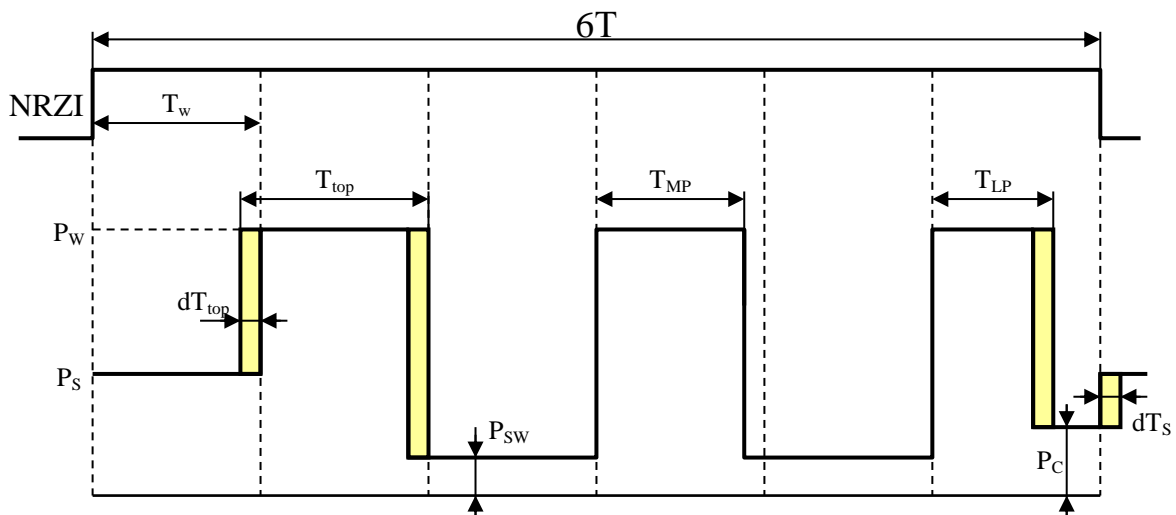


Рис. 11.33. Стратегия N/2

Первый импульс записи имеет длительность  $T_{top}$ , а величина  $dT_{top}$  отражает сдвиг переднего фронта этого импульса от своей номинальной позиции. Все последующие импульсы записи, кроме самого последнего, имеют длительность  $T_{MP}$ . Последний импульс имеет длительность  $T_{LP}$ . Величина

$dT_S$  отражает сдвиг заднего фронта охлаждающего импульса с уровнем мощности  $P_C$  со своей номинальной позиции.

Сдвиги фронтов  $dT_{top}$  и  $dT_S$ , а также длительности первого  $T_{top}$  и последнего  $T_{LP}$  импульсов могут изменяться в процессе записи в пределах величины  $T/16$  для получения более точного соответствия границ меток интервалам, кратным  $T$ .

Несмотря на то, что при записи меток длиной  $6T$  и  $7T$  число импульсов записи будет одним и тем же, их длительность и расположение в каждом случае будут отличаться.

Величины  $P_W$ ,  $P_S$ ,  $P_{SW}$ ,  $P_C$ ,  $T_{top}$ ,  $T_{LP}$ ,  $T_{MP}$  зависят от характеристик материала регистрирующего слоя конкретного диска и его информационной емкости, поэтому каждый производитель дисков BD-RE заранее определяет эти параметры и записывает их величины в форме ВЧ-модуляции краев направляющей канавки.

При записи со скоростями, превышающими однократную скорость, уровень мощности  $P_{SW}$  увеличивается и может достигать значений, больших  $P_S$ , но меньших  $P_W$ . Такой случай показан на рис. 11.34.

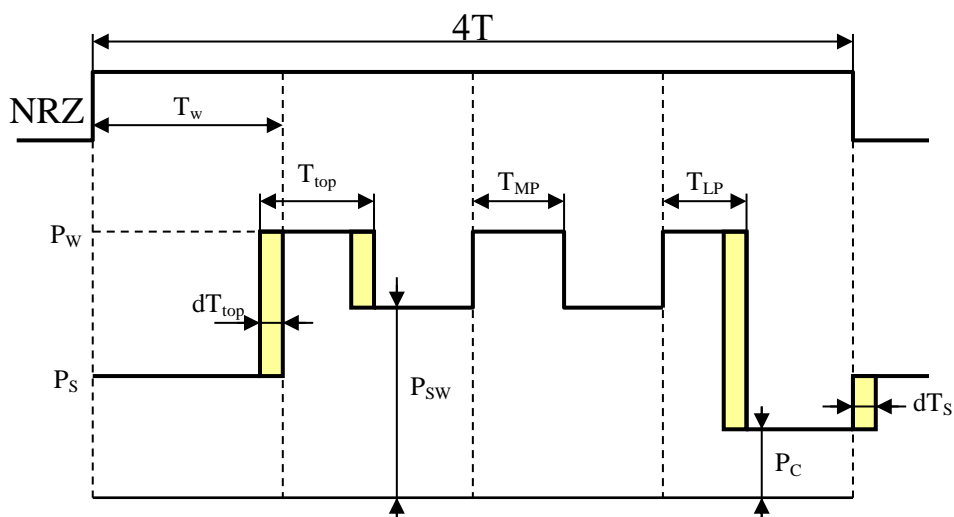


Рис. 11.34. Уровни мощности в стратегии N-1 при высоких скоростях записи

### Стратегия N/2

На рис. 11.35 показана форма сигнала записи метки длительностью  $6T$ , соответствующего стратегии N/2. Этот сигнал представляет собой модулированный импульсами различной длины интервал длительностью  $6T$  в форме NRZI. При этом, так же как и в случае стратегии N-1, используются четыре различных уровня мощности:  $P_W$ ,  $P_S$ ,  $P_{SW}$  и  $P_C$ .

Первый импульс записи имеет длительность  $T_{top}$ , а величина  $dT_{top}$  отражает сдвиг переднего фронта этого импульса от своей номинальной позиции. Все последующие импульсы записи, кроме самого последнего, имеют

длительность  $T_{MP}$ . Последний импульс имеет длительность  $T_{LP}$ . Величина  $dT_S$  отражает сдвиг заднего фронта охлаждающего импульса с уровнем мощности  $P_C$  со своей номинальной позиции.

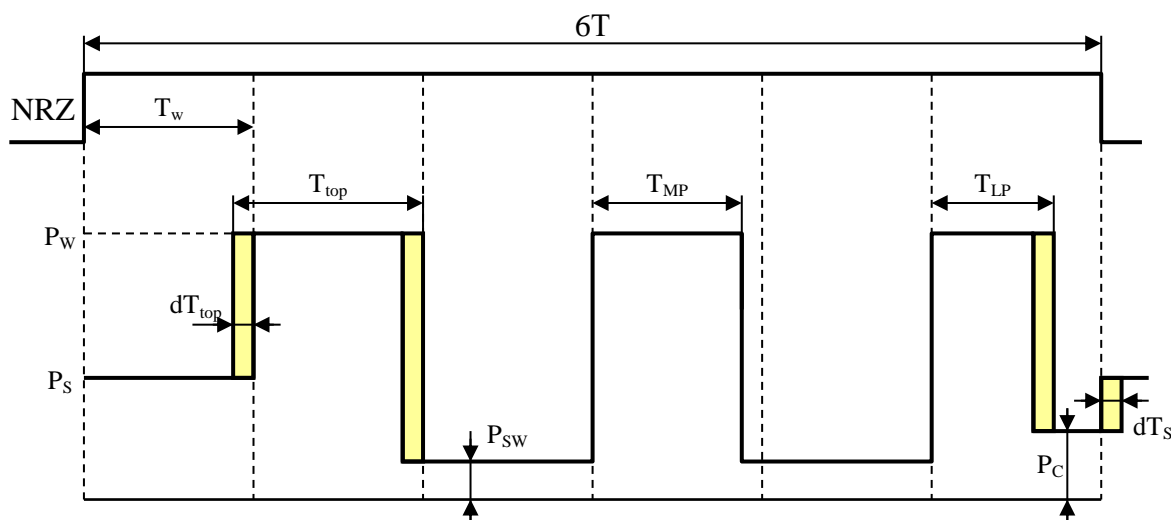


Рис. 11.35. Стратегия N/2

Сдвиги фронтов  $dT_{top}$  и  $dT_S$ , а также длительности первого  $T_{top}$  и последнего  $T_{LP}$  импульсов могут изменяться в процессе записи в пределах величины  $T/16$  для получения более точного соответствия границ меток интервалам, кратным  $T$ .

Несмотря на то, что при записи меток длиной  $6T$  и  $7T$  число импульсов записи будет одним и тем же, их длительность и расположение в каждом случае будут отличаться.

Величины  $P_w$ ,  $P_s$ ,  $P_{sw}$ ,  $P_c$ ,  $T_{top}$ ,  $T_{LP}$ ,  $T_{MP}$  зависят от характеристик материала регистрирующего слоя конкретного диска и его информационной емкости, поэтому каждый производитель дисков BD-RE заранее определяет эти параметры и записывает их величины в форме ВЧ-модуляции краев направляющей канавки.

## 11.10. ИЗГОТОВЛЕНИЕ BD-ДИСКОВ

Процесс изготовления BD-диска занимает всего 4 секунды. В будущем планируется это время сократить еще больше - до 3-3,5 секунд.

### 11.10.1. МАСТЕРИНГ BD-ДИСКОВ

Существует три основные технологии мастеринга BD-дисков: метод РТМ, иммерсионный метод и метод записи пучком электронов.

**Метод РТМ (Phase Transition Metal)**, где в качестве источника излучения используется синий лазер, является наиболее перспективным для реализации компактных и дешевых систем мастеринга.

В иммерсионном методе в качестве источника излучения используется ультрафиолетовый лазер, а запись осуществляется сквозь слой жидкости, которая вводится между внешней поверхностью высокоапертурного объектива ( $NA = 0,95$ ) и поверхностью фоторезиста. Этот метод также является недорогим, хорошо согласуется с обычными системами мастеринга оптических дисков и уже используется европейскими компаниями.

Системы **EBR** (Electron Beam Recorder), использующие для записи пучок электронов, наиболее дороги, но позволяют получить очень высокое разрешение. Используются японскими компаниями.

### *Мастеринг с использованием технологии PTM (Phase Transition Metal)*

Основная идея этой технологии состоит в использовании специально неорганического материала, который способен изменять свое фазовое состояние при воздействии лазерного излучения из исходного аморфного до кристаллического. После этого экспонированные кристаллические зоны становятся растворимыми в обычной обрабатывающей жидкости. Таким образом, этот материал является разновидностью неорганического фоторезиста.

Рис. 11.36 иллюстрирует процесс формирования дорожки записи. Используемый здесь материал имеет максимальную чувствительность к излучению с длиной волны 405 нм. Такая длина волны близка к длине волны излучения газовых лазеров, которые применяются для записи оптических дисков в форматах CD и DVD. Здесь используется объектив с числовой апертурой 0,95 – такой же, как в обычных системах мастеринга. Изменение фазового состояния используемого в данной технологии неорганического резистивного материала происходит в результате термохимической, а не фотохимической реакции, как в обычном неорганическом фоторезисте. Поэтому кристаллизация материала происходит только в зоне, где интенсивность лазерного излучения выше границы термохимической реакции. Следовательно, размеры меток получаются значительно меньше диаметра записываемого пятна.

В качестве подложки для напыления фоторезиста здесь используются кремниевые пластины – главным образом из-за их умеренной теплопроводности в сравнении с обычными стеклянными, которые используются для изготовления мастер-дисков CD и DVD.

Оптическая головка и схема управления лазером в системе PTM и в VD-рекордере очень похожи друг на друга. Если необходимо добиться более высокого качества записи, можно использовать те же самые мультиимпульсные стратегии записи, что используются в обычных потребительских рекордерах. Процесс изменения фазового состояния фоторезиста сопровождается изменением его отражающей способности, поэтому оценку качества записи можно осуществлять, наблюдая за изменением отра-

жающей способности регистрирующего слоя. Такая особенность РТМ-системы позволяет быстро и легко определять оптимальные условия записи. Не нужно дожидаться полного завершения технологического процесса по изготовлению матрицы для тиражирования дисков, чтобы, оценив результат, внести в него коррективы и только потом произвести следующий эксперимент. Оптимизация процесса записи в реальном времени является одной из ключевых особенностей системы РТМ. Поскольку оптическая головка РТМ-системы похожа на оптическую головку обычного ВД-рекордера, вся система получается компактной, легкой, отличается высокой надежностью и стабильностью в работе, а также малым потреблением энергии. Вдобавок ко всему ей, в отличие от обычных систем мастеринга с использованием газовых лазеров, не требуется громоздкая система водяного охлаждения.

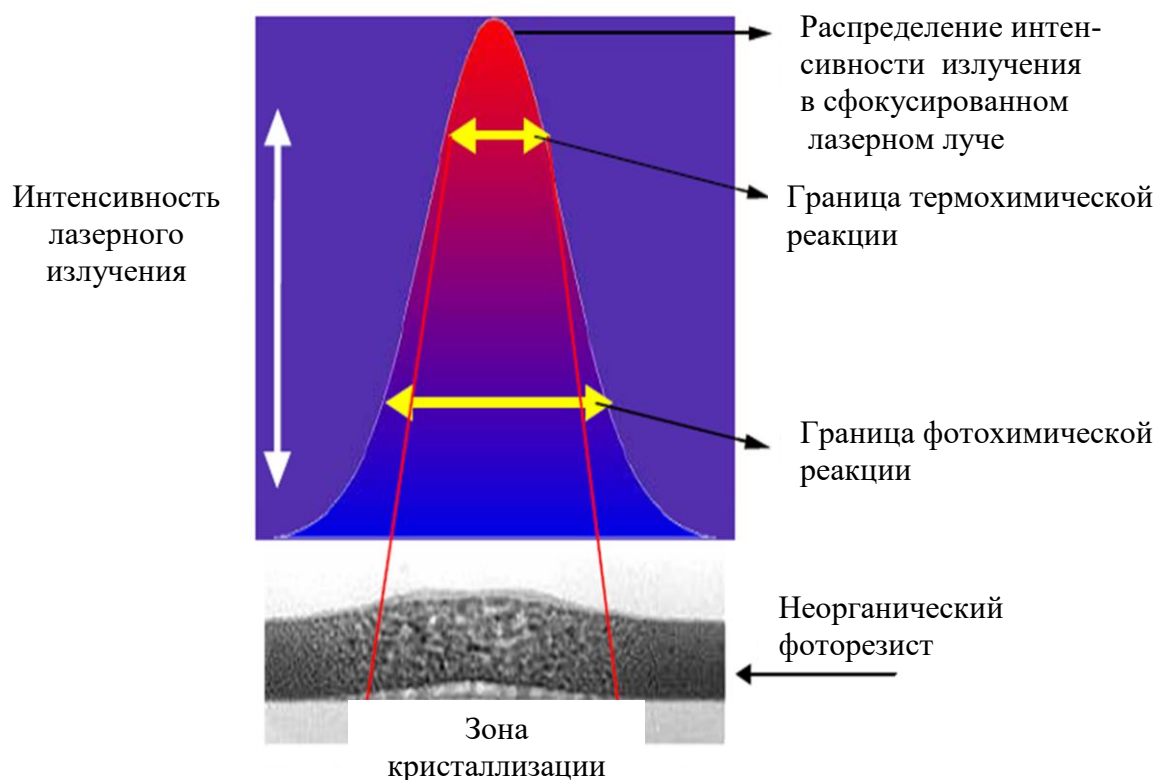


Рис. 11.36. Механизм записи с использованием технологии РТМ

Поскольку в технологии РТМ используются кремниевая подложка и неорганический фоторезист, то матрицу можно делать по полученному диску-оригиналу сразу после завершения его записи и последующей обработки в технологическом растворе. Более того, поскольку неорганический фоторезист обладает достаточной твердостью и прочностью, можно по одному диску-оригиналу изготовить до десяти матриц без малейшего ухудшения качества сигнала. Благодаря использованию относительно дешевых и легко доступных кремниевых пластин для изготовления основы мастер-

диска из технологического процесса устраняются такие дорогостоящие операции, как полировка стеклянной подложки, контроль дефектов, металлизация фоторезиста, изготовление цельнометаллического оригинала и изготовление промежуточных копий. Такое упрощение технологического процесса, наряду с другими преимуществами, обеспечивает еще и очень существенное снижение себестоимости матриц.

### **Иммерсионный метод мастеринга**

Одним из существенных преимуществ оптических дисков в сравнении с другими носителями информации является простота и низкая стоимость их тиражирования. Изготовление мастер-диска (мастеринг) является ключевым этапом в изготовлении штампа, с помощью которого в дальнейшем осуществляется тиражирование дисков BD-ROM. В период появления технологии BluRay эволюция оборудования для мастеринга оптических дисков еще не достигла того уровня, который требовался для записи дисков емкостью 25 ГБ, подобных дискам BD-ROM. Причина тому – невозможность получения записывающего пятна достаточно малых размеров.

Эlegantным решением проблемы является использование метода погружения в жидкость, который просто добавляется в уже существующую инфраструктуру записывающего оборудования и позволяет усовершенствовать технологию мастеринга оптических дисков, не внося в нее чрезмерно больших изменений. Используя иммерсионную систему, хорошо известную в микроскопии, можно получить очень маленькое световое пятно для формирования крошечных пит BD-диска.

**Иммерсионная система** (от позднелат. *immersio* — погружение) — это оптическая система, в которой пространство между предметом и первой линзой заполнено иммерсионной жидкостью. Оптические характеристики иммерсионной жидкости (показатель преломления и дисперсия) входят в абберрационный расчет объектива и учитываются при определении его оптических параметров (увеличение, числовая апертура), а также при абберрационной коррекции (исправление по полю, ахроматизация, исправление хроматических и сферических абберраций).

На первый взгляд метод погружения в жидкость кажется неосуществимым в механизме записи с ее высокими скоростями записи и высокими требованиями к стабильности механических параметров. Однако разработанное техническое решение опровергает такое мнение (рис. 11.37).

В качестве иммерсионной жидкости могут использоваться глицерин (показатель преломления 1,4739) или дистиллированная вода (показатель преломления 1,3329). Иммерсионная жидкость вводится между вращающимся диском и объективом перед записывающим пятном через специальное отверстие.

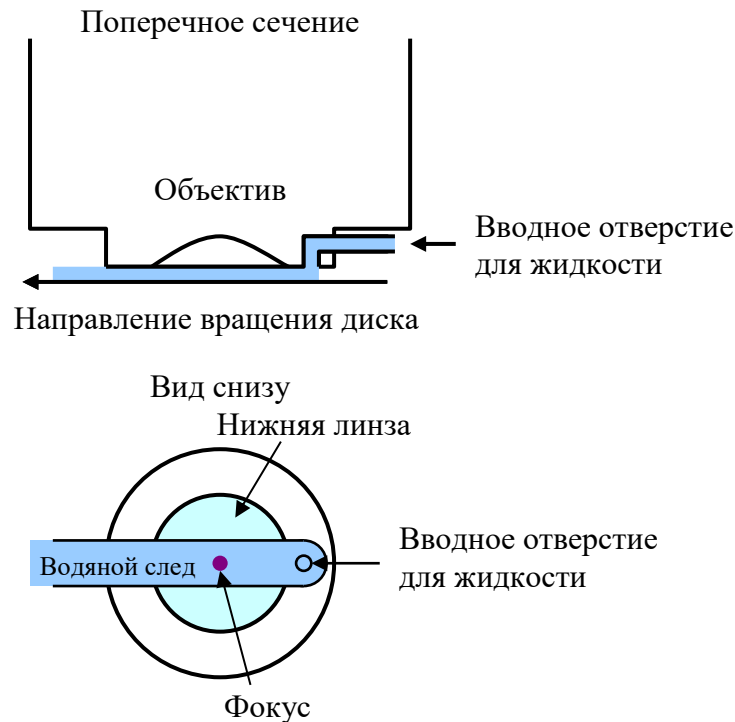


Рис. 11.37. Принцип действия иммерсионной системы

Полученная таким путем система очень похожа на обычный лазерный рекордер, который используется для записи CD и DVD. Для записи одного BD-диска емкостью 25 Гб достаточно не более 30 мл иммерсионной жидкости.

### Мастеринг с помощью пучка электронов

Для изготовления оптических дисков с высокой плотностью записи информации необходимо оборудование для мастеринга с высоким разрешением. Обычное оборудование с использованием лазерного рекордера не способно обеспечить мастеринг оптических дисков высокой плотности, поскольку его разрешающей способности для этого недостаточно. Для того чтобы повысить разрешение, было разработано оборудование, использующее для записи пучок электронов – *электронно-лучевой рекордер EBR (Electron Beam Recorder)*. Конструкция EBR, разработанного фирмой Pioneer, показана на рис. 11.38.

Запись производится в вакуумной камере, которая при этом должна быть размещена на массивном основании с хорошей защитой от вибраций. Электронно-лучевая трубка располагается над центром вакуумной камеры. С одной из сторон камеры находится детектор вторичных электронов, необходимый для наблюдения за ходом процесса. Излучающая и детектирующая части датчика высоты располагаются с противоположных сторон вакуумной камеры.



Перемещение каретки с мастер-диском вдоль оси X осуществляется с помощью двигателя постоянного тока и направляющего винта. Двигатель вращения диска, который закрепляется на его шпинделе, установлен в верхней части каретки. Источником потока электронов служит **термоэлектронный эмиттер (Thermal Field Emitter – TFE)**.

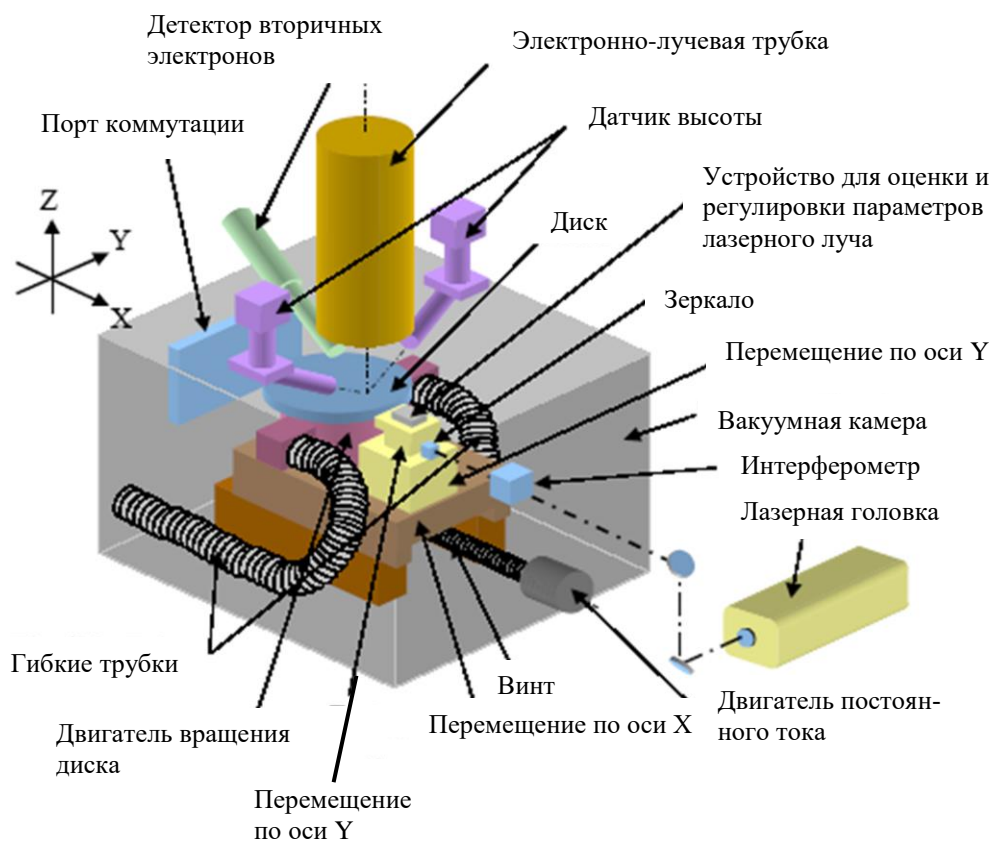


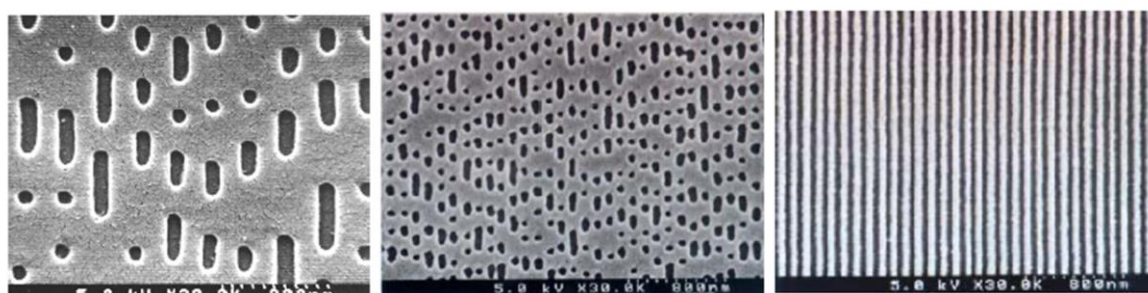
Рис. 11.38. Общий вид EBR, разработанного фирмой Pioneer

Пучок электронов, генерируемый TFE, фокусируется на поверхность диска с помощью двух электронных линз, расположенных внутри электронно-лучевой трубки. Точность фокусировки пучка – 6 мрад (половина угла сведения). Энергия пучка – 50 кЭв при величине тока 130 нА и диаметре луча 55 нм.

Модуляция луча осуществляется парой запирающих пластин, расположенных внутри электронно-лучевой трубки. Время запираения – около 10 нс. Колебания поверхности диска и его положение по вертикальной оси Z постоянно контролируются во время записи с помощью оптического датчика высоты и на основе сигнала ошибки, вырабатываемого этим датчиком, поддерживается точное положение фокуса на поверхности диска путем регулировки фокусного расстояния электронных линз. Положение луча на записываемой дорожке контролируется путем измерения с помощью интерферометра положения расположенного на каретке зеркала. Сигнал

ошибки обрабатывается путем перемещения каретки и с помощью отклоняющей системы, расположенной внутри электронно-лучевой трубки. С помощью отклоняющей системы обрабатывается также ошибка трекинга, возникающая из-за радиального биения диска.

Метод записи с помощью пучка электронов отличается высокой точностью и обладает большим запасом разрешающей способности. На рис. 11.39,а показан образец записи, соответствующий диску BD-ROM емкостью 25 Гб, с шагом дорожек 320 нм и минимальной длиной пита 149 нм. Величина джиттера, обусловленного колебаниями размеров пит, не более 5%.



(а) BD-ROM 25 Гб

(б) ROM 201 Гб

(с) Простая спираль

Рис. 11.39. Образцы записи, полученные с помощью EBR

Рядом, на рис. 11.39,б, для демонстрации потенциальных возможностей технологии EBR показана запись, выполненная в формате BD, но с плотностью записи, в 8 раз превышающей плотность записи на дисках BD-ROM – 201 Гб. Запись выполнена при точности фокусировки пучка 3 мрад (половина угла сведения). На рис. 11.39,в показана полученная тем же путем сплошная спиральная дорожка.

Технология EBR существует с 2006 года (фирма Pioneer) и в будущем может использоваться для записи оптических дисков потребительских форматов с высокой плотностью записи.

