http://siblec.ru/index.php?dn=html&way=bW9kL2h0bWwvY29udGVudC83c2VtL2NvdXJzZ TEwMS9pbmRleC5odG0=

Введение. Основные определения систем передачи

Под системой передачи принято понимать комплекс технических средств. обеспечивающих образование линейного тракта, типовых групповых трактов и каналов передачи первичной сети. При этом линейными трактами называют комплекс технических средств, обеспечивающих передачу сигналов электросвязи в полосе частот или со скоростью соответствующей данной системе передачи. В зависимости от среды распространения линейный тракт называют кабельным (волоконно-оптическим, электрическим), радиорелейным (оптическим или радиочастотным), спутниковым или комбинированным, а по типу системы передачи – аналоговым или цифровым [1].

<u>Тракт</u> групповой представляет собой комплекс технических средств, предназначенный для передачи сигналов электросвязи нормализованного числа каналов тональной частоты (КТЧ) или основных цифровых каналов (ОЦК) в полосе частот или со скоростью передачи, соответствующей данному групповому тракту. В зависимости от нормализованного числа каналов групповой тракт называют первичным, вторичным, третичным, четверичным или N-ым групповым трактом.

В системах передачи под каналом передачи принято понимать комплекс технических распространения, среды обеспечивающий передачу сигналов средств И электросвязи в определенной полосе частот (например, КТЧ 0.3...3.4 кГц) или с определенной скоростью передачи (например, ОЦК 64 кбит/с) между сетевыми станциями, сетевыми узлами или между сетевой станцией и сетевым узлом, а также между сетевой станцией или сетевым узлом и оконечным устройством первичной сети. Каналы подразделяются на аналоговые и цифровые. Для их согласования применяются аналогово-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (АЦП и ЦАП). В зависимости от скорости передачи сигналов электросвязи цифровой канал называют основным (ОЦК), первичным (ПЦК, 2048 кбит/с), вторичным (ВЦК, 8448 кбит/с), третичным (ТЦК, 34 368 кбит/с), четверичным (ЧЦК, 139 264 кбит/с) [35].

Совокупность линейных трактов систем передачи и (или) типовых физических цепей, имеющих общие линейные сооружения, устройства их обслуживания и одну и ту же среду распространения в пределах действия устройств обслуживания называют <u>линией передачи</u>. В зависимости от первичной сети, к которой принадлежит линия передачи, ее называют магистральной, внутризоновой, местной.

Цифровые волоконно-оптические системы передачи являются основой для построения транспортной сети связи Российской Федерации.

<u>Транспортная сеть</u> – совокупность ресурсов систем передачи (каналов, трактов, секций), относящихся к ним средств контроля, оперативного переключения, резервирования и управления, предназначенных для переноса информации между заданными пунктами. Составной частью транспортной сети являются сети синхронизации и управления.

Волоконно-оптические и атмосферные оптические системы передачи активно используются в сетях доступа для передачи аналоговых и цифровых сигналов. Вопросы построения транспортных сетей, сетей доступа и других сетей подробно рассматриваются в других учебных пособиях [4, 18, 20, 21].

В предлагаемом учебном пособии достаточно детально изучаются следующие аспекты.

В <u>первой главе</u> содержатся сведения по основам построения оптических систем передачи, диапазонам электромагнитных волн (ЭМВ) для оптической связи, характеристики физических сред передачи оптических сигналов, характеристики материалов для изготовления приборов оптической связи, общие схемы оптических систем передачи.

Во <u>второй главе</u> рассматриваются методы цифрового мультиплексирования побитового в плезиохронных системах, побайтового в синхронных системах, пакетного статистического в системах асинхронного режима, цифрового и аналогового оптического в системах оптической транспортной иерархии.

<u>Третья глава</u> посвящена изучению характеристик источников оптического излучения: светодиодов (СИД), суперлюминесцентных диодов (СЛД), полупроводниковых лазеров (ППЛ) и способам их согласования с физическими средами.

В <u>четвертой главе</u> отражены проблемы и возможности прямой и внешней модуляции оптического излучения, рассматриваются варианты построения передающих оптических модулей.

В <u>пятой главе</u> рассматриваются различные фотоприемники для систем передачи, приводятся их конструкции, принцип действия и основные характеристики.

<u>Шестая глава</u> посвящена изучению фотоприемных устройств (ФПУ) с различными методами фотодетектирования и отдельным устройствам ФПУ.

В седьмой главе рассмотрены принципы оптического усиления в полупроводниковых, волоконно-оптических и нелинейных оптических усилителях, конструкции и характеристики усилителей.

Предмет рассмотрения восьмой главы учебного пособия — линейные тракты оптических систем волоконных и атмосферных, одноволновых и многоволновых с методиками их расчета.

Оптические компоненты для систем передачи рассмотрены в <u>девятой главе</u>. Даются краткие характеристики оптическим мультиплексорам, коммутаторам, преобразователям длин волн, коннекторам, аттенюаторам, фотонным кристаллам и т.д.

В <u>десятой главе</u> рассмотрены возможности построения солитонных систем передачи и примеры их реализации.

1.1 Характеристика диапазона электромагнитных волн для оптической связи

Известный спектр электромагнитных волн простирается от постоянного электрического тока и низкочастотных колебаний до рентгеновских и гаммаизлучений. На рисунке 1.1 представлены все участки этого спектра и определено местоположение диапазона, который называется оптическим.

В оптическом диапазоне видимый свет занимает участок спектра от 380 нм (фиолетовый) до 780 нм (красный) и граничит со стороны более коротких волн с ультрафиолетовым излучением, а со стороны более длинных волн – с инфракрасным излучением. Наибольшее применение для оптической связи имеет диапазон, который называют ближней инфракрасной зоной (0.8 ÷ 1.675 мкм). Его использование обусловлено двумя факторами: по шкале энергий этот диапазон соответствует ширине запрещенной зоны ряда полупроводников, т.е. кванты такого излучения могут порождаться и поглощаться с ионизацией лишь валентных электронов; этот диапазон отличается наибольшей прозрачностью в таких средах распространения волн как стекловолокно и воздушная атмосфера. Следовательно, существует возможность изготовления эффективных полупроводниковых приборов и согласование их со средами передачи.

Волнам оптического излучения присущи не только волновые явления (дифракция, интерференция), но и квантовые или корпускулярные. Хорошо известна связь параметров световой волны с энергией кванта (фотона):

$$E_{\phi} = hf_{(1.1)}$$

где **h** – постоянная Планка 4,1х10⁻⁵ эВ или 6,626х10⁻³⁴ Джс, **f** – линейная частота колебаний. Учитывая связь длины световой волны и частоты,

$$\pi = \frac{c}{f} = \frac{299792,458 \, \text{[km/c]}}{f \, [\Gamma \text{II}]}, \, (1.2)$$

можно определить энергию фотона:

$$E_{\Phi} = \frac{hc}{\pi}, (1.3)$$

где с – скорость света в вакууме, округляемая до величины 3x10⁸ м/с.



Рисунок 1.1 Спектр электромагнитных волн

Произведение h×c имеет постоянное значение, например, часто употребляемое 1.24эВ×мкм.

Физика волновых оптических процессов включает изучение интерференции, дифракции и поляризации, использование законов геометрической оптики, электрои магнитооптических эффектов. Квантово-механическая природа оптического излучения наиболее отчетливо проявляется в тепловой генерации и различных видах люминесценции, в фотоэффекте, процессах взаимодействия излучения с веществом, явлениях нелинейной оптики [3, 61].

Ниже приведен пример оценки полосы частот оптического диапазона 0.8 ÷ 1.6 мкм.

Граничные частоты диапазона могут быть вычислены следующим образом:

 $\boldsymbol{f}_1 = \boldsymbol{c} \; / \; \boldsymbol{\lambda}_1, \; \boldsymbol{f}_2 = \boldsymbol{c} \; / \; \boldsymbol{\lambda}_2 \; ,$

где c= 3 x 10 ⁸ м/c, λ_1 = 0,8 x 10⁻⁶ м, λ_2 = 1,6 x 10⁻⁶ м. Полоса пропускания указанного диапазона составит $\Delta f = f_1 - f_2 = 3.75 x 10^{14} - 1,875 x 10^{14}$ Гц, что соответствует 187,5 ТГц.

1.2 Характеристика физических сред для передачи оптических сигналов

Распространение оптических электромагнитных волн может происходить в различных физических средах: в атмосфере, в волоконных световодах, выполненных из различных материалов (стекла, полупроводников, пластмасс), в волноводах интегральных микросхем, в ближнем и дальнем космосе.

Для реализации систем передачи наибольший интерес представляют такие физические среды как стеклянные и полупроводниковые волокна, волноводы микросхем и атмосфера Земли. К важнейшим характеристикам сред распространения оптических излучений необходимо отнести следующие показатели и зависимости.

Показатель преломления среды, смысл которого поясняет соотношение (1.4):

$$n = \sqrt{e M}$$
, (1.4)

где ε и μ - показатели диэлектрической и магнитной проницаемости среды, значение **n** для любого вещества всегда больше 1, т.к. скорость распространения оптических волн **v** всегда меньше в среде по сравнению с вакуумом **c** (1.5):

$$n = \frac{c}{v}$$
, (1.5)

Зависимость показателя преломления от длины волны излучения характеризует дисперсию фазовых скоростей распространения света в веществе (рисунок 1.2).





Нелинейная зависимость показателя преломления от величины мощности оптического излучения (квадратичная, кубичная)

$$n = n_0 + \Pi (Pu)_{(1.6)}$$

обусловлена свойствами некоторых сред при высокой плотности мощности светового потока (10⁷...10⁹ Вт/см²). Такая плотность мощности обычно создается лазерными источниками когерентного излучения.

Поглощение оптического излучения в материалах вызвано квантовыми переходами между различными молекулярными уровнями вещества. Например, в стекле (SiO₂)

пик поглощения приходится на длину волны 9,2 мкм, однако его "хвост" тянется до диапазона 0,8 , 1,6 мкм. Кроме того, в стеклянных волокнах большую роль играют примеси гидроксильных ионов ОН` переходных металлов Fe, Ni, Cr, V, Cu, которые приводят к большой неравномерности характеристики затухания (рисунок 1.3)

Рассеяние оптического излучения может происходить на малых неоднородностях материалов, габариты которых сопоставимы с длиной оптической волны, в том числе на малых изгибах волноводов.

Характеристика затухания стекловолокна из-за поглощения и рассеяния имеет характер "окон прозрачности" с ограниченными диапазонами частот, которые рекомендованы для систем передачи. При этом параметры затухания нормированы для применения в системах передачи (рисунок 1.4).



Рисунок 1.3 Спектральные характеристики затухания стеклянного волокна



Диапазоны А и В предназначены для длинных линий, диапазоны С и D предназначены для средних и коротких линий.

Рисунок 1.4 Нормированная характеристика затухания одномодового стекловолокна согласно рекомендации МСЭ-Т G.957



Устранение "водяного" пика

Рисунок 1.5 Характеристики улучшенного стекловолокна G.652

Для волоконных световодов с улучшенными характеристиками, приведенными на рисунке 1.5 (без "водяных пиков" и примесного поглощения), определены оптические диапазоны волн передачи (таблица 1.1)

Таблица 1.1 Оптические диапазоны улучшенного стекловолокна G.652

О – диапазон	1260-1360 нм	Основной
Е – диапазон	1360-1460 нм	Расширенный
S – диапазон	1460-1530 нм	Коротковолновый
С – диапазон	1530-1565 нм	Стандартный
L – диапазон	1565-1625 нм	Длинноволновый
U – диапазон	1625-1675 нм	Сверхдлинный

Распространение оптического излучения в атмосфере сопровождается двумя существенными для оптической линии СВЯЗИ процессами: флуктуациями принимаемого сигнала из-за рефракции излучения на турбулентных неоднородностях воздуха и аэрозольными рассеянием и поглощением на частицах дождя, тумана, снега, промышленных выбросах, пыли. Кроме того, поглощение излучения в атмосфере зависит от длины волны, и эта зависимость имеет характер окон прозрачности (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 Поглощение оптического излучения атмосферой

Поглощение света атмосферой зависит и от содержания в ней водяных паров и углекислого газа вдоль пути распространения световой волны, концентрация которых в свою очередь зависит от влажности воздуха и высоты [8].

Конструкции оптических волноводов и оптические характеристики материалов волноводов определяют целый ряд параметров сред передачи оптических сигналов: апертуру ввода излучений в волновод; модовый спектр волновода; затухание; дисперсионные искажения оптических импульсов, возникающие из-за различной скорости распространения спектральных компонентов в волноводе (рисунок 1.7), поляризационную чувствительность[6].

Величина дисперсии оценивается квадратичной разностью (1.7):

$$\mathbf{D}(\boldsymbol{\lambda}) = \boldsymbol{\Phi} = \sqrt{\boldsymbol{\Phi}^2_{\text{BMX}} - \boldsymbol{\Phi}^2_{\text{BX}}} \quad (1.7)$$



Рисунок 1.7 Дисперсия оптического импульса

Причинами дисперсии в оптоволокне принято считать [7]:

 различие скорости распространения световых мод, образующих межмодовую дисперсию (т_{м м});

 направляющие свойства оптического волновода, образующие волноводную дисперсию (т_в);

свойства материала оптоволокна, создающие материальную дисперсию (т м);

 •различие скоростей распространения двух взаимно перпендикулярных составляющих моды, обусловленных двойным лучепреломлением волокна, образующее поляризационную модовую дисперсию (т пм).

Дисперсия имеет размерность [с/км].

Волноводная и материальная дисперсия образуют хроматическую, зависящую от ширины спектра моды излучения. Поэтому хроматическая дисперсия имеет размерность [с/нм×км], где нм – единица ширины спектра излучения.

Поляризационная модовая дисперсия имеет размерность [с/√ км].

Совокупная дисперсия оптического волокна оценивается соотношением (1.8):

$$\mathbf{D}^{2}(\boldsymbol{\lambda})=\boldsymbol{\Phi}^{2}=\boldsymbol{\Phi}^{2}_{\mathrm{MM}}+\left(\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{M}}+\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{B}}\right)^{2}+\boldsymbol{\Phi}^{2}_{\mathrm{\pi}\mathrm{M}} (1.8)$$

В многомодовых волокнах преимущественно учитывается т M M.

В одномодовых волокнах учитывается сумма τ M+ τ B и при высоких скоростях передачи данных (около 10 Гбит/с и выше) - τ Π M. Однако сумма τ M+ τ Bможет быть близкой к нулю, что обусловлено различным характером дисперсии, которая, в свою очередь, определяется конструкцией волновода.

Дисперсия оптических импульсов в среде распространения может привести к межсимвольным помехам в сигналах и искажению передаваемых сообщений, поэтому дисперсия в волоконно-оптических линиях связи имеет нормированные значения для определенных спектральных диапазонов (рисунки 1.5, 1.8, 1.9). Это волоконные световоды с нулевой дисперсией на волне 1310 нм (SM, по рекомендации G.652), световоды со смещенной (DS, по рекомендации G.653) и

смещенной ненулевой дисперсией (NZDS, по рекомендациям G.655, G.656): Tera Light, Pure Guide, E-LEAF, True Wave.



Рисунок 1.8 Характеристика дисперсии одномодового стекловолокна SM, оптимизированного для длины волны 1.31 мкм



Рисунок 1.9 Характеристика дисперсии одномодовых стекловолокон SM, DS, NZDS для длины волны 1.55 мкм

На рисунке 1.10 представлены характерные значения показателей преломления сердцевины и оболочки для одномодовых волокон SM и NZDS.



Рисунок 1.10 Характеристики показателей преломления одномодовых стекловолокон для минимума дисперсии на 1310нм и около 1550 нм

С другими примерами характеристик затухания и дисперсии волоконных световодов можно детально ознакомиться в литературе [2, 4, 6, 7, 8, 10, 12, 17].

Нелинейно-оптические эффекты в средах распространения рассматриваются как результат взаимодействия оптического излучения (оптического поля) с множеством атомов и молекул. Эти эффекты могут приводить как к поглощению световых волн и ИХ рассеянию, так и к усилению. Для усиления световых волн среда распространения должна иметь инверсное (возбужденное состояние), в котором она может отдавать часть своей энергии световому полю. Подобные среды в технике оптических систем СВЯЗИ представляют собой полупроводниковые И стекловолоконные световоды с редкоземельными примесями (ионами эрбия Ег, неодима Nd, празеодима Pr, тулия Tm). Нелинейно-оптические эффекты имеют уже устоявшуюся классификацию и достаточно хорошо изучены [2, 3, 4, 23, 31, 38, 40, 52]:

•вынужденное комбинационное рассеяние и усиление;

- •вынужденное бриллюэновское рассеяние;
- •фазовая самомодуляция;
- •четырехфотонное смешение и некоторые другие [61, 62, 63, 64].

Поляризационные свойства физических сред распространения оптических волн обусловлены оптической неоднородностью (анизотропией) и могут иметь как естественное (природное), так и конструктивное происхождение.





Поляризация световой волны, т.е. придание волне определенных свойств по распределению напряженности электрической и магнитной составляющих поля, может происходить в результате отражения от границы раздела оптических сред с разными показателями преломления (рисунок 1.10).

