

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ**  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ**  
**БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ**  
**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ**  
**им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»**  
**(СПбГУТ)**

---

**М.С. Былина, С.Ф. Глаголев, В.С. Иванов**

**ВВЕДЕНИЕ В ПРОФЕССИЮ**  
**ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ**  
**СВЯЗИ**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

**СПб ГУТ)))**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**  
**2018**

УДК 621.39  
ББК 32.88

Рецензенты:

доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения императора Александра I *А. К. Канаев*,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры ССиПД СПбГУТ *И. В. Гришин*

*Утверждено редакционно-издательским советом СПбГУТ  
в качестве учебного пособия*

**Былина М. С.**

??? Введение в профессию. Оптические системы и сети связи : учебное пособие / М.С. Былина, **С.Ф. Глаголев**, В.С. Иванов ; СПбГУТ. – СПб., 2018. – ??? с.

Рассматриваются основы инфокоммуникационных технологий, особенности оптических систем связи, принципы построения оптических сетей.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

**УДК 621.39  
ББК 32.88**

© Былина М.С., Глаголев С.Ф., Иванов В. С., 2018

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2018

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>СОДЕРЖАНИЕ</b> .....	<b>3</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>5</b>
<b>1 ИНФОРМАЦИЯ И ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ</b> .....	<b>6</b>
1.1 ИНФОРМАЦИЯ, СООБЩЕНИЕ, КОЛИЧЕСТВО ИНФОРМАЦИИ.....	6
1.2 ВИДЫ И ПАРАМЕТРЫ СИГНАЛОВ .....	7
1.3 ЦИФРОВОЙ СИГНАЛ. АНАЛОГО-ЦИФРОВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ. СКОРОСТЬ ПЕРЕДАЧИ. ВРЕМЕННОЕ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ. ....	9
1.4 ФИЗИЧЕСКИЙ НОСИТЕЛЬ СИГНАЛА – ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ВОЛНА. ВИДЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН. МОДУЛЯЦИЯ. ЧАСТОТНОЕ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ. ....	13
1.5 СРЕДА ПЕРЕДАЧИ.....	15
1.6 ПРОЦЕСС ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ВЕРОЯТНОСТЬ ОШИБОК. ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ. ....	19
1.7 ВИДЫ СИГНАЛОВ, ПЕРЕДАВАЕМЫХ ПО СЕТЯМ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ, И ПРИНЦИПЫ ИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ЦИФРОВЫЕ СИГНАЛЫ .....	22
1.8 ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ И ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЩЕСТВО .....	27
<b>2 ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ</b> .....	<b>29</b>
2.1 Немного истории или как все начиналось.....	29
2.1.1 «Доволоконные» оптические системы связи .....	29
2.1.2 Оптическое волокно .....	32
2.1.3 Приемники оптического излучения.....	34
2.1.4 Источники оптического излучения.....	36
2.1.5 Волоконно-оптические системы связи.....	38
2.2 ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ, ПОЛОЖЕННЫЕ В ОСНОВУ РАБОТЫ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА, .....	39
2.3 ОПТИЧЕСКИЙ СИГНАЛ И ЕГО ПАРАМЕТРЫ .....	41
2.4 ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО .....	42
2.4.1 Конструкция оптического волокна.....	42
2.4.2 Распространение сигналов по оптическому волокну. Параметры оптического волокна	43
2.5 ОПТИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ.....	45
2.5.1 Классификация оптических кабелей .....	45
2.5.2 Конструктивные элементы оптического кабеля .....	46
2.5.3 Маркировка оптического кабеля .....	49
2.6 АКТИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ .....	50
2.6.1 Передающие оптические модули .....	50
2.6.2 Приемные оптические модули.....	57
2.6.3 Оптические усилители.....	59
2.7 ПАССИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ .....	60
2.7.1 Разъемные и неразъемные соединители .....	62
2.7.2 Оптические шнуры.....	66
2.7.3 Оптические разветвители.....	67
2.7.4 Оптические фильтры .....	69
2.7.5 Технология спектрального уплотнения. Оптические мультиплексоры спектрального уплотнения.....	71
2.7.6 Оптические аттенюаторы .....	75
2.7.7 Компенсаторы хроматической дисперсии.....	75
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	<b>77</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ИСТОРИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ В РОССИИ</b> .....	<b>79</b>
Начальный этап развития .....	79
Советский период развития .....	80
Российское высшее образование после 1992 года.....	83
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ИСТОРИЯ СПб ГУТ ИМ. ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА</b> .....	<b>84</b>
Становление и развитие университета в период с 1929 по 1956 г. ....	84

Михаил Александрович Бонч-Бруевич (1888 – 1940) .....	86
УНИВЕРСИТЕТ В ПЕРИОД 1956-1989 ГГ. ....	88
УНИВЕРСИТЕТ В ПЕРИОД С 1990 Г. ПО НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ.....	89
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>93</b>

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России реализуется государственная программа «Информационное общество», рассчитанная на период до 2020 года. Основной целью программы является повышение качества жизни граждан на основе использования информационных и телекоммуникационных технологий. Программа должна способствовать развитию и внедрению перспективных инфокоммуникационных технологий, которые позволят преодолеть так называемое цифровое неравенство – обеспечить всем гражданам равный доступ к современным средствам коммуникации.

Важнейшим направлением процесса информатизации всех сфер производства и общества в целом является развитие инфокоммуникационных технологий на базе волоконно-оптических систем связи (ВОСС). Поэтому востребованность квалифицированных бакалавров и магистров, способных разрабатывать, проектировать, строить и эксплуатировать ВОСС, на рынке труда постоянно растет. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций (СПбГУТ) им. проф. М.А. Бонч-Бруевича играет значительную роль в подготовке таких специалистов.

Настоящее пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», изучающих дисциплину «Введение в профессию». Цель пособия – ознакомить студентов с выбранным ими направлением подготовки и наиболее современными оптическими и оптоэлектронными технологиями и обеспечить основу для изучения специальных дисциплин.

Пособие состоит из двух глав и приложений. В первой главе рассмотрены основные понятия телекоммуникаций, теории сигналов и систем связи. Во второй главе рассмотрена история развития квантовой электроники, лазерной техники и волоконной оптики, основы теории распространения сигналов по оптическим волокнам, пассивные и активные компоненты ВОСС.

В приложениях представлена история высшего образования в России и история СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

# 1 ИНФОРМАЦИЯ И ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

## 1.1 Информация, сообщение, количество информации

Каждый век истории человечества характеризуется определенным словом-символом, выражающим его сущность. Для ушедшего XX века такими символами были индустриализация и научно-техническая революция. Наступивший новый век связывают со словом ИНФОРМАЦИЯ. Что же такое информация и почему наступивший век связывают именно с этим словом?

Русское слово «информация» происходит от латинского слова «informatio» (разъяснение, изложение). Первоначально под информацией понимались сведения, передаваемые людьми устным, письменным или другим способом (с помощью условных сигналов, технических средств и т.д.).

С середины XX века понятие «информация» стало общенаучным. Энциклопедический словарь включает в понятие «информация» обмен сведениями между людьми, человеком и автоматом, автоматом и автоматом.

Передача и хранение информации осуществляется с помощью **сообщений** – совокупности знаков (символов), которые позволяют представить её в некоторой форме. Передача сообщений (а, следовательно, и информации) на расстояние осуществляется с помощью какого-либо материального носителя, например, бумаги или магнитной ленты или физического про-



**Клод Элвуд Шеннон** (1916–2001)  
– американский инженер, криптоаналитик и математик.

цесса, например, звуковых или электромагнитных волн, тока и т.д. Сообщения могут быть функциями времени, например речь при передаче телефонных разговоров, температура или давление при передаче телеметрических данных, спектакль при передаче по телевидению и т.п. В других случаях сообщение не является функцией времени (например, текст телеграммы, неподвижное изображение и т.д.).

В математической теории информации, созданной американским ученым Клодом Шенноном, информация рассматривается как уменьшение неопределенности нашего знания. Такое понимание информации позволяет ввести количественные характеристики для ее оценки.

Например, после сдачи контрольной работы вы находитесь в неопределенной ситуации, так как не знаете, какую оценку получили. Информационное сообщение об оценке за контрольную работу приводит к умень-

шению неопределенности вашего знания в четыре раза, так как получено одно из четырех возможных информационных сообщений: «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо» или «отлично».

Чем более неопределенна первоначальная ситуация (чем большее количество информационных сообщений возможно), тем больше мы получим новой информации при получении информационного сообщения (тем в большее количество раз уменьшится неопределенность знания).

К. Шеннон предложил за единицу принять такое количество информации, которое содержится в информационном сообщении, уменьшающем неопределенность знания в два раза. Эта единица названа **битом** (англ. bit – binary digit – двоичная цифра).

Если количество возможных информационных сообщений равно  $N$  и все они равновероятны, полученное информационное сообщение несет количество информации равное:

$$i = \log_2 N \text{ бит.} \quad (1.1)$$

Для измерения больших объемов информации введены производные единицы. Следующая по величине за битом единица измерения называется «байт», она равна восьми битам. Согласно (1.1) именно 8 бит требуется для того, чтобы закодировать любой из 256 символов компьютерного алфавита ( $256 = 2^8$ ). Еще более крупные производные единицы для измерения количества информации

- 1 килобайт (кбайт) =  $2^{10}$  байт,
- 1 Мегабайт (Мбайт) =  $2^{20}$  байт,
- 1 Гигабайт (Гбайт) =  $2^{30}$  байт.
- 1 Терабайт (Тбайт) =  $2^{40}$  байт,
- 1 Петабайт (Пбайт) =  $2^{50}$  байт.

## 1.2 Виды и параметры сигналов

Передача сообщений на расстояние осуществляется с помощью **сигналов**. Сигнал это физический процесс, отображающий (несущий) передаваемое сообщение. Сигнал передаёт (развёртывает) сообщение во времени, то есть всегда является функцией времени. Как правило, это электрический сигнал, т.е. ток или напряжение.

Сигнал может быть непрерывным (аналоговым) или дискретным. Непрерывным по уровню и по времени или аналоговым называется сигнал, заданный на всей оси времени, который может принимать любые значения в некотором интервале величин (рис. 1.1а). Примером таких сигналов является речь и музыка, как изменение во времени звукового давления в пространстве.

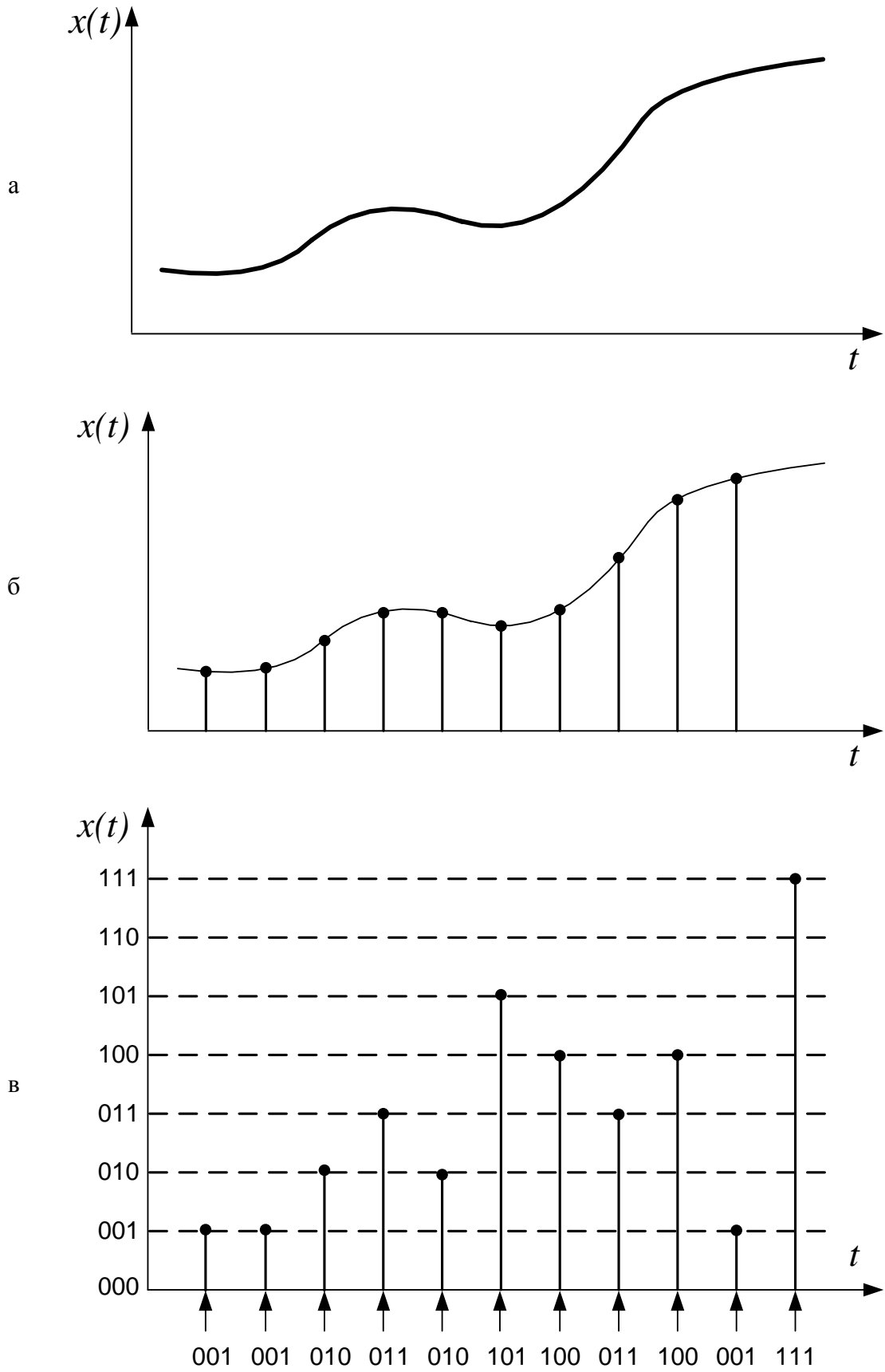


Рис. 1.1. Виды сигналов: а – аналоговый, б – дискретный по времени, в – дискретный по времени и по уровню и соответствующий ему цифровой код.



Дискретный по времени сигнал – это сигнал, заданный только в определённые моменты времени (рис. 1.1б). Дискретный по уровню (величине) сигнал – это сигнал, величина которого принимает только определённые дискретные значения (рис. 1.1в).

Сигнал характеризуют следующими основными параметрами: длительностью, шириной спектра и динамическим диапазоном.

Поскольку любой сигнал рассматривается как временной процесс, то он имеет начало и конец. Длительность сигнала определяет интервал времени, в пределах которого сигнал существует. Она измеряется в секундах.

Любой сигнал можно разложить в спектр – представить суммой конечного или бесконечного числа гармонических колебаний (гармоник), каждое из которых будет иметь свои частоту, амплитуду и фазу. Ширина спектра сигнала – это диапазон частот, в пределах которого сосредоточена его основная энергия. Она измеряется в Герцах и характеризует скорость изменения сигнала внутри интервала его существования.

Динамический диапазон сигнала  $D$  – это отношение наибольшей величины сигнала, например его мгновенной максимальной мощности  $P_{\max}$  к той наименьшей мощности  $P_{\min}$ , которую необходимо отличать от нуля при заданном качестве передачи. Динамический диапазон обычно выражают в логарифмических единицах – децибелах:

$$D = 10 \lg \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \quad (1.2)$$

Приведем для примера значения динамического диапазона для сигналов передачи программ звукового вещания: речь диктора – 25...35 дБ; музыкальные инструменты – 45...55 дБ; симфонический оркестр – до 65 дБ.

### **1.3 Цифровой сигнал. Аналого-цифровое преобразование. Скорость передачи. Временное мультиплексирование.**

Дискретный по времени и по уровню сигнал, отсчеты которого обычно равномерно расположены на временной оси, имеющий конечное число дискретных значений амплитуды, может быть представлен в цифровой форме. Для этого все возможные дискретные значения (уровни) амплитуды нумеруются (кодируются) разными числами с одинаковым числом разрядов, и записываются подряд номера уровней, которые принимает сигнал в порядке следования во времени его отсчетов. Полученная последовательность чисел называется цифровым сигналом. Обычно для нумерации уровней используют двоичную систему счисления и получаемый в результате цифровой сигнал представляет собой последовательность логических единиц и нулей (рис. 1.1в).

В современных системах связи чаще всего используются именно цифровые сигналы, обеспечивающие высокое качество связи и надежную

защиту от шумов и помех при их передаче по проводным, волоконным и радиоканалам. Аналоговые сигналы, изначально не являющиеся цифровыми (речь, изображения, видео и т.д.), обычно преобразуют в цифровую форму. Этот процесс называется аналого-цифровым преобразованием и включает в себя несколько операций.

### **1. Дискретизация аналогового сигнала.**

Под дискретизацией сигнала понимают представление его набором отсчетов, взятых через определенные обычно равные промежутки времени (рис. 1.2а). Одно из важнейших положений, на котором базируется цифровая связь, было сформулировано академиком Котельниковым в виде теоремы, которая получила название «теорема Котельникова–Шеннона». Теорема утверждает, что если правильно выбрать интервал  $\Delta t$  между отсчетами, отсчеты сохраняют всю информацию, содержащуюся в исходном сигнале с верхней частотой в спектре сигнала  $f_{upp}$ , и впоследствии из них снова можно будет восстановить исходный сигнал. «Правильный» интервал между отсчетами должен удовлетворять условию:

$$\Delta t \leq 1 / (2f_{upp}). \quad (1.3)$$

Из соотношения (1.3) видно, что дискретизация сигнала не приводит к частичной потере, содержащейся в нем информации, только если спектр сигнала ограничен сверху частотой  $f_{upp}$ . Реальные аналоговые сигналы обычно имеют неограниченный спектр ( $f_{upp} \rightarrow \infty$ ), поэтому их спектр ограничивают полосой частот  $f \leq f'_{upp}$ , в пределах которой сосредоточена основная энергия сигнала, и дискретизируют его с интервалом  $\Delta t \leq 1 / (2f'_{upp})$ .

Процесс дискретизации проиллюстрирован на рис. 1.2. Дискретные отсчеты сигнала показаны красными вертикальными линиями.

### **2. Квантование отсчетов сигнала.**

Для этого диапазон возможных изменений амплитуды отсчетов разделяется на  $2^N$  уровней квантования и каждому отсчету приписывается значение, соответствующее ближайшему нижнему уровню.

При квантовании отсчетов неизбежна частичная потеря содержащейся в сигнале информации. Потери снижаются при увеличении числа уровней квантования. В современных системах связи чаще всего используется 256 уровней квантования ( $N = 8$ ).



**Владимир Александрович Котельников** (1908–2005) – советский и российский ученый в области радиотехники, радиосвязи и радиоастрономии, академик РАН

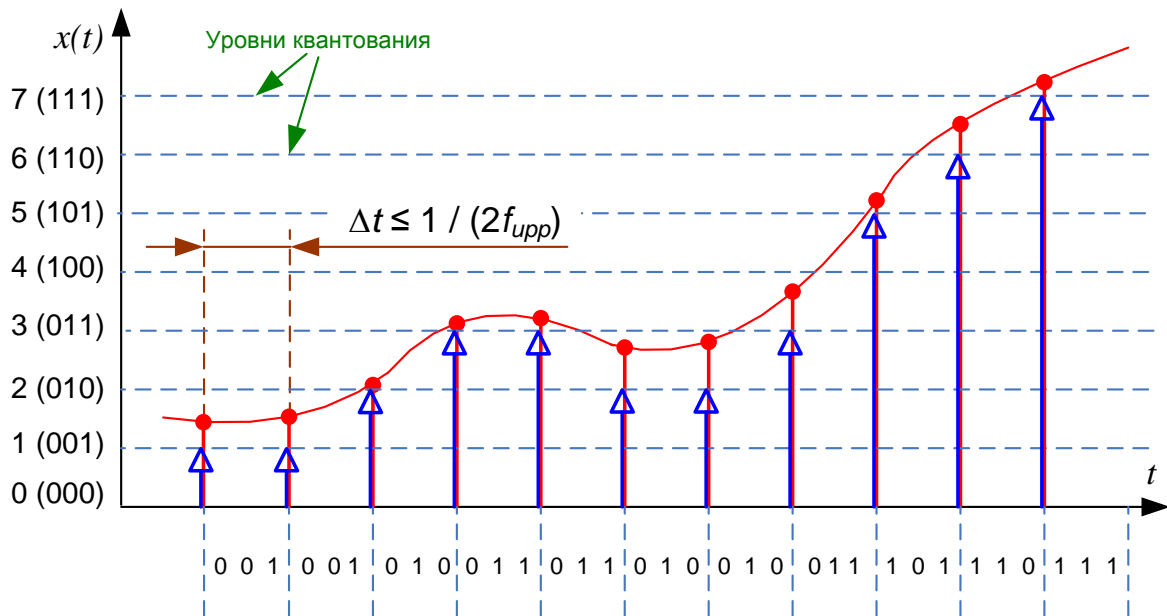


Рис. 1.2. Получение цифрового сигнала

Процесс квантования отсчетов сигнала при  $N = 3$  проиллюстрирован на рис. 1.2. Дискретные отсчеты сигнала, привязанные к соответствующим уровням квантования, показаны синими вертикальными линиями со стрелками.

### 3. Кодирование отсчетов сигнала.

На этом этапе каждый отсчет кодируется  $N$ -разрядным двоичным кодом, содержащим  $N$  бит информации. Код представляет собой номер уровня квантования, соответствующего отсчету, в двоичной форме. Результатом кодирования отсчетов сигнала является последовательность логических единиц и нулей.

Описанным способом, который также называют импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ), можно преобразовать в цифровые сигналы основные виды информации: графическую (неподвижное изображение), звуковую, числовую и видео (подвижное изображение) информацию. Однако существуют виды информации, для которых до сих пор не изобретено способов их кодирования – это тактильная информация, передаваемая ощущениями, органолептическая, передаваемая запахами и вкусами и др.

Цифровой сигнал можно характеризовать скоростью передачи – количеством информации, передаваемой за одну секунду. В рассмотренном выше примере частота следования отсчетов сигнала равна одному отсчету на интервал  $\Delta t$ . Поскольку каждый отсчет содержит  $N$  бит информации, скорость передачи информации в бит/с будет составлять:

$$B = N / \Delta t . \quad (1.4)$$

Повысить скорость передачи информации можно с помощью временного мультиплексирования сигналов (TDM – Time Domain Multiplexing). Согласно теореме Котельникова–Шеннона дискретный сигнал сохраняет всю информацию, изначально содержащуюся в непрерывном сигнале. Дискретный сигнал, как показано выше, представляет собой последовательность отсчетов, существующих в отдельные моменты времени, разделенные интервалами длительностью  $\Delta t$ . В течение этих интервалов дискретный сигнал не существует (равен нулю), но это время может быть использовано для передачи отсчетов других сигналов (рис. 1.3).

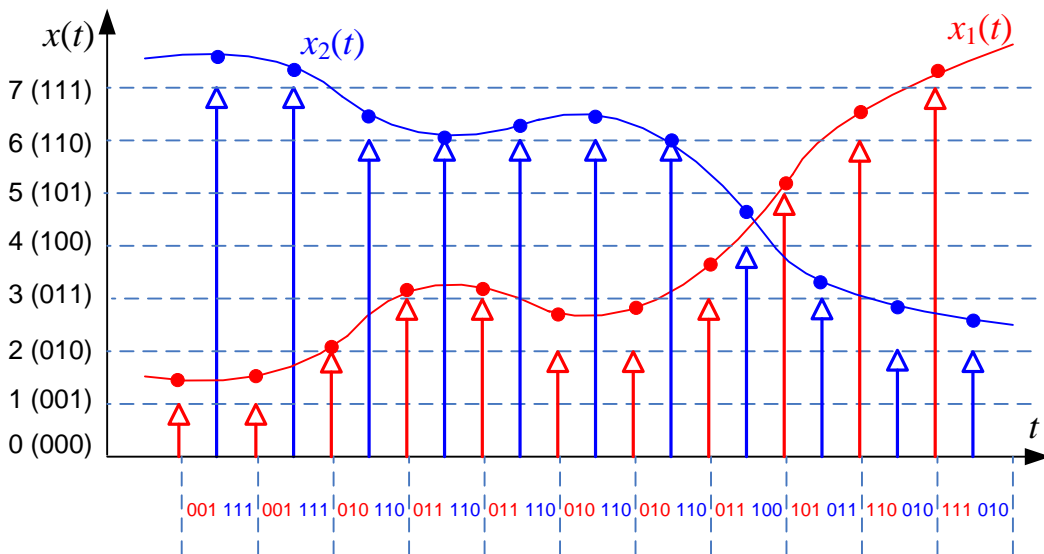


Рис. 1.3. Принцип временного уплотнения

Операцию объединения отсчетов  $M$  цифровых сигналов в интервале  $\Delta t$ , каждый из которых занимает определенный интервал времени  $\Delta t_i \ll \Delta t$ , выполняет мультиплексор TDM. Из рис. 1.3 видно, что при временном мультиплексировании скорость передачи возрастает в  $M$  раз:

$$B = M \cdot N / \Delta t. \quad (1.5)$$

Для передачи этого сигнала необходим канал связи с полосой пропускания частот не менее  $\Delta F > B / 2$ . Увеличение скорости передачи всегда связано с расширением требуемой полосы частот.

Сформированный в результате временного уплотнения цифровой сигнал, содержащий информацию об отсчетах  $M$  мультиплексируемых (первичных) сигналов, называют **групповым** или **многоканальным сигналом**. Как правило, это электрический сигнал, который может быть непосредственно передан по двухпроводным электрическим линиям связи. Так традиционно осуществлялась связь по телефонным и телеграфным линиям связи. Для организации связи по радиоканалам и в оптическом диапазоне частот используют модуляцию несущей электромагнитной волны высокой частоты электрическим сигналом.

## 1.4 Физический носитель сигнала – электромагнитная волна. Виды электромагнитных волн. Модуляция. Частотное мультиплексирование.

В качестве физического носителя сигналов в радио и оптических системах связи используется распространяющаяся в пространстве электромагнитная волна. В каждой точке пространства она характеризуется взаимно перпендикулярными векторами напряженности электрического  $E$  и магнитного полей  $H$ , которые перпендикулярны направлению распространения волны. Для монохроматической волны изменения во времени напряженности электрического поля в некоторой точке пространства описываются уравнением:

$$E(t) = E_m \cos(\omega t + \varphi), \quad (1.6)$$

где  $E_m$  – амплитуда,  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота,  $f$  – частота,  $\varphi$  – фаза.

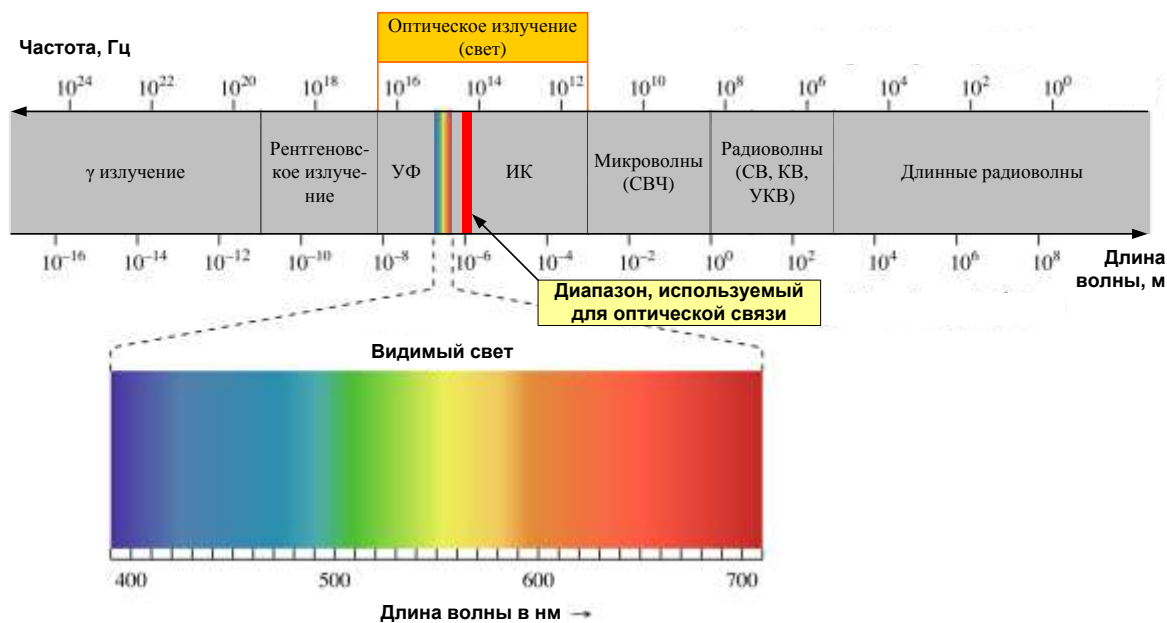


Рис. 1.4. Электромагнитное излучение

К электромагнитным волнам или электромагнитному излучению относятся радиоволны, микроволны (сверхвысокие частоты – СВЧ), инфракрасное излучение, видимый свет, ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение (рис. 1.4). Отличаются все эти виды электромагнитных волн своей частотой или длиной волны, которая связана в частотой соотношением:

$$\lambda = c/f, \quad (1.7)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме.

Из рис. 1.4 видно, что частота и длина волны могут изменяться в очень широких пределах. Приводя значения таких величин, для удобства исполь-

зуют десятичные приставки, обозначающие доли и кратные единицы измерения. Наиболее часто употребляемые десятичные приставки приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Десятичные приставки

	Наименование	Обозначение	Множитель
Доли единицы	фемто	ф	$10^{-15}$
	пико	п	$10^{-12}$
	нано	н	$10^{-9}$
	микро	мк	$10^{-6}$
	милли	м	$10^{-3}$
Кратные единицы	кило	к	$10^3$
	Мега	М	$10^6$
	Гига	Г	$10^9$
	Тера	Т	$10^{12}$
	Пета	П	$10^{15}$

Телекоммуникационные сигналы формируются путём модуляции, т.е. изменения одного или нескольких параметров электрического сигнала или электромагнитной волны (1.6) в соответствии с передаваемым сообщением.