### 11.10.2. ТИРАЖИРОВАНИЕ BD-ДИСКОВ

Тиражирование однослойных дисков BD, так же, как и дисков CD и DVD, осуществляется методом литья под давлением. Конструкция литьевой машины показана на рис. 11.40. Гранулы из поликарбоната вводятся внутрь литьевой машины через специальную воронку, расположенную в верхней ее части. Здесь поликарбонат нагревается до жидкого состояния и под давлением подается в литьевую форму, где располагается матрица с микрорельефом. Для того чтобы заготовка диска получилась качественной, температура литьевой формы во время впрыска поликарбоната должна быть такой же, как температура разогретого поликарбоната. В противном случае поликарбонат у стенок литьевой формы будет охлаждаться быст-

рее, чем в середине заготовки, а это приведет к тому, что в материале основы диска будет наблюдаться двойное лучепреломление. Диск получится бракованным.

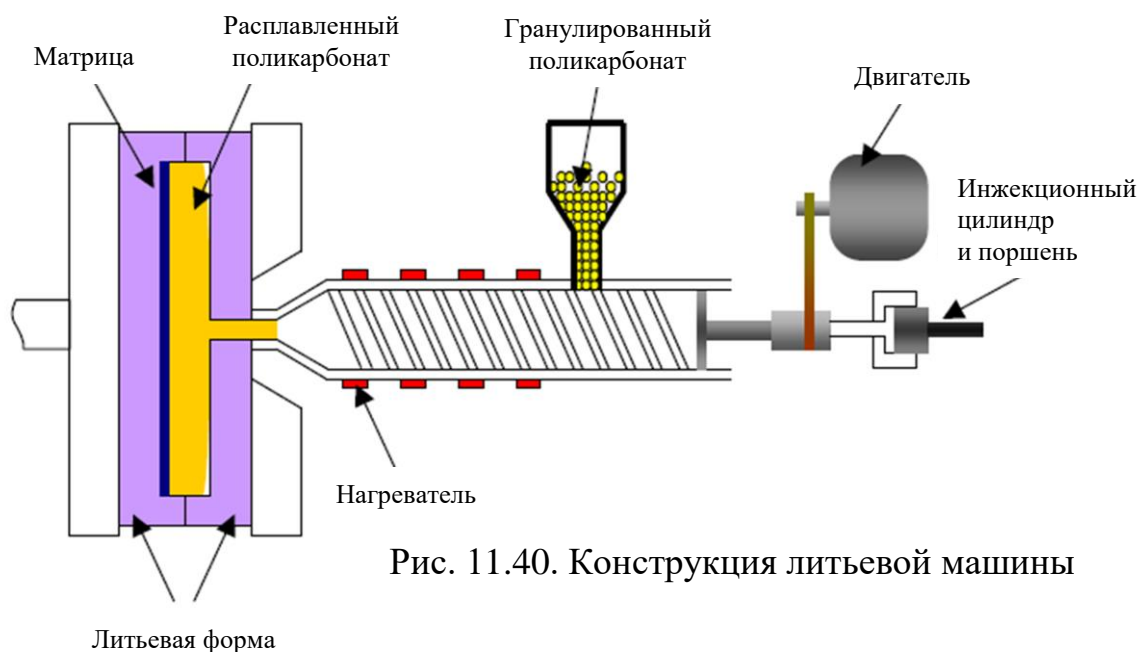


Рис. 11.40. Конструкция литьевой машины

После того как литевая форма заполнена, она медленно охлаждается до комнатной температуры. Быстрое охлаждение также приведет к неоднородности структуры основы и к появлению эффекта двойного лучепреломления. Охлажденная литевая форма размыкается на две половинки, и заготовка диска извлекается из нее.

На охлажденную заготовку диска методом напыления наносится отражающий слой из алюминия. Затем на отражающий слой методом центрифугирования наносится слой полимера, который способен переходить в твердое состояние под воздействием ультрафиолетовых лучей. Зона, прилегающая к внешнему диаметру диска, нагревается потоком инфракрасного излучения так, чтобы вязкость полимерного покрытия уменьшилась. Одновременно с этим из поликарбонатной пленки толщиной около 0,1 мм (которая заготавливается в виде рулона и по ходу технологического процесса постепенно из него отматывается) вырубается заготовка по размеру диска и укладывается на вращающийся шпиндель. Заготовка диска переворачивается полимерным слоем вниз, укладывается на шпиндель с поликарбонатной пленкой и облучается потоком ультрафиолетовых лучей, что и обеспечивает склеивание заготовки диска с поликарбонатной пленкой, которая теперь будет играть роль защитного слоя ВД-диска.

Процесс изготовления двухслойных дисков иллюстрирует рис. 11.41. Внутренний информационный слой L0 формируется на подложке из поликарбоната тем же методом, что и при изготовлении однослойных дисков (литье под давлением и напыление отражающего слоя). Затем поверх от-

ражающего слоя методом центрифугирования наносится слой *адгезива HPSA (Hard Pressure Sensitive Adhesive* – прочный адгезив, чувствительный к давлению), который полимеризуется и приобретает прочность под воздействием ультрафиолетовых лучей и в дальнейшем будет выполнять роль разделительного слоя между информационными слоями L0 и L1.

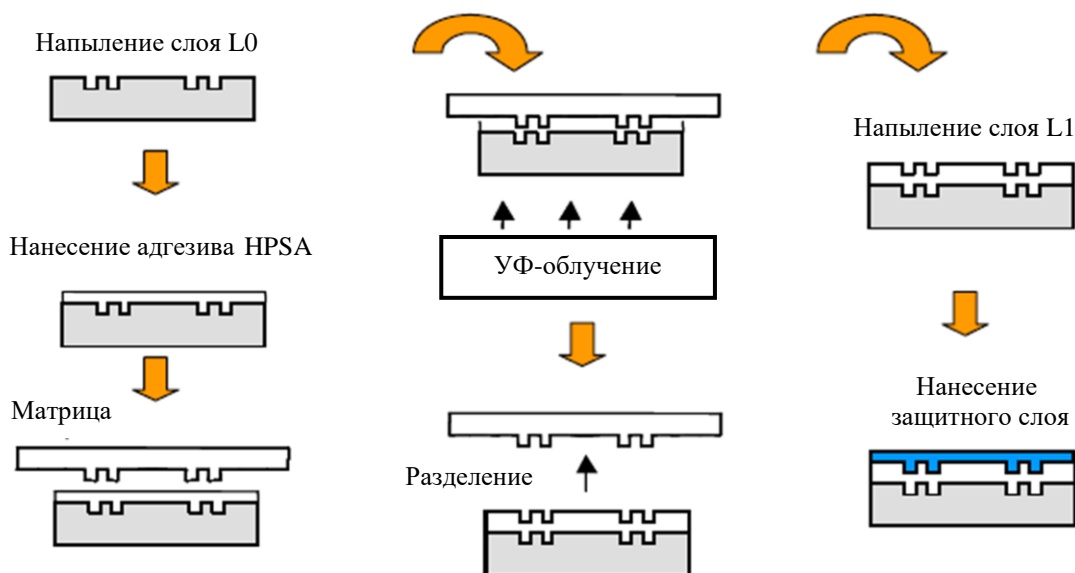


Рис. 11.41. Технология производства двухслойных дисков

Матрица с микрорельефом информационного слоя L1 прикладывается к слою адгезива HPSA и прижимается к нему, формируя питы слоя L1. После этого заготовка диска обрабатывается потоком ультрафиолетовых лучей. Полимер HPSA затвердевает, и матрица отделяется от диска. На полученный микрорельеф информационного слоя L1 насыщается полупрозрачный слой золота или кремния. Дальнейшие технологические операции – те же, что и при изготовлении однослойных дисков.

## 11.11. КОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИСКА

### 11.11.1. SID-КОДЫ

С помощью *SID-кодов (SID – Source Identification)* можно определить производителя BD-диска. Эти коды представляют собой видимые знаки (буквы и цифры), записанные на внутренней части диска (в зоне прижима). Существуют два типа SID-кодов: *код мастеринга (Mastering Code)* и *код литьевой формы (Mold Code)*.

Код мастеринга определяется тем оборудованием, которое использовалось для мастеринга диска, и должен быть представлен на матрице, используемой для тиражирования дисков.

Код литевой формы определяется оборудованием, на котором изготавливаются заготовки дисков, и по этой причине гравировается на внутренней поверхности литевой формы.

При тиражировании дисков код мастеринга будет виден на той стороне диска, где расположены питы, а код литевой формы – с противоположной стороны – там же, где этикетка (рис. 11.42).

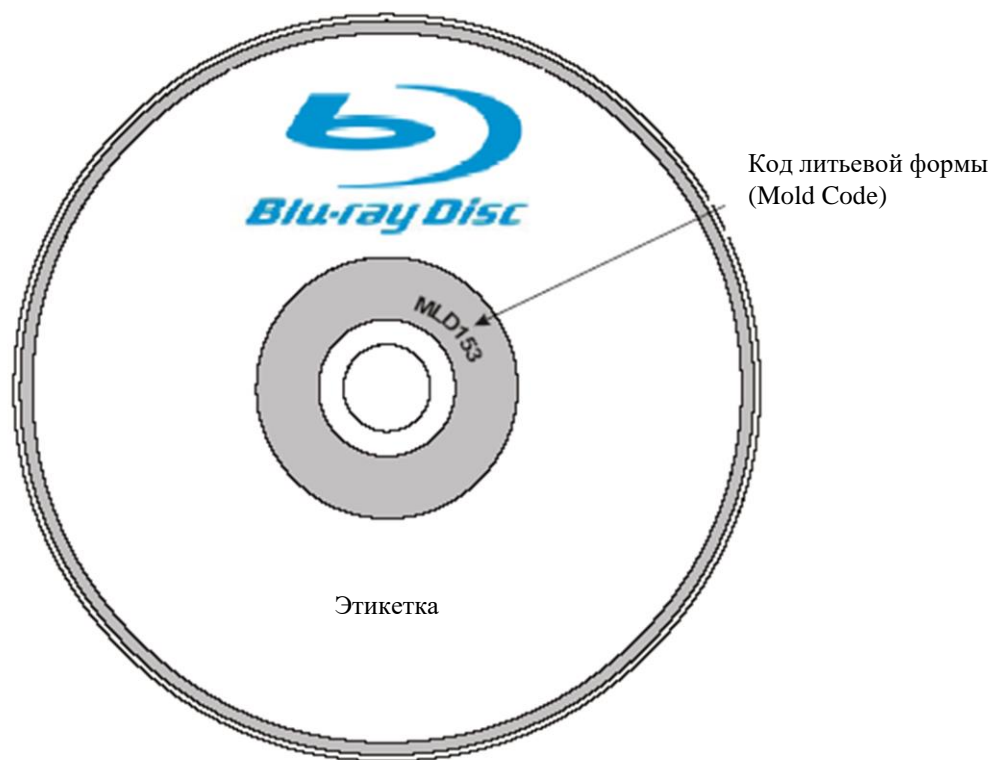


Рис. 11.42. Расположение на диске кода литевой формы

### 11.11.2. КОД ВСА

Зона поверхности диска между радиусами 21 мм и 22 мм (**BCA – Burst Cutting Area**) предназначена для записи штрих-кода (рис. 11.43), который содержит уникальную информацию, характеризующую данный диск, например, индивидуальный серийный номер диска, код владельца записи и пр. Запись ВСА-кода производится с помощью мощного лазера в режиме постоянной угловой скорости вращения – CAV (Constant Angular Velocity) и, соответственно, считываться может также только в этом режиме.

Запись штрих-кода на дисках DVD производилась с помощью мощного твердотельного YAG-лазера, в качестве активной среды которого используется алюмоиттриевый гранат (YAG обозначает состав активной среды –  $Y_3Al_5O_{12}$ ) с добавками неодима (Nd). Однако такие лазеры очень дороги и недолговечны. Поэтому для записи ВСА-кода на BD-дисках ис-



пользуется относительно дешевый мощный полупроводниковый лазер. Таким образом, процедура нанесения ВСА-кода получается недорогой. Правда, из-за ограниченной мощности лазера на штрихах ВСА-кода остаются маленькие точки отражающей поверхности, которые становятся причиной появления высокочастотного шума в воспроизведенном сигнале. Чтобы удалить этот шум, при воспроизведении используется фильтр низких частот с частотой среза 500 кГц. Результат действия этого фильтра показан на рис. 11.44.

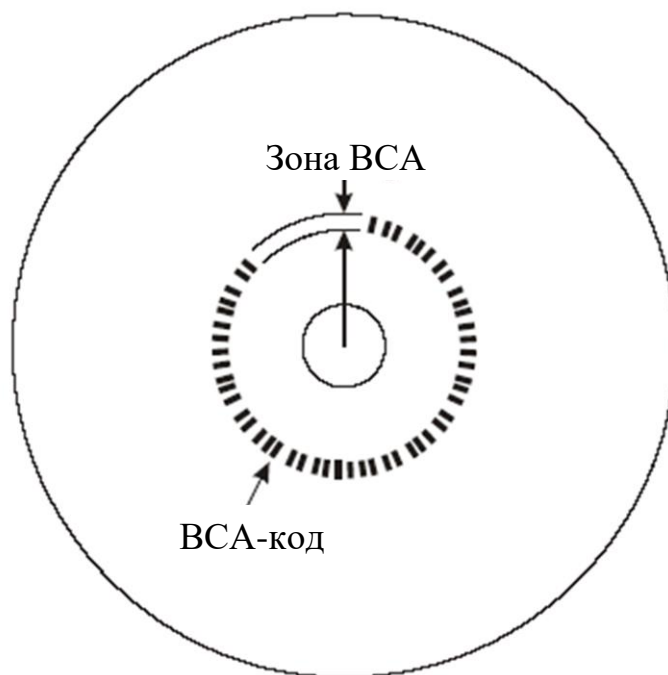


Рис. 11.43. Зона ВСА и ВСА-код

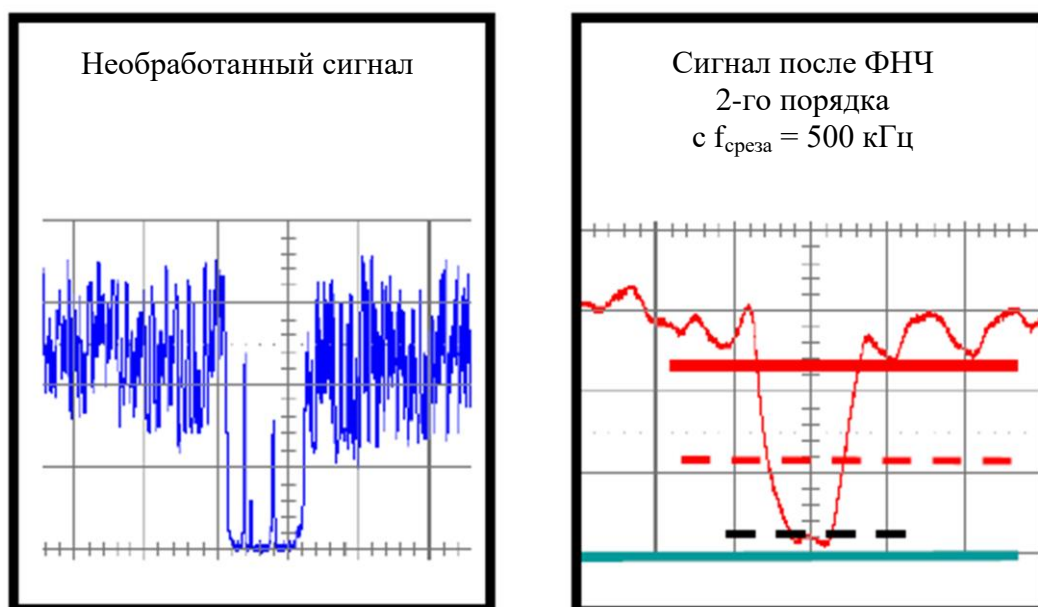


Рис. 11.44. Считанный сигнал ВСА-кода до и после НЧ-фильтрации

## 12. МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ ИНФОРМАЦИИ

Появившийся в 1992 году мини-диск задумывался как преемник компакт-кассеты, только более удобный в эксплуатации и хранящий записи в цифровом виде. Работа над MiniDisc началась в середине восьмидесятых - в «золотой век» аудиокассет, когда был достигнут «потолок» возможностей этого носителя и всем ведущим производителям стали очевидны его принципиальные ограничения.

Новый носитель должен был оставаться столь же компактным и защищённым от внешних воздействий, как и компакт-кассета, что позволило бы использовать его не только в домашних аудиосистемах, но и в автомобильных и портативных плеерах. По качеству звучания он должен был превосходить аналоговую кассету и максимально приближаться к CD при существенно меньшей ёмкости. Наконец, непременным условием должна была быть возможность многократной самостоятельной записи на такой носитель - с функциями стирания и монтажа.

В результате в MiniDisc были реализованы сразу несколько передовых на тот момент технологий, защищённых множеством патентов. В качестве технологии записи была выбрана магнитооптическая, в которой для записи информации используется лазер, разогревающий до необходимой температуры регистрирующий слой диска, и магнитная головка, изменяющая намагниченность нагретого участка. Для воспроизведения записи применяется лазер меньшей мощности: при отражении луча от того или иного участка, в зависимости от его намагниченности, изменяется угол поворота плоскости поляризации светового луча, формируемого лазером, что и фиксируется оптическим датчиком.

Магнитооптическая технология давала минидиску важные преимущества: высокую надёжность хранения записи и повышенную устойчивость к магнитным полям, быстрый произвольный доступ к любому фрагменту записи, а также возможность многократного стирания и перезаписи.

Для того чтобы расширить возможности системы MD в отношении записи фонограмм в цифровом виде, большинство минидисковых аппаратов имеет в своей структуре преобразователь частоты дискретизации. Как уже говорилось, внутренняя частота дискретизации минидисковых систем – 44,1 кГц. Наличие же преобразователя позволяет производить запись цифровых сигналов и с частотами дискретизации 48 кГц и 32 кГц.

Для защиты от пыли и механических воздействий минидиск помещен в пластиковую кассету. Размер такой кассеты 68×72×5 мм. Доступ к рабочей поверхности диска осуществляется через специальное окно, которое вне дисководов закрыто сдвигающейся шторкой.

Существует два вида минидисков, существенно различных по физической структуре. На один из них – магнитооптический – можно производить запись. Другой же – оптический – ничем, кроме геометрических раз-

меров и способа формирования потока данных, не отличается от обычного компакт-диска. Запись на него невозможна.

Технические параметры системы «MiniDisc» приведены в таблице 12.1.

Таблица 12.1

**Основные характеристики формата MiniDisc**

|   |                           |
|---|---------------------------|
| Время воспроизведения и записи, мин.          | 74 (макс.)                |
| Размеры кассеты, мм                           | 68×72×5                   |
| <b>Характеристики диска</b>                   |                           |
| Диаметр, мм                                   | 64                        |
| Толщина, мм                                   | 1,2                       |
| Диаметр центрального отверстия, мм            | 11                        |
| Начальный (внутренний) диаметр зоны ввода, мм | 29 (макс.)                |
| Внешний диаметр зоны ввода, мм                | 32                        |
| Внешний диаметр программной зоны, мм          | 61 (макс.)                |
| Шаг дорожки, мкм                              | 1,6                       |
| Скорость сканирования, м/с                    | 1,2 – 1,4                 |
| <b>Звуковые характеристики</b>                |                           |
| Число каналов                                 | 2 или 1                   |
| Детонации                                     | отсутствуют               |
| <b>Формат данных</b>                          |                           |
| Частота дискретизации, кГц                    | 44,1                      |
| Кодирование (сжатие данных)                   | ATRAC                     |
| Модуляция (канальный код)                     | EFM (8-14)                |
| Система защиты от ошибок                      | ACIRC                     |
| <b>Оптические характеристики</b>              |                           |
| Длина волны излучения лазера, нм              | 780                       |
| Числовая апертура объектива                   | 0,45                      |
| Мощность излучения лазера при записи, мВт     | 2,5 – 5,0 (главный пучок) |
| Метод записи                                  | Модуляция магнитного поля |

## 12.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ

Систему магнитооптической записи информации можно рассматривать как некий промежуточный вариант между оптической и магнитной системами записи. Запись информации здесь осуществляется путем формирования магнитограммы на поверхности дискового носителя, покрытого магнитооптическим материалом, а считывание этой информации произво-



дится уже оптическими методами – с помощью сфокусированного луча полупроводникового лазера.

В основе процесса считывания лежит *магнитооптический эффект Керра*.

В общем случае, *магнитооптический эффект* - это изменение оптических свойств вещества в зависимости от его намагниченности или от силы приложенного к нему магнитного поля. Под оптическими свойствами здесь следует понимать отражение, пропускание, поляризацию света и другие явления. Вещества, в которых наблюдается магнитооптический эффект, называются *магнитооптическими веществами*. Среди них могут быть ферромагнетики, имеющие в своей структуре магнитные атомы, - такие, как  $Y_3Fe_5O_{12}$  или  $GdFe_3O_{12}$ ; ортоферриты, образующие магнитные домены – такие как  $CdTFe$  или  $TbFeCo$  и другие материалы, содержащие металлы и редкоземельные элементы. Тонкие пленки из таких материалов обладают преимущественно *перпендикулярной намагниченностью*, т.е. силовые линии магнитного поля, образуемого ими, перпендикулярны поверхности пленки.

Магнитные свойства веществ обусловлены магнитными свойствами элементарных носителей магнетизма - движущихся внутри атомов электронов, а также совместным действием их групп. Электроны в атомах, двигаясь по орбитам вокруг ядра атома, образуют элементарные токи или магнитные диполи, которые характеризуются магнитным моментом  $m$ . Величина его равна произведению элементарного тока  $i$  и элементарной площадки  $s$ , ограниченной элементарным контуром  $m = is$ . Вектор  $m$  направлен перпендикулярно к площадке  $s$  по правилу буравчика. Магнитный момент тела представляет собой геометрическую сумму магнитных моментов всех диполей. Кроме орбитальных моментов, электроны, вращаясь вокруг своих осей, создают еще спиновые моменты, которые играют важнейшую роль в намагничивании ферромагнетиков.

Если на вещество воздействует внешнее магнитное поле, то носители магнетизма данного вещества ориентируются так, что направления их магнитных моментов совпадут с направлением внешнего магнитного поля. Возникнет собственное магнитное поле вещества – *магнитная индукция*.

Мерой изменения магнитного поля в веществе служит величина его *магнитной проницаемости*  $\mu$ , показывающая, во сколько раз величина магнитного поля  $B$  внутри данного вещества будет больше величины магнитного поля  $B_0$  в вакууме при воздействии одного и того же внешнего магнитного поля:

$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

Существует три типа магнитных веществ: парамагнетики, диамагнетики и ферромагнетики.

**Парамагнетики** – это вещества, носители магнетизма которого способны ориентироваться по направлению внешнего магнитного поля и усиливать это поле на незначительную величину. У парамагнетиков  $\mu$  лишь незначительно больше 1. В отсутствие внешнего поля ориентация носителей магнетизма вновь становится хаотичной (рис. 12.1).

К парамагнетикам относятся алюминий, натрий, литий, платина, кислород, оксид азота, оксид марганца, хлорное железо и другие соединения.

Парамагнетиками становятся ферро- и антиферромагнитные вещества при температурах, превышающих, соответственно, температуру Кюри или Нееля (температуру фазового перехода в парамагнитное состояние).

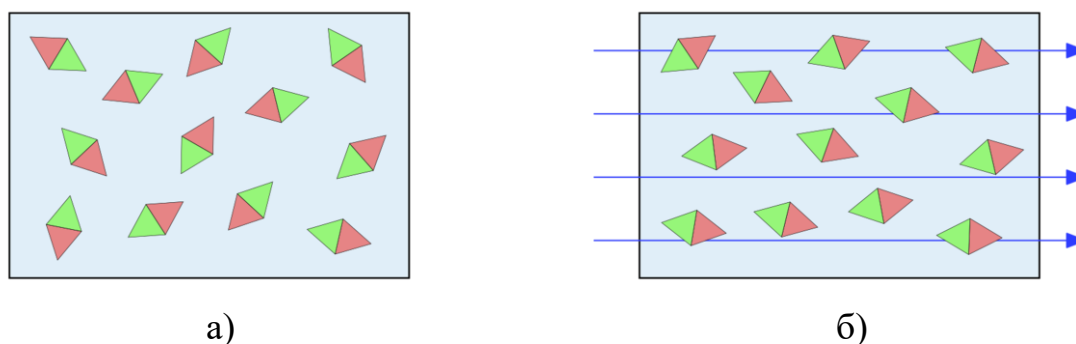


Рис. 12.1. а) парамагнетик в отсутствие магнитного поля;  
б) парамагнетик в присутствии сильного магнитного поля

**Диамагнетики** – это вещества, способные создавать внутри себя поле, ослабляющее внешнее магнитное поле. У диамагнетиков  $\mu < 1$ . В отсутствие внешнего магнитного поля атомы или молекулы диамагнетиков не имеют магнитных моментов.

Диамагнетики обладают свойством отталкиваться магнитным полем (рис. 12.2). Еще 1877 году С. Дж. Бергман стал первым человеком, заметившим, что сурьма и висмут отталкиваются магнитным полем. Однако термин «диамагнетизм» был введен даже раньше - в сентябре 1848 года - Майклом Фарадеем, когда он понял, что все материалы в природе обладают в некоторой степени диамагнитным характером ответа на приложенное к ним магнитное поле. К диамагнетикам относятся инертные газы, азот, водород, кремний, фосфор, висмут, цинк, медь, золото, серебро, а также многие другие, как органические, так и неорганические соединения. Даже человек в магнитном поле ведет себя как диамагнетик.

**Ферромагнетики** – это вещества, обладающие высоким значением магнитной проницаемости, которая может достигать сотен и тысяч единиц. Ферромагнетиками их называют по своему наиболее распространенному представителю - железу (Fe – феррум). Кроме того, к ферромагнетикам относятся кобальт (Co), никель (Ni), гадолиний (Gd), тербий (Tb), диспрозий (Dy) и другие редкоземельные элементы. Ферромагнетики способны со-

хранять состояние намагниченности и в отсутствии внешнего магнитного поля. Именно по этой причине степень и направление намагниченности их в данный момент времени зависит от «предыстории», т.е. от величины и направления внешнего магнитного поля в момент окончания его воздействия. Однако для каждого ферромагнетика существует некоторое значение температуры, которое называется *точкой Кюри* ( $T_K$ ), выше которой это вещество теряет свои ферромагнитные свойства.

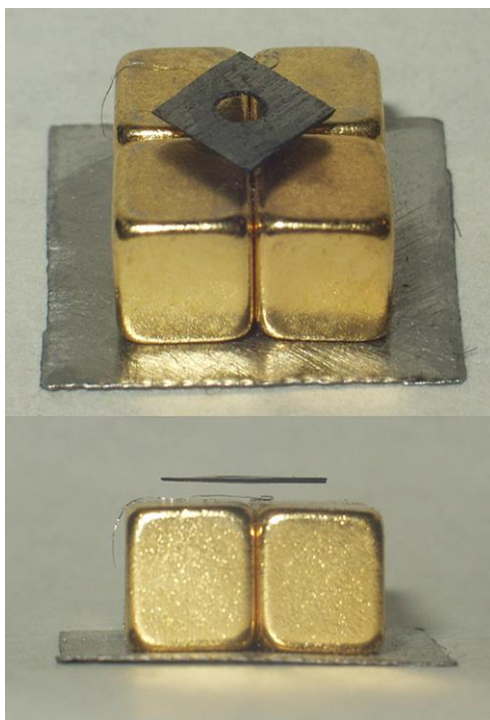


Рис. 12.2. Пиролитический углерод, парящий над неодимовым магнитом

Намагничивание ферромагнетиков происходит следующим образом. Этот процесс иллюстрируется рисунком 12.3, где по горизонтальной оси отложена напряженность внешнего магнитного поля  $H$ , а по вертикальной – магнитная индукция  $B$  в ферромагнетике.