В средах с анизотропными оптическими свойствами, например, в кварце, исландском шпате, слюде, естественный свет подразделяется на две линейно поляризованные в различных плоскостях волны, которые распространяются с различными скоростями. Это явление называется двойным лучепреломлением.

В ряде изотропных материалов, например, в жидкостях типа нитробензола, возможно искусственное создание эффекта двойного лучепреломления при помещении вещества в сильное электрическое поле. Идея создания определенных свойств оптических материалов реализована в различных приборах на основе линейного электрооптического эффекта Поккельса и нелинейного оптическогоэффекта Керра [2, 65].

Распространение световых волн в волоконных световодах связано с законами оптики (отражения, преломления) и обусловлено процессами образования оптических мод т.е. определенных типов колебаний. Описание этих процессов можно также найти в многочисленной литературе. Однако для облегчения изучения ряда сложных разделов ниже приведены некоторые определения из классической физики.

При падении луча света на границу раздела двух сред могут наблюдаться следующие эффекты: луч света преломляется; луч света отражается; луч света распространяется вдоль границы раздела сред. Эти эффекты зависят от соотношения показателей преломления сред и угла падения света. Связь этих параметров устанавливает закон Снеллиуса (голландский ученый 1580-1620гг):

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{V_1}{V_2}, (1.9)$$

где α – угол падения, β – угол преломления, V_1 –скорость света в среде 1, V_2 – скорость света в среде 2. На рисунке 1.12 приведен пример распространения света на границе раздела сред.



Рисунок 1.12 Световые лучи на границе раздела физических сред

<u>Условие Брэгга-Вульфа</u> устанавливает связь периодической среды с направлением эффективно дифрагирующих лучей света и длиной волны излучения

$$2 \times d \times SinQ = m \times \lambda$$
, (1.10)

где **d**- расстояние между отражающими элементами, **Q**- угол между падающим лучом и отражающей плоскостью, **λ**- длина волны излучения, **m**- порядок дифракции. Для справки: Брэгг У.Л. (1862-1942гг) английский физик, Вульф Г.В. (1863-1925) российский физик.

1.3 Характеристики материалов для изготовления источников и приемников оптического излучения и волноводов

Исходя из используемых спектральных диапазонов волн оптического излучения (0,8 ÷ 1,6 мкм) и некоторых перспективных участков от 1,6 мкм до 50 мкм можно отметить, что им соответствуют энергии запрещенной зоны 0,1 ÷ 5 эВ, которыми обладают полупроводниковые материалы. Энергетическая модель материала представлена на рисунке 1.13.



Рисунок 1.13 Энергетическая модель материала

Материал, у которого значение Eg = 0, называют проводником. Если Eg > 5 эВ, то материал называют изолятором.

В процессах взаимодействия излучения с материалом играет роль прежде всего энергетическая структура внешних электронных оболочек, а именно верхнего валентного уровня (Ev) и уровня ионизированного (Ec) – свободного электрона. Электрон, обладающий энергией, соответствующей одному из уровней валентной зоны, связан с атомами кристаллической решетки и пространственно локализован. Если же электрон занимает место в зоне проводимости, то он не связан с решеткой и может свободно перемещаться по кристаллу. Изменение энергии электрона представляет собой квантовый переход. Наиболее существенными являются переходы из одной зоны в другую, т.к. они сопровождаются качественными изменениями состояния кристалла. Закономерности перехода электронов в разные энергетические состояния и определяют процессы взаимодействия излучения с веществом. В состоянии термодинамического равновесия вероятность нахождения электрона на том или ином уровне (Ес или Ev) определяется функцией распространения Ферми – Дирака

$$F(E) = \frac{1}{\exp\left[(E - E_{F})/KT\right] + 1}, (1.11)$$

где E_F - уровень Ферми, совпадающий с энергетическим уровнем, для которого эта вероятность составляет 0,5;

- К постоянная Больцмана 1,38 х 10⁻²³ Дж/К,
- Т- температура по Кельвину.

Электрону для перехода из валентной зоны в зону проводимости необходимо сообщить энергию в виде кванта

$$Eg = Ev - Ec = hf$$
, (1.12)

где h и f определены в (1.1).

По скорости протекания процессов перехода электронов из одних состояний в другие материалы условно подразделяют на прямозонные и непрямозонные. Это принципиальное разделение материалов на два класса обусловлено тем, что в прямозонных материалах процессы перехода электронов проходят с минимальной задержкой и имеют высокую квантовую эффективность, т.е. выделение или поглощение квантов энергии, а в непрямозонных материалах эти процессы заторможены или вообще не происходят. Типичными прямозонными материалами являются GaAs, InAs, ZnS, GdS, а непрямозонными – Si, Ge, GaP, SiC. Эти материалы – полупроводники. Прямозонные материалы идут на изготовление прежде всего излучателей, а непрямозонные – на изготовление приемников и волноводов оптического излучения.

Наибольшее применение в технике оптической связи получили примесные полупроводниковые материалы, в которых внутри запрещенной зоны могут создаваться дискретные энергетические уровни.

Примесные полупроводники характеризуются измененными энергетическими диаграммами и образуют разные виды проводимости электрического тока – электронную и дырочную (рисунок 1.13).

Наибольший интерес для изготовления источников и приемников оптического излучения представляет соединение разнородных примесных полупроводников и образующийся при этом переход между электронной и дырочной областями (рисунок 1.14).

Известно, что прибор, изготовленный из соединения p – n, представляет собой одностороннюю токопроводящую среду – диод. При прямом и обратном смещении p – n перехода за счет внешнего источника напряжения могут наблюдаться явления излучения фотонов при рекомбинации носителей зарядов и поглощения фотонов с образованием носителей зарядов (электронов и дырок).



Рисунок 1.13 Энергетические диаграммы полупроводниковых материалов

В таблице 1.2 представлены характеристики некоторых материалов, применяемых для изготовления источников и приемников оптического излучения и волноводов.

Таблица 1.2 Характеристики материалов

Материал	Ge	Si	AIP	AIAs	AISb	GaP	GaAs	GaSb	InP	InAs
Eg, ЭВ	0.66	1.11	2.45	2.16	1.58	2.28	1.42	0.73	1.35	0.36
Λ, мкм	1.88	1.15	0.52	0.57	0.75	0.55	0.87	1.7	0.92	3.5
Тип	I	I	I	I	I	I	D	D	D	D

I – непрямозонный, D – прямозонный.

Необходимо отметить, что материалы могут иметь и более сложный состав элементов, например: InGaAs, GaAlAs, LiNdP₄O₁₂, InGaAsP и другие.

Для изготовления приборов применяют материалы с шириной запрещенной зоны, соответствующей диапазонам прозрачности стекловолокна (0,85 мкм; 1,31 мкм; 1,55 мкм) или оптическим диапазонам (таблица 1.1) и высокой квантовой эффективностью для источников излучения, низкой эффективностью для световодов. При этом предпочтение отдается материалам, пригодным для массового изготовления приборов и безопасных при работе с ними.



Рисунок 1.14 Энергетические состояния полупроводниковых приборов на основе р – п перехода

1.4 Структурная схема оптической системы передачи

На рисунке 1.15 представлена обобщенная схема оптической системы передачи, в которой блоками отображены возможные виды оборудования систем передачи.

<u>Мультиплексор</u> – устройство, обеспечивающее объединение нескольких независимых каналов на передаче и их разделение на приеме. Мультиплексор объединяет как аналоговые, так и цифровые каналы. Основным аналоговым каналом является канал тональной частоты со спектром 0,3 ÷ 3,4 кГц [27]. Могут быть аналоговые каналы и с другими характеристиками, типовые:

•первичные (60 ÷ 108 кГц);

•вторичные (312 ÷ 552 кГц);

•третичные (812 ÷ 2044 кГц)

и специальные:

. . . .

•звуковое вещание в спектре 0,03 ÷ 15 кГц;

•телевизионные в спектре 0,05 кГц ÷ 6,5 МГц.

Цифровые каналы также имеют определенные стандарты скоростей передачи данных. Основной цифровой канал 64 кбит/с формируется на основе импульснокодовой модуляции ИКМ (дискретизация тонального сигнала во временном интервале 125 мкс и восьмиразрядное кодирование) [27]. Другие цифровые каналы определены как:

первичный цифровой канал – 2 048 кбит/с;

•вторичный цифровой канал – 8 448 кбит/с;

•третичный цифровой канал – 34 368 кбит/с;

•четверичный цифровой канал – 139 264 кбит/с [35].

Рисунок 1.15 Обобщенная схема оптической системы передачи

В аналоговых и цифровых каналах могут передаваться информационные сигналы с соответствующим спектром или скоростью данных. Процедуры преобразования аналоговых сигналов в цифровые и наоборот подробно обсуждаются в [27]. В оптических системах передачи основное применение получили цифровые мультиплексоры, т.к. образуемые ими групповые сигналы представлены в двоичном коде, который придает высокую помехоустойчивость передаваемой информации. Однако в коротких линиях оптической связи применяются и аналоговые методы мультиплексирования, например, телевизионных каналов для сетей кабельного телевидения [44, 45, 46].

Широкое распространение получили цифровые мультиплексоры технологий:

•**PDH**, Plesiochronous Digital Hierarchy – плезиохронной цифровой иерархии;

•SDH, Synchronous Digital Hierarchy – синхронной цифровой иерархии;

•ATM, Asynchronous Transfer Mode асинхронного режима передачи [57].

В 2001-2005 годах МСЭ-Т принял ряд новых стандартов на цифровое мультиплексирование и передачу по волоконным линиям. Это стандарт оптической

транспортной иерархии **OTH**, Optical Transport Hierarchy и стандарт оптической передачи **Ethernet** и т.д. [110]

Мультиплексирование также может быть реализовано для оптических каналов (аналоговых и цифровых). Аналоговые оптические мультиплексоры позволяют объединять/делить определенное количество каналов, образованных на различных оптических несущих частотах в окнах прозрачности одномодовых оптических волокон. Например, в третьем окне прозрачности (1530-1565 нм) определено местоположение 41 частоты от 1528,77 нм до 1560,61 нм с интервалом не более 2 нм по рекомендации G.692. Такой вид мультиплексирования получил название мультиплексирование с разделением по длине волны – Wavelength Division Multiplexing, **WDM**. Существуют и другие виды мультиплексирования с разделением по длине волны (**CWDM, DWDM**), которые будут обсуждены в последующих разделах.

Цифровое оптическое мультиплексирование, называемое оптическим мультиплексированием с разделением по времени **OTDM**, Optical Time Division распространения Multiplexing. пока получило широкого ряда не из-за технологических проблем реализации оптических мультиплексоров коротких импульсов. Однако оно может найти применение в оптических системах передачи с использованием солитонов [23].

<u>Оптический конвертор</u> в системе передачи выполняет главные функции в преобразовании электрических сигналов в оптические на передаче и оптических в электрические с их регенерацией на приеме. Обобщенная структурная схема конвертора цифровых сигналов представлена на рисунке 1.16.

Рисунок 1.16 Оптический конвертор

Преобразователь линейного кода цифрового сигнала формирует сигнал с повышенной помехоустойчивостью передачи. Передающий оптический модуль (ПОМ) обеспечивает модуляцию оптического излучения и стык с оптической средой (атмосферой или волоконной линией). Приемный оптический модуль (ПрОМ) преобразует оптическое излучение в электрический сигнал, производит коррекцию искажений, усиление и регенерацию цифрового сигнала. При этом выделяется тактовая частота, которая используется для синхронизации приемной части мультиплексора для правильного демультиплексирования каналов.

Функции конвертора полностью контролируются и могут быть управляемыми благодаря встроенным средствам, например, микроконтроллерам.

В состав системы передачи могут входить <u>оптические усилители (ОУс)</u>, которые позволяют увеличить мощность одноволнового или многоволнового сигнала на передающей стороне или повысить чувствительность приемника. Оптические усилители имеют хорошо согласованные характеристики с оптическими передатчиками, приемниками и волоконно-оптическими линиями [6, 9, 26].

Промежуточные станции оптической системы передачи могут быть представлены устройствами: различными электронными регенераторами, оснащенными оптическими конверторами; электронными мультиплексорами с доступом К числу каналов; оптическими усилителями, служащими для определенному ретрансляции оптическими мультиплексорами оптических сигналов, С формированием доступа отдельным оптическим каналам. В К состав мультиплексоров промежуточных станций могут входить электрические и оптические кроссовые коммутаторы.

Цифровые оптические системы передачи, как правило, снабжены средствами телеконтроля и телеуправления, что позволяет контролировать работу всех компонентов системы передачи и быстро ликвидировать аварийные состояния. Обозначенные на рисунке 1.15 каналы и тракты определены во вводной части. Электрические и оптические секции мультиплексирования и регенерации (ретрансляции) определяются как участки системы передачи с отдельным контролем и управлением.

Взаимосвязь секций, трактов и каналов представлена иерархической структурой на рисунке 1.17.

Рисунок 1.17 Иерархическая организация системы передачи

Точки, обозначенные на рисунке 1.15, представляют собой стандартные стыки – интерфейсы (электрические и оптические).

Контрольные вопросы

1.Какие частоты электромагнитных колебаний относят к оптическому диапазону?

2.Как связаны длина волны электромагнитного излучения и частота?

3.Чем характеризуют оптические свойства физических сред?

4.Какие характеристики имеет стеклянный световод?

5.Чем определяются потери оптической мощности в стекловолокне?

6.Какие дисперсионные искажения оптических сигналов возможны в стекловолокне?

7.Что называют двойным лучепреломлением?

8. Что обозначает условие Брэгга-Вульфа?

9.Что представляет собой оптическая анизотропия?

10.Какие полупроводниковые материалы используются в производстве приборов для оптических систем связи?

11. Чем отличаются прямозонные и непрямозонные материалы?

12.Какое назначение имеет оптический конвертор?

2.1 Мультиплексирование плезиохронное PDH

мультиплексирование данных, Цифровое представленных циклическими последовательностями, и получившее название плезиохронной цифровой иерархии, международным стандартом цифровой передачи. Эта передача является представлена исторически сложившимися иерархиями PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy) (таблица 2.1): европейской, североамериканской и японской. В рекомендациях МСЭ-Т G.702 определены иерархические уровни и источники цифровых данных. На рисунке 2.2 приведен пример для Европейской стандартизации PDH. Соответствующие этой стандартизации иерархические уровни и циклы цифровых данных приведены на рисунке 2.3

	Европейская			Североамериканская			
		1					
Уровень	Обозн.	Скорость передачи, кбит/с	Число ОЦК	Обозн.	Скорость передачи, кбит/с	Число ОЦК	Скорость передачи, кбит/с
0	E0	64	1	DS0	64	1	64
						,	
1	E1	2048	30	DS1	1544	24	1544
2	E2	8448	120	DS2	6312	96	6312
3	E3	34 368	480	DS3	44 736	672	32064
4	E4	139 264	1920	DS4	_	4032	97 728

Таблица 2.1 Плезиохронные цифровые иерархии

Цикл передачи первичного цифрового потока E1 образован 32 канальными интервалами общей длительностью цикла 125 мкс. Каждому канальному интервалу соответствует скорость передачи 64 кбит/с (8 бит повторяются 8000 раз в секунду). Общий скоростной режим E1 = 32′ 64 кбит/с = 2048 кбит/с. Подряд следующие 16 циклов E1 образуют сверхцикл, длительность которого Tсц = 2 мс.В сверхцикле реализованы: передача сигнала сверхцикла в канальном интервале КИ16 (комбинация 0000); передача сигналов управления и взаимодействия (СУВ) для информационных каналов (КИ1-15, КИ17-31); контроль ошибок по алгоритму CRC-4, т.е. методом подсчета контрольной суммы в 16-ти последовательных циклах. Кроме того, КИ16 может быть использован для передачи информационных данных и для передачи сигнальных данных, как общий канал сигнализации.



Рисунок 2.2 Иерархические уровни плезиохронной цифровой иерархии и источники цифровых сигналов (по рекомендации G.702)



Рисунок 2.3 Циклы плезиохронной цифровой иерархии

 а) Цикл передачи первичного цифрового потока; б) Цикл передачи вторичного цифрового

в) Цикл передачи третичного цифрового потока; г) Цикл передачи четверичного цифрового потока

Циклы передачи Е2, Е3 и Е4 формируются посредством плезиохронного побитового объединения циклов нижнего иерархического уровня (рисунок 2.4).

Принцип плезиохронного мультиплексирования состоит в следующем:

•объединяемые цифровые данные, имеющие различные тактовые интервалы (в известных нормативных пределах), должны быть синхронизированы, т.е. согласованы по фазе и частоте тактов;

•для синхронизации объединяемых данных должен быть применен буфер памяти;

•скорость и фаза записи данных в параллельные буферы может различаться, но скорость считывания этих данных из буферов одинакова;



Плезиохронное побитовое мультиплексирование

Рисунок 2.4 Иерархическая схема мультиплексирования PDH

•в процессе записи данных в буфер и считывании могут образоваться в случайные моменты времени состояния неопределенности:

•период записи *Т*зап > периода считывания *Т*сч, в этом случае буфер может дважды считаться, т.е. произойдет ложная двоичная единица;

•период записи *Т*зап < периода считывания *Т*сч, в этом случае буфер может оказаться на момент считывания "пустым", т.е. произойдет ложная двоичная единица.

