

# 1. Начальные сведения об оптической связи. Особенности построения ВОЛС, их элементы

## 1.1. Оптический диапазон. Диапазоны работы различных направляющих систем

На рис. 1.1 показаны границы оптического диапазона. К оптическому диапазону относят электромагнитные поля таких частот, при которых: 1. выполняются законы геометрической оптики; 2. свет очень слабо взаимодействует с веществом. Для оптической связи в большинстве случаев используется узкий диапазон частот, расположенной в инфракрасной области спектра.

Направляющей системой связи для оптического диапазона являются волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), основой которых являются диэлектрические волноводы – оптические волокна (ОВ). Классификация и конструкции ОВ будут рассмотрены в теме 3, а их параметры – в темах 4–6.

На рис. 1.2 показаны диапазоны частот, в которых работают различные направляющие системы связи. Полосу пропускания в Гц для направляющей системы можно найти по выражению:

$$\Delta F = f_{\text{up}} - f_{\text{low}}, \tag{1.1}$$

где  $f_{\text{up}}$  и  $f_{\text{low}}$  – верхняя и нижняя частоты занимаемого диапазона. Например, для ВОЛС получаем:

$$\Delta F = 10^{15} - 10^{14} = 10 \cdot 10^{14} - 10^{14} = 9 \cdot 10^{14} \text{ Гц.}$$

Нетрудно убедиться, что ВОЛС обладают наиболее широкой полосой пропускания среди всех направляющих систем связи.

При использовании простейших двухуровневых кодов NRZ и RZ соотношение между полосой пропускания и максимальной скоростью передачи в бит/с выражается формулами:

$$\text{NRZ: } \Delta F = \frac{B_b}{2}, \quad \text{RZ: } \Delta F = B_b \tag{1.2}$$

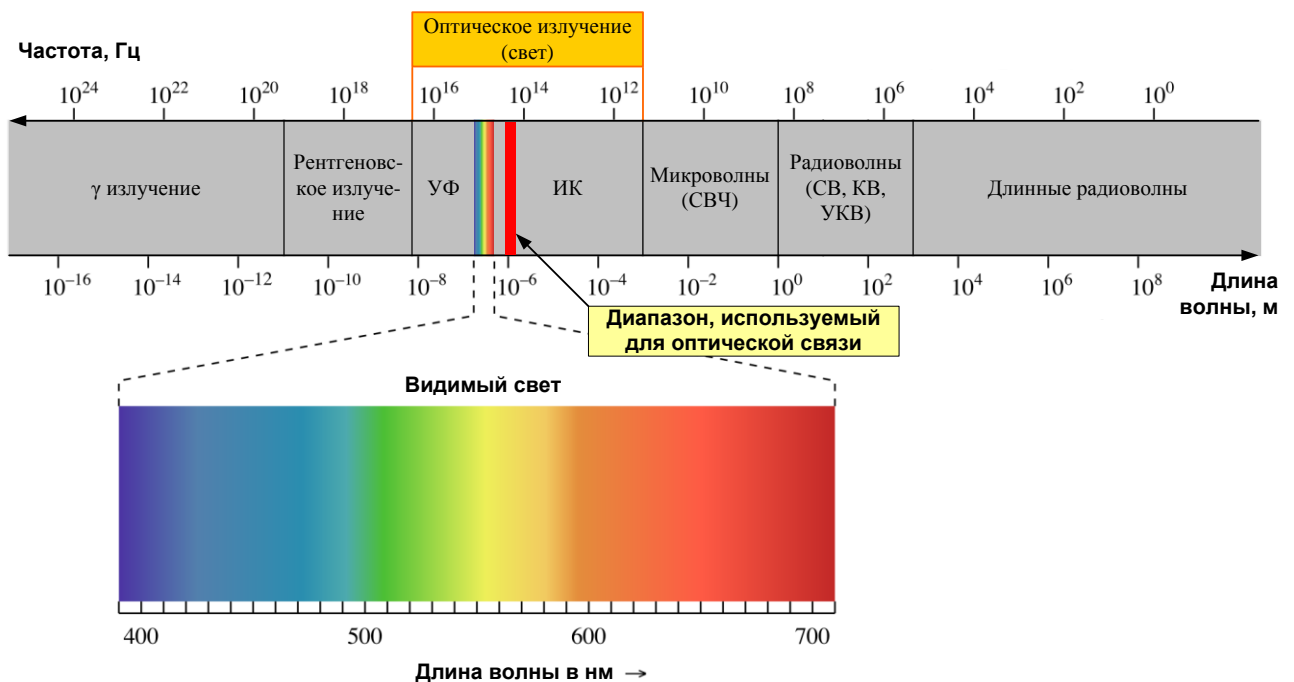


Рис. 1.1. Оптический диапазон. Диапазон, преимущественно используемый для оптической связи

**Тема 1. Начальные сведения об оптической связи. Особенности построения ВОЛС, их элементы.**

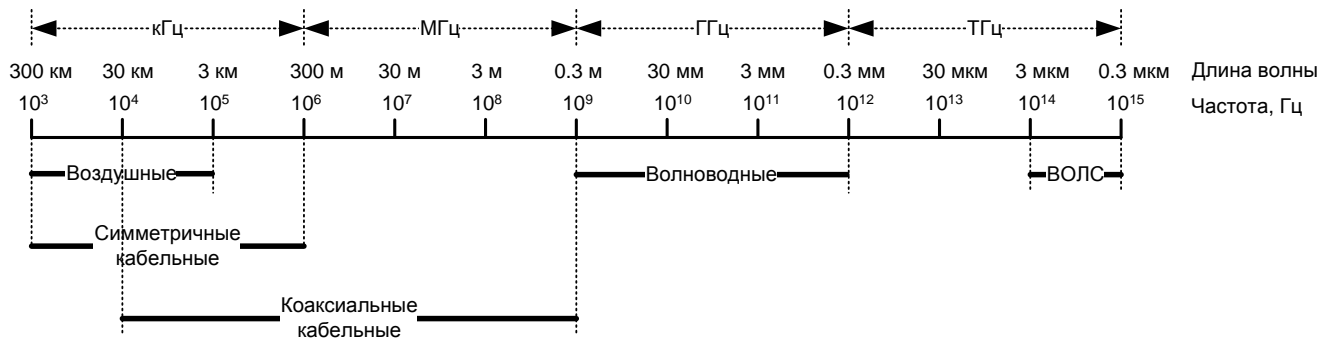


Рис. 1.2. Диапазоны работы направляющих систем связи

Из (1.2) видно, что обладающие наиболее широкой полосой пропускания ВОЛС позволяют обеспечить наибольшую скорость передачи.

**1.2. Особенности оптической связи по сравнению с электрической.**

Из (1.2) видно, что полоса частот, необходимая для цифровой передачи, возрастает с увеличением скорости передачи  $V_b$ . При этом уменьшается отношение сигнала к шуму и увеличивается коэффициент ошибок. Причины этого:

**Электрическая связь:**

1. Возрастание коэффициента затухания (уменьшение сигнала). Из-за расширения полосы частот возрастает верхняя частота в спектре передаваемого сигнала, которая определяет максимальный коэффициент затухания. Известно, что в электрических линиях связи (воздушных, симметричных и коаксиальных) коэффициент затухания возрастает пропорционально  $\sqrt{f}$  ( $f$  – частота).

2. Взаимные влияния (возрастание шума). В симметричных электрических линиях связи взаимные влияния – один из основных источников шума, возрастающего с ростом частоты.

3. Расширение полосы пропускания предусилителя регенератора (возрастание шума).

**Оптическая связь:** Основная причина – расширение полосы пропускания фотоприемного устройства (ФПУ).

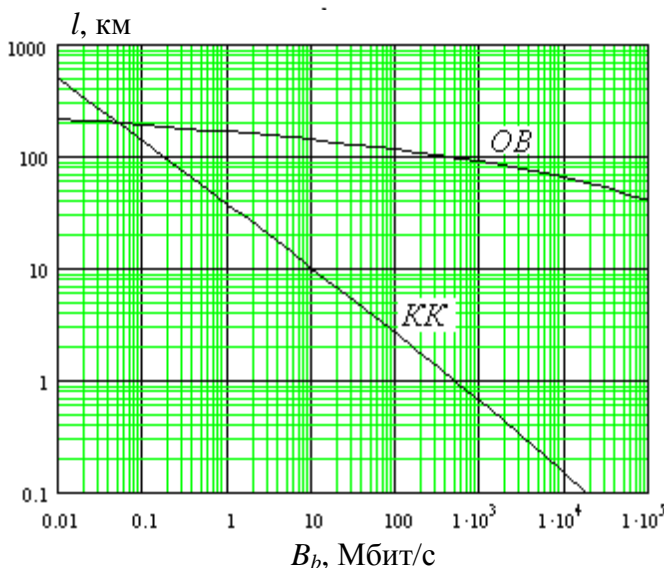


Рис. 1.3. Зависимость длины регенерационного участка от скорости передачи для средней коаксиальной пары (2.6/9.5) и одномодового ОВ со смещенной дисперсией.

В оптической связи коэффициент затухания определяется только выбранной рабочей частотой (длиной волны) и при выбранной длине волны не зависит от скорости передачи. Это преимущество является следствием того, что оптические частоты очень высоки. Кроме того, коэффициенты затухания современных оптических волокон (ОВ) очень малы и составляют 0.2–0.3 дБ/км (на длине волны 1550 нм). Для сравнения отметим, что в среднегабаритном коаксиальном кабеле коэффициент затухания составляет 2.5 дБ/км (на частоте 1 МГц).

В ВОЛС также отсутствуют взаимные влияния.

Таким образом, с ростом скорости передачи в оптических линиях уменьшение отношения сигнала к шуму и возрастание коэффициента ошибок (а значит и

уменьшение длины регенерационного участка) будет идти медленнее, чем в электрических. Поэтому длина регенерационного участка для оптической связи существенно больше (рис. 1.3).

### 1.3. Преимущества и недостатки ВОЛС

#### Преимущества:

1. Высокая широкополосность. Малое затухание. Большие длины регенерационных участков.
2. Высокая помехоустойчивость к внешним электромагнитным помехам и взаимным влияниям между ОВ в общем оптическом кабеле.
3. Малые габариты, масса, стоимость.

#### Недостатки:

1. Высокая стоимость регенераторов, мультиплексоров, демультиплексоров, технологического и измерительного оборудования.
2. Необходимость высокой квалификации обслуживающего персонала.

### 1.4. Структурная схема ВОЛС

На рис. 1.4 представлена схема линейного тракта ВОЛС с одним спектральным каналом (рис. 1.4). ПК1, ПК2 - преобразователи кода каналообразующей аппаратуры в линейный код<sup>1</sup> и обратно; ИИ + М - источник излучения + модулятор (передающее устройство - электрооптический преобразователь); ФПУ - фотоприемное устройство (оптоэлектрический преобразователь); РУ - решающее устройство; ОУ - оптический усилитель.

Двухсторонняя связь осуществляется, как правило, по двум волокнам, расположенным в одном оптическом кабеле, то есть схема связи двухволоконная, однополосная, однокабельная.

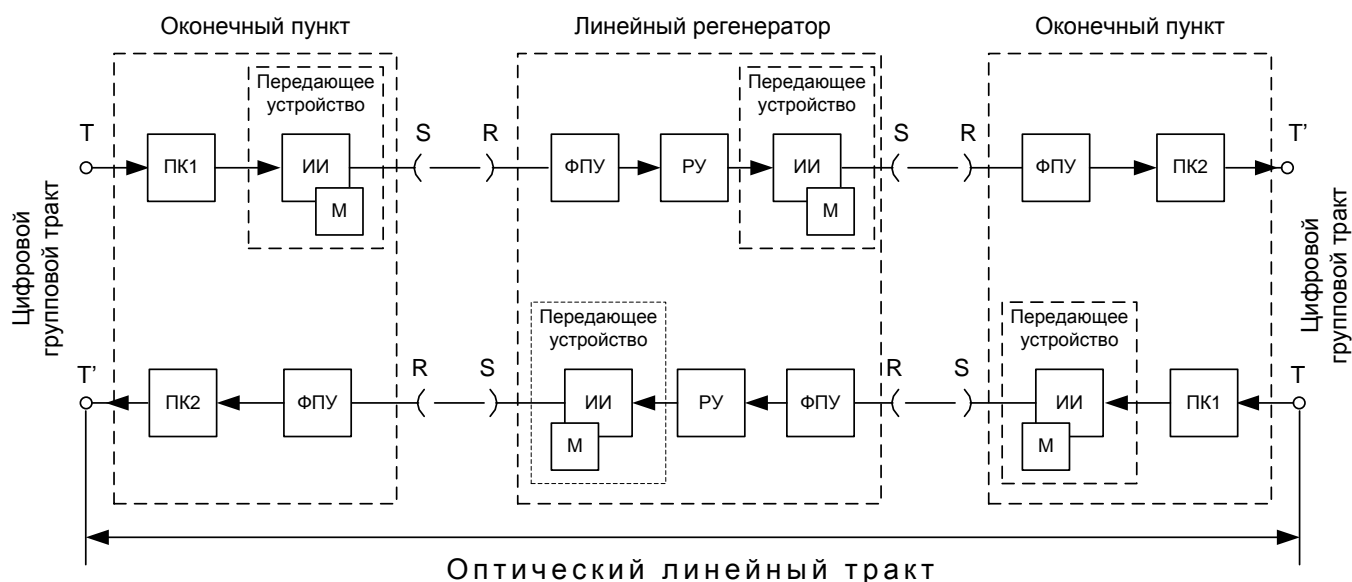


Рис.1.4. Общая схема передачи цифровых сигналов по волоконному тракту (ВТ). Оптический линейный тракт ЦСП с плезихронной или синхронной иерархией.

В качестве ИИ обычно используют полупроводниковые светодиодные или лазерные источники с  $\lambda = 0.85; 1.3; 1.55$  мкм. В качестве ФП используют Si ФД (PIN и ЛФД) для  $\lambda = 0.85$

<sup>1</sup>Линейный код повышает помехоустойчивость сигнала, а также обеспечивает возможность выделения тактовой частоты (предотвращает появление длинных «единиц» и «нулей», например, путем скремблирования).

**Тема 1.** Начальные сведения об оптической связи. Особенности построения ВОЛС, их элементы.

мкм и Ge и InArGa (PIN и ЛФД) для  $\lambda = 1.3$  и  $1.55$  мкм. На указанных длинах волн кварцевое ОВ имеет локальные минимумы затухания. Источники и приемники излучения будут рассмотрены в темах 8 и 9.

Длина волны $\lambda$ , мкм	Тип ОВ	Коэффициент затухания $\alpha$ , дБ/км	Использование
0.85	Многомодовые	2 - 5	Локальные сети, объектовая связь
1.3 (1.31)	Многомодовые и одномодовые	0.3-0.7	Локальные сети, местная городская и сельская связь, междугородная (зоновая и магистральная) связь
1.55	Одномодовые	0.15-0.25	Междугородная (зоновая и магистральная) связь

Линейные регенераторы восстанавливают ослабленный и зашумленный сигнал. Полная регенерация (восстановление амплитуды, формы и фазы сигнала) осуществляется по схеме: оптоэлектрическое преобразование сигнала – восстановление электрического сигнала – электрооптическое преобразование сигнала. Без преобразования в электрическую форму можно осуществлять усиление сигнала с помощью оптических усилителей и коррекцию дисперсионных искажений с помощью оптических компенсаторов дисперсии. Основная причина искажений сигналов в ОВ – дисперсия и способы ее компенсации оптическими методами будут рассмотрены в темах 6 и 7.

Расстояние между регенераторами обычно составляет 30–60 км для  $\lambda = 1.3$  мкм и 80–200 км для  $\lambda = 1.55$  мкм для одномодовых ОВ.

Для увеличения пропускной способности может использоваться технология спектрального мультиплексирования WDM (Wavelength Division Multiplexing) (рис. 1.5). В ОВ на передающей стороне с помощью пассивного оптического мультиплексора одновременно вводятся высокоскоростные сигналы на нескольких оптических несущих. На приемной стороне излучение выходящее из ОВ с помощью пассивного оптического демультиплексора разделяется по отдельным каналам. Конструкции и параметры оптических мультиплексоров и демультиплексоров будут рассмотрены в теме 7.

Различают:

- Плотное DWDM (Dense WDM) и сверхплотное HDWDM (High Dense WDM) спектральное мультиплексирование, для которых характерно большое число спектральных каналов вблизи длины волны  $1.55$  мкм с малым расстоянием между соседними каналами. Минимальное расстояние между каналами в соответствии с рекомендацией Международного союза электросвязи (МСЭ) G.698 может составлять  $12.5$  ГГц ( $0.1$  нм). Чаще применяются более дешевые системы с большим расстоянием между соседними каналами –  $25$  ГГц ( $0.2$  нм),  $50$  ГГц ( $0.4$  нм),  $100$  ГГц ( $0.8$  нм),  $200$  ГГц ( $1.6$  нм).
- Грубое CWDM (Coarse WDM) спектральное мультиплексирование (рекомендация МСЭ G.694), у которого минимальное расстояние между спектральными каналами составляет  $20$  нм. Системы передачи с CWDM могут работать в диапазоне длин волн от  $1.27$  до  $1.61$  мкм.
- «Широкое» (Wide WDM) спектральное мультиплексирование, для которого характерно большое расстояние между соседними каналами (более  $20$  нм).

Поскольку объединение и разделение спектральных каналов осуществляется пассивными оптическими мультиплексорами и демультиплексорами, оно сопровождается потерями, которые можно компенсировать использованием оптического усиления. На рис. 1.5 показаны два оптических усилителя (ОУ), которые обычно устанавливаются при построении системы с использованием DWDM.

Тема 1. Начальные сведения об оптической связи. Особенности построения ВОЛС, их элементы.

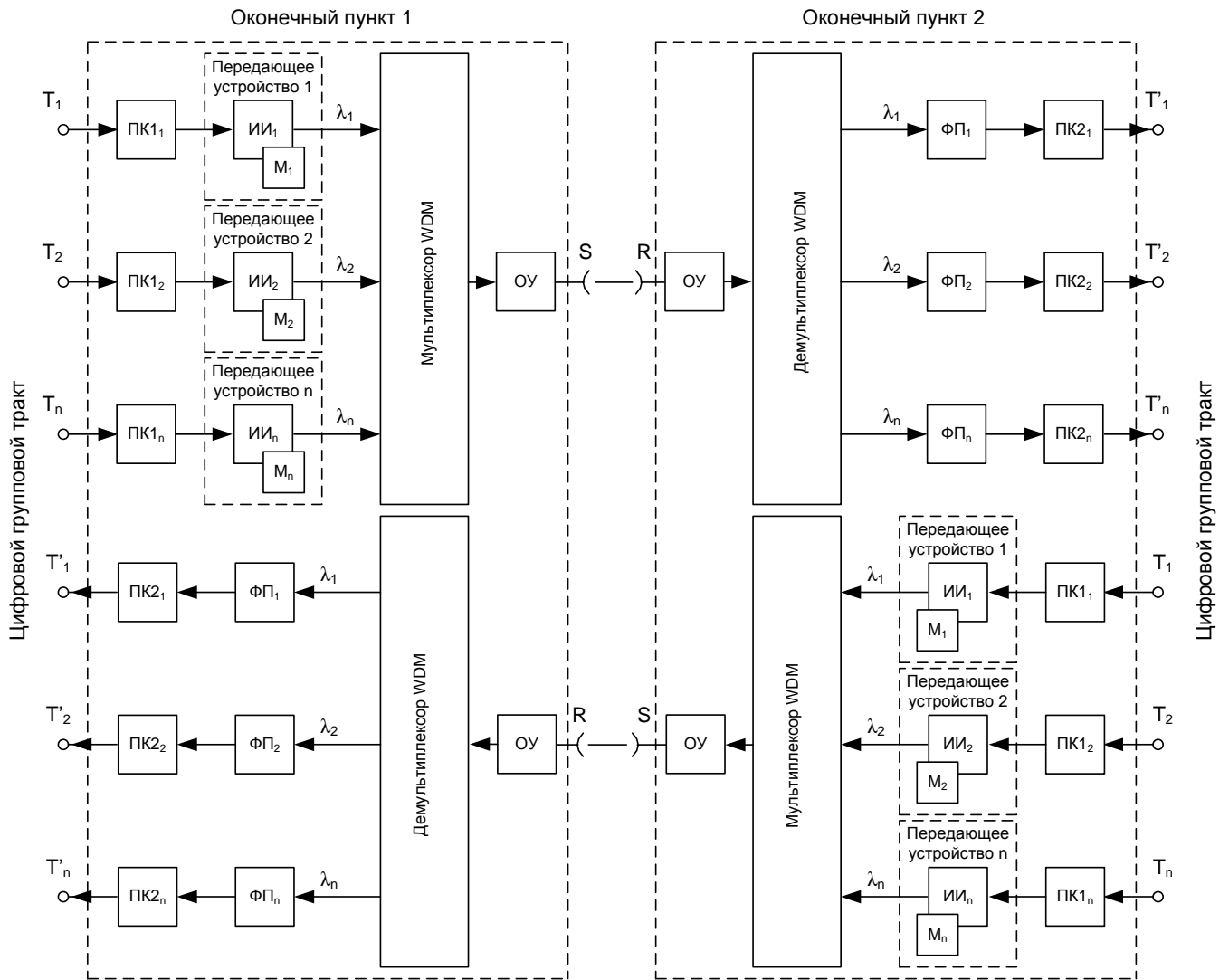


Рис.1.5. Общая схема передачи цифровых сигналов по волоконному тракту (ВТ). Оптический линейный тракт ЦСП со спектральным уплотнением

## 2. Физические основы процессов распространения света в оптических волокнах

### 2.1. Законы отражения и преломления

Рассмотрение явлений отражения и преломления света будем вести, используя понятия геометрической оптики. Переход к геометрической оптике возможен, когда размеры оптических элементов значительно превышают длину волны  $\lambda$ .

В геометрической оптике основным является понятие оптического луча. Оптический луч — это перпендикуляр к волновому фронту, то есть к поверхности равных фаз. Он совпадает с направлением распространения энергии или вектором Пойтинга.

Из курса физики известны законы отражения и преломления света на плоской не поглощающей свет границе раздела двух прозрачных сред с разными показателями преломления.

**Показатель преломления среды** характеризует фазовую скорость  $V_p$  распространения монохроматической волны в этой среде:

$$n = \frac{c}{V_p}. \quad (2.1)$$



Фазовая скорость может быть выражена через диэлектрическую  $\epsilon_a$  и магнитную  $\mu_a$  проницаемости среды:

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_a \mu_a}}. \quad (2.2)$$

Для диэлектрической и магнитной проницаемостей справедливы соотношения:

$$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon \quad \mu_a = \mu_0 \mu, \quad (2.3)$$

где  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная,  $\mu_0 = 1.257 \cdot 10^{-6}$  Гн/м – магнитная постоянная,  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость.

	<p><b>Диэлектрическая проницаемость среды <math>\epsilon_a</math> (абсолютная диэлектрическая проницаемость)</b> – физическая величина, связывающая электрическую индукцию (электрическое смещение) с напряженностью электрического поля: <math>\vec{D} = \epsilon_a \cdot \vec{E}</math>. Измеряется в Ф/м.</p> <p><b>Магнитная проницаемость среды <math>\mu_a</math> (абсолютная магнитная проницаемость)</b> – физическая величина, связывающая магнитную индукцию с напряженностью магнитного поля: <math>\vec{B} = \mu_a \cdot \vec{H}</math>. Измеряется в Гн/м.</p>
	<p><b>Относительная диэлектрическая проницаемость среды <math>\epsilon</math></b> – безразмерная физическая величина, показывающая во сколько раз диэлектрическая проницаемость данной среды больше диэлектрической проницаемости вакуума.</p> <p><b>Относительная магнитная проницаемость среды</b> – безразмерная физическая величина, показывающая во сколько раз магнитная проницаемость данной среды отличается от магнитной проницаемости вакуума.</p>

Из (2.3) и (2.2), учитывая, что для диэлектриков обычно  $\mu = 1$ , получим:

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \cdot \sqrt{\epsilon}}}. \quad (2.4)$$

Величина  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$  представляет собой скорость света в вакууме, поэтому окончательно получаем:

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}. \quad (2.5)$$

Из (2.5) и (2.1) следует:

$$n = \sqrt{\varepsilon}. \quad (2.6)$$



**Обратите внимание**, что для расчета показателя преломления среды  $n$  по выражению (2.6) относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  должна браться для оптического диапазона частот, так как она зависит от частоты (длины волны).

Если имеются две среды с разными показателями преломления, то среду с **большим** показателем преломления называют **оптически более плотной**, а среду с меньшим показателем преломления – **оптически менее плотной**.

Законы отражения и преломления света справедливы для плоской, не поглощающей свет границы раздела двух прозрачных сред с разными показателями преломления. Если граница раздела не плоская, законы справедливы, если ее можно разделить на области в пределах которых поверхность можно считать плоской, причем размер области должен существенно превышать длину волны. Обе среды должны быть *изотропны*. В изотропной среде показатель преломления не зависит от направления распространения света.

На такой поверхности *падающий* луч  $i$  расщепляется на два: проходящий во вторую среду *преломленный* луч  $t$  и *отраженный* луч  $r$  (рис. 2.1). На рис. 2.1  $N$  – вектор нормали к поверхности в точке падения.



**Угол падения (отражения, преломления)** – угол между падающим (отраженным, преломленным) лучом и нормалью к поверхности раздела двух сред в точке падения (отражения, преломления).

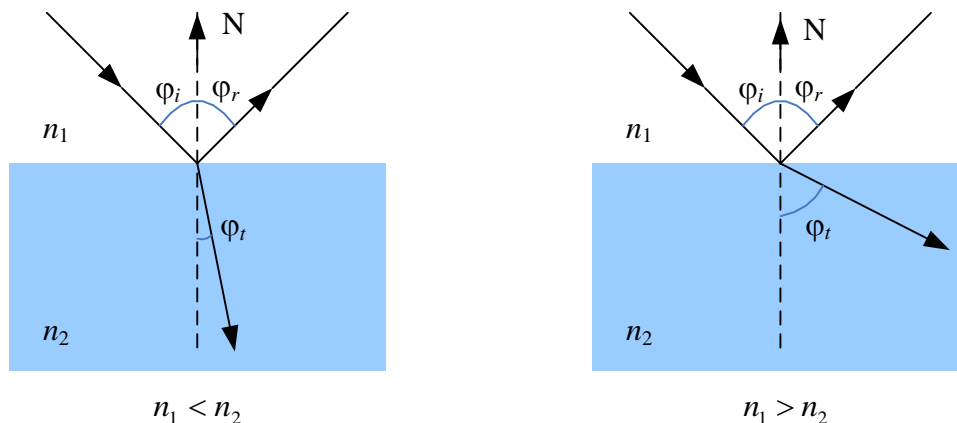


Рис. 2.1. Законы отражения и преломления света.



*Законы отражения и преломления:*

1. Падающий, отраженный и преломленный лучи и нормаль к поверхности раздела лежат в одной плоскости, называемой **плоскостью падения**.
2. Частоты падающего, отраженного и преломленного лучей одинаковы:  

$$\omega_i = \omega_r = \omega_t$$
3. Угол падения равен углу отражения:  $\varphi_i = \varphi_r$ .
4. Закон Снеллиуса (Виллеброрд Снеллиус, 1580–1626, голландский математик, физик и астроном): произведение показателя преломления на синус угла между лучом и нормалью сохраняет свое значение при переходе в другую среду.

$$n_1 \sin \varphi_i = n_2 \sin \varphi_t, \text{ где } n_1 \text{ и } n_2 - \text{показатели преломления 1 и 2 среды.}$$

На рис. 2.1 показаны два разных случая. На левом рисунке луч света, преломляясь, переходит из оптически менее плотной среды в оптически более плотную ( $n_1 < n_2$ ). В этом случае угол преломления будет по закону Снеллиуса меньше угла падения  $\varphi_t < \varphi_i$ .

На правом рисунке луч света, преломляясь, переходит из оптически более плотной среды в оптически менее плотную ( $n_1 > n_2$ ). В этом случае угол преломления будет по закону Снеллиуса больше угла падения  $\varphi_t > \varphi_i$ .

## 2.2. Явление полного внутреннего отражения

Ситуация, когда свет переходит из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, существенно отличается от ситуации обратного направления распространения света. Угол преломления в этом случае больше угла падения, поэтому ВСЕГДА существует такой угол падения, при котором угол преломления станет равным  $90^\circ$ , то есть преломленный луч пойдет вдоль границы раздела. Этот угол падения называют критическим:

$$\varphi_{cr} = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (2.7)$$

При углах падения, больших критического, преломленный луч исчезает, остается только отраженный луч. Это явление получило название **полного внутреннего отражения** (ПВО) (рис. 2.2).

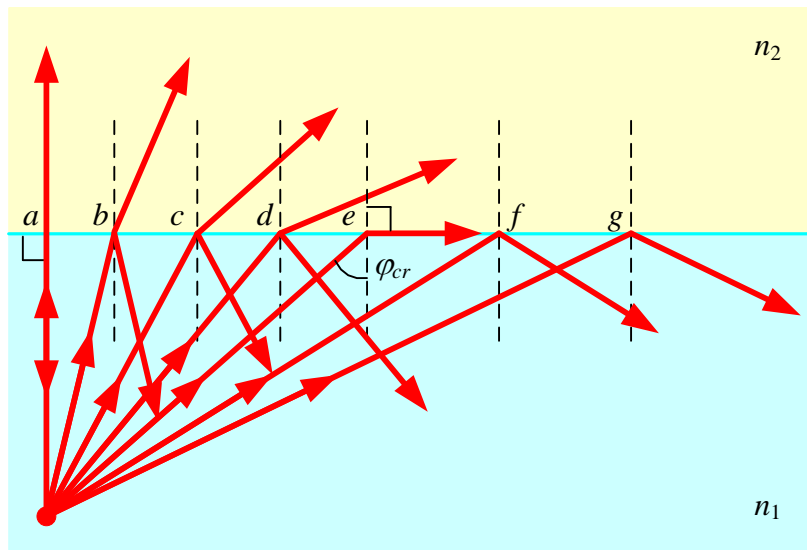


Рис. 2.2. Полное внутреннее отражение.