Предположим, что остаточная намагниченность в ферромагнетике отсутствует, т.е. носители магнетизма в нем имеют хаотичную ориентацию и его суммарное магнитное поле равно нулю. Если напряженность внешнего магнитного поля  $H$  начнет возрастать, то начнет увеличиваться и магнитная индукция  $B$ . Вначале это будет медленное нарастание, затем кривая резко пойдет вверх, и, наконец, увеличение индукции замедлится и, в конце концов, прекратится совсем.

Подобный характер зависимости  $B$  от  $H$  можно объяснить тем, что по мере увеличения величины намагничивающего поля возрастает степень ориентации молекулярных магнитных моментов по полю. Однако этот процесс начнет замедляться, когда остается все меньше и меньше несори-

ентированных моментов, и, наконец, когда все моменты будут ориентированы по полю, дальнейшее увеличение  $H$  прекращается и наступает состояние, которое называется *состоянием насыщения магнитного материала*. Предельная величина индукции при этом называется *индукцией насыщения  $B_s$* .

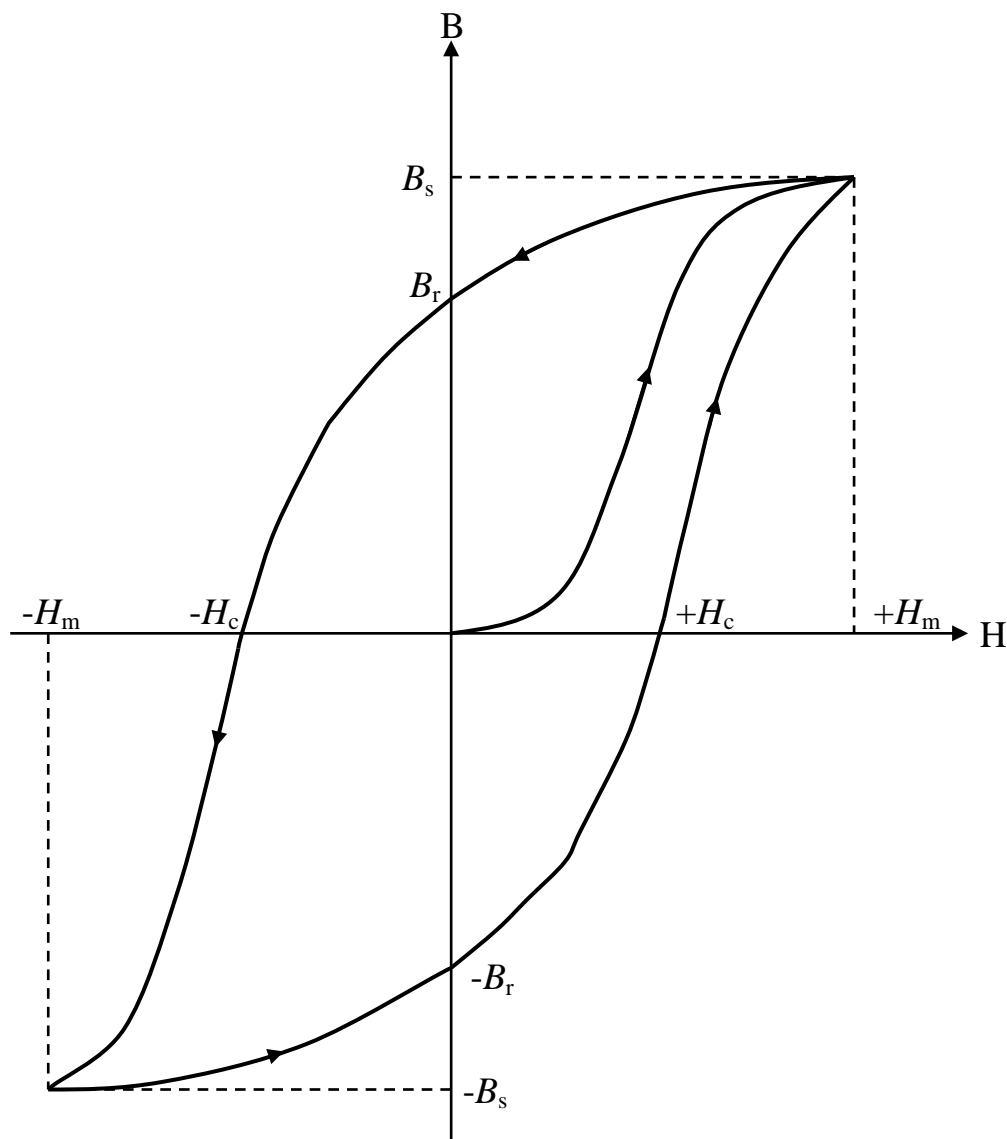


Рис. 12.3. Петля гистерезиса

Если теперь уменьшать внешнее магнитное поле вплоть до его полного снятия, то магнитная индукция при этом в той или иной степени уменьшится, но не до нуля, поскольку носители магнетизма все еще продолжают сохранять полученную ориентацию. Та ее величина, которая сохранится при полном исчезновении внешнего магнитного поля, называется *остаточной магнитной индукцией  $B_r$* .

Чтобы устранить остаточную магнитную индукцию, т.е. чтобы полностью размагнитить ферромагнетик, нужно приложить к нему внешнее маг-

нитное поле противоположного направления. Та величина напряженности обратного магнитного поля  $-H_c$ , при которой индукция  $B$  обратится в нуль, называется *коэрцитивной силой* магнитного материала.

При дальнейшем увеличении обратного магнитного поля магнитный материал снова намагнитится – но в противоположном направлении.

Если этот процесс периодически повторять, меняя направление магнитного поля, то получится замкнутая кривая, которая называется *петлей гистерезиса*. Площадь такой петли характеризует энергию, необходимую для перемагничивания магнитного материала.

Зависимость магнитной индукции от напряженности внешнего магнитного поля у парамагнетиков – линейная, а у ферромагнетиков – существенно нелинейная (рис. 12.4).

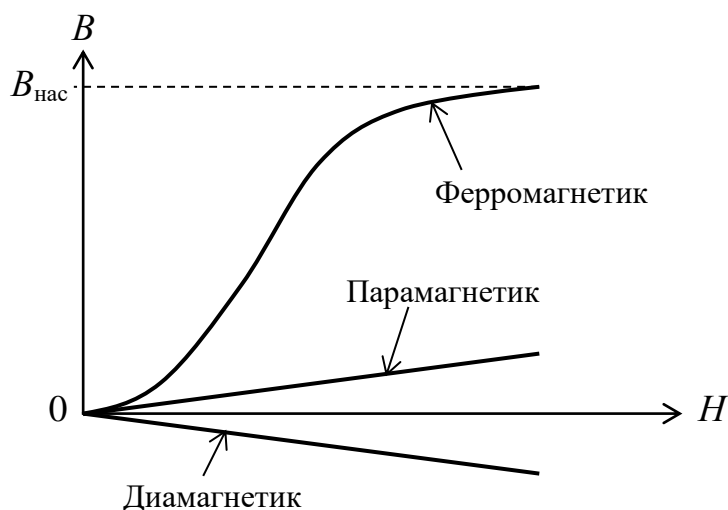


Рис. 12.4. Сравнение характеристик намагничивания ферромагнетиков, диамагнетиков и парамагнетиков

С магнитной проницаемостью вещества тесно связано его свойство, которое называется магнитной восприимчивостью.

*Магнитная восприимчивость* – это величина, характеризующая способность вещества намагничиваться во внешнем магнитном поле.

Вектор намагниченности  $J$ , т.е. магнитный момент единицы объема вещества, связан с вектором  $H$  напряженности однородного магнитного поля соотношением:

$$J = J_0 + \chi H,$$

где  $J_0$  – намагниченность в отсутствии внешнего магнитного поля,  $H$  – напряженность магнитного поля, а  $\chi$  – макроскопическая магнитная восприимчивость частицы вещества.

В присутствии внешнего магнитного поля энергия  $E$  частицы (атома, иона) изменяется в сравнении с энергией в отсутствии поля. У парамагне-

тиков самопроизвольная намагниченность  $J_0$  в отсутствие внешнего поля равна нулю и  $\chi = J/H$  определяет наведенную намагниченность. В системе единиц СИ  $\chi$  - безразмерная величина. Магнитная восприимчивость, рассчитанная на 1 кГ вещества, называется удельной ( $\chi_{уд} = \chi/\rho$ , где  $\rho$  - плотность вещества).

В соответствии с законом, установленным французским ученым Пером Кюри в 1895 году, температурная зависимость  $\chi_{уд}$  парамагнетиков имеет вид

$$\chi_{уд} = C/T,$$

где  $C$  – *постоянная Кюри*.

В 1907 году другой французский ученый П.Вейс уточнил закон Кюри применительно к ферромагнетикам. Этот закон теперь известен как закон Кюри-Вейса:

$$\chi = C/(T_Q - T),$$

где  $T_Q$  – *температура (точка) Кюри*, при приближении к которой снизу магнитная восприимчивость  $\chi$  вещества резко возрастает и его состояние изменяется от ферромагнитного к парамагнитному.

По мере увеличения температуры возрастает крутизна петли гистерезиса, которой характеризуются ферромагнитные материалы, а коэрцитивная сила и максимальная остаточная намагниченность уменьшаются, обеспечивая резкое повышение эффективности магнитной записи.

Возможность записи информации на магнитооптические материалы обусловлена тем, что эти материалы способны изменять свою магнитную восприимчивость при изменении температуры и переходить из ферромагнитного состояния в парамагнитное и обратно.

Наиболее привлекательными веществами для использования в качестве носителей магнитооптической записи могут быть вещества, у которых низкая точка Кюри (чтобы можно было производить быстрый нагрев материала носителя при небольшой мощности) сочетается с низким значением коэрцитивной силы (чтобы изменять магнитную ориентацию носителей магнетизма путем приложения относительно слабого магнитного поля). Одним из таких веществ является сплав тербия, железа и кобальта (TbFeCo), имеющий точку Кюри вблизи 185°С и коэрцитивную силу около 80 Э (6,4 кА/м). Этот сплав и используется при изготовлении регистрирующего слоя минидисков.

Существует два основных способа формирования магнитограммы на магнитооптическом носителе.

Первый состоит в том, что регистрирующий слой, нанесенный на поверхность диска, предварительно намагничивается в определенном направлении. В процессе записи на него воздействуют слабым магнитным полем противоположного направления и, одновременно с этим, - лучом лазера, мощность которого модулируется информационным сигналом. Там,

где мощность лазера велика, регистрирующий слой нагревается выше точки Кюри, и вектор намагниченности меняет свою ориентацию в соответствии с внешним полем. Там, где мощность лазера мала, нужного нагрева не получается и ориентация магнитного вектора остается прежней. В результате, на поверхности диска формируется магнитограмма, соответствующая модулирующему сигналу (рис. 12.5).

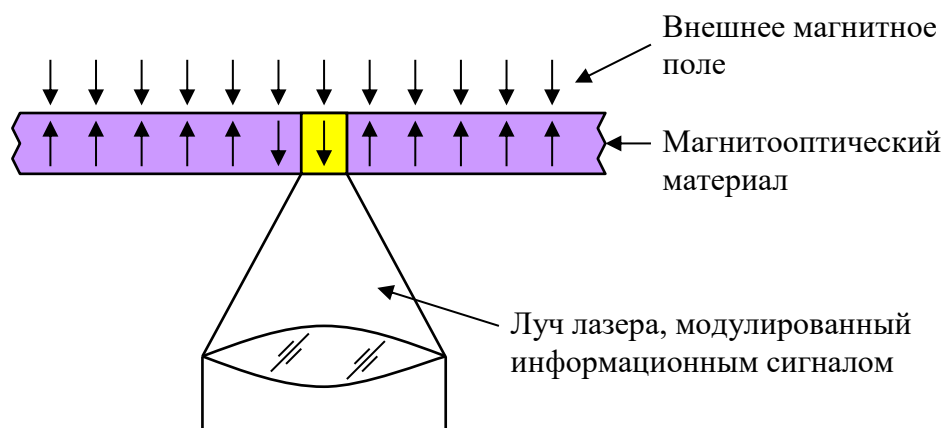


Рис. 12.5. Метод формирования магнитограммы на магнитооптическом носителе путем модуляции информационным сигналом луча лазера

Такой метод использовался в ранних системах магнитооптической записи, которые обозначались аббревиатурой *E-DAD (Erasable Digital Audio Disc)*. Образцы таких систем демонстрировались в конце 80-х годов фирмами SANIO, SHARP, THOMSON и др.

Однако этот метод оказался неудобным, так как старую информацию перед записью новой нужно было предварительно стирать. Или же применять систему из трёх независимых лазеров, один из которых стирал бы старую информацию, другой записывал новую, а третий использовался для автофокусировки и автотрекинга. Система получалась чересчур сложной и дорогой.

Поэтому в системе «Минидиск» применен другой метод. В режиме записи луч лазера используется только для нагрева дорожки выше точки Кюри, а модулирующий сигнал подается на магнитную головку, которая и обеспечивает формирование магнитограммы (рис. 12.6). Поскольку модулирующий сигнал имеет частоту более 4 МГц, то для использования в системе «Минидиск» была разработана специальная высокочастотная магнитная головка, способная изменять направление формируемого магнитного поля с частотой около 10 МГц. При таком способе записи новая магнитограмма никак не зависит от того, что было записано на диске раньше.

Магнитооптический эффект, который используется для воспроизведения информации, записанной на магнитооптическом диске, был открыт

шотландским физиком Джоном Керром еще в 1876 году и назван в его честь *магнитооптическим эффектом Керра*. Состоит он в следующем. Если пленку, содержащую участки с противоположной намагниченностью, осветить лучом линейно поляризованного света, то углы поляризации пучков, отраженных от этих участков, будут различными (рис. 12.7). Угол  $\theta$  между векторами поляризации света  $E_A$  и  $E_B$ , отраженного от разнополяризованных участков, называется *углом Керра*. При этом важно, чтобы плоскость поляризации падающего пучка совпадала с плоскостью его падения.

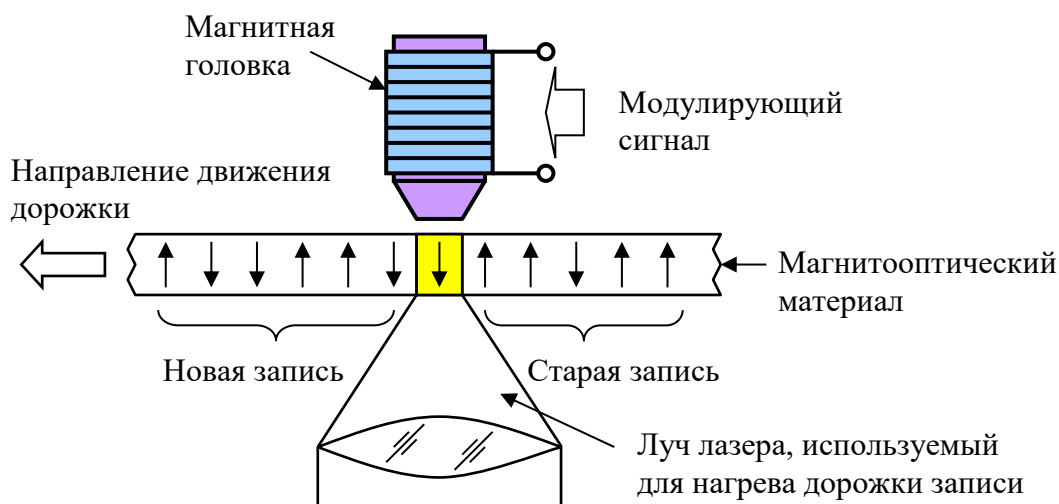


Рис. 12.6. Метод формирования магнитограммы на магнитооптическом носителе путем модуляции информационным сигналом тока через катушку магнитной головки

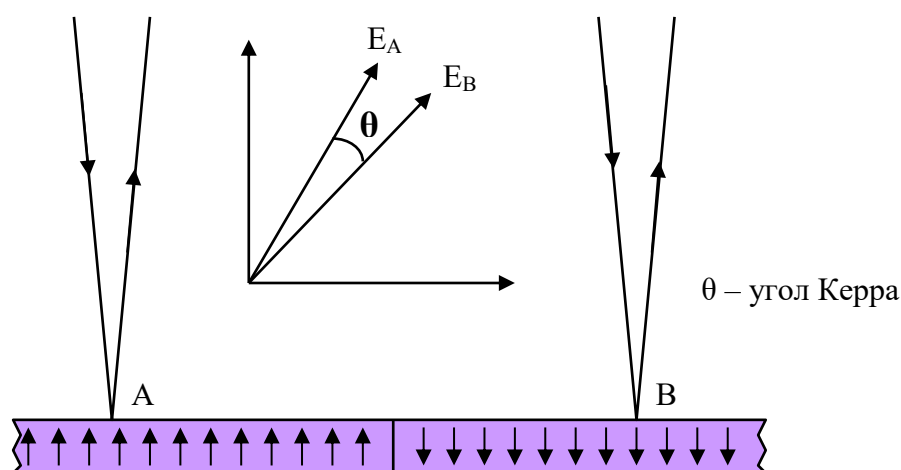


Рис. 12.7. Эффект Керра

Если отраженный свет пропустить через анализатор (пластинку из анизотропного вещества), то его интенсивность также получится различной. Поместив далее на пути луча фотоприемник, можно получить электрическое отображение информации, содержащейся в сочетании зон



намагниченности регистрирующего слоя. Следует заметить, что угол Керра весьма невелик и не превышает десятых долей градуса, однако этого вполне достаточно для того чтобы считывание информации было возможным.

Считывание в обоих случаях производится одинаково – лучом того же самого лазера, но работающего в режиме пониженной мощности, чтобы не повредить магнитограмму.

## 12.2. СТРУКТУРА МИНИДИСКА

Как уже говорилось, существует не один, а два типа минидисков. Один из них – с предварительной записью, по структуре полностью соответствует обычному компакт-дису, и запись на него невозможна. Другой выполнен по магнитооптической технологии и предназначен для записи звуковой информации пользователем.

Типичная структура магнитооптического диска показана на рис. 12.8. Основой его, как и в случае компакт-диска, служит поликарбонат. Регистрирующий слой в данном случае – соединение тербия (Tb), железа (Fe) и кобальта (Co). Для защиты от коррозии регистрирующий слой с обеих сторон окружен слоями диэлектрика из двуокиси кремния  $\text{SiO}_2$ . В качестве отражающего слоя используется пленка алюминия (Al). Поскольку отраженный луч лазера дважды проходит через регистрирующий слой и два слоя двуокиси кремния, интенсивность отраженного пучка здесь значительно меньше, чем в случае обычного компакт-диска или минидиска с предварительной записью. Для сравнения: компакт-диск отражает 70% падающего на него света, а магнитооптический минидиск – всего 15-25%. Тем не менее, система считывания проигрывателя минидисков адаптирована к такому коэффициенту отражения и сложностей при воспроизведении не возникает [36].

Для защиты от повреждений поверхность диска со стороны алюминия покрывается слоем прочной пластмассы, а на защитный слой наносится тонкий слой силиконовой смазки для улучшения скольжения магнитной головки по поверхности диска. Тем не менее, смазку можно и стереть.

Для того чтобы обеспечить формирование дорожки на записываемом минидиске, на его поверхности еще в процессе изготовления формируется U-образная направляющая канавка (рис.12.9).

Кроме того, направляющая канавка еще и форматируется путем модуляции частоты вобуляции (синусоидального колебания стенок дорожки) (рис. 12.10). Это позволяет определять и фиксировать в служебных данных информацию об адресах записываемых музыкальных фрагментов. Такая система предварительного форматирования называется ADIP (Address In Pre-groove). Размер пятна лазерного луча несколько больше ширины канавки и он модулируется вобуляцией канавки.

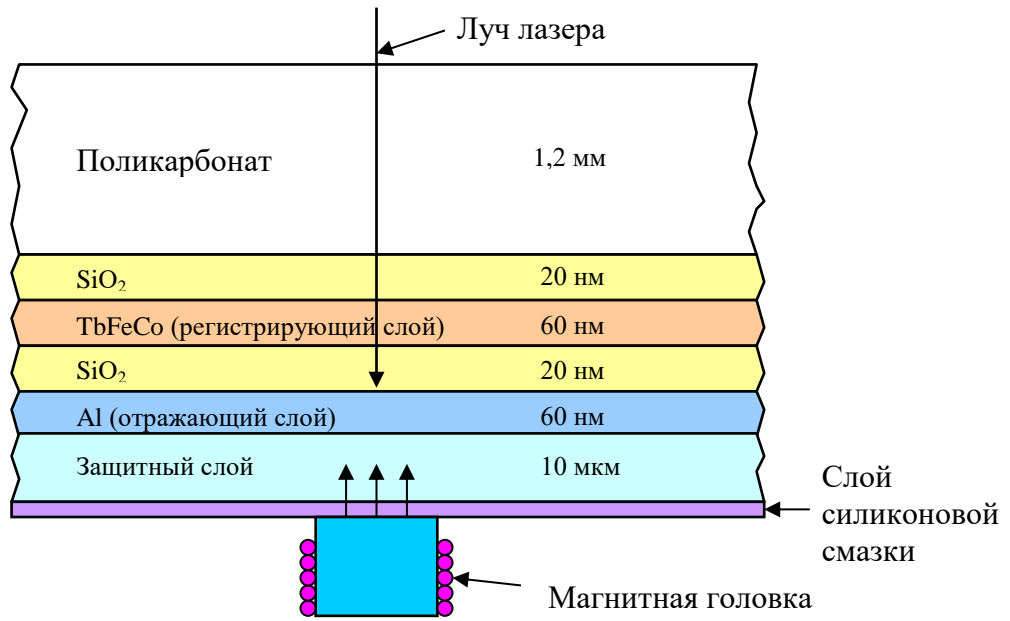


Рис. 12.8. Структура магнитооптического минидиска

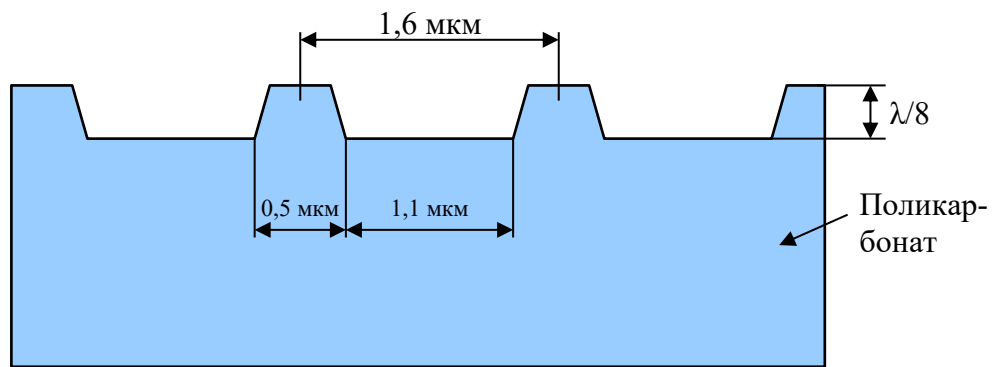


Рис. 12.9. Поперечный разрез заготовки магнитооптического (записываемого) минидиска

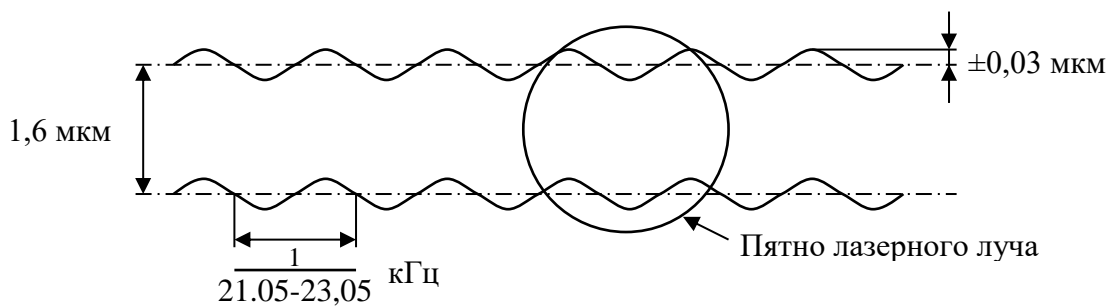


Рис. 12.10. Канавка предварительного форматирования

Частота сигнала возбуждения равна 22,05 кГц. Эту частоту легко получить путем деления пополам частоты дискретизации звукового сигнала  $f_d = 44,1$  кГц. Методом частотной модуляции сигнала возбуждения в него вводится информация о разметке диска, что позволяет при записи использовать ее для формирования адресных данных записываемых музыкальных фрагментов, а также обеспечивать постоянную линейную скорость (CLV) записи путем управления скоростью вращения двигателя. При воспроизведении адресные данные используются для поиска нужных фрагментов и для поддержания постоянной линейной скорости считывания.

Кодирование данных ADIP производится перед изготовлением диска путем частотной модуляции несущей  $f_n = 22,05$  кГц бифазным кодом.

**Бифазный код (Bi-φ)** характеризуется обязательной сменой уровня в начале каждого тактового интервала (рис. 12.11). При этом «единица» кодируется дополнительным изменением уровня в центре тактового интервала. Отсутствие такого изменения обозначает «ноль».

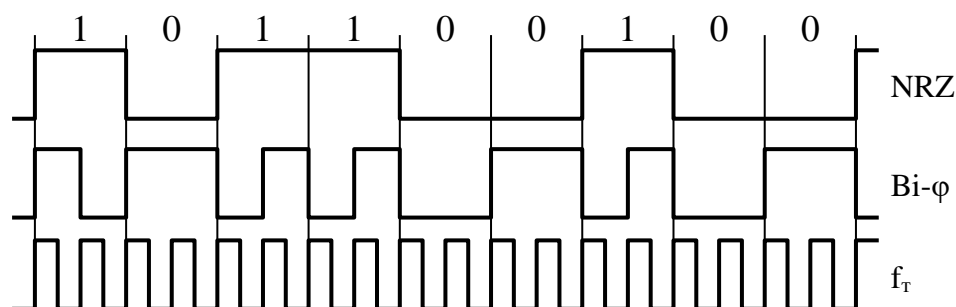


Рис. 12.11. Бифазная модуляция

Модуляция осуществляется с помощью тактовой частоты  $f_T = 6300$  Гц, которая получается путем деления частоты дискретизации 44,1 кГц на 7 (см. рис. 12.12). Результирующая скорость потока бит данных ADIP получается равной 3150 бит/с. Модуляция несущей при этом выразится в изменении ее частоты на один килогерц выше или ниже основного значения, т.е. от 21,05 кГц до 23,05 кГц -  $(22,05 \pm 1)$  кГц.

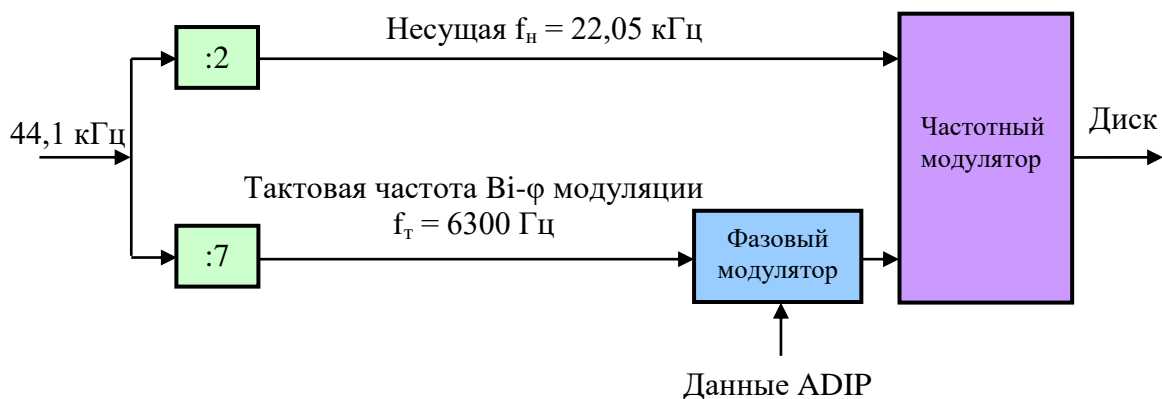


Рис. 12.12. Модуляция несущей данными ADIP

## 12.3. КОМПРЕССИЯ ЗВУКОВЫХ ДАННЫХ ПО АЛГОРИТМУ ATRAC

Как уже говорилось, для уменьшения объема звуковых данных, записываемых на миниатюрный минидиск, их подвергают процедуре компрессии по специально разработанному алгоритму ATRAC (Adaptive TRansform Acoustic Coding). Рассмотрим этот алгоритм.