На рис. 1.5а показан двоичный цифровой сигнал, т.е. последовательность кодовых символов «1» и «0», и результат его воздействия на:

- амплитуду электрического сигнала (рис. 1.5а) или электромагнитной волны (рис. 1.5б) – амплитудная модуляция несущей волны,
- частоту несущей волны (рис. 1.5в) – частотная модуляция несущей волны,
- фазу несущей волны (рис. 1.5г) – фазовая модуляция несущей волны.

Для повышения скорости передачи информации электрический сигнал или электромагнитную волну подвергают модуляции групповыми цифровыми сигналами, полученными в результате временного уплотнения многих первичных сигналов.

Для повышения скорости передачи информации можно также использовать частотное мультиплексирование сигналов (FDM – Frequency Domain Multiplexing), заключающееся в одновременном использовании для передачи  $M$  несущих волн с разными частотами  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M$ , каждая из которых подвергается модуляции своим цифровым сигналом.

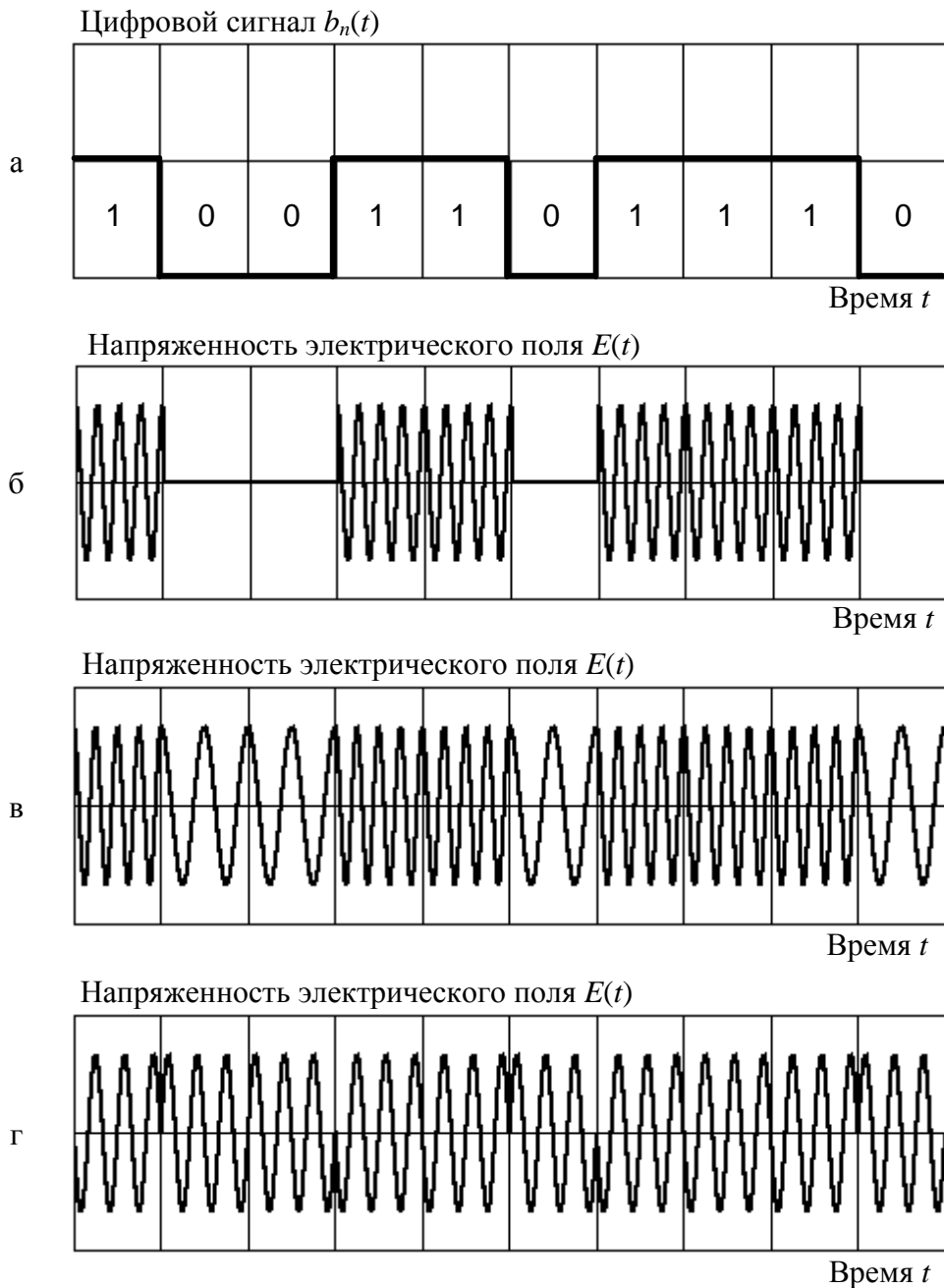


Рис. 1.5. Модуляция несущей волны: а – цифровой модулирующий сигнал, б – амплитудная модуляция, в – частотная модуляция, г – фазовая модуляция

## 1.5 Среда передачи

Сигнал, представляющий собой модулированную электромагнитную волну, передается в пространстве от передающего к приемному устройству по **среде передачи**, которая может быть как естественной (атмосфера, космическое пространство), так и искусственной (направляющие системы).

Естественную среду передачи используют системы радиосвязи, а также системы оптической связи в открытом пространстве.

Радиосигналы на несущей частоте могут передаваться через открытое пространство между двумя точками с помощью передающих и приемных антенн, располагаемых на расстоянии прямой видимости (рис. 1.6а). Для увеличения дальности связи используют ретрансляторы, которые могут образовывать единый радиорелейный канал связи в околоземной области. Увеличить дальность связи позволяют ретрансляторы, устанавливаемые на спутниках связи, которые могут находиться на геостационарных орбитах и обеспечивать устойчивую радиосвязь (рис. 1.6б).

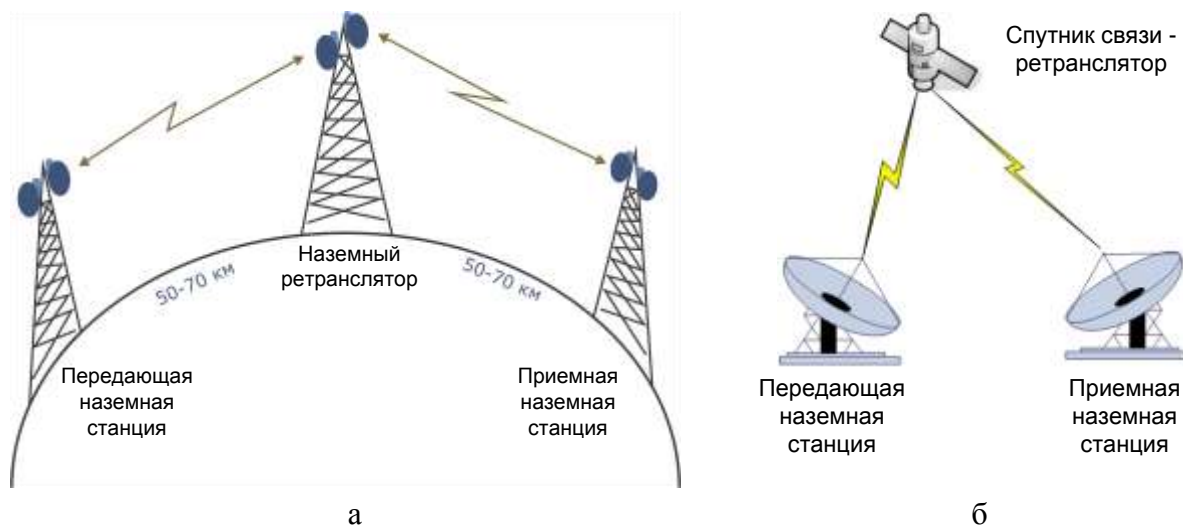


Рис. 1.6. Системы радиосвязи: а – радиорелейная линия, б – увеличение дальности связи с помощью ретранслятора, установленного на спутнике связи.

Находят применение оптические системы связи в открытом пространстве (рис. 1.7), состоящие из приемопередающих оптических устройств, располагаемых на расстоянии прямой видимости. Однако дальность связи в них ограничена сильным влиянием атмосферных условий на расстояние прямой видимости и качество связи (рис. 1.8).

Общими недостатками естественной среды передачи являются подверженность влиянию атмосферных явлений и низкая степень защищенности от несанкционированного доступа.

Направляющей системой называют устройство, предназначенное для передачи электрических или электромагнитных сигналов в заданном направлении. Таким канализирующим свойством обладают многие структуры. На рис. 1.9 показаны некоторые конструкции направляющих систем.

Симметричная линия (рис. 1.9а, б) состоит из двух проводников с одинаковыми конструктивными и электрическими свойствами.



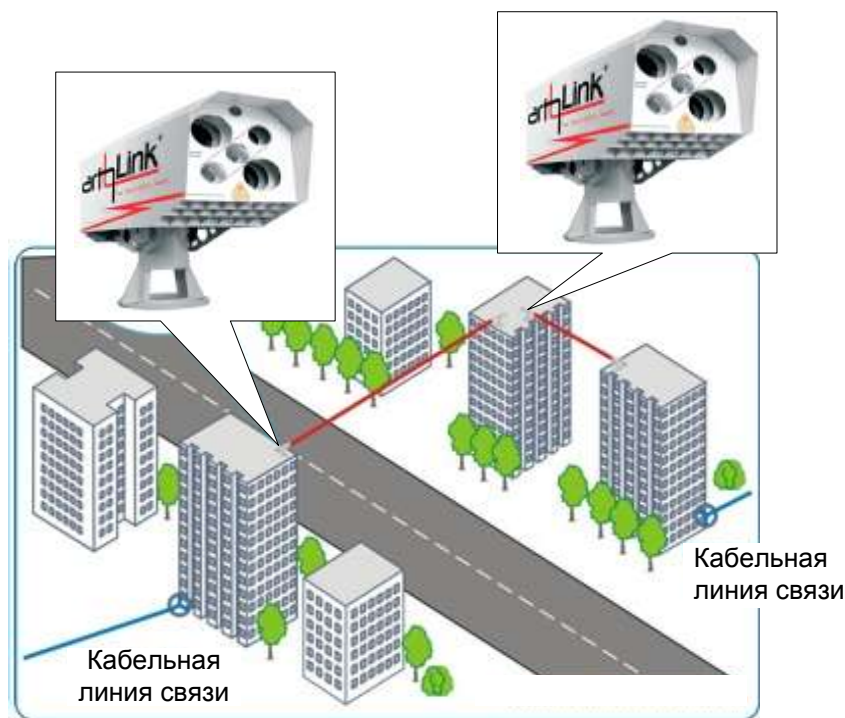


Рис. 1.7. Оптическая система в открытом пространстве.



Рис. 1.8. Уменьшение расстояния прямой видимости для сигналов оптического диапазона из-за атмосферных условий.

Коаксиальная линия (рис. 1.9в, г) состоит из двух проводников, один из которых (внутренний) расположен внутри второго (внешнего), имеющего форму полого цилиндра.

Симметричная и коаксиальная линии предназначены для передачи электрических сигналов.

Для самых высокоскоростных и наиболее протяженных линий связи используют оптические волокна (рис. 1.9д, е), которые представляет собой двухслойный диэлектрический волновод, предназначенный для передачи электромагнитных волн оптического диапазона.

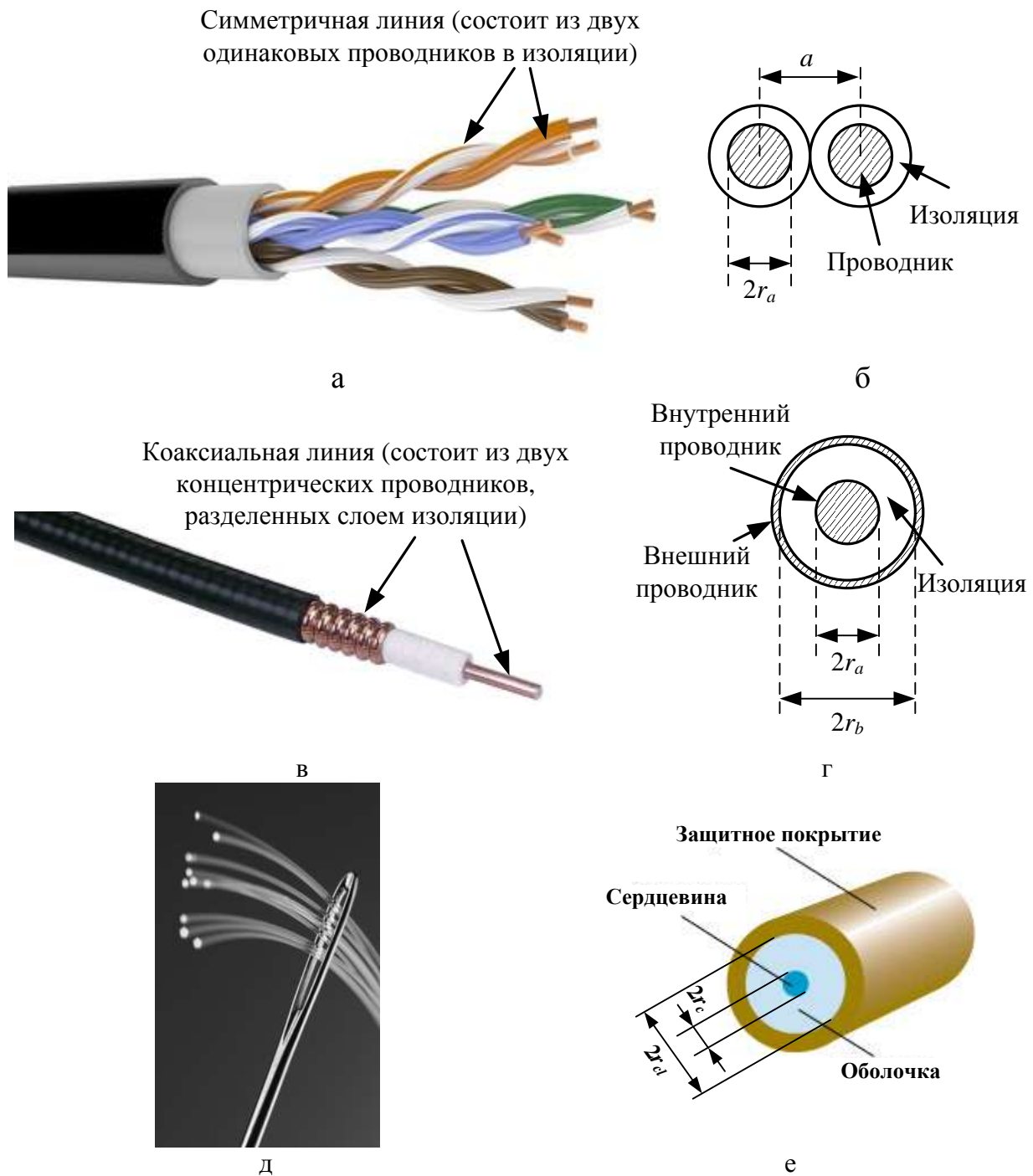


Рис. 1.9. Некоторые конструкции направляющих систем:  
 а, б – симметричная линия: внешний вид (а) и конструкция (б),  
 в, г – коаксиальная линия: внешний вид (в) и конструкция (г),  
 д – оптическое волокно: внешний вид (д) и конструкция (е).

Распространение сигнала по среде передачи сопровождается его затуханием (уменьшением энергии) и искажениями.

## 1.6 Процесс передачи информации. Вероятность ошибок. Пропускная способность.

Рассмотрим, как происходит процесс передачи информации (сеанс связи) между источником и получателем информации. В качестве источника и получателя информации может выступать человек или техническое устройство. На рис. 1.10 показана структурная схема одноканальной цифровой системы передачи (ЦСП).

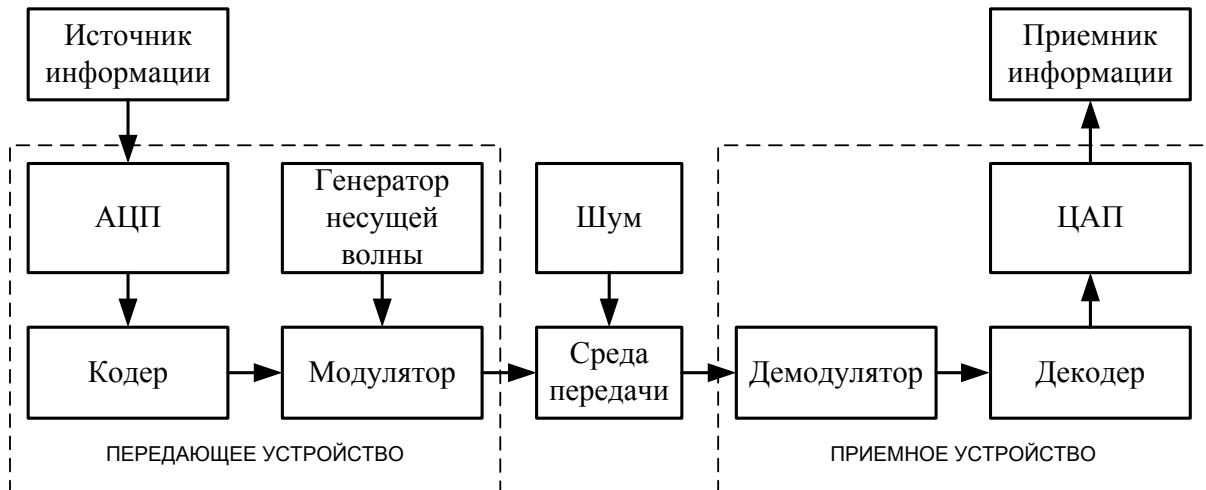


Рис. 1.10. Процесс передачи информации.

Подготовку к передаче информационного сообщения, формируемого источником, осуществляет передающее устройство. Подготовка включает:

- Аналогово-цифровое преобразование. Эту функцию выполняет аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Необходимость в АЦП отпадает, если передаваемое сообщение уже имеет цифровую форму.
- Кодирование цифрового сигнала, т.е. изменение его структуры по определенным правилам (алгоритмам кодирования). При кодировании передаваемый цифровой сигнал преобразуется с помощью кодера в линейный код, т.е. в код который поступает в среду передачи (обычно называемую линией). Линейный код согласуют с параметрами среды распространения для уменьшения искажений информационного сигнала при передаче. Кроме того, кодирование позволяет повысить конфиденциальность передаваемой информации, а также выявлять и исправлять ошибки, возникающие при передаче.
- Генерацию несущей электромагнитной волны. Эту функцию выполняет генератор несущей волны.
- Модуляцию несущей волны цифровым сигналом с линейным кодированием. Эту функцию выполняет модулятор, который может быть амплитудным, частотным или фазовым.

В некоторых случаях при передаче цифровых сигналов можно отказаться от генератора несущей частоты и модулятора и передавать кодированный линейный электрический сигнал по проводным каналам связи.

В любом случае сигнал передающего устройства поступает в среду передачи и распространяется по ней до приемного устройства. Среда передачи может исказить передаваемый сигнал и создавать шумы и помехи.

Приемное устройство путем обработки полученного сигнала, выделяет из него переданное информационное сообщение и направляет его получателю. Обработка сигнала в общем случае включает (рис. 1.10):

- Демодуляцию принятого сигнала. Эту операцию осуществляет демодулятор (детектор), который может быть амплитудным, частотным или фазовым. Он подавляет несущую частоту и выделяет искаженный средой передачи линейный сигнал, который по существу является аналоговым.
- Восстановление и декодирование цифрового сигнала. Эти операции осуществляет декодер, который содержит регенератор, преобразующий искаженный аналоговый сигнал в линейный код. Далее линейный код преобразуется в исходный цифровой сигнал.
- цифро-аналоговое преобразование, позволяющее получить из цифрового сигнала переданное информационное сообщение. Эту операцию выполняет цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Отметим, что при передаче электрических немодулированных сигналов демодулятор не используется. Если переданное сообщение изначально имело цифровую форму, ЦАП в схеме не нужен.

Операции демодуляции, декодирования и цифро-аналогового преобразования обратны операциям модуляции, кодирования и аналого-цифрового преобразования. Поэтому, если сигнал с выхода передающего устройства сразу поступит на вход приемного устройства, переданный цифровой сигнал будет восстановлен без ошибок. Однако, как отмечалось выше, распространение сигнала по среде передачи сопровождается его затуханием (уменьшением энергии) и искажениями. Затухание сигнала обусловлено взаимодействием его со средой передачи. Искажения сигнала обусловлены как взаимодействием его со средой передачи, так и шумами (помехами). Если сообщение передается на значительное расстояние, затухание сигнала и его искажения могут приводить к полной или частичной потере передаваемой информации.

Проиллюстрируем процесс восстановления двоичного информационного сигнала. На рис. 1.11а показан фрагмент исходного сигнала  $x(t)$ , на рис. 1.11б фрагмент принятого искаженного сигнала  $x_r(t)$  на выходе демодулятора. Регенератор, входящий в состав декодера, сравнивает принятый сигнал  $x_r(t)$  в определенные дискретные моменты времени (моменты принятия решения) с некоторым пороговым значением  $X_{por}$ : если  $x_r(t)$  больше порогового значения  $X_{por}$ , то на выходе декодера формируется логическая

«1», а если  $x_r(t)$  меньше  $X_{por}$ , то на выходе декодера формируется логический «0». Для правильного выбора моментов принятия решения регенератор также выполняет функцию восстановления битовой скорости передачи информации (тактовую частоту) исходного цифрового сигнала. В процессе восстановления сигнала полностью устраняются его слабые возмущения, вызванные затуханием, искажениями и шумами. Однако появление сильного возмущения может приводить к возникновению ошибок, как показано на рис. 1.11в.

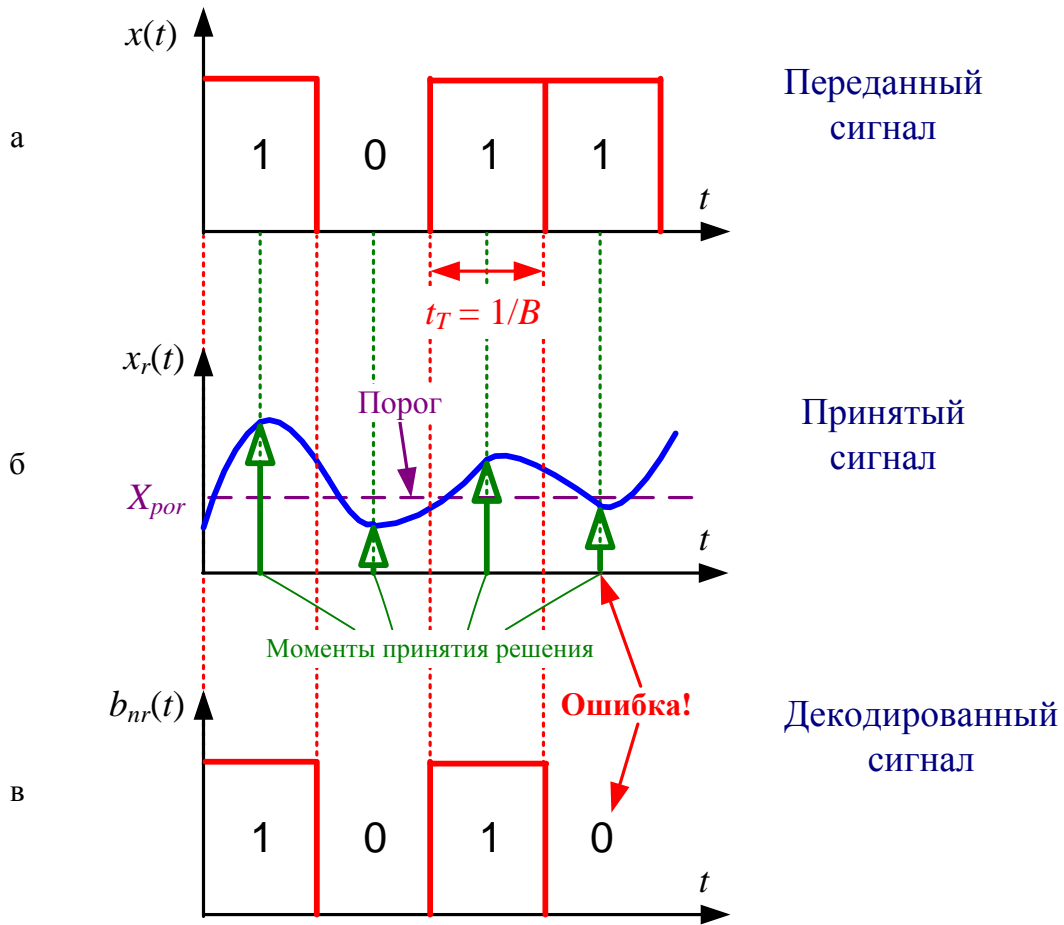


Рис. 1.11. Восстановление принятого цифрового сигнала. Возникновение ошибок.

Затухание и искажения сигнала возрастают с увеличением расстояния, которое он проходит по среде передачи. Поэтому для исключения сильных искажений сигнала большое расстояние, на которое необходимо передавать сигнал, разбивают на участки, между которыми устанавливают ретрансляторы (регенераторы), восстанавливающие принятый сигнал и передающие его дальше (рис. 1.12).

К сожалению, в силу случайной природы шумов вероятность появления сильного возмущения всегда отлична от нуля, поэтому полностью ис-

ключить возможность появления ошибок нельзя. Для системы связи можно определить **коэффициент ошибок** (BER – Bit Error Ratio):

$$BER = \frac{m}{n}, \quad (1.8)$$

где  $m$  – число ошибочно принятых бит за некоторое время  $T$ ,  $n$  – общее число принятых бит за то же время  $T$ . Коэффициент ошибок определяет вероятность появления ошибки в системе связи, если время  $T$ , в течение которого он измеряется, достаточно велико.



Рис. 1.12. Передача информации на большое расстояние.

Считается, что система связи работает правильно, если вероятность ошибки меньше некоторого заданного значения. Обычно коэффициент ошибок для обеспечения высокого качества цифровой связи составляет  $10^{-9}$ – $10^{-12}$ .

Для повышения надежности передачи сигналов в присутствии шумов используют помехоустойчивое кодирование. Теория такого кодирования основана на исследованиях К. Шеннона. Построение помехоустойчивого кода достигается введением избыточности. Избыточным называется код, у которого используются не все возможные комбинации, а только некоторые из них (разрешенные). При получении неразрешенной комбинации приемное устройство обнаружит, что соответствующий фрагмент сигнала принят с ошибкой, и передача этого фрагмента произойдет повторно.

Можно показать, что вероятность ошибки в системе связи возрастает с увеличением скорости передачи. Если задаться допустимым значением коэффициента ошибок  $BER_{per}$ , то для конкретной системы связи можно определить максимальную скорость передачи  $V_{max}$ , при которой коэффициент ошибок будет удовлетворять условию  $BER \leq BER_{per}$ . Эту максимальную скорость передачи называют **пропускной способностью** системы связи.

## 1.7 Виды сигналов, передаваемых по сетям электросвязи, и принципы их преобразования в цифровые сигналы

В п. 1.2–1.4 были рассмотрены основные идеи, положенные в основу **электросвязи**. Современные системы электросвязи являются цифровыми, то есть предназначены для передачи цифровых сигналов. Если сигнал изначально не является цифровым, он должен быть сначала подвергнут аналого-цифровому преобразованию, рассмотренному в п. 1.3.

Рассмотрим некоторые сигналы, которые не являются изначально не только цифровыми, но и электрическими.

### 1. Аудиосигнал

Аудиосигнал представляет собой акустическую волну – распространяющееся в пространстве возмущение упругой среды. Для преобразования аудиосигнала в электрический сигнал используется микрофон.

Принцип действия микрофона поясняется на рис. 1.13. Акустическая или звуковая волна воздействует на тонкую мембрану и вызывает ее колебания. К мембране прикреплена катушка индуктивности, которая, перемещаясь вместе с мембраной, совершает колебания в магнитном поле, создаваемым постоянным магнитом. В результате явления электромагнитной индукции в катушке наводится электродвижущая сила (ЭДС) и возникает ток, величина которого пропорциональна изменениям интенсивности звука во времени. Электрический аналоговый сигнал имеет форму и спектр аудиосигнала.

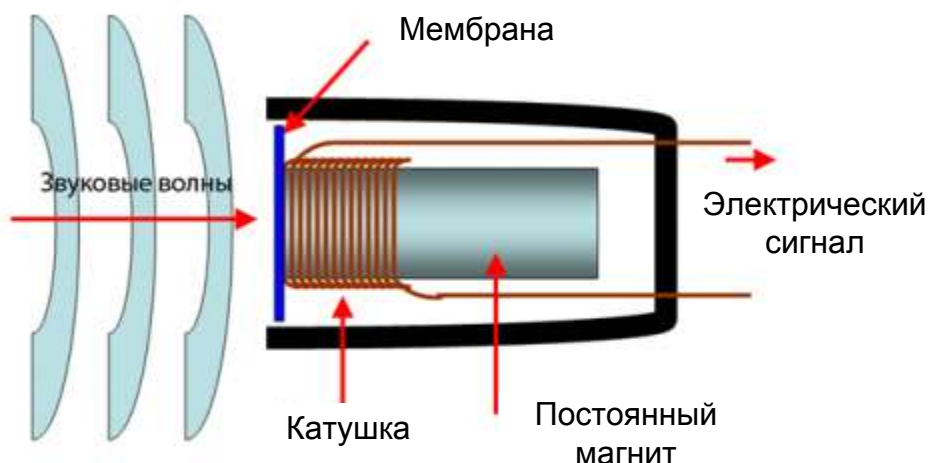


Рис. 1.13. Устройство микрофона (источник: <http://jablog.ru/blog/studio-1/3720.html>)

Полученный таким образом сигнал имеет достаточно широкий спектр. Спектр звукового сигнала, воспринимаемого ухом человека и животного лежит в пределах от долей Гц до десятков кГц. Особое значение для людей имеют речевые сигналы, энергетический спектр которых приведен на рис. 1.14.