Коэффициент отражения  $R$  в области ПВО равен 1, отражается 100% энергии, то есть потерь на отражение нет. Итак, если  $\varphi_i \geq \varphi_{cr}$ ,  $R = 1$ .

На этом физическом явлении основана работа ОВ с точки зрения геометрической оптики (рис. 2.3). Направляет свет центральная часть ОВ, которую называют сердцевинной (core). Сердцевина окружена оболочкой (clad) – слоем с другим показателем преломления, который формирует границу раздела. Оптический луч распространяется в сердцевине, переотражаясь от границы между сердцевинной и оболочкой. Благодаря тому, что луч испытывает полное внутреннее отражение, его энергия остается сосредоточенной в сердцевине.



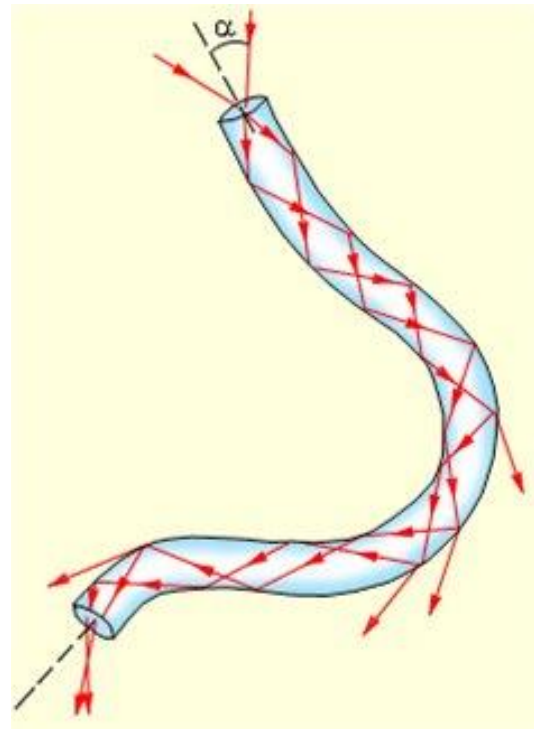
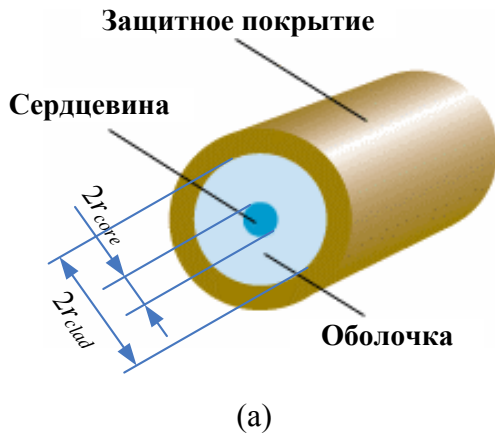


Рис. 2.3. Оптическое волокно как направляющая система: а – конструкция волновода, б – принцип действия.

(б)

### 2.3. Формулы Френеля

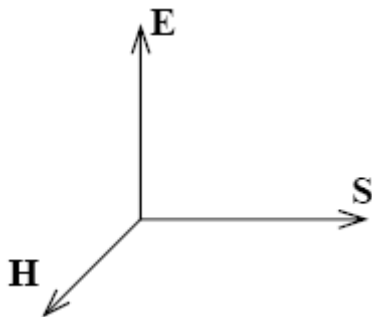


Рис. 2.4. Взаимное расположение векторов электрической (E) и магнитной (H) напряженности и направления распространения света (S).

Свет характеризуется поляризацией – направлением вектора напряженности электрического поля  $E$ . Коэффициенты отражения и пропускания границы раздела зависят от поляризации падающего света.

Для коэффициентов отражения и пропускания по напряженности электрического поля Френель (Огюстен Жан Френель, 1788—1827, французский физик) получил выражения:

- для составляющих, поляризованных в плоскости падения:

$$r_p = \frac{E_{rp}}{E_{ip}} = \frac{\operatorname{tg}(\varphi_i - \varphi_t)}{\operatorname{tg}(\varphi_i + \varphi_t)}$$

$$t_p = \frac{E_{tp}}{E_{ip}} = \frac{2 \sin \varphi_t \cos \varphi_i}{\sin(\varphi_i + \varphi_t) \cos(\varphi_i - \varphi_t)}; \quad (2.8)$$

- для составляющих, поляризованных перпендикулярно

плоскости падения:

$$r_s = \frac{E_{rs}}{E_{is}} = \frac{\sin(\varphi_i - \varphi_t)}{\sin(\varphi_i + \varphi_t)} \quad t_s = \frac{E_{ts}}{E_{is}} = \frac{2 \sin \varphi_t \cos \varphi_i}{\sin(\varphi_i + \varphi_t)}. \quad (2.9)$$

Для энергетических коэффициентов отражения и пропускания справедливо

$$R = r^2 \text{ и } T = \frac{n_2 \cos \varphi_t}{n_1} t^2. \quad (2.10)$$

Для нормального падения  $\varphi_i \rightarrow 0$ ;  $\varphi_t \approx \frac{n_1}{n_2} \varphi_i$ :

$$r_s = r_p = r = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad t_s = t_p = t = \frac{2n_1}{n_1 + n_2}. \quad (2.11)$$

Тема 2. Физические основы процессов распространения света в оптических волокнах.

$$R = r^2 \qquad T = \frac{n_2}{n_1} t^2. \qquad (2.12)$$

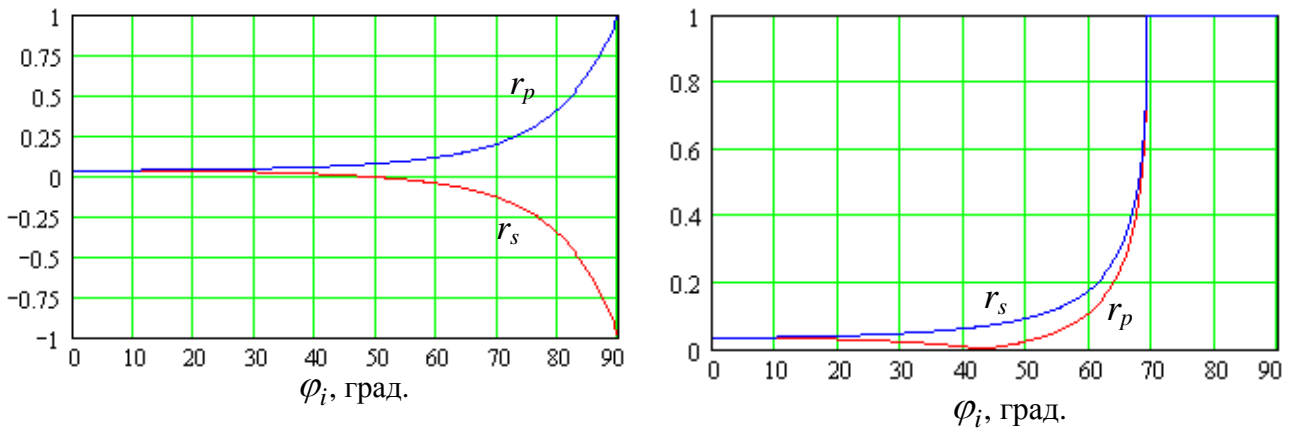


Рис. 2.5. Зависимости коэффициентов отражения от угла падения при падении светового луча из менее плотной оптической среды ( $n_1=1.4$ ) в более плотную ( $n_2=1.5$ ) (слева) и из более плотной оптической среды ( $n_1=1.5$ ) в менее плотную ( $n_2=1.4$ ) (справа).

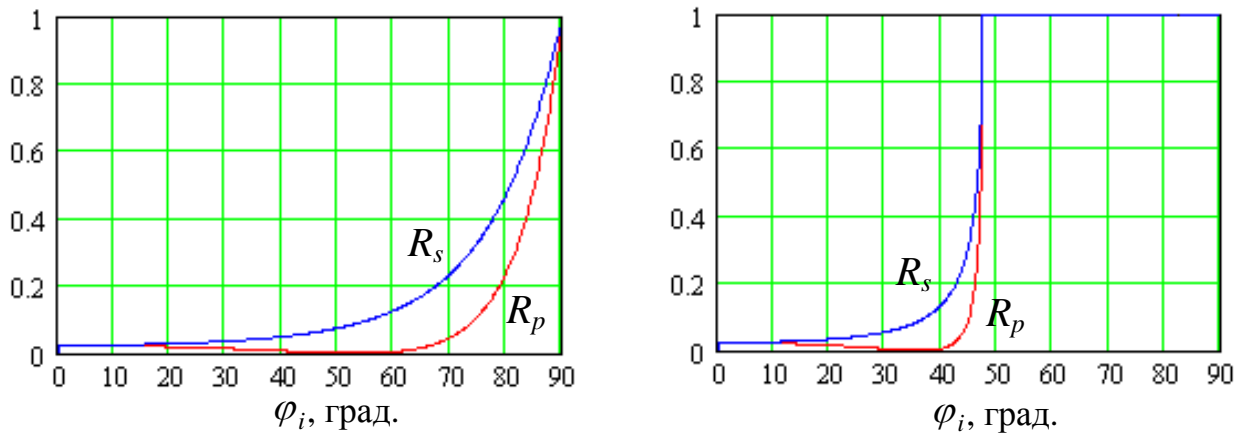


Рис. 2.6. Зависимости энергетических коэффициентов отражения от угла падения при падении светового луча из менее плотной оптической среды ( $n_1=1.1$ ) в более плотную ( $n_2=1.5$ ) (слева) и из более плотной оптической среды ( $n_1=1.5$ ) в менее плотную ( $n_2=1.1$ ) (справа).

## 3. Конструкции и производство оптических волокон и оптических кабелей

### 3.1. Оптическое волокно

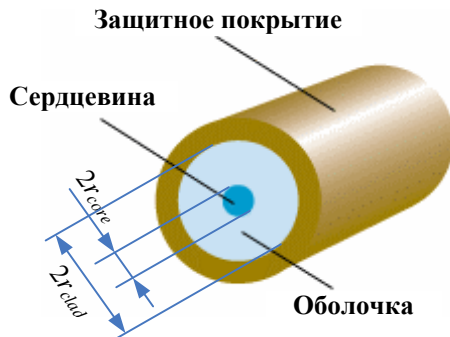


Рис. 3.1. Структура ОВ

из оптически более плотного материала (с большим показателем преломления).

Основным материалом для изготовления сердцевины и оболочки ОВ является кварцевое стекло (плавленный кварц  $SiO_2$ ). Для достижения требуемого различия показателей преломления сердцевина и/или оболочка легируются примесями, изменяющими показатель преломления кварцевого стекла. Наиболее часто используются оксид германия  $GeO_2$ , пентоксид фосфора  $P_2O_5$ , повышающие показатель преломления кварцевого стекла, и фтор  $F$  и оксид бора  $B_2O_3$ , понижающие его показатель преломления.

Первичное защитное покрытие наносится на ОВ при вытяжке и защищает его от воздействия окружающей среды (влаги, абразивных и механических воздействий). Основным материалом для изготовления защитного покрытия является акрилат.

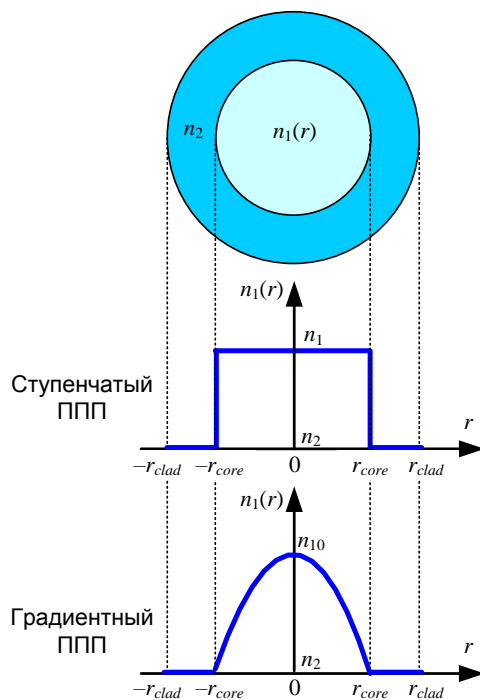


Рис. 3.2. Ступенчатый и градиентный профили показателя преломления

ческие характеристики волокон.

Основным элементом ОК является **волоконный световод** или **оптическое волокно (ОВ)**, по которому осуществляется передача оптических сигналов. ОВ, используемые в связи, имеют цилиндрическую форму (рис. 3.1) и в простейшем случае состоят из сердцевины, оболочки и одного или нескольких защитных покрытий. Сердцевина и оболочка изготавливаются из плавленного кварца.

Распространение оптического сигнала происходит в сердцевине ОВ. Свет в сердцевине удерживается благодаря явлению полного внутреннего отражения на границе между сердцевинной и оболочкой. Поэтому сердцевина изготавливается

Основной характеристикой конструкции ОВ как волновода, определяющей его оптические параметры, является профиль показателя преломления (ППП) – закон изменения показателя преломления  $n(r, \varphi)$  в поперечном сечении ОВ (сердцевине и оболочке), где  $r$  и  $\varphi$  – полярные координаты,  $0 \leq r \leq r_{clad}$ ,  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ ,  $r_{clad}$  – радиус оболочки ОВ. Для оптической связи используют ОВ с осесимметричным профилем ППП.

Показатели преломления сердцевины и оболочки в поперечном сечении ОВ могут быть постоянными, а могут изменяться по мере удаления от оптической оси. ОВ, у которых показатели преломления сердцевины и оболочки постоянны, называют волокнами со **ступенчатым ППП** или **ступенчатыми**. ОВ, у которых показатели преломления сердцевины и/или оболочки изменяются, называют волокнами с **градиентным ППП** или **градиентными** (рис. 3.2). Более сложные в изготовлении градиентные ОВ позволяют улучшить или оптимизировать опти-

По количеству распространяющихся мод (понятие моды будет рассмотрено в теме 5) ОВ делятся на **многомодовые** (ММ ОВ) и **одномодовые** (ОМ ОВ). В зарубежной литературе для обозначения этих типов волокон используют аббревиатуры MMF – multi-mode optical fiber и SMF – single-mode optical fiber.

По типу дисперсионной характеристики ОМ ОВ разделяют на **стандартные** (SF – standard fiber), **со смещенной дисперсией** (DSF – dispersion shifted fiber), **с ненулевой смещенной дисперсией** (NZDSF – non zero dispersion shifted fiber).

По знаку хроматической дисперсии в рабочем диапазоне длин волн различают ОМ ОВ с положительной и отрицательной дисперсией.

По спектральной зависимости коэффициента затухания от длины волны можно выделить волокна с нулевым водяным пиком (ZWP – zero water peak), имеющие сниженное по сравнению с обычными волокнами затухание вблизи длин волны 1383 и 1290 нм.

По чувствительности потерь в ОВ к изгибам различают ОВ, чувствительные к изгибам, и ОВ, нечувствительные к изгибам.

Диаметры сердцевины и оболочки ОВ стандартизованы. Для многомодовых кварцевых волокон установлены следующие диаметры: 50, 62.5, 85 и 100 мкм. Наиболее часто используются первые два размера. Диаметр сердцевины одномодовых ОВ может составлять от 7 до 10 мкм (для одномодовых ОВ вместо диаметра сердцевины нормируется диаметр модового поля, см. тему 6 **Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Стандартный диаметр оболочки одинаков для обоих типов волокон и составляет 125 мкм.

## 3.2. Оптический кабель

### 3.2.1. Классификация оптических кабелей

Оптический кабель (ОК) представляет собой совокупность ОВ, заключенных в общую влагозащитную оболочку, поверх которой в зависимости от условий эксплуатации могут быть наложены различные защитные покровы. Основной задачей ОК является обеспечение требуемого качества передачи при соответствующих условиях эксплуатации.

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

*Междугородные* и *зонавые* ОК предназначаются для передачи информации на большие расстояния и организации большого числа каналов. *Городские* ОК используются в качестве соединительных линий между городскими АТС. Они рассчитаны на работу без промежуточных линейных регенераторов, то есть на сравнительно короткие расстояния (5-10 км) и относительно небольшое число каналов. *Объектовые* ОК служат для передачи различной информации на малые расстояния внутри объекта и содержат, как правило, большое число ОВ. *Монтажные* ОК предназначаются для внутри- и межблочного монтажа аппаратуры.

По условиям прокладки и эксплуатации ОК подразделяются на: кабели внутренней прокладки, кабели наружной прокладки, специальные кабели.

*Кабели внутренней прокладки* используются внутри телефонных станций, офисов, зданий и помещений. По условиям прокладки они подразделяются на кабели вертикальной и горизонтальной прокладки и шнуры коммутации.

*Кабели наружной прокладки* применяются на любых (сельских, городских, зонавых и магистральных) линиях связи и по условиям прокладки их можно разделить на подвесные, подземные и подводные.

Кабели воздушной подвески в свою очередь подразделяются на кабели:

1. самонесущие – кабели, подвешиваемые на опорах различного типа;
2. прикрепляемые – кабели, крепящиеся к несущему проводу;
3. навиваемые – кабели, которые навиваются вокруг несущего провода или грозотроса;
4. встраиваемые в грозотрос.

Кабели подземной прокладки подразделяются на:

1. кабели, прокладываемые в кабельной канализации или туннеле;
2. кабели, закладываемые в грунт;
3. кабели, предназначенные для автоматической прокладки в специальных трубах, например, в полиэтиленовых трубах компании Dura-Line.

Подводные кабели подразделяются на:

1. кабели, предназначенные для укладки на дно несудоходных рек, неглубоких озер и болот;
2. кабели, предназначенные для укладки на дно судоходных рек, морей и океанов.

К *специальным* кабелям относят:

- Полевые кабели, предназначенные для быстрого развертывания полевых линий связи.
- Кабели для дистанционного управления для управления торпедами, ракетами земля-воздух и т.п.
- Огнестойкие кабели, сохраняющие работоспособность в условиях открытого пламени;
- Кабели для работы при повышенных температурах (до 85-90<sup>0</sup>);
- Кабели для работы во взрывоопасных и агрессивных средах.

Ниже рассматриваются конструктивные элементы ОК. Отдельно рассмотрены конструкции кабелей, встроенных в грозозащитный трос.

### 3.2.2. Конструктивные элементы оптического кабеля

#### 3.2.2.1. Оптический модуль

Перед использованием для производства ОК на ОВ может наноситься вторичное покрытие для защиты от механических воздействий, в первую очередь, поперечных деформаций. Вторичное покрытие может быть как одноволоконным, так и многоволоконным. Одно или несколько волокон во вторичном покрытии называют *оптическим модулем*.

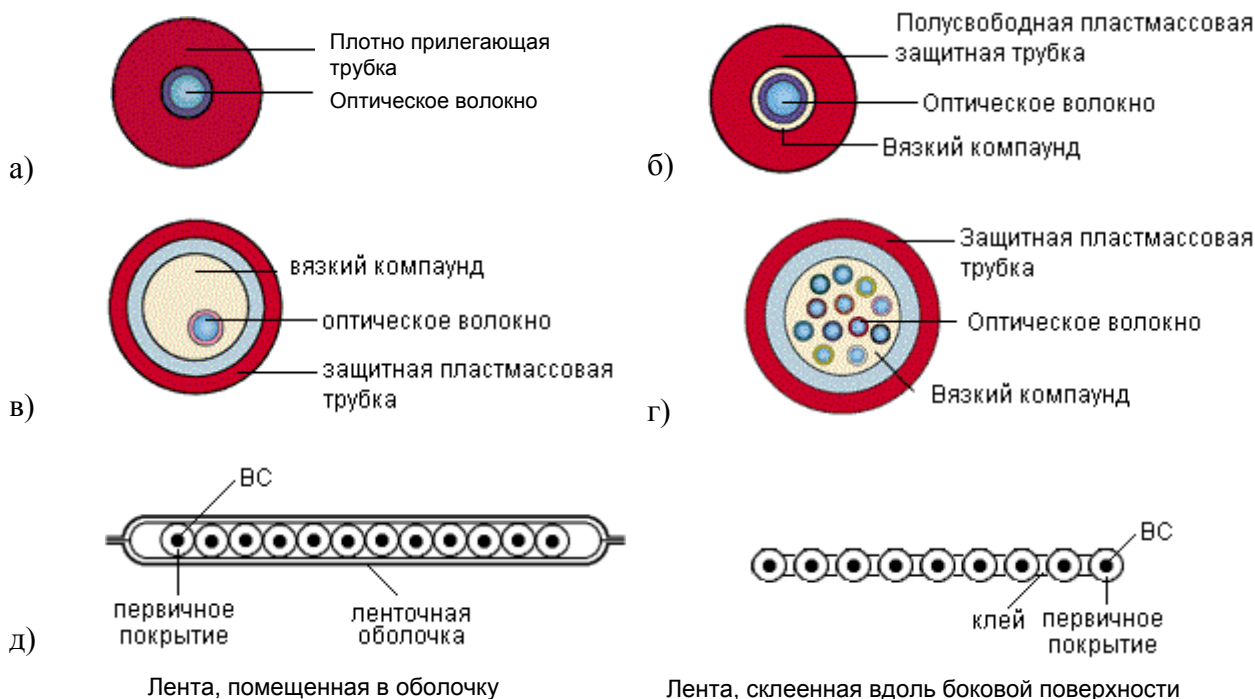


Рис. 3.3. Типы вторичного покрытия оптических волокон:  
а) сплошное; б) полусвободное трубчатое; в) свободное трубчатое;  
г) многоволоконное свободное трубчатое; д) ленточное.

Вторичные покрытия бывают нескольких типов (рис. 3.3). Сплошное (рис. 3.3а) и полусвободное трубчатое (рис. 3.3б) покрытия применяются преимущественно в кабелях внутренней прокладки. В кабелях наружной прокладки используется, как правило, свободное трубчатое покрытие одноволоконное (рис. 3.3в) или многоволоконное (рис. 3.3г). Ленточные покрытия (рис. 3.3д) используются для производства плоских кабелей.

### 3.2.2.2. Сердечник

Существуют 3 основных вида конструкций сердечника волоконно-оптического кабеля:

- повивный (рис. 3.4а)
- профилированный (рис. 3.4б),
- центральный или с использованием одиночной трубки (рис. 3.4в).

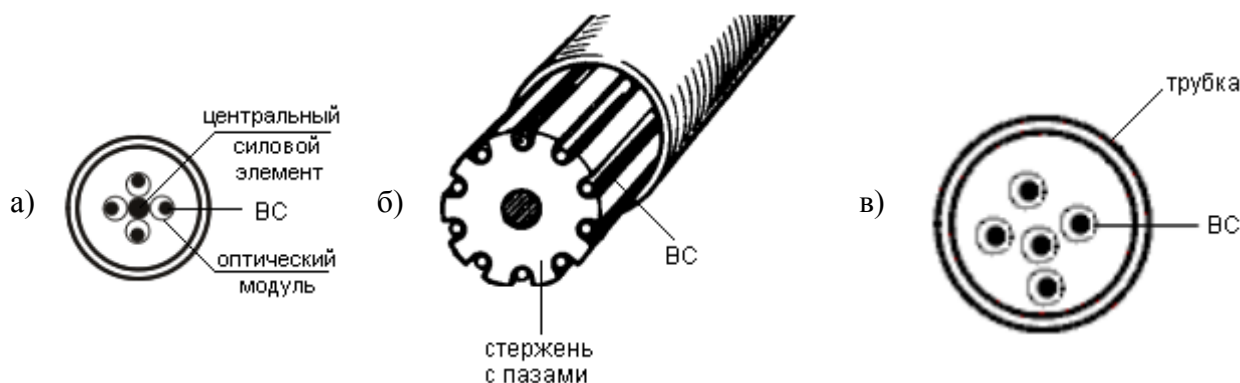


Рис.3.4. Основные конструкции сердечников ОК:  
а) повивный; б) профилированный; в) центральный.

В повивной конструкции сердечник выполнен в виде одного или нескольких повивов оптических модулей вокруг центрального силового элемента.

Конструкция с профилированным сердечником состоит из стержня с продольными пазами. Стержень (обычно из полипропилена) отливается вокруг металлического или диэлектрического центрального силового элемента. Пазы располагаются вокруг стержня спирально или с периодической сменой направления. В пазах располагают оптические модули (по одному в каждый паз) или непосредственно ОВ.

Кабель с одиночной трубкой состоит из одного многоволоконного свободного трубчатого модуля. Трубка модуля изготавливается из твердой пластмассы.

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

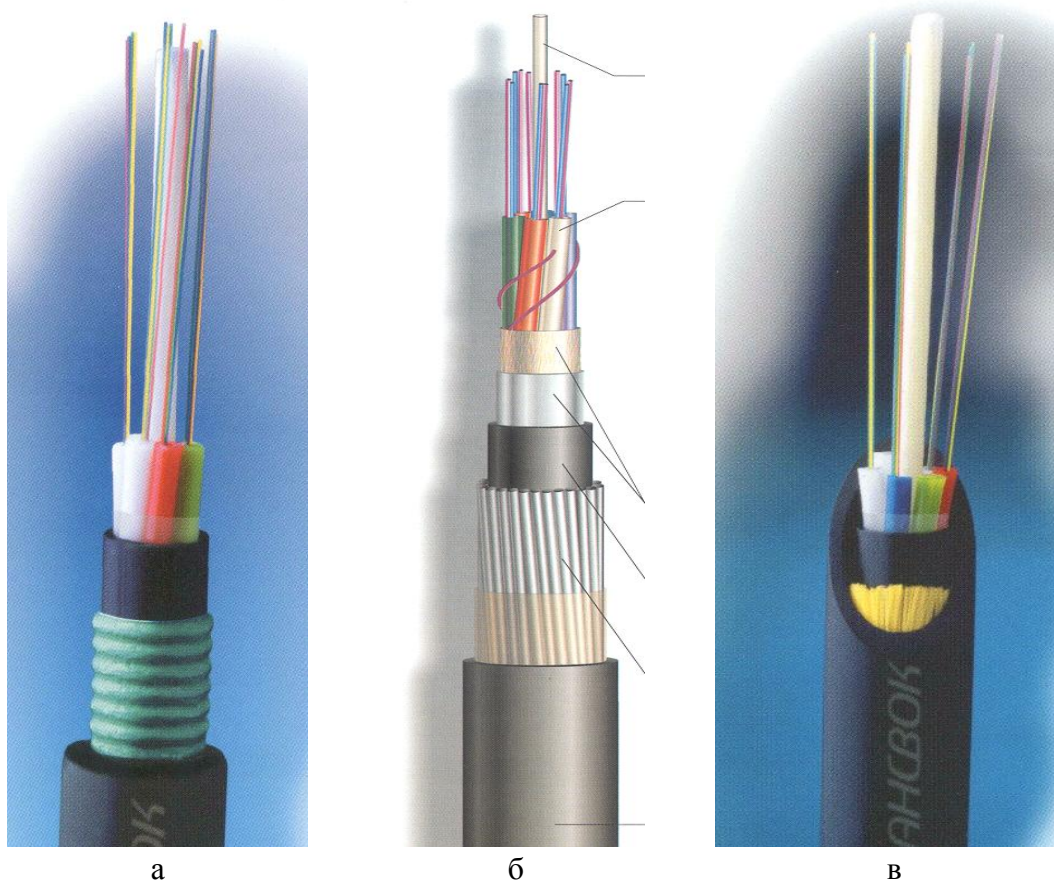
### 3.2.2.3. Защитные покрытия

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

При больших внешних нагрузках кроме внутренней защитной оболочки может накладываться броневая покров, дополнительно защищающий кабель от механических воздействий. Броня бывает *ленточная, круглопроволочная (одноповивная или двухповивная) и в виде герметичной трубки*. Для производства полностью диэлектрических кабелей используют повивы стеклопластиковых стержней или арамидных нитей. Различные виды брони представлены на рис. 3.5.

В кабелях, предназначенных для прокладки в кабельной канализации, трубах, коллекторах, на мостах и эстакадах используется стальная ленточная броня. Стальная гофри-

рованная лента, покрытая с наружной стороны сополимером, накладывается продольно с перекрытием на внутреннюю оболочку ОК.



а

б

в

Рис. 3.5. Конструкции броневых покрытий:  
а – ленточная, б – круглопроволочная, в – из арамидных нитей

В кабелях для прокладки в грунтах, не подверженных мерзлотным деформациям, на переходах через неглубокие несудоходные реки и болота применяется одноповивная броня из круглых стальных оцинкованных проволок.

Для прокладки в сложных грунтах всех групп, в том числе и подверженных мерзлотным деформациям, а также на переходах через судоходные реки применяется двухповивная круглопроволочная броня. Два повива стальных проволок в этом случае могут быть разделены промежуточной полиэтиленовой оболочкой.

Стальная проволока навивается поверх сердечника кабеля, на который перед бронированием накладывается промежуточная полимерная оболочка.

Поверх защитных покрытий на ОК надевается защитный шланг, который изготавливается из полиэтилена или негорючих безгалогенных материалов.