Для устранения указанных неопределенностей используется метод стаффинга, сущность которого поясняется с помощью рисунков 2.5, 2.6. Положительное согласование скорости в буферных устройствах предполагает заведомо более высокую скорость считывания двоичных данных из буферов, чем скорости записи, которые зависят от стабильности источников тактовых частот формирователей цифровых данных.



 $\pm \Delta B_1 \neq \pm \Delta B_2 \neq \pm \Delta B_3 \neq \pm \Delta B_4$ - отклонение скоростей передачи



Для цифровых данных Е1 отклонение скорости допустимо в пределах:

^{*B*₀ ± *ΔB*, 2048 кбит/с ± 102,4 бит/с.}

Это соответствует нормативу рекомендации G.703. Такты считывания для E2 поступают со скоростью 2052 кбит/с, что гарантирует только положительное согласование. При этом через определенное время будет проявляться ситуация неопределенности, когда одни и те же данные будут считываться дважды (рисунок 2.6).





Ситуация неопределенности должна контролироваться временным детектором, измеряющим разность фаз записи И считывания $\Delta \phi$. Образование неопределенности приведет к формированию вставки (бит S рисунок 2.6), которая выравнивает скорость и не допускает ложное считывание. При этом в структуру цикла E2 помещается команда согласования скорости (КСС). Принцип формирования КСС и ее содержание изображены на рисунке 2.7. Т.о. в цикле Е2 передаются четыре независимые друг от друга команды согласования скоростей, представленные тремя битами. Истинность команды определяется по двум или трем одинаковым битам. Распределение команд по циклу и использование выбора 2 из 3 применены для повышения помехоустойчивости передачи КСС.

В приемной части системы передачи с E2 процедура демультиплексирования происходит с обнаружением и устранением вставок в каждом из четырех потоков данных E1. Для этого восстанавливается тактовая частота каждого E1, которая применяется для работы фазового детектора демультиплексированного E1. Команды КСС и разность фаз служат вычислению вставки S и ее устранению.



Рисунок 2.7 Команды согласования скоростей

Алгоритмы формирования циклов ЕЗ, Е4 аналогичны рассмотренному для Е2.

Очевидны недостатки плезиохронного мультиплексирования:

•сложность и иерархичность схем согласования скоростей;

•сложность доступа к отдельным цифровым потокам данных;

•протяженное во времени иерархическое восстановление синхронизма между передатчиком и приёмником в случае его нарушения;

•почти полное отсутствие в циклах PDH позиций для служебных информаций (управления, контроля, служебной связи).

2.2 Мультиплексирование синхронное SDH

Синхронная цифровая иерархия SDH (Synchronous Digital Hierarchy) – набор иерархических цифровых транспортных структур (циклов), стандартизированных для транспортировки соответственно адаптированной нагрузки для передачи через физическую сеть, например, волоконно-оптическую. К иерархии цифровых структур относятся:

•синхронные транспортные модули STM-N (Synchronous Transport Module) порядка N = 0, 1, 4, 16, 64, 256;

•виртуальные контейнеры VC-n (Virtual Container) порядка n = 1, 2, 3, 4;

•административные блоки AU-n (Administrative Unit) порядка n = 3, 4;

•транспортные блоки TU-n (Tributary Unit) порядка n = 1, 2, 3;

•контейнеры C-n (Container) порядка *n* = 1, 2, 3, 4;

Эти цифровые структуры представлены во взаимной связи схемой мультиплексирования (рисунок 2.8).

STM представляет собой информационную структуру, используемую для соединения уровня секции передачи в сети SDH (рисунок 2.10). Базовая структура STM-N представлена тремя составляющими (рисунок 2.9):

•секционными заголовками SOH (Section Overhead);

•указателями административных блоков AU (Administration Unit pointers);

•информационной нагрузкой (Information Payload).

Такая структура образуется каждые 125 мкс и имеет емкость 270× 9× N байт (для *N* = 0 емкость 90×9 байт). Т.о. это цикл с байтовой структурой, который в технической литературе называют кадром или фреймом (frame).

В таблице 2.2 представлены иерархические уровни STM-N и соответствующие им скорости передачи в волоконно-оптической линии.

Любая из иерархических скоростей STM-N вычисляется простой операцией умножения, например, STM-1 емкость 270 × 9 = имеет 2430 байт, которая повторяется 8000 раз за 1 секунду, число бит а составит 2430 байт ×8000 ×8 = 155 520 000 бит/с. Другие скорости получаются умножением 155520000× *N*, т.е. на 4, 16, 64 и 256.

Усовершенствованным решением в последней стандартизации стало введение уровней STM-0 и STM-256, а также увеличение числа вариантов создания STM-N. При этом базовыми элементами остались виртуальные контейнеры, иерархия которых также расширилась за счет введения конкатенированных структур VC-4-4с, VC-4-16c, VC-4-64c и VC-4-256c, представленных в таблице 2.3.



Рисунок 2.8 Схема мультиплексирования SDH последнего поколения

Рисунок 2.8 Схема мультиплексирования SDH последнего поколения





Таблица 2.2 Иерархия скоростей передачи в SDH

Уровень STM-N	Иерархическая битовая скорость (кбит/с)
0	51 840

1	155 520
4	622 080
16	2 488 320
64	9 953 280
256	39 813 120

С точки зрения стандартов на построение транспортных сетей STM-N и VC-n относятся к различным уровням сети (рисунок 2.10).

Таблица 2.3 Иерархия виртуальных контейнеров в SDH

Тип VC	Скоростной режим, кбит/с	Полезная емкость, кбит/с
VC-11	1664	1600
VC-12	2240	2176
VC-2	6848	6784
VC-3	48 960	48 384
VC-4	150 336	149 760
VC-4-4c	601 344	599 004
VC-4-16c	2 405 376	2 396 160
VC-4-64c	9 621 504	9 584 640
VC-4-256c	38 486 016	38 338 560

SDH	Уровень каналов	E1	E3	E4	Ethernet	Другие		
ети	Адаптация: С-12, С-3, С-4, С-4-nc							
й С	Maria	Тракты нижнего порядка VC-12, (VC-3),						
9 Уровни Б трактов	Адаптация: TU-n, TUG-2, TUG-3							
		Тракты верхнего порядка VC-3, VC-4, VC-4-4с,						
рано	Адаптация: AU-3, AU-4, AUG-N, STM-N							
Ц	Уровень Союния		Мультиплексирование MSOH			MSOH		
в среды	среды	секция		Регенерация RSOH				
Ч	передачи	Среда передачи: кодирование, тактирование						

Рисунок 2.10 Уровневая модель транспортной сети SDH

В уровневой модели транспортной сети SDH представлены не все компоненты схемы мультиплексирования SDH, т.к. схема мультиплексирования не полностью реализуема в европейских стандартах, например, применительно к контейнерам С-11, С-2, представляющих американские стандартны. Положение VC-3 в качестве тракта верхнего или нижнего порядка определяется схемой мультиплексирования. Если VC-3 входит по схеме в VC-4, то его относят к нижнему порядку. Если VC-3 входит в AU-3, то его относят к верхнему порядку. При этом он служит основой формирования Для STM-0.

Виртуальные контейнеры VC-n, как и STM-N, представляют собой цифровые циклические структуры с байтовым построением. Блоки VC-n отличаются не только емкостью (таблица 2.3), но и временем формирования и рядом других показателей. На рисунке 2.11 представлены примеры структур виртуальных контейнеров VC-12, VC-3, VC-4. Заголовки VC-n служат созданию трактов (маршрутов) транспортировки пользовательской нагрузки. В них определяются уникальные адреса источников и приемников данных, контроль качества передачи, обслуживание, управление и защита от повреждений.

Административные (AU-n) и транспортные (TU-n) блоки служат средствами адаптации различных цифровых структур друг к другу. Центральным элементом этих блоков являются указатели, т.е. цифровые блоки данных, в которых записываются адреса начала размещения адаптируемой нагрузки, например, VC-4 размещается в AU-4, а VC-12 размещается в TU-12. С помощью указателей (поинтеров, PTR) согласуются различные по скорости передачи цифровые блоки. Благодаря этому VC-12 может смещаться в TU-12 без ухудшения качества доставки информации пользователя и, аналогично, VC-3, VC-4 соответственно в AU-3 и AU-4.

Структуры транспортных и административных блоков представлены на рисунках 2.12, 2.13, 2.14 и 2.15.



Рисунок 2.11 Примеры структур виртуальных контейнеров

Административный блок AU-n представляет собой структуру для адаптации между уровнем тракта верхнего порядка и уровнем секции мультиплексирования. Транспортный блок TU-n представляет собой информационную структуру для адаптации между уровнями трактов верхнего и нижнего порядков. В процессы адаптации входят также процедуры размещения данных в контейнеры C-n (Container). Виртуальный контейнер отличается от контейнера заголовком маршрута (тракта), обозначаемого POH (Path Overhead).





Рисунок 2.15 Административный блок AU-4

Контейнеры представляют собой информационные структуры, в которые записываются пользовательские данные и производится согласование скоростей на уровне каналов. Составным элементом каждого вида адаптации (TU-n, AU-n) служит *группообразование*, т.е. формирование информационных структур:

•группового транспортного блока TUG-n, n = 2, 3 (Tributary Unit Group);

•группового административного блока AUG-N, N = 4, 16, 64, 256 (Administrative Unit Group).

На рисунках 2.16, 2.17 представлено формирование TUG-n и AUG-n.



Рисунок 2.16 Формирование TUG-2 и TUG-3

В первой колонке балласта TUG-3 три верхних байта (рисунок 2.13) образуют индикатор нулевого указателя (NPI, Null Pointer Indication) при мультиплексировании TUG-3 из TUG-2. Индикатор NPI представляет собой фиксированный двоичный код, который позволяет отличить TUG-3 от блока TU-3, загружаемого виртуальным контейнером VC-3.

Способ формирования TUG-2, TUG-3, AUG-N единый, представляющий собой *синхронное побайтовое мультиплексирование* в интервале времени 125 мкс. Блок TUG-2 формируется из 3-х четвертинок TU-12. Блок TUG-3 формируется из 7 TUG-2. Блок AUG-N формируется из 4, 16, 64 или 256 AUG ступенями синхронно побайтно (рисунок 2.8). Присоединение к AUG-N секционных заголовков SOH (рисунок 2.9) создает STM-N.



Рисунок 2.17 Формирование AUG-4xN из 4AUG-Ns

Секционные заголовки RSOH и MSOH, соответственно секций регенерации и мультиплексирования, обеспечивают служебные сигналы уровня среды передачи сети SDH (рисунок 2.10).

Конкатенированные или сцепляемые контейнеры (VC-4-4c, VC-4-16c, VC-4-64c, VC-4-256c) представляют информационные структуры, формируемые для переноса нестандартной пользовательской нагрузки. Каждый контейнер C-n, C-X-nc поддерживает различные виды согласования скоростей при загрузке и выгрузке данных пользователя. Например, асинхронная загрузка, синхронная по битам нагрузки, синхронная по байтам нагрузки, синхронная по циклам нагрузки и т.д.

Для эффективного использования ресурсов транспортных сетей SDH можно задействовать процедуры конкатенации, т.е. сцепление емкости, например, нескольких VC-3 для передачи трафика 1 Гбит Ethernet или 10Гбит Ethernet. Известны два типа цепочек из контейнеров: последовательная конкатенация CCAT (Contiguous Concatenation) и виртуальная конкатенация VCAT (Virtual Concatenation). При этом CCAT допускает объединение определенного числа контейнеров, например, VC-4-Xc (X = 4, 16, 64, 256), а VCAT предполагает возможность объединения любого числа VC-12, VC-3, VC-4: VC-12-Xv и VC-3/4-Xv для последнего, например, X = 1, ..., 256.

Недостатком последовательной конкатенации является необходимость ее поддержки всеми сетевыми элементами (мультиплексорами) сети. Отдельные контейнеры или блоки нагрузки соединены друг с другом в одно целое и могут перемещаться вместе, т.е. использование разных путей для отдельных контейнеров или блоков нагрузки невозможно. Это ведет к сложности взаимодействия транспортной сети и пользовательской нагрузки. Например, сеть SDH в варианте ССАТ предлагает только четыре значения пропускной способности: 600, 2400, 9600 и 38400 Мбит/с с соответствующими каналами STM-4, STM-16, STM-64, STM-256. Это неэффективно, например, для 1 Гбит Ethernet.

Указанный недостаток последовательной конкатенации преодолевается в виртуальной конкатенации. Процедура VCAT позволяет передавать сцепленные контейнеры или блоки нагрузки с различными маршрутами. Таким образом, для поддержки VCAT необходимы только два оконечных мультиплексора. В таблице 2.4 приведен пример числового сравнения процедур VCAT и CCAT. На рисунке 2.18 представлена схема виртуальной конкатенации в транспортной сети и ее сочетание с процедурами GFP(Generic Framing Procedure – общая процедура формирования кадра) и LCAS (Link Capacity Adjustment Scheme - схема регулировки емкости канала). В узле мультиплексирования (MSPP) на передаче нагрузка в виде пакетов переменной длины из сети Ethernet распределяется в сцепленные контейнеры сети SDH. До точки получения эти контейнеры доставляются различными маршрутами. В узле приема MSPP пакеты выгружаются и передаются в сторону сети Ethernet в том порядке, в каком они поступили в узел передачи.

Нагрузка	Скорость	CCAT	VCAT				
Ethernet	10 Мбит/с	VC-3 (20%)	VC-12-5v (100%)				
Fast Ethernet	100 Мбит/с	VC-4 (67%)	VC-3-2v (100%)				
Gigabit Ethernet	1000 Мбит/с	VC-4-16c (42%)	VC-4-7v (95%)				
F/Channel	1000 Мбит/с	VC-4-16c (42%)	VC-4-7v (95%)				
Источник Источник Ethernet Кадры Ethernet – GFP размещение – VCAT передача – LCAS управление – LCAS управление							

Таблица 2.4 Сравнительная оценка VCAT и CCAT

На рисунке 2.19 представлена схема оптической системы передачи с мультиплексированием SDH. В схеме показана организация линейного тракта с промежуточными станциями и резервированием всего тракта отдельной секцией мультиплексирования. Переключение на резервную оптическую секцию происходит в случае аварии основной рабочей секции или при ухудшении качества принимаемого оптического сигнала. Управление переключением происходит автоматически с использованием байт К1 и К2 в заголовке MSOH в резервной секции. Время переключения до 50мс. Характеристики точек оптической передачи S, R приведены в приложении 2. Функции регенератора рассмотрены в главе 8.


Точки S и R передачи и приема

Рисунок 2.19 Схема оптической системы передачи с синхронными мультиплексорами и регенераторами SDH

Детальная информация по построению всех блоков передачи в SDH – формате приводится в многочисленной литературе [5, 9, 19, 21, 109, 110] и занимает существенный объём, что не представляется возможным отразить в этом учебном пособии все тонкости технологии.

2.3 Мультиплексирование асинхронное АТМ

АТМ – пакетная технология коммутации, *мультиплексирования и передачи,* в которой используются пакеты фиксированной малой емкости, называемые ячейками (иногда в литературе фрагментами). В ячейке постоянной длины (емкости) 53 байта (октета – 8 битов – двоичных символов), для информации пользователя отведено 48 байт, а заголовок, 5 байт, содержит информации, необходимые для передачи, мультиплексирования и коммутации ячейки в устройствах сети АТМ (коммутаторах). Короткие ячейки, передаваемые очень большими скоростями (до 10...40 Гбит/с), обеспечивают сети большую гибкость и эффективность использования.

Формат ячейки 53 байта – компромиссное решение ITU-Т между предложениями европейцев в 32 байта и североамериканцев и японцев 64 байта.

При формировании ячейки ATM информация временно записывается, затем вносится в ячейку, и когда ячейка наполнится, она передается в сети. Если нет информации для передачи, то передается пустая ячейка, которая поддерживает физические транспортные функции (синхронизация приемника, контроля качества по ошибкам).

ATM - технология коммуникации с ориентацией на соединение, т.е. до передачи данных между двумя оконечными устройствами должно быть установлено соединение. По информации пользователя сеть прокладывает путь передачи ячеек с определенной скоростью, отвечающей качеству услуг. Как правило, качество устанавливается по пиковой скорости передачи ячеек.

ATM - технология, поддерживающая дэйтаграммные (бессвязные) услуги передачи данных без установления соединения.

Последовательность принимаемых ячеек АТМ в точке назначения одинакова последовательности ячеек посылаемых от источника.

АТМ обеспечивает возможность приспосабливания скорости передачи к скорости генерирования информационных данных, т.е. рациональное использование емкости сети за счет *статистического мультиплексирования*.

Мультиплексирование в АТМ обеспечивает простую интеграцию разной исходной информации по одному физическому тракту.

АТМ независим от существующей системы передачи, т.е. физических транспортных функций. Ячейки могут размещаться в циклах SDH (Synchronous Digital Hierarchy) и PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy).

Возможности АТМ коммутации:

контроль соединения и сброс соединения, если сеть не располагает достаточными ресурсами;

контроль перегрузки – ограничение нагрузки в приемлемых пределах;

распределение ресурсов сети на основе договора о выделении полосы частот (скорости) и буферной памяти;

контроль параметров трафика, например пиковой и средней скорости в соединении.

Ячейки АТМ при передаче и коммутации испытывают задержки:

неравномерность времени передачи ячеек CDV (Cell Delay Variation);

отклонение во времени при разборке/сборке ячеек CAD (Cell Assembly/ Reassembly Delay).