В состав аудиосистем, кроме микрофонов, входят усилители электрических сигналов с определенными амплитудно-частотными характеристиками, которые можно изменять для управления качеством воспроизведения звука. Для воспроизведения звука используют индивидуальные телефоны (наушники) и громкоговорители общего пользования. Аудиосигналы передают по телефонным сетям, а также по сетям проводного, радио и телевизионного вещания. В технике связи спектр передаваемого сигнала обычно

сокращают для увеличения пропускной способности многоканальных систем связи. Возможную величину сокращения спектра сигнала определяют, исходя из допустимого искажения сигнала.

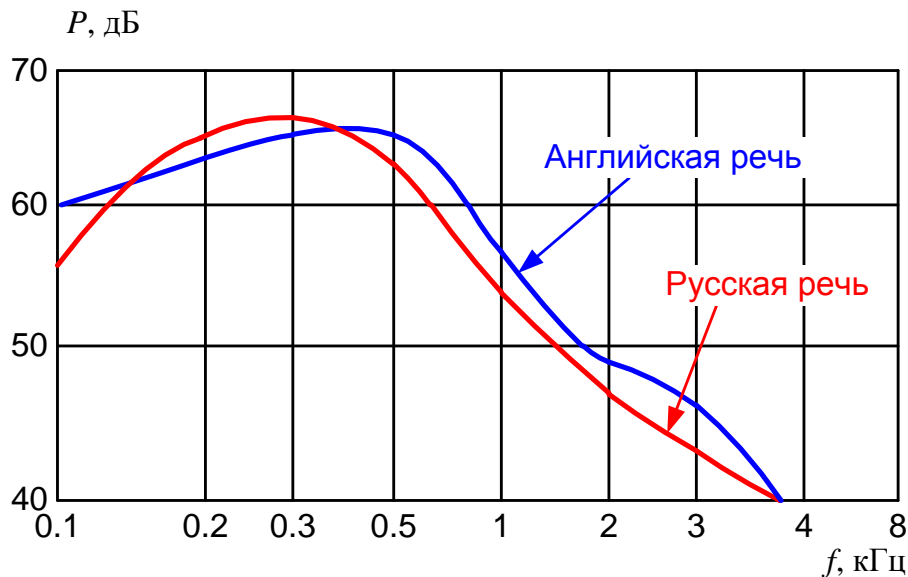


Рис. 1.14. Энергетический спектр речевого сигнала.

Спектр речевого сигнала ограничивают частотами 0.3–3.4 кГц. Эти частоты приняты Международным союзом электросвязи (МСЭ) в качестве границ эффективного спектра речи. При указанной полосе частот разборчивость слогов составляет около 90%, разборчивость фраз – более 99% и сохраняется удовлетворительная натуральность звучания.

Речевой сигнал может передаваться по аналоговым системам связи. Однако в настоящее время он обычно преобразуется в цифровую форму. Дискретизация речевого сигнала осуществляется с периодом  $\Delta t = 0.125$  мс (частота дискретизации 8 кГц) в соответствии с условием (1.3). Согласно (1.4) при использовании 256 уровней квантования (8-разрядного кодирования) скорость, необходимая для передачи этого сигнала, составит  $V = 64$  кбит/с (ОЦК).

Для высококачественного воспроизведения музыки потребуется более широкая полоса частот (12 и 16 кГц) и, соответственно, более высокая скорость передачи.

## 2. Неподвижное изображение

Преобразование неподвижного изображения в цифровой код осуществляется с помощью устройств типа цифровой фотокамеры или сканирующего устройства (рис. 1.15). Основным элементом этих устройств является светочувствительная матрица, состоящая из множества фотодиодов.

Принцип действия сканирующего устройства планшетного типа поясняет рис. 1.15а. Сканируемое изображение (оригинал) помещается на пло-



скую прозрачную поверхность, через которую оно позонно освещается подвижной флуоресцентной лампой. Свет лампы отражается от оригинала и с помощью зеркал направляется на систему, фокусирующую его на светочувствительной матрице.

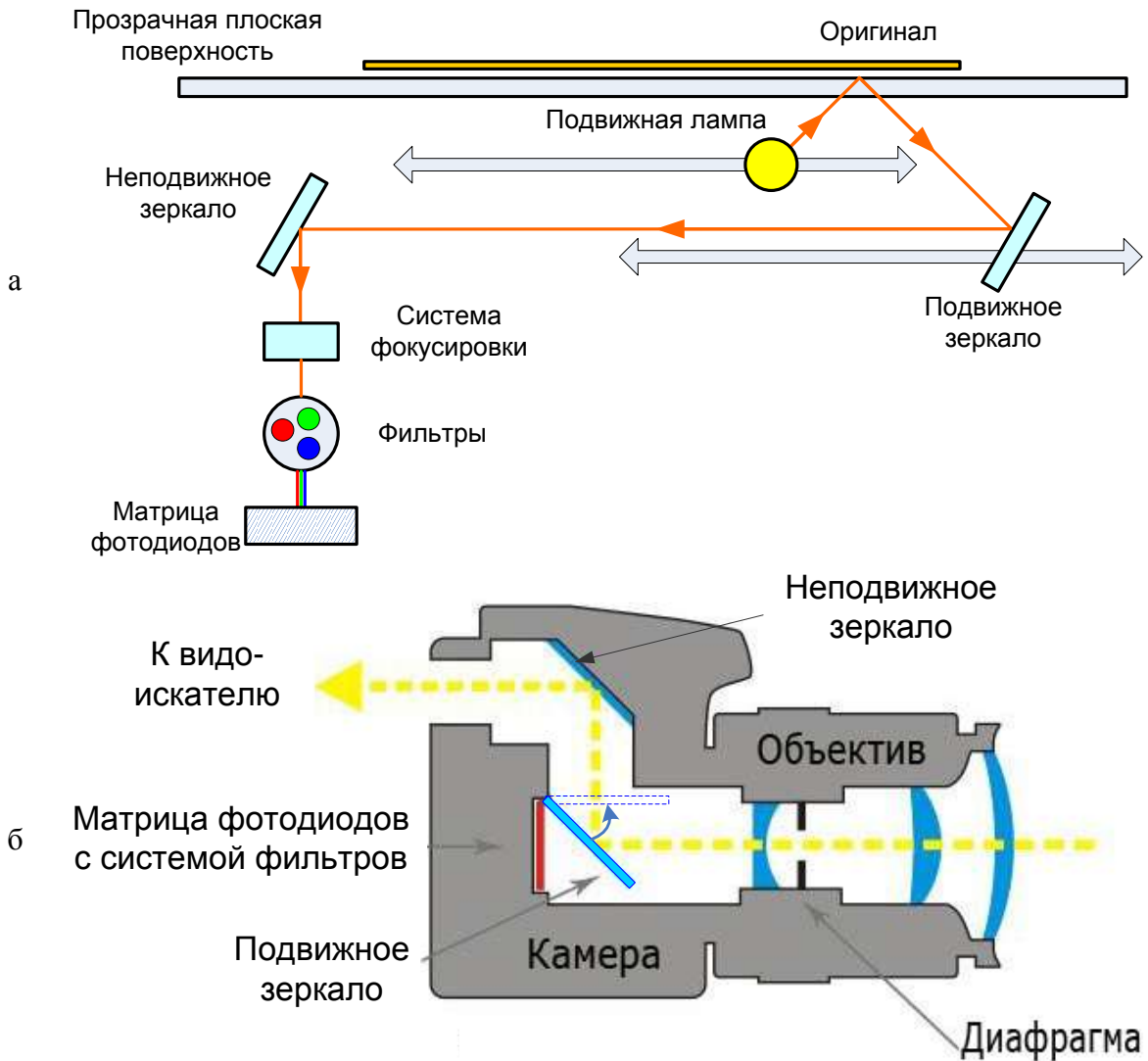


Рис. 1.15. Принцип действия сканирующего устройства планшетного типа (а) и зеркальной цифровой фотокамеры (б).

Тот же принцип положен в основу действия цифровой фотокамеры (рис. 1.15б). Фотографируемый объект освещается внешним источником света. Отраженный от объекта свет через объектив (линзовую систему фокусировки) и систему зеркал попадает в видоискатель, через который мы видим изображение объекта. В момент съемки подвижное зеркало на долю секунды поднимается и отраженный от объекта свет попадает на светочувствительную матрицу.

На каждый из фотодиодов матрицы попадает свет, отраженный от определенного элементарного участка поверхности оригинала или фотогра-

фируемого объекта, причем более светлые участки отражают больше света, чем темные. Фотодиод преобразует интенсивность света в аналоговый электрический сигнал, который подвергается аналого-цифровому преобразованию. Полученный таким образом цифровой сигнал представляет собой один пиксель исходного изображения.

Для получения цветного изображения отраженный свет предварительно проходит через систему фильтров, разлагающих его на три компонента (красный, зеленый, синий), каждый из которых улавливается своим набором фотодиодов.

В черно-белых изображениях каждому пикселю соответствует 1 бит информации о его цвете – черный или белый. В цветных изображениях каждый пиксель кодируется 24 разрядами (по 8 разрядов на красный, зеленый и синий цвета), что позволяет получить 16,7 млн. градаций цвета. Разнообразием цветного изображения является изображение в оттенках серого цвета, получаемого путем совмещения трёх основных цветов – красного, зелёного и синего в равных концентрациях.

### **3. Видеосигнал (подвижное изображение)**

В основе получения подвижного изображения лежит последовательная демонстрация на экране отдельных кадров, каждый из которых представляет собой неподвижное изображение. Известно, что человеческий глаз сохраняет зрительное впечатление в течение примерно 1/16 с, то есть в это время он еще «видит» уже исчезнувший из поля зрения предмет. Поэтому, если кадры меняются достаточно быстро (16 раз в секунду или чаще), зрительный аппарат не может воспринимать отдельные кадры и мы видим движущееся изображение.

Преобразование движущегося изображения в цифровой сигнал осуществляется с помощью цифровой видеокамеры, которая делает фотоснимки (кадры) движущегося объекта с определенной частотой. Частота следования кадров определяется международными стандартами. В России принят европейский стандарт – 25 кадров в секунду.

Если представить каждый кадр как отдельное неподвижное изображение рисунок, то полученный видеосигнал будет занимать очень большой объем. Для уменьшения скорости потока и объема видеосигнала используются различные алгоритмы его сжатия, основанные на особенностях восприятия видеосигнала человеком. Сжатие видеосигнала происходит по трем критериям:

- Уменьшение временной избыточности изображения. Учитывается, что в пределах коротких интервалов времени большинство фрагментов сцены оказываются неподвижными или незначительно смещаются по полю.

- Уменьшение пространственной избыточности изображения. Учитывается, что мелкие детали сцены несущественны для визуального восприятия человеком.
- Уменьшение цветовой избыточности изображения путём использования более низкого цветового разрешения.

Например, в известных алгоритмах сжатия MPEG из всего потока полностью передаются только избранные (опорные) кадры, которые содержат полноценное неподвижное изображение, для остальных кадров, называемых предсказуемыми, передаются только их изменения по сравнению с опорными. В среднем на 10 предсказуемых кадров передается всего один опорный. При использовании MPEG можно добиться уменьшения объема информации более чем в двести раз, но при больших коэффициентах сжатия это приводит к потерям качества.

## 1.8 Телекоммуникационные и инфокоммуникационные технологии. Информационное общество

В зарубежной и в отечественной литературе вместо термина «электро-связь» часто употребляется термин «телекоммуникации» (англ. *telecommunication*). Слово «телекоммуникации» происходит от греческого *tele-* (τηλε-) (дальний) и лат. *communicatio* (сообщение, передача).

К началу XXI века одновременное развитие цифровых телекоммуникационных систем, компьютерной техники, глобальной сети Интернет создало предпосылки к интеграции телекоммуникационных и информационных технологий. Результатом этой интеграции являются **инфокоммуникационные технологии**.

Развитие и внедрение инфокоммуникационных технологий должно привести к возникновению так называемого информационного общества – новой стадии развития общества и экономики. Информационное общество должно охватить все сферы нашей жизни:

- Экономическую: информация используется в качестве ресурса, услуг, товара, источника добавленной стоимости и занятости, получает развитие электронный бизнес. Не нужно командировать представителя к деловому партнеру из другого региона, документы заверяются электронной цифровой подписью. Не нужно тратить время на выбор товара, достаточно просмотреть каталог электронного магазина. Не нужно посещать налоговую инспекцию, чтобы сдать налоговую отчетность. Не нужно ехать в кассу, чтобы купить билет на поезд, его достаточно заказать и оплатить дистанционно.

- Политическую: свобода информации, ведущая к развитию электронной демократии, электронного государства, электронного правительства. Чтобы выразить свое мнение по тому или иному вопросу или сформировать группу единомышленников для воплощения какой-либо инициативы,

достаточно зайти на соответствующий сайт в сети Интернет. Для получения государственной услуги достаточно дистанционно заполнить форму запроса, а через определенное время получить необходимый документ в свой почтовый ящик. С использованием инфокоммуникационных технологий функционируют исполнительная (электронное правительство), и законодательная власти (электронный парламент, электронная демократия), а также судебные органы (электронное правосудие).

- Социальную: информация выступает в качестве важного стимулятора изменения качества жизни. Чтобы получить консультацию специалиста, пациенту не нужно ехать в медицинский центр, а достаточно будет оставить свои документы на портале и в назначенное время выйти на связь с профильным врачом (телемедицина). Чтобы получить помощь в чрезвычайной ситуации, достаточно воспользоваться единым номером экстренных служб. Чтобы собрать ученика в школу, достаточно скачать комплект учебников с регионального образовательного портала и сохранить их в электронной книге.

- Культурную: признание культурной ценности информации. Чтобы подобрать литературу по интересующей тематике, достаточно воспользоваться электронным каталогом любой библиотеки на всей территории страны. Чтобы посетить зарубежный музей, достаточно побывать на соответствующем сайте. Чтобы получить образование в любом университете мира, нужно обратиться к его ресурсам дистанционного обучения.

Очевидно, что многие из перечисленных возможностей инфокоммуникационных технологий в современном обществе уже стали реальностью.

В 2010 году правительством РФ была принята государственная программа «Информационное общество», рассчитанная на период с 2011 до 2020 года, целями которой являются преодоление цифрового неравенства (все граждане должны иметь равный доступ к современным средствам коммуникации), развитие новых инфокоммуникационных технологий, в том числе по созданию цифровой экономики и электронного правительства.

На сегодняшний день инфокоммуникации – одна из наиболее динамично развивающихся отраслей экономики России. Она играет ключевую роль в процессе образования единого информационного пространства и постоянно нуждается в высококвалифицированных бакалаврах и магистрах направления «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

## 2 ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ

**Волоконно-оптическая связь** – способ передачи информации, использующий электромагнитное излучение оптического диапазона в качестве носителя информационного сигнала и оптические волокна в качестве среды передачи.

### 2.1 Немного истории или как все начиналось

#### 2.1.1 «Доволоконные» оптические системы связи

Началом истории оптической связи можно считать тот момент, когда человек обнаружил, что огнем и дымом костра можно передавать сигналы. Это могло произойти около 50 тыс. лет назад.

Позже люди научились существенно увеличивать дальность передачи сигналов, используя ретрансляторы – сторожевые башни. Каждая башня обслуживалась часовым, в обязанности которого входило наблюдать за соседней башней и разжигать огонь, как только огонь появится на соседней башне. Легенда гласит, что в 1185 г. до нашей эры Клитемнестра, жена микенского царя Агамемнона, через серию таких сигнальных огней получила известие о падении Трои, поход на которую возглавлял Агамемнон. Чтобы передать известие на расстояние в 800 км, по такому огневому телеграфу понадобилось всего 9 сигнальных огней.

Основным недостатком огневого телеграфа была возможность передавать только 1 бит информации, то есть о значении сообщения необходимо было условиться заранее.

К IV веку до н.э. относится изобретение жителями Карфагена водяного телеграфа (рис. 2.1). Это устройство позволяло увеличить число передаваемых сообщений. Оно представляло собой два абсолютно одинаковых глиняных сосуда. Каждый сосуд имел отверстие возле дна, которое затыкалось пробкой. В сосуды помещались одинаковые пробковые поплавки, диаметром меньше диаметра сосудов. На поплавках закреплялись одинаковые легкие стойки с зарубками. Над каждой зарубкой писалось одно сообщение. Сосуды наполнялись водой до краев и в них опускались поплавки со стойками.

Для передачи сообщения на передающей стороне часовой подает сигнал факелом. На приемной стороне часовой также поднимает факел в знак готовности принять сообщение. Передающий, увидев сигнал, опускает факел и открывает отверстие своего сосуда. Принимающий видит, что факел опущен и также открывает отверстие своего сосуда. Вода из сосудов на передающей и приемной сторонах начинает вытекать с одной и той же скоростью. Вместе с понижением уровня воды оба поплавка со стойками опускаются внутрь сосуда. Когда нужная надпись поравняется с краем со-

суда, передающий снова поднимает факел, а принимающий смотрит, какая надпись видна над краем его сосуда. Это и есть передаваемое сообщение.

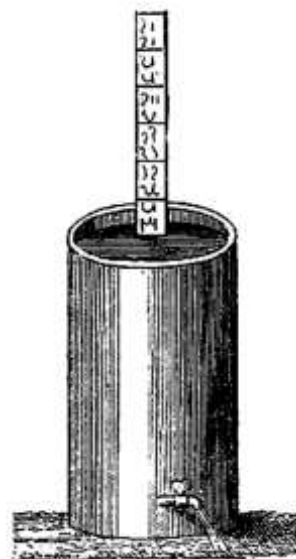


Рис. 2.1. Водяной телеграф

Водяной телеграф позволял существенно увеличить число возможных передаваемых сообщений, однако их содержание ограничивалось фиксированным набором, нанесенным на стойки.

Возможность передачи произвольных сообщений предоставлял факельный телеграф, который был изобретен александрийскими инженерами Клеоксеном и Демоклетом (рис. 2.2). Для передачи сообщений использовалась специальная азбука. Все 24 буквы греческого алфавита были разделены на 5 таблиц. 4 первых таблицы содержали по 5 символов, а последняя таблица – 4 оставшихся. На каждой из станций телеграфа были построены две зубчатых стены, имеющие по 5 промежутков между зубцами. При помощи факелов, которые выставлялись в эти промежутки, можно было подавать сигналы соседней станции. Сообщения передавались по буквам. На левой стене передавался номер таблицы. На рис. 2.2 в промежутках между зубцами левой стены выставлено 2 факела, то есть передается буква из таблицы № 2. На правой стене передавался номер буквы в таблице. На рис. 2.2 выставлено 5 факелов, то есть передается символ № 5. Пятый символ во второй таблице – это буква к (каппа).

Это изобретение александрийских инженеров легло в основу всех современных методов кодирования.



Таблица 1:	$\alpha — \varepsilon^1$
Таблица 2:	$\zeta — \kappa^2$
Таблица 3:	$\lambda — \omicron^3$
Таблица 4:	$\pi — \upsilon^4$
Таблица 5:	$\varphi — \omega^5$



Рис. 2.2. Факельный телеграф Клеоксена и Демоклета

Следующий этап развития оптической связи наступил с изобретением Хансом Липперсгеем подзорной трубы около 1608 г. Подзорная труба позволила на порядок увеличить расстояние, на котором человеческий глаз может наблюдать удалённый объект и вернула интерес к идее оптического телеграфа.

Наиболее значительным достижением эры «доволоконной» оптической связи стал оптический телеграф, сконструированный французом Клодом Шаппом.



Ханс Липперсгей (1570-1690)  
– голландский оптик



Клод Шапп (1763-1805) – французский механик

Этот телеграф передавал сообщения при помощи больших подвижных планок на высоких башнях, видимых на большом расстоянии. При помощи веревок и блоков планки могли принимать 196 различных положений. Каждая башня-станция обслуживалась одним или двумя работниками. Они наблюдали за соседней станцией в подзорную трубу и воспроизводили на своей мачте такие же сигналы, какие передавал сосед.

В 1794 году под руководством Шаппа была построена телеграфная линия Париж-Лилль длиной в 210 км, содержащая 20 промежуточных станций. 1 сентября 1794 г. парижский Конвент получил первую депешу: «Французская армия одержала победу над австрийцами!». 210 км депеша преодолела всего за 3 часа. По-

<sup>1</sup>  $\alpha$  - Альфа,  $\beta$  - Бета,  $\gamma$  - Гамма,  $\delta$  - Дельта,  $\varepsilon$  - Эпсилон

<sup>2</sup>  $\zeta$  - Дзета,  $\eta$  - Эта,  $\theta$  - Тета,  $\iota$  - Иота,  $\kappa$  - Каппа

<sup>3</sup>  $\lambda$  - Ламбда,  $\mu$  - Мю,  $\nu$  - Нью,  $\xi$  - Кси,  $\omicron$  - Омикрон

<sup>4</sup>  $\pi$  - Пи,  $\rho$  - Ро,  $\sigma$  - Сигма,  $\tau$  - Тау,  $\upsilon$  - Ипсилон

<sup>5</sup>  $\varphi$  - Фи,  $\chi$  - Хи,  $\psi$  - Пси,  $\omega$  - Омега

сле успешной демонстрации телеграфные линии начали строить по всей Европе.

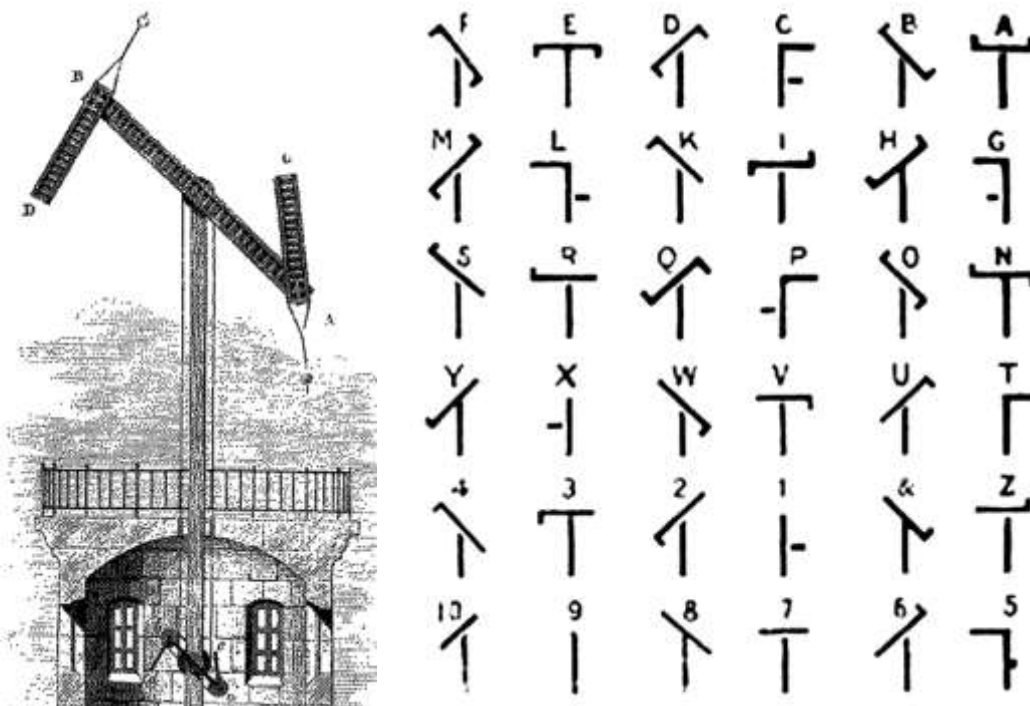


Рис. 2.3. Телеграф Клода Шаппа и разработанная им азбука

В России телеграф Шаппа был построен в 1833 г. Линия соединяла Петербург с Варшавой (1200 км) и имела 149 промежуточных станций. Передача депеши требовала одного часа. По тем временам – феноменальная скорость. Линия успешно проработала целых двадцать лет.

В 1934 году американец Норман Р. Френч запатентовал идею оптической телефонной системы, в которой свет модулировался речевыми сигналами и передавался по стеклянным стержням. Эта система представляла собой прообраз современных волоконно-оптических систем связи. Реализовать его идею удалось только спустя четверть века, для чего пришлось решить две технических проблемы: 1) создание оптических волокон с низкими потерями сигнала при распространении; 2) создание подходящих источников и приемников излучения.

### 2.1.2 Оптическое волокно

Распространение оптического излучения по оптическому волокну основано на явлении **полного внутреннего отражения** (ПВО), впервые описанного в 1600 году немецким физиком Иоганном Кеплером.

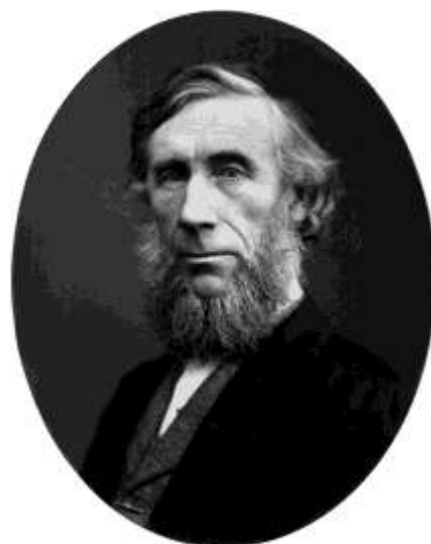


**Иоганн Кеплер** (1571-1630) – немецкий математик, астроном, механик и оптик



Возможность создания оптических волокон была впервые доказана английским физиком Джоном Тиндалем в 1870 году. В своем опыте он продемонстрировал и объяснил принцип направления света по струе воды – водяному световоду.

Создателями оптических волокон считаются голландец Абрахам Ван Хиил, англичанин Гарольд Хопкинс и индус Нариндер Капани, в период 1953–1958 г. независимо друг от друга предложившие идею двухслойного световода, состоящего из оптически более плотной световедущей сердцевины и оптически менее плотной светоизолирующей оболочки, обеспечивающей условия ПВО (рис. 1.9е). В 1956 г. Нариндер Капани впервые предложил термин «волоконная оптика».



**Джон Тиндаль (1820-1893)** – английский физик



**Нариндер Сингх Капани (род. 1926)** – индийский физик



**Гарольд Хопкинс (1918-1994)** – британский физик



**Бэзил Айзек Хиршовиц (род. 1925)** – американский гастроэнтеролог

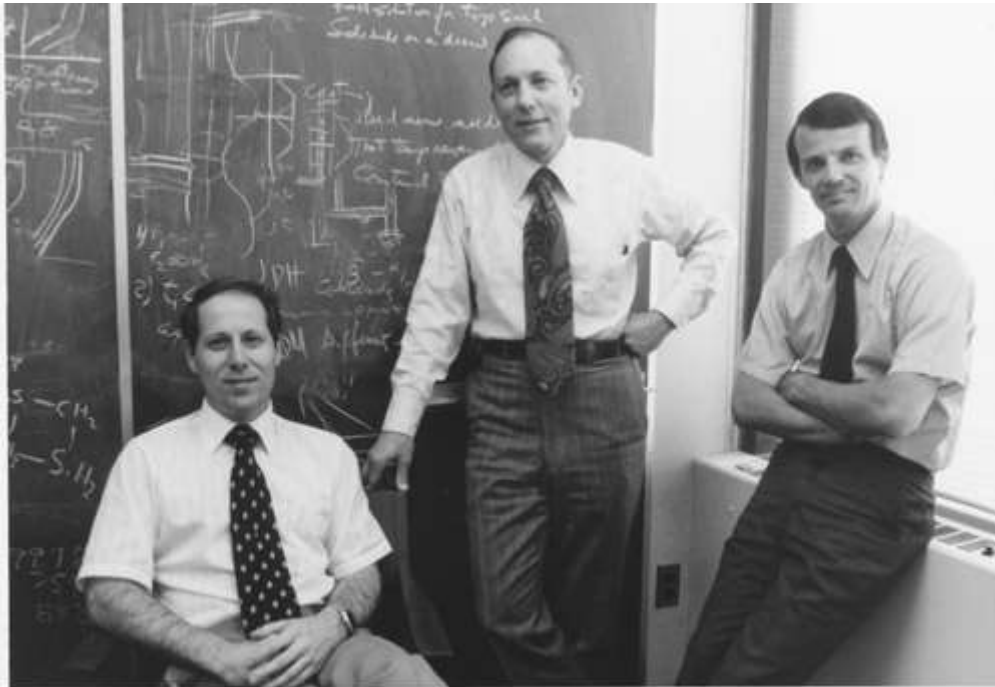
В 1958–1959 г. Нариндер Капани и американец Бэзил Айзек Хиршовиц предложили изготавливать и сердцевину, и оболочку световода из стекла с разными показателями преломления.

В 1966 году японские ученые Чарльз Као и Джордж Хокхэм показали, что большие потери света при распространении, которые были основным недостатком первых оптических волокон, обусловлены недостаточной очисткой стекла от содержащихся в нем примесей. Они показали, что использование волокон для оптической связи будет возможно, если сигналы в них будут уменьшаться не более чем в 100 раз при распространении на 1 км. Путем тестирования различных материалов Чарльз Као обнаружил, что наиболее подходящим для изготовления оптических волокон является кварцевое стекло, обеспечивающее самые малые потери.



**Чарльз Као Куэн** (род. 1933)  
– китайский, британский и  
американский инженер-физик

В 1970 году специалисты крупной стекольной американской компании Corning Glass физик-теоретик Роберт Маурер, химик Питер Шульц и физик-экспериментатор Дональд Кек окончательно решили проблему высоких потерь, разработав новую технологию изготовления кварцевых оптических волокон, основанную на осаждении паров тетрахлорида кремния. Созданное ими волокно имело оболочку из чистого кварцевого стекла, а сердцевину – из стекла с примесями для повышения показателя преломления.



Дональд Кек (род. 1941), Роберт Маурер (род. 1924) и Питер Шульц (род. 1942) в Corning после создания первых оптических волокон с низкими потерями

### ***2.1.3 Приемники оптического излучения***

Приемниками оптического излучения в волоконно-оптических системах передачи служат полупроводниковые фотодиоды, работа которых основана на внутреннем фотоэффекте.