#### 3.2.2.4. Гидрофобное заполнение

Особое внимание при производстве ОК уделяют защите от проникновения воды. При повреждении волоконно-оптического кабеля вода может проникнуть внутрь полый оболочки покрытия и за счет капиллярного эффекта распространиться вдоль по кабелю на значительные расстояния. При замерзании воды волокна подвергаются воздействию напряжений во многих точках, что может вызвать микроизгибы и приведет к недопустимому увеличению затухания. Кроме того, влага, попавшая на поверхность волокна, изменяет энергию активации роста трещин, что существенно снижает его прочность, уменьшая тем самым время его жизни.

Для предотвращения проникновения воды все пустоты внутри ОК заполняются специальным гидрофобным наполнителем, представляющим собой вязкий компаунд. Заполняются пространство внутри оптических модулей и между ними, а также все пустоты

в бронеповиве. Наиболее дорогой и высококачественный компаунд - тиксотропный гель используется для заполнения оптических модулей. Для сердечника и брони используют более дешевое заполнение.

### 3.2.2.5. Особенности конструкции подвесных ОК

В конструкции самонесущих подвесных кабелей содержится несущий трос, обычно стальной. Трос может заключаться в отдельную оболочку, образуя вместе с кабелем так называемую «восьмерку» (рис. 3.6). Вместо троса может использоваться повив стальной проволоки.

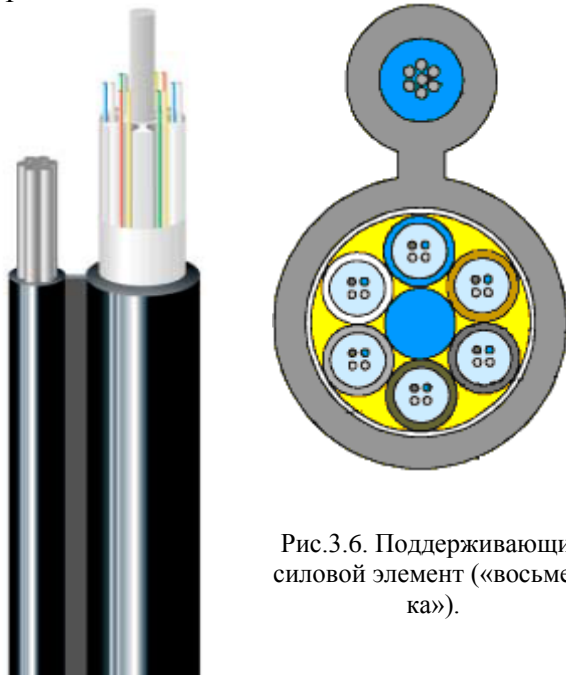


Рис.3.6. Поддерживающий силовой элемент («восьмерка»).

Для оптической связи вдоль коммуникаций, принадлежащих энергосистемам повсеместно используется оптический кабель, встроенный в грозозащитный трос (ОКГТ). Такой кабель используется вместо обычного грозотроса (рис. 3.7).

Сердечник ОКГТ может иметь те же конструкции, что и обычный ОК. Поверх сердечника накладывается 1-2 слоя алюминиевой или стальной проволоки, плакированной алюминием. Сердечник может быть заключен в алюминиевую трубку или защищен специальными композитными материалами от разогрева связанного с токами короткого замыкания.

Такой кабель имеет полное внешнее сходство с грозотросом, а значит не нуждается в специальной монтажной арматуре, он имеет хорошую стойкость к высоким

нагрузкам и может применяться при больших провесах.

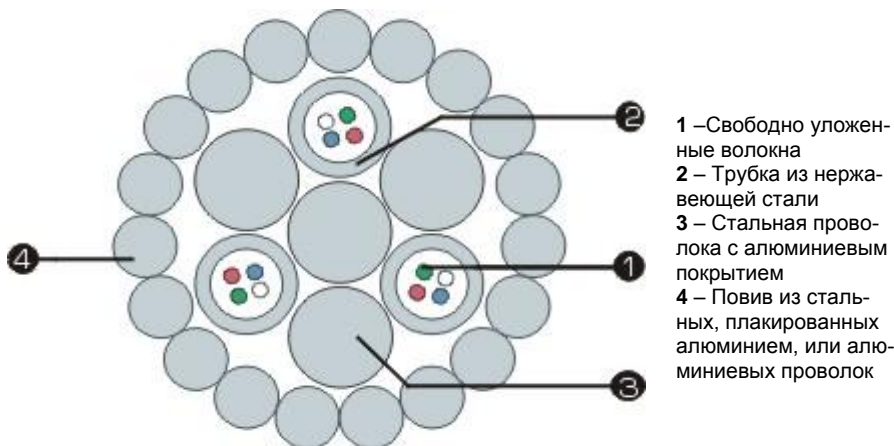


Рис. 3.7 ОКГТ с сердечником повивной скрутки, содержащим оптические модули из нержавеющей стали со свободно уложенными волокнами, в алюминиевой трубке.

### 3.2.3. Маркировка ОК

Производители волоконно-оптических кабелей придерживаются индивидуальной системы маркировки своей продукции. Обычно марка представляет собой буквенно-цифровой индекс, в котором тем или иным способом зашифрованы сведения о конструкции кабеля и его основных характеристиках. Этот индекс вместе с метровыми метками наносится на внешнюю защитную оболочку.



Следует отметить, что пока не существует единых правил маркировки оптических кабелей. Каждый производитель использует свою систему маркировки. В качестве примера рассмотрим маркировку ОК завода ОАО «Севкабель» (рис. 3.8).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
СКО-		Д	П	С -		024 -	Е -	06 -		06 -		М2
												наличие медных жил: <b>М2</b> – две, <b>М4</b> – четыре, <b>М8</b> – восемь.
												Дополнительное поле
												Число элементов в повиве сердечника: <b>04 ... 12</b>
												Дополнительное поле
												Максимальное число ОВ в модуле или пучке: <b>04, 06, 08 или 12</b>
												Тип ОВ: <b>Е</b> - одномодовое стандартное, <b>С</b> - одномодовое со смещенной дисперсией, <b>Н</b> - одномодовое с ненулевой смещенной дисперсией, <b>М</b> - многомодовое
												Число ОВ в кабеле: <b>от 002 до 144</b> (только четные значения).
												Дополнительное поле
												Тип дополнительных внешних покровов: <b>О</b> - без дополнительных внешних покровов, <b>Л</b> - с гофрированной продольно наложенной стальной лентой и ПЭ оболочкой, <b>Н</b> - с гофрированной стальной лентой и оболочкой из пластмассы, не распространяющей горения, <b>С</b> - с однослойной броней из стальных проволок и ПЭ оболочкой, <b>У</b> - с усиленной однослойной броней из стальных проволок и ПЭ оболочкой, <b>2</b> - с двухслойной броней из стальных проволок и ПЭ оболочкой, <b>М</b> - с однослойной броней из стеклопластиковых стержней и ПЭ оболочкой, <b>Т</b> - с периферийными диэлектрическими силовыми элементами и ПЭ оболочкой.
												Тип оболочки: <b>А</b> – алюмополиэтиленовая, <b>П</b> – полиэтиленовая, <b>Н</b> – не распространяющая горение
												Тип сердечника: <b>Д</b> - повивный с диэлектрическим центральным элементом, <b>О</b> – с использованием одиночной трубки.
												Дополнительное поле
Фирма-производитель ОАО "Севкабель" ( <b>СК</b> ), производство оптического кабеля ( <b>О</b> )												

Рис. 3.8. Пример маркировки оптических кабелей

## 4. Затухание в оптических волокнах

### 4.1. Затухание, единицы измерения затухания

Затухание  $a$  характеризует ослабление сигнала (показывает, во сколько раз ослабляется сигнал) и измеряется обычно в логарифмических единицах – децибелах. При оптических измерениях затухание измеряют в соответствии с выражением:

$$a = 10 \cdot \lg \frac{P_0}{P_1}, \quad (4.1)$$

где  $P_0, P_1$  – мощности сигнала на входе и выходе ОВ, ОК или любого пассивного компонента волоконного тракта в Вт.



**Полезно запомнить:**

1. Каждые 10 оптических дБ соответствуют изменению  $P_0/P_1$  в 10 раз, то есть затухание 10 дБ соответствует уменьшению сигнала в 10 раз, 20 дБ – в 100 раз, 30 дБ – в 1000 раз и т.д.
2. Каждые 3 оптических дБ соответствуют изменению  $P_0/P_1$  в 2 раза, то есть затухание 3 дБ соответствует уменьшению сигнала в 2 раза, 6 дБ – в 4 раза, 9 дБ – в 8 раз и т.д.

### 4.2. Абсолютный уровень мощности. Расчет затухания через абсолютные уровни мощности

В оптической связи часто используют не мощность излучения в Вт, а связанную с ней величину, называемую абсолютным уровнем мощности (понятие введено в ОСТ 45.159-2000). Абсолютный уровень мощности  $y$  соответствующий мощности  $P$  выражается в **децибелах мощности дБм** и определяется следующим образом:

$$y = 10 \cdot \lg \frac{P}{P_z}. \quad (4.2)$$

В выражении (4.2)  $P_z$  – мощность, принимаемая за 0 дБм. В оптической связи  $P_z = 1$  мВт.

Зная абсолютный уровень мощности  $y$ , можно определить мощность  $P$ . Из (4.2) следует:

$$P = P_z \cdot 10^{y/10}. \quad (4.3)$$



**Полезно запомнить:**

1. Увеличение абсолютного уровня на 10 дБ соответствует увеличению сигнала в мВт в 10 раз.
2. Уменьшение абсолютного уровня на 10 дБ соответствует уменьшению сигнала в мВт в 10 раз.
3. Увеличение абсолютного уровня на 3 дБ соответствует увеличению сигнала в мВт в 2 раза.
3. Уменьшение абсолютного уровня на 3 дБ соответствует уменьшению сигнала в мВт в 2 раза.

Если известны не мощности  $P_0$  и  $P_1$  в Вт, а соответствующие абсолютные уровни мощности  $y_0$  и  $y_1$  в дБм, то удобно пользоваться другой формулой для расчета затухания, которую легко получить из выражения (4.1):

$$a = y_0 - y_1. \quad (4.4)$$

### 4.3. Причины потерь в кварцевых ОВ. Коэффициент затухания, его зависимость от длины волны.

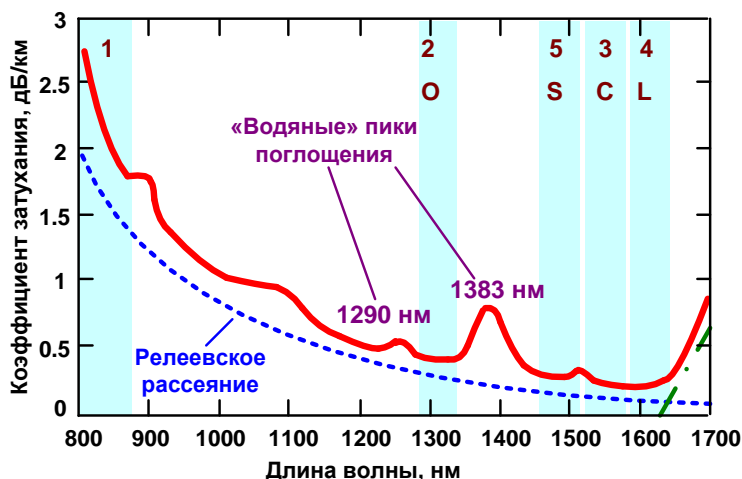
Общие или вносимые потери в ОВ можно разделить на собственные потери, характеризующиеся собственным затуханием, и дополнительные потери. Собственное

затухание (рис. 4.1) обусловлено самим ОВ и возрастает с увеличением его длины. Для однородного ОВ можно рассчитать коэффициент затухания  $\alpha$  - величину собственного затухания на единицу длины:

$$\alpha = \frac{a(\text{дБ})}{L}, \text{ дБ/км} \quad (4.5)$$

где  $L$  - длина ОВ, км.

Зависимость коэффициента затухания в кварцевых оптических волокнах от длины волны излучения представлена на рис. 4.1.



Окно прозрачности	Длина волны, нм
1	780-860
2 – Original (O)	1260-1360
3 – Conventional (C)	1530-1565
4 – Long wavelength (L)	1565-1625
5 – Short wavelength (S)	1460-1530

Рис. 4.1. Зависимость коэффициента затухания от длины волны и положение окон прозрачности в кварцевых ОВ

Собственные потери в ОВ в основном обусловлены двумя причинами: **рассеянием** и **поглощением**. Соответственно коэффициент затухания можно разделить на две составляющих – коэффициент затухания  $\alpha_s$ , обусловленный рассеянием, и коэффициент затухания  $\alpha_a$ , обусловленный поглощением:

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_a \quad (4.6)$$

#### Рассеяние

Из рис. 4.1 видно, что в диапазоне длин волн 800-1700 нм потери асимптотически уменьшаются с ростом длины волны. Это обусловлено релеевским рассеянием света в ОВ.



**Релеевское рассеяние света происходит на неоднородностях, которые имеются в аморфном кварцевом стекле. Под неоднородностью понимается локальное изменение показателя преломления вещества, размеры которого сравнимы с длиной волны.**

Потери из-за релеевского рассеяния быстро уменьшаются с ростом длины волны:

$$\alpha_s = \chi_s \lambda^{-4}, \quad (4.7)$$

где  $\chi_s$  - коэффициент пропорциональности, который для высококачественных кварцевых ОВ равен 0.7-0.9 дБ·мкм<sup>4</sup>/км. Этот коэффициент зависит от материала (вида и концентрации легирующих добавок и т.п.) и технологии изготовления ОВ.

#### Поглощение

Другим характерным видом потерь, оказывающим влияние на вид представленной характеристики, является поглощение. Поглощение – это потери энергии распространяющегося света, возникающие в результате взаимодействия его с частицами среды (атомами и молекулами). При поглощении в ОВ световая энергия преимущественно преобразуется во внутреннюю энергию вещества (в тепло)<sup>1</sup>, то есть расходуется на возбуждение колебаний частиц.

Известно, что частица может обладать не любой энергией, а только энергией, соответствующей разрешенным энергетическим уровням. Для перехода с уровня, имеющего

<sup>1</sup> Энергия световой волны может расходоваться и на другие процессы – фотолюминесценцию (вторичное излучение в другом диапазоне частот), ионизацию атомов вещества и др.

энергию  $W_i$ , на уровень, имеющий энергию  $W_j > W_i$ , частица должна поглотить квант с энергией  $W = W_j - W_i$ .

Распространяющееся по ОВ излучение в корпускулярной теории представляет собой поток фотонов (квантов света). Энергия фотона связана с его частотой  $\nu$  (длиной волны  $\lambda$ ):

$$W_p = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}, \quad (4.8)$$

где  $h = 6,626 \times 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка,  $c$  – скорость света. Если эта энергия совпадает (или близка) с порцией энергии, необходимой частице для перехода на более высокий энергетический уровень, то есть, если  $W_p \approx W$  она будет эффективно поглощаться частицами. В противном случае поглощения практически не будет.

Таким образом, существуют определенные – резонансные – длины волн, которые активно поглощаются веществом. Поэтому говорят, что поглощение носит резонансный характер.

ОВ содержит различные частицы – кварца, основного материала, полезных (легирующих) примесей и вредных примесей, попадающих в ОВ из-за несовершенства технологии производства. Каждая частица имеет свой набор длин поглощаемых волн, которые могут попадать в используемый для связи спектральный диапазон 0.80-1.6 мкм. У кварца и используемых легирующих примесей всплески поглощения в используемом диапазоне отсутствуют. Кварц дает мощные пики поглощения в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра, которые немного захватывают используемый диапазон.

К вредным примесям относят ионы переходных металлов (ванадия, железа, меди, кобальта, никеля, марганца), а также гидроксильные группы ОН. При современных технологиях изготовления ОВ наибольший вклад в поглощение вносят именно гидроксильные группы. Они дают мощные пики поглощения на длинах волн 1290 и 1.383 мкм. Также они определяют более слабые пики поглощения в области длин волн 1130, 950, 875, 825 и 725 нм.

Этот тип потерь существенно зависит от технологии изготовления ОВ и имеет тенденцию к снижению. Так, например, на длине волны 1383 мкм этот пик для современного ОВ составляет 0.4—0.6 дБ/км, а для специального волокна, такого как AllWave, уменьшается до 0.31 дБ/км.

Характер зависимости затухания от длины волны для разных типов ОВ мало отличается.

## 4.4. Окна прозрачности

Из рис. 4.1 видно, что для передачи оптических сигналов может использоваться широкий участок спектра, где потери в ОВ достаточно малы. Его принято разбивать на более узкие участки – рабочие диапазоны или **окна прозрачности**.

*Первое окно прозрачности* используется в основном в локальных вычислительных сетях.

*Второе окно прозрачности (O – Original, основной диапазон)* используется в городских и зональных линиях, а также в локальных вычислительных сетях.

*Третье окно прозрачности (C – Conventional, стандартный диапазон)* наиболее широко используется в магистральных линиях.

В последнее время в связи с развитием технологии спектрального мультиплексирования (DWDM) повысился интерес к третьему и прилегающим к нему четвертому и пятому окнам прозрачности.

*Четвертое окно прозрачности (L – Long wavelength, длинноволновый диапазон)* позволяет расширить спектральный диапазон DWDM систем в сторону длинных волн до 1620 нм.

*Пятое окно прозрачности (S – Short wavelength, коротковолновый диапазон)* позволяет расширить спектральный диапазон DWDM систем в сторону коротких волн до 1460 нм.

## 4.5. Причины дополнительных потерь в кварцевых ОВ.

К дополнительным потерям относятся:

- потери при вводе и выводе излучения в волокно.

- потери в соединениях (стыках) строительных длин,
- изгибные потери.
- потери, связанные с нарушениями геометрической формы ОВ и случайно расположенными структурными дефектами.

Потери на вводе и выводе излучения в ОВ зависят от соотношения размеров излучающей площадки источника или фоточувствительной площадки приемника и сердцевинны ОВ, соотношения апертур источника или приемника и ОВ, а также от коэффициента отражения торцевой поверхности ОВ. Эти потери обычно учитываются в приводимых производителями параметрах ПОМ с волоконным выходом и ПРОМ с волоконным входом.

Потери в стыках ОВ мы подробно рассмотрим позже в теме «Пассивные компоненты».

Изгибные потери разделяют на потери из-за макроизгибов, радиус которых много больше радиуса сердцевинны ОВ, и микроизгибов ОВ, радиус которых соизмерим с радиусом сердцевинны ОВ.

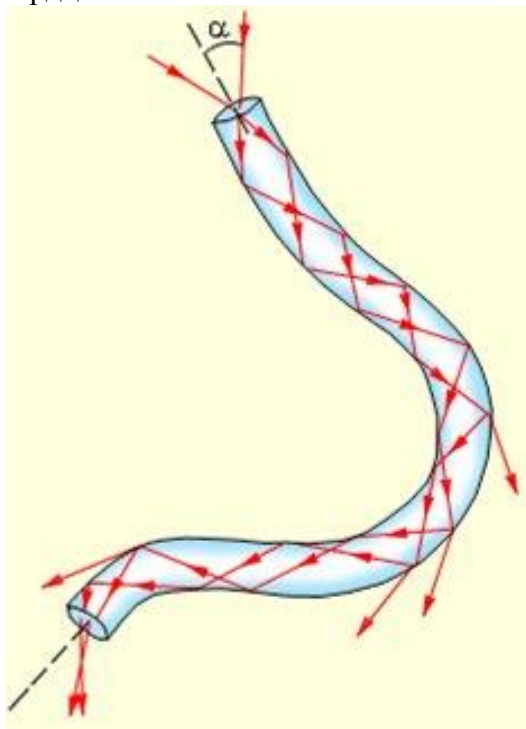


Рис. 4.2. Потери излучения на макроизгибе

Потери из-за макроизгибов возникают из-за нарушения условий ПВО в месте изгиба (рис. 4.2) и сильно зависят от радиуса изгиба. При больших радиусах изгиба (более 25-30 мм на длине волны 1310 нм) они пренебрежимо малы. При уменьшении радиуса изгиба потери начинают быстро возрастать.

Относительно недавно, однако, фирма Corning разработала новый тип ОВ – волокно ClearCurve, с очень малыми потерями на макроизгибах. В этом волокне сердцевина окружена кольцом отражающих наноструктур, не позволяющих свету выйти за пределы сердцевинны.

При соблюдении допустимых радиусов изгибов кабеля и ОВ потери из-за макроизгибов можно считать пренебрежимо малыми.

Существенный вклад в увеличение затухания могут вносить микроизгибы, возникающие из-за механических напряжений в ОВ и вызывающие рассеяние распространяющегося по волокну излучения.

Нарушения геометрической формы ОВ и структурные дефекты могут являться следствием несовершенства технологии производства ОВ. В этом случае связанные с ними потери учтены в величине указанного производителем коэффициента собственного затухания. Однако такие нарушения могут возникнуть и в процессе эксплуатации ВОЛС в результате внешних воздействий на оптический кабель и ОВ и привести к существенному ухудшению качества связи и/или к ускорению процессов деградации ОВ, то есть повысить вероятность повреждения ВОЛС. Такие случаи выявляются при проведении профилактических измерений и ликвидируются в плановом порядке.

#### 4.6. Влияние затухания на длину регенерационного участка



**Затухание ограничивает максимальное расстояние, на которое можно передать сигнал без регенерации.**

Длина регенерационного участка  $L_{rs}$  – это максимальное расстояние, на которое можно передать оптический сигнал без регенерации (максимально возможное расстояние

между двумя соседними регенераторами или максимальная длина оптической линии без регенераторов). В ОВ длина регенерационного участка ограничивается двумя факторами – затуханием оптического сигнала и его искажениями (дисперсией). При проектировании оптической линии отдельно оценивают:

- длину регенерационного участка, ограниченную затуханием, или **длину регенерационного участка по затуханию**  $L_{rsa}$ ,
- длину регенерационного участка, ограниченную дисперсией, или **длину регенерационного участка по дисперсии**  $L_{rsd}$ .

После этого за длину регенерационного участка  $L_{rs}$  принимают меньшее из двух полученных значений:

$$L_{rs} = \min(L_{rsa}, L_{rsd}). \quad (4.9)$$

Для оптических линий и сетей малой протяженности вместо терминов «длина регенерационного участка», «длина регенерационного участка по затуханию», «длина регенерационного участка по дисперсии» используют термины «максимальная длина сегмента сети», «максимальная длина сегмента сети, ограниченная затуханием», «максимальная длина сегмента сети, ограниченная дисперсией».

Принцип расчета  $L_{rsd}$  будет рассмотрен в теме 6. Здесь мы рассмотрим принцип расчета  $L_{rsa}$ .

Если известно максимально допустимое затухание  $a_{\max}$  на регенерационном участке, то длину регенерационного участка по затуханию  $L_{rsa}$  можно примерно оценить следующим образом:

$$L_{rsa} = \frac{a_{\max}}{\alpha}, \quad (4.10)$$

где  $\alpha$  - коэффициент затухания.



**Максимально допустимое затухание в линии определяется параметрами передающего и фотоприемного устройства.**

Одним из основных параметров передающего устройства является средняя мощность излучения в точке  $S$   $P_S$  или ее абсолютный уровень  $y_S$ . Для фотоприемного устройства основным параметром является его чувствительность – минимальная мощность  $P_{R\min}$  или ее абсолютный уровень  $y_{R\min}$  на его входе (в точке  $R$ ), который он способен принять. Максимально допустимое затухание в линии определяется следующим образом:

$$a_{\max} = 10 \cdot \lg \frac{P_S}{P_{R\min}} = y_S - y_{R\min}. \quad (4.11)$$

Выражение (4.10) не учитывает дополнительных потерь, которые также возникают в оптической линии. Уточним выражение (4.10) учетом потерь в соединениях ОВ.

Если известно число неразъемных соединений  $N_n$  и средние потери в одном соединении  $a_n$ , можно уточнить выражение (4.10):

$$L_{rsa} = \frac{a_{\max} - N_n a_n}{\alpha} \quad (4.12)$$

Число неразъемных соединений на регенерационном участке зависит от строительной длины  $L_s$ :

$$N_n = \frac{L_{rs}}{L_s} - 1 \quad (4.13)$$

Подставив это выражение в (4.12) и решив полученное уравнение относительно  $L_{rs}$ , получим:

$$L_{rsa} = \frac{a_{\max} + a_n}{\alpha + a_n/L_s}.$$

Пренебрегая в числителе величиной  $a_n$  по сравнению с  $a_{\max}$ , получим:

$$L_{rsa} = \frac{a_{\max}}{\alpha + a_n/L_s} \quad (4.14)$$

#### 4.7. Влияние затухания на минимальную длину сегмента сети



**Затухание ограничивает также минимальное расстояние, на которое можно передать сигнал без принятия дополнительных мер по снижению его уровня.**

Это ограничение связано с параметром фотоприемного устройства – уровнем его перегрузки – максимальной мощностью  $P_{R\max}$  или ее абсолютным уровнем  $y_{R\max}$ , который приемник способен принять.

Минимально допустимое затухание в линии определяется следующим образом:

$$a_{\min} = 10 \cdot \lg \frac{P_S}{P_{R\max}} = y_S - y_{R\max}. \quad (4.15)$$

Если известно минимально допустимое затухание  $a_{\min}$ , то минимальную длину сегмента  $L_{ns}^2$  можно примерно оценить следующим образом:

$$L_{ns\min} = \frac{a_{\min}}{\alpha}. \quad (4.16)$$

Выражение (4.16) не учитывает дополнительных потерь, основным источником которых являются разъемные соединения. Если  $a_p$  – средние потери в разъемном соединении, то выражение (4.16) можно уточнить:

$$L_{ns\min} = \frac{a_{\min} - 2a_p}{\alpha}. \quad (4.17)$$

Если реальная длина сегмента сети меньше, в линию придется внести дополнительное затухание. Величину минимального дополнительного затухания  $a_{a\min}$  можно найти из соотношения:

$$L_{ns} = \frac{a_{\min} - 2a_p - a_{a\min}}{\alpha}, \quad (4.18)$$

где  $L_{ns}$  – реальная длина сегмента сети. Из (4.18) следует:

$$a_{a\min} = a_{\min} - L_{ns} \alpha - 2a_p \quad (4.19)$$

<sup>2</sup> ns – network segment

## 5. Многомодовые оптические волокна

### 5.1. Понятие моды. Классификация волокон

Оптическое волокно (ОВ) является **направляющей системой**. Направляемость света оптическим волокном можно объяснить на основании явления полного внутреннего отражения (ПВО).

На рис. 5.1 показана структура ОВ, которое состоит из сердцевины и оболочки. Сердцевина имеет показатель преломления  $n_1$  несколько выше показателя преломления оболочки  $n_2$ . Поэтому на границе сердцевина-оболочка может наблюдаться явление ПВО.

Предположим, что лучи от некоторого источника фокусируются в центре торца ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления (ППП), имеющим постоянное значение показателя преломления, как в сердцевине, так и в оболочке. В зависимости от величины угла  $\varphi_{i0}$ , который эти лучи образуют с осью, имеют место (рис. 5.1):

1. лучи сердцевины или направляемые лучи (коричневый луч). Это лучи, которые на границе сердцевина-оболочка испытывают ПВО.
2. лучи оболочки (синий луч). Это лучи, которые испытывают ПВО на границе оболочка-защитное покрытие.
3. лучи, выходящие в окружающее пространство (зеленый луч). Лучи, для которых не выполняются условия ПВО.

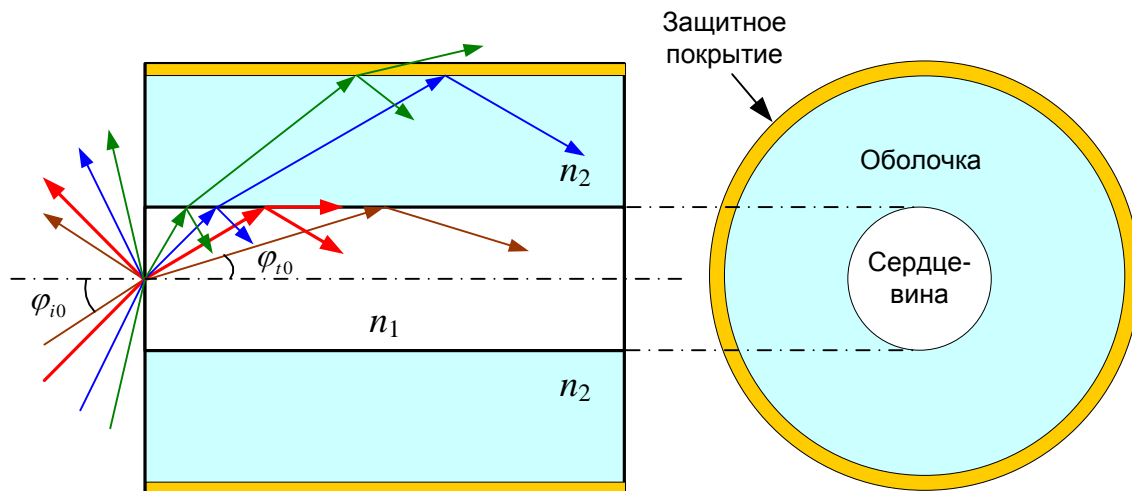


Рис. 5.1. Моды в ОВ со ступенчатым ППП

Для оптической связи могут использоваться только направляемые лучи, для которых выполнено условие ПВО на границе сердцевина-оболочка. Из темы 2 мы знаем, что для этого угол падения луча на границу сердцевина-оболочка должен быть критического угла  $\varphi_{cr} = \arcsin(n_2/n_1)$ . На рис. 5.1 красный луч падает на границу сердцевина-оболочка под углом  $\varphi_{cr}$ .