Каждая АТМ ячейка (пакет) содержит в заголовке адрес (маршрут) передачи, который является уникальным идентификатором каждой ячейки. Процедуры формирования ячеек (пакетов) АТМ и их мультиплексирование демонстрируется на рисунке 2.20.



Рисунок 2.20 Формирование и мультиплексирование ячеек АТМ

Входные потоки данных разных пользователей, имеющие разные скорости (64 кбит/с; 2 Мбит/с; 34 Мбит/с и другие), разбиваются на блоки данных. При этом, чем выше скорость потока, тем больше блок данных. Каждый блок данных разбивается на одинаковые сегменты. В технологии АТМ сегменты имеют объем 48 байт. Очевидно, что чем выше скорость входящих данных, тем больше сегментов формируется при адаптации. Ниже каждый сегмент получает индивидуальный заголовок и далее передается для транспортирования через сеть (общий физический канал). Полная структура ячейки (пакета) АТМ, предназначенного для передачи через различные участки сети АТМ, представлена на рисунке 2.21.



Рисунок 2.21 Ячейка АТМ и виды заголовков

Заголовки ячеек бывают двух типов. Первый тип заголовка, названный UNI (рисунок 2.21), предназначен для участка сети "пользователь-сеть". Второй тип заголовка, названный NNI, предназначен для обмена между узлами сети ATM.

Каждый элемент заголовка ячейки АТМ имеет определенное назначение.

GFC (Generic Flow Control) – контроль общего потока (на участке пользователь-сеть).

VCI и VPI (Virtual Channel Identifier, Virtual Path Identifier) – иденти-фикаторы виртуального пути (VPI) и канала (VCI).

Каждая ячейка ATM содержит в заголовке адрес, состоящий из двух частей: идентификатора виртуального пути (VPI) и идентификатора виртуального канала (VCI). Этот адрес дает уникальную идентификацию виртуального соединения ATM на физическом интерфейсе.

При этом понятие "виртуальное соединение" предполагает наличие соединения по запросу пользователя, т.е. в моменты обмена данными и при этом создается иллюзия существования непрерывного канала, но на самом деле физического соединения нет.

Физический путь передачи содержит один или несколько виртуальных путей, каждый из которых состоит из одного или нескольких виртуальных каналов. VPI и VCI связаны с конкретным соединением на заданном пути передачи и имеют только локальное значение для каждого коммутатора. Коммутатор преобразует входные пути VPI и каналы VCI в выходные VPI и VCI, что демонстрируется на рисунке 2.22.



a) Виртуальные пути и каналы сети АТМ





Рисунок 2.22. Назначение идентификаторов VPI и VCI

Между узлами и терминалами сети образуются виртуальные пути и виртуальные каналы. Адресное пространство на участке терминал-сеть (А-Б или Д-Е) составляет 28 VPI и 216 VCI, а на участке между коммутаторами (В-Г) составит 212 VPI и 216 VCI. На участках сети АТМ А-В и Г-Е сохраняется идентификатор виртуального канала (VCI 57 и VCI 15), но изменяется идентификатор виртуального пути VPI 2 - VPI 7 и VPI 3 - VPI 1. Это изменение происходит в кроссовом коммутаторе АТМ (Cross Connect). Общая структура коммутатора приведена на рисунке 2.23.



Рисунок 2.23 Общая структура коммутатора АТМ

Виртуальные каналы, создаваемые в сети АТМ, могут быть представлены тремя видами:

PVC (Permanent Virtual Circuit) – постоянные виртуальные каналы – это постоянное соединение между двумя оконечными станциями, которое устанавливается в процессе конфигурирования сети;

SVC (Switched Virtual Circuit) – коммутируемые виртуальные каналы – устанавливается соединение каждый раз, когда одна оконечная станция пытается адресовать данные другой оконечной станции. При этом когда посылающая станция запрашивает соединение, сеть ATM распространяет адресные таблицы и сообщает этой станции VCI и VPI, включаемые в заголовок ячейки. SVC устанавливается динамически.

SPVC – это гибрид PVC и SVC. SPVC обладает лучшими свойствами двух видов виртуальных каналов. Позволяет заранее задать конечные станции и некоторые связи, т.е. экономить время на установление соединения.

Три бита PTI (Payload Type Identificates) – идентификатор типа полезной нагрузки, используемый для описания типа полезной нагрузки (данные пользователя или сетевое сообщение, таблица 2.5).

Таблица 2.5 Кодирование идентификатора РТ

Кодовая комбинация	Тип потока	Индикатор перегрузки	Тип блока данных

000	0 Пользователя	0 Нет перегрузки	0 Тип 0 блока
001	0 Пользователя	0 Нет перегрузки	1 Тип 1 блока
010	0 Пользователя	1 Есть перегрузка	0 Тип 0 блока
011	0 Пользователя	1 Есть перегрузка	1 Тип 1 блока
100	1 Сети	0 Обслуживание (се	егмент за сегментом)
101	1 Сети	0 Обслуживание из конца в конец	
110	1 Сети	1 Административное управление сетевыми ресурсами	
111	1 Сети	1 Резерв	

CLP (Cell Loss Priority) – один бит заголовка содержит информацию о приоритете пакета ATM. Приоритет устанавливается в коммутаторе в зависимости от состояния сети. CLP = 1 – высокий приоритет потери ячейки. Ячейки выбрасываются в первую очередь при перегрузке сети. CLP = 0 – низкий приоритет потерь.

Для синхронизации между передатчиком и приемником ячеек ATM используется процедура поля HEC (Header Error Control) – контроль ошибок в заголовке. HEC кроме синхронизации обеспечивает обнаружение и частичное исправление ошибок в заголовке (рисунок 2.6).

Поток данных первых четырех байт делится в передатчике на многочлен x⁸+x²+x+1. Остаток от деления (8 бит) передается в поле HEC. Поле HEC для ячеек одного канала фиксировано. Приемник после каждых 53 байт фиксирует поле HEC. Если шесть раз подряд фиксируется одинаковое поле HEC, то приемник переходит в режим синхронизма. В этом режиме могут поддерживаться два состояния: обнаружение и исправление одиночных ошибок и обнаружение и не исправление многих ошибок в заголовках на определенном временном интервале или в заголовке.

В технологии ATM принято различать следующие виды ячеек: пустые (свободные); исправные; неисправные; присвоенные; не присвоенные; ячейки сигнализации; ячейки управления и обслуживания.

Пустые (свободные) ячейки – ячейки физического уровня сети ATM, которые предназначены для приспособления скорости передачи информационных ячеек по границе среды ATM и среды физической к емкости системы передачи. С их помощью обеспечивается непрерывность потока ячеек.

Исправные ячейки – ячейки, которые имеют заголовок без ошибок, или на которых сделана коррекция на физическом уровне.

Неисправная ячейка – ячейки, заголовки которых содержат ошибки, которые неисправимы на физическом уровне. Такие ячейки подлежат отбрасыванию на физическом уровне, т.е. на уровне транспортировки в физической среде.

Присвоенные ячейки – ячейки, которые определены для конкретных услуг на уровне АТМ.

Ячейки без присвоения – ячейки, которые не содержат присвоения услугам уровня ATM, но имеют значения VPI и VCI.

Ячейки сигнализации – ячейки, переносящие сигнальные сообщения между элементами сети для установления, поддержки или разъединения соединения в сети.

Ячейки управления и обслуживания – ячейки, которым определено переносить информацию администрирования и обслуживания (например, контроля и управления трафиком).

Для лучшего понимания процессов мультиплексирования в АТМ рассматривается модель транспортировки АТМ,состоящая из трех плоскостей: плоскости сигнализации и контроля, плоскости пользователя, плоскости управления. Эти плоскости связывают физический уровень, уровень АТМ, уровень адаптации АТМ и верхние уровни (сигнализации и служб). Структура модели приведена на рисунке 2.24.

Плоскость сигнализации и контроля обеспечивает установление, прекращение и контроль соединений. Для этого в плоскости предусмотрены функции сигнализации, адресации и маршрутизации. Благодаря этой плоскости создаются соединения.

Плоскость услуг (пользовательская) обеспечивает передачу информации в виде данных, аудио- и видео информации. Плоскость отвечает за защиту данных пользователя, управляет потоком данных.

Плоскость управления обеспечивает совместную работу двух первых плоскостей. Она позволяет координировать управление плоскостями и уровнями. Управление плоскостями позволяет получить единую систему с единым описанием, а управление уровнями обеспечивает предоставление требуемых от отдельных уровней ресурсов для конкретных случаев.



Рисунок 2.24 Трехмерная модель АТМ

Уровень адаптации ATM (AAL, ATM Adaptation Layer) представляет собой набор протоколов AAL1 – AAL5, которые преобразуют сообщения протоколов верхних уровней в ячейки ATM нужного формата, и наоборот, из ячеек восстанавливает информационные потоки. Уровень адаптации состоит из нескольких подуровней (рисунок 2.25)

Нижний подуровень AAL, называемый сегментирующим и собирающим (Segmentation and Reassemble, SAR), не зависит от типа протокола AAL, т.е. от трафика, и занимается разбиением (сегментированием) сообщения, принимаемого от верхнего подуровня.

Уровни ААL1- ААL5	Подуровень конвергенции (CS)	Общая часть подуровня конвергенции Специфическая часть для сервиса	
	Подуровень сегментации и сборки (SAR)		
Уровни	Подуровень конвергенции	Общая часть подуровня конвергенции	
AAL1- AAL5	(CS)	Специфическая часть для сервиса	
	Подуровень сегментации и сборки (SAR)		

Рисунок 2.25 Структура ААL

Сегмент составляет 48 байт. Далее сегмент получит заголовок (5 байт) и будет направлен на физический уровень в виде ячейки АТМ (53 байта).

Верхний подуровень AAL, называемый подуровнем конвергенции (Convergence Sublayer, CS), зависит от конкретного вида трафика. Протоколы CS решают многие задачи: синхронизацию передачи и приема, контроль битовых ошибок, мультиплексирование пользовательских данных и т.д.

Для нормальной работы AAL формируются служебные сообщения, включаемые в блоки данных перед сегментацией. Передача данных через уровень AAL может происходить в двух режимах: сообщения и потока. Благодаря AAL созданы несколько классов обслуживания (рисунок 2.26).

Трафик (класс услуги)	Звук (А)	Видео со сжатием (В)	Данные, FR, (C)	LAN (D)
Синхронизация	Требуется		Не треб	уется
Скорость	Постоянная	Переменная	Переменная доступная	Переменная неопределенная
Соединение	Установление сое, виртуальные ка		динения, налы	Без соединения
Тип AAL	AAL1 AAL2		AAL AAL5	3/4]
Временной параметр	Реальное	Реальное/ нереальное	Нереал	іьное

Рисунок 2.26 Адаптационные уровни и классы обслуживания

Уровень АТМ полностью не зависит от процессов физического уровня. Основная задача АТМ уровня состоит в подготовке данных, получаемых от AAL, для передачи в сеть на передаче. На приемной стороне ячейки, поступившие из сети, преобразуются в поток сегментов, направляемых на AAL. Кроме того, уровень АТМ транслирует ячейки в сети через коммутаторы, статистически мультиплексирует и демультиплексирует потоки ячеек.

Физический уровень – самый нижний уровень модели АТМ и определяет физический интерфейс. Он делится на два подуровня: подуровень согласования с системой передачи и подуровень физической среды (рисунок 2.27).

Физический уровень ATM может быть реализован технологиями PDH, SDH, OTH и прямой передачей ячеек в физическую среду через конвертор линии, например, оптический, в котором происходит линейное кодирование/декодирование и модуляция несущей частоты.

	Согласование с системой передачи	Согласование скорости ячеек, формирование и проверка поля НЕС, границы ячеек, адаптация к среде передачи
Физический уровень	Физическая среда	Битовая синхронизация, преобразование сигналов Физическая среда: оптическое волокно, витая пара, радиоканал, атмосферный оптический канал

Рисунок 2.27 Составляющие физического уровня АТМ

2.4 Мультиплексирование ОТН

Схема мультиплексирования и упаковки оптической транспортной иерархии OTH (Optical Transport Hierarchy) отражает последовательность преобразований информационных данных и оптических сигналов в интерфейсе оптической сети. Схема представлена на рисунке 2.28. Процедуры преобразований показаны стрелками. Блоки схемы, изображенные в виде прямоугольников, предназначены под упаковку цифровых данных. Блоки схемы, изображенные в виде овалов, предназначены для операций мультиплексирования.



Рисунок 2.28 Схема мультиплексирования и упаковки ОТН

Таблица 2.6 Иерархические скорости и циклы ОТ	ΓH
---	----

OTUk	Скорость, кбит/с	Отклонение скорости	Длительность цикла

OTU1	2 666 057		48,971 мкс
OTU2	10 709 225	± 20· 10 ⁻⁶	12,191 мкс
OTU3	43 018 413		3,035 мкс

В результате операций упаковки создаются адаптированные блоки цифровых данных, которые передаются в оптических каналах, т.е. на отдельных волнах. В результате операций мультиплексирования создаются групповые блоки цифровых данных и групповые блоки оптических каналов с разделением по длине волны WDM. Отдельные блоки цифровой и оптической передачи имеют следующее назначение.

OPUk, Optical Channel Payload Unit-k, блок оптического канала нагрузки порядка *k*, где *k* = 1, 2, 3. Эта информационная структура используется для адаптации информации пользователя к транспортировке в оптическом канале. Адаптация производится на скорости 2.5Гбит/с, 10Гбит/с, 40Гбит/с. Это могут быть циклы SDH или другие цифровые потоки.

Блок OPUk состоит из поля информационной нагрузки и заголовка.

ODUk, Optical Data Unit-k, блок данных оптического канала порядка k, где k = 1, 2, 3. Эта информационная структура состоит из поля информации (OPUk) и заголовка.

ODUkP, ODUk Path – блок данных оптического канала порядка *k*, поддерживающий тракт из конца в конец оптической сети OTN (Optical Transport Network).

ODUkT, ODUkTCM – ODUk Tandem Connection Monitoring – блок данных оптического канала, поддерживающий наблюдение (мониторинг) парных (тандемных) соединений в оптической сети OTN. Один блок ODUkT допускает поддержку мониторинга до 6 тандемных сообщений.

OTUk, Optical Transport Unit-k, цифровой блок оптического канала транспортировки порядка k, где k = 1, 2, 3. Эта цифровая информационная структура используется для транспортировки ODUk через одно или большее число соединений (кроссовые соединения в узлах) оптических каналов. Блок OTUk определен в двух версиях: OTUkV и OTUk.

Блок OTUk рекомендован к применению на локальных участках OTN в полной и упрощенной формах исполнения.

Блок OTUkV характеризуется как частично стандартизированная структура и рекомендуемая для применения в составе оптического транспортного модуля OTM (Optical Transport Module) в полной форме исполнения. Блок OTUkV состоит из блока данных оптического канала, заголовка для управления соединением оптического канала и поля контроля/исправления ошибок FEC, Forward Error Correction (глава 8).

Для передачи в оптической секции формируются/расформировываются оптические транспортные модули ОТМ-n.m, ОТМ-nr.m, ОТМ-0.m. Индексы ОТМ определены для обозначения различных вариантов построения модулей.

Индекс "*n*" используется для обозначения максимального числа волн передачи. Если *n* = 0, то это признак одноволновой передачи.

Индекс "/" используется для обозначения упрощенных функций, в частности ОТМ не содержит отдельный канал передачи заголовков.

Индекс "*m*" используется для обозначения иерархической ступени ОТН с соответствующей скоростью передачи в варианте комбинирования скоростей. Он

является расширенным по сравнению с индексом "k" обозначением (m = 1, 2, 3, 12, 123, 23).

Индекс "*k*" используется для обозначения поддерживаемой иерархической скорости ОТН. *k* = 1 соответствует примерно скорости 2,5 Гбит/с, *k* = 2 соответствует примерно скорости 10 Гбит/с, *k* = 3 соответствует примерно скорости 40 Гбит/с.

Передача в оптической физической секции, включающей в свой состав усилители, компенсаторы дисперсии, волоконные световоды, предусмотрена в виде многоволнового оптического сигнала, состоящего из одного или нескольких ОТМ. Порядок волновой передачи ОТМ определен индексом "*n*", который может быть 0 ≤*n* ≤16.

Цифровые блоки данных OTUk, где *k* = 1, 2, 3, образуют оптическую транспортную иерархию OTH, для которой определены скорости передачи информации, цикличность и структура цикла. В таблице 2.6 представлены скорости передачи OTUk и их периодичность.

На рисунке 2.29 приведена общая структура OTUk, при создании которой на этапах мультиплексирования применяется побайтовое объединение информационных данных ODUk в групповые блоки ODTUGk, где k = 1, 2, 3. Формирование структур OTUk, ODUk и OPUk связано с присоединением заголовков OH и согласованием скоростей.

Цикл OTUk начинается синхрословом FAOH емкостью 7 байт в головной части. В завершении цикла применяется блок 4× 256 байт, который может быть представлен кодом Рида-Соломона RS (Reed-Solomon) или содержать нулевое заполнение (глава 8).

Передача байт блоков OTUk производится слева на право и сверху вниз байт за байтом (рисунок 2.30).