Явление фотоэффекта было впервые описано в 1888 году А.Г. Столетовым. В 1905 году А. Эйнштейн предложил квантовую теорию фотоэффекта, основанную на предположении М. Планка о том, что излучение света веществом происходит дискретно (неделимыми порциями – квантами), и энергия излучаемой порции зависит от частоты света. Впоследствии кван-

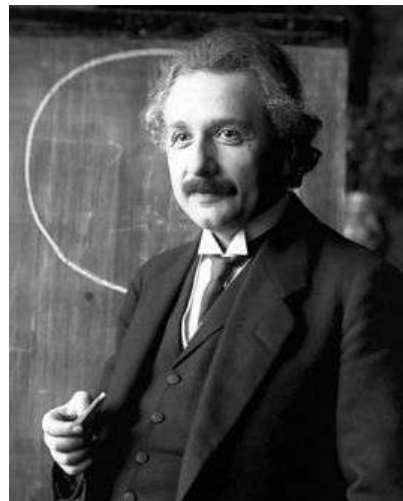
ты света получили наименование фотонов (термин введен в 1929 году химиком Г. Льюисом).



**Александр Григорьевич Столетов** (1839–1896) – русский физик



**Макс Планк** (1858–1947) – немецкий физик-теоретик



**Альберт Эйнштейн** (1879–1955) – физик-теоретик

Разработка фотодиода базировалась на уже существующих полупроводниковых диодах с  $p-n$  переходом, разработанных в 1899 году К.Ф. Брауном. В начале XX века было обнаружено, что диоды могут использоваться не только для выпрямления сигналов (как приборы, обладающие односторонней проводимостью), но и для регистрации оптического излучения.

В 1959 г. Вольфганг Гартнер<sup>6</sup> опубликовал статью, в которой описал конструкцию и работу кремниевого фотодиода  $p-i-n$  структуры. Возможность использования для производства фотодиодов германия была впервые продемонстрирована в 1962 году Р.П. Рисом<sup>7</sup>.

В 1963 году Кеннет Г. Маккей и Кеннет Б. Макафи создали лавинный фотодиод, способный регистрировать более слабые оптические сигналы по сравнению с фотодиодом  $p-i-n$  структуры.



**Карл Фердинанд Браун** (1850–1918) – немецкий физик

<sup>6</sup> Wolfgang W. Gärtner

<sup>7</sup> R.P. Riesz



**Кеннет Бейли Макафи**  
(1924–2000) – американский инженер

Примерно в то же время был разработан фотодиод с барьером Шоттки, конструкция которого основана на известном диоде Шоттки с переходом металл-полупроводник. Благодаря малой емкости такого перехода фотодиод с барьером Шоттки обладает очень высоким быстродействием.

#### **2.1.4 Источники оптического излучения**

В качестве источников оптического излучения в волоконно-оптических системах передачи используются светоизлучающие и лазерные диоды.

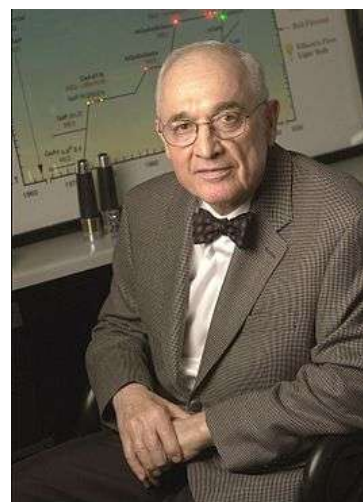
Первое известное сообщение об электролюминесценции – излучении света твёрдотельным диодом было сделано в 1907 году британским экспериментатором Генри Раундом, сотрудником компании Маркони Лабс. Эти эксперименты позже, независимо от Раунда, повторены в 1923 году О. В. Лосевым, который получил патент на «световое реле», представлявшее собой по сути первый полупроводниковый светодиод.



**Генри Джозеф Раунд**  
(1881–1966) – английский инженер



**Олег Владимирович Лосев**  
(1903–1942) – советский физик



**Ник Холоньяк** (род. 1928) – американский ученый-изобретатель

В 1961 году Роберт Байард и Гари Питтман из компании Texas Instruments открыли и запатентовали технологию инфракрасного светодиода. Первый в мире практически применимый светодиод, работающий в видимом (красном) диапазоне, разработал Ник Холоньяк для компании General Electric в 1962 году. Холоньяк считается «отцом современного светодиода».



В 1976 году Томас Пирсол<sup>8</sup> создал первый в мире высокоэффективный светодиод высокой яркости, предназначенный для передачи данных в волоконно-оптических системах.

Решающим фактором для развития волоконно-оптических систем связи явилось величайшее открытие XX века, сделанное в 1958 году американским ученым Чарльзом Х. Таунсом и независимо от него советскими физиками А.М. Прохоровым и Н.Г. Басовым. Они создали источник когерентного излучения – квантовый генератор, названный лазером.



**Чарльз Хард Таунс**  
(1915-2015) – американский физик



**Александр Михайлович Прохоров** (1916-2002) – советский и российский физик



**Николай Геннадиевич Басов**  
(1922-2001) – советский и российский физик

В 1962 году были созданы первые полупроводниковые импульсные лазеры. Авторами этих разработок были Роберт Холл (лазер на основе GaAs); Ник Холоньяк (лазер на основе GaAsP); Н.Г. Басов, О.Н. Крохин и Ю.М. Попов (лазер на основе GaAs).

Основным недостатком первых лазеров был очень сильный нагрев в процессе работы, в результате чего они могли работать только при температуре жидкого азота и быстро выходили из строя. Преодолеть этот недостаток удалось Ж. Алфёрову и Г. Крёмеру, независимо друг от друга в 1963 году предложившим лазерный диод на основе двойной гетероструктуры. В конструкции такого диода присутствуют полупроводниковые материалы с разными электрохимическими свойствами. Создание гетероструктур оказалось гигантским прорывом в микроэлектронике. За это открытие Ж. Алфёров и Г. Крёмер в 2000 году были удостоены Нобелевской премии.

---

<sup>8</sup> Thomas P. Pearsall



**Крохин Олег Николаевич** (род. 1932) – советский и российский физик



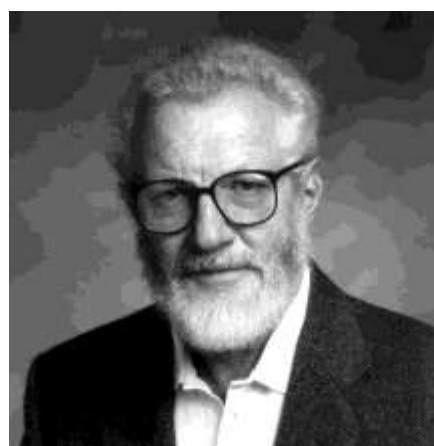
**Попов Юрий Михайлович** (род. 1929) – советский и российский физик



**Роберт Холл (1919–2016)** – американский физик и инженер



**Жорес Иванович Алфёров** (род. 1930) – советский и российский физик



**Герберт Крёмер** (род. 1928) – немецкий физик

Первый лазерный диод GaAs-AlGaAs, работающий при комнатной температуре, был создан в 1968 году под руководством Ж. Алфёрова в Физико-техническом институте имени А.Ф.Иоффе.

### **2.1.5 Волоконно-оптические системы связи**

Первые в мире исследования возможности создания систем связи на основе оптических волокон были начаты в СССР в 1957 г. О.Ф. Косминским, В.Н. Кузмичевым, которые обосновали общую схему и сформулировали основные принципы построения оптических многоканальных систем связи. В 1962 году в НИИ «Дальняя связь» была испытана первая 12-канальная оптическая система передачи.

Внедрение волоконно-оптических технологий первыми начали военные. В 1973 году волоконно-оптическая линия была внедрена на борту военного корабля ВМС США Little Rock. В 1976 г. ВВС США начали реализацию программы внедрения волоконно-оптических технологий на воз-

душных судах, в рамках которой на борту военного самолета А-7 кабели с медными жилами были заменены на волоконно-оптические.

В 1977 году была построена волоконно-оптическая система передачи (ВОСП) военного назначения протяженностью 2 км, связавшая наземную спутниковую станцию с центром управления на скорости 20 Мбит/с.

В 1977 году компании AT&T и GTE ввели в эксплуатацию первые коммерческие ВОСП для передачи телефонных сигналов. Поскольку эти системы передачи по своим характеристикам превосходили все другие, существовавшие на тот момент, их внедрение способствовало быстрому распространению волоконно-оптических технологий.

В 1980 г. AT&T объявила об амбициозном проекте ВОСП, связывающей между собой Бостон и Ричмонд. Реализация этого проекта ясно показала, что в будущем ставку следует делать на волоконно-оптическую технологию.

Колоссальный скачок в пропускной способности оптических систем связи произошел в конце 1990-х гг. с внедрением технологии спектрального уплотнения, которая позволила передавать более сотни каналов по одному волокну на разных длинах волн. К 2000 г. скорость передачи в коммерческих системах связи достигла примерно 1 Тбит/с.

К настоящему времени в мире проложено более 2 млрд км оптических волокон, по которым передается более 80 % от общего объема передаваемой информации. Пропускная способность оптических систем связи за 40 лет своего существования выросла более чем в 100 000 раз: если в начале 1970-х гг. по одному волокну передавали менее 100 Мбит/с, то к настоящему времени скорость передачи в коммерческих системах составляет примерно 10 Тбит/с по одному волокну.

Вопрос о предельной скорости передачи по одному волокну пока остается открытым. Предельная скорость передачи, которую, по оценкам экспертов, можно достичь в среднесрочной перспективе, составляет 100 Тбит/с.

## **2.2 Физические законы, положенные в основу работы оптического волокна,**

Выше уже отмечалось, что работа оптического волокна основана на явлении полного внутреннего отражения (ПВО), которое при определенных условиях может наблюдаться при падении света на границу двух оптически прозрачных сред с разными показателями преломления.

Показателем преломления среды  $n$  называют безразмерную величину, равную отношению скорости света  $c$  в вакууме к скорости света  $v$  в данной среде:

$$n = c/v \quad (2.1)$$

Среду с бóльшим показателем преломления называют оптически более плотной, среду с меньшим показателем преломления – оптически менее плотной.

Из школьного курса физики Вы знаете, что луч света, падающий на плоскую границу раздела двух однородных оптически прозрачных сред с разными показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ , в общем случае расщепляется на два луча – отраженный и преломленный (рис. 2.4а). Угол падения  $\alpha_i$  всегда равен углу отражения  $\alpha_r$ . Соотношение между углами падения  $\alpha_i$  и преломления  $\alpha_t$  устанавливает закон, открытый в 1621 году голландцем Виллебрордом Снеллиусом:

$$n_1 \sin \alpha_i = n_2 \sin \alpha_t \quad (2.2)$$

Если  $n_1 < n_2$  (свет падает со стороны оптически менее плотной среды), выражение (2.2) справедливо при  $\alpha_i < 90^\circ$ . Если  $n_1 > n_2$  (свет падает со стороны оптически более плотной среды), выражение (2.2) справедливо только при выполнении условия:

$$\alpha_i < \alpha_{cr} = \arcsin(n_2/n_1). \quad (2.3)$$

Угол  $\alpha_{cr}$  называют критическим углом.



**Виллеброрд Снеллиус** (1580-1626) – голландский математик, физик и астроном

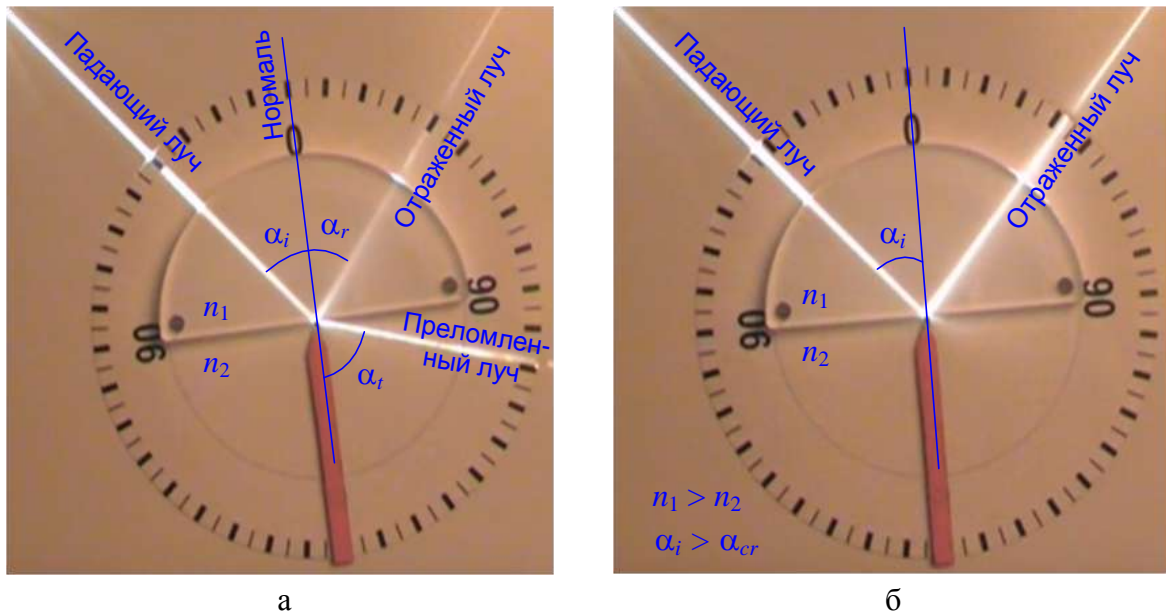


Рис. 2.4. Падение луча на границу раздела двух сред со стороны оптически более плотной среды: а – под углом, меньшим критического, б – под углом, большим критического (наблюдается ПВО).



При падении света со стороны оптически более плотной среды и угле падения, удовлетворяющем условию:

$$\alpha_i \geq \alpha_{cr} = \arcsin(n_2/n_1) \quad (2.4)$$

можно наблюдать явление ПВО – исчезновение преломленного луча (рис. 2.4б).

Отметим, что при ПВО от границы раздела отражается 100% энергии падающего луча.

### 2.3 Оптический сигнал и его параметры

Оптический сигнал представляет собой электромагнитную волну оптического диапазона, один или несколько параметров которой подвергнуты модуляции – изменению в соответствии с передаваемым сообщением (см. п. 1.4). Кроме перечисленных в п. 1.4 видов модуляции (амплитудная, частотная, фазовая), для электромагнитной волны оптического диапазона возможна также модуляция по поляризации.

Поляризацией называют явление направленного колебания вектора напряженности электрического поля  $E$ . Основными видами поляризации являются линейная (вектор  $E$  колеблется вдоль прямой) и эллиптическая (конец вектора  $E$  описывает эллипс). Частным случаем эллиптической поляризации является круговая (конец вектора  $E$  описывает окружность).

Энергетическими характеристиками оптического сигнала являются его мощность  $P$  и уровень  $y$ , связанные между собой соотношениями:

$$y = 10 \lg(P/P_z), \quad P = P_z \cdot 10^{y/10}, \quad (2.5)$$

где  $P_z = 1$  мВт – мощность, соответствующая нулевому уровню. Уровень оптического сигнала измеряется в децибелах мощности, сокращенно обозначаемых дБм, и может быть как положительным (при  $P > P_z$ ), так и отрицательным (при  $P < P_z$ ).

Зависимость мощности оптического сигнала от времени при амплитудной модуляции представляет собой последовательность коротких оптических импульсов. Одним из важнейших параметров оптического импульса является длительность, традиционно определяемая по уровню, соответствующему половине его амплитуды.

Оптический сигнал также может быть представлен в виде спектра (см. п. 1.2) и охарактеризован шириной спектра, которая может быть выражена в единицах частоты  $\Delta F$  или длины волны  $\Delta \lambda$ :

$$\Delta f = f_{\max} - f_{\min}, \quad \Delta \lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}, \quad (2.6)$$

где  $f_{\max}$  и  $f_{\min}$  ( $\lambda_{\max}$  и  $\lambda_{\min}$ ) – верхняя и нижняя частоты (длины волн) диапазона в пределах которого сосредоточена основная энергия оптического сигнала.

## 2.4 Оптическое волокно

### 2.4.1 Конструкция оптического волокна

Из п. 1.5 мы уже знаем, что оптическое волокно (ОВ) представляет собой двухслойный диэлектрический волновод, предназначенный для передачи электромагнитных волн оптического диапазона.

Конструкция ОВ представлена на рис. 1.9е. ОВ представляет собой стеклянную нить цилиндрической формы, состоящую из трех concentрических слоев: сердцевины, оболочки и защитного покрытия, необходимого для защиты ОВ от внешних воздействий.

Сердцевина и оболочка имеют близкие, но разные показатели преломления, причем показатель преломления сердцевины  $n_1$  больше показателя преломления оболочки  $n_2$ . Поэтому введенный в сердцевину ОВ луч света может испытывать ПВО на границе между сердцевиной и оболочкой. Поскольку при ПВО вся энергия падающего луча переходит в отраженный луч, свет может распространяться по сердцевине ОВ, переотражаясь от границы с оболочкой и не теряя при отражении свою энергию (рис. 2.5). Таким образом, сердцевина и оболочка формируют волноводную структуру, направляющую оптическое излучение.

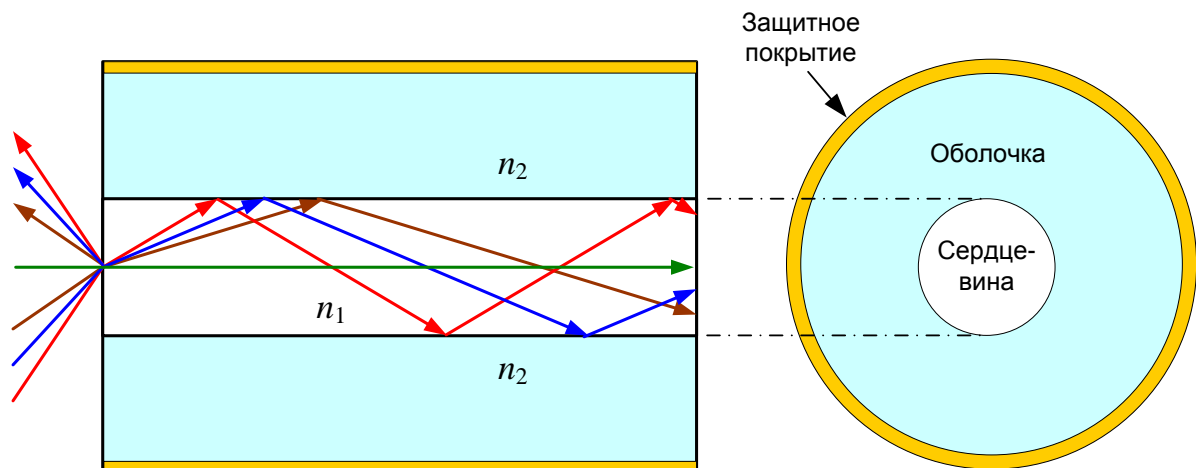


Рис. 2.5. Распространение лучей света по сердцевине ОВ.

Из условия (2.4) следует, что лучей, испытывающих ПВО на границе между сердцевиной и оболочкой может быть бесконечно много. Однако более строгий анализ показывает, что не все такие лучи могут существовать в ОВ. Число лучей, которые испытывают ПВО и могут существовать в ОВ, конечно. Такие лучи называют направляемыми модами.

Количество направляемых волокон мод зависит от частоты или длины волны излучения. Если на данной длине волны в ОВ может распространяться более одной направляемой моды, говорят, что ОВ работает в многомодовом режиме. В противном случае говорят, что ОВ работает в одномодовом режиме.

Серийно выпускаемые ОВ по количеству направляемых мод разделяются на одномодовые (ОМ), предназначенные для работы в одномодовом режиме, и многомодовые (ММ), предназначенные для работы в многомодовом режиме.

Основным материалом для изготовления сердцевины и оболочки ОВ служит кварцевое стекло. Для изменения показателя преломления кварцевого стекла используются легирующие добавки, например, оксид германия (увеличивает показатель преломления кварцевого стекла) или фтор (уменьшает показатель преломления кварцевого стекла). Защитное покрытие ОВ изготавливают из полимерного материала – акрилата.

Геометрические размеры ОВ стандартизуются Международным союзом электросвязи. Все кварцевые ОВ должны иметь одинаковый диаметр оболочки, равный 125 мкм. Диаметр сердцевины ММ ОВ должен составлять 50 мкм. Диаметр сердцевины ОМ ОВ не стандартизован и составляет обычно 7–10 мкм.

#### 2.4.2 Распространение сигналов по оптическому волокну. Параметры оптического волокна

В процессе распространения по ОВ оптический сигнал затухает (его энергия уменьшается) и искажается (изменяет свою форму).

Уменьшение энергии оптического сигнала в ОВ характеризуют затуханием  $a$ , определяемым выражением:

$$a = 10 \lg(P_{in}/P_{out}) = y_{in} - y_{out}, \quad (2.7)$$

где  $P_{in}$  и  $P_{out}$  – мощности оптического сигнала на входе и выходе ОВ, а  $y_{in}$  и  $y_{out}$  – соответствующие им уровни. Затухание измеряется в децибелах (дБ).

Очевидно, что затухание ОВ возрастает с увеличением его длины. Поэтому для сравнения различных ОВ между собой по этому параметру вводят коэффициент затухания  $\alpha$ :

$$\alpha = a/L, \quad (2.8)$$

где  $L$  – длина ОВ. Коэффициент затухания принято выражать в дБ/км. Коэффициент затухания представляет собой затухание ОВ длиной 1 км.

Коэффициент затухания кварцевого ОВ сложным образом зависит от длины волны. Наименьшие значения он принимает в ближнем инфракрасном диапазоне от 700 до 1650 нм, в котором выделяют так называемые окна прозрачности – диапазоны длин волн, в пределах которых коэффициент затухания имеет локальные минимумы (табл. 2.1).

Величина коэффициента затухания ОВ преимущественно определяется материалом (кварцевое стекло), а также технологией его изготовления.

Таблица 2.1. Окна прозрачности кварцевых ОВ

Окно	Средний коэфф. затух., дБ/км		Полное наименование	Краткое наименов.	Диапазон длин волн, нм
	ММ ОВ	ОМ ОВ			
Первое	2–5	–	Первое окно	–	780–860
Второе	0.5–0.7	0.3–0.4	Основной диапазон (Original)	О-диапазон	1280–1360
			Расширенный диапазон (Extended)	Е-диапазон	1360–1460
Третье	–	0.15–0.22	Коротковолновый диапазон (Short wavelength)	S-диапазон	1460–1530
			Стандартный диапазон (Conventional)	С-диапазон	1530–1565
			Длинноволновый диапазон (Long wavelength)	L-диапазон	1565–1625
			Сверхдлинный диапазон (Ultra-long wavelength)	U-диапазон	1625–1675

Наиболее неблагоприятным видом искажений сигналов в ОВ является уширение (увеличение длительности) оптических импульсов, которое называют дисперсией (рис. 2.6). Уширение может приводить к перекрытию и даже слиянию соседних импульсов, в результате чего они окажутся неразличимыми для приемного устройства.

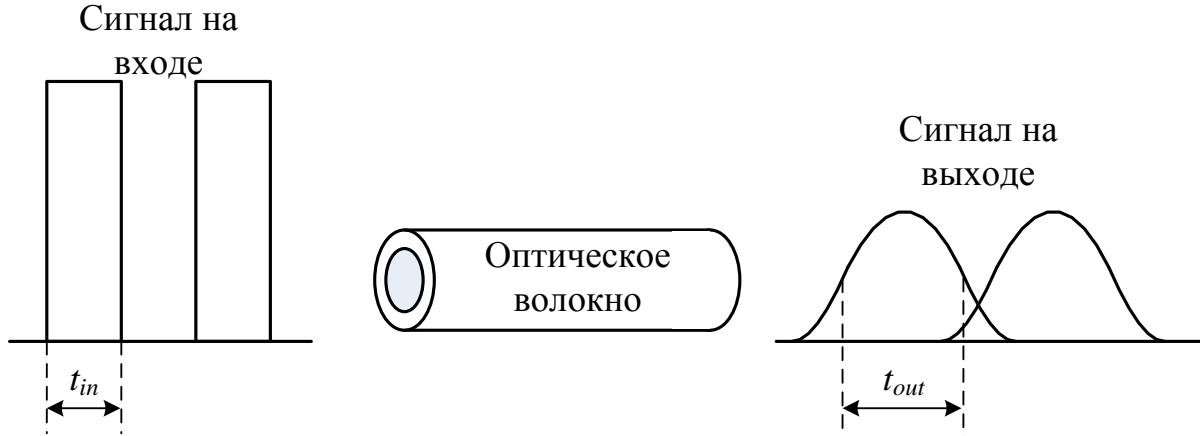


Рис. 2.6. Увеличение длительности импульсов в ОВ.

Дисперсию (уширение импульсов)  $\Delta t$  в ОВ принято оценивать следующим образом:

$$\Delta t = \sqrt{t_{out}^2 - t_{in}^2}, \quad (2.9)$$

где  $t_{in}$  и  $t_{out}$  – длительности импульсов на входе и выходе ОВ соответственно.

С величиной дисперсии связана полоса пропускания ОВ  $\Delta F$ , определяемая соотношением:

$$\Delta F = 0.44/\Delta t. \quad (2.10)$$

Различают несколько видов дисперсии:

- Межмодовая дисперсия обусловлена различием скоростей распространения отдельных направляемых мод в ОВ, имеет место только в ММ ОВ.
- Хроматическая дисперсия обусловлена различием скоростей распространения отдельных спектральных составляющих оптического сигнала, имеет место как в ОМ ОВ, так и в ММ ОВ.
- Поляризационно-модовая дисперсия обусловлена различием скоростей распространения электромагнитных волн с разным состоянием поляризации, имеет место как в ОМ ОВ, так и в ММ ОВ.

Дисперсия ОВ, как и затухание, возрастает с увеличением его длины. Полоса пропускания ОВ уменьшается с увеличением его длины. Для сравнения ОВ вводят коэффициенты различных видов дисперсии, а также параметр широкополосности волокна.

Коэффициенты межмодовой  $D_{mod}$ , хроматической  $D_{chr}$  и поляризационно-модовой  $D_{pmd}$  дисперсий определяются выражениями:

$$D_m = \Delta t/L, D_{chr} = \Delta t/(L \cdot \Delta\lambda), D_{pmd} = \Delta t/\sqrt{L}. \quad (2.11)$$

Из (2.11) видно, что разные коэффициенты дисперсии измеряются в различных единицах. Коэффициент межмодовой дисперсии принято выражать в нс/км, хроматической – в пс/(нм·км), поляризационно-модовой – в пс/км<sup>0.5</sup>.

Коэффициенты дисперсии ОВ зависят от длины волны, а их величины в значительной степени определяются конструкцией ОВ.

Широкополосность ОВ  $F_B$  определяется полосой пропускания ОВ  $\Delta F$  и его длиной  $L$ :

$$F_B = \Delta F \cdot L. \quad (2.12)$$

Ее принято выражать в МГц·км. Широкополосность представляет собой полосу пропускания ОВ длиной 1 км.

Поскольку в ОМ ОВ один из видов дисперсии (межмодовая) отсутствует, эти ОВ меньше искажают оптический сигнал по сравнению с ММ ОВ, то есть обладают меньшей дисперсией и большей широкополосностью. Широкополосность ММ ОВ составляет от 200 до 4700 МГц·км, широкополосность ОМ ОВ может превышать 100 ГГц·км.

Затухание и дисперсия ограничивают максимальное расстояние, на которое можно передать оптический сигнал по ОВ без использования регенераторов.

## 2.5 Оптический кабель

### 2.5.1 Классификация оптических кабелей

Оптический кабель (ОК) представляет собой совокупность ОВ, заключенных в общую влагозащитную оболочку, поверх которой в зависимости

от условий эксплуатации могут быть наложены защитные покровы. Основной задачей ОК является обеспечение требуемого качества передачи при соответствующих условиях эксплуатации.

Конструкции ОК в основном определяются назначением и областью их применения. По своему назначению ОК подразделяются на междугородные, зонные, городские, объектовые и монтажные.

По условиям прокладки и эксплуатации ОК различают кабели внутренней прокладки, наружной прокладки, специальные кабели. Среди ОК наружной прокладки выделяют подземные и подводные ОК, а также ОК воздушной подвески.

### **2.5.2 Конструктивные элементы оптического кабеля**

#### **Оптический модуль**

Оптическим модулем называют одно (одноволоконный модуль) или несколько (многоволоконный модуль) ОВ во вторичном покрытии. В целях идентификации модули и ОВ внутри многоволоконного модуля окрашиваются.

Вторичное покрытие предназначено для защиты ОВ от механических воздействий, в первую очередь поперечных деформаций. Вторичные покрытия бывают нескольких типов (рис. 2.7):

– сплошное (рис. 2.7а). Представляет собой толстый слой полимера (мягкий поливинилхлорид), нанесенный непосредственно на волокно с первичным покрытием. Диаметр ОВ в таком покрытии порядка 0.9 мм. Такие ОВ используются в качестве одноволоконного ОК или в составе многоволоконного ОК для внутренней прокладки;

– полусвободное трубчатое (рис. 2.7б). Отличается от сплошного тем, что между ОВ в первичном покрытии и слоем полимера находится тонкий слой (несколько сотых долей мм) вязкого компаунда. Это облегчает снятие защитных покрытий перед монтажом и уменьшает влияние микроизгибов. Используется в ОК внутренней прокладки;

– свободное трубчатое одноволоконное (рис. 2.7в) или многоволоконное (рис. 2.7г). Представляет собой пластмассовую трубку (полиамид или полибутилентерефталат), заполненную вязким гидрофобным компаундом, в котором свободно расположено ОВ. Используется в ОК наружной прокладки.

– ленточное, с числом ОВ от 2 до 24 (рис. 2.7д).

Для предотвращения проникновения воды пространство внутри полусвободного и свободного трубчатого вторичного покрытия заполняется специальным вязким гидрофобным компаундом – тиксотропным гелем.