### 12.3.1. КОДЕР ATRAC

На входе кодера ATRAC звуковые данные представлены в том же виде, что и на входе кодера CIRC формата CD – 16-разрядные отсчеты, следующие с частотой 44,1 кГц. Суммарная скорость такого потока данных в пересчете на два стереоканала составляет  $16 \times 2 \times 44100 = 1,4$  Мбит/с. На выходе кодера скорость потока данных должна составлять 292 кбит/с, т.е. примерно в 5 раз меньше. Другими словами, коэффициент сжатия данных здесь составляет примерно 1:5. Чтобы получить такой коэффициент сжатия, используется несколько процедур, позволяющих устранить из потока данных, представляющих звуковой сигнал, психоакустическую избыточность, т.е. те компоненты звука, которые человеческий слух не воспринимает или воспринимает с трудом. Блок схема, иллюстрирующая процесс такого преобразования (кодер ATRAC), показана на рис. 12.13.

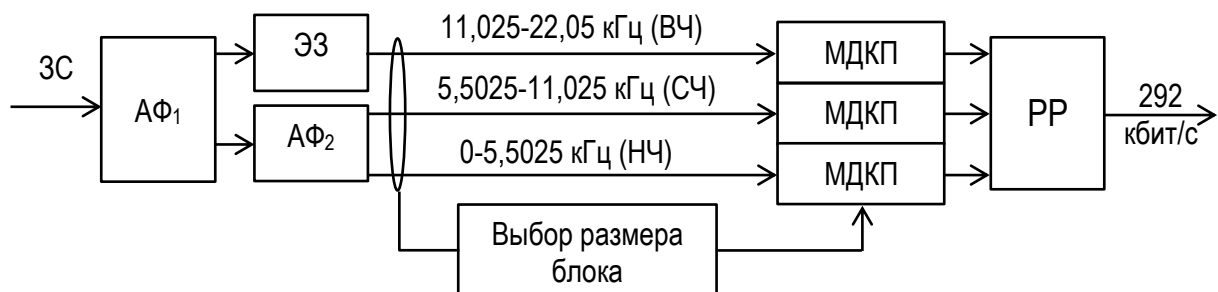


Рис. 12.13. Кодер ATRAC

АФ1,2 – анализирующие фильтры; ЭЗ – элемент задержки;  
РР - распределение разрядов; МДКП – блок модифицированного  
дискретно-косинусного преобразования

Прежде всего, цифровой звуковой сигнал делится на три неодинаковые полосы - высокочастотную 11,025-22,05 кГц (ВЧ), среднечастотную 5,5025-11,025кГц (СЧ) и низкочастотную 0-5,5025 кГц (НЧ). Деление выполняется с помощью так называемых *квадратурных зеркальных фильтров*, или *фильтров QMF (Quadrature Mirror Filters)*. Такие фильтры способны делить частотный диапазон только пополам, поэтому вначале полный диапазон частот (условно 0-22,05 кГц) с помощью анализирующе-

го фильтра  $A\Phi_1$  делится на два одинаковых поддиапазона: 11,025-22,05 кГц (ВЧ) и 0-11,025 кГц (НЧ), а затем нижний поддиапазон делится еще раз пополам с помощью анализирующего фильтра  $A\Phi_2$ : 5,5025-11,025кГц (СЧ) и 0-5,5025 кГц (НЧ). Такое неодинаковое деление предпочтительнее деления на три одинаковые полосы по двум причинам. Во-первых, как известно из психоакустики, критические полосы человеческого слуха в низкочастотном диапазоне гораздо уже, чем в высокочастотном, поэтому в первом приближении такое неравномерное деление больше соответствует особенностям слухового восприятия звука человеком [181-208]. Во-вторых, квадратурные зеркальные фильтры наиболее просты в реализации и обладают наименьшими искажениями, неизбежно возникающими при перекрытии частотных спектров смежных поддиапазонов.

Для обеспечения правильных временных соотношений высокие частоты задерживаются элементом задержки ЭЗ, пока производится обработка сигнала в низкочастотной и среднечастотной субполосах.

Затем сигналы всех трех субполос проходят через блоки модифицированного дискретно-косинусного преобразования МДКП (MDCT – Modified Discrete Cosine Transform), где временные отсчеты звукового сигнала преобразуются в частотные компоненты в том же самом временном интервале. Перед выполнением МДКП оценивается характер сигнала в каждой из субполос, и в соответствии с этим выбирается размер блока для последующей обработки. В зависимости от характера сигнала можно выделить большее или меньшее время для обработки блока и, следовательно, анализировать его более или менее тщательно. Это позволит наиболее точно определить степень уменьшения объема данных и, таким образом, повысить общую эффективность процедуры кодирования.

Обычное ИКМ-преобразование очень неэффективно, поскольку биты используются весьма расточительно. Для записи высококачественных звуковых программ (впрочем, как и видеопрограмм) в этом случае приходится тратить много места на поверхности носителя. Если, к примеру, кодируется музыка для записи компакт-диска (в формате CD), то нет никакой разницы, есть звук в какой-то момент времени или его нет. Даже беззвучные паузы будут кодироваться, обрабатываться и записываться на диск. Следовательно, получается, что большой объем отсчетов звукового сигнала, по 16 бит каждый, будет означать лишь одно – отсутствие звука. Очевидно, что это бесполезная трата времени и объема данных, которые приходится записывать. Предположим, что существует возможность обнаруживать такие «бесполезные» отсчеты и корректировать объем записываемых данных, соответствующих такому ничему не значащему входному сигналу – например, использовать не 16, а всего лишь два бита для каждого отсчета, не имеющего реального содержания. Тогда можно было бы сэкономить много процессорного времени и места на дорожке записи. Выбор размера блока, который производится в системе кодирования по алгоритму

ATRAC, соответствует процедуре, описанной в этом примере, но только этим он не ограничивается.

Анализ и преобразование выполняются над некоторыми массивами данных, т.е. определенное количество отсчетов объединяются и обрабатываются как один блок данных. Когда мы изменяем размер блока, мы также изменяем количество отсчетов, которые определяют время и объем памяти, необходимые для обработки каждого отдельного блока.

Максимальный интервал времени, выделяемых для анализа одного блока, составляет 11,6 мс. Всего существует восемь различных интервалов, минимальный из них равен  $11,6/8 = 1,45$  мс. Процедура подобного деления на временные блоки называется *неравномерным разделением по времени (Non-Uniform Time Splitting)*.

Смысл такого деления на блоки заключается в следующем.

- Существует несколько разновидностей звука. Слуховая система человека распознает тип звука и адаптируется к нему.

- Если рассматривать, к примеру, короткий импульс (рис. 12.14,а), то по оси времени он займет очень мало времени и нет необходимости резервировать для его анализа большой временной блок. Такой короткий звук не требует подробного анализа, поскольку уровень звука изменяется очень резко и необходимо знать только эти изменения или коэффициент изменения. Явление это является типичным: когда разница уровней между последовательными звуками очень большая, то слуховая система человека в большей степени будет сосредоточена на самих различиях, а не на деталях этих различий.

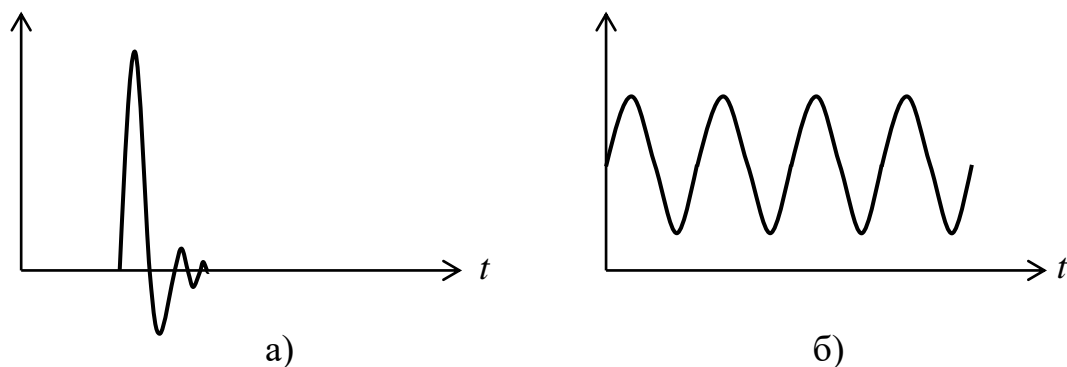


Рис. 12.14. Короткий импульс (а) и синусоида (б)

- Пример противоположного свойства: если рассматривать в качестве входного воздействия медленно изменяющийся синусоидальный звуковой сигнал (рис. 12.14,б), то по оси времени он занимает большой интервал, и мы вынуждены резервировать достаточно длительный промежуток времени для его анализа. При этом анализировать этот звук можно куда более детально. И это действительно необходимо, поскольку слуховая система

человека будет делать с таким звуком то же самое. В подобных случаях слух становится весьма чувствительным к деталям.

Кроме рассмотренного неравномерного разделения по времени, используется также *неравномерное разделение по частоте (Non-Uniform Frequency Splitting)*.

Оно основано на концепции критических полос, о которой уже упоминалось выше. Есть, однако, отличие: неравномерное разделение по частоте в системе ATRAC использует не 24, а большее число полос – 52. При этом для низких частот используется 20 критических субполос, а для средних и высоких – по 16 критических субполос.

Очевидно, что чем больше используется критических полос, тем выше получается точность анализа звукового сигнала. Кроме того, в области наивысшей чувствительности слуха (примерно до 4 кГц) число полос будет наибольшим (рис. 12.15).

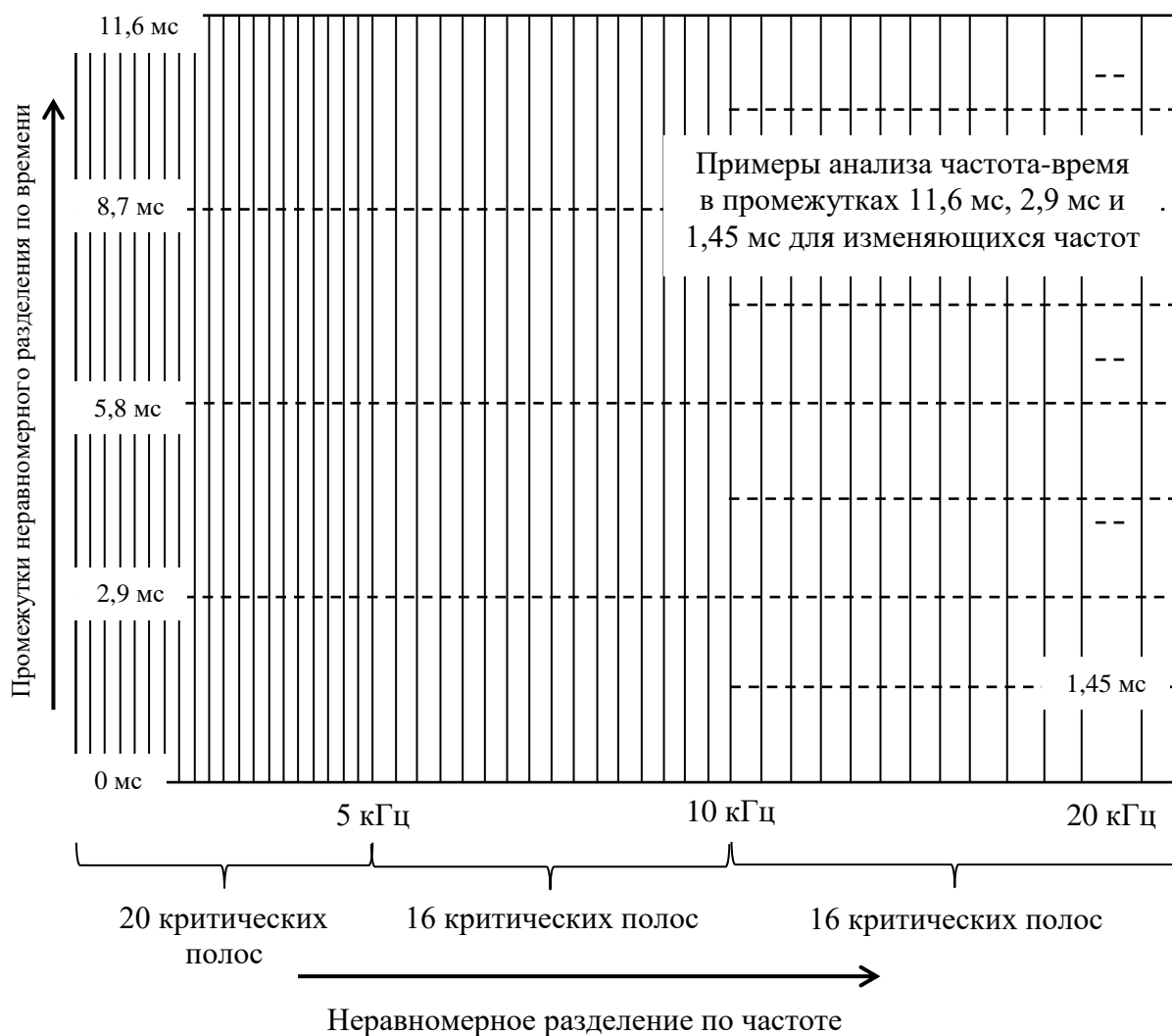


Рис. 12.15. Неравномерное разделение

Выбор разделения по времени также играет очень важную роль. По существу он выполняется на базе сравнения числа соседних блоков, где измеряются и сравниваются пиковые значения. На основе такого сравнения выбирается такой режим разделения, который в данных обстоятельствах является оптимальным (рис. 12.16).

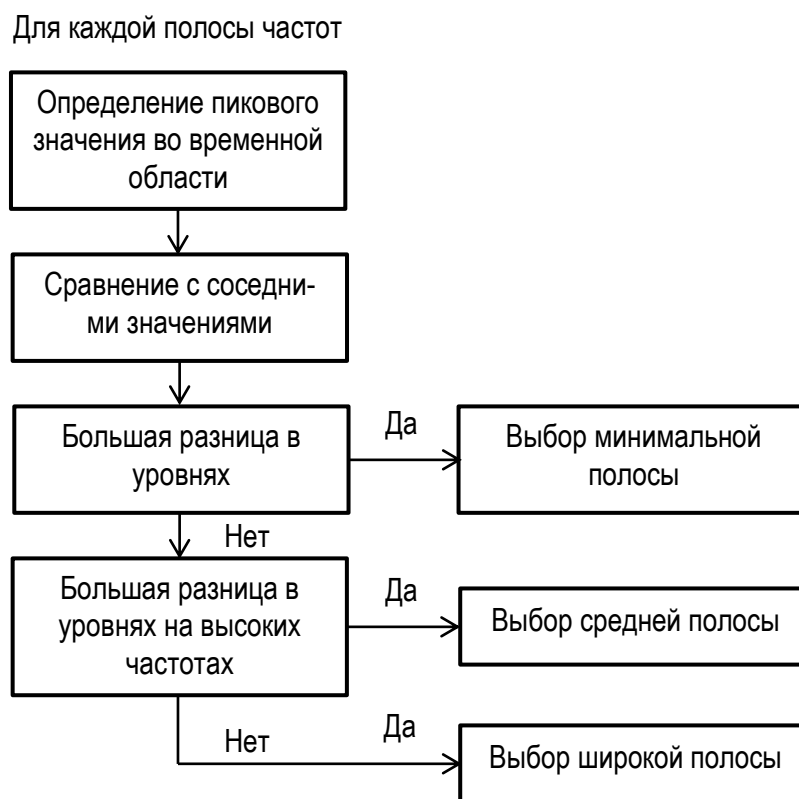


Рис. 12.16. Выбор оптимальной стратегии разделения

Практический эффект от процесса такого разделения состоит в следующем.

- Можно использовать метод обработки, который в наибольшей степени соответствует обработке, выполняемой слуховой системой человека.
- Для каждого диапазона частот можно определить критические субполосы, приспособленные к чувствительности человеческого слуха в данной полосе частот, и соответствующим образом настроить процесс обработки.
- Для каждой полосы частот и входного сигнала можно определить время, которое потребуется для обработки.
- В пределах каждой полосы частот и, исходя из выбранного времени обработки, рассчитывается ряд спектральных составляющих. Очевидно, что чем большее количество спектральных составляющих рассчитано, тем более высоким будет разрешение.
- Разделение по времени/частоте подобным образом действительно может обеспечить адаптацию стратегии обработки входного звукового



сигнала и в то же время поддерживать скорость выходного потока постоянной на уровне 292 кбит/с.

Все это сводится к правильному выбору баланса между распределением времени и разрешающей способностью обработки. Для тех областей звукового спектра, где необходима точность, можно зарезервировать больший объем обработки (обычно это требуется в области низких частот). Для тех областей, где более важной является скорость (обычно в области высоких частот), можно выделить меньшие промежутки времени при более низком разрешении и т.д. (рис. 12.16).

Выходной сигнал блоков МДКП служит информацией в частотной области, и, как уже говорилось, его можно представить как анализ частотного спектра входного сигнала в пределах определенного временного интервала (блока).

На этом выходе можно теперь воспользоваться упомянутыми выше законами психоакустики для снижения скорости потока данных – проверку уровня маскирования звуковых сигналов.

Последней стадией обработки является распределение разрядов. Вся значимая информация здесь не передается в виде отсчетов звукового сигнала фиксированной разрядности, как в формате CD-Audio. Каждый частотно-временной блок данных теперь известен вместе со своим уровнем. Он представляется не фиксированным числом разрядов, а плавающим – от 0 до 15 разрядов, определяющим динамический диапазон данного фрагмента сигнала. Масштабный коэффициент определяет относительный уровень сигнала, а остальные разряды можно удалить как шум квантования.

Выходной сигнал системы кодирования ATRAC радикально отличается от данных, записываемых на компакт-диск формата CD-Audio. На минидиск записываются данные, отражающие разрядность кодовых слов, масштабные коэффициенты и данные о спектральных составляющих (данные для каждого блока), что можно сравнить с компьютерным представлением информации с плавающей запятой.

Кодированный поток выходных данных со скоростью 292 кбит/с подвергается дальнейшей обработке (ACIRC, EFM и т.д.) и после этого записывается на диск.

### **12.3.2. ATRAC-ДЕКОДИРОВАНИЕ**

При считывании диска все процедуры выполняются в обратном порядке: EFM-демодуляция, ACIRC-декодирование и декодирование по системе ATRAC (рис. 12.17).

Входной поток демультимплексируется и проверяется на наличие ошибок. На основе тех же законов психоакустики, которые использовались при кодировании, процесс декодирования обеспечивает восстановление исходной информации. Полученные данные (в каждой полосе частот) направля-

ются в блоки выполнения обратного МДКП, после чего объединяются с данными других полос для получения конечного правильного звукового сигнала в форме цифровых отсчетов. Таким образом восстанавливается исходный звуковой сигнал, за вычетом отброшенных составляющих, которые играют незначительную роль. Поэтому разница между исходным звуковым сигналом и сигналом, воспроизведенным системой ATRAC, минимальна.

Еще одним преимуществом такого способа передачи звукового сигнала является возможность изменения некоторых параметров в будущем (с целью дальнейшего улучшения) без создания проблем совместимости. Рассматриваемая система спроектирована таким образом, чтобы можно было изменять алгоритмы без создания проблем совместимости до тех пор, пока используются базовые форматы.

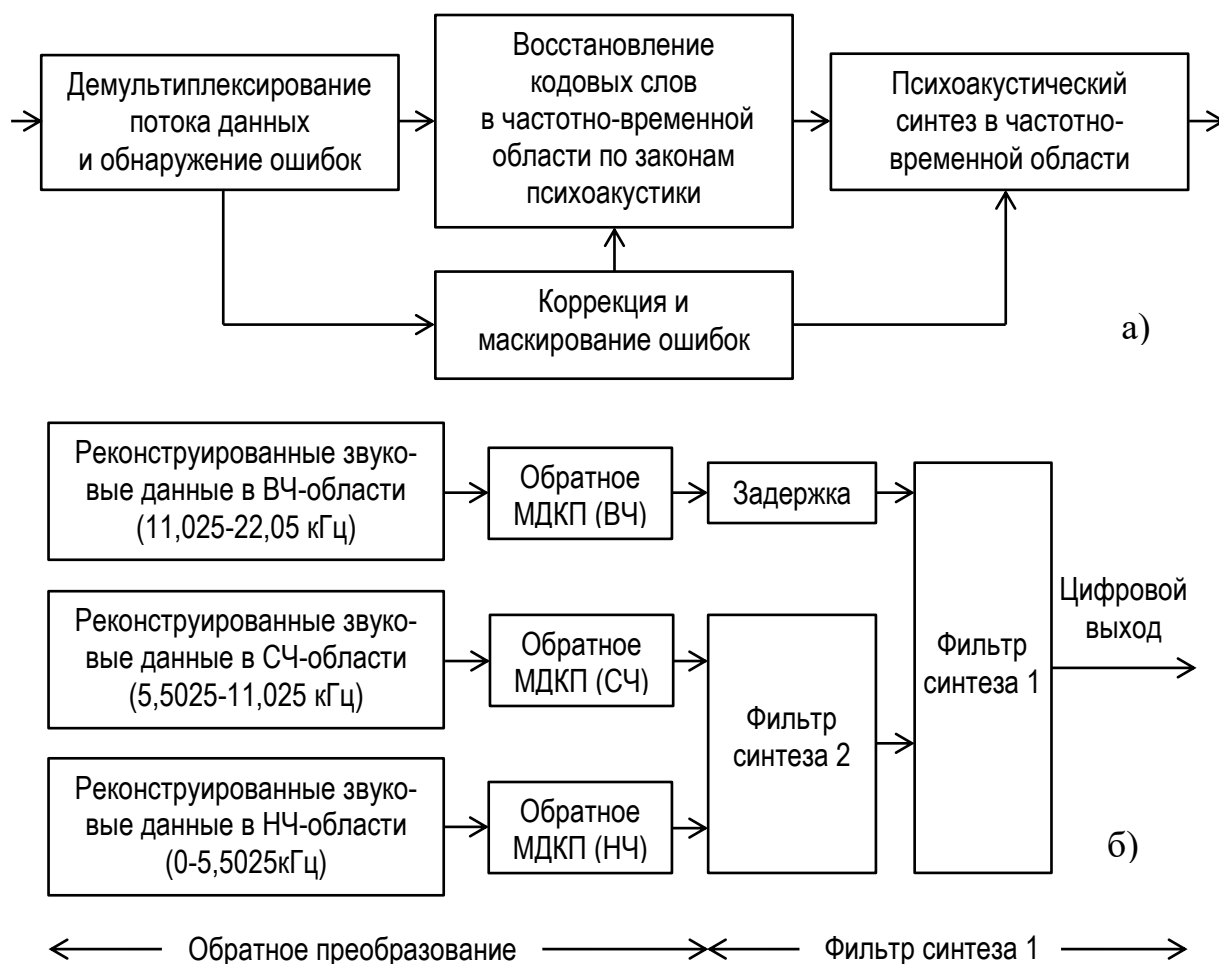


Рис. 12.17. Декодирование данных, считанных с минидиска, и ATRAC-декодирование

### 12.3.3. ВЕРСИИ СИСТЕМЫ ATRAC

В первых минидисковых устройствах использовалась система ATRAC версии 1. Однако качество звукового сигнала, полученного с ее помощью, было далеко от совершенства. После этого она много раз дорабатывалась, и последовательно появлялись версии 2, 3, 4, 4,5 и R. Каждая новая версия была, очевидно, усовершенствованием предыдущей, шаг за шагом улучшая качество алгоритмов кодирования и декодирования звукового сигнала.

Версия 1 использовалась только в самых первых устройствах. Сразу после нее появилась версия 2, которая заметно улучшила качество звука. С появлением же версии 3 звучание минидиска вплотную приблизилось к стандартам, которые соответствуют звучанию компакт-диска формата CD-Audio. Последующие версии ATRAC обладали столь замечательным качеством, что нужен был исключительно хороший слух, чтобы заметить разницу между компакт-диском и минидиском.

Большинство усовершенствований в версиях ATRAC связаны со следующими обстоятельствами.

- Пересматривались и уточнялись размеры и количество критических субполос.

- Пересматривались и делались более гибкими параметры разделения по времени и частоте.

- Были увеличены коэффициенты масштабирования и число разрядов для их описания.

- Пересматривались психоакустические характеристики компрессии и адаптировались к потребностям пользователей.

- Со временем быстродействие и вычислительная мощность процессоров, используемых для кодирования и декодирования в системе ATRAC, заметно возросли, что позволило производить более сложные и более точные вычисления в реальном времени.

- Развитие науки и технологий обеспечило возможность использования двукратной обработки входного звукового сигнала, что позволило получить гораздо более высокое качество результата. Такая двухстадийная обработка обеспечивает очень высокую точность кодирования. На первой стадии система ATRAC определяет основные параметры звукового сигнала. При этом уточняется в каком направлении (частота, масштабирование, время) кодер должен выполнить наибольший объем работы для получения наилучшего результата, а также где большие усилия не требуются, иначе говоря, где имеются резервы, на которых можно сэкономить без особых потерь в качестве результата. Повторная обработка использует информацию, полученную на первой стадии, для переработки звуковых данных с целью достижения наилучшего результата. Такую двухэтапную обработку вполне можно сравнить с упражнением по сортировке: предположим, что требуется за короткое время рассортировать ряд предметов по некоторой

совокупности их свойств – размеру, цвету, запаху и т.д. Очевидно, что можно достигнуть лучшего результата, если за выделенное время выполнить сначала грубую сортировку, а потом, получив предварительный результат и накопив определенный опыт на первом этапе, выполнить вторую сортировку.

#### 12.3.4. АЛГОРИТМ ATRAC3/MDLP

Отдельного внимания заслуживает один из наиболее совершенных алгоритмов компрессии семейства ATRAC – ATRAC3, который был разработан и использовался для режима долговременной записи/воспроизведения минидиска. Этот алгоритм также носит название MDLP-сжатием (аббревиатура от MiniDisc Long Play). В табл. 12.2 приведены данные обо всех возможных режимах.

Таблица 12.2

##### *Режимы записи*

| Режим записи | Число каналов | Макс. время записи (мин) | Режим ATRAC | Скорость передачи данных (кбит/с) |
|--------------|---------------|--------------------------|-------------|-----------------------------------|
| Моно         | 1             | 160                      | ATRAC       | 146                               |
| Сtereo       | 2             | 80                       | ATRAC       | 292                               |
| LP2          | 2             | 160                      | ATRAC3      | 132                               |
| LP4          | 2             | 320                      | ATRAC3      | 66                                |

Диски, кодируемые в режиме ATRAC3, могут быть воспроизведены на любом проигрывателе минидисков, выпущенном после внедрения алгоритма ATRAC3 (1999 г.). Очевидно, что получить обратную совместимость было весьма затруднительно, поэтому ее и не существует. Режим «160 минут моно» был предусмотрен с самого начала, хотя не все первые проигрыватели были запрограммированы для воспроизведения/записи в режиме «моно».