Конечным результатом исполнения операций схемы мультиплексирования является оптический транспортный модуль ОТМ в одном из трех вариантов: ОТМ-0.m; ОТМ-nr.m и ОТМ-n.m. В этих вариантах ОТМ могут сочетаться различные по скорости оптических каналов, с загружаемыми в них ОТUk. Например, ОТМ-n.1 переносит сигналы ОТU1 в *n*-оптических каналах или ОТМ-n.23 переносит *j*количество сигналов ОТU2 и *I* количество сигналов ОТU3, а сумма соответствует неравенству *i* + *j* ≤ *n*.



Строки

Рисунок 2.29 Структура цикла OTUk



Рисунок 2.30 Порядок передачи OTUk

Блок оптического канала OCh предназначен для транспортировк информационных данных пользователя сети OTN. В каждом оптическом канале OCh производится регенерация цифровых сигналов по принципу 3R, т.е. восстановление амплитуды, формы и фазовых параметров электрических импульсов. Пользовательские сигналы в OCh представляют собой сигналы OTUk. Кроме того, OCh могут поддерживать передачу других цифровых сигналов, например STM-N, Гигабит Ethernet. Блок оптического канала может создавать сетевой цикл полной или упрощенной формы.

Полная форма цикла уровня OCh предполагает перенос пользовательских данных на отдельной оптической частоте и заголовка каждого оптического канала на общей оптической частоте для *n*-каналов, т.е. отдельным оптическим сервисным каналом (OOS).

Упрощенная форма сигнала уровня ОСһ исключает оптический сервисный канал.

Для каждого оптического канала OChn используется поле сигналов обслуживания, помещаемое в заголовке OOS.

Блок переноса оптического канала ОСС (Optical Channel Carrier) предназначен для модуляции/демодуляции оптической частоты. Он может исполнять функции в двух вариантах: ОСС и ОССг. Вариант блока ОСС используется в полнофункциональной схеме оптического мультиплексирования с формированием заголовка ОСС в секции оптического мультиплексирования OMS. Вариант блока ОССг используется в упрощенной схеме оптического мультиплексирования без заголовка ОСС.

Каждому блоку ОСС придается точно определенная оптическая частота, соответствующая стандарту DWDM или CWDM.

DWDM, Dense Wavelength Division Multiplexing – плотное мультиплексирование с разделением по длине волны.

CWDM, Coarse Wavelength Division Multiplexing – редкое мультиплексирование с разделением по длине волны.

Эти стандарты рассмотрены в главе 8.

Блок группирования оптических несущих частот порядка n OCG-n (Optical Carrier Group of order-n) предназначен для мультиплексирования/демультиплексирования до 16 частот (n < 16). Предусмотрено две разновидности группирования: OCG-n.m и OCG-nr.m.

Группирование OCG-n.m состоит в объединении/делении *n* оптических несущих частот с каналами нагрузки OTU-m в любом сочетании *m* (OTU1, OTU2, OTU3) и канала обслуживания с заголовком OCC.

Группирование OCG-nr.m состоит в объединении/делении *n* оптических несущих частот с каналами нагрузки OTU-m в любом сочетании *m* (OTU1, OTU2, OTU3). В

этом варианте группирования не предусмотрено отдельного ассоциированного заголовка.

Благодаря группированию OCG-n создается оптическая секция мультиплексирования OMS-n, в которой образуются блоки оптического мультиплексирования OMU-n (Optical Multiplex Union-n, n > 1).

Для поддержки уровня оптической секции мультиплексирования создается заголовок секции мультиплексирования OMS-n OH, транспортируемый в сервисном канале OOS.

Блок оптического транспортного модуля ОТМ-n.m поддерживает оптическую секцию передачи OTS-n в оптической транспортной сети OTN. Модуль OTM-n.m создается в OTS-n и состоит из оптических волн нагрузки (OMS-n) и отдельного заголовка OTS-n OH, передаваемого в OOS.

Понятие оптической секции передачи может быть ассоциировано с понятием оптической физической секции порядка *n*, OPS-n. B OPS-n передается многоволновый оптический сигнал по определенной физической среде (волокна, соответствующие рекомендациям G.652, G.653, G.655, G.656). Кроме того, допускается ассоциация OMS и OTS в OPS. Число *n* установлено не более 16. Очевидно, что в паре оптических волокон можно организовать несколько отдельных OPS, в каждом из которых может быть до 16 волн. Это возможно благодаря стандартной сетке частот, пример которой рассмотрен в главе 8.

На рисунке 2.31 приведена структура интерфейса оптической транспортной сети с рассмотренными обозначениями, соответствующими схеме мультиплексирования ОТН. Этой структуре соответствует схема оптической системы передачи ОТН с секциями и каналами (рисунок 2.32).



Рисунок 2.31 Структура интерфейса оптической транспортной сети



Рисунок 2.32 Схема оптической системы передачи с мультиплексированием ОТН

В схеме оптической системы передачи с мультиплексированием ОТН предусмотрены промежуточные ретрансляторы (R) многоволновых сигналов оптических транспортных модулей ОТМ, включенные в секции обслуживания ОТS, оптические мультиплексоры ОМХ с соответствующим обслуживанием в секции OMS, транспондеры TPD с обслуживанием оптических каналов OCh, с функциями 3R регенераторов и обслуживанием цифровых блоков OPU, ODU, OUT (таблица 2.7) и загрузкой и выгрузкой информационных сигналов.

ODU – тип блока	OPU – блок нагрузки (кбит/с)	Шаг (кбит/с)
ODU1	2 488 320	
ODU2	238/237 ´ 9 953 280 » 9 995 277	
ODU3	238/236 ´ 39 813 120 » 40 150 519	
ODU1-Xv, X = 1 to 256	2 488 320 to 637 009 920	2 488 320
ODU2-Xv, X = 1 to 256	» 9 995 277 to » 2 558 709 902	» 9 995 277
ODU3-Xv, X = 1 to 256	» 40 150 519 to » 10 278 532 946	» 40 150 519

Таблица 2.7 Ёмкости цифровых блоков ОТН

2.5 Мультиплексирование Ethernet

Стандарт Ethernet прошел длительный путь эволюционного развития от технологии доступа с контролем коллизий на витой паре, "тонком" или "толстом" коаксиальном кабеле, до одномодовых световодов с дуплексной раздельной передачей и построением пассивной оптической сети. При этом скоростной режим изменился от 10 Мбит/с до 10 Гбит/с, а в перспективе составит уже 100Гбит/с.В процессе эволюции Ethernet меняется не только скоростной режим, но и формат кадров передачи, в которых учитывались возможности дуплексной передачи и хронометраж передачи. Пример двух различных форматов кадров приведен на рисунке 2.33.



1 – кадр IEEE 802.3; 2 – кадр IEEE PON 802.3ah Рисунок 2.33 Форматы кадров Ethernet

Назначение полей кадров Ethernet:

•преамбула состоит из семи байт 10101010;

•SFD, Start-of-Frame-Delimiter – начальный ограничитель кадра состоит из одного байта 10101011, появление его указывает на то, что следующий байт относится к заголовку;

•DA, Destination Address – адрес назначения длиной от 2 до 6 байт;

•SA, Source Address – адрес источника от 2 до 6 байт, содержит адрес узлаотправителя данных;

•L/T, Length/Type – длина или тип кадра указывает в 2-х байтах на длину или тип кадра, последний может быть задействован для обозначения разнотипных кадров;

•поле данных может содержать до 1500 байт;

•поле PAD (Padding) заполняет недостающее пространство данных до 46 байт;

•FCS, Frame Check Sequence – поле контрольной суммы (CRC-32);

•SOP, Start of Packet – поле указывает на начало кадра пассивной оптической сети PON 802.3ah;

•резервное поле 4 байта;

•LLID, Logical Link Identificator – индивидуальный идентификатор узла PON в 2х байтах; •первый бит LLID указывает на вид соединения "точка-точка" или "точкамноготочка", а остальные 15 бит содержат собственно индивидуальный адрес узла E-PON;

•CRC, Circle redundancy Check – контрольная сумма по преамбуле.

Протокольная организация Ethernet предусматривает контроль коллизий, т.е. одновременную передачу по общей линии сообщений более чем одной станцией. Для этого в различных версиях Ethernet предусмотрены такие механизмы, как CSMA/CD или MPCP и т.д.Метод доступа CSMA/CD (Carrier-Sense Multiply-Access/Collision Detection) называется методом коллективного доступа с опознанием несущей и обнаружением коллизий и применяется исключительно в сетях с логической общей шиной, к которой подключаются рабочие станции. Метод доступа MPCP (Multi-Point Control Protocol) – протокол управления множеством узлов, который представляет порядок передачи данных и устраняет коллизии.Совместно с формированием логических кадров передачи данных протоколы доступа являются частью логической структуры интерфейсов Ethernet, соответствующих физическому и канальному уровням модели взаимодействия открытых систем OSI (рисунок 2.34).



Рисунок 2.34 Протокольная структура Ethernet

Протокол управления логическим каналом LLC может поддерживать одну из процедур передачи:

- •передача без установления соединений и без подтверждений (дейтаграммы);
- •передача с установлением соединения (образования логического канала) и подтверждением;
- •передача без установления соединения, но с подтверждением.

Протоколы управления доступом к среде MAC это уже рассмотренные примеры CSMA/CD и MPCP.Физическое кодирование PCS зависит от вида среды передачи, например, используется кодирование 4B5B в формате NRZ для передачи по волоконно-оптической линии. Более подробную информацию о Ethernet IEEE 802.3 можно найти в литературе [19, 20, 21].

2.5.1 Ethernet стандарта EoT ITU-T G.8010 в оптической системе передачи

Протокольные уровни Ethernet стандарта ITU-T G.8010 определены в подуровнях для управления и контроля при использовании различных сред передачи (рисунок 2.35).

Кадры Ethernet EoT снабжаются сообщениями о типе нагрузки, протокольными метками доступа в подсеть SNAP (Sub-Network Access Protocol), контролем логического канала с адаптированными пользовательскими сигналами LLC (Logical Link Control), метками длины поля пользовательской нагрузки в кадре и типом кадра Ethernet. Транспортировка кадров Ethernet EoT может осуществляться с наблюдением транспортного тракта из конца в конец ETHP (Ethernet end-to-end path) и сегментным мониторингом ETHS (Segment monitoring). Большинство вариантов передачи кадров уже стандартизированы: Ethernet ® PDH, SDH, OTH, ATM. Протоколы GFP(Generic Framing Procedure – общая процедура формирования кадра, стандарт ITU-T) и LAPS(Link Access Procedure SDH – процедура доступа к линии SDH, стандарт ITU-T) обеспечивают эффективное согласование пакетной и циклической передачи.

Однако перенос кадров Ethernet через сети с протоколами MPLS (многопротокольная коммутация по меткам) и RPR(защищаемое пакетное кольцо) еще находятся в стадии разработки стандартов.



средами передачи

2.5.2 Схемы мультиплексирования Ethernet

Схемы мультиплексирования Ethernet различаются ступенями мультиплексирования. Общая схема мультиплексирования представлена на рисунке 2.36.

Одноступенчатая схема мультиплексирования кадра Ethernet предусматривает объединение до 4096 кадров Ethernet в общий логический путь транспортной сети (рисунок 2.37). Для этого каждый мультиплексируемый кадр получает свою метку (С-Тад), содержащую идентификатор локальной сети (рисунок 2.38).

Двухступенчатая схема мультиплексирования предполагает возможность объединения уже мультиплексированной нагрузки на первой ступени с метками С-

Тад в количестве *M*, где число *М*однозначно не регламентировано. На рисунках 2.39 и 2.40 представлено двухступенчатое мультиплексирование Ethernet.



Рисунок 2.37 Одноступенчатая схема мультиплексирования Ethernet



Рисунок 2.38 Одноступенчатое мультиплексирование Ethernet



Рисунок 2.40 Двухступенчатое мультиплексирование Ethernet

Контрольные вопросы

1 Какие виды цифрового мультиплексирования применяют в оптических системах передачи?

2 В чём заключается основной принцип плезиохронного мультиплексирования?

3 Какое назначение имеют битовые вставки при мультиплексировании PDH?

4 Какие скоростные режимы формируются в системах PDH?

5 В чем проблемы мультиплексирования PDH?

6 Какие преобразования цифровых данных предусмотрены в схеме мультиплексирования SDH?

7 Какие функции выполняют заголовки в цифровых блоках SDH?

8 Какое назначение определено указателям в цифровых блоках SDH?

9 Какие элементы входят в состав системы передачи SDH?

10 Что определяется в точках S и R системы передачи SDH?

11 В чем принципиальное отличие мультиплексирования ATM от SDH?

12 Чем отличается ячейка АТМ от цикла SDH?

13 Какие протокольные функции предусмотрены в АТМ?

14 Каким образом можно совместить мультиплексирование SDH и ATM?

15 В чём заключено отличие мультиплексирования ОТН от SDH?

16 Чем отличаются циклы SDH и OTH?

17 Какие виды мультиплексирования сочетаются в ОТН?

18 Какое из рассмотренных видов мультиплексирования обеспечивает наивысшую эффективность использования полосы пропускания стекловолокна? И почему?

3.1 Требования к излучателям

Источник оптического излучения, излучатель – прибор, преобразующий электрическую энергию возбуждения в энергию оптического излучения заданного спектрального состава и пространственного распределения. Источники оптического излучения должны отвечать определенным требованиям для успешного их применения в системах связи.

- 1. Высокая эффективность преобразования энергии возбуждения в энергию излучения.
- 2. Узкая спектральная полоса излучения.
- 3. Направленность излучения. Концентрация излучения на малой площади, характеризуемая показателем интенсивности (3.1)

$$\mathbf{I}=rac{\mathbf{c}\,\mathbf{n}}{4\,\mathbf{p}}\,\mathbf{E}^{\,2}$$
 , [Bt/cm 2] (3.1)

где n – показатель преломления, с – скорость света, Е – напряженность светового поля [В/см].

- 4. Быстродействие при модуляции, т.е. быстрое возникновение и гашение излучения.
- 5. Совместимость с приемниками излучения и физическими средами передачи.
- 6. Когерентность излучения.
- 7. Миниатюрность и жесткость исполнения.
- 8. Высокая технологичность и низкая стоимость.
- 9. Длительный срок службы (не менее 10 5 часов)
- 10. Высокая устойчивость к различным перегрузкам (механическим, тепловым, радиационным).
- 11. Возможность перестройки частоты излучения.

Указанным требованиям в большой степени отвечают некоторые типы излучателей:

- 1. светоизлучающие полупроводниковые диоды (СИД);
- 2. инжекционные полупроводниковые лазерные диоды (ППЛ);
- 3. твердотельные лазеры;
- 4. волоконные лазеры.

В отдельных случаях применение могут найти малогабаритные газовые лазеры. Светоизлучающий прибор является центральным прибором в составе передающего оптического модуля.

3.2 Светоизлучающие диоды. Конструкции, принцип действия, основные электрические и оптические характеристики

Светодиод (СИД) представляет собой полупроводниковый прибор с р - n переходом, протекание электрического тока через который вызывает интенсивное спонтанное излучение. Известно много конструкций СИД, однако наибольшее применение получили поверхностные и торцевые СИД.

3.2.1 Конструкции светодиодов для оптической связи

В технике оптической связи наибольшее применение получили две конструкции СИД: поверхностный (рисунок 3.1) и торцевой (рисунок 3.2).





В поверхностном светодиоде волоконный световод присоединяется к поверхности излучения через специальную выемку в полупроводниковой подложке. Такой способ стыковки СИД и стекловолокна обусловлен необходимостью ввода максимальной мощности спонтанного излучения в световод.



Рисунок 3.2 Конструкция торцевого светодиода

В конструкции торцевого светодиода предусмотрен вывод оптической мощности излучения через один из торцов. При этом другой торец выполнен в виде зеркала, которое отражает фотоны в активный слой. В приборе применяются дополнительные слои полупроводникового материала GaAlAs, который отличается от активного слоя показателем преломления и шириной запрещенной зоны. Это создает в активном слое оптический волновод, способствующий концентрации фотонов и усилению бегущей волны в инверсной насыщенной зарядами среде. Светоизлучающий торец СИД согласуется с волоконным световодом линзовой системой.

3.2.2 Принцип действия светодиодов

Работа светодиодов основана на случайной рекомбинационной люминесценции избыточных носителей заряда, инжектируемых в активную область светодиода. В результате инжекции не основных носителей заряда и дрейфа основных в активном слое происходит накопление и рекомбинация этих зарядов с выделением квантов энергии, которые примерно соответствуют ширине запрещенной зоны активного слоя:

$$E_{\phi} \approx E_{g} = h f$$
 (3.2)

При этом фотоны (кванты энергии), случайно образовавшиеся, могут двигаться в случайном направлении, отражаться от границ различных любом слоев полупроводников, поглощаться кристаллами и излучаться с поверхности (рисунок 3.1) или из торца (рисунок 3.2). Величина излучаемой мощности СИД примерно инжекции. линейно зависит ОТ величины тока Благодаря некоторым вышеперечисленным особенностям конструкции торцевого СИД в нем может происходить образование небольшого числа стимулированных, вынужденных и, естественно, когерентных фотонов. Это способствует увеличению общей мощности излучаемой энергии с концентрацией в пространстве. По этой причине торцевые называются слабокогерентными СИЛ источниками света или суперлюминесцентными диодами (СЛД).