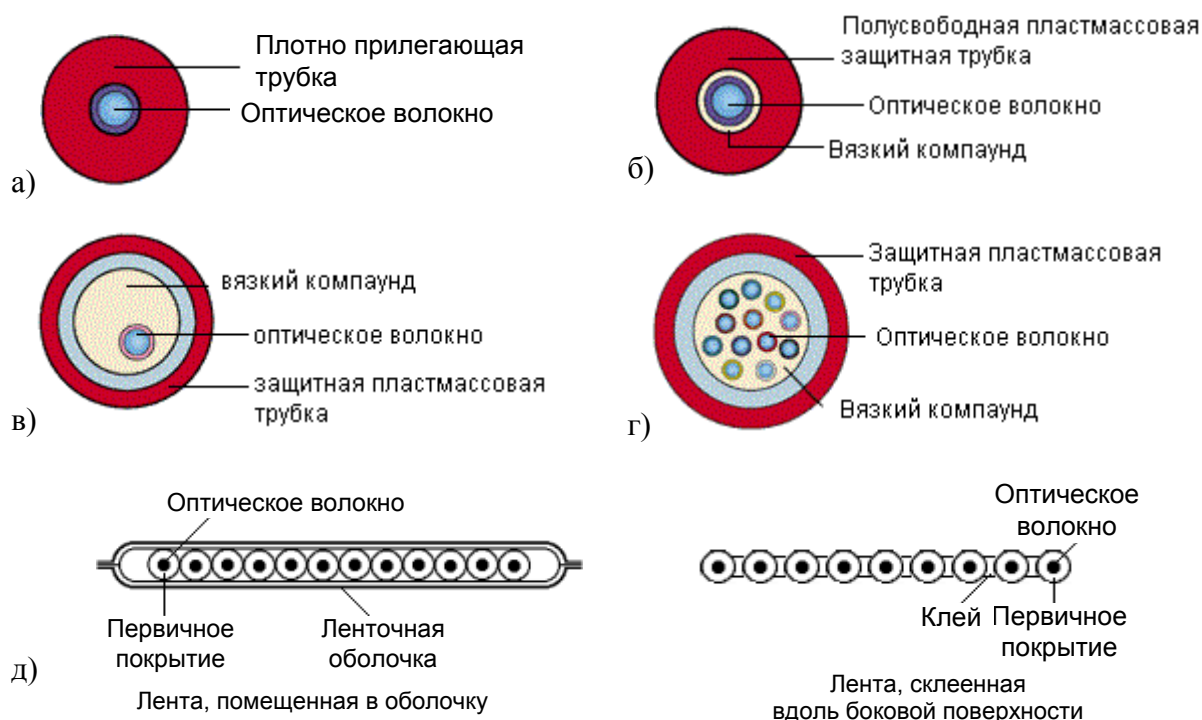


Рис. 2.7. Типы вторичного покрытия оптических волокон:  
 а) сплошное; б) полусвободное трубчатое; в) свободное трубчатое;  
 г) многоволоконное свободное трубчатое; д) ленточное

### Сердечник ОК

Существуют 3 вида конструкции сердечника ОК: повивная (рис. 2.8а), с профилированным сердечником (рис. 2.8б), с использованием одиночной трубки (рис. 2.8в).

В повивной конструкции сердечник выполнен в виде повивов оптических модулей (свободное трубчатое покрытие) вокруг центрального силового элемента (ЦСЭ). При малом (менее 6) числе требующихся модулей для обеспечения устойчивой правильной скрутки вместе с ними скручиваются пластмассовые кордели – заполнители сплошного сечения.

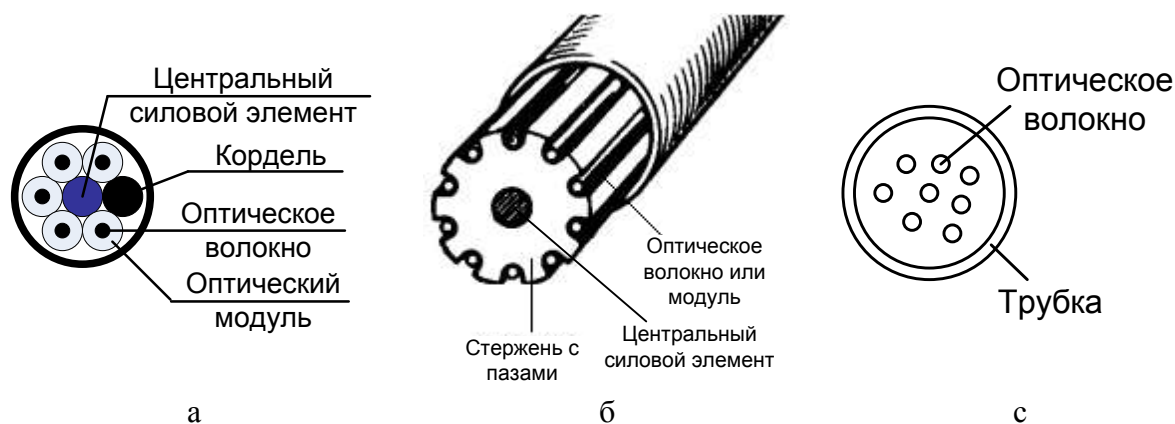


Рис. 2.8. Основные конструкции сердечников ОК: а) повивная;  
 б) с профилированным сердечником; в) с использованием одиночной трубки

Конструкция с профилированным сердечником состоит из полипропиленового стержня с продольными пазами. Стержень отливается вокруг металлического или диэлектрического ЦСЭ. Пазы располагаются вокруг стержня спирально или с периодической сменой направления. ОВ или оптические модули свободно располагаются в пазах.

Сердечник ОК с одиночной трубкой состоит из одной пластмассовой трубки. Внутри трубки свободно располагаются ОВ.

Для увеличения упругости ОК при растяжении в конструкцию сердечника могут включаться упрочняющие (армирующие) элементы. В сердечнике они могут располагаться двумя способами: вдоль центральной оси кабеля или распределенно по его сечению. Распределенными упрочняющими элементами являются, например, пластмассовые кордели, включаемые в повив вместе с оптическими модулями при малом числе последних.

В повивной конструкции и конструкции с профилированным сердечником упрочняющий ЦСЭ располагается вдоль центральной оси кабеля. В качестве такого элемента может использоваться стальная проволока диаметром 2–3,5 мм, трос такого же диаметра из нескольких проволок более тонкого сечения) или диэлектрический стержень (стеклопруток или арамидный пруток).

Свободное пространство внутри сердечника заполняется гидрофобным наполнителем. В случае если требуется конструкция ОК без наполнителя, водонепроницаемость сердечника по длине может быть обеспечена при помощи водоблокирующих лент или нитей.

Сформированный сердечник скрепляется поясной изоляцией из синтетической полипропиленовой, терефталатной (лавсановой) ленты, накладываемой путем спиральной обмотки в один или два слоя.

Для организации связи на большие расстояния, например для морских подводных ВОСП, используют оптические усилители, для дистанционного питания которых в сердечнике ОК предусматривают медные жилы.

### Защитные покровы ОК

Кабельный сердечник защищается от воздействия внешней среды оболочкой. В качестве материалов оболочек используются полиэтилен, поливинилхлорид, алюмополиэтилен, безгалогенные материалы, не распространяющие горение.

При больших внешних нагрузках кроме внутренней защитной оболочки может накладываться броневой покров (рис. 2.9), дополнительно защищающий кабель от механических воздействий. В качестве броневого покрова чаще всего используется повив из стальных оцинкованных проволок или стеклопластиковых прутков, а также стальная гофрированная лента.



В ОК, предназначенных для прокладки в кабельной канализации, трубах, коллекторах, на мостах и эстакадах используется броня из стальной гофрированной ленты. В кабелях для прокладки в грунтах, не подверженных мерзлотным деформациям, на переходах через неглубокие несудоходные реки и болота применяется броня из круглых стальных оцинкованных проволок. Для прокладки в сложных грунтах всех групп, в том числе и подверженных мерзлотным деформациям, а также на переходах через судоходные реки применяется двухповивная броня из круглых стальных оцинкованных проволок. Повивы разделяются промежуточной полиэтиленовой оболочкой.

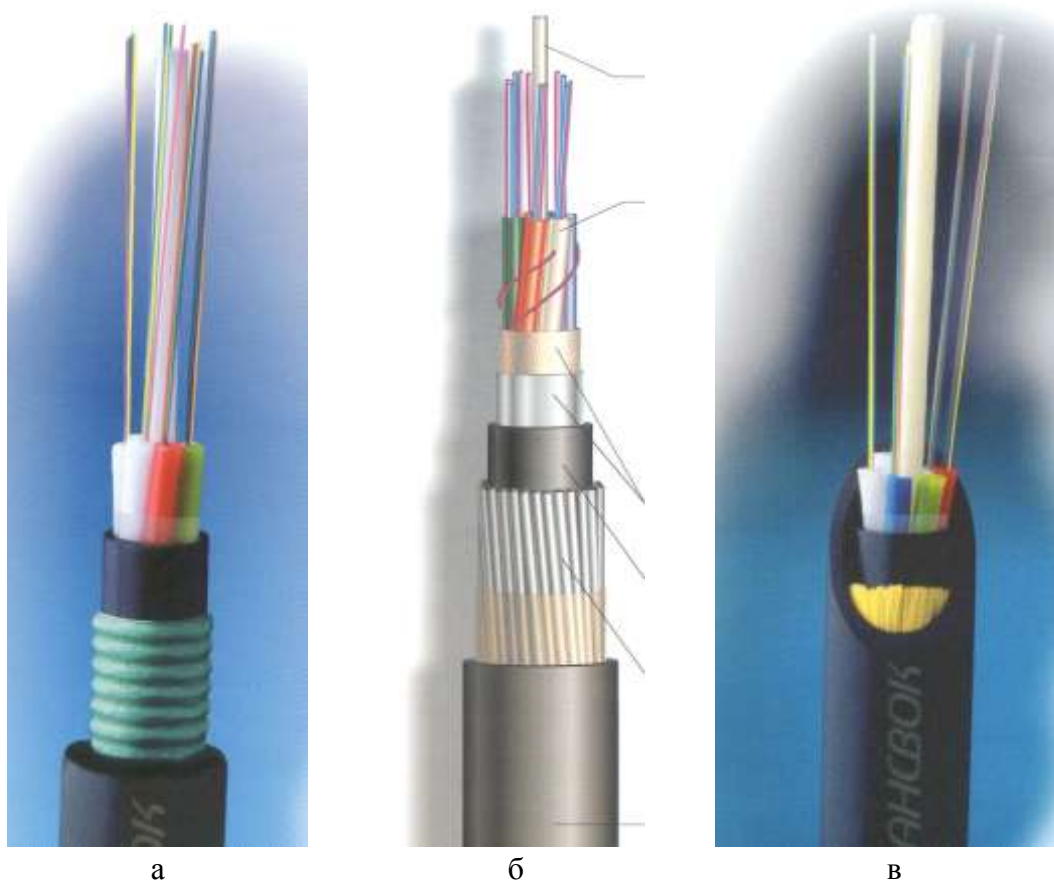


Рис. 2.9. Конструкции броневых покровов:  
а – ленточная, б – круглопроволочная, в – из арамидных нитей

Пустоты в бронеповиве заполняются гидрофобным компаундом.

Поверх бронепокровов на кабельный сердечник наносят защитный шланг из полиэтилена или негорючих безгалогенных материалов. Для дополнительного упрочнения кабеля в защитный шланг могут быть впрессованы две толстые стальные проволоки.

### 2.5.3 Маркировка оптического кабеля

Маркировка представляет собой аббревиатурную запись основных параметров оптического кабеля, к которым относятся: назначение и об-

ласть применения, конструкция сердечника, материалы оболочек, тип брони, число оптических модулей и оптических волокон, величина коэффициента затухания на рабочих длинах волн, величина дисперсии, допустимое растягивающее усилие и др.

Чтобы любой специалист мог быстро расшифровать аббревиатурную запись, обозначения одних и тех же параметров ОК различных производителей должны быть унифицированы. Однако в настоящее время в маркировке ОК отечественного производства унификация отсутствует. Каждый кабельный завод использует свою систему маркировки.

## 2.6 Активные компоненты волоконно-оптических систем передачи

### 2.6.1 Передающие оптические модули

#### Источник излучения

Передающее устройство в составе ВОСП называют передающим оптическим модулем (ПОМ). Основным оптическим элементом ПОМ является источник излучения (ИИ), выполняющий функцию генератора несущей волны в схеме системы связи на рис. 1.10. Как уже отмечалось выше, в качестве ИИ в составе ПОМ используются светоизлучающие (СИД) и лазерные диоды (ЛД), а излучение возникает в их *p-n* переходе.

Физической основой работы СИД и ЛД является квантовая теория поглощения и испускания света частицами (атомами, молекулами), созданная А. Эйнштейном. В квантовой теории энергия одиночной частицы изменяется дискретно – скачком от одного разрешенного значения (уровня) энергии до другого. При рассмотрении процессов излучения можно ограничиться учетом двух энергетических уровней квантовой частицы: основного с наименьшей энергией  $W_1$  и возбужденного с энергией  $W_2$ . Тогда увеличение энергии частицы от уровня  $W_1$  до уровня  $W_2$  происходит с поглощением порции (кванта) энергии  $W_{12} = W_2 - W_1$ . Уменьшение энергии частицы от уровня  $W_2$  до уровня  $W_1$  происходит с выделением порции (кванта) энергии  $W_{12}$ .

Квант энергии может иметь различную природу: акустическую, тепловую или электромагнитную. Электромагнитный квант, имеющий частоту оптического диапазона, называется квантом света или фотоном и обладает энергией, пропорциональной его частоте  $f$ :

$$W = h \cdot f, \quad (2.13)$$

где  $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка. Излучение фотона называется люминесценцией.

При объединении большого количества квантовых частиц, то есть в любом твердом полупроводниковом материале, в соответствии с принципом Паули происходит расщепление уровней  $W_1$  и  $W_2$  для каждой квантовой частицы на множество подуровней, образующих две зоны уровней: валентную ( $W_1$ ) с максимальным уровнем  $W_{1\max}$  и зону проводимости ( $W_2$ ) с

минимальным уровнем  $W_{2\min}$ . На рис. 2.10 и 2.11 показаны энергетические зоны  $W_1$  и  $W_2$  для квантовых частиц, а также условно показаны несколько пронумерованных подуровней в валентной зоне и зоне проводимости.

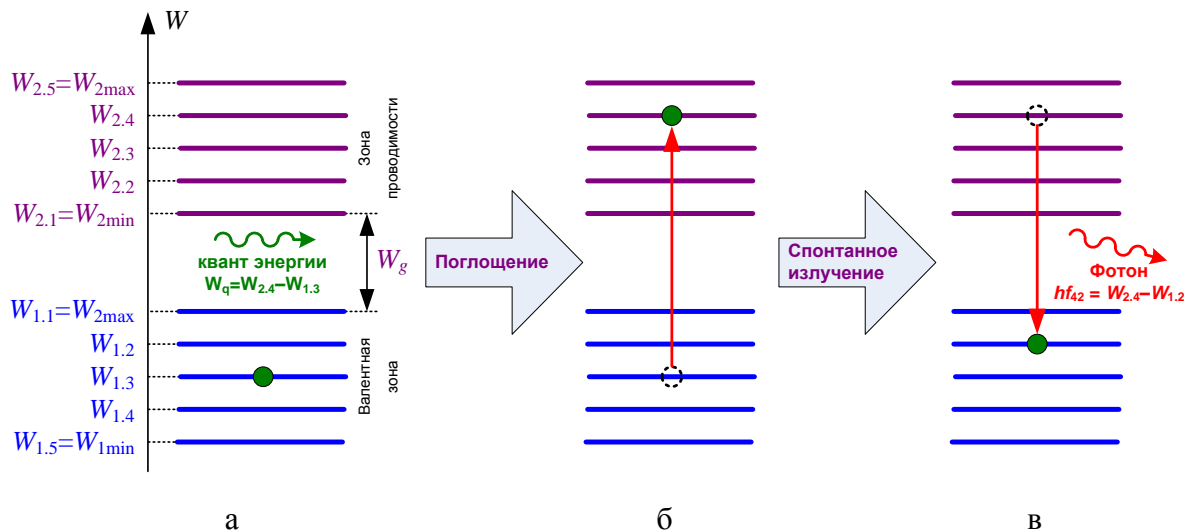


Рис. 2.10. Спонтанная люминесценция

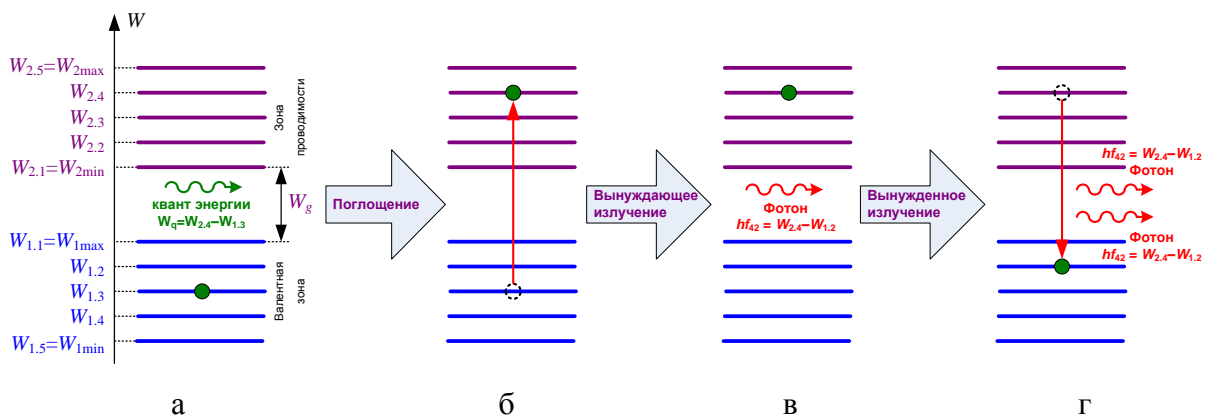


Рис. 2.11. Вынужденная люминесценция

Важной характеристикой полупроводникового материала является ширина запрещенной зоны  $W_g = W_{2\min} - W_{1\max}$ . Для возбуждения частицы необходима энергия, превышающая ширину запрещенной зоны. Эту энергию квантовые частицы могут получить от движущихся через  $p$ - $n$  переход зарядов, которые обладают кинетической энергией  $W_q \geq W_g$ . На рис. 2.10а, б и 2.11а, б показан процесс возбуждения частицы (поглощения кванта энергии  $W_q$ ). В зависимости от изначальной энергии частицы, которой она обладала в валентной зоне, и величины поглощенной энергии  $W_q$  частица может оказаться на любом из подуровней зоны проводимости.

Через некоторое время, называемое временем жизни, возбужденная частица самопроизвольно (спонтанно) переходит в основное состояние (любой из подуровней валентной зоны) с излучением фотона, энергия которого равна изменению энергии частицы и может отличаться от  $W_q$  (рис.

2.10в). Этот процесс называется спонтанной люминесценцией, а возникшие фотоны – спонтанным излучением.

Поскольку энергия излучаемых фотонов с некоторой вероятностью может принимать любое значение от  $W_g = W_{2\min} - W_{1\max}$  до  $W_{2\max} - W_{1\min}$ , спонтанное излучение имеет сравнительно широкий спектр – от  $f_{\min} = W_g / h$  до  $f_{\max} = (W_{2\max} - W_{1\min}) / h$ . Наиболее вероятным является излучение на частоте, близкой к  $f_{\min}$ . Кроме того, спонтанное излучение имеет случайный характер. Фаза, направление распространения, поляризация световых волн, излучаемых различными частицами, не согласованы друг с другом. Это означает, что излучение системы частиц некогерентно. Излучение СИД преимущественно является спонтанным.

При взаимодействии фотона с возбужденными частицами может возникать вынужденное излучение (рис 2.11в, г). Свойства вынужденного излучения сильно отличаются от спонтанного. При вынужденном излучении испускаемый фотон неотличим от фотона, который вызывает его появление. Частота, фаза, направление распространения испускаемого фотона совпадают с соответствующими характеристиками фотона, вызвавшего его излучение. Это означает, что вынужденное излучение когерентно, то есть согласовано по свойствам с тем излучением, которое его вызывает. Кроме того, вместо одного фотона за счет вынужденного излучения появляется два фотона, а это означает, что происходит усиление света и, при наличии положительной обратной связи, генерация когерентного излучения.

В основе конструкции СИД и ЛД лежит  $p$ - $n$  переход – контакт между полупроводниковыми материалами  $p$ -типа (легированного акцепторной примесью) и  $n$ -типа (легированного донорной примесью). При отсутствии напряжения в зоне контакта возникает потенциальный барьер и область обедненная свободными электрическими зарядами. Непременным условием возникновения излучения из такой структуры является прямое смещение перехода, т.е. приложение к нему напряжения, превышающего величину потенциального барьера, причем «+» источника питания подается на  $p$ -область, а «-» – на  $n$ -область. В этом случае переход обладает высокой проводимостью, а ток в нем создается основными носителями заряда (электронами в полупроводнике  $n$ -типа и дырками в полупроводнике  $p$ -типа).

Таким образом, СИД и ЛД осуществляют электрооптическое преобразование электрического тока (потока электронов) в оптическую мощность (поток фотонов).

Конструктивным отличием ЛД от СИД является помещение  $p$ - $n$  перехода (активной среды) в оптический резонатор, который в простейшем случае представляет собой два плоских зеркала, находящихся на расстоянии  $L$  друг от друга. Одно из них должно быть полупрозрачным для вывода излучения из резонатора. Мы уже знаем, что возникшее в переходе излучение может действовать как вынуждающее. Резонатор повышает вероятность появления вынужденного излучения в ЛД, но не на всех длинах волн

от  $\lambda_{\min} = c / f_{\max}$  до  $\lambda_{\max} = c / f_{\min}$ , а только на тех, для которых выполнено условие:

$$L = 0.5 \cdot m \cdot \lambda, \quad (2.14)$$

где  $m$  – любое целое число. Для излучения на длинах волн, удовлетворяющих (2.14), резонатор представляет собой оптический фильтр, который усиливает излучение этих длин волн и подавляет все другие. В результате могут быть созданы условия не только для усиления вынуждающего излучения, но и для генерации узкополосного излучения. Излучение ЛД благодаря наличию резонатора является преимущественно вынужденным и имеет узкий спектр.

Можно показать, что усиление и генерация в  $p$ - $n$  переходе ЛД возникают, если в каждый момент времени число возбужденных частиц, обладающих энергией  $W_2$ , превышает число невозбужденных частиц, обладающих энергией  $W_1$ . Такое состояние активной среды называется инверсной населенностью энергетических уровней частиц. Оно достигается и поддерживается, если электрический ток  $I$  через  $p$ - $n$  переход ЛД достаточно велик, т.е. превышает некоторое пороговое значение.

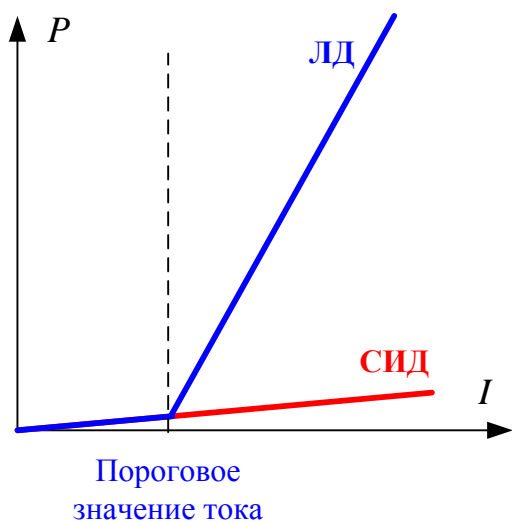


Рис. 2.12. Ватт-амперные характеристики источников излучения

Зависимость  $P(I)$  излучаемой оптической мощности  $P$  от тока  $I$  через  $p$ - $n$  переход называется ватт-амперной характеристикой (ВтАХ) источника излучения. Типичные ВтАХ для СИД и ЛД показаны на рис. 2.12.

ВтАХ СИД практически линейна и имеет относительно малую крутизну (мощность излучения медленно возрастает с увеличением тока).

ВтАХ ЛД состоит из двух участков. При малых токах ЛД ведет себя как СИД. Однако при достижении током некоторого порогового значения ЛД переходит в режим лазерной генерации излучения и крутизна ВтАХ резко возрастает. В этом режиме даже небольшое изменение тока может приводить к существенному изменению мощности.

### Модуляция излучения

Различают два вида оптической модуляции:

- внутренняя или прямая модуляция мощности источника излучения путем управления током через  $p$ - $n$  переход СИД или ЛД (рис. 2.13а);
- внешняя модуляция источника непрерывного излучения с помощью специального модулятора (рис. 2.13б).

Для реализации внутренней модуляции сигнал от кодера в схеме рис. 1.10 преобразуется в ток через  $p-n$  переход СИД или ЛД. Для внешней модуляции используется электрооптическое устройство – модулятор, который может изменять амплитуду напряженности несущей волны, ее частоту, фазу, состояние поляризации или оказывать комбинированное воздействие на несколько параметров волны, например, амплитуду и фазу.

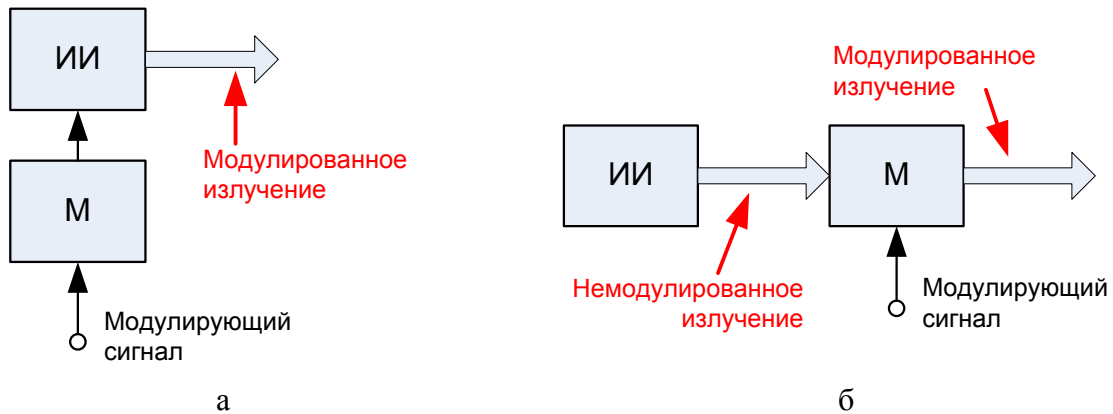


Рис. 2.13. Принцип работы внутреннего (а) и внешнего (б) модуляторов:  
ИИ – источник излучения, М – модулятор

Рассмотрим для примера внутреннюю модуляцию СИД, при которой ток через  $p-n$  переход изменяется по закону цифрового модулирующего сигнала (рис. 1.5а) от минимального значения  $I_{\min}$ , соответствующего логическому нулю, до максимального значения  $I_{\max}$ , соответствующего логической единице. Среднее значение тока  $I_0$  (рабочая точка) выбирается так, чтобы значения мощности при токах  $I_{\min}$  и  $I_{\max}$  лежали на линейном участке ВтАХ. В этом случае мощность излучения  $P$  меняется синхронно с изменениями тока  $I$  – возрастает при возрастании тока и уменьшается при его уменьшении (рис. 2.14). Таким образом, с помощью внутреннего модулятора получают модуляцию мощности излучения.

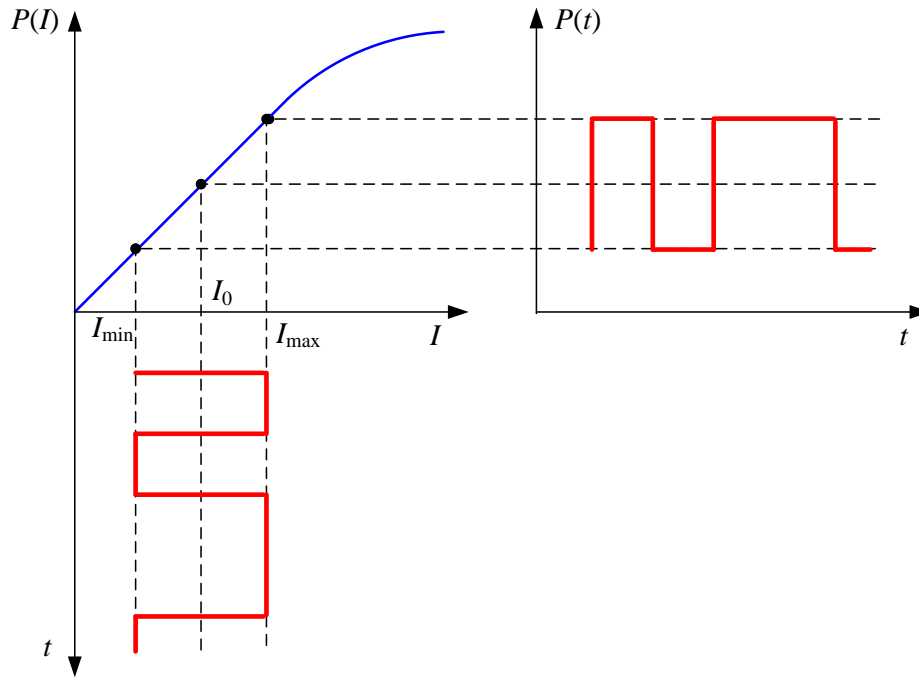


Рис. 2.14. Внутренняя модуляция излучения СИД

Основным недостатком внутренней модуляции является невысокое быстродействие, связанное с инерционностью источников излучения. Такие модуляторы могут использоваться в системах связи, работающих со скоростью менее 10 Гбит/с. В более высокоскоростных системах используется внешняя модуляция.

Амплитудную модуляцию излучения можно осуществить с помощью внешнего модулятора на основе электроабсорбционного эффекта Франца-Келдыша. Слово «абсорбция» (от лат. *absorbere* – поглощать) означает поглощение. В соответствии с теорией Эйнштейна в любой среде, кроме абсолютного вакуума, возможно поглощение фотона частицей среды, под которым понимают исчезновение фотона с энергией  $W$  и увеличение энергии частицы на величину  $W$ . Как отмечено выше, частица может менять свою энергию только дискретно – скачком от одного разрешенного уровня энергии до другого. Поэтому она может поглощать только фотоны, энергия которых соответствует таким разрешенным переходам.