Допустимо смешивать музыкальные дорожки, которые были закодированы в различных режимах ATRAC на одном диске, так как информация о режиме записи является именно той информацией, которая записывается для каждой дорожки индивидуально.

Режимы LP2 и LP4 работают на основе таких же алгоритмов, как и все другие режимы ATRAC с полной скоростью потока данных. Более высокое сжатие получается посредством сильного сокращения количества данных – этого можно добиться разными способами: путем использования меньшей разрядности для коэффициентов масштабирования или промежутков времени, меньшего числа критических полос, различных пороговых значений и т.д. Очевидно, однако, что это повлияет на качество звуча-

ния. Поэтому следует понимать, что режимы LP2 и LP4 являются компромиссом между качеством и количеством – большая продолжительность программ достигается за счет некоторого снижения качества их звучания.

## 12.4. ФОРМАТ ДАННЫХ

Формат данных минидиска аналогичен формату CD-ROM в режиме 2, описанному в «желтой книге».

В этом формате CD-ROM данные разбиты на сектора. Тот же формат сектора использован в минидиске, но на основе другой концепции: формат сектора CD-ROM расширен до формата кластера. Формат данных на минидиске удобно сравнивать с форматом любой книги:

Книга → Минидиск  
 Глава → Кластер  
 Параграф → Сектор  
 Предложение → Звуковая группа  
 Слово → Данные

Один кластер содержит 36 секторов, из которых 32 сектора используются для сжатых данных и 4 сектора – для компоновки и размещения субданных (рис. 12.18). Эти 4 сектора (компоновки/субданных) отличаются на предварительно записанных и записываемых дисках.

- У предварительно записанных дисков эти сектора заполняются субданными, которые могут содержать графическую информацию (для отображения на дисплее), информацией о диске, текстами песен и т.д. Другими словами, это «художественная» область.

- У записываемых дисков три сектора нужны для данных о компоновке и один для субданных. Назначение данных компоновки будет пояснено ниже.

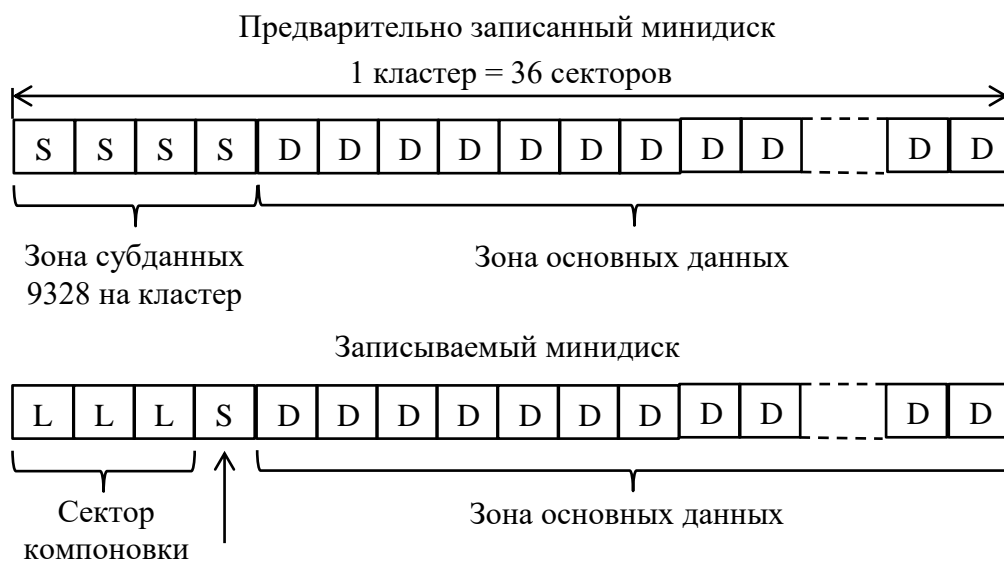


Рис. 12.18. Структура кластера

Каждый сектор содержит в общей сложности 2352 байта, из которых 2332 байта являются байтами данных (как в формате CD-ROM). Остальные 20 байтов используются для адресации и управления.

Следующий уровень – звуковая группа. Звуковая группа является наименьшим элементом разбиения, содержащим 424 байта (по 212 байтов на левый и правый каналы). Звуковая группа представляет собой сжатые системой ATRAC звуковые данные, эквивалентные 512 несжатым отсчетам при частоте дискретизации 44,1 кГц.

В двух секторах содержатся 11 звуковых групп. Первый сектор содержит пять полных звуковых групп и половину шестой группы левого канала. Следующий сектор начинается с шестой группы правого канала и продолжается еще пятью звуковыми группами. Таким образом, можно подсчитать количество байтов на сектор:  $424 \times 5 + 424/2 = 2332$  байта.

Кроме того, можно обосновать степень сжатия, используемую на минидисках:

- каждая звуковая группа, сжатая системой ATRAC, содержит 424 байта;

- каждая из этих звуковых групп соответствует 512 сжатым 16-разрядным отсчетам каждого из двух каналов:  $512 \times 16 \times 2 = 16384$  бита = 2048 байт

- вывод: 2048 байт сжаты в 424 байта, что соответствует коэффициенту сжатия примерно 1:5.

Теперь следует пояснить способ компоновки кластеров. Кластеры на минидиске должны быть скомпонованы (связаны) друг с другом. Это значит, что между ними должна быть предусмотрена область перехода во избежание ошибочной перезаписи начала первого сектора одного кластера окончанием последнего сектора предыдущего кластера.

Такая компоновка кластеров обусловлена необходимостью обеспечить возможность записи. На компакт-дисках и CD-ROM (неперезаписываемых) используются CIRC-кодирование и модуляция EFM. В формате «Минидиск» используется та же самая EFM-модуляция, но расширенный вариант CIRC-кодирования – ACIRC (Advanced CIRC).

Исходный вариант CIRC-кодирования был использован в качестве основы, но дополнен усовершенствованной системой перемежения, чтобы усилить защиту от пакетов ошибок.

Как показано на рис. 12.19, ACIRC от CIRC отличается увеличенной задержкой и большей длиной перемежения, для того, чтобы повысить возможность коррекции ошибок. Одним из результатов такой дополнительной задержки является то обстоятельство, что один сектор на входе кодера занимает 98 кадров, а перемежение – 108 кадров. Поэтому между соседними кластерами должна быть предусмотрена буферная зона, которая обеспечивала бы надлежащую запись столь длинных последовательностей с перемежением.

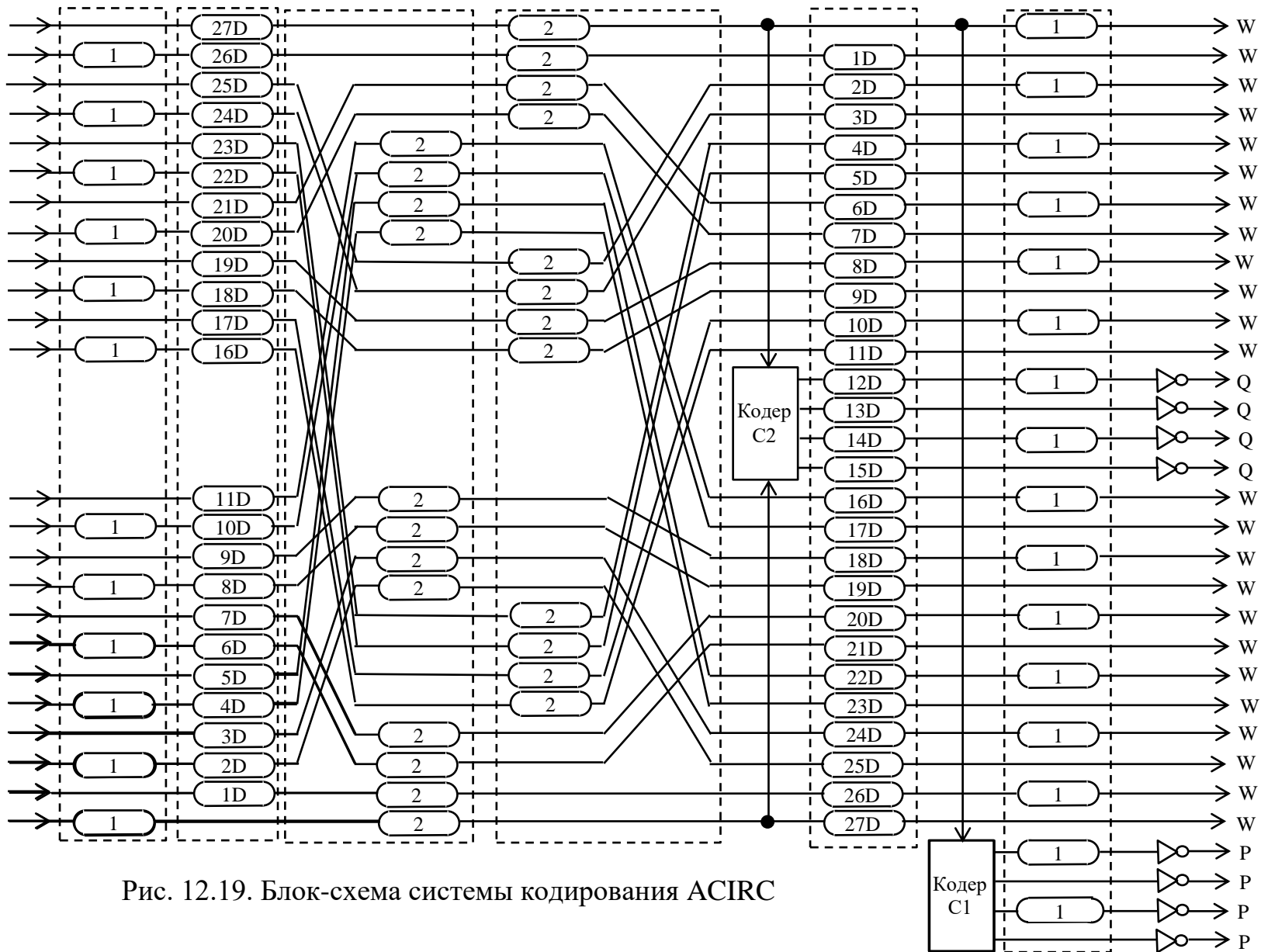


Рис. 12.19. Блок-схема системы кодирования ACIRC

Один кластер представляет собой минимальную область, используемую при записи минидиска. Так как перемежение последнего сектора в кластере не завершено, а перемежение первого сектора в следующем кластере только должно начаться, для разделения соседних кластеров необходимо предусмотреть секторы компоновки.

Представим себе схему кластеров без области компоновки. Мы записываем один кластер, но перемежение в последнем секторе предыдущего кластера еще не завершено. Последние перемежаемые и задержанные байты из него будут записаны в первый сектор следующего кластера и, безусловно, разрушат информацию в данном секторе. Ясно, что такая ситуация недопустима.

Для этой цели достаточно трех секторов компоновки. Первый сектор и часть второго используются для оставшегося перемежения последнего кластера. Другая часть второго сектора компоновки и третий сектор – для перемежения следующего сектора (рис. 12.20).

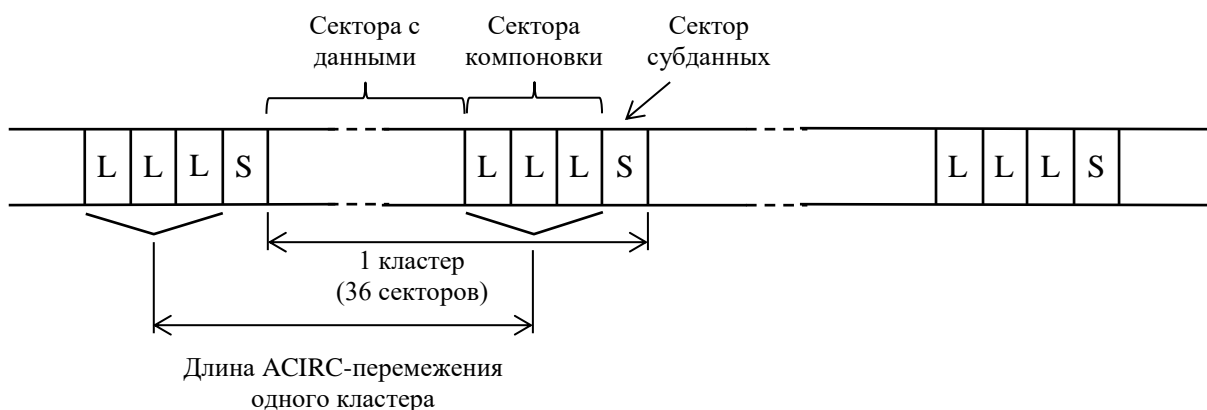


Рис. 12.20. Компоновка кластера

Такой формат компоновки необходим только для записываемого минидиска. На предварительно записанный тиражированный диск данные записываются в один прием. Они не перезаписываемые, следовательно, нет необходимости в секторах компоновки. В этом случае свободное пространство используется для размещения субданных.



## 13. ЦИФРОВЫЕ ЗВУКОВЫЕ ИНТЕРФЕЙСЫ

Английское слово *interface* имеет несколько значений: граница раздела, поверхность раздела, сопряжение, стык, устройство сопряжения, поэтому в различных областях техники в понятие *интерфейс* специалисты вкладывают разный смысл.

В одном случае под интерфейсом понимают совокупность компьютерных программ, с помощью которых пользователь может общаться с машиной, т.е. это правила взаимодействия операционной системы компьютера (машины) с пользователем (физическим лицом).

В другом случае это совокупность программных и аппаратных средств, обеспечивающих логическое и физическое взаимодействие отдельных блоков и программ вычислительной системы (внутрисистемное взаимодействие).

В третьем случае это также совокупность программных и аппаратных средств, но эти средства обеспечивают логическое и физическое взаимодействие между устройствами и оборудованием принципиально различного назначения.

Последнее определение наиболее близко к определению цифрового звукового интерфейса, поскольку с его помощью обеспечивается взаимодействие аппаратуры принципиально различного функционального назначения: магнитофонов, микшеров, синтезаторов, лазерных проигрывателей, цифровых усилителей, компьютеров, тюнеров, ИКМ-адаптеров, микрофонов и т.д.

Таким образом, будем называть ***цифровым звуковым интерфейсом совокупность программных и аппаратных средств, обеспечивающих обмен цифровой звуковой информацией между аудиооборудованием.***

В общем случае интерфейс включает в себя преобразователь информации в один из стандартных форматов (кодер интерфейса), соединительную линию, включающую в себя входной и выходной разъемы и соединительный кабель, и устройство обратного преобразования информации – декодер интерфейса (рис. 13.1).

Форматы данных у разных интерфейсов сильно отличаются по содержанию, а кодеры и декодеры – по сложности. В одном случае через интерфейс передается только непосредственно цифровой звуковой сигнал в виде последовательности отсчетов, сигнал синхронизации и очень ограниченное число дополнительных данных – как, например, в формате TDIF, где кроме цифрового звукового сигнала и сигналов синхронизации, передается только указатель наличия или отсутствия имфазиса.

В других форматах количество дополнительных данных гораздо больше, и информация организуется в блоки, каждый из которых снабжен блочной синхрогруппой (SDIF-2, ADI). Может использоваться и дополнительная канальная модуляция потока данных (SDIF-3).

В наиболее сложных форматах (AES3, AES10, S/PDIF) объем дополнительной информации сопоставим с объемом основных звуковых данных, а сам формат имеет очень сложную многоуровневую структуру (слова, кадры, субкадры, блоки). Здесь используется несколько видов синхронизирующей информации, в том числе несколько разных синхрогрупп, данные кодируются кодами, контролирующими ошибки, и перед передачей в канал модулируются канальными кодами.

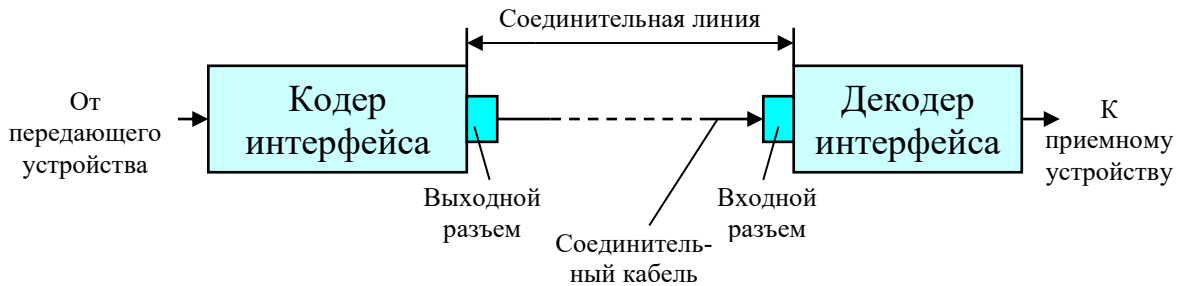


Рис. 13.1. Структурная схема цифрового звукового интерфейса

В качестве соединительной линии могут использоваться экранированная витая пара, коаксиальный кабель или оптическое волокно, поэтому выходные и входные цепи интерфейсов всегда имеют соответствующие буферные каскады или преобразователи физического представления сигнала: электрического в оптический (светодиод или полупроводниковый лазер) и оптический в электрический (фотодиод).

### 13.1. AES3 (AES/EBU)

*Стандарт AES3 относится к числу профессиональных и содержит практические рекомендации, относящиеся к формату последовательной передачи двух каналов цифровых звуковых данных, представленных в линейном ИКМ-коде [209]. Первая редакция данного стандарта была разработана в 1985 году усилиями Международного общества инженеров-разработчиков звукового оборудования **AES (Audio Engineering Society)**, после длительного анализа и обсуждения была утверждена под названием **AES3-1985**. Этот стандарт был поддержан Европейским радиовещательным союзом **EBU (European Broadcasting Union)**, получил статус международного и стал называться **AES/EBU [210]**, хотя в документах AES он по-прежнему обозначается **AES3**.*

Несмотря на то, что стандарт AES3 изначально разрабатывался как двухканальный, спецификация на него является достаточно гибкой и позволяет использовать его для передачи многоканального звукового сигнала, а также для передачи звуковых сигналов с повышенными частотами дискретизации.

Стандарт AES3 оказался настолько удачным и гармоничным, что многие организации по стандартизации опубликовали свои, очень похожие на него версии [211].

### 13.1.1. ФОРМАТ ДАННЫХ

Наименьшей структурной единицей в AES3 является 32-разрядный субкадр (рис 13.1), содержащий в качестве основных данных 20-разрядное значение звукового отсчета одного из двух стереоканалов. Два субкадра, в одном из которых содержатся данные о значении отсчета левого канала в двоичном дополнительном коде (субкадр L), а в другом – отсчета правого канала в двоичном дополнительном коде (субкадр R), составляют кадр. В том случае если передается монофонический звуковой сигнал, его отсчеты располагаются в субкадре L, а субкадр R заполняется «нулями».

Последовательность из 192 последовательных кадров составляет блок данных (рис. 13.2).



Рис. 13.1. Формат субкадра интерфейса AES3

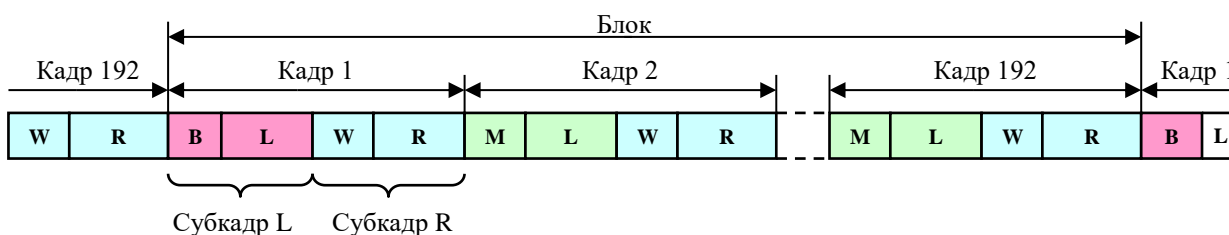


Рис. 13.2. Структура блока интерфейса AES/EBU

Для передачи через соединительную линию данные модулируются **бифазным (двухфазным) канальным кодом Vi-φ-M**. Это нужно для придания полученной последовательности свойство самосинхронизации. Канальный код Vi-φ-M (бифазный маркированный), используемый для этой цели, характеризуется наличием обязательного изменения уровня в начале каждого тактового интервала.

Кроме того, при передаче логической «единицы» изменение уровня есть еще и в центре тактового интервала. При передаче же логического «нуля» такое изменение отсутствует (рис. 13.3) [24, 52, 212]. Звуковые

данные внутри субкадра представлены в двоичном дополнительном коде и располагаются младшими разрядами вперед, что является недостатком интерфейса, так как почти во всех ЦАП и АЦП преобразование начинается со старшего разряда. Поэтому и при кодировании перед передачей по интерфейсу и при декодировании при приеме, приходится «переворачивать» отсчеты.

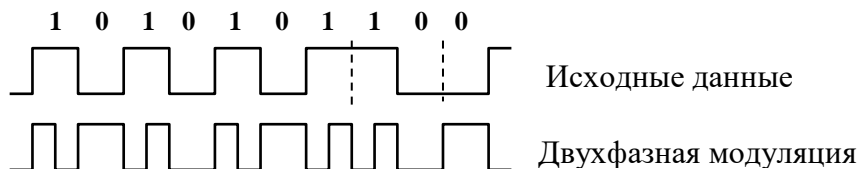


Рис. 13.3. Двухфазная модуляция по методу Вi-ф-М

Для передачи отсчета в субкадре зарезервировано 20 разрядов, если используются 16 разрядов, первые 4 разряда (самые младшие) заполняются «нулями». Если используются 24 разряда, самые младшие разряды записываются в *зоне дополнительных данных AUX*, расположенной между основными данными и синхрогруппой.

**Синхрогруппа**, расположенная в начале каждого субкадра и занимающая первые четыре разряда, имеет три различные конфигурации. Одна из них **В** обозначает начало субкадра L первого кадра блока, другая **М** – начало любого другого субкадра L внутри блока. Третья форма **W** обозначает начало субкадра R – независимо от его положения в блоке (рис. 13.2 и 13.4).

Для того чтобы синхрогруппу можно было легко опознать, в её конфигурации присутствуют не встречающиеся в потоке данных элементы – интервалы между изменениями уровня (перепадами) в полтора такта и отсутствие обязательного перепада на границе двух тактов.

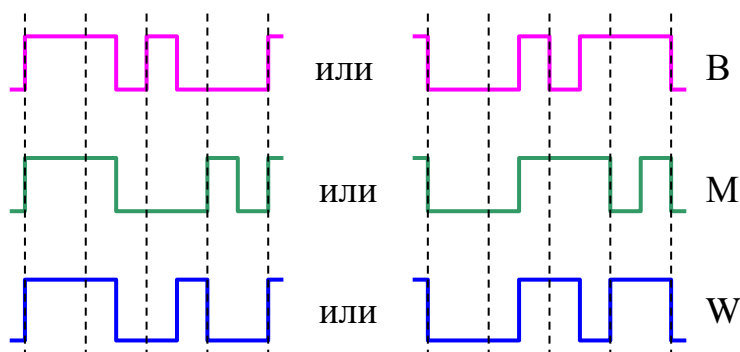


Рис. 13.4. Различные конфигурации синхрогрупп:  
В – канал L в начале блока, М – канал L внутри блока, W – канал R

В каждом субкадре, кроме синхрогруппы, имеются еще четыре вспомогательных разряда – V, U, C и P.

Разряд *V (Validity)* является указателем достоверности отсчета, значение которого содержится в основных данных субкадра. Достоверной в данном случае считается отсчет, не являющийся результатом маскирования (интерполяции, приглушения и т.д.). Если отсчет достоверен, то  $V = 0$ .

Разряд *U (User data)* – это разряд пользователя. Рекомендации по заполнению битов пользователя изложены в стандарте AES18-1992, а также в техническом документе EBU 3250 [213].

Разряд *C (Channel status data)* характеризует состояние каждого из двух каналов L и R и содержит в себе информацию о типе передаваемых по каналу данных. Каждые 192 разряда, содержащиеся в субкадрах, соответствующих одному из каналов L и R одного блока, делятся на 24 байта, которые описывают состояние рассматриваемого канала. Общая структура блока, характеризующего состояние канала, показана на рис. 13.5.

Разряд *P (Parity bit)* – это бит четности. Его значение выбирается таким, чтобы общее число «единиц» в значащей части субкадра (без синхрогруппы) было четным. С его помощью можно обнаружить наличие нечетного числа ошибок в субкадре.

| Байт | 0  | 1     | 2        | 3           | 4                   | 5      | 6 | 7 | Бит |
|------|--|-------|----------|-------------|---------------------|--------|---|---|-----|
| 0    | Pro=1  | Audio | Emphasis |             | Lock                | $f_s$  |   |   | 7   |
| 1    | Channel mode   |       |          |             | User bit management |        |   |   | 15  |
| 2    | AUX  |       |          | Word length |                     | Резерв |   |   | 23  |
| 3    | Описание многоканального режима  |       |          |             |                     |        |   |   | 31  |
| 4    | DAR signal   |       | Резерв   |             |                     |        |   |   | 39  |
| 5    | Резерв   |       |          |             |                     |        |   |   | 47  |
| 6    | Буквенно-цифровой код источника данных в формате ASCII                       |       |          |             |                     |        |   |   | 55  |
| 7    |  |       |          |             |                     |        |   |   |     |
| 8    |  |       |          |             |                     |        |   |   |     |
| 9    |  |       |          |             |                     |        |   |   |     |
| 10   | Буквенно-цифровой код в формате ASCII, характеризующий предназначение данных |       |          |             |                     |        |   |   | 87  |
| 11   |  |       |          |             |                     |        |   |   |     |
| 12   |  |       |          |             |                     |        |   |   |     |
| 13   |  |       |          |             |                     |        |   |   |     |
| 14   | Код адреса локальной выборки звукового сигнала (32-разрядный двоичный)       |       |          |             |                     |        |   |   | 119 |
| 15   |  |       |          |             |                     |        |   |   |     |
| 16   |  |       |          |             |                     |        |   |   |     |
| 17   |  |       |          |             |                     |        |   |   |     |
| 18   | Код времени дня (32-разрядный двоичный)                                      |       |          |             |                     |        |   |   | 151 |
| 19   |  |       |          |             |                     |        |   |   |     |
| 20   |  |       |          |             |                     |        |   |   |     |
| 21   |  |       |          |             |                     |        |   |   |     |
| 22   | Резерв   |       |          |             | Reliability flags   |        |   |   | 183 |
| 23   | CRCC   |       |          |             |                     |        |   |   | 191 |

Рис. 13.5. Спецификация 24 байт блока статуса канала

Рассмотрим более подробно значение битов и байт блока статуса канала.

Байт 0 блока статуса канала содержит информацию, которая, прежде всего, идентифицирует данные, как данные, предназначенные для профессионального использования (бит 0 – Pro=1), а также характеризует их содержание – звуковые или не звуковые (бит 1 – Audio) (табл. 1). Кроме того, здесь содержится информация об использовании имфазиса (биты 2, 3, 4 – Emphasis), о частоте дискретизации звукового сигнала (биты 6,7 –  $f_s$ ) и о наличии внешней синхронизации (бит 5 – Lock).