3.2.3 Основные характеристики светодиодов

Ваттамперная характеристика светодиодов показывает зависимость излучаемой мощности от тока, протекающего через прибор (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 Ваттамперные характеристики светодиодов

Характеристики имеют линейный и нелинейные участки. Нелинейность обусловлена предельными возможностями по спонтанной рекомбинации электронов и дырок и их ограниченным числом, зависящим от насыщенности примесными компонентами и объема общего активного слоя. Ваттамперная характеристика зависит от температуры кристалла. С ее повышением мошность излучения значительно снижаться может [8]. Спектральная характеристика светодиодов показывает зависимость излучаемой мощности от длины волны излучения (рисунок 3.4)



Рисунок 3.4 Спектральные характеристики светодиодов

По спектральной характеристике можно определить ширину спектра излучения на уровне половинной от максимальной мощности излучения. Ширина спектра СЛД $\Delta\lambda_1$ (около 10 ÷ 30 нм), для поверхностного СИД $\Delta\lambda_2$ (около 30 ÷ 60 нм). Более узкий спектр излучения СЛД объясняется волноводным эффектом и некоторой согласованностью (когерентностью) излучательных рекомбинаций. При этом характер излучения остается спонтанным и ширина спектра определяется

разбросом энергетических состояний рекомбинирующих электронов и дырок. Диаграмма направленности излучения светодиода показывает распределение энергии излучения в пространстве (рисунок 3.5)



Рисунок 3.5 Угловая расходимость излучения

Угловая расходимость излучения оценивается на уровне уменьшения мощности в пространстве в два раза (Р_{МАКС} /2), что отмечено на рисунке точками на пересечении распределения поверхностного лучей И кривых мощности. Для СИД величины $\phi_X \approx \phi_V$ и могут составлять 110° ...180°. Для СЛД величины ϕ_X и ϕ_V не примерно составляют: $\phi \mathbf{X} \approx 60^{\circ}$, $\phi \mathbf{V} \approx 30^{\circ}$ равны И Внешняя квантовая эффективность светодиода показывает долю выводимой мощности излучения от полученной в результате спонтанной рекомбинации

з_{внеш} =
$$\frac{P_{излуч}}{P_{percom5}}$$
 (3.3)

В [3, 8, 13] показано, что эта доля не превышает 2 – 10 %, что обусловлено большими потерями из-за рассеяния мощности внутри прибора и отражением фотонов на границе "полупроводник – воздух" и "полупроводник – световод" из-за различных показателей преломления полупроводника (n = 3,5) и среды (n = 1,5).

3.3 Лазеры. Конструкции, принцип действия, основные электрические и оптические характеристики

3.3.1 Определение лазера

Лазер (LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) – прибор, генерирующий оптическое когерентное излучение на основе эффекта вынужденного, симулированного излучения.

Свойство когерентности излучения лазера предполагает согласованное протекание во времени и пространстве колебательных или волновых процессов. Излучаемая лазером электромагнитная волна называется когерентной, если ее амплитуда, частота, фаза, направление распространения и поляризация постоянны или изменяются упорядоченно.

Для представления процессов, происходящих в лазере, рассматривается простейшая двухуровневая модель (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 Двухуровневая модель процессов в лазере

В присутствии электромагнитного излучения (фотонов определенной энергии) с подходящей длиной волны в подходящем веществе (газе, жидкости, твердом теле, полупроводнике) могут наблюдаться индуцированные переходы между электронными состояниями: поглощение фотонов, спонтанное излучение фотонов и стимулированное излучение фотонов. При переходе между состояниями электронов с энергией Ev и Ec излучение имеет частоту

$$\mathbf{f} = \frac{\mathbf{E}_{\mathbf{c}} - \mathbf{E}_{\mathbf{v}}}{\mathbf{h}}, \quad (3.4)$$

т.е. в свободном пространстве наблюдается волна

$$\lambda = \frac{\mathbf{h} \mathbf{c}}{\mathbf{E}_{\mathbf{c}} - \mathbf{E}_{\mathbf{v}}}, \quad (3.5)$$

h Планка, где постоянная С скорость света. При взаимодействии излучения с атомами вещества, находящимися в нижнем энергетическом состоянии, может произойти поглощение квантов излучения (фотонов) и атомы перейдут на верхний энергетический уровень. Спонтанное излучение фотонов может происходить случайно. Когда во взаимодействии с излучением принимает участие возбужденный атом, т.е. находящийся в верхнем энергетическом состоянии, вместо спонтанного излучения может произойти имеет одинаковую частоту и стимулированное излучение. Оно фазу с индуцирующим излучением. Благодаря этому могут быть получены такие характеристики излучения как узкополосность, направленность, возможность модуляции широкой полосе В частот. Все три вышеуказанных процесса можно связать между собой уравнением Эйнштейна [8, 13]:

$$B_{12} N1 E(f) = A_{21} N2 + B_{21} N2 E(f)_{(3.6)}$$

где E(f) – полная энергия поля фотонов на единицу объема материала;

A₂₁ – коэффициент, определяемый вероятностью спонтанного перехода в единицу времени с уровня E_C на уровень E_V;

В₂₁ и В₁₂ – коэффициенты, определяемые вероятностью вынужденного перехода электронов с энергетического уровня E_C на E_V и наоборот; таким образом, произведение B₁₂ E(f) характеризует вероятность поглощения, а произведение В₂₁E(f) – вероятность вынужденного излучения;

N1 и N2 – число возбужденных электронов.

Физический смысл уравнения Эйнштейна можно представить так: левая часть определяет поглощение энергии внешнего фотонного поля в единицу времени, а правая – полную энергию, выделяемую в веществе в виде спонтанного и стимулированного излучения. Условие вынужденного излучения записывается:

$$\frac{\mathbf{B}_{21} \ \mathbf{N2}}{\mathbf{B}_{12} \ \mathbf{N1}} > \mathbf{1}$$
(3.7)

При одинаковых B₂₁ и B₁₂ должны быть созданы условия инверсной населенности N2 > N1, что трактуется как необходимость усиления электронов (возбуждение электронов).

Таким образом, для создания условия стимулированного излучения необходимо выполнение неравенства

$$\frac{\mathbf{B}_{21}}{\mathbf{A}_{21}} \mathbf{E}(\mathbf{f}) > 1,$$
(3.8)

что свидетельствует о необходимости получения сильного электромагнитного поля (высокой концентрации фотонов) в веществе. Исходя из вышеотмеченного, можно сделать вывод о конструкции лазера (рисунок 3.7). Для того, чтобы вещество стало источником когерентного излучения, оно должно иметь область с инверсной населенностью (N2 > N1) и связанную с ней область пространства (резонатор), в которой происходит увеличение энергии фотона в единице объема за счет стимулированного излучения (E(f) > 1). Фотонное поле создается отражателями фотонов, образующими резонансную систему.



Рисунок 3.7 Общая конструкция лазера

3.3.2 Определение резонатора для лазера

Что такое резонатор? В широком смысле резонатором называют колебательную систему, в которой возможно накопление энергии электромагнитных, акустических или механических колебаний. В пространственных (объемных) резонаторах могут возбуждаться колебания только определенных длин волн и определенной структуры, образующие стоячую волну. Частоты этих колебаний называются резонансными или собственными частотами резонатора, а колебания модами резонатора. Резонатор лазера для системы оптической связи должен быть сконструирован таким образом, чтобы в нем сохранялось небольшое число мод, а остальные должны гаситься. Для этого резонаторы делаются открытыми. Пример конструкции резонатора открытого типа (Фабри – Перо) приведен на рисунке 3.8. Электромагнитные волны, распространяясь вдоль оси резонатора, будут отражаться от зеркал перпендикулярно их поверхности и интерферировать между собой и образуют стоячие волны (моды).



Условие образования стоячих волн записывается:

$$L = \frac{\lambda}{2}m , \qquad (3.9)$$

где m = 1, 2, 3,... – число полуволн. Частотное расстояние между двумя ближайшими колебаниями определяется соотношением

$$\Delta \mathbf{f}_{m} = \mathbf{f}_{m} - \mathbf{f}_{m-1} = \frac{\mathbf{c}}{\boldsymbol{\lambda}_{m}} - \frac{\mathbf{c}}{\boldsymbol{\lambda}_{m-1}} = \frac{\mathbf{c}}{2L}$$
(3.10)

С учетом показателя преломления среды внутри резонатора можно записать:

$$\Delta \mathbf{f}_{\mathrm{m}} = \frac{\mathbf{c}}{2 \,\mathrm{L}\,\mathrm{n}}, \quad (3.11)$$

где n > 1. Также можно показать, что

$$\Delta \lambda_{m} = \frac{\lambda_{m}^{2}}{2 L n} (3.12)$$

Открытый резонатор способствует разрежению мод по сравнению с объемным из-за того, что волны, распространяющиеся в резонаторе под углом не слишком малым, после нескольких отражений выходят из резонатора. Важной характеристикой резонатора является его добротность [13]:

$$Q = - \frac{\pi L n}{\lambda_m \ln R}, \quad (3.13)$$

R коэффициент отражения где зеркал. R = 3,6; I = Пример: L 0.5 MM: 0,3; n = 0.85 МКМ. Q = 5787

Для создания инверсной населенности в веществе, помещаемом в резонатор, используются следующие методы: оптическая накачка, газовый разряд, химическая накачка, газодинамическая накачка и другие [3]. В технике оптических систем связи в основном используются полупроводниковые материалы для изготовления лазеров. Источником накачки приборов в этом случае является источник электрического тока. Основу конструкции лазера на полупроводниках составляют гетеропереходы, т.е. слои полупроводников с различными квантовыми и оптическими характеристиками.

3.3.3 Конструкции и принцип действия полупроводниковых лазеров

Известно множество типов конструкций полупроводниковых лазеров. Они подразделяются на простейшие (гомолазеры) и двойной гетероструктуры (ДГС), в которых используются резонаторы Фабри – Перо и электронные полоски (полосковые) с селекцией продольных мод, с распределенной обратной связью (РОС), с распределенными брэгговскими отражателями (РБО), связанно – сколото - составные (СЗ), с внешней синхронизацией мод и так далее [2, 3, 4, 6, 8, 13, 31, 41, 69, 78]. В рамках ограниченного по объему учебного пособия не представляется возможным рассмотреть достаточно подробно все эти конструкции. Поэтому внимание будет уделено только четырем конструкциям, которые чаще всего

применяются в оптических передатчиках систем связи. Это многомодовый лазерный диод полосковой геометрии с резонатором Фабри – Перо (обозначается Ф-П), лазер с распределенной обратной связью и распределенными брэгговскими отражателями (POC, PБO) лазер С вертикальным резонатором ЛBP. И Конструкция полоскового лазера Φ-Π представлена 3.9. на рисунке Название "двойная гетероструктура" обозначает, что эта конструкция имеет двойной слой различных по свойствам полупроводников, прилегающих к активному слою, которые отличают эту конструкцию от простейшего лазера [13]. Полупроводниковые слои оболочки имеют меньший показатель преломления, чем у активного слоя. Благодаря этому, в активном слое создается волновой канал с высокой плотностью носителей зарядов и фотонов. Активный слой имеет толщину около 0,1 ÷ 1 мкм. В нем с помощью источника электрического тока создается инверсная населенность. Внутренние поверхности торцов отшлифованы и превращены в зеркала.



Рисунок 3.9 Конструкция полоскового лазера Ф-П с двойной гетероструктурой

При малых токах накачки в активной области возникает спонтанное излучение, как и в СИД. При этом активная область излучает спонтанные фотоны во все стороны, и большая их часть покидает прибор через полупрозрачные зеркала (R ≈ 0,33). Лишь единицы из них отражаются обратно и проходят строго в плоскости активного слоя к противоположному зеркалу. Сталкиваясь с возбужденными атомами, они отдают им кванты энергии и вызывают вынужденную рекомбинацию электронов и дырок. Вновь возникают фотоны, которые будут согласованы между собой и вызвавшими их фотонами. При малых токах накачки количество вынужденных фотонов мало. При увеличении тока возрастает инверсная населенность и при N2 > N1 может произойти полное поглощение спонтанного излучения вынужденным. Ток, при котором это происходит, называется пороговым. После порогового тока резко нарастает мощность излучения. Такой режим работы прибора называется лазерной генерацией (рисунок 3.10).

Рисунок 3.10 Характеристика лазерной генерации мощности

Точные условия лазерной генерации подробно изложены в [31]. Они основаны на решении системы дифференциальных уравнений, связывающих плотность фотонов и концентрацию носителей заряда в активном слое. Условия лазерной генерации имеют фазовую составляющую

$$\beta = \frac{2 \pi}{\lambda_{m}} \mathbf{N} \cdot (3.14)$$

N = 1, 2, 3... и амплитудную составляющую

$$\mathbf{K}_{u} \mathbf{L} = \boldsymbol{\alpha} \mathbf{L} + \mathbf{ln} \left(\frac{\mathbf{l}}{\mathbf{R}} \right), \quad (3.15)$$

где К_и – коэффициент усиления среды на длине резонатора L, а - коэффициент затухания среды, R коэффициент отражения (~0.33). Таким образом, лазер представляет собой оптический квантовый генератор, в котором для возбуждения и поддержания электромагнитных колебаний должны выполняться условия баланса фаз И амплитуд. характеристика лазера определяется размерами резонатора, Спектральная спектром спонтанного излучения и выполнением условий генерации (рисунок 3.11).

Рисунок 3.11 Спектральная характеристика лазера

Для излучения лазером максимальной мощности необходимо добиться совпадения максимальной мощности спектра спонтанного излучения и собственных мод резонатора. Реальная спектральная характеристика лазера Ф-П представлена на рисунке 3.12

Спектральная характеристика представляет совокупность мод генерации. Ширина спектра оценивается на уровне –3 дБм от максимальной мощности (Рмакс/2). Излучение лазера, выходящее через торец, характеризуется диаграммой направленности. Угловая расходимость когерентного излучения обусловлена фундаментальными пределами

$$\varphi \sim \frac{\lambda}{A}$$
, (3.16)

где А – апертура излучателя, I - длина волны центральной моды. Для полупроводникового лазера величина угла расходимости оценивается постой формулой:

$$\varphi_{x, y} = \arcsin \frac{\lambda}{d_{x, y}}, (3.17)$$

где d_x и d_y – размер излучающей площадки по горизонтали и вертикали. Реальный угол расходимости составляет:

 ϕ $_{\textbf{X}}$ ~ 5 \div 10 град, ϕ $_{\textbf{V}}$ ~ 15 \div 30 град.

Рисунок 3.12 Спектральная характеристика лазера Ф-П

Необходимо отметить, что характеристики излучения лазера не остаются постоянными. Например, величина порогового тока сильно зависит от температуры тела лазера

 $I_{ni} = I_{n_1} \exp \left(t_i / t_1 \right),$ (3.18)

где t_i > t₁. На рисунке 3.13 приведены графики зависимости порогового тока лазера от температуры.

Рисунок 3.13 Зависимость порогового тока от температуры лазера

Для снижения зависимости порогового тока лазера от температуры в конструкциях применяют микрохолодильники на основе эффекта Пельтье [112], т.е. отбора излишков тепловой энергии материалами сплавного типа при прохождении через них электрического тока определенной величины. При изменении величины тока накачки в лазере происходит изменение спектрального состава, что при модуляции тока накачки информационным сигналом приводит к динамическому уширению спектра и перескоку максимальной мощности
излучения ОДНИХ [8]. С мод на другие Широкий спектр лазерных мод затрудняет процесс передачи информационных сигналов по волоконно-оптическим линиям связи из-за дисперсии импульсов оптической мощности. Для преодоления этой проблемы разработаны различные конструкции одномодовых лазеров. Чаще других применяют лазеры типа РОС, распределенная обратная связь (в англоязычной литературе DFB, Distributed Feed Back) и лазеры с брэгговскими отражателями РБО (в англоязычной литературе DBR, Distributed Brag Reflector): лазеры с вертикальными резонаторами ЛВР (в VCSEL, Vertical-Cavity англоязычной литературе Surface Emitting Laser). В отличие от лазеров Ф-П в лазерах РОС и РБО положительная обратная связь, необходимая для генерации лазерного излучения, создается не за счет зеркал, локально расположенных на торцах резонатора, а образуется внутри самого лазера. В лазерах РОС такая связь создается благодаря распределенной структуре под названием "гофр". Это граница между резонатором и другим диэлектрическим слоем (рисунок 3.14).

Обратная связь в лазере РОС осуществляется за счёт брэгговского рассеяния волн на гофре, который представляет собой фазовую дифракционную решетку с очень высокой разрешающей способностью, являющейся «распределённым резонатором». Качественная картина этого процесса состоит в следующем. Волна, распространяющаяся в активном слое справа влево, испытывает частичные отражения от гофра, в результате чего образуются дифрагированные волны, распространяющиеся в противоположном направлении, т.е. слева направо.