В соответствии с (2.13) энергия фотона однозначно связана с его частотой, то есть можно говорить о спектре поглощения среды – наборе частот излучения, которые могут поглощаться ее частицами. Электроабсорбционный эффект, открытый немецким физиком Францем Вальтером и советским физиком Л.В. Келдышем в 1957-1958 гг., заключается в смещении спектра поглощения некоторых материалов в сторону более длинных волн под действием напряженности электрического поля. Этот эффект наблюдается, например, в полупроводниковых кристаллах.



Упрощенная схема ЭАМ представлена на рис. 2.15. Полупроводниковый кристалл помещается между двумя плоскими электродами, на которые подается напряжение  $U_s$ , изменяющееся по закону цифрового модулирующего сигнала (рис. 1.5а) от 0, соответствующего логическому нулю, до максимального значения  $U_{\max}$ , соответствующего логической единице. В результате между электродами то возникает (при передаче логической единицы), то исчезает (при передаче логического нуля) однородное электрическое поле. Напряженность электрического поля равна  $E = U_s / d$ , где  $d$  – расстояние между электродами (толщина кристалла).



**Келдыш Леонид Вениаминович** (1931-2016) – советский физик

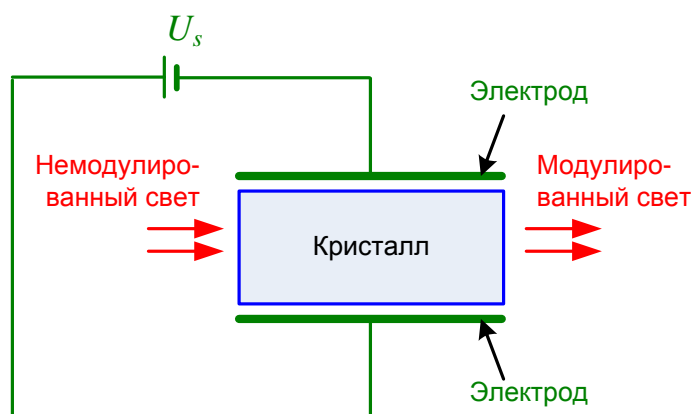


Рис. 2.15. Внешний модулятор, основанный на электроабсорбционном и электрооптическом эффекте

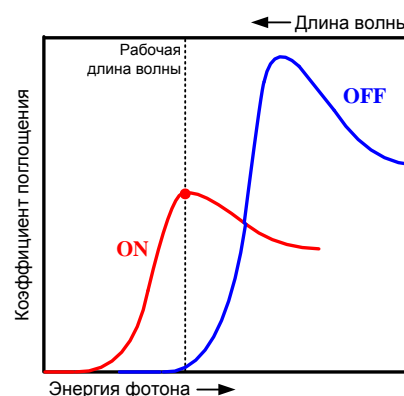


Рис. 2.16. Эффект электропоглощения

Предположим, что на вход ЭАМ поступает оптическое излучение мощностью  $P$ . На рис. 2.16 условно показаны спектры поглощения кристалла, обладающего электроабсорбционным эффектом, при выключенном (OFF) и включенном (ON) электрическом поле. Если выбрать рабочую длину волны излучения так, как показано на рисунке:

- при выключенном поле коэффициент поглощения будет маленьким, то есть большая часть фотонов просто пройдет через кристалл и мощность излучения на выходе ЭАМ будет примерно равна  $P$ .
- при включенном поле коэффициент поглощения резко возрастет и мощность излучения на выходе ЭАМ будет намного меньше  $P$ .

В результате оптический сигнал на выходе ЭАМ окажется модулированным по амплитуде.

Фазовую модуляцию напряженности электрического поля оптической волны можно реализовать с помощью линейного электрооптического эффекта, открытого в 1893 г. немецким физиком Ф. Поккельсом. Эффект заключается в том, что показатель преломления  $n_0$  некоторых материалов (ниобата лития, арсенида галлия и др.) изменяется при приложении внешнего электрического поля напряженностью  $E$  на

$$\Delta n(E) = 0.5k_p n_0^3 E, \quad (2.15)$$

где  $k_p$  – постоянная Поккельса материала,  $n_0$  – показатель преломления материала в отсутствие электрического поля.

Упрощенная схема ЭОМ представлена на рис. 2.15. Между электродами помещается кристалл, в котором наблюдается электрооптический эффект. На электроды подается напряжение  $U_s$ , изменяющееся по закону цифрового модулирующего сигнала (рис. 1.5а) от минимального значения  $U_{\min}$ , соответствующего логическому нулю, до максимального значения  $U_{\max}$ , соответствующего логической единице. В результате напряженность однородного электрического поля, возникающего между электродами, изменяется от  $E_{\min} = U_{\min} / d$  до  $E_{\max} = U_{\max} / d$ , а показатель преломления кристалла – от  $n_{\min} = n_0 + \Delta n(E_{\min})$  до  $n_{\max} = n_0 + \Delta n(E_{\max})$ .

С показателем преломления  $n$  кристалла длиной  $L$  связано изменение фазы проходящего через него излучения с длиной волны  $\lambda$ :

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot L \cdot n / \lambda. \quad (2.16)$$

Поскольку показатель преломления  $n$  меняется при изменении напряженности электрического поля, будет меняться и фаза излучения на выходе ЭОМ. Таким образом, с помощью ЭОМ можно получить фазовую модуляцию оптического излучения.

## 2.6.2 Приемные оптические модули

### Приемник излучения

Приемное устройство в составе ВОСП называют приемным оптическим модулем (ПрОМ). Основным оптическим элементом ПрОМ является фотоприемное устройство (ФПУ), выполняющее функцию демодулятора в схеме системы связи на рис. 1.10. В состав ФПУ входит приемник излучения, в качестве которого используются фотодиоды (ФД)  $p$ - $i$ - $n$  структуры (PIN ФД) и лавинные фотодиоды (ЛФД).

Работа ФД основана на явлении внутреннего фотоэффекта – поглощении оптического излучения материалом полупроводника, сопровождающемся генерацией подвижных носителей заряда и возникновением тока,



**Поккельс Фридрих Карл Альвин** (1865-1913) – немецкий физик

называемого фототоком. Основной характеристикой ФД является его вольтамперная характеристика (ВАХ).

На рис. 2.17 представлено семейство ВАХ фотодиода, облучаемого оптическим излучением разной мощности  $P$  ( $P_1 < P_2 < P_3$ ), а также в отсутствие излучения ( $P = 0$ ).

Фотодиод обычно работает при приложении к нему обратного (отрицательного) напряжения. При обратном напряжении, большем некоторого порогового значения  $U_{bd}$ , в ФД наблюдается лавинный пробой, сопровождающийся быстрым ростом фототока. Для работы PIN ФД используется обратное напряжение  $U \ll U_{bd}$ , для работы ЛФД используется обратное напряжение, близкое к  $U_{bd}$ .

ВАХ фотодиода описывается выражением:

$$I = I_{bc} + I_{ph} = I_{bc} - M \cdot S \cdot P, \quad (2.17)$$

где  $I_{bc}$  – темновой ток (ВАХ при  $P = 0$ ),  $I_{ph}$  – фототок,  $S$  – токовая чувствительность ФД (А/Вт),  $M$  – коэффициент лавинного умножения, учитывающий рост фототока при наступлении лавинного пробоя (для PIN ФД  $M = 1$ ).

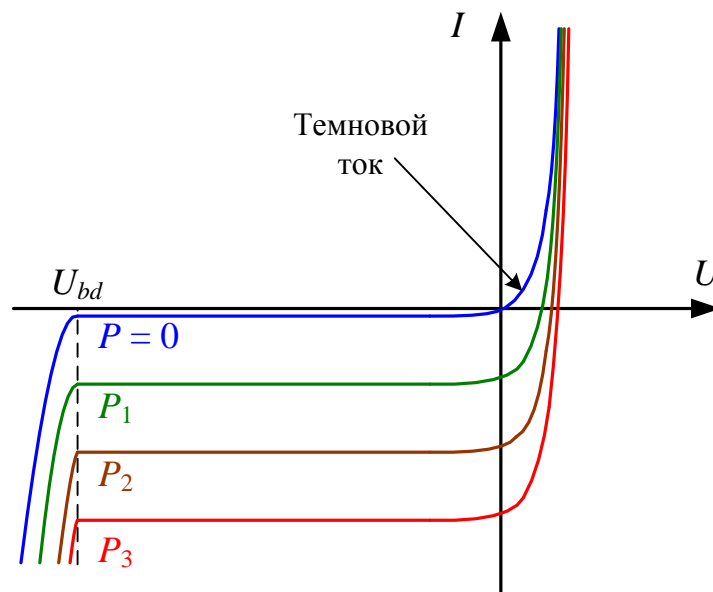


Рис. 2.17. Вольтамперная характеристика ФД

### Фотоприемное устройство

В ВОСП используются два типа ФПУ – с энергетическим и когерентным приемом оптического сигнала. В ФПУ с энергетическим приемом на фоточувствительную площадку ФД падает непосредственно излучение регистрируемого оптического сигнала (рис. 2.18а). В ФПУ с когерентным приемом на фоточувствительной площадке ФД интерферируют две световых волны – излучение регистрируемого оптического сигнала и опорное излучение от местного источника (рис. 2.18б).

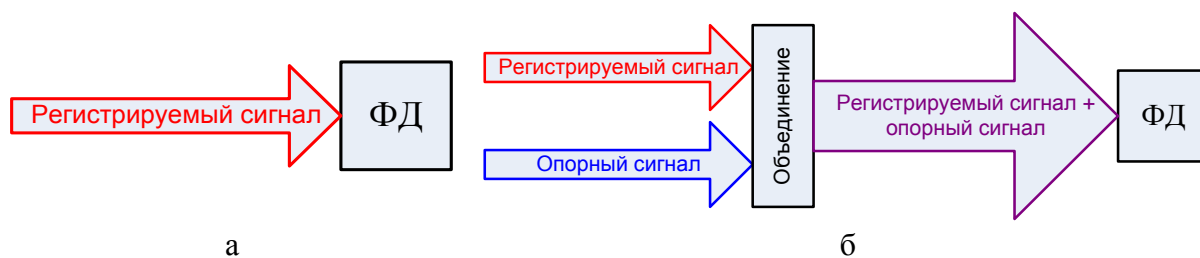


Рис. 2.18. Принципы энергетического (а) и когерентного приема (б)

Конструкция ФПУ с энергетическим приемом существенно проще, однако в этом случае генерируемый в ФД фототок сохраняет информацию только об изменениях мощности регистрируемого сигнала. Поэтому с помощью такого ФПУ можно принимать только сигналы с модуляцией мощности или амплитудной модуляцией напряженности электрического поля несущей волны.

В ФПУ с когерентным приемом фототок сохраняет информацию об амплитуде, частоте и фазе напряженности электрического поля несущей волны. Поэтому когерентное ФПУ позволяет принимать сигналы с любыми видами модуляции. Дополнительным преимуществом когерентного ФПУ является сохранение в фототоке информации об искажениях сигнала, обусловленных хроматической дисперсией, что позволяет использовать электронные методы ее компенсации (устранения искажений).

Качество принятого оптического сигнала оценивается на выходе регенератора (рис. 1.10). Основным оцениваемым параметром является коэффициент ошибок  $k_e$  – отношение неправильно принятых бит к общему количеству переданных бит. Для каждой ВОСП определяется допустимое значение коэффициента ошибок  $k_{e\text{ per}}$ .

Для ФПУ вводятся два параметра, связанные с коэффициентом ошибок:

- Чувствительность ФПУ – минимальная мощность  $P_{R\text{min}}$  или уровень мощности  $y_{R\text{min}}$  сигнала на входе ФПУ, при котором  $k_e \leq k_{e\text{ per}}$ . Чувствительность ФПУ ограничена уровнем его собственных шумов.
- уровень перегрузки ФПУ – максимальная мощность  $P_{R\text{max}}$  или уровень мощности  $y_{R\text{max}}$  сигнала на входе ФПУ, при котором  $k_e \leq k_{e\text{ per}}$ .

ФПУ на основе ЛФД обладают лучшей чувствительностью по сравнению с ФПУ на основе PIN ФД. ФПУ с когерентным приемом обладают лучшей чувствительностью по сравнению с ФПУ с энергетическим приемом.

### 2.6.3 Оптические усилители

В п. 2.4 отмечалось, что одним из факторов, ограничивающих дальность связи в ВОСП, является затухание оптического сигнала в ОВ. Опти-

ческим усилителем называют электрооптическое устройство, которое усиливает ослабленный сигнал.

Наибольшее распространение получили волоконные усилители, в которых усиление происходит за счет нелинейного взаимодействия в активном ОВ ослабленного сигнала и мощного излучения от дополнительного местного источника, называемого накачкой. В результате этого взаимодействия накачка передает часть своей энергии сигналу. В качестве активного ОВ может выступать как само телекоммуникационное ОВ (оптические усилители на эффекте Рамана), так и специальное кварцевое ОВ, легированное редкоземельными элементами.

Широкое применение нашли оптические усилители на ОВ, легированном эрбием. В литературе для их обозначения используют аббревиатуру EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier.

Основным параметром оптического усилителя является его коэффициент усиления, определяемый следующим образом:

$$G = 10 \lg(P_{out} / P_{in}), \quad (2.18)$$

где  $P_{in}$  и  $P_{out}$  – мощности оптического излучения сигналов на входе и выходе усилителя соответственно.

Оптический усилитель является источником шума в ВОСП. При построении протяженных ВОСП с усилителями необходимо учитывать накопление генерируемых ими шумов.

## 2.7 Пассивные компоненты волоконно-оптических систем передачи

К пассивным компонентам ВОСП относят компоненты, не потребляющие энергию от внешних электрических или оптических источников: разъемные и неразъемные соединители и оптические шнуры, разветвители, пассивные фильтры, мультиплексоры спектрального уплотнения, изоляторы, циркуляторы, аттенюаторы, компенсаторы хроматической дисперсии, коммутационные элементы.

Пассивные компоненты могут иметь один вход и один выход или несколько входов и/или выходов (многопортовые компоненты).

Основными параметрами компонента с одним входом и выходом являются зависящие от частоты излучения вносимые  $a_{IL}$  и возвратные  $a_{RL}$  потери, определяемые следующим образом (рис. 2.19):

$$a_{IL} = 10 \lg(P_{in} / P_{out}), \quad a_{RL} = 10 \lg(P_{in} / P_{ref}) \quad (2.19)$$

где  $P_{in}$  и  $P_{out}$  – мощности оптического излучения на входе и выходе пассивного компонента соответственно,  $P_{ref}$  – мощность, отраженная от пассивного компонента.

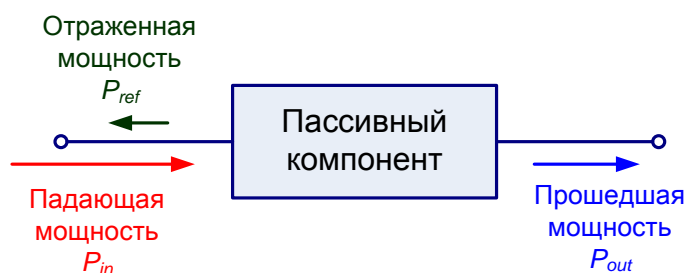


Рис. 2.19. К определению вносимых и возвратных потерь компонента с одним входом и одним выходом.

Величина  $P_{ref} / P_{in}$ , входящая в (2.19), представляет собой коэффициент отражения. Чем больше возвратные потери, тем меньше коэффициент отражения.

К пассивным компонентам с одним входом и одним выходом относятся разъемные и неразъемные соединители и оптические шнуры, изоляторы, аттенюаторы, компенсаторы хроматической дисперсии.

Излучение, падающее на один из входов многопортового компонента, распределяется между всеми или некоторыми его выходами. Таким образом, в компоненте могут существовать разрешенные и запрещенные пути для проходящего излучения.

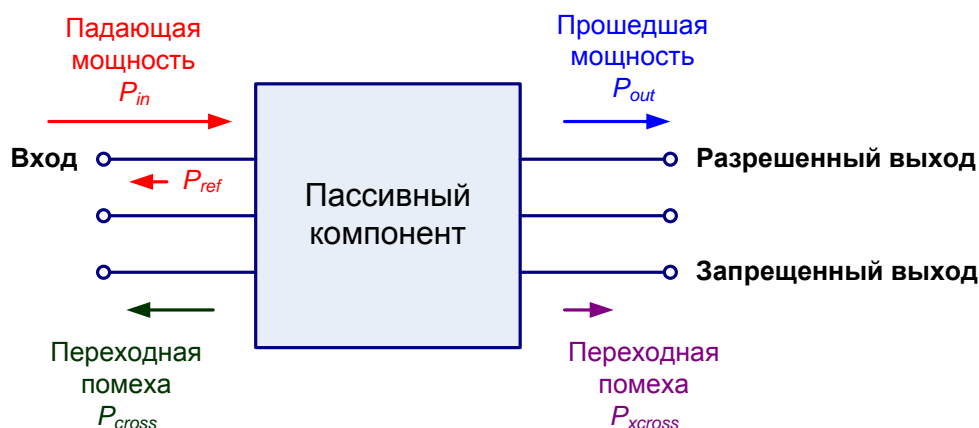


Рис. 2.20. К определению параметров многопортовых компонентов.

Потери излучения, прошедшего через компонент по разрешенному пути, называют вносимыми потерями. Вносимые потери определяются для каждого разрешенного пути в отдельности по выражению (2.19).

Потери излучения, прошедшего через компонент по запрещенному пути, характеризуют переходным затуханием на дальний конец (изолирующей) (рис. 2.20):

$$a_{cross} = -10 \cdot \lg(P_{cross} / P_{in}) \quad (2.20)$$

Излучение, падающее на один из входов компонента, вызывает переходные помехи на других его входах. Эти помехи характеризуют переходным затуханием на ближний конец (направленностью) (рис. 2.20):

$$a_{cross} = -10 \cdot \lg(P_{cross}/P_{in}) \quad (2.21)$$

Чем больше переходные затухания, тем меньше помехи и, следовательно, тем качественнее соответствующий компонент.

Возвратные потери определяются для каждого входа и выхода пассивного компонента по выражению (2.19).

К многопортовым пассивным компонентам относятся оптические разветвители, фильтры, мультиплексоры WDM, циркуляторы.

Все перечисленные параметры зависят от частоты излучения.

### 2.7.1 Разъемные и неразъемные соединители

Соединители предназначены для соединения различных компонентов ВОСП с ОВ, а также для соединения ОВ между собой. Соединители бывают разъемными и неразъемными. Неразъемные соединители используются в местах постоянного монтажа кабельных систем. Разъемные соединители допускают многократные соединения и разъединения.

Разъемный соединитель двух ОВ (рис. 2.21) состоит из 2 коннекторов (вилки) и адаптера (розетки). Для соединения ОВ с источником и приемником излучения, измерительным прибором входы/выходы этих элементов должны быть выполнены как розетки.

Главным элементом вилки является наконечник с капилляром для ввода ОВ, которое предварительно освобождается от защитных покрытий. Наконечники изготавливают из нержавеющей стали или из керамики на основе циркония или оксида алюминия. Переходная розетка снабжается центрирующим элементом, выполненным в виде упругой трубки с продольным разрезом. Центрирующий элемент плотно охватывает наконечники, обеспечивая их соосность.

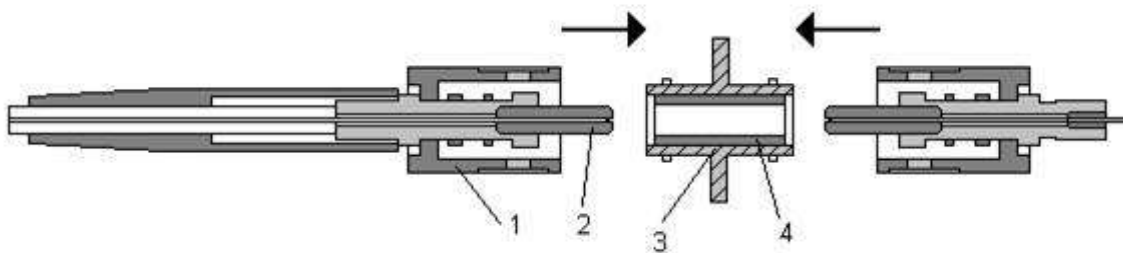


Рис. 2.21. Конструкция соединителя: 1 – корпус вилки, 2 – наконечник, 3 – корпус розетки, 4 - центрирующий элемент.

ОВ вводится в наконечник и фиксируется специальным клеем. Затем наконечник вместе с ОВ полируют для придания его торцу сферической формы.

Существующая номенклатура разъемных соединителей достаточно велика. Наиболее распространенными в настоящее время являются соединители SC (рис. 2.22) и LC (рис. 2.23).



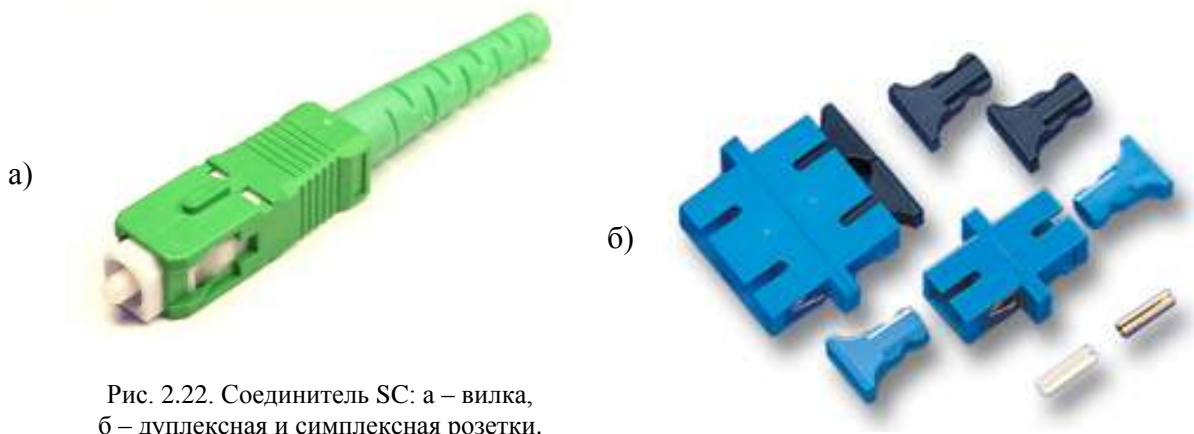


Рис. 2.22. Соединитель SC: а – вилка, б – дуплексная и симплексная розетки.

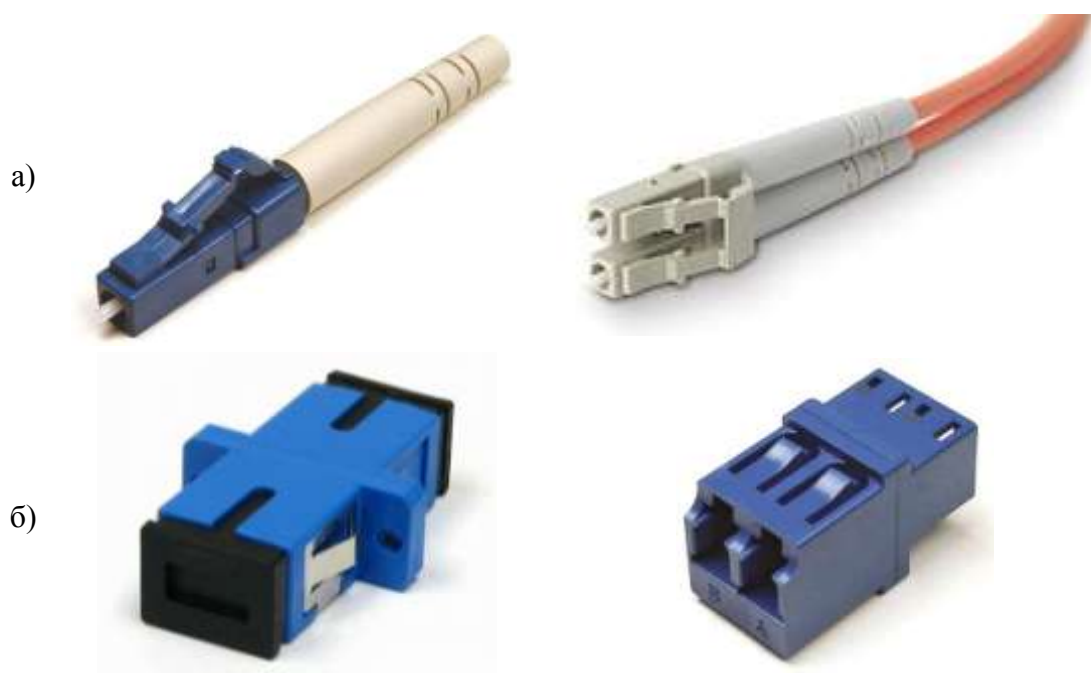


Рис. 2.23. Соединитель LC: а – симплексная и дуплексная вилки, б – симплексная и дуплексная розетки.

*Соединитель SC* (от английского Subscriber Connector – абонентский разъем) (рис. 2.22) считается наилучшим в классе немалогобаритных соединителей. Используемая в его конструкции защелка с фиксатором обеспечивает простое и надежное подключение и большую плотность установки соединителей на оптических распределительных панелях. Соединитель имеет прямоугольную форму и предусматривает возможность объединения двух разъемов в один дуплексный с помощью специальных фиксаторов на вилках или внешнего фиксатора.

*Соединитель LC* (Link Control) (рис. 2.23) является малогабаритным. Уменьшение размера соединителя достигнуто за счет уменьшения диаметра наконечника диаметром в 2 раза по сравнению с соединителем SC. Пластмассовый корпус вилки имеет прямоугольное сечение и оснащен внеш-

ней защелкой рычажного типа. Соединитель производится в симплексном и дуплексном вариантах.

Неразъемные соединители разделяются на сварные и механические. Механические соединители имеют относительно простую конструкцию. Основными узлами соединителя являются направляющие для двух ОВ (V-образные канавки) и устройство фиксации ОВ. Внутреннее пространство соединителя заполняется специальным гелем для защиты открытых участков ОВ от воздействия влаги. Одновременно гель обладает иммерсионными свойствами – его показатель преломления близок к показателю преломления сердцевины ОВ.

Для получения соединения двух ОВ их необходимо подготовить. Подготовка включает:

- освобождение концов ОВ от защитных покрытий и очистку их от пыли и загрязнений,
- подготовку торцов ОВ с помощью специального инструмента с алмазной режущей кромкой, который осуществляет скол ОВ перпендикулярно оптической оси.

Подготовленные ОВ вводят в соединитель через вводные каналы. При этом ОВ попадают в направляющие. Центрирующий элемент обеспечивает их юстировку. Фиксация ОВ внутри соединителя осуществляется путем его обжима.

Конструкция центрирующего элемента и фиксирующего механизма различна у разных производителей. На рис. 2.24 представлен механический соединитель производства ЗМ.

Вносимое механическими соединителями затухание существенно меньше, чем у разъемных соединителей, они обеспечивают стабильность характеристик и высокую надежность. Их использование наиболее удобно при проведении аварийного ремонта волоконно-оптических линий для технологической операции организации временной вставки.

На протяженных ВОСП используются преимущественно сварные неразъемные соединения, обладающие самой высокой надежностью и самыми низкими вносимыми потерями. Сварка ОВ производится с помощью специального устройства – сварочного аппарата. Подготовка ОВ к сварке осуществляется так же, как для механического соединения.

Перед сваркой на одно из сращиваемых ОВ надевают защитную термоусаживаемую гильзу (рис. 2.25), армированную стальным стержнем и предназначенную для защиты сварного соединения от механических воздействий и воздействий окружающей среды. Затем оба ОВ вводятся в юстировочное устройство сварочного аппарата и закрепляются.

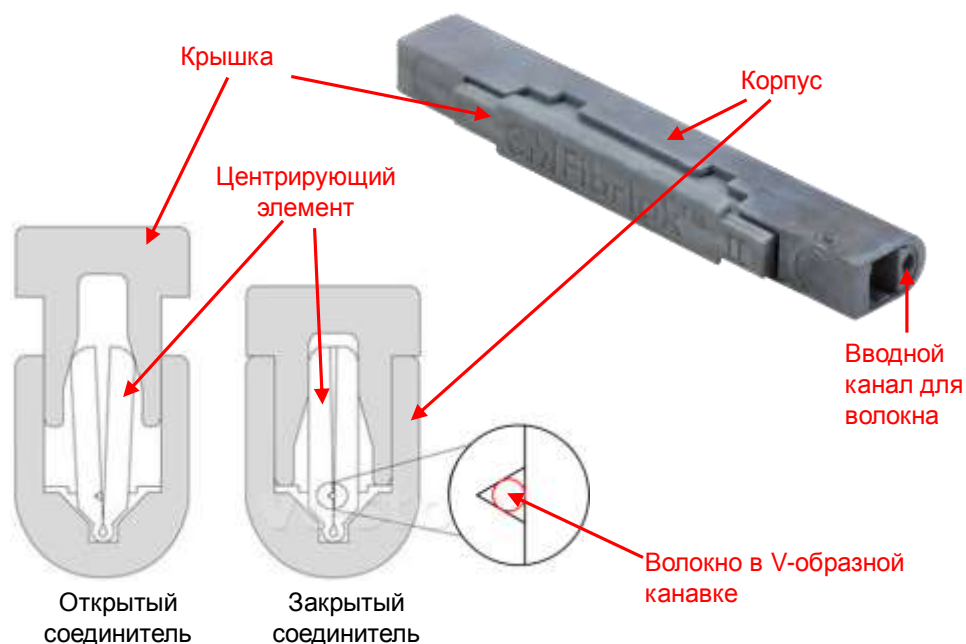


Рис. 2.24. Механический соединитель Fibrlok производства 3М.



Рис. 2.25. Термоусаживаемая гильза. Чертеж и внешний вид.

Юстировочное устройство представляет собой две расположенные напротив друг друга V-образные калиброванные канавки (рис. 2.26). Юстировка в современных сварочных аппаратах производится автоматически путем перемещения V-образных канавок вдоль осей  $x$ ,  $y$  и  $z$ .