Таким образом, в соответствии с геометрическим приближением все лучи, угол падения которых на границу сердцевина-оболочка  $\varphi_i \geq \varphi_{cr}$ , являются направляемыми, то есть направляемых лучей должно быть бесконечно много. Однако если провести более сложный анализ, окажется, что свойством направляемости для каждого ОВ обладает ограниченное число лучей, идущих под определенными дискретными углами. Эти лучи получили название **направляемых мод**.

Ненаправляемые лучи также называют модами и различают **оболочечные моды** (синий луч) и **моды излучения** (зеленый луч).

Все ОВ можно по количеству распространяющихся в них **на рабочей длине волны** направляемых мод можно разделить на **многомодовые** (ММ ОВ, в которых число направляемых мод больше одной) и **одномодовые** (ОМ ОВ, в которых свойством направляемости обладает только одна мода).



## 5.2. Многомодовые оптические волокна со ступенчатым ППП

### 5.2.1. Траектории лучей в ступенчатом ОВ. Направляемые лучи.

Рассмотрим траектории лучей в многомодовом ОВ со ступенчатым ППП. Все возможные направляемые лучи можно разделить на меридиональные, имеющие зигзагообразные траектории, которые пересекают оптическую ось ОВ, и косые, имеющие спиралевидные траектории, которые не пересекают оптическую ось ОВ. Для простоты мы будем рассматривать только меридиональные лучи. Они отличаются углами падения  $\varphi_i$  на границу сердцевина-оболочка:

$$\varphi_i \geq \arcsin \frac{n_2}{n_1} = \varphi_{cr}. \quad (5.1)$$

Рассмотрим процессы ввода излучения в ступенчатое ММ ОВ от источника, который фокусирует излучение на центр торца ОВ.

На торцевой поверхности лучи испытывают отражение и преломление света. Преломленные на плоской торцевой поверхности лучи продолжают распространяться в сердцевине ОВ (рис. 5.2) под углом преломления по отношению к оси ОВ

$$\varphi_i = \arcsin \left( \frac{n_0}{n_1} \cdot \sin(\varphi_{i0}) \right), \quad (5.2)$$

где  $n_0$  – показатель преломления среды, из которой вводится излучение в ОВ,  $\varphi_{i0}$  – угол падения некоторого луча на торцевую поверхность ОВ.

Далее эти лучи достигнут границы раздела сердцевина-оболочка, на которой также будет происходить отражение и преломление света. Угол падения для меридиональных лучей на границу раздела сердцевина-оболочка составит

$$\varphi_i = \pi/2 - \varphi_i. \quad (5.3)$$

Направляемыми могут быть только те лучи, для которых выполняется условие полного внутреннего отражения

$$\varphi_i \geq \varphi_{cr} = \arcsin \left( \frac{n_2}{n_1} \right), \quad (5.4)$$

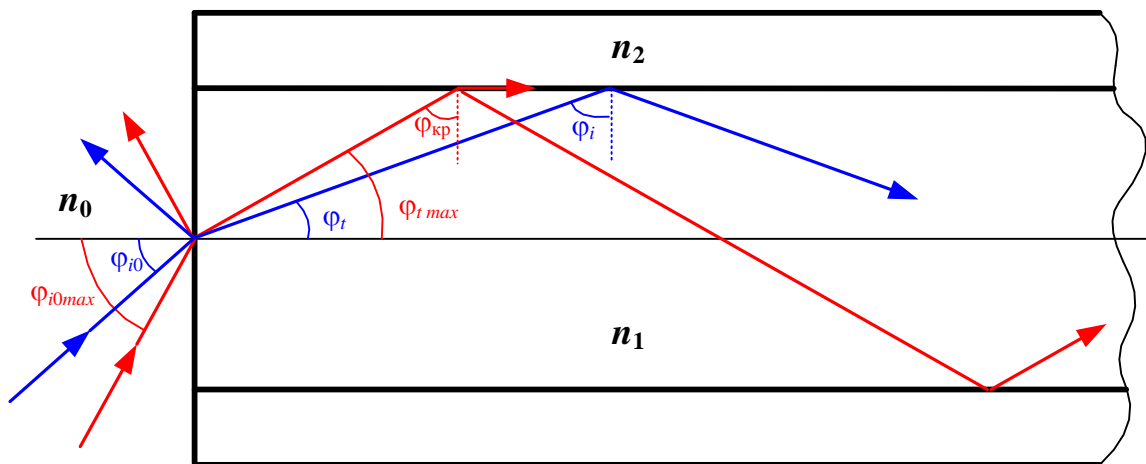


Рис.5.2. Ввод и распространение меридиональных лучей по ступенчатому ОВ

### 5.2.2. Параметры ступенчатого ОВ.

#### 5.2.2.1. Числовая апертура.

Максимальный угол ввода луча в ОВ будет соответствовать лучу, угол падения которого на границу сердцевина-оболочка равен критическому:

$$\sin(\varphi_{i0}) \leq \sin(\varphi_{i0\max}) = \frac{1}{n_0} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (5.5)$$

Угол  $\varphi_{i0\max}$  называется **апертурой** или **апертурным углом**. Это максимальный угол между оптической осью и одной из образующих светового конуса лучей источника, которые входят через торец ОВ и распространяются по прямолинейной сердцевине ОВ, испытывая полное внутреннее отражение на границе сердцевина-оболочка.

**Числовая апертура**  $NA$  – параметр, характеризующий эффективность ввода излучения в ОВ. Числовая апертура равна синусу апертурного угла, измеренного при вводе излучения в ОВ из воздуха, то есть при  $n_0 = 1$ :

$$NA = \sin(\varphi_{i0\max}) \Big|_{n_0 = 1} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Если угол ввода луча будет больше апертурного, соответствующий луч не будет направляемым.

Если наблюдать выходящее из ОВ излучение, то оно также выходит из ОВ в виде конуса с тем же углом  $\varphi_{i0\max}$  при вершине.

### 5.2.2.2. Нормированная частота, число направляемых мод.

Одним из важных параметров ОВ является, так называемая **нормированная частота**

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{core} \cdot NA}{\lambda_0}, \quad (5.6)$$

где  $r_{core}$  – радиус сердцевины ОВ,  $\lambda_0$  – длина волны источника излучения в вакууме.

Видно, что нормированная частота растет с увеличением радиуса сердцевины и увеличением числовой апертуры или с увеличением разности показателей преломления. Нормированная частота позволяет определить **число направляемых мод**<sup>1</sup> в ступенчатом ОВ по выражению

$$M = INT\left(\frac{v^2}{2}\right), \quad (5.7)$$

где INT означает целую часть числа.



Число направляемых мод – целочисленная величина. Кроме того, для телекоммуникационных волокон минимальное возможное число мод равно 1. Поэтому при расчете числа мод: 1) получив не целое значение, необходимо взять целую часть результата. 2) получив значение меньше 1, необходимо считать, что число мод равно 1. Точное условие достижения одномодового режима рассмотрено в теме 6.

Поскольку выражение для нормированной частоты включает в себя длину волны источника, число мод будет также зависеть от рабочей длины волны.

### 5.2.2.3. Межмодовая дисперсия.

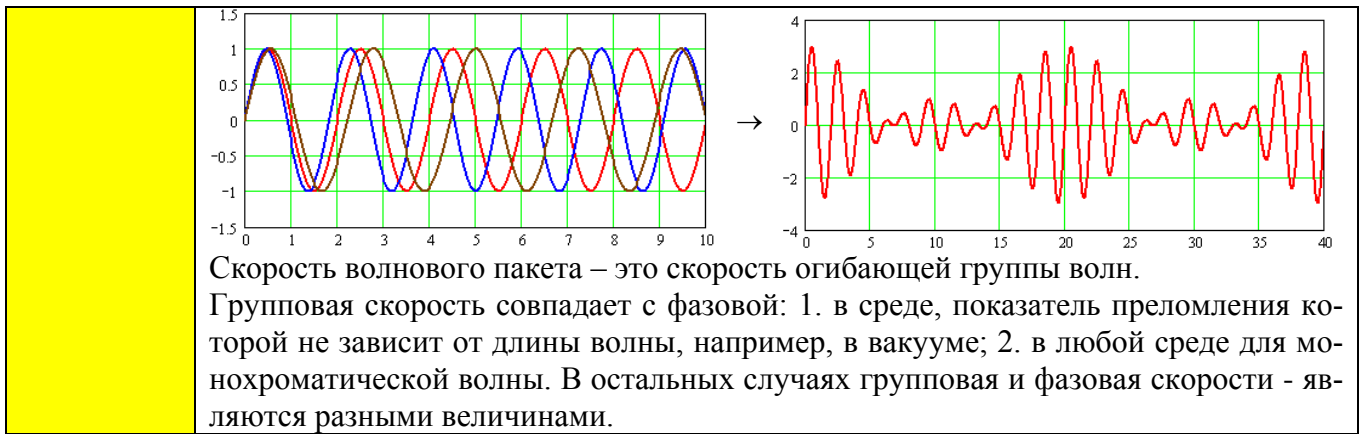
Оптические сигналы, передаваемые по ММ ОВ, представляют собой последовательность коротких оптических импульсов. Энергия оптического импульса, введенного в ОВ, распределяется между всеми направляемыми модами. Каждая мода несет часть энергии исходного импульса. Скорости, с которыми разные моды переносят энергию, (групповые скорости) в ступенчатом ОВ будут одинаковыми.

Отметим, что скорость распространения энергии (групповая) и фазовая  $c/n_1$  – скорость не всегда совпадают. В данном случае – это разные величины.



Под **групповой скоростью** понимают скорость движения волнового пакета, который формируется при сложении монохроматических волн разных (но близких) частот:

<sup>1</sup> Далее под **числом мод** будет пониматься **число направляемых мод**.



Показатель преломления, как чистого плавленного кварца, так и плавленного кварца с легирующими примесями зависит от длины волны. На рис. 5.3 показаны зависимости  $n(\lambda)$  для чистого кварца (черная кривая) и для кварца с различным содержанием легирующей добавки  $\text{GeO}_2$ . Кроме того, сигналы, передаваемые по ОВ, не являются монохроматическими.

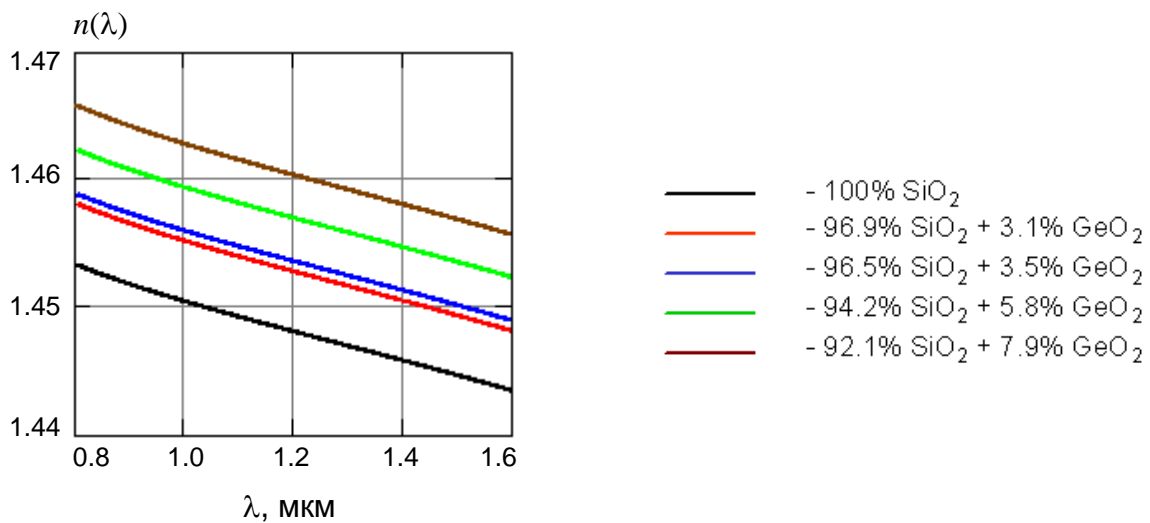


Рис. 5.3. Зависимости показателя преломления от длины волны.

Таким образом, групповая скорость света в кварцевом волокне не совпадает с фазовой скоростью, равной  $c/n$ . Для групповой скорости:

$$V_g = \frac{c}{n_g}, \text{ где } n_g(\lambda) = n(\lambda) - \lambda \frac{dn(\lambda)}{d\lambda} - \text{групповой показатель преломления.} \quad (5.8)$$

В (5.8) запись  $dn(\lambda)/d\lambda$  означает производную показателя преломления  $n(\lambda)$  по длине волны  $\lambda$ .

Для того чтобы пройти 1 км волокна, разным модам приходится преодолевать разное расстояние. Мода, идущая вдоль оптической оси волокна, должна пройти путь, равный длине волокна, то есть 1 км. Мода, идущая под углом к оптической оси, должна пройти больший путь. Легко показать, что он будет равен  $1 \text{ км} / \sin \phi$ , где  $\phi$  – угол падения луча на границу сердцевина-оболочка.

Соответственно, порции энергии, переносимые разными модами, на выход ОВ придут не одновременно. Первым придет импульс, который несет мода низшего порядка, имеющая кратчайший путь. Затем будут приходить импульсы других мод. На выходе ОВ импульсы отдельных мод, пришедшие в разное время, сложатся, образуя более широкий, по сравнению с входным, оптический импульс. Эти процессы проиллюстрированы на рис. 5.4.

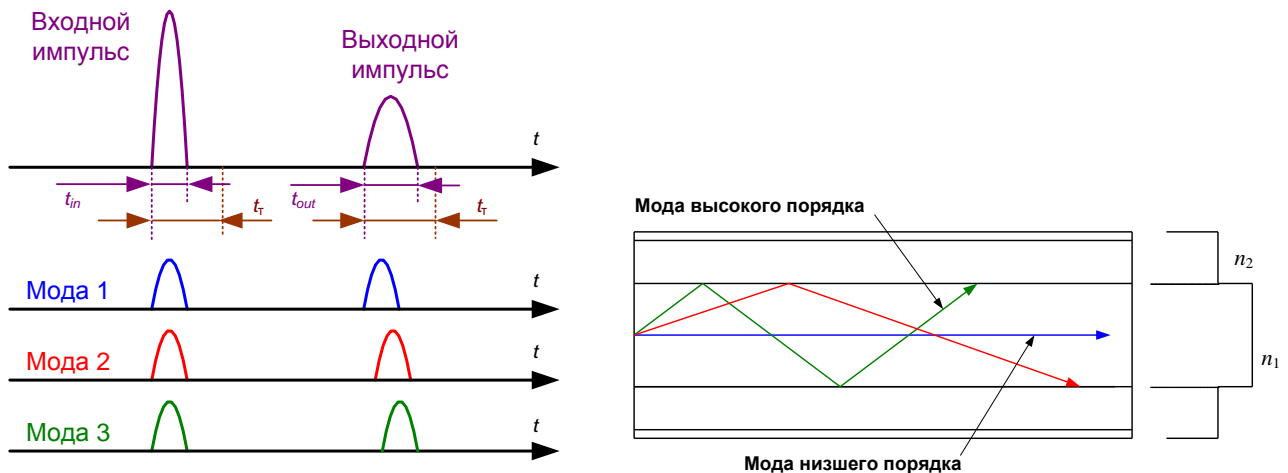


Рис.5.4. Межмодовая дисперсия в ММ ОВ со ступенчатым ППП.

Явление уширения импульса в ММ ОВ называется **межмодовой дисперсией**. Величину уширения импульса на одном километре волокна называют **коэффициентом межмодовой дисперсии**  $D_m$ . Коэффициент межмодовой дисперсии измеряется в нс/км. Если его величина известна, то уширение импульса  $\Delta t$  в ОВ длиной  $L$  в первом приближении определится выражением

$$\Delta t = \sqrt{t_{out}^2 - t_{in}^2} = D_m \cdot L. \quad (5.9)$$

Для ориентировочной оценки коэффициента межмодовой дисперсии можно определить разность времен распространения меридиональных лучей с наименьшей и наибольшей длиной траектории. Наименьшую траекторию и наименьшее время распространения  $t_{min}$  имеет луч, распространяющийся вдоль оси ОВ.

$$t_{min} = \frac{L \cdot n_{1g}}{c} \quad (5.10)$$

Наибольшую траекторию и наибольшее время распространения  $t_{max}$  имеет луч, распространяющийся по ОВ, отражаясь от границы раздела сердцевины и оболочки под углом полного внутреннего отражения.

$$t_{max} = \frac{L \cdot n_{1g}}{c \cdot \sin(\varphi_{cr})} = \frac{L \cdot n_{1g} \cdot n_1}{c \cdot n_2} \quad (5.11)$$

Теперь для коэффициента межмодовой дисперсии можно записать

$$D_m = \frac{t_{max} - t_{min}}{L} = \frac{n_{1g}}{c} \cdot \left[ \frac{n_1}{n_2} - 1 \right] = \frac{n_{1g} \cdot (n_1 - n_2)}{c \cdot n_2} = \frac{n_{1g} \cdot NA^2}{c \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2)} \quad (5.12)$$



**Межмодовая дисперсия ограничивает максимальное расстояние, на которое можно передать сигнал с определенной скоростью без регенерации.**

**Межмодовая дисперсия ограничивает максимальную скорость, с которой можно передавать сигнал на определенное расстояние без регенерации.**

Цифровой оптический сигнал, передаваемый по ОВ, представляет собой последовательность коротких оптических импульсов. Число импульсов, передаваемых за 1 с, соответствует скорости передачи. Скорость передачи определяет также тактовый интервал, отведенный одному импульсу. Например, для двухуровневого кодирования:

- при скорости 1 бит/с передается 1 импульс в 1 с и тактовый интервал равен 1 с,
- при скорости 2 бит/с передается 2 импульса в 1 с и тактовый интервал 0.5 с,
- и т.д.

Изначально импульс занимает от четверти до половины тактового интервала. В процессе распространения по волокну он постепенно расширяется из-за дисперсии и занимает все большую часть тактового интервала. Когда импульс займет весь тактовый интервал, сигнал необходимо регенерировать (восстанавливать).

Чем больше дисперсия, тем быстрее расширяются импульсы и тем чаще нужно ставить регенераторы.

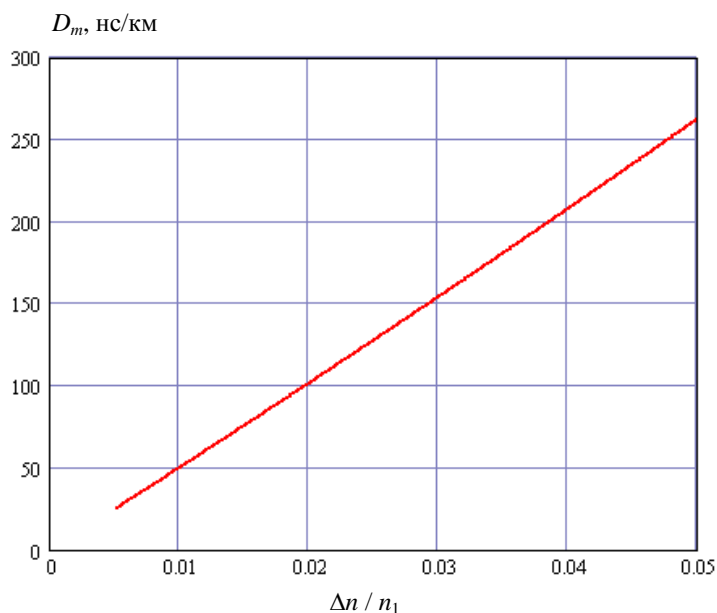


Рис. 5.5. Зависимость коэффициента межмодовой дисперсии от относительной разности показателей преломления сердцевин и оболочки  $\Delta n / n_1 = (n_1 - n_2) / n_1$ .

ры.

На рис. 5.5 показаны результаты расчетов коэффициента межмодовой дисперсии по выражению (5.12). Видно, что с увеличением относительной разности показателей преломления межмодовая дисперсия быстро растет.

Для уменьшения межмодовой дисперсии необходимо уменьшать количество мод в ОВ. Из выражения (5.7) видно, что для уменьшения количества мод необходимо уменьшать нормированную частоту, т.е. уменьшать радиус сердцевин, числовую апертуру (разность показателей преломления между сердцевинной и оболочкой) и использовать источник с большей длиной волны.

#### 5.2.2.4. Широкополосность.

С коэффициентом межмодовой дисперсии связано понятие широкополосности волокна или удельной полосы пропускания  $B$ . Этот параметр может быть определен экспериментально по срезу амплитудно-частотной модуляционной характеристики<sup>1</sup> (АЧМХ) на уровне 3 дБ (рис. 5.6). Между  $B$  в Гц·км и  $D_m$  в с/км существует зависимость

$$W = \frac{0.44}{D_m} \tag{5.13}$$

Коэффициент 0.44 в (5.13) является безразмерным.

Широкополосность  $B$  принято выражать в МГц·км. Величина широкополосности для ступенчатых ММ ОВ ограничивается величиной 20-50 МГц·км. Это очень мало.

<sup>1</sup> АЧМХ – зависимость модуля комплексного коэффициента передачи огибающей мощности оптического излучения, модулированного гармоническим сигналом, от частоты модуляции.

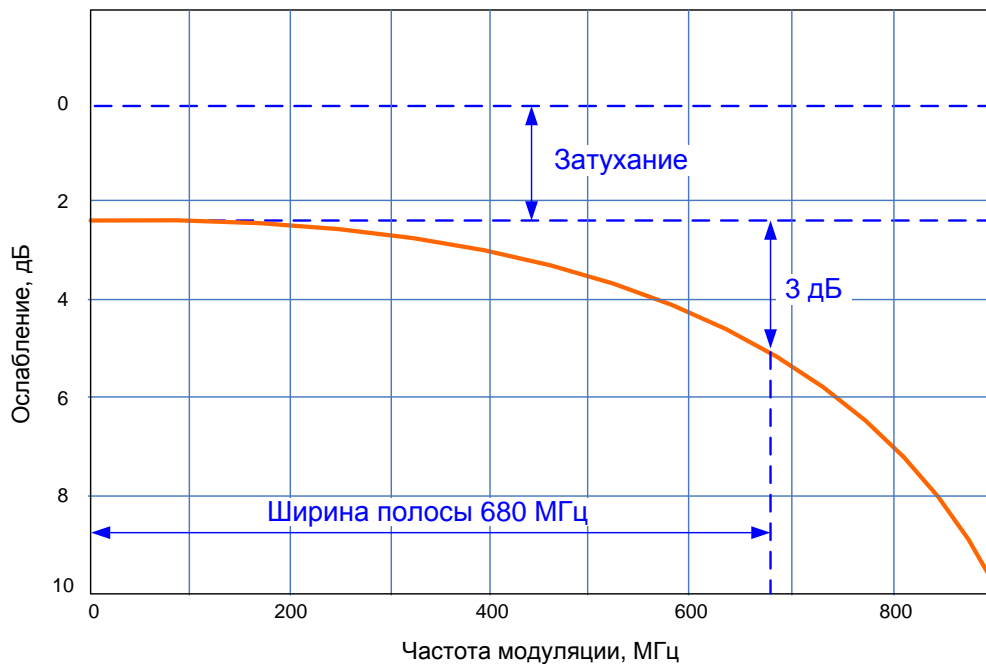


Рис. 5.6. Понятие широкополосности ОВ.

### 5.3. Связь широкополосности с максимальными длиной сегмента и скоростью передачи.



**Широкополосность (дисперсия) ограничивает максимальную длину сегмента сети – максимальное расстояние, на которое можно передать сигнал с определенной скоростью без регенерации.**

**Широкополосность ограничивает максимальную скорость, с которой можно передавать сигнал на определенное расстояние без регенерации.**

В ОВ с известной широкополосностью  $B$  всегда существует компромисс между скоростью и дальностью передачи:

$$B = \Delta F \cdot L, \quad (5.14)$$

где  $\Delta F$  – ширина полосы, необходимая для передачи сигнала с нужной скоростью,  $L$  – расстояние, на которое нужно передать сигнал.

Можно считать, что минимальная необходимая полоса пропускания  $\Delta F$  определяется шириной спектра, занимаемого модулирующим электрическим сигналом. При использовании двухуровневых кодов ее можно рассчитать по выражениям:

$$\text{для кода NRZ:} \quad \Delta F = \frac{B_b}{2} \quad (5.15)$$

$$\text{для кода RZ:} \quad \Delta F = B_b \quad (5.16)$$

В (5.15) и (5.16)  $B_b$  – битовая скорость передачи данных (бит/с). Полосы пропускания  $\Delta F_{NRZ}$  и  $\Delta F_{RZ}$  выражаются в герцах (Гц).

Если известна скорость передачи сигнала  $B_b$ , можно найти максимальную длину сегмента сети  $L_{nsd}$ , ограниченную дисперсией (это понятие было введено в теме 4):

$$L_{nsd} = B / \Delta F, \quad (5.17)$$

Если известно расстояние  $L$ , на которое передается сигнал, можно найти максимальную скорость, с которой можно его передавать. Расстояние определяет максимальную полосу, которую может занимать передаваемый сигнал:

$$\Delta F_{\max} = B / L. \quad (5.18)$$

Максимальную скорость передачи можно определить по выражениям (5.15) и (5.16):

$$\text{для кода NRZ:} \quad B_{b\max} = 2\Delta F_{\max} \quad (5.19)$$

для кода RZ:  $B_{b \max} = \Delta F_{\max}$  (5.20)

### 5.4. Градиентные многомодовые оптические волокна с усеченным степенным профилем показателя преломления

Для уменьшения коэффициента межмодовой дисперсии и увеличения широкополосности были разработаны градиентные ММ ОВ с усеченным степенным ППП, в которых  $n_1$  показатель преломления сердцевинны ОВ с радиусом  $r_{core}$  уменьшается с увеличением расстояния  $r$  от оси ОВ по закону близкому к параболическому

$$n_1^2 = n_{10}^2 \cdot \left[ 1 - 2\Delta \cdot \left( \frac{r}{r_{core}} \right)^q \right], \text{ при } 0 < r < r_{core}, \quad (5.21)$$

где  $n_{10}$  – показатель преломления на оси ОВ,  $q$  – показатель степенного профиля, близкий к 2,  $\Delta$  – высота профиля:

$$\Delta = \frac{n_{10}^2 - n_2^2}{2n_{10}^2} \quad (5.22)$$

Показатель преломления оболочки  $n_2$  у такого ОВ является постоянной величиной

$$n_2 = n_{10} \cdot \sqrt{1 - 2\Delta}. \quad (5.23)$$

На рис. 5.7 показаны профили показателей преломления с различными значениями показателя степенного профиля. Расчеты проводились для  $n_{10} = 1.5$ ,  $\Delta = 0.01$ .

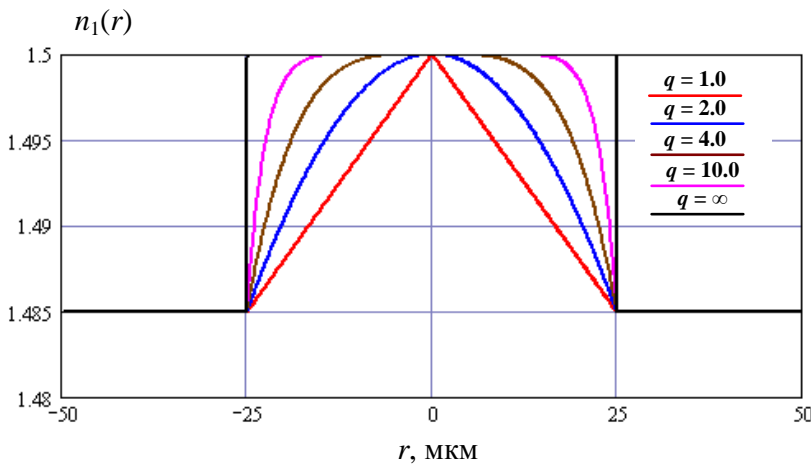


Рис. 5.7. Усеченные степенные профили показателя преломления.

#### 5.4.1. Траектории лучей в ОВ с усеченным степенным профилем. Направляемые лучи.

На рис. 5.8 показаны траектории некоторых лучей (мод) в градиентном ОВ. Видно, что радиальные изменения показателя преломления приводят к искривлению траекторий лучей.

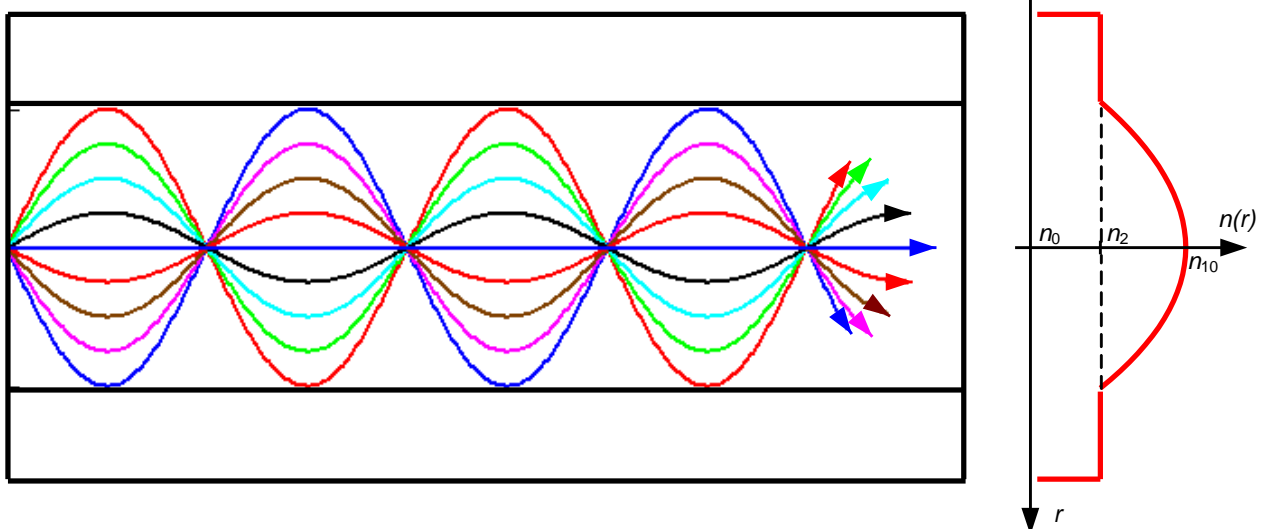


Рис. 5.8. Траектории меридиональных лучей в ОВ с усеченным степенным ППП.