Рисунок 3.14 Конструкция лазера РОС

При этом волна, распространяющаяся вправо, ослабевает в направлении к левому краю, т.к. её энергия перекачивается в волну противоположного направления, интенсивность которой возрастает при сложении отраженных волн в фазе. Т.о. электромагнитное поле в резонаторе РОС можно представить в виде двух волн, распространяющихся в противоположных направлениях. Внутри резонатора могут

сохраниться только волны, отражающиеся от гофра под углом Q+ π/2. Это обусловлено селективностью обратной связи, для которой длину волны настройки на отражение в резонаторе вычисляют через условие Брэгга – Вульфа

 $\Lambda \times n_{\Theta} \times (1 + SinQ) = I \times \lambda_0, (3.19)$

где Λ - период гофра, $\mathbf{n_3}$ – эффективный фазовый показатель преломления, I –

целое число, λ**0** – длина волны излучения в свободном пространстве. Для **Q** = *π*/2 шаг гофра может быть определен:

$$\Lambda = \frac{1 \lambda_0}{2 n_{3}}, \quad (3.20)$$

при этом, как правило, значение I = 1. Для повышения мощности излучения в одномодовый лазер РОС может быть встроено с одного из торцов зеркало. Длина волны, обозначенная в (3.20) λ, называется длиной волны Брэгга. Ей соответствует частота генерации

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}\mathbf{0} \pm \left(\mathbf{l} + \frac{1}{2}\right) \frac{\mathbf{c}}{\mathbf{n}_{3}\mathbf{L}}, \quad (3.21)$$

где L – длина активного слоя с гофром, с – скорость света в свободном пространстве.

Важнейшей характеристикой одномодового лазера РОС является спектр излучения (рисунок 3.15)



Обычно ширина спектра излучения лазера РОС оценивается на уровне –20 дБм от максимального значения мощности. Кроме того, в спектре могут наблюдаться боковые моды, величина подавления которых должна быть не менее 30 дБ. Одномодовые лазеры РОС являются одними из основных источников излучения для протяженных волоконно-оптических линий. Лазеры РБО имеют другую конструкцию (рисунок 3.16), в которой активная область излучения находится вне зоны фильтрации моды. Это построение обеспечивает формирование спектральной линии уже, чем у лазера РОС на порядок.



Рисунок 3.16 Конструкция лазера РБО

Характеристики некоторых видов одномодовых и многомодовых полупроводниковых лазеров приведены в таблице 3.1 [79].

Изделие	Длина волны, нм	Мощность, мВт	Ток накачки, мА	Ширина спектра, нм	Примечание
ИЛПН-206-М	1270-1330	1-2	40-80	3-10	
ИЛПН-206-2	1270-1330	1.5-2.5	30-80	5	
ИЛПН-234-А	1500-1600	3.0	30-85	0.1	Угловая расходимость 1.3 град
ИЛПН-234-Б	1500-1600	4.0	45-100	0.1	Угловая расходимость 1.3 град

Таблица 3.1 Характеристики полупроводниковых лазеров

Для получения высокой стабильности излучения лазеров разработаны также лазеры с вертикальными резонаторами ЛВР (рисунок 3.17), обозначаемые VCSEL (Vertical-Cavity Surface Emitting Laser). В этих лазерах генерация оптического излучения происходит поперек p-n перехода. Преимущество короткого высококачественного резонатора ЛВР заключается в генерации моды узкого спектра высокой стабильности. Такие лазеры могут формироваться группами на одной подложке микросхемы. При этом стабилизация параметров производится сразу для всего лазерного массива. Слои отражателя выполнены из набора четвертьволновых пластин, фильтрующих моду излучения. Они формируют структуру распределенного брэгговского отражателя DBR. Слои изолятора уменьшают спонтанную эмиссию фотонов.



Рисунок 3.17 Конструкция лазера ЛВР

3.3.4 Классы лазерных устройств для систем оптической связи

Максимальное лазерное излучение зависит от типа используемого лазерного диода. Международный стандарт IEC 825 определяет максимальный уровень лазерного излучения для каждого лазерного класса в соответствии с длиной волны (в классы входят лазерные диоды и оптические усилители). Таблица 3.2 Классы лазерных устройств по международному стандарту IEC 825

Класс лазера	Длина волны излучения, нм	Максимальная мощность лазерного излучения, мВт
1	1300	8.85
	1550	10
3A	1300	31
	1550	50
к×ЗА	1300	81
	1550	50
3B	1300	500
	1550	500

3.4 Согласование источников оптического излучения с физическими средами

3.4.1 Соединение источника с волокном

С учетом различия апертур источника излучения и световода разработан ряд элементов ввода — вывода излучения. Они выполняют функцию оптического согласования угловых апертур активных элементов (светодиодов и лазеров) и световодов. Показатели преломления полупроводниковых материалов, из которых изготавливаются СИД и ППЛ, имеют размерность около 3,5 (ППЛ \approx 3,5), а стекловолокно — около 1,5. Еще больше проблем с выводом / вводом излучения через воздушный зазор, т.к. показатель преломления воздуха мало отличается от единицы ($n_{\rm B}$ = 1,001). Условие полного внутреннего отражения при распространении света на границе раздела сред полупроводник — воздух имеет вид (3.22) [3]:

, (3.22)

α_{КР} = критический угол вывода (рисунок 3.18)

Рисунок 3.18 Вывод излучения из светодиода

При этом доля излучаемой мощности составит [13]:

(3.23)

Вместе с тем лучи, достигшие поверхности раздела сред в пределах α_{KP} испытывают некоторое отражение на неоднородностях поверхностей (полупроводника и стекловолокна). Коэффициент, учитывающий это рассеяние, вычисляется (3.24) [13] :

(3.24)

Пример расчета эффективности вывода излучения: $n_{\Pi\Pi} = 3.6;$

 $\alpha_{\rm KP}$ = 15°;

 $\kappa = 3.85 \times 10^{-2};$ m = 0,68.

Эффективность вывода излучения

где Р₀ – излученная мощность в активном слое. Эффективность составит

Для повышения эффективности ввода излучения в стекловолокно используются различные линзы, позволяющие сконцентрировать световой луч, что эквивалентно увеличению апертуры. Анализ согласования источника излучения с одномодовым волокном, проведенный методом волновой оптики, показывает [6]:

(3.25) (3.26)

где х – боковое смещение, z – продольное смещение, r₁ и r₂ - радиусы модовых пятен волокна и лазерного луча на уровне мощности 1/e². При этом луч света сужен линзовой системой. При жесткой стыковке излучателей и оптических волноводов используют клеевые фотополимеризуемые композиты на основе полиэфиракрилатных компаудов. Эти клеи быстро полимеризуются под действием ультрафиолетового излучения и имеют малую усадку.

3.4.2 Линзовые соединения

На рисунках 3.19 – 3.22 представлены различные линзовые соединители [6, 8], которые согласуют световоды и излучатели.

Рисунок 3.19 Согласование микролинзой

Рисунок 3.20 Согласование линзой на световоде

Рисунок 3.21 Согласование линзой на излучателе

Рисунок 3.22 Согласование градановой линзой

Приведенные на рисунках примеры линзовых соединителей (микролинз, торцевых линз, граданов) не исчерпывают все возможные способы [2, 3, 8].

3.4.3 Вывод излучения в атмосферу

В открытых (атмосферных) оптических системах связи основная сложность состоит в изменчивости атмосферной прозрачности и рефракции оптического луча. Таким

образом, осуществить строгую фокусировку луча от передатчика к приемнику не представляется возможным. Для того, чтобы получить максимальную мощность в приемном устройстве, необходимо учесть не только направленные свойства источника излучения (лазера, светодиода), HO И апертуру приемника, дифракционные искажения при выводе излучения в атмосферу, рефракцию и поглощение атмосфере согласующих устройствах. В И В плоскости приемной апертуры должно формироваться изображение излучаемой мощности от передатчика. Для этого используется система расширения светового коллимированного пучка (рисунок 3.23). Это уменьшает расходимость, обусловленную дифракцией света.

Рисунок 3.23 Расширитель пучка, используемый для уменьшения его расходимости

Благодаря расширителю пучка получены угловые расходимости лазерного излучения в пределах 0,5÷3 ± 0,1 мрад при мощности передатчика от 10 до 45 мВт и дальности передачи от 0,5 до 5 км [80].

Для расчета максимального затухания атмосферного канала с учетом угловой расходимости излучения применимо соотношение 3.27 [114].

Аатмос. кан.=10lg(Рпер×D²прием. ант./Рприем. миним×Ф²×L²атмос.кан.) ^(3.27)

Где Р_{пер} – мощность на выходе передающей антенны, **D**_{прием.ант.} -диаметр приемной антенны, **Р**_{прием.миним.}- минимальная мощность на входе приемной антенны, **φ** – угол расходимости излучения, **L**_{атмос.кан.} – длина атмосферного канала.

Если расходимость пучка света мала, например, не превышает 0,1 мрад, то требуемая точность наведения будет предъявлять жесткие требования к системе управления лучом и механической стабильности передатчика и приемника.

3.4.4 Перестройка частоты излучения лазера

В системах многоволновой передачи (DWDM), кроме лазеров с фиксированными частотами генерации, часто необходимы перестраиваемые лазеры. Такие лазеры необходимы для коммутации и управления оптическими потоками в оптических сетях. Также перестройка лазеров необходима для тестовых операций элементов систем DWDM. При этом важнейшей характеристикой перестройки лазера является скорость перестройки, которая должна измеряться наносекундами в одних случаях (переключение нагрузки с оптического канала на оптический канал) и в других случаях секунды, когда происходит тестирование каналов DWDM.

Широкое применение получили перестраиваемые лазеры с внешними резонаторами Фабри-Перо, дифракционными брэгговскими решетками, плоскими отражательными дифракционными решетками, встроенным управляемым воздушным резонатором и другие. В таблице 3.3 приведены примеры характеристик перестраиваемых лазеров.

Таблица 3.3 Характеристики перестраиваемых лазеров

	Производитель	Спектральный диапазон, нм	Точность, нм
Тип источника			

LPB	Tektronix	1290 - 1570	0.01
FLS-2600	Exfo	1520 - 1570	0.01
81554SM	Agilent	1290 - 1330	0.01
81640A	Agilent	1500 - 1640	0.015
TQ8111	ADVANTEST	400 - 1600	0.01

Подробную информацию о перестраиваемых лазерах можно найти в [36].

Контрольные вопросы

1.Что такое источник оптического излучения?

2.Какие требования предъявляются к излучателям оптических систем передачи?

3.Что представляет собой светодиод?

4.Какие конструкции СИД применяются в системе связи?

5.На чем основан принцип действия СИД?

6.Какое принципиальное различие имеют СИД торцевой и поверхностный?

7.Какие характеристики имеет СИД?

8.Какое устройство называется лазером?

9.Что представляет собой уравнение Эйнштейна?

10.Из каких элементов состоит лазер?

11. Каковы условия лазерной генерации?

12.Как устроен резонатор Фабри – Перо?

13.В чем заключается работа полоскового лазера?

14.Какие характеристики имеют полупроводниковые лазеры?

15.Что особенного в конструкции и принципе действия лазеров РОС, РБО и ЛВР?

16.Какие классы лазерных устройств предусмотрены для систем оптической связи?

17.Каким образом согласуются излучатели с волоконно-оптическими линиями связи и атмосферой?

18.С какой целью созданы лазеры с перестройкой частоты излучения?

http://siblec.ru/index.php?dn=html&way=bW9kL2h0bWwvY29udGVudC83c2VtL2Nvd XJzZTEwMS9sZWM0Lmh0bQ==

4.1. Определение модуляции и классификация видов.

Сигналы, поступающие от источников сообщений (микрофона, телевизионной камеры, датчика телеметрии и других), как правило, не могут быть непосредственно переданы по каналу радиодиапазона или оптического диапазона частот. Чтобы осуществить эффективную передачу сигналов в какой-либо среде (атмосфере или стекловолокне), необходимо перенести спектр сигналов из низкочастотной области в область достаточно высоких частот.

Процедура переноса спектра из низких частот в область высоких частот называется модуляцией.

Обратная процедура получила название демодуляции.

Модуляция в оптических системах с одноканальной и многоволновой передачей должна удовлетворять ряду требований:

- при модуляции должен создаваться компактный спектр сигнала, спектральная эффективность должна приближаться к величине 0.4-0.5 бит/с/Гц (например, полоса 100ГГц при скорости 40Гбит/с);
- модулированный сигнал должен быть максимально устойчив к нелинейным эффектам;
- модулированный сигнал должен быть устойчивым к дисперсионным и нелинейным искажениям в волоконно-оптической линии и устройствах компенсации дисперсии и оптического усиления;
- конфигурация оптического передатчика и приемника должны быть достаточно простыми.

В технике оптических систем передачи этим требованиям соответствуют в определенной степени**внешняя** и **прямая** модуляция электромагнитных излучений оптического диапазона.

Внешняя модуляция основана на изменении параметров излучения (интенсивности, поляризации и других) при прохождении светового луча через какуюлибо среду (рисунок 4.1).

Внешняя модуляция основана на следующих физических явлениях.

Электрооптический эффект – изменение параметров показателя преломления некоторых материалов (например, ниобата лития LiNbO3) под действием электрического поля, создаваемого источником модулирующего сигнала.



Рисунок 4.1 Принцип внешней модуляции

Магнитооптический эффект Фарадея – изменение параметров показателя преломления некоторых материалов под действием магнитного поля, создаваемого источником модулирующего сигнала.

Упругооптический эффект – изменение параметров показателя преломления некоторых материалов под действием акустической (или механической) волны, создаваемой источником модулирующего сигнала (эффект Брэгга, эффект Рамана – Ната).

Электроабсорбционный эффект – изменение параметров прозрачности некоторых материалов под действием электрического поля, создаваемого источником модулирующего сигнала.



Рисунок 4.2 Принцип прямой модуляции

Наиболее широкое применение в модуляторах оптических передатчиков получили электрооптический и электроабсорбционный эффекты. Модуляторы на их основе называются ЭОМ и АБОМ. Эти модуляторы отличаются высоким быстродействием и получили применение в высокоскоростных системах передачи (от 2,5 Гбит/с до 100 Гбит/с и выше).

Прямая модуляция, иногда называемая непосредственной, предполагает воздействие модулирующего сигнала на источник оптического излучения (рисунок 4.2).

Прямая модуляция отличается относительной простотой и реализуемостью в интегральных схемах, что труднодостижимо для внешней модуляции. Однако применение прямой модуляции имеет частотный (скоростной) предел около 5 ГГц (2,5 – 5,0 Гбит/с) [26, 51]. Это обусловлено конечным временем жизни носителей зарядов и фотонов в средах преобразования (активном слое лазерного диода).

Относительная простота и низкая стоимость прямой модуляции обусловили ее широкое применение в оптических системах передачи аналоговых и цифровых сигналов с модуляцией интенсивности (мощности) излучения.

Помимо модуляции интенсивности излучения нашли применение методы модуляции фазы, частоты и поляризации оптического излучения как для передачи информационных сигналов, так и для высокоточных датчиков [2, 3, 24, 50, 60, 71].

4.2. Прямая модуляция

Выходное излучение полупроводникового светодиода или лазера можно непосредственно модулировать изменением характеристик активного слоя (тока накачки/инжекции, объема резонатора лазера) так, чтобы получить модуляцию мощности излучения или оптической частоты, или импульсную модуляцию. Чаще всего при прямой модуляции изменяется выходная мощность или излучение выходит импульсами за счет изменения величины силы тока, протекающего через прибор.

Для реализации прямой модуляции интенсивности (мощности) необходимо подать постоянное смещение (рисунок 4.3), которое позволяет получить линейный процесс.

Интенсивность излучения – средняя мощность, переносимая волной за одну секунду через волновую поверхность площадью один квадратный метр. Однако для описания процесса модуляции часто применяется просто параметр мощности (4.1, 4.2).

(4.1)

где P0 – постоянная или максимальная мощность излучения в зависимости от выбора величины тока смещения, М – параметр глубины модуляции, который определяется соотношением [24]

(4.2)

где P_P – пиковая мощность оптического излучения, P_{min} – минимальная мощность оптического излучения.

Изменение мощности излучения может происходить импульсно или по закону сигнала с непрерывным во времени изменением, как показано на рисунке 4.3. Непрерывные (аналоговые) сигналы при модуляции могут искажаться. Поэтому при модуляции интенсивности выбирается линейный участок ваттамперной характеристики излучателя. Достижимой является величина М до 90%, но при этом начинают проявляться нелинейные искажения. Для их оценки и нормирования применяется степенная аппроксимация.

Рисунок 4.3 Прямая модуляция со смещением

Степенная аппроксимация ваттамперной характеристики с нелинейностями в окрестностях некоторой рабочей точки (ток смещения) можно представить в виде зависимости мощности излучения[14]:

(4.3)

где a₀, a₁, a₂... – коэффициенты аппроксимации.

Полагая, что ток, проходящий через прибор (СИД или ППЛ), подчиняется закону

(4.4)

После подстановки 4.4 в 4.3 и перехода к мощности получится:

 $P_{s} = P_{0} + P_{1}\cos_{s}t + P_{2}\cos_{s}t + P_{3}\cos_{s}t + \dots$ (4.5)

Таким образом, нелинейные искажения приводят при модуляции к искажению формы сигнала и изменению его спектра, т.е. появлению гармоник сигнала P_2cos2_st , P_3cos3_st и т.д. Изменение спектра опасно образованием переходных помех в многоканальных системах. По этой причине на искажения введены показатели для

оценки нелинейности: затухание нелинейности по мощности второй и третьей гармоник

(4.6)

Минимально допустимые значения:

а_{н2} = 55 дБ, а_{н3} = 60 дБ.