Таблица 1.1

**Содержание 0-го байта блока статуса канала**

|   |
|---|
| <b>Бит 0 – Pro=1</b>  |
| 0 – использование блока статуса канала в потребительской сфере<br>1 – использование блока статуса канала в профессиональной сфере   |
| <b>Бит 1 – Audio</b>  |
| 0 – цифровые звуковые данные<br>1 – данные, не являющиеся звуковыми   |
| <b>Биты 2, 3, 4 – Emphasis (информация о наличии имфазиса)</b>  |
| 000 – информация об использовании имфазиса отсутствует<br>100 – имфазис не используется<br>110 – имфазис с характеристикой 50/15 мкс*<br>111 – имфазис с характеристикой CCITT J.17** |
| <b>Бит 5 – Lock</b>   |
| 0 – петля автоматического слежения по частоте дискретизации замкнута<br>1 – петля автоматического слежения по частоте дискретизации разомкнута  |
| <b>Биты 6, 7 – <math>f_s</math> (информация о частоте дискретизации)</b>  |
| 00 – информация о частоте дискретизации отсутствует<br>01 – частота дискретизации 48 кГц<br>10 – частота дискретизации 44,1 кГц<br>11 – частота дискретизации 32 кГц                  |

\*Имфазис с характеристикой 50/15 мкс наиболее распространен и используется, к примеру, в формате CD. Характеристика преимфазиса такого типа показана на рис. 13.6.

\*\**CCITT – International Telegraph and Telephone Consultative Committee* (Международный консультативный комитет по телеграфной и телефонной связи). Характеристика преимфазиса в соответствии с рекомендациями CCITT представлена на рис. 13.7.

Байт 1 характеризует режим передачи звукового сигнала: одноканальный монофонический, два отдельных канала, двухканальный стереофонический или многоканальный (биты 0, 1, 2, 3 – Channel mode), а также способ формирования бит пользователя (биты 4, 5, 6, 7 – User bit management) (табл. 13.2).

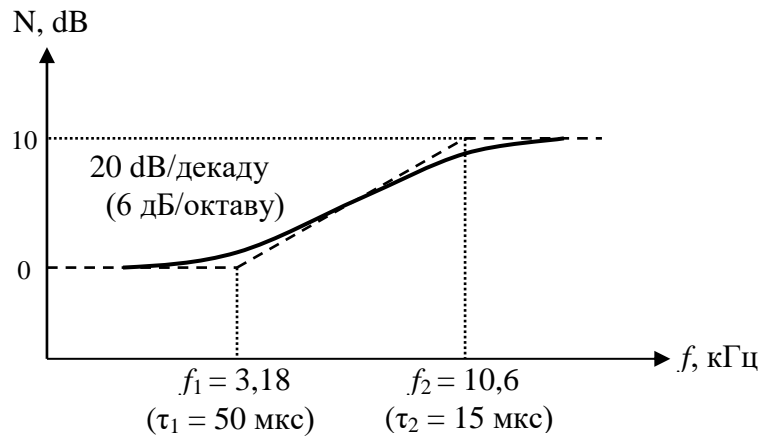


Рис. 13.6. Характеристика преимфазиса 50/15

#### Вносимое затухание

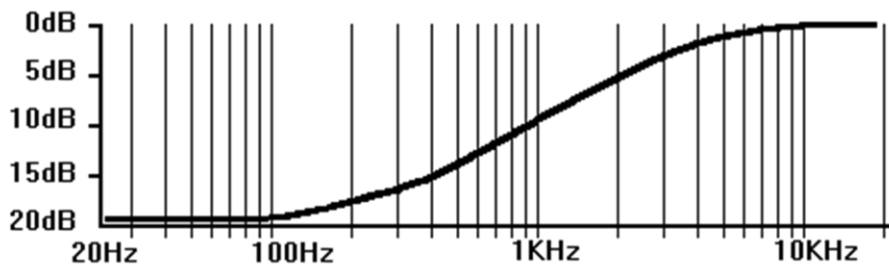


Рис. 13.7. Характеристика преимфазиса, соответствующего рекомендациям ССИТТ

Байт 1 характеризует режим передачи звукового сигнала: одноканальный монофонический, два отдельных канала, двухканальный стереофонический или многоканальный (биты 0, 1, 2, 3 – Channel mode), а также способ формирования бит пользователя (биты 4, 5, 6, 7 – User bit management) (табл. 13.2).

Байт 2 оговаривает максимальную длину отсчета звукового сигнала (биты 0, 1, 2 – AUX) и число реально используемых битов (биты 3, 4, 5 – Word length). Биты 6 и 7 – резервные (табл. 13.3).

Байт 3 зарезервирован для использования в режиме передачи многоканального звукового сигнала.

Байт 4, так же как и байт 3, предназначен для использования в многоканальном режиме передачи звукового сигнала. Биты 0 и 1 характеризуют точность поддержания внешнего сигнала синхронизации: Grade 1 ( $\pm 1$  ppm) и Grade 2 ( $\pm 10$  ppm). Биты 3, 4, 5 и 6 указывают на использование одной из альтернативных частот дискретизации, кратных либо  $f_s = 44,1$  кГц (22,05, 88,2 и 176,4 кГц), либо  $f_s = 48$  кГц (24, 96 и 192 кГц) (табл. 13.4).

Байт 5 является резервным и рассчитан на возможность использования в будущем для передачи каких-либо дополнительных данных.

Таблица 13.2

## Содержание 1-го байта блока статуса канала

|   |
|---|
| <b>Биты 0, 1, 2, 3 – информация о режиме кодирования канала</b> |
| 0000 – информация отсутствует                                   |
| 0001 – двухканальный  |
| 0010 – одноканальный  |
| 0011 – первичный/вторичный                                      |
| 0100 – стереофонический   |
| 0101 – резерв   |
| 0110 – резерв   |
| 0111 – одноканальный при удвоенной частоте дискретизации        |
| 1000 – одноканальный при удвоенной частоте дискретизации        |
| 1001 – одноканальный при удвоенной частоте дискретизации        |
| 1111 – многоканальный режим                                     |
| <b>Биты 4, 5, 6, 7 – форма заполнения бит пользователя</b>      |
| 0000 – биты пользователя отсутствуют                            |
| 0001 – блок из 192 битов  |
| 0010 – заполнение в соответствии с рекомендациями AES18         |
| 0011 – заполнение определено пользователем                      |

Таблица 13.3

## Содержание 2-го байта блока статуса канала

|   |  |                |
|---|--|----------------|
| <b>Биты 0, 1, 2 – максимальное количество бит на отсчет</b>                         |  |                |
| 000   | – максимум 20 битов                            |                |
| 001   | – максимум 24 бита                             |                |
| 010   | – максимум 20 битов (одноразовое согласование) |                |
| 011   | – резерв                                       |                |
| <b>Биты 3, 4, 5 – кол-во битов (длина отсчета 24 бита) (длина отсчета 20 битов)</b> |  |                |
| 000   | нет информации                                 | нет информации |
| 001   | 23 бита  | 19 битов       |
| 010   | 22 бита  | 18 битов       |
| 011   | 21 бит   | 17 битов       |
| 100   | 20 битов                                       | 16 битов       |
| 101   | 24 бита  | 20 битов       |
| <b>Биты 6,7 – резерв</b>  |  |                |

Байты с 6-го по 9-й содержат буквенно-цифровой код в формате ASCII\*, характеризующий источник данных, передаваемых по этому каналу.

\*ASCII (*American Standard Code for Information Interchange – американский стандартный код для обмена информацией*) – представляет собой 7-битный код, предназначенный для отображения десятичных цифр, букв латинского и национального алфавитов, знаков препинания и управляющих символов. В компьютерах обычно используют 8-битное расширение ASCII.



Байты с 10 по 13 содержат буквенно-цифровой код в формате ASCII, характеризующий предназначение данных, передаваемых по этому каналу.

Байты с 14 по 17 определяют адрес локальной выборки звукового сигнала.

Байты с 18 по 21 отражают текущее время дня с точностью до периода следования блоков статуса канала. При частоте дискретизации 48 кГц период следования блоков составит 4 мс. Этот код времени может быть использован для синхронизации по кадрам сопутствующего передаваемым звуковым данным видеоизображения.

Таблица 13.4

**Содержание 4-го байта блока статуса канала**

|  |
|--|
| <b>Биты 0,1 – опорный сигнал (AES11)</b>               |
| 00 – отсутствует                                       |
| 01 – уровень точности 1 (Grade 1)                      |
| 10 – уровень точности 2 (Grade 2)                      |
| 11 – резерв  |
| <b>Бит 2 – резерв</b>                                  |
| <b>Биты 3,4,5,6 – частота дискретизации</b>            |
| 0000 – не указана                                      |
| 1000 – 24 кГц  |
| 0100 – 96 кГц  |
| 1100 – 192 кГц   |
| 0010 – резерв  |
| 1010 – резерв  |
| 0110 – резерв  |
| 1110 – резерв  |
| 0001 – резерв  |
| 1001 – 22,05 кГц                                       |
| 0101 – 88,2 кГц  |
| 1101 – 176,4 кГц                                       |
| 0011 – резерв  |
| 1011 – резерв  |
| 0111 – резерв  |
| 1111 – определяется пользователем                      |
| <b>Бит 7 – наличие указателя частоты дискретизации</b> |
| 0 – нет указателя                                      |
| 1 – указатель присутствует                             |

Байт 22 содержит информацию о достоверности данных блока статуса канала (биты 4, 5, 6, 7 – Reliability flags). Биты 1, 2, 3 и 4 этого байта – резервные.

Последний 23 байт представляет собой остаток от побитного деления всех предшествующих битов блока статуса канала на порождающий многочлен  $g(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$  кода CRCC (Cyclic Redundancy Check

Code), обеспечивающий возможность обнаружения ошибок в данных блока.

Один из возможных вариантов реализации схемы деления битов блока статуса канала на порождающий многочлен кода CRCC, построенной на основе регистра сдвига с обратными связями, показан на рис. 13.8.

Регистр сдвига выполнен на D-триггерах и элементах ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, выполняющих операцию сложения по модулю 2. Биты блока статуса канала подаются на вход регистра и одновременно на выход устройства. После того, как последний бит данных записан в регистр, из него выводится полученный в результате деления 8-разрядный остаток.

Стандарт AES3 определяет три уровня заполнения блока статуса канала, использование которых определяется характером данных, передаваемых от источника программ к приемному устройству: минимальный, стандартный и расширенный.

При использовании *минимального уровня* первый бит блока статуса канала (бит 0 в 0-м байте) устанавливается в «1», что указывает на профессиональный статус передаваемых данных, а все остальные биты блока устанавливаются в «0».

При использовании *стандартного уровня* информацию должны содержать байты 0, 1, 2 (частота дискретизации, использование преимфазиса, характер звукового сигнала – моно, стерео и пр., число разрядов квантования и т.п.) и байт 23, который содержит данные CRCC. Этот уровень используется наиболее часто.

*Расширенный уровень* предполагает использование всех битов блока статуса канала.

Как отмечалось ранее, звуковые данные, передаваемые через интерфейс AES3, могут иметь разрешение до 24 бит на отсчет. Однако в большинстве случаев разрядность отсчетов звукового сигнала не превышает 20. Четыре оставшихся бита, обозначенные на рис. 1 как AUX, могут в этом случае использоваться для передачи двух дополнительных речевых каналов, сопровождающих основные звуковые данные. Частота дискретизации в этих дополнительных каналах будет составлять 1/3 от основной частоты дискретизации, а разрядность отсчетов – 12 битов. Другими словами, каждый 12-разрядный отсчет дополнительного канала будет распределяться между тремя последовательными субкадрами соответствующего основного канала – по 4 бита в каждом субкадре.

Очевидно, что частота  $f_T$  следования битов данных по интерфейсу будет в 32 раза выше удвоенной частоты дискретизации  $f_s$  передаваемого сигнала:

$$f_T = 32 \times 2 f_s.$$

Для проигрывателя компакт-дисков и DAT-магнитофона в режиме работы с частотой дискретизации 44,1 кГц,

$$f_T = 32 \times 2 \times 44,1 \text{ кГц} = 2822,4 \text{ кГц} = 2,822 \text{ МГц}.$$

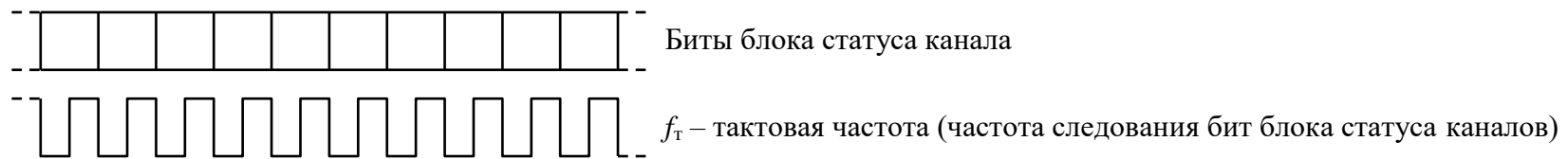
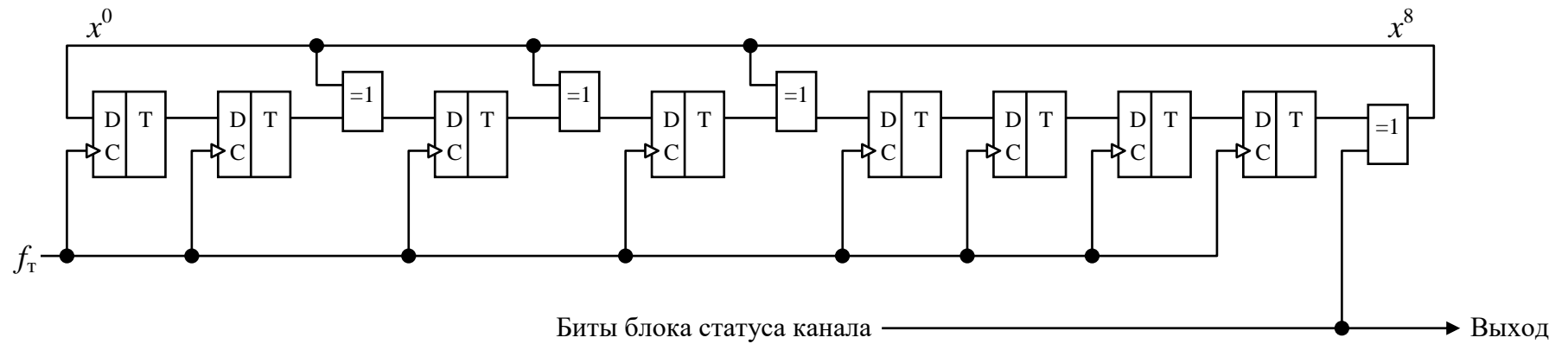


Рис. 13.8. Схема вычисления остатка от деления битов блока статуса канала на порождающий многочлен  $g(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$  кода CRCC и временные диаграммы, поясняющие ее работу

Если частота дискретизации DAT-магнитофона 48 кГц,

$$f_T = 32 \times 2 \times 48 \text{ кГц} = 3072 \text{ кГц} = 3,072 \text{ МГц}.$$

Если частота дискретизации 96 кГц,  $f_T = 6,144 \text{ МГц}$ , а если 192 кГц, то  $f_T = 12,288 \text{ МГц}$ .

Для источников с частотой дискретизации 32 кГц

$$f_T = 32 \times 2 \times 32 \text{ кГц} = 2048 \text{ кГц} = 2,048 \text{ МГц}.$$

### 13.1.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Непосредственное соединение цифровой аппаратуры в AES3 осуществляется с помощью специальных соединителей. Соединители могут быть как электрическими (коаксиальными), так и оптическими.

Электрические характеристики соединителей интерфейса частично совместимы с RS-422. Дифференциальное напряжение на выходе передающего модуля должно быть в пределах от 2 до 2,7 В, фронты импульсов от 5 до 30 нс, фазовое дрожание (джиттер) не должно превышать 4 нс. В профессиональной технике всегда используется симметричная балансная линия (то есть сигнал передается одновременно по двум проводам и в противофазе) в виде витой пары с трехконтактными соединителями XLR, использовавшимися еще в аналоговой технике (рис. 13.9). Источник сигнала и приемник должны быть оснащены соответственно выходным и входным симметрирующими трансформаторами, и обязательно иметь идентичные выходное и входное сопротивления, составляющее  $110 \text{ Ом} \pm 20\%$  на частотах от 100 кГц до  $128 f_{k,\max}$  ( $f_k$  – частота следования кадров).

Передача по кабелю, имеющему волновое сопротивление  $110 \text{ Ом} \pm 20\%$  на частотах от 100 кГц до  $128 f_{k,\max}$ , возможна на расстояние до 500 м без коррекции и до 1000 м с коррекцией. По обычному кабелю – на 70 м без коррекции и до 250 м с коррекцией. Эксплуатация интерфейса без оконечной нагрузки  $110 \text{ Ом}$  недопустима из-за значительного влияния отраженной волны. Схема соединения с применением витой пары приведена на рис. 13.10.



Рис. 13.9. Соединитель типа XLR

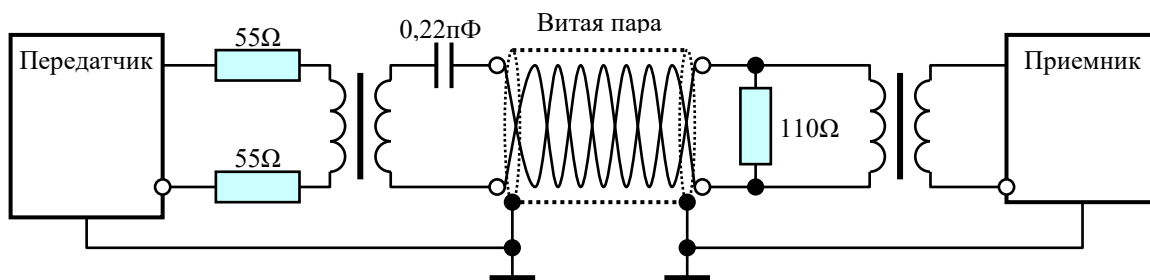


Рис. 13.10. Схема коммутации с помощью витой пары, рекомендуемая стандартом AES3

Несколько позже был стандартизован коаксиальный вариант интерфейса AES3 – AES3ID, допускающий передачу данных по высококачественному коаксиальному кабелю на расстояние до 1 км с использованием соединителей типа BNC (рис. 13.11). При этом выходное напряжение передатчика должно составлять  $1 \pm 0,1$  В на нагрузке 75 Ом. Характеристики, сходные с аналоговым видеосигналом (размах 1 В, полоса частот около 6 МГц), позволяют передавать этот сигнал по имеющимся аналоговым студийным видеотрактам с их корректирующими усилителями и коммутаторами (рис. 13.12).



Рис. 13.11. Соединитель типа BNC

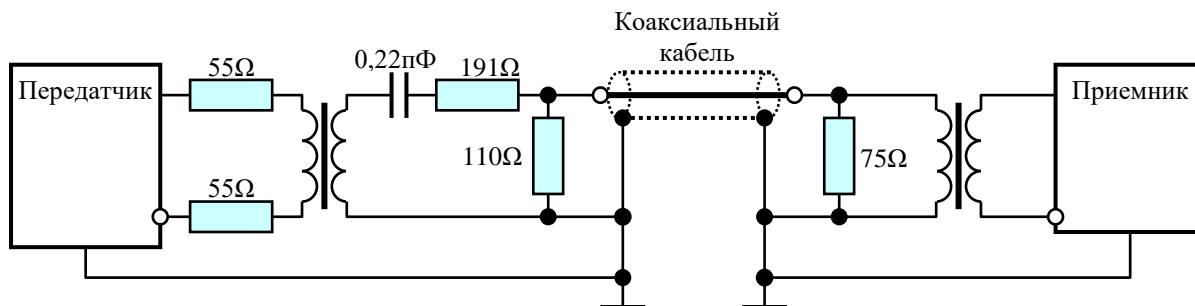


Рис. 13.12. Схема коммутации с помощью коаксиального кабеля, рекомендуемая стандартом AES3ID

## 13.2. S/PDIF

Потребительским аналогом профессионального интерфейса AES3 является *S/PDIF (Sony/Philips Digital Interface Format)*, похожий на AES3, но имеющий несколько иные и электрические характеристики, и формат незвуковых данных [53].

Благодаря схожести характеристик AES3 и S/PDIF, в некоторых случаях профессиональная и потребительская аппаратура могут соединяться напрямую. Однако без точного знания технических особенностей используемой аппаратуры выполнять такие соединения не рекомендуется, поскольку имеет место существенная разница в электрических характеристиках AES3 и S/PDIF, и, кроме того, у них разный формат блока статуса канала. Результат соединения может быть непредсказуемым. Аппаратура, адаптированная к работе с обоими форматами, должна интерпретировать информацию, содержащуюся в блоке статуса канала, руководствуясь значением первого («нулевого») бита первого («нулевого») байта этого блока: «1» – профессиональный формат; «0» – потребительский формат.

### 13.2.1. ФОРМАТ ДАННЫХ

Итак, как уже упоминалось выше, формат данных S/PDIF (структура субкадра, кадра, блока) полностью совпадает с форматом данных AES3.

Отличие состоит только в значениях битов и байт блока статуса канала (рис. 13.13).

В формате S/PDIF, в отличие от AES3, определены только первые четыре байта блока.

Бит 0 **байта 0** (Pro=0) в формате S/PDIF всегда имеет значение «0», что указывает на потребительское назначение данных, передаваемых через интерфейс (табл. 2.1). Бит 1 (Audio) определяет характер данных как звуковые «0» или незвуковые «1». Бит 2 (Copy) определяет возможность копирования передаваемых данных: «0» - копирование запрещено, «1» – копирование разрешено. Биты 3,4,5 (Emphasis) в том случае, когда данные являются звуковыми, указывают на наличие «100» или отсутствие «000» преимфазиса. Биты 6, 7, определяющие режим передачи, всегда имеют значение «00».

Если рекордер, имеющий вход интерфейса S/PDIF, подключен к источнику сигнала в формате AES3, его декодер может интерпретировать индикатор преимфазиса профессионального интерфейса (бит 2 байта 0) как инструкцию к запрету копирования и заблокировать функцию записи рекордера.

В аналогичных обстоятельствах, когда источником сигнала является аппарат с выходом в формате S/PDIF, а приемником – профессиональный рекордер с входом в формате AES3, профессиональный рекордер может правильно идентифицировать данные как потребительские, анализируя бит

0 (который в данном случае будет иметь значение «0»), но ошибиться в интерпретации бита запрета копирования (бит 2), истолковав его как признак того, что информация о наличии имфазиса отсутствует. Таким образом, следует обращать особое внимание на то, какой именно тип интерфейса используется в объединяемой посредством интерфейса аппаратуре.

| Байт | 0             | 1     | 2    | 3        | 4              | 5    | 6      | 7 | Бит |
|------|---------------|-------|------|----------|----------------|------|--------|---|-----|
| 0    | Pro=0         | Audio | Copy | Emphasis |                | Mode |        |   | 7   |
| 1    | Category code |       |      |          |                |      |        | L | 15  |
| 2    | Source number |       |      |          | Channel number |      |        |   | 23  |
| 3    | $f_s$         |       |      |          | Clock accuracy |      | Резерв |   | 31  |
| 4    | Резерв        |       |      |          |                |      |        |   | 39  |
| ...  |               |       |      |          |                |      |        |   | ... |
| 23   |               |       |      |          |                |      |        |   | 191 |

Рис. 13.13. Спецификация 24 байт блока статуса канала в интерфейсе S/PDIF

Таблица 13.5

**Содержание 0-го байта блока статуса канала**

|  |   |
|--|---|
| <b>Бит 0 Pro=0 (потребительские данные)</b>                            |   |
| 0  | Блок статуса канала соответствует потребителскому формату   |
| 1  | Блок статуса канала соответствует профессиональному формату |
| <b>Бит 1 Audio</b>   |   |
| 0  | Цифровые звуковые данные                                    |
| 1  | Незвуковые данные   |
| <b>Бит 2 Copy/copyright (возможность копирования)</b>                  |   |
| 0  | Копирование запрещено/авторские права защищены              |
| 1  | Копирование возможно/авторские права не защищены            |
| <b>Биты 3, 4, 5 Emphasis – если бит 1=0 (цифровые звуковые данные)</b> |   |
| 000  | Отсутствует – 2-канальный звуковой сигнал                   |
| 100  | 50/15 мкс – 2-канальный звуковой сигнал                     |
| 010  | Резерв – 2-канальный звуковой сигнал                        |
| 110  | Резерв – 2-канальный звуковой сигнал                        |
| xx1  | Резерв – 4-канальный звуковой сигнал                        |
| <b>Биты 3, 4, 5 – если бит 1 = 1 (незвуковые данные)</b>               |   |
| 000  | Цифровые данные   |
| xxx  | Все другие состояния битов 3, 4, 5 (резерв)                 |

| <b>Биты 6, 7 Mode (Режим)</b> |  |
|-------------------------------|--|
| 00                            | Режим 9 (определяется байтами 13)        |
| xx                            | Все другие состояния битов 6, 7 (резерв) |

Биты 0–6 **байта 1** (Category code) представляют собой код категории источника, т.е. указывают на тип оборудования, которое является источником передаваемых данных (табл. 13.6). В режиме 00 таким оборудованием могут служить проигрыватели CD, DVD, MiniDisc, DAT-рекордеры, синтезаторы, преобразователи частоты дискретизации, цифровые тюнеры и т.п. Бит 7 байта 1 (L) указывает на статус источника, т.е. на то, являются ли передаваемые данные оригиналом или копией.

Первые три бита (0,1,2) из семи бит кода категории источника определяют класс оборудования, которое служит источником звукового сигнала, а последние четыре (3, 4, 5 и 6) – конкретный его тип внутри этого класса.

Например, если три первых бита имеют значение 001, оборудование принадлежит к классу приемников сигналов цифрового звукового вещания (табл. 13.7). Последние четыре бита кода категории источника указывают на систему радиовещания, в которой функционирует приемное оборудование: европейская (1000), американская (0011), японская (0000) и пр.

Таблица 13.6

**Содержание 1-го байта блока статуса канала**

| <b>Биты 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 – Category code (код категории источника)</b> |  |   |
|---|--|---|
| Биты 0,1,2,3  | Биты 4,5,6   |   |
| 0000  | 000  | Общая                                   |
|   | 001  | Экспериментальная                       |
|   | xxx  | Резерв                                  |
| 0001  | xxx  | Твердотельная память                    |
| 001x  | xxx  | Приемник цифрового радиовещания         |
| 010x  | xxx  | Преобразователь частоты дискретизации   |
| 0110  | 0xx  | Ц/А-преобразователь без копирайта       |
|   | 1xx  | Ц/А-преобразователь с копирайтом        |
| 0111  | xxx  | Приемник цифрового радиовещания         |
| 100x  | xxx  | Оптические (лазерные) дисковые носители |
| 101x  | xxx  | Муз. инструменты, микшеры и т.д.        |
| 110x  | xxx  | Магнитные ленточные и дисковые носители |
| 111x  | xxx  | Резерв                                  |
| <b>Бит 7 – L (статус источника)</b>                                       |  |   |
|   | <b>Только для кодов категории: 001xxxx, 0111xxx, 100xxxx</b> |   |
| 0   | Оригинал или предварительно записанные данные                |   |
| 1   | Нет указаний или копия от 1-й и выше                         |   |
| <b>Все другие коды категории</b>  |  |   |
| 0   | Нет указаний или копия от 1-й и выше                         |   |
| 1   | Оригинал или предварительно записанные данные                |   |



Оптические лазерные носители в формате S/PDIF отнесены к категории 100 (табл. 13.8). Тем самым одновременно определяется и структура субкадра – 16 битов на отсчет и частота дискретизации 44,1 кГц. При этом содержимое служебного канала Q компакт-диска побитно (один бит за один кадр данных в формате CD) переносится в канал U (биты пользователя) интерфейса S/PDIF. Содержимое канала P компакт-диска, который используется как индикатор музыка/пауза, в канал U интерфейса S/PDIF не передается. Начало данных субкода обозначается последовательностью, состоящей как минимум из 16 «нулей», следующих за стартовым битом высокого уровня. После этого следуют 7 битов субкода (каналы Q–W).