Различные типы лучей (мод) можно характеризовать лучевым инвариантом  $\beta$ , который представляет собой постоянную для данного луча скалярную величину, характеризующую его направление в любой точке поперечного сечения сердцевинны.

$$\beta = n_1(r) \cdot \cos \theta_z(r) \quad (5.24)$$

где  $\theta_z(r)$  - угол, образующийся между касательной к траектории луча и осью ОВ.

Траектории направляемых лучей в таком ОВ никогда не доходят до границы сердцевина-оболочка. Они распространяются внутри центральной части сердцевинны, ограниченной цилиндрической поверхностью, называемой **внешней каустикой**. Это исключает потери мощности. Радиус внешней каустики можно найти из 5.24 и 5.21, приравняв  $\theta_z(r)$  к 0:

$$r_{ce} = r_{core} \cdot \left( \left( 1 - \frac{\beta^2}{n_{10}^2} \right) / 2\Delta \right)^{\frac{1}{q}} \quad (5.25)$$

Из условий  $r_{ce} < r_{core}$  и  $r_{ce} > 0$ , можно получить условие направляемости лучей:

$$n_2(\lambda) < \beta \leq n_1(\lambda) \quad (5.26)$$

Моде низшего порядка, также как и в ступенчатых ОВ, соответствует траектория вдоль оси ОВ, а моде самого высокого порядка соответствует траектория, касательная к поверхности раздела сердцевинны и оболочки.

## 5.4.2. Параметры ОВ с усеченным степенным профилем.

### 5.4.2.1. Межмодовая дисперсия, широкополосность.

Общая идея перехода от многомодовых ступенчатых ОВ к градиентным состоит в том, чтобы выровнять времена распространения отдельных мод по ОВ, и, тем самым, существенно уменьшить коэффициент межмодовой дисперсии.

Скорость любого луча, кроме осевого, в градиентном ОВ будет изменяться вдоль его траектории (рис. 5.10). Она будет наименьшей при прохождении оси ОВ и наибольшей вблизи оболочки. Профиль показателя преломления подбирается таким образом, чтобы выровнять времена прохождения различных мод по ОВ. Поскольку полностью это сделать невозможно, межмодовая дисперсия все равно будет иметь место.

Для оценки коэффициента межмодовой дисперсии  $D_m$  нам (как и в случае ступенчатого ОВ) нужно найти два направляемых луча с минимальным и максимальным временами распространения на расстояние  $L$  в ОВ:

$$D_m = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{L} = \tau_{\max} - \tau_{\min}, \quad (5.27)$$

где  $\tau_{\max}$  и  $\tau_{\min}$  – максимальное и минимальное удельные времена распространения лучей – времена распространения лучей в ОВ на единичное расстояние.

Известно, что удельное время распространения луча в ОВ с усеченным степенным профилем зависит только от лучевого инварианта  $\beta$  и от параметра  $p$  внеосевой дисперсии материала сердцевинны ОВ:

$$\tau(\beta) = \frac{1}{c} \cdot \frac{n_{10g}}{q+2} \left[ (p+q) \cdot \frac{n_{10}}{\beta} + (2-p) \cdot \frac{\beta}{n_{10}} \right], \quad (5.28)$$

где  $n_{10g} = n_{10}(\lambda) - \lambda \frac{dn_{10}}{d\lambda}$  – групповой показатель преломления на оси ОВ;  $c = 3 \cdot 10^5$  км/с - скорость света в вакууме;

$p = \frac{n_{10}}{n_{10g}} \frac{\lambda}{\Delta} \cdot \frac{d\Delta}{d\lambda}$  – параметр внеосевой дисперсии материала сердцевинны

ОВ. В (5.28) записи  $dn_{10}/d\lambda$  и  $d\Delta/d\lambda$  означают производные показателя преломления  $n_{10}$  и высоты профиля  $\Delta$  по длине волны  $\lambda$ . Удельное время распространения луча принято выражать в с/км.



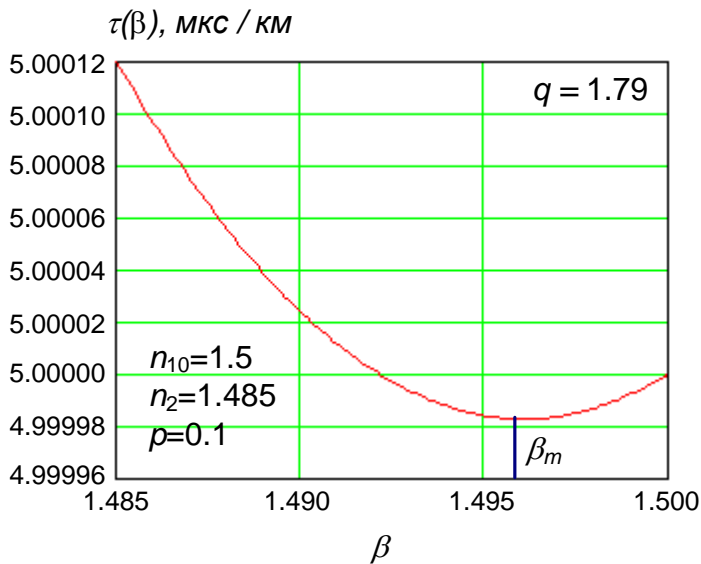


Рис. 5.9. Зависимость удельного времени задержки от величины первого инварианта.

На рис. 5.9 показана зависимость удельного времени распространения для различных значений инварианта  $\beta$ . Из рис. 5.9 видно, что для определенного значения инварианта  $\beta_m$  удельное время распространения принимает минимальное значение.

$$\beta_m = n_{10} \cdot \sqrt{\frac{q+p}{2-p}} \quad (5.29)$$

При этом минимальное удельное время распространения на единичное расстояние будет равно:

$$t(\beta_m) = \frac{1}{c} \cdot \frac{2n_{10g}}{q+2} \cdot \sqrt{(p+q) \cdot (2-p)} \quad (5.30)$$

Инвариант  $\beta_m$  всегда соответствует самому «быстрому» лучу, но этот луч не всегда является направляемым.

На рис. 5.10 показаны варианты расположения диапазона направляемых лучей относительно  $\beta_m$ . На двух верхних графиках инвариант  $\beta_m$  соответствует ненаправляемому лучу, на двух нижних – направляемому.

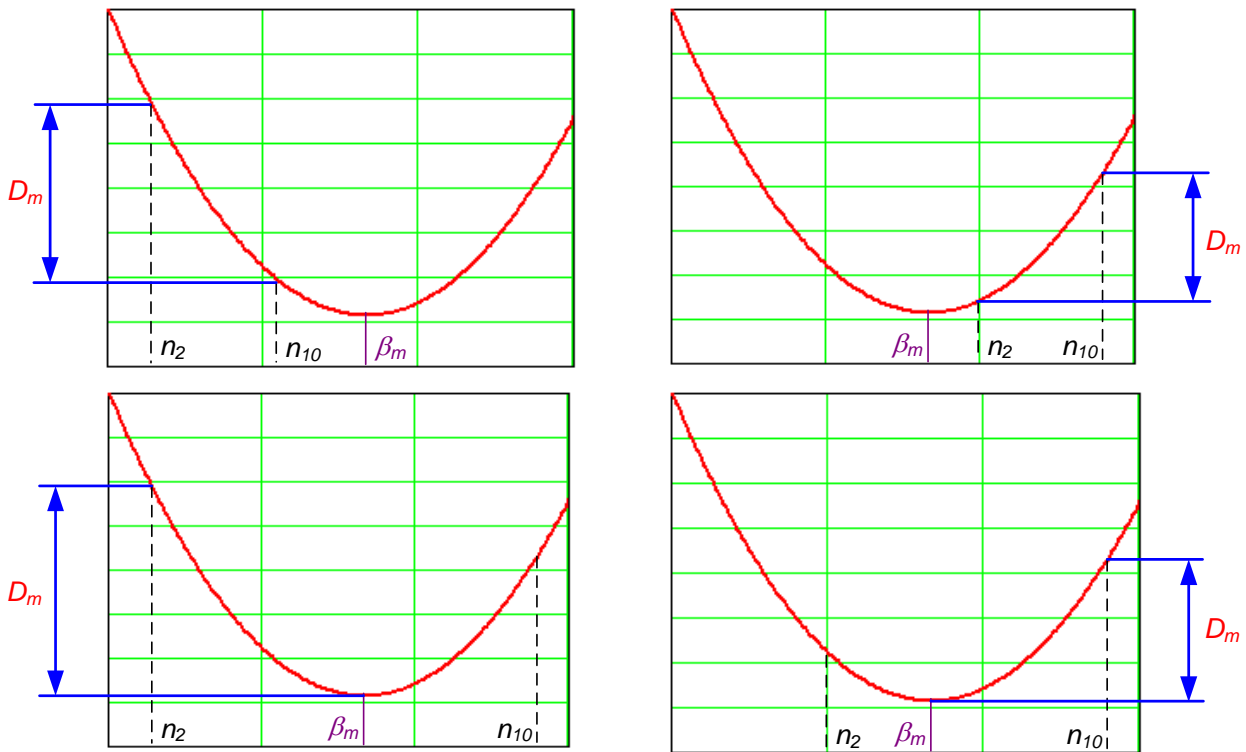


Рис. 5.10. Расчет коэффициента межмодовой дисперсии.

Расположение диапазона направляемых лучей по отношению к  $\beta_m$  на определенной длине волны зависит от показателя степенного профиля  $q$ .

В зависимости от того, входит ли  $\beta_m$  в диапазон направляемых лучей (5.26), удельные максимальное и минимальное времена распространения, входящие в выражение (5.27) для коэффициента межмодовой дисперсии, рассчитываются по-разному:

$$\tau_{\max} = \begin{cases} \max[\tau(n_{10}), \tau(n_2), \tau(\beta_m)] & \text{при } n_2 < \beta_m < n_{10} \\ \max[\tau(n_{10}), \tau(n_2)] & \text{при } \beta_m < n_2 \text{ и } \beta_m > n_{10} \end{cases} \quad (5.31)$$

$$\tau_{\min} = \begin{cases} \min[\tau(n_{10}), \tau(n_2), \tau(\beta_m)] & \text{при } n_2 < \beta_m < n_{10} \\ \min[\tau(n_{10}), \tau(n_2)] & \text{при } \beta_m < n_2 \text{ и } \beta_m > n_{10} \end{cases} \quad (5.32)$$

Минимально достижимая межмодовая дисперсия соответствует варианту, когда удельные времена распространения, соответствующие минимальному и максимальному значениям инварианта  $\beta$  равны (рис. 5.11). Из (5.28) следует, что в этом случае:

$$\tau(n_{10}) = \frac{n_{10g}}{c} = \tau(n_2) = \frac{1}{c} \cdot \frac{n_{10g}}{q+2} \left[ (p+q) \cdot \frac{n_{10}}{n_2} + (2-p) \cdot \frac{n_2}{n_{10}} \right], \quad (5.33)$$

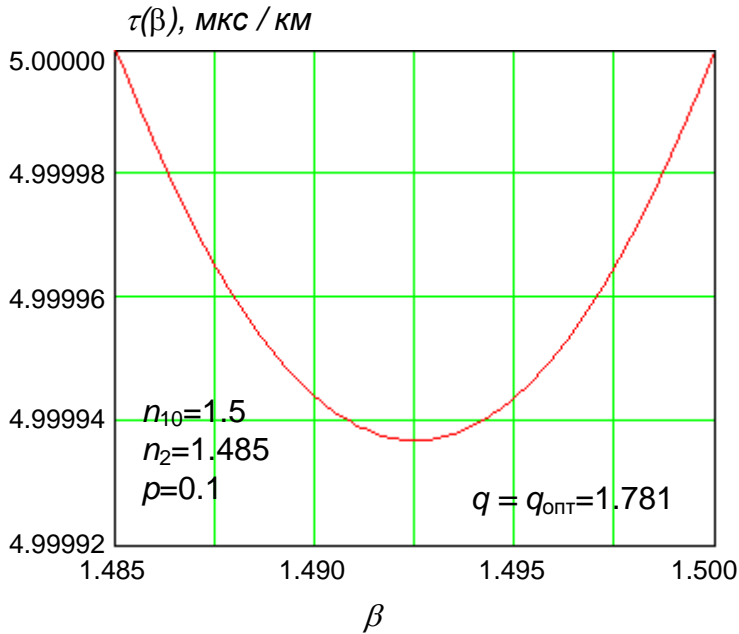


Рис. 5.11. Зависимость удельного времени задержки от величины инварианта для оптимального показателя степенного профиля

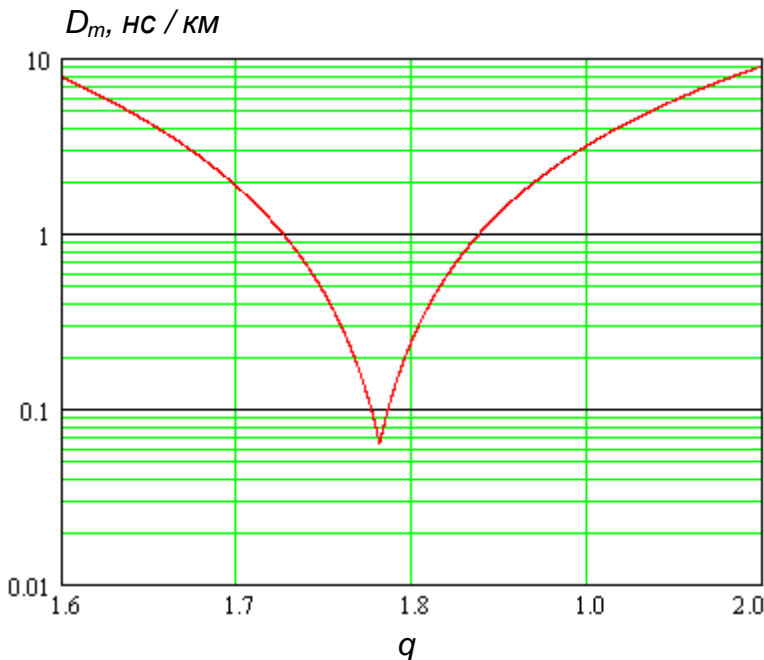


Рис. 5.12. Зависимость межмодовой дисперсии от показателя степенного профиля

Решив уравнение (5.29) относительно  $q$ , получаем, что минимальная дисперсия будет у волокна с оптимальным значением параметра степенного профиля

$$q_{opt} = 2 \cdot \frac{n_2}{n_{10}} - p \cdot \frac{n_{10} + n_2}{n_{10}}. \quad (5.34)$$

Коэффициент минимально достижимой межмодовой дисперсии при  $q = q_{opt}$  может быть рассчитан по выражению

$$D_{m \min} = t(n_{10}) - t(\beta_m) = \frac{n_{10g}}{c} \cdot \left[ 1 - 2 \cdot \frac{\sqrt{n_{10} \cdot n_2}}{n_{10} + n_2} \right] \quad (5.35)$$

Для приведенных на рис. 5.11 параметров  $\beta_m = 1.492$ ,  $q_{opt} = 1.781$ ,  $D_{m \min} = 63$  пс/км.

Зависимость коэффициента межмодовой дисперсии от показателя профиля  $q$  имеет минимум, который также зависит от длины волны (рис. 5.12). Из рис. 5.12 видно, что минимум очень острый, то есть даже небольшое отклонение показателя степенного профиля от оптимального приводит к резкому возрастанию дисперсии. Поскольку существующие технологии изготовления ОВ не позволяют выдерживать этот параметр с необходимой точностью, в реальных ОВ дисперсия значительно больше минимально достижимой. Однако она значительно меньше, чем у ступенчатых ОВ и составляет 0.2–2 нс/км.

Соответственно широкополосность градиентных многомодовых ОВ значительно больше, чем у ступенчатых, и лежит в пределах 200 – 2000 МГц км.

### 5.4.2.2. Локальная числовая апертура, эффективная числовая апертура.

Для градиентных ОВ вводится понятие **локальной числовой апертуры**, которая показывает, что максимальный угол ввода оптического излучения в этом случае зависит от того, в какой точке сердцевины излучение вводится в градиентное волокно. Для ОВ с градиентным ППП числовая апертура зависит от расстояния  $r$  до оси ОВ

$$NA(r) = \sqrt{n_1^2(r) - n_2^2}. \quad (5.36)$$

При расчете эффективности ввода излучения в градиентное ОВ его удобно рассматривать, как ступенчатое и характеризовать **эффективной числовой апертурой**<sup>1</sup>, которая для ОВ с  $q = 2$  составляет

$$NA_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{n_{10}^2 - n_2^2} \quad (5.37)$$

### 5.4.2.3. Число направляемых мод.

Для определения количества мод в ОВ с усеченным степенным профилем также используется нормированная частота ОВ (5.6)

$$M = \frac{v^2}{2(1 + 2/q)} \quad (5.38)$$

Из последнего выражения следует то, что в ступенчатых ОВ при том же значении нормированной частоты будет в два раза больше мод, чем в градиентных ОВ с  $q = 2$ .

## 5.5. Многомодовые градиентные ОВ. Рекомендации МСЭ G.651. Новые типы многомодовых ОВ для высокоскоростных сетей.

ММ ОВ с градиентным (усеченным степенным) ППП применяются:

1. На местных сетях для передачи сигналов с относительно низкими скоростями до 8 Мбит/с (PDH)
2. В локальных сетях для передачи сигналов на небольшие расстояния, но даже с гигабитными скоростями.

Градиентным ММ ОВ посвящена рекомендация МСЭ G.651.1. Рекомендуемые параметры ММ ОВ показаны в табл. 5.1.

Таблица 5.1.

Параметры	Градиентное ММ ОВ G.651.1
Диаметр сердцевины $2r_{core}$ (мкм)	$50.0 \pm 3.0$
Диаметр оболочки $2r_{clad}$ (мкм)	$125.0 \pm 2.0$
Диаметр защитного покрытия (мкм)	$245 \pm 10$
Радиальное отклонение сердцевины относительно оболочки (мкм)	$\leq 3.0$
Отклонение сердцевины от окружности	$\leq 5\%$
Числовая апертура на оптической оси	$0.2 \pm 0.015$
Номинальное затухание на длине волны 850/1300 нм (дБ/км)	$\leq 3.5 / \leq 1.0$
Широкополосность на длинах волн 850 и 1300 нм при насыщающем возбуждении (МГц·км)	$\geq 500$

Приведенные характеристики многомодовых волокон позволяют обеспечить необходимой полосой пропускания на расстояниях до 2 км все технологии со скоростями до 622 Мбит/с.

<sup>1</sup> Согласно ГОСТ 26599-85 Термины и определения: Эффективная числовая апертура – значение, равное синусу половины плоского угла, соответствующего телесному углу, ограничивающему конус, в котором сосредоточена заданная часть мощности оптического излучения на выходе оптического волокна.

Однако с внедрением более высокоскоростных технологий Gigabit Ethernet и 10-Gigabit Ethernet полоса пропускания перестала быть достаточной. Ограничение оказалось связано со спецификой новых источников излучения, используемых в высокоскоростных системах. В них вместо светоизлучающих диодов применяются более быстродействующие многомодовые лазеры типа VCSEL или одномодовые лазеры. Существенно, что эти излучатели имеют различную ширину диаграммы направленности (рис. 5.13).

Светоизлучающий диод из-за широкой диаграммы направленности дает самое большое световое пятно, которое засвечивает сразу всю сердцевину ОВ, часто захватывая также и оболочку. Такой ввод светового сигнала в волокно называется насыщающим возбуждением световода.

Лазер VCSEL формирует значительно меньшее пятно, засвечивая только центральную часть сердцевины. Одномодовый лазер генерирует самый узкий пучок света, направляя его точно по центру сердцевины вдоль оптической оси волокна. Такой ввод светового сигнала в волокно называется лазерным возбуждением световода.

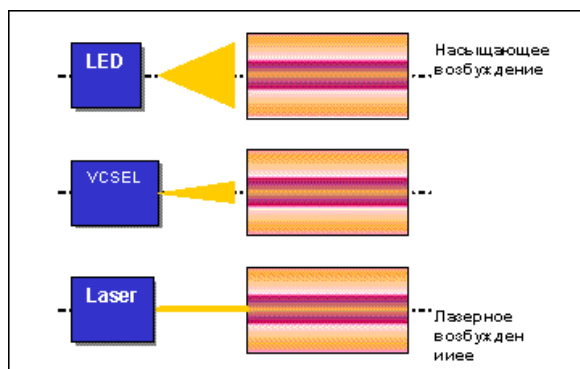


Рис. 5.13. Ввод излучения в волокно от различных источников

Профиль показателя преломления обычного ММ ОВ имеет немонотонность, обусловленную технологией его производства (рис. 5.14). Эта немонотонность находится именно там, где распространяется основная часть энергии лазерного луча. Изменение показателя преломления в зоне распространения лазерного луча приводит к возникновению мод высокого порядка и увеличению коэффициента межмодовой дисперсии, а значит уменьшению полосы пропускания.

Для радикального решения этой проблемы было начато производство ММ ОВ нового поколения (Laser Grade Multimode Fiber) со сглажен-

ным ППП.

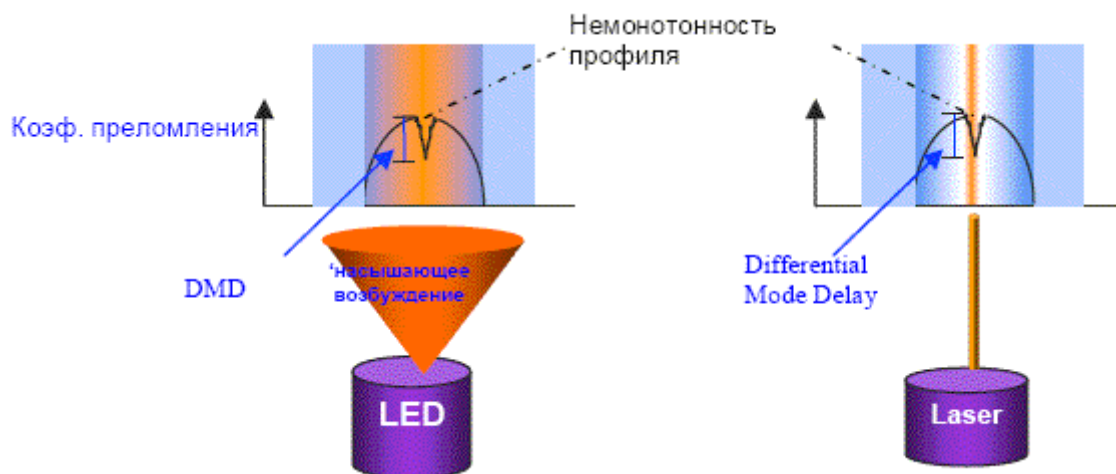


Рис. 5.14. Использование светоизлучающего диода и лазера с ММ ОВ.

Стандарт ISO/IEC 11801 определяет 4 категории улучшенных ММ ОВ, оптимизированных для высокоскоростных локальных сетей и отличающихся большей широкополосностью (табл. 5.2). К категории OM1 относят обычные многомодовые волокна, категория OM2 включает многомодовые волокна, предназначенные для скорости передачи до 1 Гбит/с, категория OM3 – многомодовые волокна для скорости передачи до 10 Гбит/с. В табл. 5.2 приведены параметры этих волокон и максимальные расстояния, на которых обеспечивается необходимая пропускная способность.

Таблица 5.2

Категория волокна	OM1		OM2	OM3	OM4	
Диаметр сердцевины волокна, мкм	50	62.5	50	50	50	
Коэффициент затухания на длине волны 850/1300 нм, дБ/км	3.5/1.5		3.5/1.5	3.5/1.5	2.4/0.6	
Широкополосность при насыщающем возбуждении на длине волны 850/1300 нм, МГц·км	400/800	200/400	600/1200	1500/500	3500/500	
Широкополосность при лазерном возбуждении на длине волны 850 нм, МГц·км	–		–	2000	4700	
Максимальное расстояние для Gigabit Ethernet / 10 Gigabit Ethernet / 40 Gigabit Ethernet, м	850 нм	550/–	275/–	750/110	/300	/600/150
	1300 нм	550/–	550/–	2000/110	–	–

Альтернативным использованием более дорогих ММ ОВ категорий OM2, OM3 и OM4 решением является создание специальных условий ввода луча в сердцевину ОВ путем смещения точки ввода оптического сигнала относительно оси ОВ. Этот способ реализован в виде соединительного шнура с так называемым модовым преобразованием (Offset Launch Mode Conditioning Cable Assembly). Шнур предназначен для подключения гигабитных портов активного сетевого оборудования к ОВ (рис. 5.15). Смещенный ввод обеспечивается пассивным устройством, представляющим собой соединение отрезков ОМ и ММ ОВ с некоторым радиальным смещением. Номинальное радиальное смещение для волокна 62,5/125 мкм составляет 20 мкм, а для волокна 50/125 мкм – 13 мкм, допуски на смещение приведены на рис. 5.15.

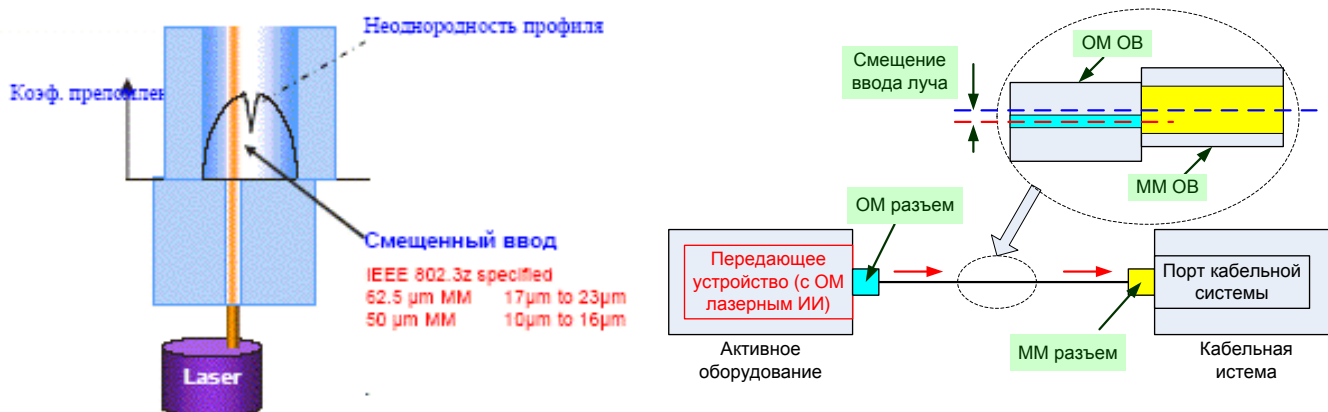


Рис. 5.15. Принцип и схема смещенного ввода светового луча в ММ ОВ

Шнуры для смещенного ввода оптического сигнала предназначены для применения в уже существующих многомодовых сетях. С их помощью для ОВ класса OM1 можно реализовать полосу пропускания, необходимую для Gigabit Ethernet на длинах до 550 м.

## 6. Одномодовые оптические волокна

### 6.1. Одномодовый режим передачи. Длина волны отсечки.

Радикальным способом уменьшения дисперсионных искажений является переход от многомодовой передачи к одномодовой. Как мы уже знаем из темы 5, число направляемых мод  $M$  в ступенчатом оптическом волокне можно рассчитать, зная нормированную частоту  $v$  – безразмерный параметр, связанный с геометрическими (радиус сердцевины  $r_{core}$ ) и оптическими (числовая апертура  $NA$ ) характеристиками ОВ, а также с длиной волны источника излучения в вакууме  $\lambda_0$ :

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{core} \cdot NA}{\lambda_0}, \quad (6.1)$$

$$M = INT\left(\frac{v^2}{2}\right). \quad (6.2)$$

Из (6.2) следует, что достигнуть одномодового режима можно путем уменьшения  $v$ . Волновой анализ мод ОВ позволяет получить условие достижения одномодового режима, которое для ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления (ППП) будет выглядеть следующим образом:

$$v \leq 2.405 = \frac{2\pi \cdot r_{core} \cdot NA}{\lambda_0}. \quad (6.3)$$

Впервые одномодовый режим передачи в волокне со ступенчатым профилем показателя преломления был достигнут путем уменьшения радиуса сердцевины до 5 мкм. Такие волокна называют стандартными одномодовыми (ОМ) ОВ.



Обратите внимание, что в условие достижения одномодового режима входит длина волны источника излучения. Это означает, что одно и то же ОВ может быть как одномодовым так и многомодовым в зависимости от рабочей длины волны.

Для ОВ можно рассчитать **длину волны отсечки**  $\lambda_{cut}$ , которая разделяет режимы одномодовой и многомодовой передачи. Из (6.3) можно получить по-другому сформулированное условие достижения одномодового режима:

$$\lambda_0 \geq \lambda_{cut} = \frac{2\pi \cdot r_{core} \cdot NA}{2.405}. \quad (6.4)$$

В табл. 6.1 приведены результаты расчета нормированной частоты и длины волны отсечки для ММ ОВ с радиусами сердцевины 50 и 62.5 мкм (со ступенчатым ППП и  $NA = 0.2$ ) и стандартного ОМ ОВ.