Сварка происходит в поле электрической дуги, создаваемой между двумя электродами сварочного аппарата (рис. 2.27). Дуговой разряд обеспечивает нагрев концов свариваемых ОВ до температуры плавления кварца ( $1600-2000^{\circ}\text{C}$ ). Затем торцы волокон совмещаются микропроводкой держателя одного из волокон.

Механическая прочность полученного соединения проверяется путем тестирования соединения на разрыв с усилием 2 или 4.5 Н, которое осуществляет сварочный аппарат.

Завершающим этапом создания сварного соединения является смещение защитной термоусаживаемой гильзы на место соединения и ее термоусадка в специальной печи сварочного аппарата. В печи гильза нагревается за минуту до  $90-150^{\circ}$ , при этом градиент температуры направлен от ее цен-

тра к краям. Поэтому в процессе усадки гильза выдавливает весь воздух, герметизируя тем самым место сварного стыка.

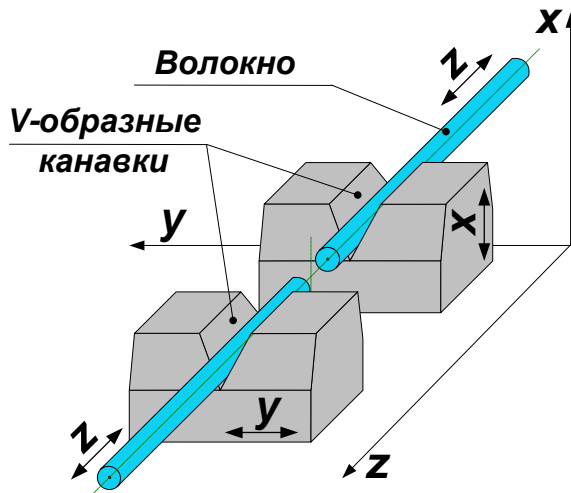


Рис. 2.26. Юстировка волокон в сварочном аппарате

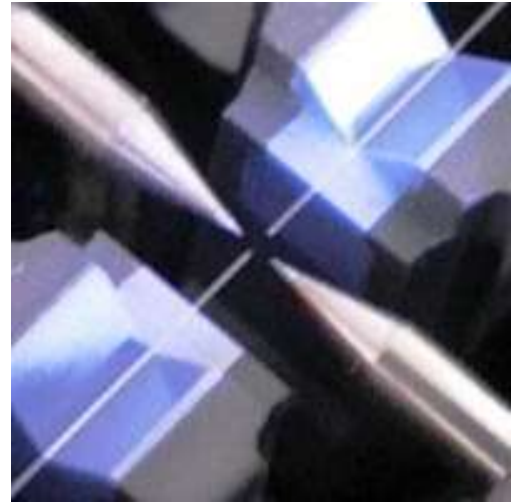


Рис. 2.27. Электроды сварочного аппарата.

Современные сварочные аппараты также позволяют вычислить или измерить потери, вносимые полученным соединением.

На рис. 2.28 показаны готовые сварные соединения ОВ в оптической кассете.



Рис. 2.28. Готовые сварные соединения ОВ в оптической кассете.

### 2.7.2 Оптические шнуры

Оптические шнуры разделяются на монтажные (пиг-тейлы) и соединительные (патч-корды). Оптический монтажный шнур (рис. 2.29а) представляет собой симплексный (одноволоконный) оптический миникабель, оконцованный с одной стороны оптическим разъёмным соединителем. Они

предназначены для присоединения к волокнам магистрального кабеля с помощью сварки или механического соединителя.

Оптический соединительный шнур (рис. 2.29б) представляет собой оптический симплексный или дуплексный (двухволоконный) миникабель, оконцованный с обеих сторон оптическими разъёмными соединителями. Основная функция оптического шнура – обеспечение соединения между различными активными сетевыми устройствами, между сетевым устройством и оптическим распределительным узлом, внутри оптического соединительного узла или кросса.

Монтажные и соединительные шнуры различаются длиной, типом ОВ, и типом оптического соединителя. Они могут изготавливаться из волокна в буферном покрытии диаметром 0.9 мм или из одноволоконного или двухволоконного малогабаритного оптического кабеля.

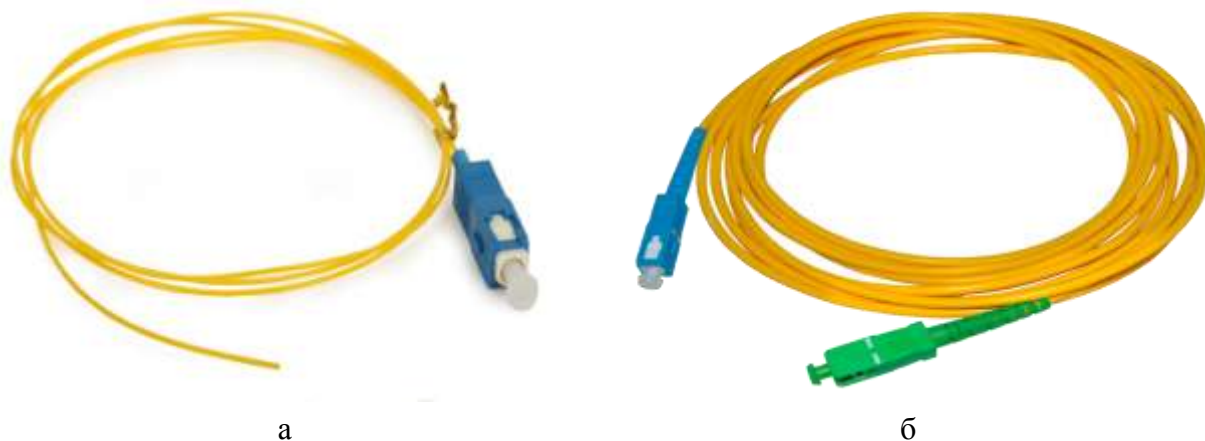


Рис. 2.29. Оптические шнуры: а – монтажный (пиг-тейл), б – соединительный (патч-корд).

### 2.7.3 Оптические разветвители

Во многих случаях возникают задачи разделения и объединения потоков излучения, проходящих по ОВ. Устройства, выполняющие эти операции, называют оптическими разветвителями (сплиттерами). Они находят применение для передачи нескольких сигналов по одному ОВ, организации дуплексной связи по одному ОВ, широко используются для непрерывного контроля (мониторинга) ответственных ВОЛС, входят в состав многих оптических измерительных приборов и поверочных установок.

Оптические разветвители можно разделить на древовидные и звездообразные (рис. 2.30).

Древовидный разветвитель  $1 \times m$  расщепляет один оптический сигнал на  $m$  направлений или выполняет обратную функцию объединения нескольких оптических сигналов в один общий сигнал. Мощность входного сигнала может разделяться между выходами поровну или неравномерно.



Звездообразные разветвители  $n \times m$  имеют  $n$  входных и  $m$  выходных портов. Оптический сигнал, пришедший на один из входов, равномерно распределяется между выходными портами.

Вносимые потери разветвителя складываются из собственных потерь, зависящих от технологии и качества его изготовления, и потерь разветвления, обусловленных разделением мощности входного сигнала между несколькими выходами. Потери разветвления представляют собой теоретический минимум вносимых потерь и для разветвителя с равномерным разделением мощности входного сигнала между  $m$  выходами составляют

$$a_{\text{л.сп}} = 10 \cdot \lg(m) \quad (2.22)$$



Рис. 2.30. Типы разветвителей: а) древовидный, б) звездообразный.

По конструкции различают сплавные волоконные (Fused Biconical Taper splitter, FBT splitter) и планарные (интегрально-оптические) разветвители (Planar Lightwave Circuit splitter, PLC splitter). Этапы производства сплавных и планарных разветвителей представлены на рис. 2.31.

Достоинствами сплавных разветвителей являются простота изготовления, а также возможность неравномерного деления мощности входного оптического сигнала между выходами. Недостатком сплавных разветвителей являются относительно большие собственные вносимые потери.

Планарный разветвитель имеет небольшие собственные вносимые потери, но позволяет разделять мощность входного оптического сигнала только поровну между всеми выходами.

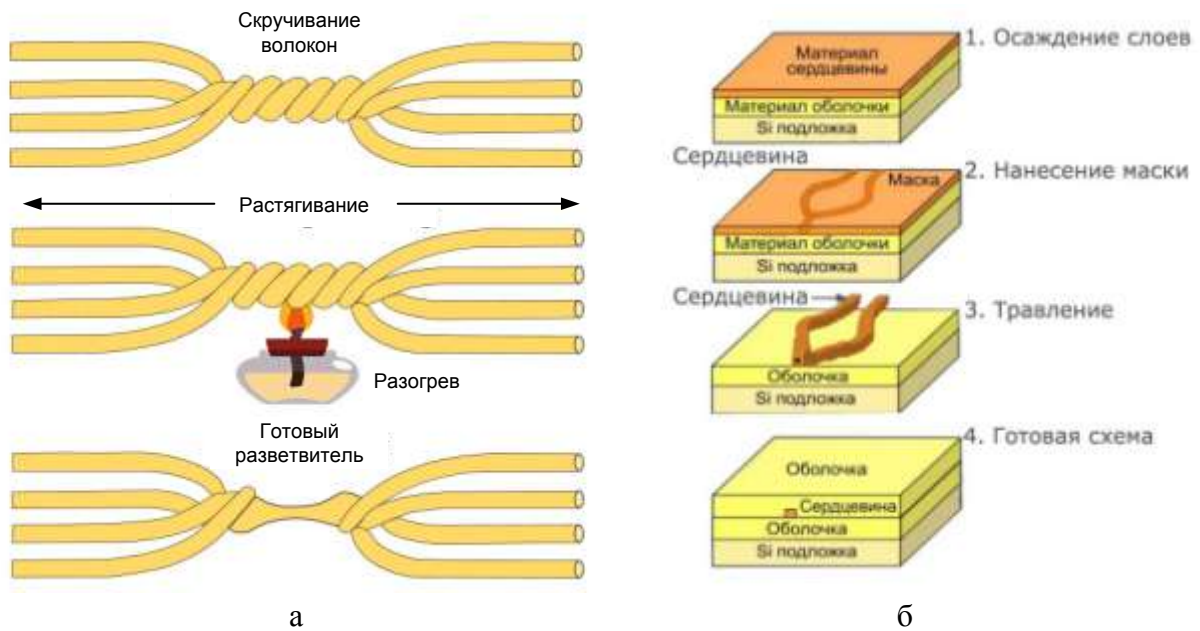


Рис. 2.31. Технологии производства сплавного (а) и планарного (б) разветвителя.

#### 2.7.4 Оптические фильтры

Оптические фильтры (волновые селекторы) предназначены пропускания или отклонения излучения в определенном диапазоне длин волн. В зависимости от пропускаемых длин волн различают фильтры нижних частот (длинноволновые), верхних частот (коротковолновые), заграждающие и полосовые фильтры. Они применяются в WDM системах, волоконно-оптических усилителях и системах мониторинга и контроля ОВ.

Широкое применение находят оптические интерференционные фильтры, основанные на интерференции света в многослойных тонких пленках (покрытиях) с различными показателями преломления. Тонкопленочный фильтр представляет собой многослойную структуру, состоящую из тонких слоев прозрачных диэлектрических материалов с различными показателями преломления, нанесенных последовательно друг за другом на оптическую подложку (рис. 2.32).

На каждой границе раздела между слоями из-за различия их показателей преломления часть падающего светового пучка проходит в следующий слой, а часть отражается обратно. Вышедшие из многослойной структуры отраженные прошедшие волны интерферируют, создавая отраженную от фильтра волну и прошедшую через фильтр волну. Результатом фильтрации в зависимости от конструкции фильтра является отраженная и/или прошедшая волны.

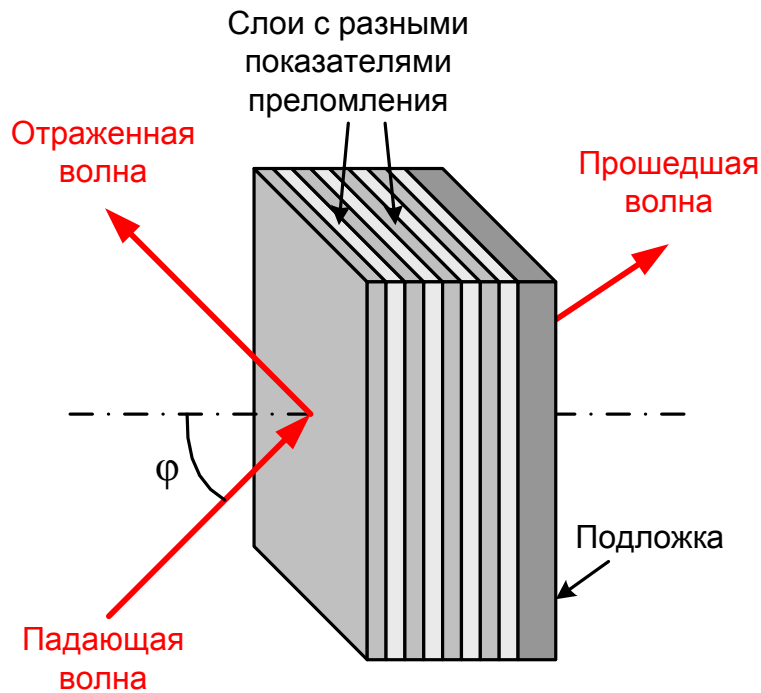


Рис. 2.32. Конструкция интерференционного фильтра.

Как Вы знаете из школьного курса физики, интерферирующие волны могут сложиться в фазе, образуя интерференционный максимум – волну удвоенной амплитуды, а могут сложиться в противофазе, подавив друг друга и образуя интерференционный минимум.

В многослойной структуре результат интерференции для прошедшей и отраженной волн оказывается зависящим от длины волны, то есть:

- излучение одних длин волн складывается в фазе, эти длины волн образуют полосу пропускания фильтра, в которой он имеет малые вносимые потери
- излучение других длин волн складывается в противофазе, эти длины волн образуют полосу задерживания фильтра, в которой он имеет большие вносимые потери.

Подобрав показатель преломления и толщину каждого слоя, можно получить фильтр с заданными полосами пропускания и задерживания для прошедшей и/или отраженной волн.

К спектральным характеристикам оптических фильтров, кроме полос пропускания и задерживания, относится переходная полоса – диапазон длин волн между полосой пропускания и полосой задерживания, для которых вносимые потери принимают промежуточные значения.

Вносимые затухание оптического фильтра определяется отдельно для полосы пропускания и для полосы задерживания.

Для современных интерференционных фильтров типовые значения вносимых потерь в полосе пропускания составляют 0.5-0.8 дБ, в полосе задерживания 25-50 дБ, а возвратные потери 50 дБ. У узкополосных оптические



ских фильтров полоса пропускания составляет 1-8 нм, а у широкополосных может достигать 60 нм.

Оптический фильтр можно создать также на основе однородной волоконной брэгговской решетки. Брэгговской решеткой называют оптическое устройство с периодически изменяющимся показателем преломления. Волоконная брэгговская решетка (ВБР) представляет собой участок ОВ, в сердцевине которого показатель преломления периодически изменяется в продольном направлении (рис. 2.33). На рисунке использованы следующие обозначения:  $n_1$  – показатель преломления сердцевины ОВ,  $n_2$  – показатель преломления оболочки ОВ,  $n_3$  – показатель преломления штриха ВБР (области с повышенным показателем преломления),  $n_0$  – показатель преломления окружающей среды. ВБР характеризуют шагом  $\Lambda$  – расстоянием между двумя соседними штрихами. Однородной или регулярной называют ВБР, шаг которой не зависит от расстояния вдоль нее.

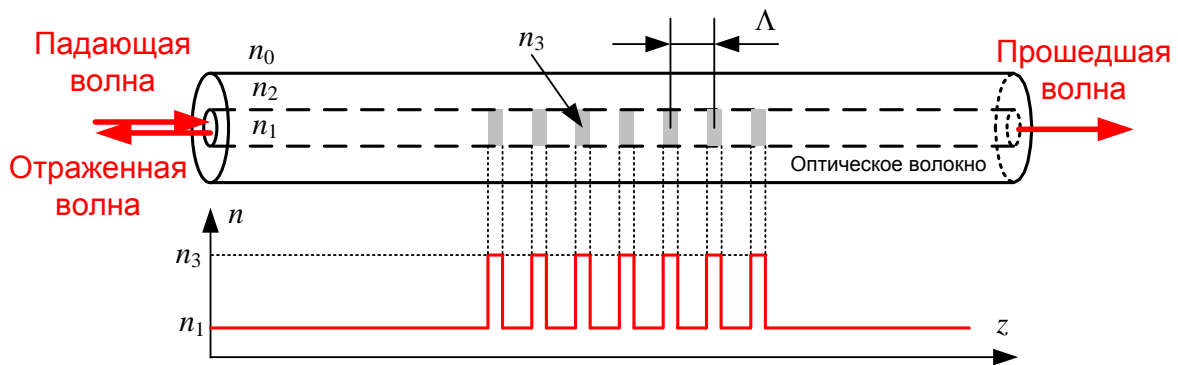


Рис. 2.33. Однородная волоконная брэгговская решетка.

Результатом фильтрации является отраженное решеткой излучение. Центральная длина волны отраженного излучения определяется условием Брэгга:

$$\lambda_0 = 2n_{eff} \Lambda \quad (2.23)$$

где  $n_{eff}$  – эффективный показатель преломления сердцевины ОВ на длине волны  $\lambda_0$ . Ширина полосы пропускания решетки обратно пропорциональна ее длине.

### 2.7.5 Технология спектрального уплотнения. Оптические мультиплексоры спектрального уплотнения

В п. 1.5 отмечалось, что для повышения скорости передачи информации в системах связи используют частотное мультиплексирование сигналов FDM. Частотное мультиплексирование с использованием несущих волн оптического диапазона в литературе обычно называют спектральным мультиплексированием и используют аббревиатуру WDM (Wavelength Division Multiplexing).

Получили распространение несколько разновидностей WDM, отличающихся плотностью размещения частот (длин волн) несущих:

- WWDM (Wide WDM) – разнесенное спектральное мультиплексирование с минимальным расстоянием между соседними несущими длинами волн более 20 нм;
- CWDM (Coarse WDM) – грубое спектральное мультиплексирование с минимальным расстоянием между соседними несущими длинами волн 20 нм, несущие длины волн лежат во 2 и 3 окнах прозрачности и стандартизованы следующим образом:  $\lambda_i = 1271 + 20 \cdot i$  нм ( $i = 0, 1, 2 \dots 17$ );
- DWDM (Dense WDM) – плотное спектральное мультиплексирование с расстоянием между соседними несущими длинами волн 1.6 нм и менее, несущие длины волн лежат в 3 окне прозрачности, стандартизованы частоты несущих:  $f_i = 193.1 + i \cdot \Delta f$  ТГц ( $\Delta f = 200, 100, 50, 25, 12.5$  или  $6.25$  ГГц,  $i = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ ).

Мультиплексирование модулированных оптических несущих осуществляют мультиплексоры спектрального уплотнения. Модулированные оптические несущие принято называть спектральными каналами.

Мультиплексоры спектрального уплотнения делятся на терминальные (Mux), которые устанавливаются на оконечных узлах связи (терминалах), и мультиплексоры ввода/вывода (Optical Add/Drop Multiplexer, OADM) (рис. 2.34), которые устанавливаются на транзитных (промежуточных) узлах связи.

OADM отличаются от терминальных тем, что некоторые спектральные каналы проходят через них транзитом, а другие вводятся и выводятся в транзитном узле связи.

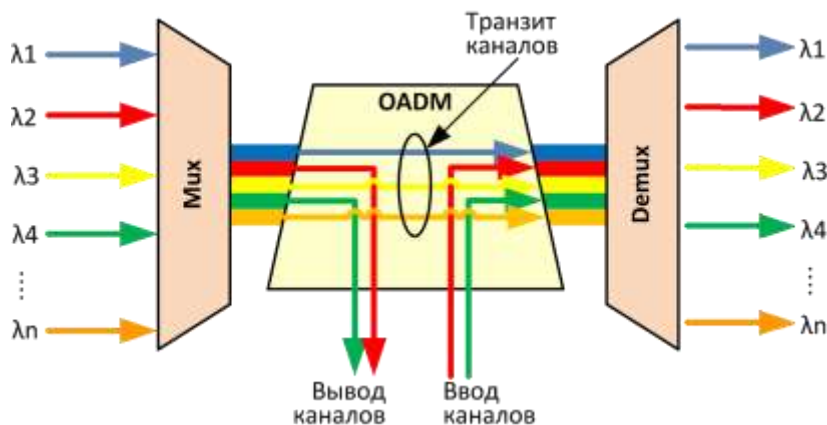


Рис. 2.34. Виды мультиплексоров WDM.

Для создания мультиплексоров спектрального уплотнения используются различные технологии.

### Терминальные мультиплексоры

На рис. 2.35 показана система интерференционных фильтров, образующая терминальный мультиплексор, работающий в режиме демультиплексирования. Каждый фильтр выделяет из падающего на него излучения один спектральный канал. Фильтры располагают под наклоном к оптической оси, чтобы отраженный свет не попадал обратно в систему. С выхода одного фильтра излучение попадает на вход следующего.

Аналогичную конструкцию можно создать на основе волоконных брэгговских решеток. Для разделения падающего и отраженного излучения используют циркуляторы (см. п. 2.7.6).

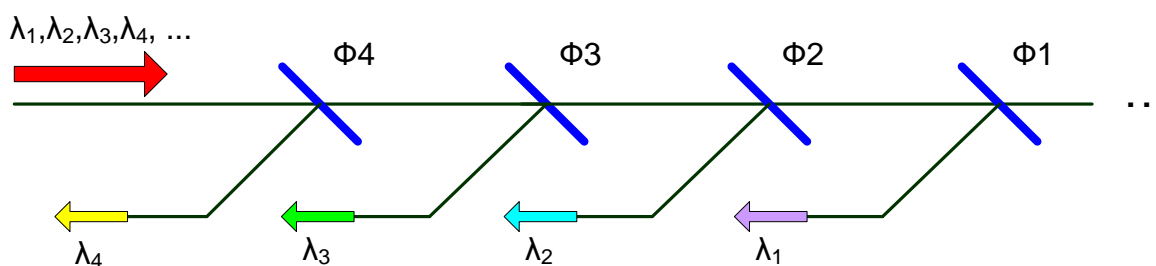


Рис. 2.35. Обработка многоволнового сигнала системой интерференционных фильтров.

Вносимые потери терминальных мультиплексоров на основе интерференционных фильтров и волоконных брэгговских решеток растут пропорционально числу спектральных каналов и различны для разных каналов, поэтому используются в системах с относительно небольшим числом спектральных каналов (до 32).

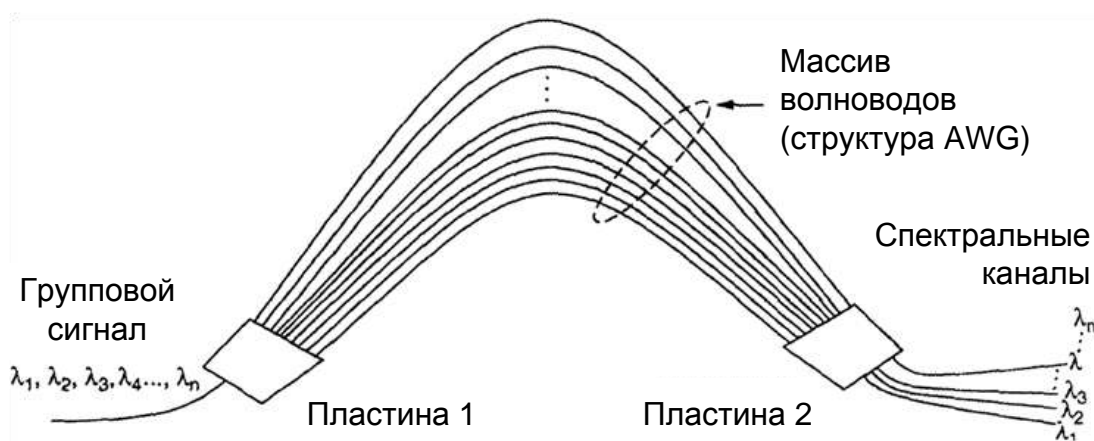


Рис. 2.36. Мультиплексор AWG.

Для WDM систем с большим числом каналов наиболее перспективным является интегрально-оптический мультиплексор (рис. 2.36) на основе массива волноводов, образующих фазосогласованную волноводную дифракционную решетку (Arrayed Waveguide Grating, AWG).

В конструкцию мультиплексора AWG входят две волноводные однородные пластины, которые соединяются массивом из  $m$  волноводов. Длины соседних волноводов в массиве отличаются на фиксированную величину  $\Delta L$ .

Рассмотрим работу устройства в режиме демультиплексирования. Групповой сигнал через входной планарный волновод попадает в 1-ю пластину, проходит через нее и захватывается массивом волноводов. Каждый волновод массива, таким образом, канализирует часть излучения группового сигнала. Поскольку все волноводы имеют разную длину, в каждом из них излучение приобретает свой фазовый сдвиг. Во 2-й пластине происходит интерференция излучений, прошедших по разным волноводам, в результате которой в каждом из выходных волноводах излучение определенного спектрального канала складывается в фазе, а другие каналы при этом оказываются в противофазе (подавляются).

Вносимые потери мультиплексора WDM мало зависят от числа объединяемых или разделяемых спектральных каналов и практически одинаковы для всех каналов.

### Мультиплексоры ввода/вывода с использованием оптических циркуляторов

Для создания мультиплексоров ввода/вывода OADM обычно используются системы интерференционных фильтров или волоконных брэгговских решеток. На рис. 2.37 представлен мультиплексор OADM на основе ВБР.

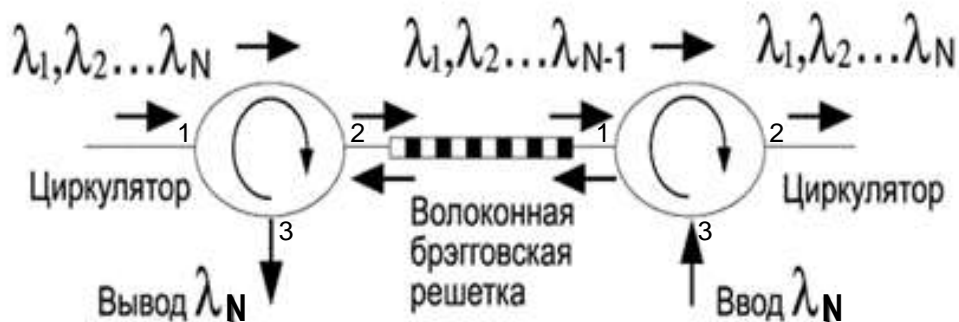


Рис. 2.37. Мультиплексор ввода/вывода на основе ВБР.

Многоволновой сигнал CWDM или DWDM с длинами волн  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$  поступает в порт 1 первого оптического циркулятора (ОЦ1), который направляет входные сигналы по кругу на порт 2, к которому подключена ВБР, имеющая резонанс на длине волны  $\lambda_N$ . ВБР пропускает все сигналы в порт 1 второго оптического циркулятора (ОЦ2), кроме сигнала на длине волны  $\lambda_N$ , который возвращается к порту 2, в соответствии с функцией циркулятора, передается по кругу к порту 3 и выводится к одному абоненту

этого узла. Сигналы прошедшие ВБР, поступают в порт 1 ОЦ2, проходят через него в порт 2 ОЦ2 и далее к следующим ВБР и циркуляторам. Сигнал от абонента на длине волны  $\lambda_N$  поступает в порт 3 ОЦ2, который отправляет его через свой порт 1 в ВБР. ВБР возвращает этот сигнал в порт 1 ОЦ2 и он выходит через порт 2 соединяясь с остальными сигналами.

### 2.7.6 Оптические аттенюаторы

Аттенюаторы используются для уменьшения мощности оптического сигнала. Различают аттенюаторы с фиксированным и переменным затуханием.

Фиксированные аттенюаторы (рис. 2.41а) имеют установленное изготовителем значение затухания. Аттенюаторы с переменным затуханием (рис. 2.41б) позволяют изменять величину затухания в некоторых пределах путем поворота оправы с помощью специального ключа. Величина затухания контролируется с помощью измерения мощности излучения. Для проведения измерений выпускаются аттенюаторы с переменным затуханием, имеющие экран с индикацией установленного затухания.



Рис. 2.41. Оптические аттенюаторы с фиксированным (а) и переменным (б) затуханием.

Вносимым затуханием переменного аттенюатора принято называть величину начального затухания, которое составляет обычно 0.5-1 дБ.

### 2.7.7 Компенсаторы хроматической дисперсии

Вы уже знаете, что дальность связи в ВОСП может ограничиваться одним из двух факторов – затуханием или дисперсией. Основным видом дисперсии в системах дальней связи является хроматическая дисперсия, которую можно компенсировать оптическими методами. Устройства, осуществляющие такую компенсацию, называются компенсаторами хроматической дисперсии.

Как отмечалось в п. 2.4.2, хроматическая дисперсия обусловлена различием скоростей распространения отдельных спектральных составляющих оптического сигнала в волокне. Принцип ее компенсации заключается в выравнивании скоростей распространения спектральных составляющих. Для этого зависимость скорости распространения излучения от длины вол-

ны в компенсаторе должна быть обратной аналогичной зависимости в волокне.

Наиболее широкое распространение получили компенсаторы хроматической дисперсии на основе специальных оптических волокон, называемых волокнами для компенсации дисперсии (Dispersion Compensation Fiber, DCF), и компенсаторы на основе волоконных брэгговских решеток с переменным периодом (рис. 2.42).



а



б

Рис. 2.42. Внешний вид компенсатора хроматической дисперсии на основе специального ОВ (а) и волоконной брэгговской решетки (б).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение хочется еще раз подчеркнуть, что в нашем университете Вы получите современную, актуальную профессию, востребованность которой будет только возрастать. Во всем мире инфокоммуникации являются одной из самых быстроразвивающихся наукоемких и высокотехнологичных отраслей мировой экономики, в развитие которой вкладываются большие ресурсы.