Таблица 13.7

**Типы оборудования, принадлежащие к категории 001**

| Биты 3,4,5,6 | Приемники сигналов цифрового звукового вещания   |
|--------------|--|
| 0000         | Японская система радиовещания                    |
| 0011         | Американская система радиовещания                |
| 1000         | Европейская система радиовещания                 |
| 0001         | Электронные системы доставки программ (интернет) |
| xxxx         | Прочие состояния битов 3–7 (резерв)              |

Таблица 13.8

**Типы оборудования, принадлежащие к категории 100**

| Биты 3,4,5,6 | Оптические лазерные носители                          |
|--------------|---|
| 0000         | CD, совместимые с IEC-908 (CD-Audio)                  |
| 1000         | CD, несовместимые с IEC-908 (прочие разновидности CD) |
| 1001         | MD – MiniDisc   |
| xxxx         | Прочие состояния битов 3–7 (резерв)                   |

К категории 101 относятся микшеры, электронные музыкальные инструменты (синтезаторы) и микрофоны (табл. 13.9).

Таблица 13.9

**Типы оборудования, принадлежащие к категории 101**

| Биты 3,4,5,6 | Музыкальные инструменты, микшеры и т.п. |
|--------------|---|
| 0000         | Синтезаторы                             |
| 1000         | Микрофоны                               |
| xxxx         | Прочие состояния битов 3–7 (резерв)     |

Категория 010 включает в себя устройства перекодирования цифрового звукового сигнала, связанного с преобразованием частоты дискретизации, и процессоры цифровой обработки сигнала (табл. 13.10).

Устройства цифровой магнитной записи относятся к категории 110 (табл. 13.11). Структура субкадра интерфейса S/PDIF при этом определяется следующим образом. Длина слова звуковых данных принимается, равной 24 битам. Однако для передачи самого 16-разрядного звукового отчета используются биты с 12-го по 27-й (младший разряд – первый), а биты с 4 по 11 используются для передачи байта данных субкода. Кроме того, для обеспечения возможности редактирования данных может передаваться и синхронизирующая информация.

Таблица 13.10

**Типы оборудования, принадлежащие к категории 010**

| Биты 3,4,5,6 | Цифровые преобразователи звукового сигнала |
|--------------|--|
| 0000         | ИКМ-кодеры/декодеры                        |
| 0010         | АЦП, цифровые звуковые семплеры            |
| 0100         | Микшеры цифрового звукового сигнала        |
| 1100         | Преобразователи частоты дискретизации      |
| xxxx         | Прочие состояния битов 3–7 (резерв)        |

Таблица 13.11

**Типы оборудования, принадлежащие к категории 110**

| Биты 3,4,5,6 | Устройства цифровой магнитной записи |
|--------------|--------------------------------------|
| 0000         | DAT                                  |
| 1000         | Видеомагнитофоны с ИКМ-адаптером     |
| xxxx         | Прочие состояния битов 3–7 (резерв)  |

**Байт 2** блока статуса канала определяет номер источника программ (биты 0, 1, 2, 3 – Source number) и номер канала (биты 4, 5, 6, 7 – Channel number) (табл. 13.12).

Таблица 13.12

**Содержание 2-го байта блока статуса канала**

| Биты 0,1,2,3 Source number (номер источника) |                                       |
|--|---------------------------------------|
| 0000   | Не определен                          |
| 1000   | 1                                     |
| 0100   | 2                                     |
| 1100   | 3                                     |
| 0010   | 4                                     |
| 0111   | 14 (0-й бит – младший, 3-й – старший) |
| 1111   | 15                                    |
| Биты 4,5,6,7 Channel number (номер канала)   |                                       |
| 0000   | Не определен                          |
| 1000   | А (левый в 2-канальном формате)       |
| 0100   | В (правый в 2-канальном формате)      |
| 1100   | С                                     |
| 0111   | Н (4-й бит – младший, 7-й – старший)  |
| 1111   | О                                     |

**Байт 3** блока статуса канала определяет частоту дискретизации (биты 0,1,2,3 –  $f_s$ ) и точность поддержания тактовой частоты (биты 4, 5, 6, 7 – Clock accuracy) (табл. 13.13).

Таблица 13.13

*Содержание 3-го байта блока статуса канала*

| <b>Биты 0,1,2,3 – <math>f_s</math> (частота дискретизации)</b> |  |
|--|--|
| 0000   | 44,1 кГц                                     |
| 0100   | 48 кГц                                       |
| 1100   | 32 кГц                                       |
| 1100   | Преобразователь частоты дискретизации        |
| xxxx   | Прочие состояния бит 0-3 – в резерве         |
| <b>Биты 4, 5 Clock accuracy (точность синхронизации)</b>       |  |
| 00   | Уровень II, $\pm 1000$ ppm (низкая точность) |
| 01   | Уровень III, изменение высоты тона           |
| 10   | Уровень I, $\pm 50$ ppm (высокая точность)   |
| 11   | Резерв                                       |
| <b>Биты 6,7</b>  |  |
| xx   | Резерв                                       |

### 13.2.2. СОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ ИНТЕРФЕЙСА S/PDIF

Потребительский интерфейс в отличие от профессионального не требует балансной линии с низким импедансом. Для выполнения соединений хорошо подходит самый обычный коаксиальный телевизионный кабель с волновым сопротивлением 75 Ом, однако максимально допустимая длина кабеля – не более 10 м.

Электрические сигналы формата S/PDIF имеют существенно меньшую величину, в сравнении с форматом AES3, и в размахе составляют всего 0,4–0,5 В без постоянной составляющей.

Передающий и приемный модули должны иметь трансформаторную развязку. При этом выходное и входное сопротивления источника и приемника сигналов должно составлять 75 Ом в отличие от аналогичных схем в формате AES3, где эти величины составляют 110 Ом.

Для передачи сигнала в формате S/PDIF могут использоваться оптические соединительные линии Toslink, при этом длина пластикового волокна кабеля может достигать 15 м. При использовании оптических кабелей с кварцевым волокном длина соединения может достигать 1 км.

### 13.3. AES10 (MADI)

Интерфейс *AES10* или *MADI (Multichannel Audio Digital Interface)* является многоканальным расширением своего предшественника – двухканального интерфейса AES3 и предназначен для последовательной передачи

32, 56 или 64 каналов цифровых звуковых данных, представленных в линейном коде с частотой дискретизации в диапазоне от 32 до 96 кГц и имеющих разрешение до 24 бит на канал. Кроме того, интерфейс может быть адаптирован для передачи звуковых данных с разрешением 28 битов на канал.

Интерфейс MAD1 впервые был принят в 1991 году (AES10–1991). Спустя некоторое время он был доработан, и в 2003 году была утверждена его новая версия – AES10-2003. С тех пор интерфейс пересматривался и дополнялся многократно [214].

В отличие от интерфейса AES3, где обеспечивается самосинхронизация формируемого потока данных, интерфейс MAD1 требует использования внешнего сигнала синхронизации, который формируется в соответствии с рекомендациями стандарта AES11 [215].

### 13.3.1. ОРГАНИЗАЦИЯ ПОТОКА ДАННЫХ, ПЕРЕДАВАЕМЫХ ЧЕРЕЗ ИНТЕРФЕЙС

Передаваемые через интерфейс данные организованы в **кадры**, каждый из которых содержит  $N$  32-разрядных **субкадров** (каналов), эквивалентных субкадрам формата AES3. Каждый субкадр MAD1, так же, как и субкадр AES3, содержит  $n$ -й отсчет соответствующего канала и дополнительные служебные символы. Нумерация каналов начинается с 0 до  $N-1$  (рис. 13.14). На рис. 13.14 показана структура кадра для частоты дискретизации 48 кГц и 56 каналов передачи (номера отсчетов в одном и том же кадре совпадают).

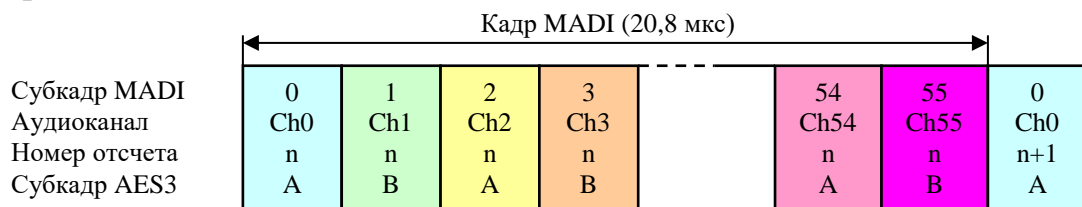


Рис. 13.14. Структура кадра MAD1 для частоты дискретизации 48 кГц и 56 каналов передачи звуковых данных

На рис. 33.15 и 13.16 показаны варианты формирования кадра для частоты дискретизации 48 кГц и 28 каналов передачи звуковых данных.

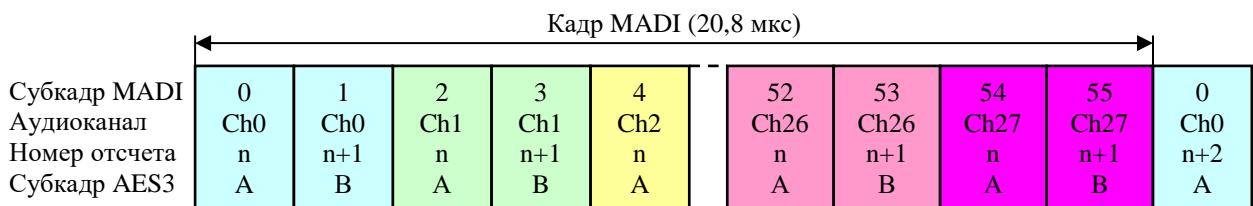


Рис. 13.15. Структура кадра MAD1 для частоты дискретизации 96 кГц и 28 каналов передачи звуковых данных (вариант 1)

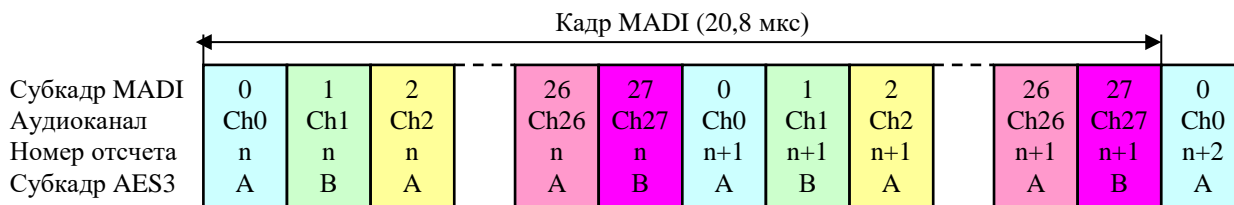


Рис. 13.16. Структура кадра MAD1 для частоты дискретизации 96 кГц и 28 каналов передачи звуковых данных (вариант 2)

### 13.3.2. ФОРМАТ СУБКАДРА

Каждый канальный субкадр интерфейса по стандарту MAD1, так же, как субкадр интерфейса по стандарту AES3, включает в себя 32 бита данных (рис. 13.17).



Рис. 13.17. Формат данных субкадра

Звуковые (или иные) данные, представленные в двоичном дополнительном коде, располагаются в промежутке с 4 по 27-й разряды (27-й бит – старший). Если разрядность отсчета меньше 24 битов, то все незначащие биты равны 0. Незначащие биты располагаются в младших разрядах отсчета. Например, если используются 20-разрядные отсчеты, то значащие биты располагаются с 27-го по 8-й разряд включительно (27-й разряд – старший), а биты с 7-го по 4-й – нули. Если данный канал не используется вовсе, то все разряды звуковых данных равны нулю.

Используемые (активные) каналы всегда располагаются в начале кадра MAD1, а неактивные – на его последних позициях.

Разряды с 28-го по 31-й – это разряды V, U, C и P, которые имеют то же самое значение, что и в стандарте AES3.

**Разряд V (validity)** – указатель достоверности отсчета: равен 0, если отсчет не является результатом маскирования (интерполяции, приглушения и пр.), и равен 1 в противном случае.

**Разряд U (user)** – разряд пользователя.

**Разряд C (channel)** – характеризует состояние канала.

**Разряд *P* (parity)** – дополняет количество «единиц» в разрядах с 30-го по 4-й включительно до четного числа. Если число «единиц» в этих разрядах четно – он равен «0», если нечетно – «1».

**Первый (0-й)** разряд субкадра MADI – разряд синхронизации, являющийся «1» для первого (0-го) субкадра MADI в кадре MADI, и «0» – для всех остальных субкадров.

**Второй (1-й)** разряд субкадра MADI – идентификатор активности данного канала. Если канал активен – этот разряд имеет значение «1», если не активен – «0».

**Третий (2-й)** разряд субкадра MADI – идентификатор канала (субкадра) A/B в формате AES3. Для канала A этот разряд имеет значение «0», для канала B – «1».

**Четвертый (3-й)** разряд субкадра MADI – идентификатор начала блока в формате AES3, имеющий значение «1», – это первый субкадр блока в формате AES3. Для всех остальных субкадров блока AES3 этот разряд имеет значение «0».

### 13.3.3. ФОРМАТ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО КАНАЛУ

Перед передачей данных по каналу они кодируются каналным кодом, известным как **4B5B**. Для этого все 32 бита субкадра (канала) разбиваются на восемь 4-разрядных слов (табл. 13.14). Каждое 4-разрядное слово перекодируется в 5-разрядное в соответствии с табл. 13.15. Полученные 5-разрядные слова передаются слева направо, как указано в табл. 13.16, образуя последовательность (рис. 13.18).

Скорость потока исходных данных, передаваемых по интерфейсу, должна поддерживаться вблизи 100 Мбит/с, но не превышать этого значения. Соответственно скорость потока каналных битов после выполнения операции кодирования кодом 4B5B должна быть вблизи 125 Мбит/с. Частоты дискретизации и разрядность квантования звукового сигнала в разных случаях отличаются друг от друга, поэтому выполнить это требование напрямую довольно затруднительно.

Следовательно, для обеспечения требуемой скорости потока данных на выходе передатчика, а также для поддержания синхронной работы передатчика и приемника информации, в поток данных вставляется необходимое число синхрогрупп, не несущих никакой смысловой информации, которые легко может распознать декодер каналного кода 4B5B.

Таблица 13.14

**Образование 4-х разрядных слов из символов субкадра MADI**

| Слово | Разряды субкадра |
|-------|------------------|
| 0     | 0123             |
| 1     | 4567             |
| 2     | 89..             |
| 3     | ....             |
| 4     | ....             |
| 5     | ....             |
| 6     | ....             |
| 7     | ...31            |

Таблица 13.15

**Кодирование по методу 4B5B**

| 4-разрядное слово | 5-разрядное слово |
|-------------------|-------------------|
| 0000              | 11110             |
| 0001              | 01001             |
| 0010              | 10100             |
| 0011              | 10101             |
| 0100              | 01010             |
| 0101              | 01011             |
| 0110              | 01110             |
| 0111              | 01111             |
| 1000              | 10010             |
| 1001              | 10011             |
| 1010              | 10110             |
| 1011              | 10111             |
| 1100              | 11010             |
| 1101              | 11011             |
| 1110              | 11100             |
| 1111              | 11101             |



Рис. 13.18. Данные субкадра, кодированные канальным кодом 4B5B

**Порядок передачи 5-разрядных канальных слов**

| Слово | Канальные разряды |
|-------|-------------------|
| 0     | 01234             |
| 1     | 56789             |
| 2     | .....             |
| 3     | .....             |
| 4     | .....             |
| 5     | .....             |
| 6     | .....             |
| 7     | ....39            |

Такие синхрогруппы вставляются, по меньшей мере, один раз за время передачи кадра MADI. Синхрогруппа всегда располагается между двумя смежными 40-битными субкадрами. Синхрогруппа, расположенная в конце кадра, имеет вид 11000 10001, однако это не единственная конфигурация синхрогруппы – всего таких конфигураций может быть до 32-х. Синхрогруппы при необходимости могут вставляться между смежными каналами (субкадрами) внутри одного и того же кадра. Могут быть вставлены не одна, а несколько синхрогрупп. Точный порядок использования синхрогрупп стандартом не регламентируется (рис. 13.19).

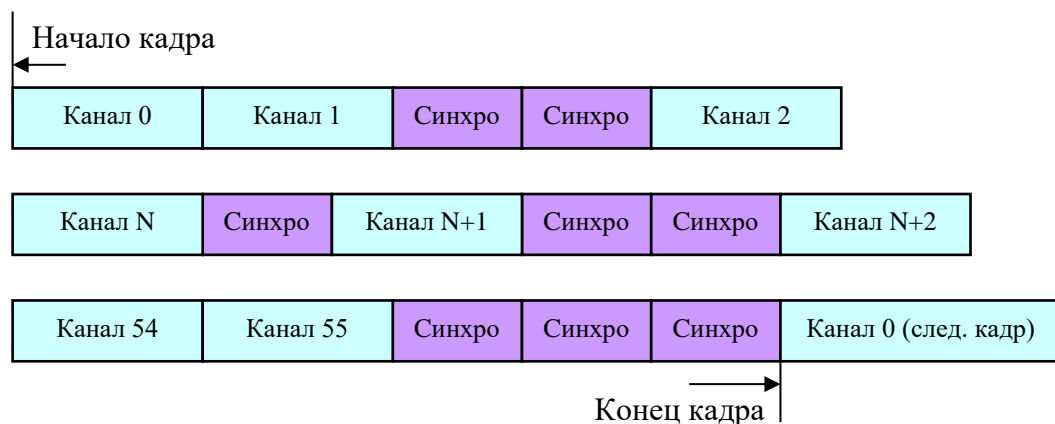


Рис. 13.19. Примеры использования синхрогрупп

### 13.3.4. ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ И ЧИСЛО ПЕРЕДАВАЕМЫХ КАНАЛОВ

Частота дискретизации, на которой может использоваться интерфейс MADI при определенном числе каналов, должна принадлежать одному из диапазонов:

- для 56 каналов – от 32 кГц до 48 кГц  $\pm 12,5\%$ ;
- для 64 каналов – от 32 кГц до 48 кГц – номинальная частота;
- для 28 каналов – от 64 кГц до 96 кГц  $\pm 12,5\%$ .



Сигналы с более высокой частотой дискретизации (например, 192 кГц) могут передаваться путем использования двух или более числа каналов на отсчет.

Для 56 каналов при частоте дискретизации  $48 \text{ кГц} \pm 12,5\%$  или для 28 каналов при частоте дискретизации  $96 \text{ кГц} \pm 12,5\%$  результирующая скорость цифрового потока данных не должна превышать 96,768 Мбит/с. Для 64 каналов при частоте дискретизации 48 кГц или 32 каналов при частоте дискретизации 96 кГц результирующая скорость цифрового потока данных не должна превышать 98,304 Мбит/с.

Для 56 каналов при частоте дискретизации 32 кГц результирующая скорость потока данных не должна быть меньше 50,176 Мбит/с.

Максимально допустимая скорость потока данных, передаваемых через интерфейс MADI, для любых сочетаний числа активных каналов и частоты дискретизации не должна превышать 100 Мбит/с.

Максимально допустимая скорость потока канальных битов (после преобразования в код 4B5B), не должна превышать 125 Мбит/с.

### **13.3.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Электрическое соединение приемника и передатчика интерфейса осуществляется при помощи коаксиального кабеля с характеристическим сопротивлением  $75 \pm 2 \Omega$  длиной не более 50 м. Возможно соединение с помощью оптического кабеля.

К примеру, при использовании оптического интерфейса FDDI длина линии может достигать 2 км. Может быть также использована синхронная линия оптической связи SONET (Synchronous Optical Network), при этом сигнал синхронизации также передается по оптической линии.

Размах напряжения на выходе передатчика должен быть от 0,3 до 0,6 В. Время нарастания и спада электрического сигнала между величинами 20 и 80% амплитуды должно быть не более 3 нс и не менее 1 нс. Используются разъемы типа BNC. Для обеспечения необходимого уровня сигнала на выходе передатчика и на входе приемника размещаются буферные каскады (рис. 13.20 и 13.21).

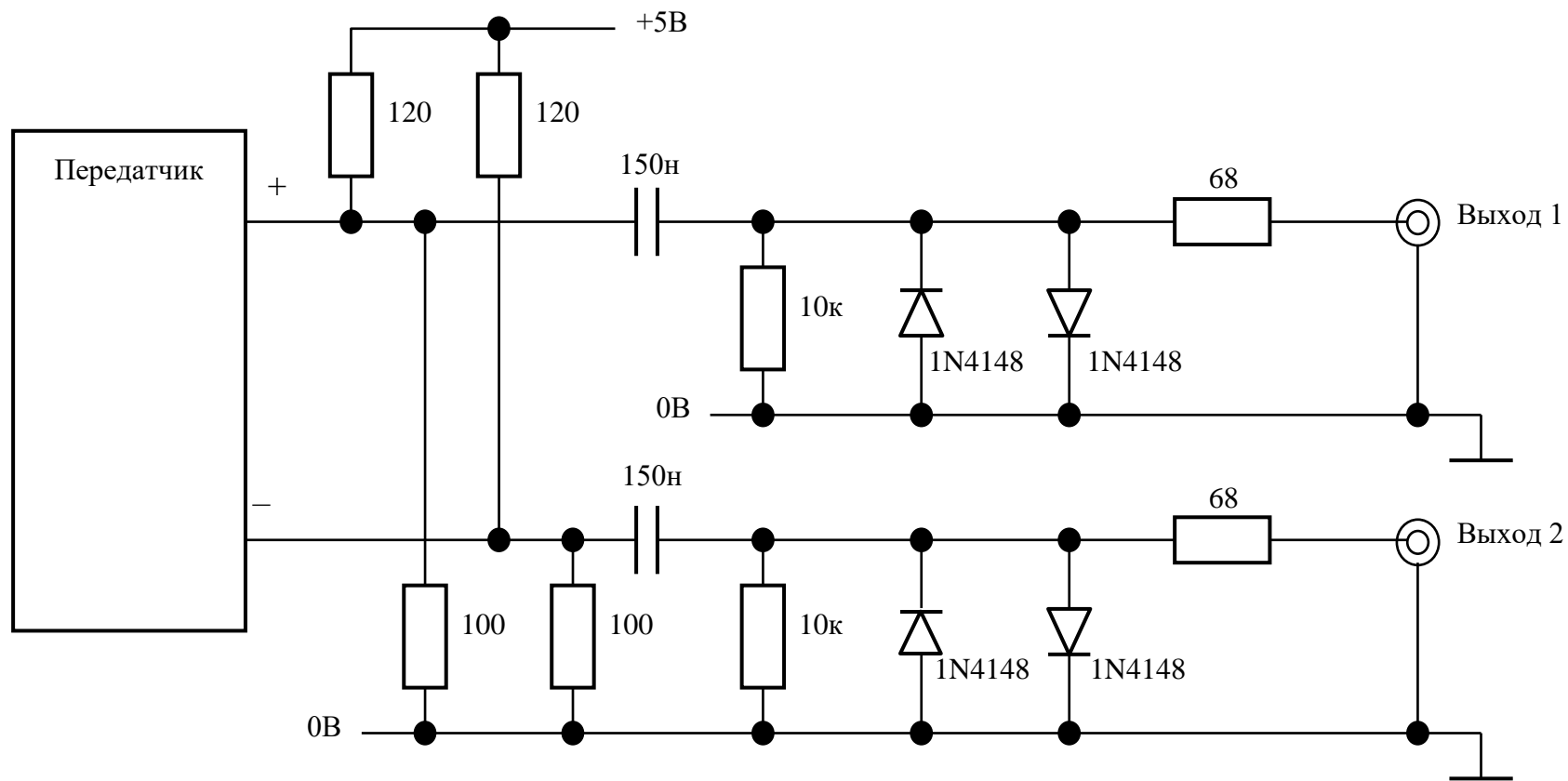


Рис. 13.20. Схема буферной цепи передатчика интерфейса MADI

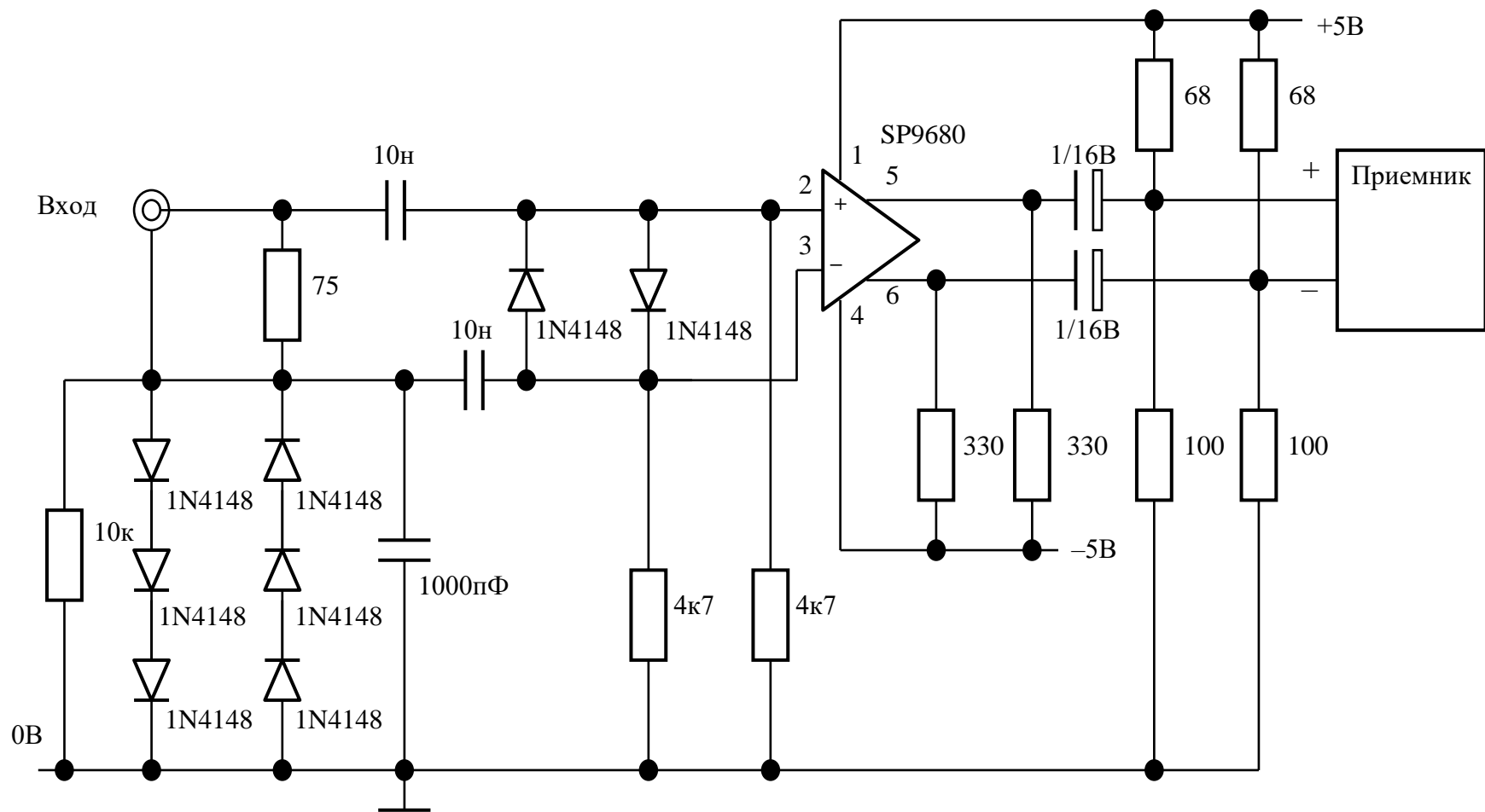


Рис. 13.21. Схема буферной цепи приемника интерфейса MADi

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эрэкутороникусу Райфу, 1990, №10, с. 45-49.
2. Хосо Гидзюцу, 1977, №9, с. 59-65.
3. Тэрэбидзен Гаккайси, 1979, №1, с. 17-26.
4. Тэрэбидзен Гаккайси, 1980, №4, с. 349-355.
5. JAES, 1973, №7, р. 535-541.
6. Studio Sound, 1976, Oct., р. 28-31.
7. Тэрэбидзен Гаккайси, 1979, №1, с. 11-16.
8. Хосо Гидзюцу, 1977, №9, с. 71-76.
9. JAES, 1978, №1/2, р. 56-63.
10. Хосо Гидзюцу, 1977, №9, с. 77-82.
11. Хосо Гидзюцу, 1978, №10, с. 89-93.
12. Annu Nat. Telecommun. Conf., Birmingham, 1978, Conf. Rec. v. 1-3, N-Y.
13. Нихон Онке Гаккайси, 1975, №10, с. 585-592.
14. Хосо Гидзюцу, 1978, №10, с. 100-105.
15. Popular Electronics, 1979, №3, р. 42, 43, 46.
16. Radio Mentor Elektronik, 1979, №11, р. 379-877.
17. Хосо Гидзюцу, 1978, №10, с. 59-66.
18. Vries L.B., Immink K.A., Nijb J.G., Doi T.T., Odaka K. etc. The Digital Compact Disc: Modulation and Error Correction Schemes. 67<sup>th</sup> Convention of the Audio Engineering Society, J. Audio Eng. Soc. (Abstracts), vol. 22, Dec. 1980, р. 931.
19. Doi T.T. General Information on Compact Disc. - JAES, vol. 29, 1981, No. 1/2, pp. 60-66.
20. Doi T.T. Channel Coding for Digital Audio Recordings, JAES, vol. 31, 1983, No. 4, pp. 224-236.
21. Heemskerk J.R.J., Immink K.A. Compact Disc: System Aspects and Modulation, Philips Techn. Rev., vol. 40, 1982, No. 6, pp. 157-164.
22. Исида Ёсинобу. Цифровые звуковые диски. – Тэрэбидзен Гаккайси, т. 36, 1982, №3, с. 194-200.
23. Standard on Compact Disc Digital Audio System, JEC Techn. Com. No.60: Recording, Sub-committee 60A: Sound Recording, EL 15-14-299/82, 1982.
24. Никамин В.А. Форматы цифровой звукозаписи. - СПб.: - ЭЛБИ, 1998. - 264 с.
25. Никамин В.А. Цифровая звукозапись. Технологии и стандарты. - СПб., Наука и Техника, 2002. - 256 с.
26. Никамин В.А. Компакт-диски и CD-устройства. – СПб.: Лань, 1997, 112 с.
27. International Standard ISO/IEC 16448. Second Edition. 2002-04-15. Information Technology – 120 mm DVD – Read-only disc.
28. Василевский Ю. А. Цифровой многопрофильный диск DVD – основные технические характеристики, ТКТ, 1998, №2, с. 9.
29. Василевский Ю. А. Все о цифровых видеодисках DVD, ТКТ, 1997, №7, с. 59.
30. Василевский Ю. А. Семейство DVD и его применение в телевидении, ТКТ, 1998, №5, с. 13.
31. ISO/IEC 14496-3. Information Technology – Coding of audio-visual objects. Part 3: Audio, 1999, Super Audio CD Format.