Для достижения указанных значений ан2 и ан3 могут применяться различные методы уменьшения нелинейных искажений: предискажение, использование отрицательной обратной связи, фазовая компенсация и другие.

Введение предискажений в информационный сигнал S(t) до модуляции, обратных тем, которые при модуляции вносит источник излучения, позволяет выполнить требование по минимальной величине a2г и a3г, однако в этом методе реализация модулятора чувствительна к возможным изменениям ваттамперной характеристики [8].

Метод отрицательной обратной связи широко применяется для компенсации нелинейных искажений в усилителях аналоговых систем. Однако при реализации в оптическом модуляторе имеет место особенность в использовании оптического канала (рисунок 4.4).

Излучаемая мощность P_s будет пропорциональна параметрам передачи сигнала в цепи обратной связи, образованной фотодиодом и усилителем 1 (4.7).

Ps ~ Rx[S(t) - Kxl_{oc}]

(4.7)

где R – коэффициент, учитывающий передачу в усилителе 2.

Рисунок 4.4 Схема модулятора с компенсацией нелинейных искажений в цепи обратной связи

Рисунок 4.5 Подавление второй гармоники при фазовой компенсации

Необходимо отметить, что кроме компенсации нелинейных искажений в схеме с обратной связью стабилизируется величина средней излучаемой мощности и поддерживается рабочий режим источника излучения.

Идея метода фазовой компенсации отражена на рисунке 4.5.

При фазовой компенсации продуктов нелинейности модуляции (второй гармоники) применяется одновременная модуляция двух близких по характеристикам приборов. При этом модулирующие сигналы S(t) сдвинуты по отношению друг к другу на 90° (/2). Фазы вторых гармоник будут сдвинуты на величину (180°), т.е. будут интерферировать в общем пути в противофазе.

Для уменьшения влияний нелинейных искажений на качество передачи информации в аналоговых системах применяют предварительную модуляцию на поднесущей частоте. При этом модулированный сигнал преобразуется в формат импульсного двухуровнего сигнала с частотно-импульсной, широтно-импульсной, времяимпульсной модуляцией (ЧИМ, ШИМ, ВИМ).

4.2.1 Модуляционные характеристики светоизлучающего диода

Частотная характеристика модуляции СИД имеет ограниченную верхнюю частоту, определяемую временем жизни инжектированных носителей зарядов в активном слое _S:

(4.8)

где f — частота модулирующего сигнала S(t). Полоса частот модуляции СИД определяется по частоте, на которой обнаруживается уменьшение средней квадратичной мощности модулированного сигнала в два раза (4.9).

(4.9)

Это возможно в случае

(4.10)

В логарифмическом масштабе это изменение мощности будет соответствовать

На рисунке 4.6 представлен график частотной характеристики модуляции СИД.

Рисунок 4.6 Частотная характеристика модуляции СИД

Реальная полоса частот модуляции СИД зависит от конструкции прибора и, как правило, не превышает 100 МГц.

Эквивалентная электрическая схема модулятора с СИД представлена на рисунке 4.7.

Рисунок 4.7 Эквивалентная схема модулятора с СИД

Заметное отличие имеют характеристики модуляции СИД в высокочастотном непрерывном и импульсном режимах модуляции.

Высокочастотный непрерывный режим предполагает большой ток прямого смещения, на который накладывается гармоническое воздействие

(4.11)

где

В таком случае задержки рекомбинации определяются временем жизни носителей заряда в активном слое ts и внутренней квантовой эффективностью. Достижимая полоса частот модуляции может быть расширена до 200 МГц.

Рисунок 4.8 Характеристика быстродействия СИД при модуляции

В импульсном режиме модуляции, когда происходит включение и выключение прибора большим сигналом, скорость релаксации зависит не только от _s, но и от таких процессов, как перезарядка барьерной емкости р - n перехода (Cд = 10 ? 100 пФ), установлением распределения концентрации носителей зарядов во всей области излучения. При этом наблюдается задержка включения

где Uд – напряжение на диоде, - амплитуда модулирующего импульса. Кроме того, наблюдается время нарастания импульса tHP (рисунок 4.8).

Общее время включения СИД при импульсной модуляции составит

(4.13)

В результате этого полоса частот модуляции СИД не достигает и 100 МГц. Только в короткозамкнутом режиме, когда выключается и замыкается цепь СИД, полосы частот модуляции малым и большим сигналом могут быть равными.

4.2.2 Модуляционные характеристики полупроводникового лазера

Частотная характеристика модуляции ППЛ имеет ограниченную верхнюю частоту, определяемую спонтанным временем жизни фотона в активном слое внутри резонатора [8, 24]:

(4.14)

где - пороговый ток лазера, - ток модулирующего сигнала.

Частотные характеристики модуляции ППЛ зависят и от добротности резонатора

(4.15)

где с – скорость света; n – показатель преломления активного слоя ППЛ; L – длина резонатора; а Р – потери на рассеяние; R1 и R2 - коэффициенты отражения зеркал резонатора.

Кроме того, выбор величины тока смещения относительно порогового позволяет изменять полосу частот модуляции (рисунок 4.9).

Приведенные модуляционные характеристики имеют явно выраженный резонансный характер. В основе резонансного характера лежит процесс взаимодействия между избыточными носителями и оптическим излучением в резонаторе. В зоне генерации возникают два своеобразных резервуара (носители заряда и кванты – фотоны), между которыми происходит обмен энергией. Наиболее наглядно резонансное явление наблюдается при импульсной модуляции тока накачки (рисунок 4.10).

Рисунок 4.9 Частотные характеристики модуляции ППЛ

При возбуждении лазера скачком тока I_S наблюдается задержка начала генерации на время _S, которое необходимо для возрастания плотности носителей зарядов до порогового уровня:

(4.16)

Резкое увеличение концентрации носителей заряда в свою очередь вызывает возрастание рекомбинационного излучения, которое опять с задержкой увеличивает вынужденную рекомбинацию, что приводит к падению концентрации носителей заряда и уменьшению излучаемой мощности. Наличие задержек приводит к колебательному процессу, называемому "пичковым" или "звоном лазера". Пичковый режим ограничивает частотный диапазон модуляции многомодового лазера. Применение в технике оптической связи узкополосковых лазеров, лазеров зарощенного типа, одномодовых лазеров РОС со специальными поглощающими противопичковыми добавками на основе титана исключили в значительной степени влияние "звона".

Рисунок 4.10 Импульсная модуляция ППЛ

Рисунок 4.11 Динамическое уширение спектра лазера при модуляции

Другой проблемой прямой модуляции лазерного прибора стало динамическое уширение спектра. Если ППЛ работает в режиме постоянного тока, то легко возникает одна продольная мода. Однако если осуществить непосредственную гармоническую модуляцию, то число генерируемых продольных мод возрастает. Это связано с тем, что одновременно с модуляцией происходит резкое изменение усиления в активном слое, и при большом числе продольных мод усиление постепенно превышает потери в резонаторе. Это уширение спектра называется динамическим или другое название чирпинг-эффекта, т.е. паразитной частотной модуляции.

Динамическое уширение спектра зависит от частоты модуляции и становится серьезной проблемой в случае, когда полоса передачи ограничена шириной спектра источника оптического излучения, например, хроматической дисперсией в одномодовом стекловолокне (рисунок 4.11) т.к. это явление приводит к дополнительным искажениям оптических импульсов. Кроме того, в процессе прямой модуляции образуются дополнительные шумовые составляющие, которые также ограничивают возможности передачи по волоконным световодам.

4.2.3 Шумы модуляции лазера

Шумы, возникающие при модуляции тока накачки лазера, подразделяются:

- шумы, обусловленные спонтанным излучением;
- шумы, обусловленные изменением температуры и тока (дробовый шум);
- шумы, обусловленные отраженным излучением от стыка с оптическим волокном;
- шумы перескока моды;
- шумы частотной модуляции.

Шумы спонтанного излучения присутствуют во всех без исключения полупроводниковых лазерах. Они обусловлены флуктуациями коэффициента усиления в активном слое из-за флуктуаций спонтанного излучения. При этом максимум шума может быть распределен в частотном интервале от 1 ГГц до 100 ГГц.

Шумы изменения температуры и тока накачки – обусловлены изменением смещения из-за изменения температуры и модулирующих составляющих тока накачки. Сказывается влияние частот ниже 10 МГц.

Шумы отражения оптического сигнала от стыка с поверхностью световода связаны с возвратом отраженного света, который имеет произвольную фазу. При этом изменяются условия генерации, которые приводят к изменению резонансной длины волны, числа генерируемых мод, изменению формы ватт-амперной характеристики и т.д. Для борьбы с шумами отражения используются оптические изоляторы [6, 10].

Шумы перескока моды возникают из-за малого спектрального расстояния между модами. При ширине спектра моды около 1-2 нм расстояние между модами составляет около 0,8 нм. По этой причине и недостаточно высокой добротности резонатора в процессе модуляции возникают возможности генерации лазера на соседних модах. Перескок моды приводит к значительным колебаниям мощности

излучения лазера. Для устранения шумов перескока применяется режим с высоким смещением (около или выше порогового тока). Лазеры типа РОС благодаря регулировке не имеют перескока мод.

Шумы частотной модуляции сходны по природе с шумами мод, обусловленными флуктуациями спонтанного излучения, колебаниями температуры, электрического тока, обратным светом, перескоком моды. Эффективным средством борьбы с шумом модуляции лазера считается отрицательная обратная связь с широкой полосой частот.

4.2.4 Схемотехнические решения для прямой модуляции излучения СИД и ППЛ

Простейшая схема (рисунок 4.12) применяется для модуляции СИД. Схема требует больших токов включения источника сигнала. В схеме могут возникать большие искажения информационного сигнала. В схеме сложно выполнить предварительное смещение.

Рисунок 4.12 Простейшая схема модулятора

Схема модулятора с логическим затвором и предварительным смещением (рисунок 4.13) позволяет обеспечить высокие скорости передачи сигналов с двумя уровнями передачи.

Транзистор VT1 с резистором R образуют логический затвор, который управляется информационным сигналом.

Рисунок 4.13 Схема модулятора с логическим затвором

Стабилизирующая схема модулятора с обратной связью позволяет обеспечить высокую линейность модуляции, что чрезвычайно необходимо для сигналов, чувствительных к нелинейным искажениям (рисунок 4.14). Схема стабилизирует излучение ППЛ.

Рисунок 4.14 Стабилизирующая схема модуляции с обратной связью

Небольшая часть выходной мощности захватывается местным фотодиодом (ФД), совмещенным с ППЛ, преобразуется в фототок, ток усиливается и сравнивается с током информационного сигнала. Отклонение мощности излучения компенсируется изменением тока накачки.

Рассмотренные схемы модуляторов могут входить в состав передающих оптических модулей, которые представлены двумя видами [28, 68]: светодиодными или лазерными модулями и интегрированными передающими модулями.

4.2.5 Светодиодные, лазерные и интегральные передающие оптические модули

Светодиодные и лазерные модули представляют собой излучатели, размещенные в корпусах, сопряженных со стандартными оптическими соединителями. Передающие модули помимо согласующих устройств имеют встроенные фотодиоды обратной связи, терморезисторы, термоохладители. Конструктивное оформление модулей способствует выполнению требований по характеристикам и удобству в

эксплуатации. На рисунке 4.15 приведен пример схемы модуля. Схема требует применения навесного монтажа, управления охладителями и формирователя тока модуляции.

Рисунок 4.15 Структурная схема лазерного модуля

В таблице 4.1 указано назначение выводов.

Таблица 4.1 Назначение выводов на корпусе лазерного модуля

№ вывода	Назначение вывода
1	Термисторный датчик
2	Термисторный датчик
3	Анод лазерного диода
4	Анод фотодиода
5	Катод фотодиода
6	Термоохладитель
7	Термоохладитель
8	Анод модулятора
Корпус	Катод лазерного диода и модулятора

Рисунок 4.16 Схема передающего интегрированного модуля

Интегральные передающие модули вырабатывают излучение с длинами волн 1510 ... 1564 нм. Они состоят из лазера со схемой управления, системы автоматической регулировки уровня мощности, устройства наблюдения за лазерным лучом и сигнализатора неисправности.

Охладитель со схемой управления размещен в корпусе. Необходимо заметить, что охладитель (микрохолодильник) потребляет электрический ток 300-700мА, что существенно превышает ток накачки при прямой модуляции лазера (10 - 150мА).

Входы данных и тактовой частоты – дифференциальные, на основе схем положительной эмиттерно-связанной логики.

Эти интегральные модули не требуют навесных элементов. Для их применения нужно подвести только напряжение питания.

На рисунке 4.16 представлен пример схемы передающего интегрированного модуля.

В таблицах 4.2 и 4.3 приведены назначение выводов и характеристики [68].

Таблица 4.2 Назначение выводов интегрального модуля

№ вывода	Назначение вывода
2	отключение лазера
3	напряжение питания лазера
4	выход измерителя мощности лазера
5	подстройка частоты лазера
7	сигнал превращения выходной мощности

9	выход датчика температуры	
11	напряжение питания охладителя	
12	выход сигнала "Температура ниже нормы"	
13	выход сигнала "Температура выше нормы"	
16	напряжение питания охладителя	
17, 18, 22, 28	корпус	
23	инвертирующий вход данных	
24	неинвертирующий вход данных	
25	напряжение питания схем ЭСЛ	
26	вход сигнала модулятора	
27	напряжение питания схемы управления	
Остальные выводы не используются		

Таблица 4.3 Характеристики модуля

Параметр	Ед. изм.	Номиналы	
Оптические характеристики			
Длина волны	НМ	1502 1564	
Скорость передачи	Мбит/с	2 622	
Выходная мощность	дБм	-3 +2	
Подавление боковых мод	дБ	> 30	
Электрические характеристики			
Напряжение питания	В	4,7 5,3	
Потребляемый ток	мА	200	
Напряжение питания охладителя	В	3,0 5,3	
Ток охладителя	мА	650	
Тип данных	-	эмиттерно-связанная логика (ЭСЛ)	
Другие типы вх/вых	-	КМОП	

4.4. Сравнительная характеристика прямой и внешней модуляции

Преобразование электрических сигналов в оптические можно реализовать в передатчике несколькими способами (прямой модуляцией, внешней электрооптической, акустооптической, электроабсорбционной модуляцией). Какое значение имеет каждый вид модуляции?

Например, при сравнении прямой и внешней модуляции на скорости передачи импульсов цифрового сигнала в 10 Гбит/с в стандартном одномодовом оптическом волокне (G.652) допустимые дальности передачи составляют [76]:

- при прямой модуляции до 20 км;
- при электроабсорбционной модуляции до 100 км;
- при электрооптической модуляции (модулятор Маха Зендера) свыше 100 км, а при наличии оптических усилителей до 1500 км [74].

Лучшие результаты может обеспечить передача по волокнам с характеристиками G.655, G.656 (смещенная ненулевая дисперсия), что обусловлено меньшими дисперсионными искажениями и нелинейными эффектами.

Причиной столь существенных различий является эффект чирпинга, т.е. паразитной частотной модуляции или динамического расширения спектра оптического модулированного сигнала.

Акустические модуляторы не сравниваются по характеристикам из-за ограниченного спектра модулирующих сигналов (не выше 1 ГГц [6]).

Среди перспективных высокоскоростных видов модуляции необходимо обратить внимание на внешнюю модуляцию двухступенчатой реализации с ограничением полосы модулированного сигнала в форматах NRZ и RZ при доубинарном фазовом и амплитудном кодировании с подавлением несущей частоты, с подавлением одной боковой (DB-CSRZ, CS-RZ DPSK, NRZ DPSK, DQPSK, D8PSK, D16PSK, SSB). Эти виды модуляция предназначены, прежде всего, для систем DWDM большой протяженности линий со скоростью передачи в каждом канале 40Гбит/с и выше с минимизацией межканальных помех и частотного интервала между каналами оптической передачи. В перспективе модули оптической передачи для DWDM будут выполняться гибридными (рис 4.38), где совмещаются источники излучения со схемами стабилизации режима работы, оптические внешние модуляторы Маха-Зендера, оптические мультиплексоры и элементы волоконной оптики.

Рисунок 4.38 Гибридный модуль передачи 25 каналов WDM на общую скорость до 1Тбит/с

Контрольные вопросы

- 1. Что такое модуляция оптического излучения?
- 2. Какие виды модуляции применяются в технике оптической связи?
- 3. Какие отличия имеют прямая и внешняя модуляции оптического излучения?
- 4. Чем характеризуется прямая модуляция?
- 5. Каким образом уменьшаются искажения при прямой модуляции?
- 6. Чем отличаются модуляционные характеристики СИД и ППЛ?
- 7. Почему происходит динамическое уширение спектра?
- 8. Чем вызваны шумы при прямой модуляции излучения?

- 9. Какие функциональные блоки входят в передающие интегрированные оптические модули?
- 10. Каким образом происходит электрооптическая модуляция?
- 11. Чем определяется полоса пропускания ЭОМ?
- 12. Какое физическое явление используется в электроабсорбционном модуляторе?
- 13. Как работает модулятор Маха Цендера (Зендера)?
- 14. Почему возможна акустооптическая модуляция?
- 15. Какие реальные дальности передачи в ВОСП достижимы при прямой и внешней модуляции на скоростях 10 Гбит/с и выше?