Системы связи относятся к наиболее сложным объектам, когда-либо создаваемым человеком. Без них уже не может функционировать мировое сообщество. Развитие инфокоммуникационной отрасли носит опережающий характер по сравнению с другими отраслями, и впитывает в себя основные научные достижения. К созданию современных телекоммуникационных систем причастны почти все известные физики прошлого и настоящего: от Ньютона и Гюйгенса, Френеля и Декарта до большинства нобелевских лауреатов по физике от М. Планка и А. Эйнштейна до А. М. Прохорова, Ч. Таунса, Н. Г. Басова и Ж. И. Алферова.

Особое значение для инфокоммуникационной отрасли имеет развитие оптической связи, разработка и внедрение оптических и оптоэлектронных технологий. Выбрав профиль «Оптические системы и сети связи», Вы будете работать в самой современной, перспективной и интересной области науки и техники. Помимо серьезной общей подготовки Вы также изучите оптические методы передачи, хранения и обработки информации, методы и приборы для оптических измерений, особенности оптических датчиков.

СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича и кафедра «Фотоники и линий связи», являющаяся выпускающей по профилю «Оптические системы и сети связи», поддерживают партнерские отношения с ведущими компаниями инфокоммуникационной отрасли, которые предоставляют нашим лабораториям современное оборудование, обеспечивают практику студентов и рабочие места выпускникам. Основными партнерами являются: ОАО «Ростелеком», ОАО «Мегафон», ОАО «МТС», ОАО «ВымпелКом» («Билайн»), компания «Т8», ОАО «Супертел», ГРУППА СТР, ЗАО «Связьстройдеталь», Группа компаний «ОПТЭН», НПК «Связьсервис», НПП «Измерительная техника связи», ОАО «Лентелефонстрой», ОАО «Гипросвязь», ЛОНИИС, ЛОНИИР, ООО «Сименс», ООО «Трансвязь», Группа компаний «ВестКолл», ООО «Волиус» и многие другие.

Выпускающая кафедра располагает высококвалифицированными преподавателями и семью учебно-исследовательскими лабораториями, оснащенными современным оптическим телекоммуникационным, технологическим и измерительным оборудованием. В трех лабораториях развернуты действующие оптические сети. На кафедре ведется большая научная работа в области оптической связи, к которой привлекаются студенты. Кафедра

поддерживает творческие контакты с отечественными и иностранными учеными и преподавателями.



# ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ИСТОРИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ В РОССИИ

## Начальный этап развития

Отсчет истории высшего образования в России начинается с создания первого высшего учебного заведения, которым была Славяно-греко-латинская академия, основанная в 1687 году в Москве по инициативе Симеона Полоцкого – наставника детей русского царя Алексея Михайловича. Академия создавалась по образцу западных университетов с доступом к обучению всех сословий.

Следующим этапом в развитии высшего образования в России следует считать период правления Петра I. Его реформаторская политика и процесс развития промышленности, торговли, военного дела, науки и образования требовали новых специалистов для страны. В связи с этим были открыты Школа математических и навигационных наук (1701 г.), Артиллерийско-инженерная и медицинская школы (1707 г.), Морская академия (1715 г.), медицинская школа (1716 г.), инженерная школа (1719 г.).

В 1724 году распоряжением Петра I в Санкт-Петербурге была создана Академия наук и открыт первый классический университет в России – Академический университет, официально признанный предшественником Санкт-Петербургского государственного университета. В 1755 году благодаря первому русскому академику М. В. Ломоносову был создан Московский университет.

Во второй половине XVIII века в Российской империи, как и во многих странах вследствие изобретения паровой машины происходит промышленный переворот. И как следствие возникает необходимость в квалифицированных кадрах с инженерным образованием. В связи с этим со второй половины XVIII века начали создаваться первые технические высшие учебные заведения:

– Санкт-Петербургский государственный горный университет – первое в России высшее техническое учебное заведение, был основан в 1773 году указом императрицы Екатерины II, как воплощение идей Петра I и М. В. Ломоносова о подготовке собственных специалистов для развития горнозаводского дела;

– Главное инженерное училище (1810 г);

– Московский государственный технический университет, впоследствии высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана (1830 г).

В начале XIX века система российского государственного образования включала приходские училища, уездные училища, губернские гимназии и университеты, преемственные между собой. Все образовательные учреждения были разделены на учебные округа во главе с попечителями. Центрами учебных округов становились университеты. Для подготовки учителей

лей при них открылись педагогические институты, ведущую роль среди которых сыграл самостоятельный педагогический институт в Петербурге (1804 г.), реорганизованный в 1816 году в Главный педагогический институт. В 1819 году на его базе был создан Санкт-Петербургский университет (ныне Санкт-Петербургский государственный педагогический университет).

При Николае I образование стало более консервативным. Высшие учебные заведения были лишены автономии, ректоры, деканы и профессора, стоявшие во главе кафедр, стали назначаться Министерством народного просвещения. Поступить в университеты могли только выпускники классических гимназий и те, кто сдал экзамены за курс классической гимназии. Выпускники других типов гимназий (технических, сельскохозяйственных и других) могли поступать в другие высшие учебные заведения. В дальнейшем автономия университетам была возвращена в ходе реформ Александра II в 1863 году. Она была снова отменена Александром III и восстановлена Николаем II, который отменил ограничения на прием студентов.

В Российской империи использовалась немецкая система образования, имевшая три ступени: *первая* – средняя (10-летняя) школа; *вторая* (среднее профессиональное и специализированное гуманитарное образования) – столичные и губернские коммерческие, политехнические и др. училища; *третья* (высшее и инженерное образование) – институты и университеты.

### **Советский период развития**

К началу 1917 года в России насчитывалось 65 высших учебных заведений. Большинство из них располагалось в Петрограде, Москве, Киеве и некоторых других городах Европейской части страны, а также в Средней Азии и Белоруссии.

В период послереволюционной национализации промышленности (1917–1930) для закрепления и умножения позиций России в промышленности советское правительство стало активно заниматься проблемой подготовки высококвалифицированных специалистов. Декретом СНК РСФСР от 11 декабря 1917 года все учебные заведения, в том числе вузы, были переданы в ведение Наркомпроса РСФСР, а 4 июля 1918 года все вузы были объявлены государственными учебными заведениями.

Большое внимание советское правительство уделяло созданию новых вузов. В 1918–1919 годах в крупных промышленных центрах и союзных республиках были созданы десятки новых учебных заведений, такие как Уральский, Азербайджанский, Белорусский, Нижегородский университеты и другие вузы. Университеты активно стали готовить преподавателей для вновь открываемых технических учебных заведений. Правительством принимается решение иметь в каждом областном (краевом) центре по университету.

В системе высшего образования происходит процесс пролетаризации. 2-го августа 1918 года был издан декрет «О правилах приема в высшие учебные заведения». Для привлечения в состав студентов рабоче-крестьянской молодежи отменялись вступительные экзамены и плата за обучение, устанавливались стипендии для студентов из пролетарских слоев.

Одной из практических мер для активного получения трудящимися высшего образования стала организация подготовительных курсов для рабочих и крестьян, желающих поступить в вузы. На базе этих курсов в 1920 году были созданы рабочие факультеты (рабфаки), целью которых было дать детям рабочих и крестьян достаточный запас знаний для успешного поступления и обучения в вузе. Поступление на рабфаки осуществлялись по рекомендации профсоюзов, фабрично-заводских комитетов, исполнительных комитетов и иных органов власти.

Несмотря на трудности, связанные с гражданской войной, мероприятия большевиков в области высшего образования привели к тому, что число вузов к 1920 году увеличилось почти в 2,5 раза.

Декретом от 1-го октября 1918 года были отменены ученые степени и звания и связанные с ними права и преимущества. Из всех профессорско-преподавательских должностей сохранялись только должности профессора и преподавателя. Профессорами могли быть избраны по конкурсу лица, известные своими научными трудами или иными работами по своей специальности либо своей научно-педагогической деятельностью.

Ученые степени были восстановлены постановлением Совета народных комиссаров СССР от 13 января 1934 года № 79 «Об ученых степенях и званиях». Были установлены ученые степени кандидата наук и доктора, а также ученые звания:

- ассистента (в высших учебных заведениях) или младшего научного сотрудника (в научно-исследовательских учреждениях);
- доцента (в высших учебных заведениях) или старшего научного сотрудника (в научно-исследовательских учреждениях);
- профессора (в высших учебных заведениях) или действительного члена научно-исследовательского учреждения.

В 1921 году Советом народных комиссаров РСФСР принимается «Положение о высших учебных заведениях», которым вводилась новая система руководства вузами. Вузы управлялись правлениями, факультеты – президиумами. Кафедры упразднялись, вместо них создавались предметные комиссии и отделения. Директор вуза назначался Наркомпросом РСФСР.

В 1923 году в вузах была введена плата за обучение. От платы освобождались военные, работники образования, крестьяне, инвалиды, безработные, пенсионеры, стипендиаты, Герои СССР (в том числе полные кавалеры ордена Славы) и Герои Социалистического Труда. Устанавливался

лимит на число бесплатных мест в вузах. Плата за обучение в вузах сохранялась до 1950-х годов.

В 1929 году Наркомпрос РСФСР разрешил студентам технических специальностей учиться по заочной форме в отраслевых вузах. А 29 августа 1938 года Постановлением Совета народных комиссаров СССР «О высшем заочном обучении» был определен перечень специальностей, по которым было возможно получение образования по заочной форме, а также создана сеть самостоятельных заочных вузов. Для заочников были введены дополнительные оплачиваемые отпуска по месту работы.

В 1930 году вузы получали ведомственное подчинение и разделялись по отраслевому принципу. Были предприняты первые шаги к разделению науки и высшего образования. Научные подразделения выделялись в отдельные научно-исследовательские институты и получали ведомственное подчинение или включались в систему Академии наук.

Быстрое индустриальное развитие СССР требовало еще больше квалифицированных инженеров. Вместе с увеличением набора в вузы в 1936—1938 годах проводилось упорядочение их организации. Так, были введены единые учебные планы и программы, определена система штатных преподавателей, учреждена (восстановлена) система учёных степеней и званий. В то же время в вузах создавалась аспирантура. Защита аспирантами кандидатских диссертаций началась с 1934 года.

В 1936 году совместным постановлением Совета народных комиссаров СССР и Центрального комитета ВКП(б) было принято ряд важных мер в сфере высшего образования. Были чётко определены порядок приема, организации учебного времени и работы, вопросы руководства вузами и дисциплины в высшей школе. Были восстановлены деканаты и кафедры, должности профессорско-преподавательского состава, прежняя система занятий (лекции профессоров и доцентов, практические занятия с преподавателями и производственная практика), срок приема был ограничен (до этого вузы устанавливали эти сроки произвольно).

В период Великой Отечественной войны вузам СССР был нанесен значительный ущерб. Многие вузы были разрушены, часть вузов переведена в тыл. Для продолжения подготовки специалистов с 1943 года в тылу, в основном в восточных районах СССР, открылось более 50 вузов. В послевоенное время многие из вузов пришлось восстанавливать практически заново.

С 1950-х годов на основании Постановления Совета Министров СССР и ЦК КПСС от 30 августа 1954 года № 1836 стала применяться практика распределения выпускников вузов по специальности и квалификации, приобретенными ими в вузе.

В СССР в 1960–1980-е годы высшее образование было бесплатным. В вузы по единым правилам приёма на дневную форму обучения принимались имеющие законченное среднее образование лица в возрасте до 35 лет.

На вечернюю и заочную формы обучения ограничений в приеме по возрасту не было. При зачислении в вузы преимущественное право предоставлялось лицам, имеющим стаж практической работы. Лицам, окончившим высшие учебные заведения, присваивалась квалификация в соответствии с полученной специальностью, выдавались диплом и нагрудный знак установленного образца.

Советская система образования, как и до 1917 года, продолжала базироваться на трёх уровнях: среднее школьное образование (в том числе неполное или непосредственно рабочее профессиональное) образование; среднее специальное профессиональное образование, – это ссузы (техникумы); высшее (на базе полного среднего или среднего специального образования) – институты и университеты.

Несмотря на то, что высшее образование в советский период переживало быстрый количественный рост, но качество подготовки специалистов во многих вузах оставалось неудовлетворительным, что отмечалось рядом правительственных документов. Особенно низкое качество обучения наблюдалось в национальных республиках.

### **Российское высшее образование после 1992 года**

В России до начала процессов демократизации функционировали только государственные вузы, управление которыми осуществлялось центральным органом управления образования. Начиная с 1993 г, наблюдается значительный рост численности негосударственного сектора высшего образования. За счет создания новых вузов и выделения филиалов вузов в самостоятельные учреждения общее число вузов резко выросло. Так, на 1-ое января 2012 г. в Российской Федерации насчитывалось 1046 образовательных учреждений, реализующих программы высшего профессионального образования (из них государственных вузов – 609, негосударственных – 437) и около 2100 филиалов. Произошло и значительное увеличение численности студентов высшего образования. Если в 1993 году в российских вузах обучалось чуть более 2,5 млн. студентов, то численность студентов в 2012 году составила 6 млн. студентов.

Пожалуй, самое важное событие в развитии системы современного высшего образования произошло в 2003 году, когда Россия на Берлинской встрече министров образования европейских стран присоединилась к Болонскому процессу, подписав Болонскую декларацию о создании к 2010 году единого и гармоничного Европейского пространства высшего образования.

В рамках реформы, связанной с подписанием этой декларации, к настоящему времени сформировались следующие уровни высшего образования бакалавриат, магистратура, аспирантура. По отдельным направлениям

подготовки сохранился уровень образования «специалитет» существовавший в России до присоединения к Болонскому процессу.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ИСТОРИЯ СПБ ГУТ ИМ. ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА**

### **Становление и развитие Университета в период с 1929 по 1956 г.**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича был создан в годы первой пятилетки. Начавшаяся тогда индустриализация СССР вызвала потребность в большом числе инженеров-связистов. В связи с этим в 1929 году было принято решение о создании в Ленинграде Высших курсов инженеров связи, а 13 октября 1930 г. вышло постановление Совнаркома СССР об организации Ленинградского института инженеров связи (ЛИИС). На первый курс было принято 662 человека.

В ЛИИС были организованы факультеты: телефонный, телеграфный, радиотехнический и инженерно-экономический. В том же году открылся рабочий факультет (рабфак) и техникум связи, составившие с институтом единую структуру, названную Ленинградским учебным комбинатом связи (ЛУКС).

Первым директором ЛИИС стал профессиональный революционер, член ВКПБ с 1901 года, член Общества старых большевиков – Парижер Семен Савич. Парижер С.С. окончил политехнический институт в Карлсруэ (Германия). Руководил институтом с 16.08.1930 г по 01.09.1931 г. В последующие годы институтом руководили:



**Парижер Семен Савич (1875-1932) – директор ЛИИС с 16.08.1930 по 01.09.1931**



**Панов Николай Николаевич** – директор ЛИИС в 1931-1935 гг



**Иванов Константин Евстафьевич** – директор ЛИИС в 1935-1937 гг



**Сидоров Федор Ефимович** – директор ЛИИС в 1937-1941 гг, директор ЛЭИС в 1944-1945 гг



**Каменев Михаил Андреевич** – директор ЛЭИС в 1941-1944 гг



**Степанов Сергей Васильевич** – директор ЛЭИС в 1945-1956 гг

Привлечение с самого начала деятельности ЛИИС к учебному процессу лучших в стране специалистов по радиотехнике и технике проводной связи обеспечивало высокое качество подготовки специалистов связи. Одним из крупнейших специалистов, приглашенных для работы в институте был советский ученый, один из пионеров радиотехники – Михаил Александрович Бонч-Бруевич, имя которого присвоено институту в 1940 году Постановлением Совета народных комиссаров СССР от 8 июня.

Героическими страницами в истории института являются годы Великой Отечественной войны. В первые дни войны подавляющее большинство профессорско-преподавательского состава, сотрудников и студентов ушли на фронт. Кафедры перестроились на выполнение военных заказов. Учебно-производственные мастерские выпускали снаряды, изготавливались приборы для военно-морского флота, радиостанции. Работники мастерских не отходили от станков по 17-18 часов в сутки, в мастерских ели, спали, работали. Все было подчинено интересам фронта.

В марте 1942 года институт был эвакуирован в Кисловодск, а затем в Тбилиси. Оборудование и имущество вывезено не было, для их охраны осталась небольшая группа обслуживающего персонала. Для 16 студентов старших курсов, оставшихся в Ленинграде, удалось организовать учебные занятия, которые не прерывали даже во время обстрелов и бомбежек.

После прорыва блокады в январе 1943 года положение в Ленинграде улучшилось, что позволило начать в августе 1944 года реэвакуацию института, которая проходила в два этапа и была завершена в январе 1945 г.

Далеко не все сотрудники вернулись в институт после войны: многие погибли на фронте и в блокаду, другие остались в Тбилиси. И все же «лэи-совцы» самоотверженно и с удивительным энтузиазмом в предельно сжатые сроки восстановили довоенный уровень.

К 1950 году была полностью восстановлена лабораторно-техническая база института. Подготовку специалистов вели два факультета дневной формы обучения – факультет радиосвязи и радиовещания и факультет телефонно-телеграфной связи а также факультет вечернего обучения. В 1955 году начал осуществляться набор на заочный факультет. Общее число обучающихся в ЛЭИС студентов по состоянию на 1956 г составило порядка 5000 человек.

### **Михаил Александрович Бонч-Бруевич (1888 – 1940)**

Михаил Александрович Бонч-Бруевич родился 21 февраля 1888 г. в Орле. Окончил Киевское коммерческое училище, Петербургское Николаевское военно-инженерное училище, Офицерскую электротехническую школу.

Свою первую научную работу по теории искрового разряда М.А. Бонч-Бруевич выполнил в 1907-1914. Она была опубликована в виде двух статей в журнале Русского физико-химического общества.

При поддержке начальника Тверской радиостанции М.А. Бонч-Бруевич в подсобном помещении радиостанции организовал мастерскую, где смог наладить выпуск отечественных электровакуумных ламп. Этими лампами комплектовался радиоприемник, производившийся в мастерской Тверской радиостанции по заказу Главного военно-технического управления русской армии.



В начале 20-х годов в Нижегородской лаборатории под руководством М. А. Бонч-Бруевича велись исследования методов радиотелефонирования. 15 января 1920 года был произведен первый успешный опыт радиотелефонной передачи из Нижнего Новгорода в Москву.

В целях обеспечения постановления Совнаркома о создании центральной телеграфной станции с радиусом действия в 2000 вёрст М.А. Бонч-Бруевич в 1922 году предложил оригинальное конструкторско-техническое решение мощной генераторной лампы.



Под его руководством проектировалась и в 1922 году была построена в Москве первая мощная радиовещательная станция (Шуховская башня), начавшая свою работу в августе 1922 года — Московская центральная радиотелефонная станция, имевшая мощность 12 кВт. 22 и 27 мая 1922 года М. А. Бонч-Бруевич организовал пробные передачи по радио музыкальных произведений из студии Нижегородской лаборатории, а 17 сентября 1922 года был организован первый в Европе радиовещательный концерт из Москвы.

В 1922 году М.А. Бонч-Бруевичем была изготовлена лабораторная модель радиотехнического устройства для передачи изображения на расстоянии, названная им радиотелескопом.

В середине 1920-х годов М. А. Бонч-Бруевич занялся исследованием использования коротких радиоволн для радиосвязи. Убедившись, что короткие радиоволны прекрасно подходят для организации и радиотелеграфной, и радиотелефонной связи, в Нижегородской радиолaborатории разработали и спроектировали аппаратуру для такого вида радиосвязи. В 1926

году на основе этой аппаратуры была запущена в эксплуатацию магистраль коротковолновой связи между Москвой и Ташкентом.

С 1921 г. занимал должность профессора кафедры радиотехники Нижегородского университета, с 1922 г. – профессора Московского высшего технического университета им. Баумана. Учёным запатентовано и передано промышленности около 60 изобретений.

В 1931-1940 гг. М.А. Бонч-Бруевич вёл педагогическую работу в Ленинградском электротехническом институте связи (ЛЭИС) в должности профессора кафедры теоретической радиотехники, заведовал радиофакультетом, был заместителем директора института по учебной части. С 1931 г. являлся членом-корреспондентом Академии наук СССР, в 1934 г. получил звание доктора наук.

Скончался 7 марта 1940 г. В том же году Постановлением Совета народных комиссаров СССР от 8 июня ЛЭИС было присвоено имя профессора М.А. Бонч-Бруевича.

### Университет в период 1956-1989 гг.

Второе рождение ЛЭИС наступило с приходом в 1956 году на должность ректора института К.Х. Муравьева. При нем институт расширился за счет второго учебного корпуса на наб. р. Мойки д. 65. Были введены в строй два общежития на 700 и 600 мест, открыты полигон и база отдыха в Воейково, типография в Красном селе. Было организовано 12 отраслевых научно-исследовательских лабораторий, а в 1963 г. возник филиал института при НПО им. Коминтерна, который стал готовить инженеров для научно-производственных объединений и предприятий Ленинграда. За годы существования филиала было подготовлено более 4000 высококвалифицированных инженеров для научно-производственных объединений и предприятий Ленинграда, таких как «Красная Заря», «Ленинец», «Дальняя связь» и других.

В 1960 году был организован новый радиотехнический факультет с задачей подготовки инженеров широкого профиля по двум специальностям: конструирование и технология производства радиоаппаратуры и радиотехника. За первые четыре года радиотехнический факультет вырос более чем в два раза, в связи с чем в 1964 году из его состава был выделен радиокон-



**Муравьев Константин Хрисанович** – ректор ЛЭИС в 1956-1971 гг

структурский факультет. В это же время образован деканат по работе с иностранными студентами.

Семидесятые – начало восьмидесятых годов XX столетия в нашей стране ознаменовались замедлением темпов экономического роста, эти годы в истории остались под определением “застой”. Несмотря на это, институт продолжал готовить хороших специалистов и не сходил с дистанции ведущего вуза в области подготовки инженеров связи. 1972 год дал жизнь двум ведущим связным факультетам – МЭС (многоканальная электросвязь) и АЭС (автоматическая электросвязь). Началось строительство учебно-лабораторного корпуса на пр. Большевиков (1978—1992 гг.).

В период с 1972 по 1989 гг институтом руководили:



**Миронов Виктор Михайлович** – ректор ЛЭИС в 1972-1975 гг



**Куликовский Юрий Петрович** – ректор ЛЭИС в 1975-1983 гг



**Гомзин Вадим Николаевич** – ректор ЛЭИС в 1983-1989 гг

### **Университет в период с 1990 г. по настоящее время**

К началу 90-х годов, во времена «перестройки» руководство института понимало, что вместе со страной следует радикально менять стратегию развития института, использовать новые методы работы для достижения вставших перед отраслью связи и страной. В 1992 г. в институте был образован факультет экономики и управления.

В последнее десятилетие XX века среди важнейших решений руководства страны, призванных обеспечить структурную модернизацию системы высшего образования, является предоставление ряду вузов статуса университета. В соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.09.1992 № 1691-р, и приказом Госкомвуза России от 05.07.1993 № 55 Ленинградский электротехнический институт связи им. проф. М. А. Бонч-Бруевича переименован в Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций а приказом Минсвязи России от 11.08.1993 № 194 Университету возвращено имя проф. М.А. Бонч-Бруевича

В качестве приоритетных научных направлений было определено развитие цифровых систем передачи информации, внедрение волоконно-оптических линий связи, развитие информационных сетей, мобильных сетей связи. Созданы новые кафедры: цифровой обработки сигналов, сетей связи, информационной безопасности телекоммуникационных систем, биомедицинской техники, информационных управляющих систем, глобальных информационных технологий, глобальных инфокоммуникационных сетей и систем.

На базе СПб ГУТ создан Санкт-Петербургский центр электросвязи - отраслевой центр подготовки и повышения квалификации специалистов. Создан департамент фундаментальной подготовки, обеспечивший обучение в университете специалистов по системе «бакалавр-магистр». В 1998г. был создан гуманитарный факультет. В этот же период времени в состав СПб ГУТ включен Санкт-Петербургский колледж телекоммуникаций филиалами университета стали Архангельский и Смоленский колледжи телекоммуникаций, организовано государственное образовательное учреждение Лицей при СПбГУТ, создан институт информационных технологий.

5 сентября 2008 г состоялась торжественная церемония открытия нового реконструированного учебного корпуса университета на пр. Большевиков, д. 22. Реконструкция корпуса позволила организовать учебный процесс на качественно новом уровне.



В период с 1972 по 1989 гг институтом руководили:



**Сиверс Мстислав Аркадьевич** – ректор ЛЭИС в 1989-1996 гг



**Галкин Сергей Леонидович** – ректор ЛЭИС в 1997-1998 гг



**Гоголь Александр Александрович** – ректор ЛЭИС в 1999-2011 гг

История университета последних лет – это период стремительного развития в условиях реформирования системы высшего образования в стране. В целях соответствия современным требованиям к образовательной деятельности совершенствуются учебные программы и открываются новые специальности, специализации и направления. Университет переходит на Болонскую систему образования «бакалавриат – магистратура».

В течение 2013-2014 гг. университет пережил реструктуризацию факультетов. В настоящее время в структуре университета 8 факультетов в составе 31 кафедр, в том числе 4 базовых от предприятий отрасли; институт военного образования, в том числе учебный военный центр и военная кафедра; научно-исследовательский институт «Технологий связи»; 3 колледжа телекоммуникаций. Ежегодно в СПб ГУТ обучаются более 9 500 студентов.

Ежегодный выпуск составляет почти 2000 специалистов по 7 направлениям подготовки бакалавров и магистров, 15 специальностям высшего профессионального образования, а также 11 специальностям подготовки среднего профессионального образования. Диплом университета телекоммуникаций служит гарантией высокой культуры, образованности и способности квалифицированно решать сложные профессиональные задачи. Выпускники показывают не только высокий уровень подготовки, но и способности творческого использования знаний на практике, быстрой адаптации в новых областях деятельности.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича является общепризнанным лидером российской высшей школы в области подготовки специалистов для отрасли связи и телекоммуникаций. Университет является активным участником реализации Стратегии развития отрасли информационных технологий в РФ на 2014-2020 гг. и на перспективу до 2025 г., утвержденной распоряжением Правительства РФ от 1 ноября 2013 г. N 2036-р.



10 июля 2012 года университет принят в члены Международного союза электросвязи (МСЭ). Новый статус позволил СПбГУТ участвовать в мероприятиях МСЭ, оказывать влияние на глобальные решения в области инфокоммуникационных технологий ИКТ, популяризировать свои научные и образовательные разработки. В 2014 году университет стал местом проведения VI научной конференции “Калейдоскоп- 2014”, которая была организована Международным союзом электросвязи.

СПбГУТ сотрудничает с ведущими зарубежными телекоммуникационными компаниями: Alcatel-Lucent, AT&T, Hewlett Packard, IBM, Intel, Iskratel, Italtel, Microsoft, Motorola, NEC, Nokia-Siemens, Oracle, RAD, Samsung Electronics, Sony-Ericsson, Sun Microsystems, T-Systems и другими, в том числе – в научно-исследовательской и опытно-конструкторской областях.

СПбГУТ – это территория объединяющая, связующая и многонациональная. Уже более полувека здесь ведется обучение молодежи более чем из 60 стран мира. К 2015 году в СПбГУТ получили образование свыше 2000 инженеров связи из Европы, Азии, Африки и Латинской Америки. С целью развития преподавательского и студенческого обмена в рамках Болонского процесса СПбГУТ сотрудничает с профильными вузами 36 стран мира и имеет партнерские отношения с 70 вузами.

Стратегической целью развития СПбГУТ является комплексное научное и образовательное обеспечение государственной политики в области развития отрасли связи и информационных технологий, создание передового российского технического университета, повышение ориентации образования на практические нужды отрасли ИКТ, взаимодействие с ведущими образовательными организациями высшего образования и компаниями, работающими в области информационных технологий, как по вопросам кадровой политики, так и в части научной деятельности.



**Бачевский Сергей Викторович**  
– ректор СПбГУТ с 2011 г.

С 2011 года университетом руководит Бачевский Сергей Викторович.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В.А., Портнов Э. Л., Кочановский Л. Н. Направляющие системы электро-связи : учебник для вузов. В 2-х томах. Т. 1. Теория передачи и влияния. – 7-е изд., перераб. и доп. – М. : Горячая линия –Телеком, 2009. – 424 с.
2. Глаголев С.Ф., Иванов В.С., Кочановский Л.Н. Физические основы оптических направляющих систем: учебное пособие. – СПб: СПбГУТ, 2008. – 160 с.
3. Иванов В.С. Направляющие системы электросвязи. История создания и развития. Ч. 3: учебное пособие – СПб: СПбГУТ, 2012. – 91 с.
4. Ефанов В.И. Введение в специальность «Физика и техника оптической связи»: учебное пособие – Томск: ТУСУР, 2006.
5. Соколов В.А. Методические особенности преподавания дисциплины «Введение в профессию». – Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе. – Т. 2, № 2, 2013. – С. 6-12.
6. Скляр О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. – СПб: Лань, 2010. – 272 с.
7. Дмитриев С.А., Слепов Н.Н. Волоконно-оптическая техника: Современное состояние и перспективы. Сборник статей. – М.: ООО «Волоконно-оптическая техника», 2005. - 576 с.
8. Игнатов А. Н. Оптоэлектроника и нанофотоника: учебное пособие. СПб: Лань, 2011. – 538 с.
9. Стратегическая программа на 2015–2025 гг. Технологическая платформа «Инновационные лазерные, оптические и оптоэлектронные технологии – фотоника» [Электронный ресурс]. – <http://www.cislaser.com>.
10. Ресурсы сайта [www.sut.ru](http://www.sut.ru).
11. Ресурсы сайта <http://u3a.ifmo.ru>

**Былина Мария Сергеевна  
Глаголев Сергей Федорович  
Иванов Владимир Степанович**

**ВВЕДЕНИЕ В ПРОФЕССИЮ.  
ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ СВЯЗИ**

**Учебное пособие**

Редактор ...

Компьютерная верстка ...

План издания 2018 г., п. 179

Подписано к печати 24.12.2015

Объем ... усл.-печ. л. Тираж ... экз. Заказ ...

Редакционно-издательский отдел СПбГУТ  
193232 СПб., пр. Большевиков, д. 22

Отпечатано в СПбГУТ