Табл. 6.1. Параметры ОВ со ступенчатыми ППП

Тип ОВ	Нормированная частота		Длина волны отсечки, мкм
	$\lambda = 0.85$ мкм	$\lambda = 1.3$ мкм	
ММ 50/125	37.0	24.2	13.1
ММ 62.5/125	46.2	30.2	16.3
ОМ	3.60	2.37	1.28

### 6.2. Диаметр модового поля.

В геометрической трактовке единственной направляемой моде ОМ ОВ соответствует луч, распространяющийся вдоль его оси. С волновой точки зрения мода – это волна, поле которой не полностью сосредоточено в сердцевине. Для ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления относительное распределение напряженности поля основной моды  $E(r)$  в поперечном сечении ОВ хорошо описывается функцией Гаусса  $F(r)$ :

$$F(r) = \frac{E(r)}{E_{\max}} = \exp\left(-\frac{4r^2}{d_{mf}^2}\right), \quad (6.5)$$

где  $r$  – расстояние от оптической оси ОВ,  $d_{mf}$  – диаметр модового поля.

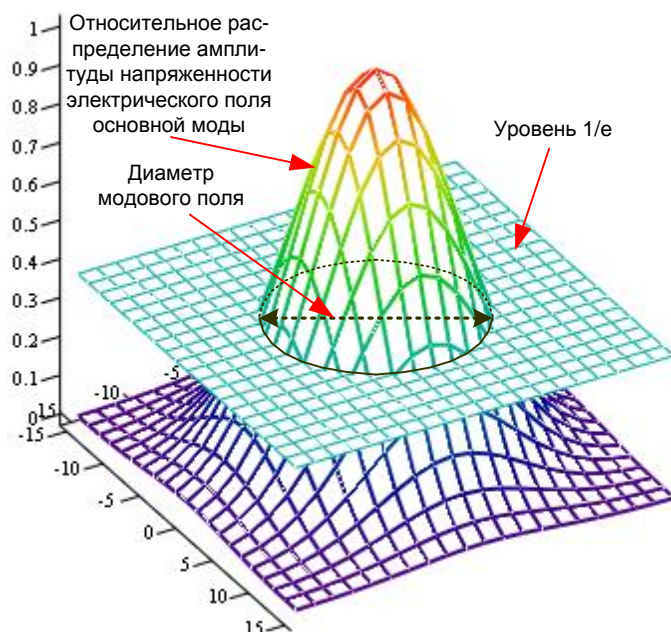


Рис. 6.1. Определение диаметра модового поля ступенчатого ОВ

$$d_{mf} = 2r_{core} \left( 0.65 + \frac{1.619}{v^{1.5}} + \frac{2.879}{v^6} \right). \quad (6.6)$$

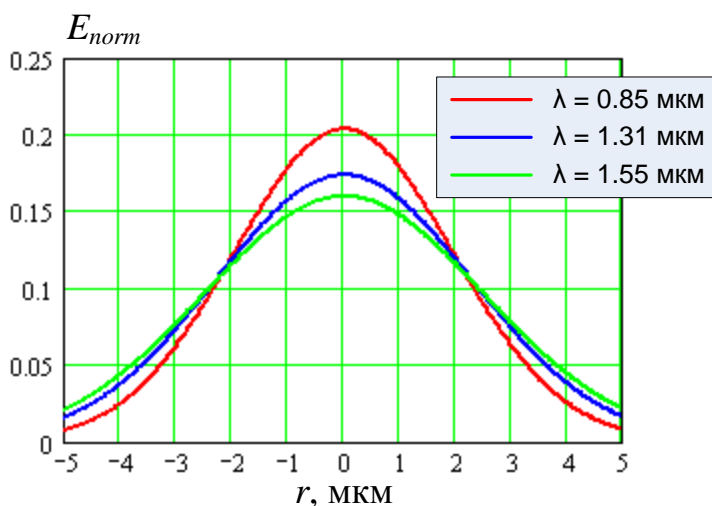


Рис. 6.2. Распределение модового поля основной моды в стандартном волокне.

Для ОМ ОВ вместо числовой апертуры и диаметра сердцевины нормируется **диаметр модового поля**<sup>1</sup> – ширина распределения амплитуды напряженности электрического поля основной моды. Диаметр модового поля определяется на уровне  $1/e = 0.369$  от его максимума  $E_{\max}$  (рис.6.1):

Диаметр модового поля можно также определить по распределению интенсивности поля основной моды  $I(r)$  в поперечном сечении ОВ. Так как  $I(r) \sim E^2(r)$ , в этом случае диаметр определяется на уровне  $1/e^2 = 0.135$  от максимума  $I_{\max}$ .

Для ОМ ОВ диаметр модового поля  $d_{mf}$  можно приближенно рассчитать по выражению:

Из (6.6) и (6.1) видно, что диаметр модового поля растет с увеличением длины волны. На рис. 6.2 показаны рассчитанные по выражениям (6.5) и (6.6) распределения модового поля для стандартного волокна на длинах волн, которые обычно используются для связи.

### 6.3. Хроматическая дисперсия в одномодовых волокнах.

В ОМ ОВ отсутствует межмодовая дисперсия. Однако уширение проходящих по ОМ ОВ импульсов все же существует. Это обусловлено, так называемой, **хроматической дисперсией**,

которая возникает из-за того, что по волокну распространяются немонахроматические сигналы:

1. Спектр цифрового оптического сигнала имеет конечную ширину, зависящую от скорости передачи;
2. Источники излучения имеют определенную ширину спектра излучения (рис. 6.3).

<sup>1</sup> В литературе также встречаются термины «диаметр поля моды», «диаметр модового пятна».

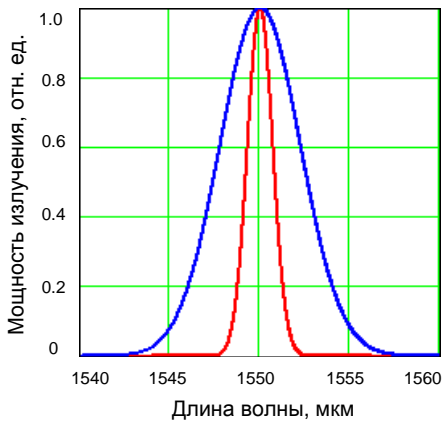


Рис. 6.3. Спектр излучения источника

Поскольку скорость распространения света в ОВ зависит от длины волны излучения  $\lambda$ , разные спектральные составляющие сигнала распространяются с разной скоростью.

Коэффициент хроматической дисперсии принято представлять в виде суммы двух составляющих: коэффициента материальной дисперсии  $D_{mat}$  и коэффициента волноводной дисперсии  $D_w$

$$D_{chr} = D_{mat} + D_w. \quad (6.7)$$

Материальная дисперсия обусловлена зависимостью показателя преломления кварца  $n(\lambda)$  (как фазового, так и группового) от длины волны  $\lambda$ . Коэффициент материальной дисперсии  $D_{mat}$  пропорционален второй производной показателя преломления по длине волны:

$$D_{mat} = -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad (6.8)$$

На рис. 6.4 показана зависимость материальной дисперсии от длины волны (красная кривая). Видно, что материальная дисперсия имеет знак и при некоторой длине волны  $\lambda = \lambda_{0mat}$  материальная дисперсия проходит через 0.

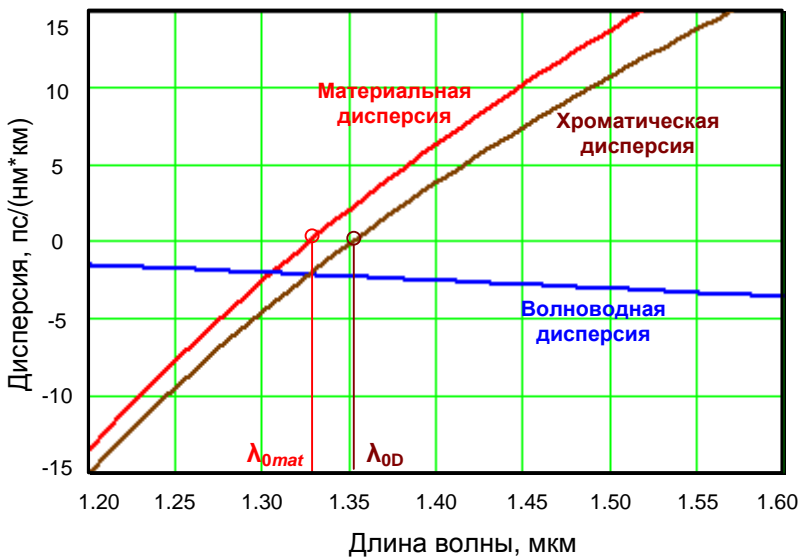
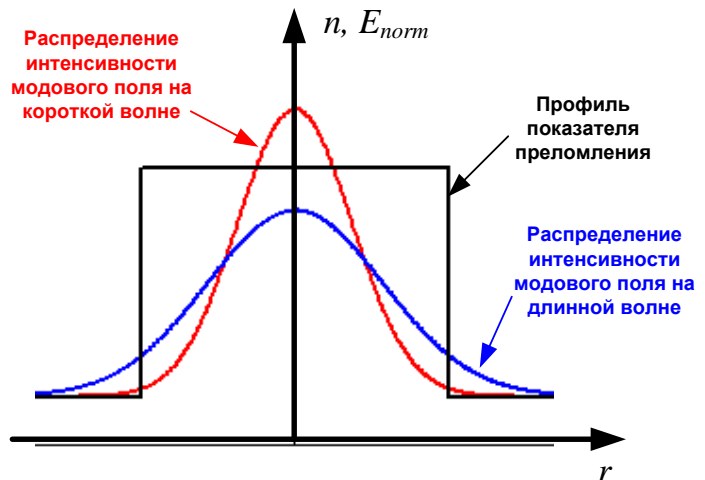


Рис. 6.4. Хроматическая дисперсия в стандартном одномодовом волокне





Коэффициент волноводной дисперсии  $D_w$  не связан со свойствами материала, но зависит от конструкции и размеров волновода. Основным параметром ОМ ОВ как волновода является диаметр модового поля. Конструкцией волновода можно считать ППП. Появление волноводной дисперсии связано с тем, что волна в волокне распространяется в двух средах – частично в сердцевине, частично в оболочке, и показатель преломления для нее принимает промежуточное значение между показателями преломления сердцевины и оболочки, которое иногда называют эффективным показателем преломления. При изменении длины волны глубина проникновения поля в оболочку меняется (рис. 6.5) и, следовательно, меняется значение эффективного показателя преломления.

Рис. 6.5. Возникновение волноводной дисперсии

Известно, что для телекоммуникационных ОВ в диапазоне используемых длин волн коэффициент волноводной дисперсии отрицателен и уменьшается с увеличением длины волны.

На рис. 6.4 показана зависимость коэффициента волноводной дисперсии от длины волны для стандартного волокна (синяя кривая) и результирующего коэффициента хроматической дисперсии (коричневая кривая). Из рисунка видно, что существует такая длина волны, при которой коэффициенты материальной и волноводной дисперсии равны по модулю и имеют противоположные знаки, то есть коэффициент хроматической дисперсии равен нулю. Эту длину волны называют **длиной волны нулевой хроматической дисперсии** или просто **длиной волны нулевой дисперсии**  $\lambda_{0D}$ .

Вблизи длины волны нулевой дисперсии зависимость  $D_{chr}(\lambda)$  хорошо аппроксимируется линейной функцией:

$$D_{chr}(\lambda) = S_{0D}(\lambda - \lambda_{0D}), \quad (6.9)$$

где  $S_{0D}$  – наклон коэффициента хроматической дисперсии на длине волны  $\lambda_{0D}$ . Наклон коэффициента хроматической дисперсии принято выражать в пс/(нм<sup>2</sup>·км) – пикосекундах на нанометр в квадрате на километр.

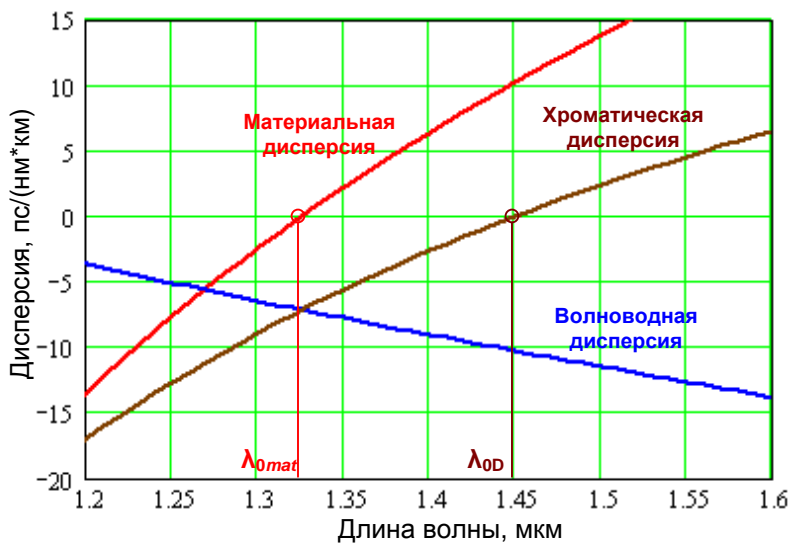


Рис. 6.6. Смещение длины волны нулевой хроматической дисперсии путем изменения волноводной дисперсии.

Зависимость коэффициента волноводной дисперсии от длины волны сильно зависит от размеров и конструкции ОВ. Это позволяет в широких пределах управлять зависимостью результирующего коэффициента хроматической дисперсии  $D_{chr}$  от длины волны, изменяя при этом длину волны нулевой дисперсии  $\lambda_{0D}$  (рис. 6.6).

Коэффициент хроматической дисперсии принято выражать в пс / (нм·км). Такая единица измерения выявляет физический смысл коэффициента хроматической дисперсии: уширение импульса в волокне длиной 1 км при ширине спектра оптического сигнала 1 нм.

нала 1 нм.

Для уширения оптического импульса  $\Delta t$  за счет хроматической дисперсии справедливо следующее соотношение:

$$\Delta t = \sqrt{t_{out}^2 - t_{in}^2} = |D_{chr}| \cdot \Delta\lambda \cdot L, \quad (6.9)$$

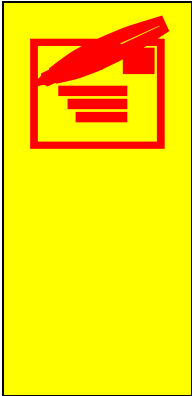
где  $\Delta\lambda$  – ширина спектра оптического сигнала,  $L$  – длина ОВ.

Выше уже отмечалось, что по волокнам передаются немонахроматические сигналы. Полную ширину спектра оптического сигнала  $\Delta\lambda$  можно определить по выражению:

$$\Delta\lambda = \sqrt{\Delta\lambda_{sign}^2 + \Delta\lambda_{sour}^2}, \quad (6.10)$$

где  $\Delta\lambda_{sign}$  – ширина спектра модулирующего электрического сигнала,  $\Delta\lambda_{sour}$  – ширина спектра излучения источника.

Зависимости уширения оптического импульса в ОВ длиной 1 км от ширины спектра оптического сигнала и от хроматической дисперсии показаны на рис. 6.7.



Обратите внимание, что на рис. 6.7 ширина спектра оптического сигнала указана в частотной области и выражена в ГГц. Установим связь между шириной спектра в частотной области  $\Delta f$  и в области длин волн  $\Delta \lambda$ .

Под шириной спектра в частотной области  $\Delta f$  понимают разность верхней  $f_2$  и нижней  $f_1$  частот в спектре оптического сигнала  $\Delta f = f_2 - f_1$ . Преобразуя это простое выражение получим:

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{c}{\lambda_2} - \frac{c}{\lambda_1} = \frac{c \cdot (\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1 \lambda_2} = \frac{c \cdot \Delta \lambda}{\lambda_1 \lambda_2},$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – верхняя и нижняя длины волн в спектре оптического сигнала,  $c$  – скорость света в вакууме.

Упростим полученную связь между  $\Delta f$  и  $\Delta \lambda$ . Учтем, что оптические частоты очень велики и, как правило,  $\Delta f \ll f_1$  и  $\Delta f \ll f_2$ , а значит  $\Delta \lambda \ll \lambda_1$  и  $\Delta \lambda \ll \lambda_2$ . Поэтому можно считать, что  $\lambda_1 \lambda_2 \approx \lambda_0^2$ , где  $\lambda_0$  – центральная длина волны в спектре оптического сигнала (рабочая длина волны):

$$\Delta f \approx \frac{c \cdot \Delta \lambda}{\lambda_0^2}, \text{ откуда } \Delta \lambda \approx \frac{\lambda_0^2 \cdot \Delta f}{c} \quad (6.11)$$

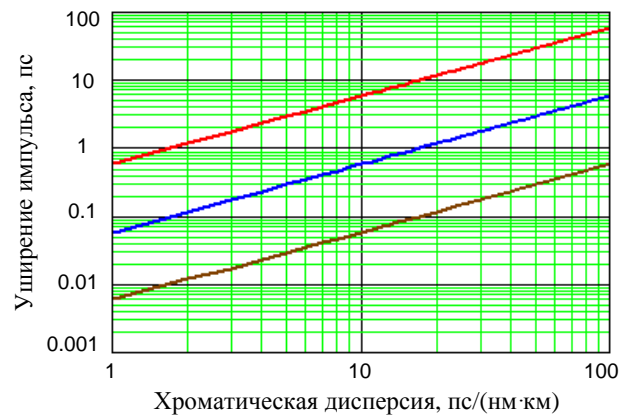
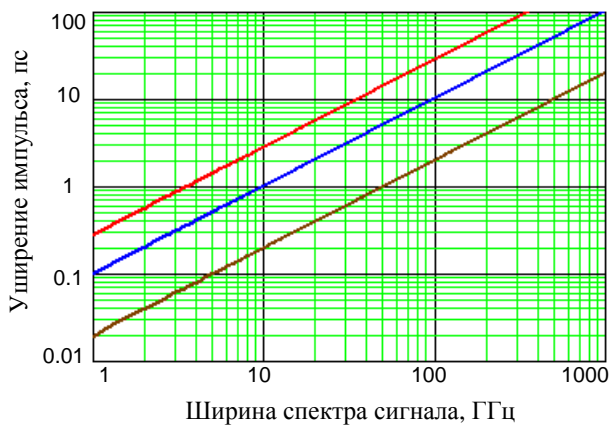


Рис. 6.7. Зависимость уширения импульса от ширины спектра сигнала (левый рисунок) при хроматической дисперсии 3.5 (кор.), 18 (син.) и 50 (кр.) пс/(нм·км) и от хроматической дисперсии (правый рисунок) при ширине спектра сигнала 1 (кор.), 10 (син.) и 100 (кр.) ГГц.

## 6.4. Влияние хроматической дисперсии на длину регенерационного участка и максимальную скорость передачи.



**Хроматическая дисперсия ограничивает длину регенерационного участка по дисперсии.**

В теме 4 были введены понятия длины регенерационного участка, длины регенерационного участка по затуханию и длины регенерационного участка по дисперсии.

Механизм ограничения длины регенерационного участка по дисперсии следующий. В процессе распространения по ОВ сформированный внутри тактового интервала оптический импульс постепенно расширяется из-за дисперсии и занимает все большую часть тактового интервала. Если ОВ длинное, то распространяющийся импульс успеет не только занять весь тактовый интервал, но и расширяться на соседний тактовый интервал и слиться с другим импульсом. В результате приемное устройство может воспринять слившиеся импульсы не как два отдельных импульса, а как один импульс, что приведет в ошибке при приеме. Поэтому необходи-

мо определить максимальное допустимое уширение импульсов  $\Delta t_{per}^1$ , при котором отдельные импульсы еще будут отличимы друг от друга.

В первом приближении мы можем допустить расширение импульса на весь тактовый интервал, то есть длительность импульса на выходе ОВ может быть равна ширине тактового интервала:  $t_{out} = t_T$ . Пусть длительность импульса на входе ОВ  $t_{in} = k \cdot t_T$ , где  $k$  – коэффициент, равный отношению длительности импульса, соответствующего логической единице, к длительности тактового интервала  $t_T$  ( $k$  всегда меньше 1). Тогда:

$$\Delta t_{per} = \sqrt{t_T^2 - k^2 \cdot t_T^2} = t_T \cdot \sqrt{1 - k^2} = \frac{\sqrt{1 - k^2}}{B_b}, \quad (6.12)$$

где  $B_b$  – скорость передачи, бит/с. Последнее равенство в (6.12) справедливо для двухуровневого кодирования.

Из (6.9) видно, что уширение импульса растет с длиной ОВ, поэтому можно рассчитать длину ОВ, на которой уширение импульса  $\Delta t$  достигнет максимально допустимой величины  $\Delta t_{per}$ . Это расстояние и будет *длиной регенерационного участка по дисперсии*  $L_{rsd}$ . Из соотношения  $\Delta t = \Delta t_{per}$  с учетом (6.9) и (6.10) получаем:

$$L_{max} = \frac{\Delta t_{per}}{|D_{chr}| \cdot \sqrt{\Delta \lambda_{sign}^2 + \Delta \lambda_{sour}^2}}. \quad (6.13)$$



**Обратите внимание**, что в (6.13) от скорости передачи зависят два параметра: допустимое уширение импульса  $\Delta t_{per}$  и ширина спектра электрического модулирующего сигнала  $\Delta \lambda_{sign}$ .



**Хроматическая дисперсия ограничивает максимальную скорость, с которой можно передавать сигнал на определенное расстояние без регенерации.**

Механизм ограничения тот же. Рассчитать максимальную скорость можно, решив относительно  $B_{b \max}$  следующее уравнение:

$$L \cdot |D_{chr}| \cdot \sqrt{\Delta \lambda_{sign}^2(B_{b \max}) + \Delta \lambda_{sour}^2} = \Delta t_{per}(B_{b \max}) \quad (6.14)$$

Подставив в (6.14) выражения (6.11) и (6.12) и возведя обе его части в квадрат, получим биквадратное уравнение, которое легко решается аналитически.

Выражение (6.14) значительно упрощается, **если возможно пренебречь величиной  $\Delta \lambda_{sign}$**  по сравнению  $\Delta \lambda_{sour}$ :

$$\text{при } \Delta \lambda_{sign} \ll \Delta \lambda_{sour}: L \cdot |D_{chr}| \cdot \Delta \lambda_{sour} = \Delta t_{per}(B_{b \max}) \quad (6.15)$$

С учетом (6.12) из (6.15) получаем:

$$B_{b \max} = \frac{\sqrt{1 - k^2}}{L \cdot |D_{chr}| \cdot \Delta \lambda_{sour}} \quad (6.16)$$

## 6.5. Типы и параметры одномодовых волокон.

В настоящее время широко используются несколько основных классов ОМ ОВ в соответствии с рекомендациями ITU-T<sup>2</sup>:

- G.652 Стандартное одномодовое;
- G.653 Одномодовое со смещенной дисперсией;
- G.654 Одномодовое со смещенной длиной волны отсечки;

<sup>1</sup> permissible

<sup>2</sup> ITU-T - (International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector) - Сектор стандартизации телекоммуникаций Международного союза электросвязи

- G.655 Одномодовое с ненулевой смещенной дисперсией;
- G.656 Одномодовое с ненулевой смещенной дисперсией для широкополосной передачи;
- G.657 Одномодовое с уменьшенными потерями на изгибах малого радиуса.

### 6.5.2. Стандарт G.652 – стандартное одномодовое ОВ

Рекомендация G.652 описывает геометрические, оптические, механические параметры и параметры передачи стандартных ОВ (SF - standard fiber). Стандартным ОВ называют одномодовое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления (рис. 6.11Рис.). Это волокно оптимизировано для второго окна прозрачности (1260-1360 нм). Его длина волны нулевой дисперсии составляет  $\lambda_{0D} \sim 1.3-1.324$  мкм.

В текущей редакции G.652 стандартные ОВ разделены на четыре категории – А, В, С, D (табл. 6.2). Оптические волокна категорий С и D являются волокнами ZWP, обладающими пониженным затуханием на длине волны 1383 нм.

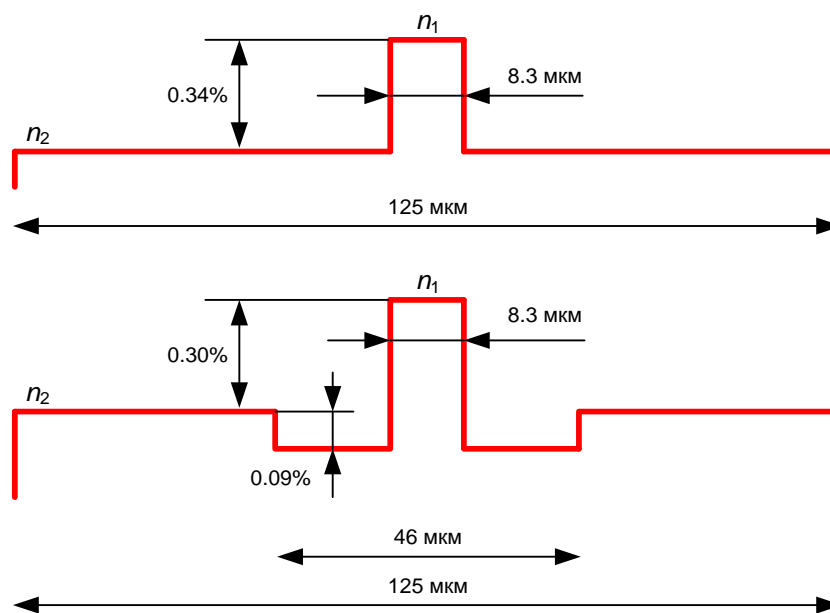


Рис. 6.8. Профили показателей преломления стандартных одномодовых ОВ

Стандартные ОВ имеют хроматическую дисперсию на  $\lambda = 1310$  нм менее 3.5 пс/(нм·км), а на  $\lambda = 1550$  нм их дисперсия возрастает до 20–23 пс/(нм·км), хотя затухание при этом уменьшается до 0.2 дБ/км и они могут с успехом использоваться на этой длине волны. При этом длина участка регенерации обычно ограничивается хроматической дисперсией.

Табл. **Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.**6.2. Параметры стандартных одномодовых ОВ

Параметр	Значение для ОВ категории			
	А	В	С	Д
Коэффициент затухания на длине волны 1310/1550 нм (дБ/км)	0.5 / 0.4	0.4 / 0.35	0.4 / 0.3	0.4 / 0.3
Коэффициент затухания на длине волны 1625 нм (дБ/км)	–	0.4	–	–
Коэффициент затухания на длине волны 1383 нм (дБ/км)	–	–	0.4	0.4
Максимальное приращение затухания при намотке 100 витков на оправку диаметром 30 мм на длине волны 1550/1625 нм (дБ)	0.1 / –	– / 0.1	– / 0.1	

Параметр	Значение для ОВ категории			
	A	B	C	D
Диаметр модового поля $d_{mf}$ на длине волны 1310 нм (мкм)	8.6–9.5	8.6–9.5	8.6–9.5	8.6–9.5
Диаметр оболочки $d_{clad}$ (мкм)	125.0±1.0	125.0±1.0	125.0±1.0	125.0±1.0
Неконцентричность сердцевины и оболочки максимальная (мкм)	0.6	0.6	0.6	0.6
Некруглость оболочки (%)	1.0	1.0	1.0	1.0
Максимальная кабельная длина волны отсечки (нм)	1260	1260	1260	1260
Длина волны нулевой дисперсии $\lambda_{0D}$ (нм)	1300-1324	1300-1324	1300-1324	1300-1324
Максимальный наклон коэффициента хроматической дисперсии $S_{0D}$ на длине волны $\lambda_{0D}$ (пс/(нм <sup>2</sup> ·км))	0.092	0.092	0.092	0.092
Коэффициент поляризационно-модовой дисперсии $D_p$ (пс/√км)	0.5	0.2	0.5	0.2

### 6.5.2. Стандарт G.653 –одномодовое ОВ со смещенной дисперсией

С целью оптимизации дисперсионных параметров одномодовых ОВ на длине волны 1550 нм, на которой кварцевые ОВ имеют минимальное затухание, были разработаны градиентные одномодовые ОВ. Усложняя профиль показателя преломления (рис. 6.9) и делая его форму близкой к треугольной, получили ОВ, имеющие длину волны нулевой дисперсии вблизи 1550 нм. Такие ОВ получили название ОВ с нулевой смещенной дисперсией (ZDSF – Zero Dispersion Shifted Fiber) или просто со смещенной дисперсией (Dispersion Shifted Fiber - DSF). Их параметры регламентируются рекомендацией G.653.

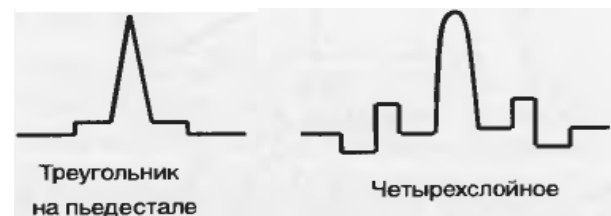
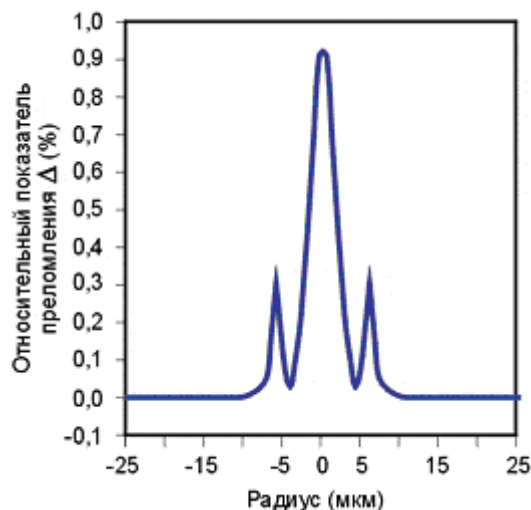


Рис. 6.9. Профили показателей преломления ОВ со смещенной дисперсией

Эти ОВ имеют хроматическую дисперсию на  $\lambda = 1550$  нм менее 3.5 пс/(нм км), а на  $\lambda = 1310$  нм до 20 пс/(нм км).