32. ISO/IEC 13818-7. Information Technology – Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio. Part 7: Advanced Audio Coding, 1997. Super Audio CD Player SCD-1 Technology.
33. Reefman D., Janssen E. Enhanced Sigma-Delta Structures for Super Audio CD Application. Convention Paper Presented at the 112<sup>th</sup> 2002 May 10 (Munich, Germany) Convention. Convention Paper 5616, IEEE Trans. on Consumer Electronics. 1995, v. 14, №3.
34. Takada K. and Nakajo M. Optical Review 8 (2001). p. 463.
35. В.А. Никамин. Формат BluRay. Учебное пособие. - Издательство СПбГУТ, 2010, 72 с.
36. Tanaka Y. High Density Magneto-Optical Disc Technologies. IEEE Trans. on Consum. Electron., v. 43, 1997, №3, pp. 475-481.
37. Nishida S. et al. New Developments for Mini Disc System. IEEE Trans. on Consum. Electron., v. 40, 1994, №3, pp. 774-780.
38. Крауфорд Ф. Волны. Перевод с англ. под ред. А.И. Шальникова и А.О. Вайсенберга, изд. 2-е, исправл., Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1976.
39. Бишоп Р. Колебания. Перевод с англ., «Наука», 1968.
40. Горелик Г.С. Колебания и волны, Физматгиз, 1959.
41. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике, вып. 3. Излучение. Волны. Кванты. М.: Мир, 1967.
42. Дитчберн Р. Физическая оптика. Перевод с англ., «Наука», 1965.
43. Иродов И.Е. Волновые процессы. М.; СПб.: Физматлит, 2001.
44. Ландсберг Г.С. Оптика, Гостехиздат, 1940.
45. Поль Р.В. Оптика. М.: Наука, 1966.
46. Жевандров Н.Д. Поляризация света М.: Наука, 1969.
47. Гонда С., Сэко Д. Оптоэлектроника в вопросах и ответах. Л.: Энергоатомиздат, 1989.
48. Апенко М.И., Гвоздева Н.П. Физическая оптика. М.: Машиностроение, 1979.
49. Накадзима Х., Огава Х. Цифровые грампластинки, - М.: Радио и связь, 1988.
50. Бохьюз Г., Браат Дж., Хейсер А. и др. Оптические дисковые системы. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1991, 280 с.
51. Щербина В. И. Цифровая звукозапись. – М.: Радио и связь, 1989, 192 с.
52. Цифровая звукозапись. Под ред. Дж. Маеса и М. Веркаммена. Пер. с англ. – М.: Мир, 2004, 352 с.
53. Watkinson J. R. The Art of Digital Audio. Boston, MA.: Focal Press, 1994.
54. Вологдин Э. И., Викторенков А. В., Шпигель Л. М. Автоматическая фокусировка в лазерных системах записи и воспроизведения. – Техника средств связи, сер. ТРПА, 1978, вып.1.
55. Коченов В. И. Автоматическая фокусировка с помощью наклонного лазерного пучка. – Техника средств связи, сер. ТРПА, 1979, вып. 2.
56. Вологдин Э. И. Динамические методы автоматической фокусировки. - Техника средств связи, сер. ТРПА, 1979, вып. 2.
57. Патент США № 4621353, МКИ G11В 7/00.
58. Патент США № 4622659, МКИ G11В 7/00, 21/10.
59. Патент США № 4625303, МКИ G11В 7/00.

60. Патент США № 4627041, МКИ G11B 7/00.
61. Патент Японии № 61-36295, МКИ G11B 7/09, G02B 7/11.
62. А. с. СССР № 1312639, МКИ G11B 7/09.
63. А. с. СССР № 1275533, МКИ G11B 7/09.
64. Никамин В. А. Микросхемы для CD-проигрывателей. Сервосистемы. SONY, PHILIPS, TOSHIBA, SANYO. Справочник. – СПб-Киев.: Наука и техника, 2003, 272 с.
65. Никамин В. А. Специализированные микросхемы для проигрывателей компакт-дисков и приводов CD-ROM. SONY, PHILIPS. Процессоры цифровой обработки сигналов. Справочник. – М-СПб.: Бином-Пресс, Альтекс-А, Корона-Принт, 2004, 256 с.
66. Okada R., Kondo M., Kime K. The Three-beam Optical Pick-up for CD-players/ - IEEE Int. Conf. Consum. Electron., Rosemont, Ill, 8-10, June, 1983, New-York, p. 184-185.
67. Международный патент № 86/05914, МКИ G11B 7/09.
68. Международный патент № 86/07486, МКИ G11B 7/085.
69. Международный патент № 86/07179, МКИ G11B 5/58, 5/39, 5/02.
70. Патент США № 4616354, МКИ G11B 7/00.
71. Патент Японии № 61-36296, МКИ G11B 7/09.
72. Патент Японии № 61-36288, МКИ G11B 5/588, H04N 5/782.
73. Патент ФРГ № 3618720, МКИ G11B 7/09.
74. А. с. СССР № 1307477, МКИ G11B 7/09.
75. А. с. СССР № 1297105, МКИ G11B 7/00.
76. А. с. СССР № 1297107, МКИ G11B 7/09.
77. Гуревич В. С., Штутман Л. М. Особенности применения лазерных диодов в цифровых лазерных звукопроигрывателях. – Техника средств связи, сер. ТРПА, 1987, вып. 3, с. 88-96.
78. Живулин А. В. Регулирование и синхронизация скорости цифрового потока в проигрывателе «Компакт Диск». – Техника средств связи, сер. ТРПА, 1987, вып. 3, с. 96-103.
79. Шляпоберский В. И. Основы техники передачи дискретных сообщений. - М.: Связь, 1979, 480 с.
80. Мартынов Е. М. Синхронизация в системах передачи дискретных сообщений. - М.: Связь, 1972, 216 с.
81. Левин Л. С., Плоткин М. А. Основы построения цифровых систем передачи. - М.: Связь, 1975, 176 с.
82. Колтунов М. Н., Коновалов Г. В., Лангуров З. И. Синхронизация по циклам в цифровых системах связи. - М.: Связь, 1980, 152 с.
83. Оганян Л. Н., Тихонов Б. Н. Анализ основных направлений повышения эффективности систем синхронизации по циклам. – Техника средств связи, сер. ТПС, 1987, вып. 9, с. 42-53.
84. Оганян Л. Н. Показатели качества системы цикловой синхронизации. – Радиотехника, 1985, №9, с. 32-35.
85. Воронцов В. И. Помехоустойчивость систем цикловой синхронизации цифровых систем передачи с выделением каналов. – Электросвязь, 1983, с. 15-19.
86. Леонов Г. А., Селеджи С. М. Системы фазовой синхронизации в аналоговой и цифровой схемотехнике. – СПб.: Невский диалект, 2002, 112 с.
87. Витерби Э. Д. Принципы когерентной связи. – М.: Советское радио, 1970, 392 с.

88. Gardner F. M. Phase-lock techniques. New-York: John Wiley, 1996.
89. Гупта С. Фазовая автоподстройка частоты. ТИИЭР, 1975, т. 63, с. 50-66.
90. Линдсей В. Системы синхронизации в связи и управлении. – М.: Сов. радио, 1978, 600 с.
91. Шахгильдян В. В., Ляховкин А. А. Системы фазовой автоподстройки частоты. - М.:–Связь, 1972, 447 с.
92. Системы фазовой синхронизации / Под ред. В. В. Шахгильдяна и Л. Н. Белюстиной. – М.: Радио и связь, 1982, 289 с.
93. Системы фазовой автоподстройки частоты с элементами дискретизации / Под ред. В. В. Шахгильдяна. – М.: Связь, 1979, 224 с.
94. Nash G. Phase locked loop. Design Fundamentals. Phoenix AZ.: Motorola Inc. 1994.
95. Леонов Г. А., Смирнова В. Б. Математические проблемы теории фазовой синхронизации. СПб.: Наука, 2000, 400 с.
96. А. с. СССР № 1160582, МКИ H04L 7/08.
97. А. с. СССР № 864586, МКИ H04L 7/08.
98. А. с. СССР № 944135, МКИ H04L 7/08.
99. А. с. СССР № 972568, МКИ G11B 5/09.
100. А. с. СССР № 944136, МКИ H04L 7/08.
101. А. с. СССР № 944137, МКИ H04L 7/08.
102. А. с. СССР № 944138, МКИ H04L 7/08.
103. Патент Японии № 59-37752, МКИ H04L 7/08.
104. Патент Японии № 57-6308, МКИ H04L 7/08.
105. Патент Японии № 56-9091, МКИ H04L 7/08.
106. Патент США № 4357630, МКИ H04L 5/10.
107. Патент Великобритании № 2007465, МКИ H04N 7/08.
108. Патент ФРГ № 1815233, МКИ H04L 7/04.
109. Hoeve H., Timmermans J. and Vries L. B. Error Correction and Concealment in the Compact Disc System, Philips Tech. Rev., v. 40, 1982, N6, pp. 166-172.
110. Vries L., Immink K., Nijb J. G., Doi T. T., Odaka K. etc. The Digital Compact Disc: Modulation and Error Correction Schemes. 67<sup>th</sup> Conv. of Audio Eng. Society, JAES (Abstract), v. 22, 1980, Dec., p. 931.
111. Doi T. T. General Information on Compact Disc, JAES, v. 29, 1981, N1/2, pp. 60-66.
112. Doi T. T., Odaka K., Fukuda G. Cross Interleave Code for Error Correction of Digital Audio Systems, 64<sup>th</sup> AES Conv. N 1559 (H4).
113. Э. Л., Зяблов В. В. Обобщенные каскадные кодыю – М.: Связь, 1976.
114. Форни Д. Каскадные коды. – М.: Мир, 1971.
115. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки. – М.: Мир, 1976.
116. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. – М.: Мир, 1986.
117. Мак-Вильямс Ф. Дж., Слоэн Н. Дж. А. Теория кодов, исправляющих ошибки. – М.: Связь, 1979.
118. Касами Т., Токура Н., Ивадари Е., Инагаки Я. Теория кодирования. – М.: Мир, 1978.
119. Колесник В. Д., Мирончиков Е. Т. Декодирование циклических кодов. – М.: Связь, 1968.

120. Кларк Дж. мл., Кейн Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи., сер. Статистическая теория связи, вып. 28, - М.: Радио и связь, 1987.
121. Meggit J. Error Correcting Codes for Correcting Bursts of Errors, IBM J. Res. Develop, v. 4, 1960, pp. 329-334.
122. Kasami T. Optimum Shortened Cyclic Codes for Burst-Error Correction, IEEE Trans. Inform. Theory, v. IT-10, N2, 1963.
123. Chien R. Linear Residue Codes for Burst Error Correction, IEEE Trans. Inform. Theory, v. IT-10, 1964, pp. 127-133.
124. Masaya Ohkubo, etc. On Interleaved Codes for Error Correction Codes. Electronics and Communication in Japan, v. 64-A, N5, 1981, pp. 20-29.
125. Nakano I. New Decoding Methods of Interleaver Burst Error Correcting Codes. The Trans. of the Chist of Elect. and Commun. Eng. Japan, v. j66-A, N4, Apr., 1983, pp. 344-354.
126. Патент ФРГ № 3119669A1, МКИ H03K 13/32.
127. Патент Великобритании № 2076569A, МКИ G06F 11/10.
128. Matull K. ICs for Compact Disc Decoders, Electronic Components and Applications, v. 4, N3, May 1982, pp. 131-141.
129. Driessen L. M. N. E., Vries L. V. Performance Calculations of the CD Error Correcting Codes on a Memoryless Channel, 4<sup>th</sup> Int. Conv. on Video and Data Recording, Southampton, 1982, (IERE Conv. Proc. N 34).
130. Вологдин Э. И. Детектирование ошибок в цифровых декодерах лазерных проигрывателей. - Техника средств связи, сер. ТРПА, 1985, вып. 1.
131. Эрэкутороникусу Райфу, 1983, №3, с. 217-325.
132. Европейский патент № 0072640, МКИ G11B 5/09, публ. 23.2.83.
133. Electronic Components & Applications, 1984, v. 6, N4, pp. 216-222.
134. National Technical Report, v. 29, N2, 1983, pp. 86-96.
135. IEEE Trans. on Consum. Elect., v. CE-30, 1984, N3, pp. 353-359.
136. Вологдин Э. И., Коган А. М., Козмина Т. А. К расчету суперстратегии декодирования в системе «Компакт-Диск» - Техника средств связи, сер. ТРПА, 1987, вып. 3, с. 36-49.
137. Гофман Ю. Г., Коган А. М., Сеницына Л. Г. Декодер кода CIRC. - Техника средств связи, сер. ТРПА, 1987, вып. 3, с. 49-58.
138. Finck R., Slowgrove D. Third-generation decoding ICs for CD-players, Electronic Components & Applications, 1988, v. 8, N3, pp. 145-152.
139. Вологдин Э. И. Исправление ошибок и стираний в декодере лазерного звукопроигрывателя. - Техника средств связи, сер. ТРПА, 1987, вып. 3, с. 21-30.
140. Heemskerck J. R. J. etc. Compact Disc: System Aspects and Modulation, Philips Techn. Rev., v. 40, 1982, N6, pp. 157-164.
141. Doi T. T. Channel Coding for Digital Audio Recordings, JAES, v. 31, 1983, N4, pp. 224-236.
142. Immink K. A. EFM – The Modulation Method for the Compact Disc Digital Audio System / K. A. Immink, N. Ogawa // AES Digital Audio (Collected Papers from AES Premiere Conference), New-York, 1982. – P. 117-126, J. Audio Eng. Soc. – Vol. 30, 1982, № 3-6. P. 117-126.



143. Immink K. A., Gross U. Optimization of Low-Frequency Properties of Eight-to-Fourteen Modulation, *Radio & Electronic Engineer*, v. 53, 1983, N2, Febr., pp. 63-66.
144. В.А. Никамин. Канальная модуляция в системах записи цифровых данных: Монография. – 2-е изд. перераб. и доп. – СПбГУТ. – СПб., 2014. – 160 с.
145. Никамин В. А. Преобразователь 14-8 кода EFM / В. А. Никамин // Рукопись, депонированная в ЦНИИ «Румб» 01.04.85 г., справка № ДР-2096, реферат опублик. в БАУ «Судостроение», сер. 4, 1985. - №3.
146. Data interchange on read-only 120 mm optical data disks (CD-ROM) / Standard ECMA-130, 2nd Edition - June 1996.
147. Pohlman K. S. Principles of Digital Audio, 5rd Ed. / K. S. Pohlman; McGraw-Hill, 2005. – 860 p.
148. Stand D. Optimization of Reversible Optical DataStorage Discs // *Optical Storage Media. Proc. SPIE.* – 1983. - № 420. – P. 200-204.
149. Takenaga M., Yamada N., Soohara Y. etc. New Optical Erasable Medium Using Tellurium // *Optical Storage Media. Proc. SPIE.* – 1983. - № 420. – P. 173-177.
150. Aoki Y., Watanabe K., Oyama T. etc. New Optical Recording Material for Data Storage // *Optical Storage Media. Proc. SPIE.* – 1983. - № 420. – P. 313-318.
151. Imamura N. Magneto Optical Disc Memory // *Information Processing Society of Japan.* – 1985. – Vol. 26, №1. – P. 25-32.
152. Никамин В.А. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи. Справочник. – СПб.: Корона-Принт, 2003, 224 с.
153. Inose H., Yasuda Y., Murakami J. A Telemetry System by Code Modulation – Delta-Sigma Modulation, *IRE Trans.*, v. 8, 1962, Sept. p. 204.
154. Inose H., Yasuda Y. A Unity Bit Coding Method by Negative Feedback, *Proc. IEEE*, v. 51, 1963, Nov., pp. 1524-1535.
155. Bernhard E. Bosser, Bruse A. Wooley. The Design of Sigma-Delta Modulation Analog-to-Digital Converters, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, v. 23, №6, pp. 1298-1308.
156. Choi T., Kaneshiro R. etc. High-Frequency CMOS switched-capacitor filter for communications application, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, v. SC-18, Dec. 1983, pp. 652-664.
157. 120 mm DVD - Read-Only Disk / Standard ECMA-267, 3rd Edition - April 2001.
158. Immink K.A. Constructions of Almost Block-Decodable Runlength-Limited Codes. – *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 41, Jan. 1995, No. 1, pp. 284-287.
159. Immink K.A. EFMPlus: The Coding Format of the MultiMedia Compact Disc. – *IEEE Trans. on Consum. Electron.*, vol. 41, Aug. 1995, No. 3, pp. 491-497.
160. Nakamura M. et al. A Study on a High Density Digital Video Disc Player. *IEEE Trans. on Cons. Electron.*, v. 41, N3, pp.498-502.
161. ISO/IEC 13818-1: Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio: Systems.
162. Suzuki B. H. DVD-Audio Specifications. AES 17 International Conference on High Quality Audio Coding.
163. Fuchigami N., Kuroiwa T., Suzuki B. H. DVD-Audio Specifications. *Journal of Audio Eng. Soc.*, v. 48, N12, 2000 December, pp. 1228-1240.
164. 80 mm (1,23 Gbytes per side) and 120 mm (3,95 Gbytes per side) DVD-Recordable Disk (DVD-R). Standard ECMA-279, December 1998.

165. Data Interchange on 120 mm Optical Disk using +RW Format - Capacity: 3,0 Gbytes and 6,0 Gbytes. Standard ECMA-274 2nd Edition - June 1999.
166. Taylor J. DVD Demystified. McGraw-Hill Professional.
167. Tewksbury S. K., Hollock R. W. Oversampled Linear Predictive and Noise-Shaping Coder of Order  $N > 1$ . IEEE Trans. Circuits Syst., v. CAS-25, 1978, July, pp. 436-447.
168. Skritek P. Prospective Converter Techniques for Improved Signal-to-Noise Ratio in Digital Audio Systems, presented at the 82<sup>nd</sup> Convention of the Audio Engineering Society, JAES (Abstracts), v. 35, 1987, May, p. 394, preprint 2477.
169. Hawksford M. J. Nth-Order Recursive Sigma-ADC Machinery at the Analog-to-Digital Gateway, presented at the 78<sup>th</sup> Convention of the Audio Engineering Society, JAES (Abstracts), v. 33, 1985, July/Aug., pp. 586, 588, preprint 2248.
170. Никамин В.А. Формат BluRay. Учебное пособие. - Издательство СПбГУТ, 2010, 72 с.
171. White Paper, Blu-ray Disc, 1C. Physical Format Specifications for BD-ROM, 5<sup>th</sup> Edition, March, 2007.
172. White Paper, Blu-ray Disc Format, 4. Key Technologies, August, 2004.
173. White Paper, Blu-ray Disc Format, 2B. Audio Visual Application Format Specifications for BD-ROM, March, 2005.
174. White Paper, Blu-ray Disc Format, 3. File System Specifications for BD-RE, R, ROM, August, 2004.
175. White Paper, Blu-ray Disc Recordable Format, part 1, Physical Specifications, February, 2006.
176. White Paper, Blu-ray Disc Format, 1A. Physical Format Specifications for BD-RE, 2<sup>nd</sup> Edition, February, 2006.
177. White Paper, Blu-ray Disc Format, Audio Visual Application Format Specifications for BD-RE Version 2.1, March, 2008.
178. Nishioka S., Nakano I. and Yamaguchi T. Ext. Abstr. (50<sup>th</sup> Spring Meet. 2003). Japan Society of Appl. Physics and Related Societies, 27p-ZW-10 [in Japanese].
179. Takada K. and Nakajo M. Optical Review 8 (2001). P.463.
180. Park K.S. et. al. ISOM/ODS2002, TuC.4. P.165.
181. В.А. Никамин. Зрительно-слуховое восприятие аудиовизуальных программ. Учебник. – СПбГУТ. – СПб., 2015. – 328 с.
182. Алдошина И.А., Приттс Р. Музыкальная акустика: Учебник. – СПб.: Композитор, 2006.
183. Zwicker E., Fast H. Psychoacoustics, 2<sup>nd</sup> ed. New York.: Springer, 1999.
184. Howard D., Angus J. Acoustics and Psychoacoustics. G-B.: Focal-Press, 2001.
185. Шиффман Х.Р. Ощущение и восприятие. СПб.: Питер, 2003.
186. Hearing / Ed. Moore B. London.: Academic Press, 1995.
187. Moore B. Introduction to the psychology of hearing. N. Y.: Academic Press, 1989.
188. Bregman A.S. Auditory Scene Analysis: The Perceptual Organization of Sound. Cambridge: MIT Press, 1990.
189. Parncutt R. Harmony: Psychoacoustical Approach. N. Y.: Springer, 1990.
190. Гельфанд С.А. Слух. М.: Медицина, 1984.
191. Блауэрт Й. Пространственный слух. Москва.: Энергия, 1979.

192. Blauert J. Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization. Cambridge: MIT Press, MA, 1997.
193. Слуховая система / Отв. ред. Я.А. Альтман. Л.: Наука, 1990.
194. Zwicker E., Zwicker T. Audio Engineering and Psychoacoustics: Matching Signals to the Final Receiver, the Human Auditory System. Journal of Audio Engineering Society. Vol. 39, No. 3, March 1991. P. 1215-1261.
195. Encyclopedia of Acoustics / Ed. M. Crocker. N.Y.: J. Wiley & Sons, 1997. V. 1-4.
196. The Psychology of Music / Ed. D. Deutsch. N.Y.: Academic Press, 1984.
197. Sloboda J.A. The Musical Mind: The Cognitive Psychology of Music. Oxford.: University Press, 1985.
198. Rossing T.D. The Science of Sound. N.Y.: Adisson-Wesley Publ, 1982.
199. Stevens S. Psychophysics. N.Y.: Wiley, 1975.
200. Данилова Н.Н. Психофизиология. Учебник. М.: Аспект Пресс, 2001.
201. Moore B., Glasberg B., Baer T. A Model for the Prediction of Thresholds, Loudness and Partial Loudness / Journal of Audio Engineering Society. Vol. 45, No. 4, April 1997. p. 224-240.
202. Bosi M., Goldberg R. Introduction to Digital Audio Coding and Standards. Boston: Kluwer Ac. Publishers, 2003.
203. Никамин В.А. Системы пространственного звучания. Учебное пособие. – СПб.: Корона-Принт, 2004.
204. В.А. Никамин. Многоканальные звуковые системы : [монография]. – В. А. Никамин ; СПбГУТ. – СПб., 2017. – 184 с.
205. Слуховая система / Отв. ред. Я.А. Альтман. Л.: Наука, 1990.
206. Ковалгин Ю.А. Стерефония. М.: Радио и связь, 1989.
207. Litovsky et al. The precedence effect. / J. Acoustic. Soc. Am., Vol. 106, No. 4, 1999.
208. Toole F. Sound Reproduction. G-B.: Focal-Press, 2008.
209. AES3-2009: AES standard for digital audio engineering – Serial transmission format for two-channel linearly represented digital audio data, 2004.
210. Specification of the Digital Audio Interface (The AES/EBU interface) Tech. 3250-E // 3th Ed, 2004.
211. ITU-R Recommendation BS647: A digital audio interface for broadcasting studios, 2004.
212. Adaptive Coding for Self-clocking Recording / A. Gabor // IEEE Transaction on Magnetics. 1967. Vol. 4. P. 866–868.
213. EBU document Tech. 3250 – Supplement 1, 1992: Format, for the user data channel of the digital audio interface (The AES/EBU interface), 1992.
214. AES10-2008: AES Recommended Practice for Digital Audio Engineering – Serial Multi-channel Audio Digital Interface (MADI) (Revision of AES10-1991).
215. AES11-1991: AES Recommended practice for digital audio engineering - Synchronization of digital audio equipment in studio operations, 1991.

**Никамин Виктор Александрович**  
**ОПТИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ ИНФОРМАЦИИ**

*Научное издание*

Отпечатано с авторского оригинал-макета

План изданий научной литературы 2018 г., п. 6

Подписано к печати 08.02.2018  
Объем 20,5 усл.-печ. л. Тираж 500 экз. Заказ 843

Редакционно-издательский отдел СПбГУТ  
193232 СПб., пр. Большевиков, 22

Отпечатано в типографии ИПЦ ООО «Политехника-принт»  
190005 СПб., Измайловский пр., д. 18Д