Волокна со смещенной дисперсией предназначены для высокоскоростных линий связи с большой длиной регенерационного участка без применения технологии спектрального уплотнения. Возможно также использование этого оптического волокна в системах со спектральным уплотнением при ограниченной протяженности регенерационного участка, пониженной мощности передаваемого сигнала и ограниченной плотности спектральных компонентов. Указанные ограничения связаны с нелинейными искажениями, проявляющимися вблизи длины волны нулевой дисперсии при усилении многочастотного сигнала.

Согласно рекомендации G.653 ОВ со смещенной дисперсией разделяются на две категории А и В по значению коэффициента поляризационной модовой дисперсии. Волокна категории В имеют меньшую поляризационную модовую дисперсию (табл. 6.3).

Табл. **Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.**6.3. Параметры одномодовых ОВ со смещенной дисперсией

Параметр	Значение для ОВ категории		
	А	В	
Коэффициент затухания на длине волны 1550 нм (дБ/км)	0.35	0.35	
Максимальное приращение затухания при намотке 100 витков на оправку диаметром 30 мм на длине волны 1550 нм (дБ)	0.5	0.1	
Диаметр модового поля $d_{mf}$ на длине волны 1550 нм (мкм)	7.8–8.5	7.8–8.5	
Диаметр оболочки $d_{clad}$ (мкм)	125.0±1.0	125.0±1.0	
Неконцентричность сердцевины и оболочки максимальная (мкм)	0.8	0.6	
Некруглость оболочки (%)	2.0	1.0	
Максимальная кабельная длина волны отсечки (нм)	1270	1270	
Максимальный коэффициент хроматической дисперсии $D_{chr}$ в диапазоне длин волн 1525–1575 нм (пс/(нм·км))	3.5	–	
Максимальный наклон коэффициента хроматической дисперсии $S_{0D}$ в диапазоне длин волн 1500–1600 нм (пс/(нм <sup>2</sup> ·км))	0.085	–	
Зависимость минимального коэффициента хроматической дисперсии от длины волны в диапазоне	1460–1525 нм	–	$0.085 \cdot (\lambda - 1525) - 3.5$
	1525–1625 нм	–	$3.5/75 \cdot (\lambda - 1600)$
Зависимость максимального коэффициента хроматической дисперсии от длины волны в диапазоне	1460–1575 нм	–	$3.5/75 \cdot (\lambda - 1500)$
	1575–1625 нм	–	$0.085 \cdot (\lambda - 1575) + 3.5$
Коэффициент поляризационно-модовой дисперсии $D_p$ (пс/√км)	0.5	0.2	

### 6.5.3. Стандарт G.654 –одномодовое ОВ со смещенной длиной волны отсечки

Стандарт G.654 определяет одномодовое волокно со смещенной длиной волны отсечки (CSF - Cutoff Shifted Fiber), предназначенное для протяженных наземных и подводных линий связи. Это волокно имеет сниженное по сравнению со стандартным ОВ затухание вблизи длины волны 1550 нм. Его длина волны нулевой дисперсии лежит вблизи 1300 нм. Длина волны отсечки смещена в длинноволновую область, ее максимальное значение составляет 1530 нм.

Особенностью ОВ стандарта G.654 является увеличенный диаметр модового поля, позволяющий обеспечить максимальную дальность передачи за счет использования больших уровней оптической мощности.

Стандарт определяет 4 категории волокон CSF – А, В С и D, отличающиеся номинальными диаметром модового поля, коэффициентом затухания и дисперсионными характеристиками. Волокна категории В и D имеют наибольший диаметр модового поля (до 15 мкм). Волокна категорий В, С и D имеют сниженный с 0.5 до 0.2 пс/√км коэффициент поляризационной модовой дисперсии, а волокна категорий А и С – сниженный с 22 до 20 пс/(нм·км) коэффициент хроматической дисперсии.

Табл. **Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.**6.4. Параметры одномодовых ОВ со смещенной длиной волны отсечки

Параметр	Значение для ОВ категории			
	А	В	С	D
Коэффициент затухания на длине волны 1550 нм (дБ/км)	0.22	0.22	0.22	0.20
Максимальное приращение затухания при намотке 100 витков на оправку диа-	0.5	0.5	0.5	2.0

Параметр	Значение для ОВ категории			
	A	B	C	D
метром 30 мм на длине волны 1625 нм (дБ)				
Диаметр модового поля $d_{mf}$ на длине волны 1550 нм (мкм)	9.5–10.5	9.5–13	9.5–10.5	11.5–15.0
Диаметр оболочки $d_{clad}$ (мкм)	125.0±1.0	125.0±1.0	125.0±1.0	125.0±1.0
Неконцентричность сердцевины и оболочки максимальная (мкм)	0.8	0.8	0.8	0.8
Некруглость оболочки (%)	2.0	2.0	2.0	2.0
Максимальная кабельная длина волны отсечки (нм)	1530	1530	1530	1530
Максимальный коэффициент хроматической дисперсии $D_{1550max}$ на длине волны 1550 нм (пс/(нм·км))	20	22	20	23
Максимальный наклон коэффициента хроматической дисперсии $S_{1550max}$ на длине волны 1550 нм (пс/(нм <sup>2</sup> ·км))	0.070	0.070	0.070	0.070
Коэффициент поляризационно-модовой дисперсии $D_p$ (пс/√км)	0.5	0.2	0.2	0.2

#### 6.5.4. Стандарт G.655 –одномодовое ОВ с ненулевой смещенной дисперсией

Стандарт G.655 определяет одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF – Non Zero Dispersion Shifted Fiber), предназначенное для использования с системами DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing – плотного спектрального мультиплексирования). Эти волокна отличаются от волокон DSF стандарта G.653 смещением длины волны нулевой дисперсии выше или ниже диапазона работы оптического усилителя, что обеспечивает подавление нелинейных эффектов при усилении многочастотного сигнала (рис. 6.10). Они оптимизированы для использования в диапазоне от 1530 до 1565 нм. Допустимо расширение диапазона их использования от 1460 до 1652 нм.

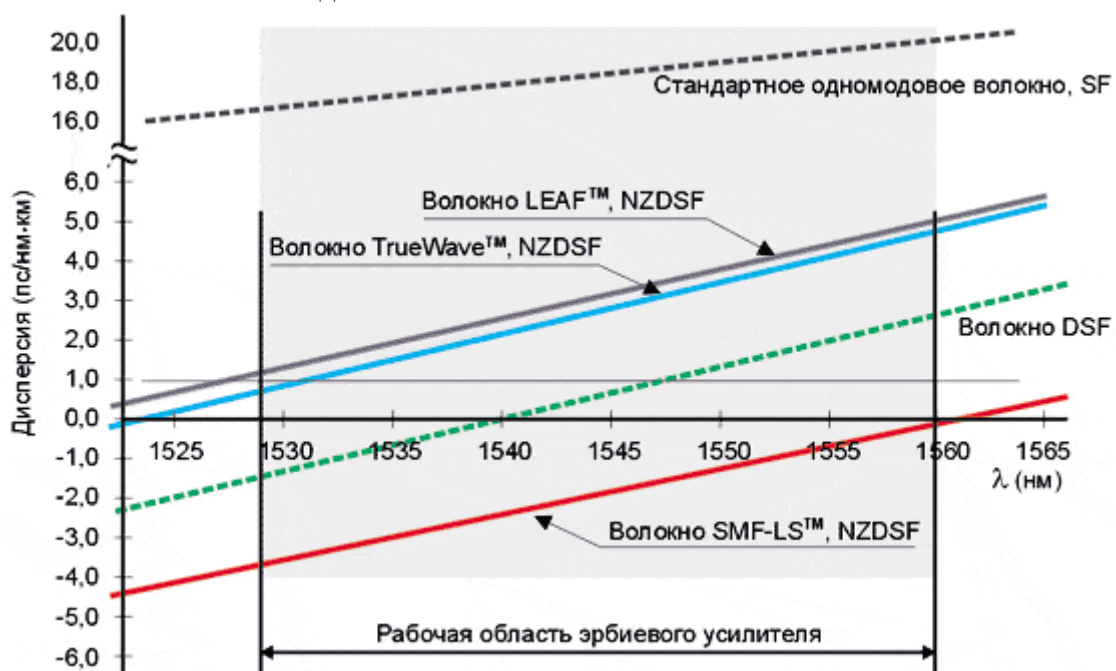


Рис. 6.10. Зависимость хроматической дисперсии в ОМ ОВ от длины волны



Стандарт разделяет волокна NZDSF на три категории - C, D и E (A и B исключены из версий стандарта, начиная с 2006 г.), которые различаются по значениям хроматической дисперсии и рабочему диапазону.

Табл. **Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.**6.5. Параметры одномодовых ОВ с ненулевой смещенной дисперсией

Параметр	Значение для ОВ категории		
	C	D	E
Коэффициент затухания на длине волны 1550 / 1625 нм (дБ/км)	0.35 / 0.4	0.35 / 0.4	0.35 / 0.4
Максимальное приращение затухания при намотке 100 витков на оправку диаметром 30 мм на длине волны 1625 нм (дБ)	0.5	0.1	0.1
Диаметр модового поля $d_{mf}$ на длине волны 1550 нм (мкм)	8–11	8–11	8–11
Диаметр оболочки $d_{clad}$ (мкм)	125.0±1.0	125.0±1.0	125.0±1.0
Неконцентричность сердцевины и оболочки максимальная (мкм)	0.8	0.6	0.6
Некруглость оболочки (%)	2.0	1.0	1.0
Максимальная кабельная длина волны отсечки (нм)	1450	1450	1450
Диапазон рабочих длин волн, нм	1530–1625	1460–1625	1460–1625
Коэффициент поляризационно-модовой дисперсии $D_p$ (пс/√км)	0.2	0.2	0.2
Хроматическая дисперсия в диапазоне длин волн (нм)	1530–1565	1460–1550	1460–1550
Максимальный коэффициент хроматической дисперсии $ D_{max} $ (пс/(нм·км))	10.0	$\frac{2.91}{90}(\lambda - 1460) + 3.29$	$\frac{4.65}{90}(\lambda - 1460) + 4.66$
Минимальный коэффициент хроматической дисперсии $ D_{min} $ (пс/(нм·км))	1.0	$\frac{7.0}{90}(\lambda - 1460) - 4.2$	$\frac{5.42}{90}(\lambda - 1460) + 0.64$
Максимальная величина $ D_{max}  -  D_{min} $ (пс/(нм·км))	5.0	–	–
Знак коэффициента хроматической дисперсии	+ или –	не определено	не определено
Хроматическая дисперсия в диапазоне длин волн (нм)	1565–1625	1550–1625	1550–1625
Максимальный коэффициент хроматической дисперсии $ D_{max} $ (пс/(нм·км))	опред. <sup>1</sup>	$\frac{5.06}{75}(\lambda - 1550) + 6.2$	$\frac{4.12}{75}(\lambda - 1550) + 9.31$
Минимальный коэффициент хроматической дисперсии $ D_{min} $ (пс/(нм·км))	опред.	$\frac{2.97}{75}(\lambda - 1550) + 2.8$	$\frac{3.3}{75}(\lambda - 1550) + 6.06$
Максимальная величина $ D_{max}  -  D_{min} $ (пс/(нм·км))	опред.	–	–
Знак коэффициента хроматической дисперсии	+ или –	не определено	не определено

На сегодняшний день существует два подхода к созданию волокон с ненулевой смещенной дисперсией. Основное различие между ними заключается в реализуемом диаметре модового поля. С увеличением этого параметра удобнее вводить излучение в световод, что особенно важно для DWDM-систем, использующих сложную интегральную оптику. Большой диаметр

<sup>1</sup> Будет определен в следующей версии стандарта

модового поля позволяет повысить уровень мощности излучения, вводимого в волокно. Однако волокна с меньшим диаметром модового поля обладают меньшими потерями на изгибах и более пологой дисперсионной кривой. Оба подхода в равной мере обеспечивают подавление нелинейных эффектов.

### 6.5.5. Стандарт G.656 –одномодовое ОВ с ненулевой смещенной дисперсией для широкополосной передачи

Стандарт G.656 определяет ОМ ОВ с хроматической дисперсией, которая превышает некоторое небольшое ненулевое значение во всем диапазоне длин волн от 1460 до 1625 нм. Это ОВ предназначено для систем спектрального уплотнения CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) и DWDM.

Коэффициенты затухания и хроматической дисперсии волокон G.656 нормируются отдельно для разных диапазонов. ОВ имеют сглаженную характеристику затухания: для длин волн 1460-1530 нм типичное значение составляет 0,35 дБ/км, для диапазона 1530-1565 нм - 0,275 дБ/км, а для диапазона 1565-1625 нм - 0,35 дБ/км. Диаметр модового поля этих ОВ у различных производителей варьируется от 7 до 11 мкм.

Параметры ОМ ОВ стандарта G.656 приведены в табл. 6.6.

Табл. **Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.**6.5. Параметры одномодовых ОВ с ненулевой смещенной дисперсией для широкополосной передачи

Параметр	Значение
Коэффициент затухания на длине волны 1460 нм (дБ/км)	0.4
Коэффициент затухания на длине волны 1550 нм (дБ/км)	0.35
Коэффициент затухания на длине волны 1625 нм (дБ/км)	0.4
Максимальное приращение затухания при намотке 100 витков на оправку диаметром 30 мм на длине волны 1625 нм (дБ)	0.5
Диаметр модового поля $d_{mf}$ на длине волны 1550 нм (мкм)	7.0–11.0
Диаметр оболочки $d_{clad}$ (мкм)	125.0±1.0
Неконцентричность сердцевины и оболочки максимальная (мкм)	0.8
Некруглость оболочки (%)	2.0
Максимальная кабельная длина волны отсечки (нм)	1450
Диапазон рабочих длин волн, нм	1460–1625
Коэффициент поляризационно-модовой дисперсии $D_p$ (пс/√км)	0.2
<i>Хроматическая дисперсия в диапазоне длин волн (нм)</i>	<i>1460–1550</i>
Максимальный коэффициент хроматической дисперсии $ D_{max} $ (пс/(нм·км))	$\frac{4.68}{90}(\lambda - 1460) + 4.60$
Минимальный коэффициент хроматической дисперсии $ D_{min} $ (пс/(нм·км))	$\frac{2.6}{90}(\lambda - 1460) + 1.0$
<i>Хроматическая дисперсия в диапазоне длин волн (нм)</i>	<i>1550–1625</i>
Максимальный коэффициент хроматической дисперсии $ D_{max} $ (пс/(нм·км))	$\frac{4.72}{75}(\lambda - 1550) + 9.28$
Минимальный коэффициент хроматической дисперсии $ D_{min} $ (пс/(нм·км))	$\frac{0.98}{75}(\lambda - 1550) + 3.6$

### 6.5.6. Стандарт G.657 – одномодовое ОВ с уменьшенными потерями на изгибах малого радиуса

Стандарт G.657 определяет одномодовое волокно BIF (Bend Insensitive Fiber), обладающее низкой восприимчивостью к изгибам, предназначенное для оптических сетей доступа.

Обычные ОВ очень чувствительны к макроизгибам (изгибы, радиус которых много больше радиуса сердцевины ОВ), так как на изгибе нарушаются условия полного внутреннего отражения (рис. 6.11) и излучение начинает выходить из сердцевины в оболочку ОВ. При этом резко возрастают вносимые ОВ потери.

Поскольку увеличение затухания ОВ быстро растет с уменьшением радиуса изгиба, стандартами определяется минимальный допустимый радиус изгиба, который еще не приводит к заметному возрастанию вносимых потерь. Для обычных ОВ минимальный допустимый радиус изгиба составляет 30 мм, при этом кроссовое оборудование разрабатывается для радиуса изгиба не менее 100 мм и оказывается довольно громоздким. Для транспортных сетей это не имеет значения, но для сетей доступа является недостатком.

Поэтому был разработан новый тип ОВ – ОВ с малыми потерями на макроизгибах. Этим ОВ посвящена рекомендация Международного союза электросвязи G.657. Конструкция ОВ с малыми потерями на макроизгибах представлена на рис. 6.12. Это ОВ имеет в оболочке наноструктуры, которые отражают обратно в сердцевину свет, вышедший в оболочку в результате нарушения условий полного внутреннего отражения (рис. 6.13).

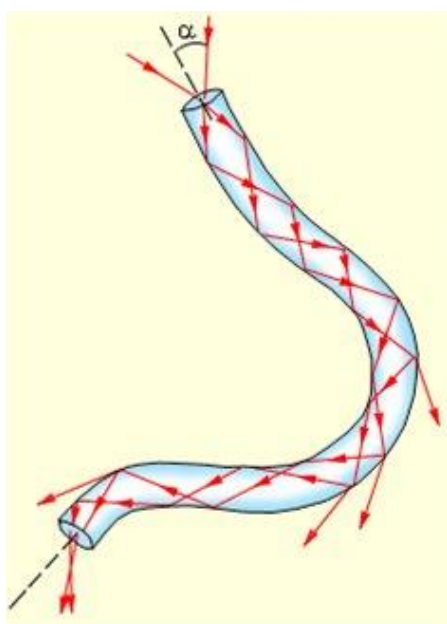


Рис. 6.11. Потери излучения на изгибах

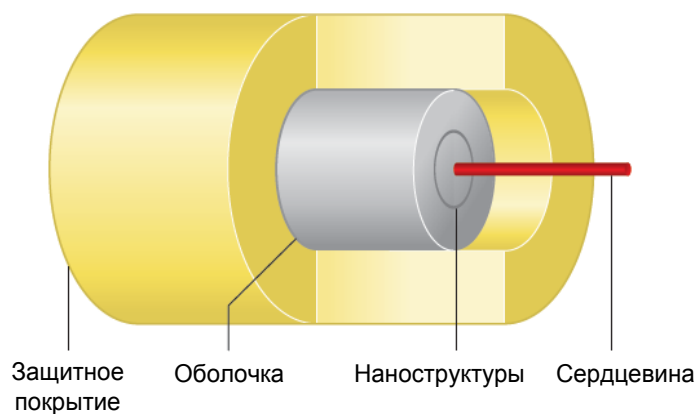
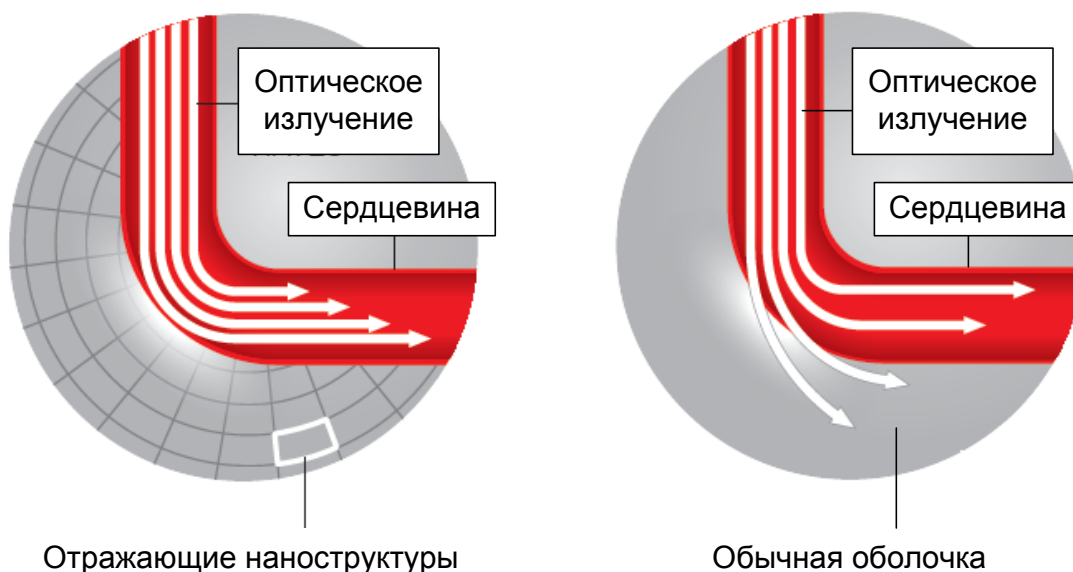


Рис. 6.12. Конструкция ОВ G.657



а

б

Рис. 6.13. Удержание света в сердцевине ОВ стандарта G.657

Параметры ОВ в соответствии с рекомендацией G.657 приведены в табл. 6.6.

Табл. 6.6. Параметры одномодовых ОВ с уменьшенными потерями на изгибах малого радиуса

Параметр	Значение для ОВ категории										
	A1		A2			B3			B4		
Максимальный коэффициент затухания в диапазоне длин волн 1310–1625 нм (дБ/км)	0.4		0.4			0.4			0.4		
Максимальный коэффициент затухания на длине волны 1383 нм (дБ/км)	0.4		0.4			0.4			0.4		
Максимальный коэффициент затухания на длине волны 1550 нм (дБ/км)	0.3		0.3			0.3			0.3		
Диаметр модового поля $d_{mf}$ на длине волны 1310 нм (мкм)	8.6–9.5		8.6–9.5			8.6–9.5			8.6–9.5		
Диаметр оболочки $d_{clad}$ (мкм)	125.0±0.7		125.0±0.7			125.0±0.7			125.0±0.7		
Неконцентричность сердцевины и оболочки максимальная (мкм)	0.5		0.5			0.5			0.5		
Некруглость оболочки (%)	1.0		1.0			1.0			1.0		
Максимальная кабельная длина волны отсечки (нм)	1260		1260			1260			1260		
Диапазон длин волн, в котором нормирована хроматическая дисперсия (нм)	1300–1324		1300–1324			1250–1350			1250–1350		
Максимальный наклон коэффициента хроматической дисперсии (пс/(нм <sup>2</sup> ·км))	0.092		0.092			0.11			0.11		
Коэффициент поляризационно-модовой дисперсии $D_p$ (пс/√км)	0.2		0.2			0.5			0.5		
<i>Потери на макроизгибах</i>											
Радиус оправки (мм)	15	10	15	10	7.5	15	10	7.5	10	7.5	5.0
Число витков	10	1	10	1	1	10	1	1	1	1	1
Максимальное приращение затухания на длине волны 1550 нм (дБ)	0.25	0.75	0.03	0.1	0.5	0.03	0.1	0.5	0.03	0.08	0.15
Максимальное приращение затухания на длине волны 1625 нм (дБ)	1.0	1.5	0.1	0.2	1.0	0.1	0.2	1.0	0.1	0.25	0.45

Стандарт разделяет ОВ на 2 категории – А и В. ОВ категории А по оптическим параметрам соответствуют стандарту G.652D, но имеют улучшенные характеристики потерь на изгибе. 10 витков ОВ, намотанного на оправку диаметром 15 мм, не должны увеличивать затухание более чем на 0.25 дБ на длине волны 1550 нм. Один виток ОВ, намотанного на оправку диаметром 10 мм, не должен увеличивать затухание более чем на 0.75 дБ на длине волны 1550 нм. Они применимы в окнах прозрачности O, E, S, C и L (то есть во всем диапазоне от 1260 до 1625 нм). Длина волны нулевой дисперсии этих ОВ лежит в диапазоне от 1300 до 1324 нм. Диаметр сердцевины составляет от 8.6 до 9.5 мкм.

Волокна категории В пригодны для передач на волнах длиной 1310, 1550 и 1625 нм на ограниченные расстояния, связанных с транспортом сигналов внутри помещений и допускают меньшие по сравнению с волокнами категории А радиусы изгибов. 10 витков ОВ на оправке диаметром 15 мм не должны увеличивать затухание более чем на 0.03 дБ на длине волны 1550 нм, один виток на оправке диаметром 10 мм – более чем на 0.1 дБ. Длина волны нулевой дисперсии этих ОВ лежит в диапазоне от 1300 до 1420 нм. Диаметр сердцевины составляет от 6.3 до 9.5 мкм.

## 6.6. Компенсация хроматической дисперсии в одномодовых волокнах.

### 6.6.1. Принцип компенсации хроматической дисперсии.



Как положительная, так и отрицательная хроматическая дисперсия проявляется уширением импульса при распространении его по оптическому волокну. Этот факт проиллюстрирован на рис. 6.14.

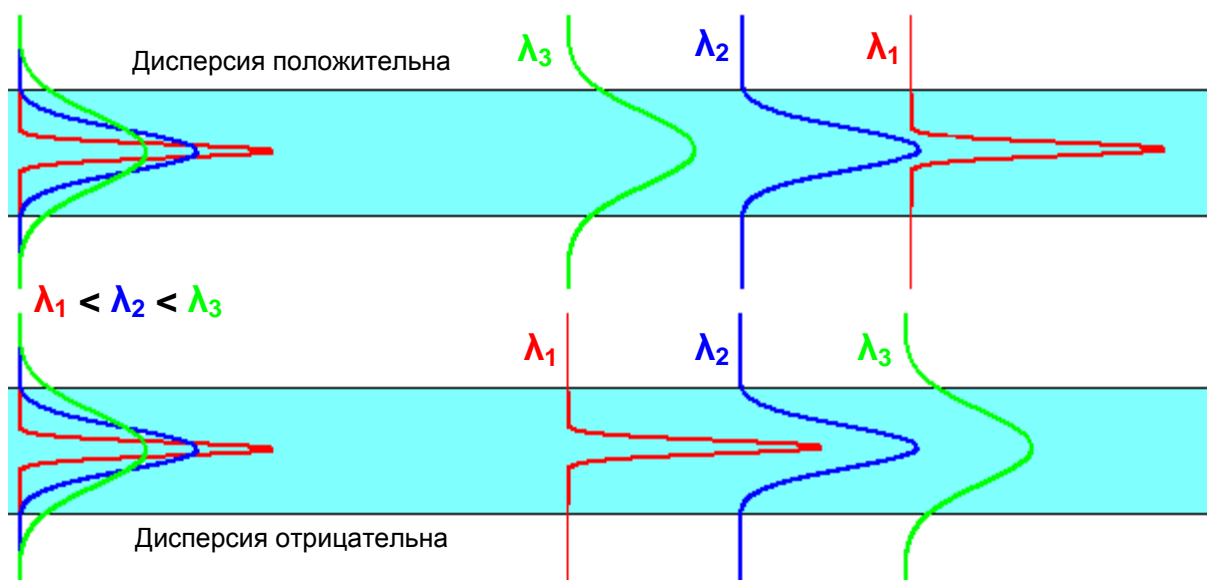


Рис. 6.14. Проявление хроматической дисперсии разного знака.

Таким образом, существует возможность прямой компенсации дисперсии путем чередования отрезков ОВ с положительной и отрицательной хроматической дисперсией.

### 6.6.2. Волокна для компенсации хроматической дисперсии DCF.

Хроматическая дисперсия состоит из двух составляющих:

- материальной, которая в наибольшей степени определяется свойствами основного материала для изготовления волокон – плавленого кварца;
- волноводной, которая может очень сильно меняться при измерении размеров и конструкции ОВ (в первую очередь, профиля показателя преломления).

Однако недостаточно просто подобрать такой профиль, при котором хроматическая дисперсия будет отрицательной. Необходимо также, чтобы на-

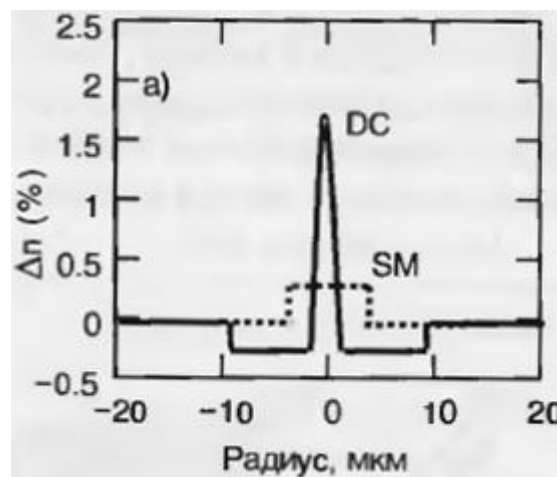


Рис. 6.15. Профиль показателя преломления ОВ DCF.

клон дисперсионной характеристики (6.9) был таким же, как и у основного волокна (стандартного).

Такие ОВ были разработаны. Они получили название – **волокно для компенсации дисперсии – Dispersion Compensation Fiber (DCF)**. Профиль показателя преломления этого волокна показан на рис. 6.15. За счет такого профиля это волокно имеет большую по модулю отрицательную дисперсию (рис. 6.16), наклон которой соответствует наклону дисперсионной характеристики стандартного волокна.

Хроматическая дисперсия в DCF волокнах примерно в 5 раз больше (по модулю) дисперсии стандартного волокна. Из рис. 6.16 видно, что коэффициент затухания в них в 2.5 раза больше, чем в стандартном волокне.

Дополнительные потери возникают в местах соединения DCF волокон с SF волокнами, так как они имеют разные диаметры модовых полей. У DCF волокна площадь модового поля меньше, она составляет примерно  $19 \text{ мкм}^2$ , в то время как у SF волокна – примерно  $85 \text{ мкм}^2$ .

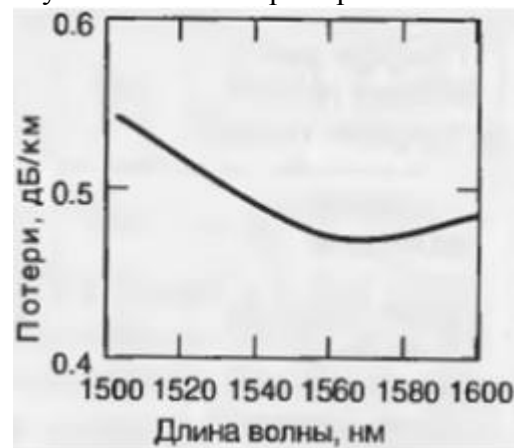
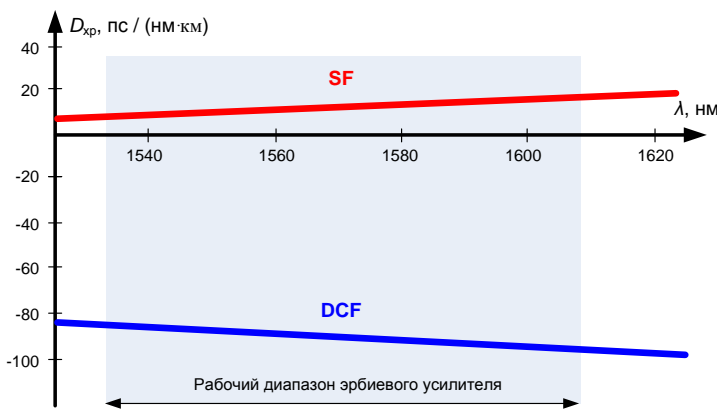


Рис. 6.16. Оптические характеристики волокна DCF.

Волокно DCF производится рядом компаний: Corning, Lucent Technologies, Sumitomo Electric и др. Оно укладывается в виде бухты в специальные модули – модули компенсации дисперсии DCM. Характеристики некоторых модулей приведены в табл. 6.7.

Табл. 6.7 Параметры модулей для компенсации дисперсии

Фирма-производитель	Corning				
Тип модуля	DCM-20	DCM-40	DCM-60	DCM-80	DCM-95
Компенсируемая длина линии, км	20	40	60	80	95
Дисперсия волокна модуля, пс/нм	$-329 \pm 5$	$-658 \pm 10$	$-988 \pm 10$	$-1317 \pm 15$	$-1564 \pm 15$
<b>Вносимое затухание, дБ</b>	<b>&lt;3,2</b>	<b>&lt;5,0</b>	<b>&lt;6,8</b>	<b>&lt;8,6</b>	<b>&lt;10,0</b>
<b>Среднее значение поляризационно-модовой дисперсии, пс</b>	<b>&lt;0,8</b>	<b>&lt;1,1</b>	<b>&lt;1,4</b>	<b>&lt;1,5</b>	<b>&lt;1,6</b>
Фирма-производитель	Lucent Technologies				
Тип модуля	DK-40	DK-60	DK-80		
Компенсируемая длина линии, км	40	60	80		
Дисперсия волокна модуля, пс/нм	$-680 \pm 21$	$-1020 \pm 31$	$-1360 \pm 41$		
<b>Вносимое затухание, дБ</b>	<b>&lt;5,2</b>	<b>&lt;7,0</b>	<b>&lt;8,9</b>		
<b>Среднее значение поляризационно-модовой дисперсии, пс</b>	<b>&lt;0,6</b>	<b>&lt;0,75</b>	<b>&lt;0,9</b>		

Модули DCM могут устанавливаться в стойку с аппаратурой SDH или WDM или непосредственно в соединительную муфту на трассе магистрали (рис. 6.17).

### 6.6.3. Расчет параметров компенсатора.

Основное назначение компенсаторов – компенсация хроматической дисперсии при реконструкции магистральных ВОСП на стандартном волокне с увеличением скорости передачи и/или переводом их с длины волны 1310 на длину волны 1550 нм. Реконструкция предполагает,

обычно, сохранение уже существующих регенерационных участков. Расчет компенсатора для каждого участка (если они имеют разную длину) выполняется отдельно.

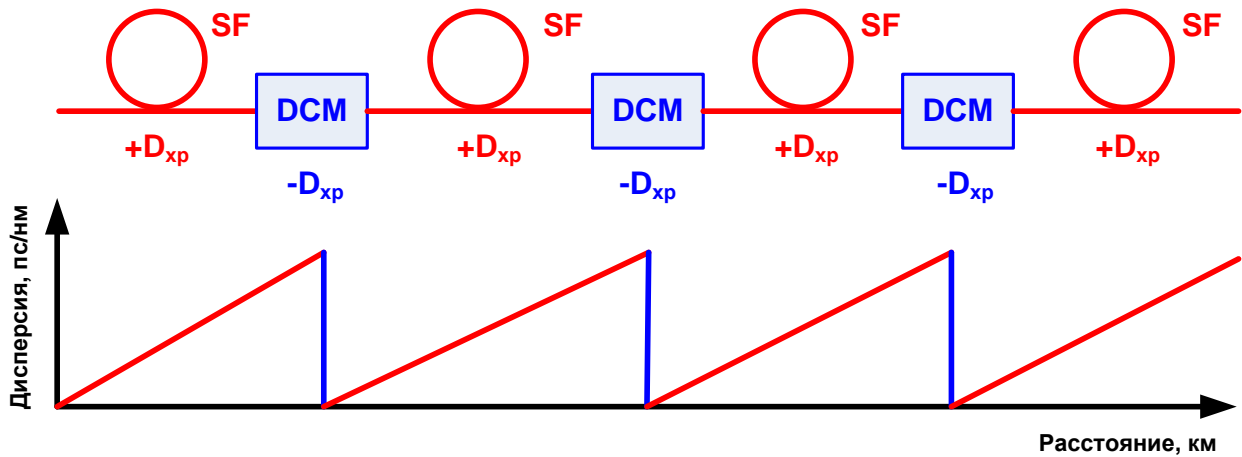


Рис. 6.17 Компенсация хроматической дисперсии в линейном тракте

Рассмотрим регенерационный участок длиной  $L_{rs}$ .

**Первый шаг – определяем, нужна ли компенсация дисперсии.** Для этого нужно рассчитать, каково будет уширение импульса  $\Delta t$  на регенерационном участке и сравнить его с допустимым уширением  $\Delta t_{per}$ . Уширение импульса  $\Delta t$  рассчитываем по выражению (6.9), допустимое уширение  $\Delta t_{per}$  – по выражению (6.12). Если окажется, что  $\Delta t \leq \Delta t_{per}$ , компенсация дисперсии не нужна. В противном случае ее необходимо компенсировать.

**Второй шаг - определяем необходимую длину компенсирующего волокна.** Уширение импульса на участке длиной  $L_{rs}$  с компенсатором дисперсии можно найти по выражению:

$$\Delta t = |D_{chr}| \cdot L_{rs} \cdot \Delta\lambda - |D_{DCF}| \cdot L_{DCF} \cdot \Delta\lambda, \quad (6.17)$$

где  $L_{DCF}$  – длина компенсирующего волокна DCF в компенсаторе,  $D_{DCF}$  – хроматическая дисперсия волокна DCF.

В результате компенсации уширение импульса  $\Delta t$  должно стать не больше допустимого уширения  $\Delta t_{per}$ . Найдем  $L_{DCF}$ , считая, что  $\Delta t = \Delta t_{per}$ . Из (6.17) получаем:

$$L_{DCF} = \frac{|D_{chr}| \cdot L_{rs}}{|D_{DCF}|} - \frac{\Delta t_{per}}{|D_{DCF}| \cdot \Delta\lambda}. \quad (6.18)$$

**Третий шаг - определяем потери в модуле DCM.** Потери в модуле складываются из собственных потерь в волокне DCF и дополнительных потерь, обусловленных двумя соединениями волокон DCF и SF:

$$a_{DCM} = \alpha_{DCF} \cdot L_{DCF} + 2 \cdot a_{DCF-SF}, \quad (6.19)$$

где  $\alpha_{DCF}$  – коэффициент затухания волокна DCF,  $a_{DCF-SF}$  – потери в соединении волокон DCF и SF.

**Четвертый шаг – проверяем, удовлетворяет ли теперь наш регенерационный участок требованиям по затуханию.** Для этого нужно рассчитать, общее затухание на регенерационном участке и сравнить его с допустимым затуханием.

Общее затухание на регенерационном участке складывается из:

1. Затухания в стандартном волокне, которое с учетом потерь в стыках строительных длин определяется выражением (см. тему 4):

$$a_{SF} = \alpha \cdot L_{rs} + \frac{L_{rs}}{L_s} a_n, \quad (6.20)$$

где  $\alpha$  – коэффициент затухания волокна SF на рабочей длине волны,  $L_s$  – строительная длина кабеля с SF волокном,  $a_n$  – средние потери в сварном соединении SF-SF.

2. Затухания в модуле DCM, определяемого выражением (6.19).

Значит для общего затухания справедливо:

$$a = a_{SF} + a_{DCM} = \alpha \cdot L_{rs} + \frac{L_{rs}}{L_s} a_n + \alpha_{DCF} \cdot L_{DCF} + 2 \cdot a_{DCF-SF} \quad (6.21)$$

Максимально допустимое затухание в линии определяется через средний уровень мощности источника излучения  $y_S$  и чувствительность приемника  $y_{R \min}$  (см. тему 4):

$$a_{\max} = y_S - y_{R \min} \quad (6.23)$$

!

**Параметры  $y_S$  и  $y_{R \min}$  в (6.23) выражены в дБм!**

Если  $a \leq a_{\max}$ , можно ставить компенсатор с рассчитанными параметрами. Если же  $a > a_{\max}$ , совместно с компенсатором придется использовать оптический усилитель, который скомпенсирует «лишние» потери сигнала. Минимальный коэффициент усиления усилителя в дБ можно рассчитать по выражению:

$$G = a - a_{\max} \quad (6.24)$$

#### 6.6.4. Недостатки использования компенсаторов.

1. Модуль DCM имеет относительно большой уровень вносимых потерь. Поэтому, увеличивая длину участка регенерации по дисперсии, он одновременно уменьшает длину участка регенерации по затуханию.
2. При использовании модуля DCM увеличивается суммарная поляризационно-модовая дисперсия.

### 6.7. Поляризационно-модовая дисперсия.

В ОВ имеется еще один вид дисперсии – поляризационно-модовая дисперсия (ПМД).

Монохроматический свет представляет собой поперечную электромагнитную волну, которая характеризуется поляризацией - направлением вектора напряженности электрического поля  $E$ . В идеальном ОВ с круговой симметрией сердцевинки и оболочки показатель преломления и скорость распространения света не зависят от направления его поляризации. В реальных волокнах идеальная круговая симметрия нарушается (рис. 6.18). В результате скорость распространения света начинает зависеть от поляризации.

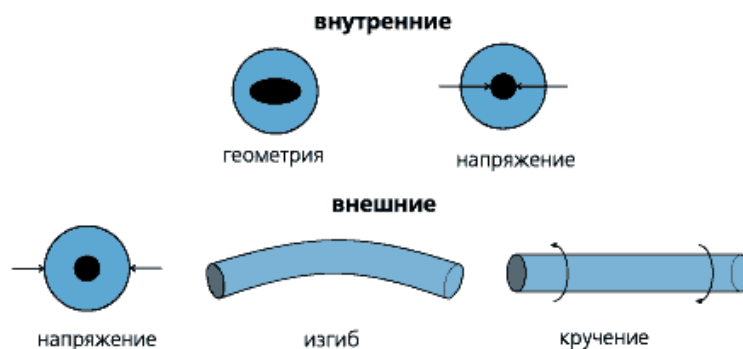


Рис. 6.18. Причины возникновения поляризационно-модовой дисперсии

В поперечном сечении реального ОВ можно выявить взаимно перпендикулярные оси наименьшей и наибольшей скорости (рис. 6.19). Тогда произвольно направленный вектор  $E$  можно разложить на две составляющие, направленные вдоль этих осей. Скорости распространения этих составляющих будут различны. Это приводит к уширению оптического импульса, т.е. к ПМД.

В большинстве одномодовых ОВ расположение осей наибольшей и наименьшей скорости случайным образом меняется вдоль сердцевинки. Поэтому ПМД имеет статистическую при-



роду. Можно считать, что уширение проходящего по ОВ импульса растет с увеличением длины  $L$  пропорционально квадратному корню из этой длины

$$\Delta t = D_p \cdot \sqrt{L}, \quad (6.25)$$

где  $D_p$  – коэффициент ПМД (среднее значение). Коэффициент ПМД принято выражать в пс/км<sup>0.5</sup> (пикосекундах на корень из километра).

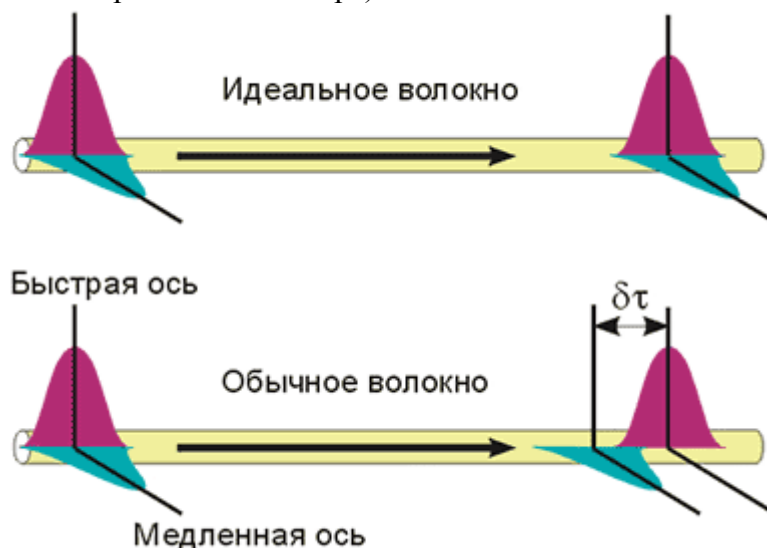


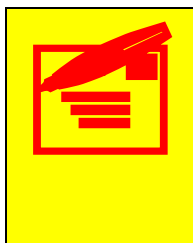
Рис. 6.19. Механизм возникновения поляризационно-модовой дисперсии

Для большинства ОМ ОВ паспортная величина ПМД лежит в пределах 0.02 – 0.2 пс/км<sup>0.5</sup>. Однако при производстве оптических кабелей и строительстве ВОЛС результирующая величина ПМД увеличивается. Кроме того, она имеет тенденцию изменяться во времени. Поэтому для высокоскоростных (10 Гбит/с и выше) и очень длинных (1000 км и больше) линий положено ее измерять при проведении приемо-сдаточных испытаний и затем периодически во время эксплуатации, чтобы убедиться в том, что она лежит в допустимых пределах.

Табл. 6.8 Допустимое уширение импульсов из-за ПМД

Уровень STM	Скорость передачи, Мбит/с	Длительность тактового интервала, пс	Максимально допустимое уширение импульса, пс
STM-1	0.156	6400	640.0
STM-4	0.622	1600	160.0
STM-16	2500	400	40.0
STM-64	10000	100	10.0
STM-256	40000	25	2.5

На вызываемое ПМД уширение импульса накладываются более жесткие условия по сравнению с другими видами дисперсии. В ряде работ указано, что это уширение не должно превышать 0.1 тактового интервала. В таблице 6.5 представлены допустимые уширения импульса на регенерационном участке для различных систем передачи.



**Итак, для ПМД допустимое уширение импульса рассчитывается не так, как для хроматической дисперсии. Для ПМД справедливо:**

$$\Delta t_{per\ pmd} = 0.1 \cdot t_T = \frac{0.1}{B_b}, \quad (6.26)$$

где  $t_T$  – длительность тактового интервала,  $B_b$  – скорость передачи в бит/с. Последнее равенство в (6.26) справедливо для двухуровневого кодирования.

Существует возможность компенсации ПМД. Поскольку в отличие от хроматической эта дисперсия случайна и изменяется во времени, компенсировать ее можно, только постоянно отслеживая ее значение и подстраивая параметры компенсатора. Поэтому компенсатор является активным устройством с обратной связью.

Альтернативой компенсаторам этого вида дисперсии является использование специальных волокон, сохраняющих поляризацию.

## 6.8. Влияние поляризационно-модовой дисперсии на длину регенерационного участка и максимальную скорость передачи.



ПМД ограничивает максимальное расстояние, на которое можно передать сигнал с определенной скоростью без регенерации.

Механизм ограничения тот же, что и у хроматической дисперсии. В процессе распространения по волокну импульс постепенно расширяется из-за дисперсии и на каком-то расстоянии от начала волокна его уширение становится равным допустимому. Это расстояние и есть длина регенерационного участка, ограниченная ПМД  $L_{rs\ pmd}$ . Из (6.22) следует:

$$L_{rs\ pmd} = \left( \frac{\Delta t_{per\ pmd}}{D_p} \right)^2. \quad (6.27)$$



ПМД ограничивает максимальную скорость, с которой можно передавать сигнал на определенное расстояние без регенерации.

Механизм ограничения тот же. Рассчитать максимальную скорость можно, по выражению, следующему из (6.25) и (6.26):

$$\Delta t_{per\ pmd} = \frac{0.1}{B_{b\ max}} = D_p \cdot \sqrt{L}$$

$$B_{b\ max} = \frac{0.1}{D_p \cdot \sqrt{L}} \quad (6.28)$$

## 6.9. Влияние различных видов дисперсии на скорость и дальность передачи.

На рис. 6.20-6.22 приведены зависимости максимальной скорости передачи от дальности при индивидуальном влиянии межмодовой (рис. 6.20), хроматической (рис. 6.21) и поляризационно-модовой (рис. 6.22) дисперсий.

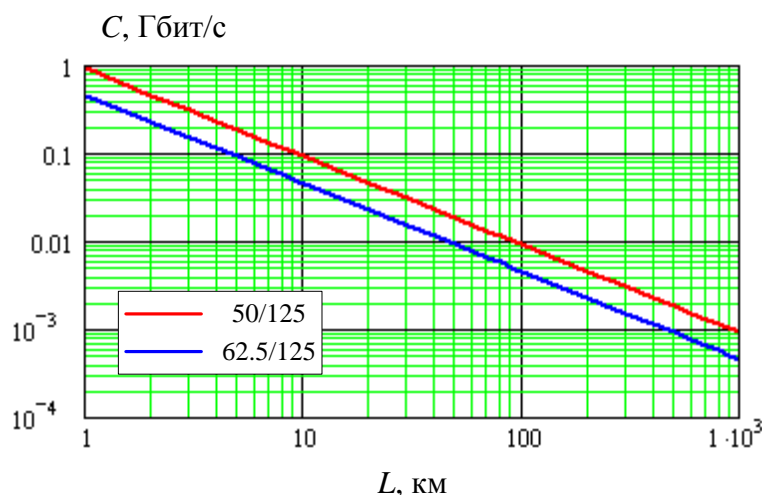


Рис. 6.20. Индивидуальное влияние на максимальную скорость и дальность передачи межмодовой дисперсии при длине волны 1300 нм

Расчет влияния межмодовой и хроматической дисперсии проведен в предположении, что допустимое уширение оптического импульса составляет 0.5 тактового интервала.



Обратите внимание, что **хроматическая и поляризационно-модовая дисперсии имеют место как в одномодовых, так и в многомодовых ОВ.**

Из представленных рисунков видно, что межмодовая дисперсия является основным ограничивающим фактором. Поэтому при расчете длины регенерационного участка по дисперсии в многомодовых волокнах учитывается только межмодовая дисперсия.



Обратите внимание, что на рис. 6.21 приведен расчет и для реального и для идеального источника излучения. Идеальному источнику соответствует ширина спектра излучения  $\Delta\lambda = 0$ .

Представленные на рис. 6.22 графики, иллюстрирующие ограничения поляризационно-модовой дисперсии, рассчитаны в предположении, что допустимое уширение импульса составляет не более 0.1 тактового интервала.

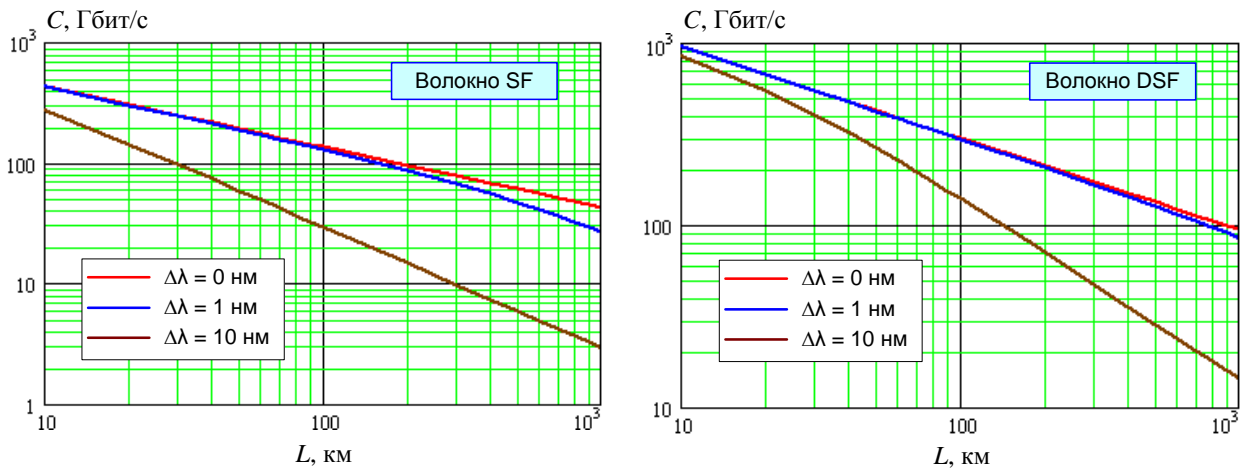


Рис. 6.21. Индивидуальное влияние на максимальную скорость и дальность передачи хроматической дисперсии при длине волны 1550 нм.

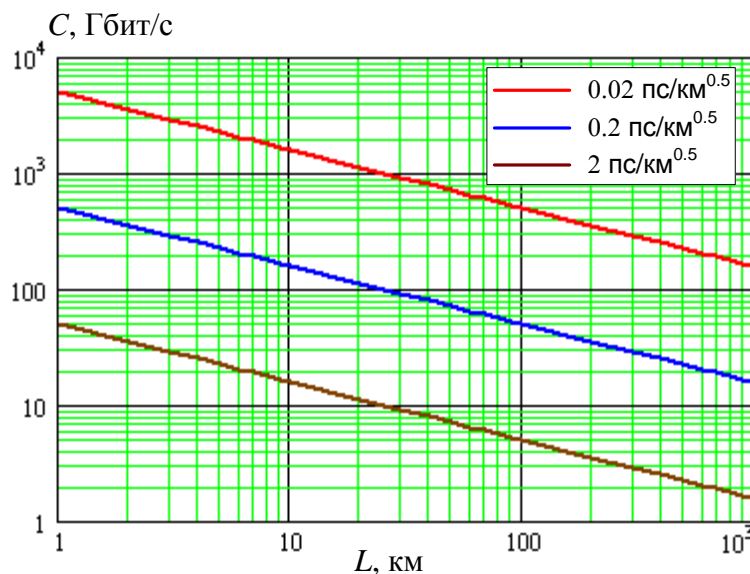


Рис. 6.22. Индивидуальное влияние на максимальную скорость и дальность передачи поляризационной модовой дисперсии.

## 7. Пассивные оптические компоненты

К пассивным компонентам ВОЛС относят компоненты, не потребляющие энергию никаких электрических или оптических источников:

- Разъемные и неразъемные соединения и соединители;
- Разветвители;
- Пассивные фильтры;
- Мультиплексоры DWDM;
- Изоляторы;
- Циркуляторы;
- Атенюаторы;
- Компенсаторы дисперсии.

### 7.1. Общие параметры пассивных компонентов

Вносимое затухание или вносимые потери (insertion loss) определяют уменьшение мощности излучения в компоненте:

$$a_{IL} = 10 \cdot \lg \frac{P_{in}}{P_{out}} = y_{in} - y_{out}, \quad (7.1)$$

где  $P_{in}$  и  $P_{out}$  – мощности излучения на входе и выходе компонента,  $y_{in}$  и  $y_{out}$  – соответствующие им уровни мощностей. Для многопортовых компонентов  $P_{in}$  и  $P_{out}$  – суммарные мощности излучения на входных и выходных портах компонента.

Возвратные потери (return loss) определяют долю оптической мощности, которая отражается от компонента:

$$a_{RL} = 10 \cdot \lg \frac{P_{in}}{P_{ref}} = y_{in} - y_{ref}. \quad (7.2)$$

где  $P_{in}$  и  $P_{ref}$  – мощности падающего и отраженного излучения,  $y_{in}$  и  $y_{ref}$  – соответствующие им уровни мощностей.

Отношение мощностей, стоящее в (7.2) под знаком логарифма, представляет собой величину, обратную коэффициенту отражения  $R$ :

$$R = \frac{P_{ref}}{P_{in}}. \quad (7.3)$$

Поэтому выражение (7.2) можно записать в виде:

$$a_{RL} = -10 \cdot \lg R. \quad (7.2a)$$

### 7.2. Разъемные и неразъемные соединения.

В волоконно-оптических линейных трактах используются как разъемные, так и неразъемные соединения. Преимуществами разъемных соединений являются простота и оперативность подключения, возможность реконфигурации физической топологии сети.

Для построения протяженных ВОЛС более важными являются такие параметры соединения, как вносимые и возвратные потери, надежность, срок службы, стоимость в расчете на одно соединение. Поэтому на протяженных линиях используются только неразъемные сварные соединения.

Промежуточное положение между разъемными и сварными соединениями по характеристикам занимают неразъемные механические соединения.

#### 7.2.1. Вносимые потери в соединениях

Вносимые потери в соединениях можно разделить на внутренние и внешние. Внутренние вносимые потери возникают из-за различия параметров соединяемых ОВ. К причинам внутренних вносимых потерь относятся:

- неодинаковость диаметров сердцевин соединяемых ОВ,
- неодинаковость показателей преломления соединяемых ОВ,
- неодинаковость числовых апертур соединяемых ОВ,

- наличие эксцентриситетов сердцевина/оболочка ОВ с разных сторон.

К внешним вносимым потерям относят потери, возникающие по причине несовершенства инструментов и оборудования, применяемых для сращивания ОВ, недостаточного мастерства кабельщиков и т. п. Такими причинами являются угловое, радиальное и осевое (только для разъёмных соединений) смещения осей соединяемых ОВ, а также шероховатости и загрязнение их торцевых поверхностей.

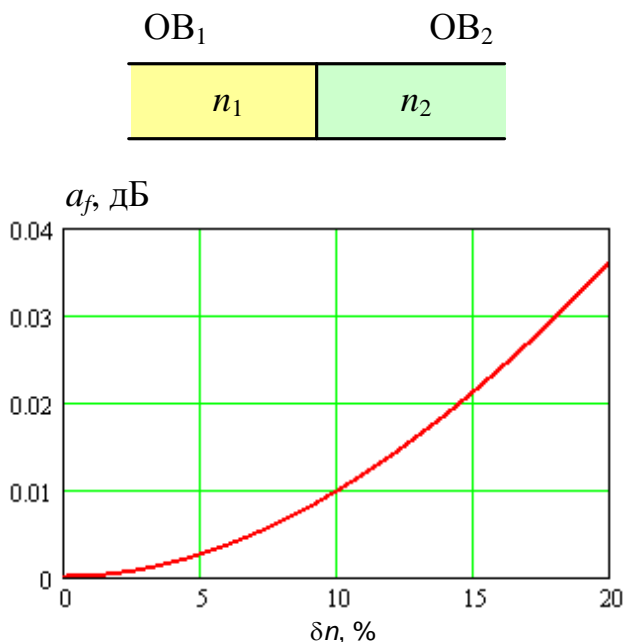


Рис. 7.1. Потери в соединении ОВ с разными показателями преломления сердцевины

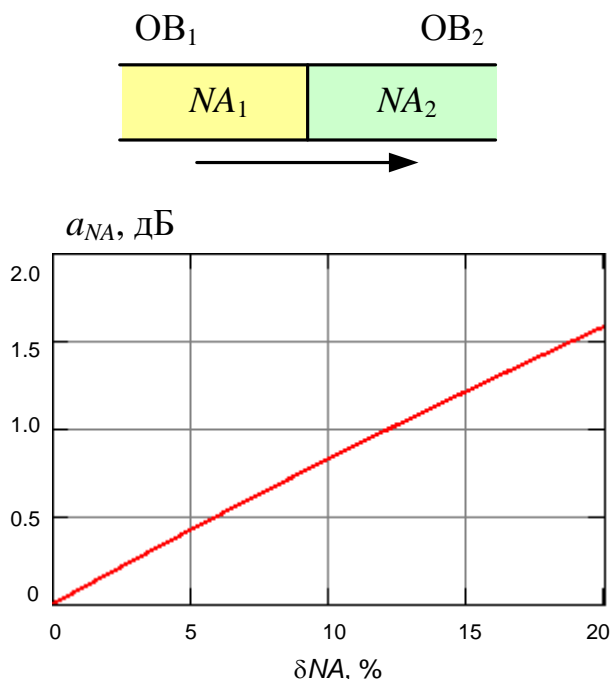


Рис. 7.2. Потери в соединении ОВ с разными числовыми апертурами

Формальному расчету поддаются внутренние потери, возникающие из-за различия параметров соединяемых ОВ, и внешние потери, возникающие из-за смещений.

Потери из-за **различия показателей преломления**  $n_1$  и  $n_2$  сердцевины ОВ (рис. 7.1) являются следствием френелевского отражения на границе двух сред:

$$a_f = -10 \cdot \lg \frac{4n_1n_2}{(n_1 + n_2)^2}. \quad (7.4)$$

Потери при **различии числовых апертур**  $NA_1$  и  $NA_2$  соединяемых МОВ (рис. 7.2):

$$a_{NA} = \begin{cases} -20 \cdot \lg \frac{NA_2}{NA_1} & \text{при } NA_1 > NA_2 \\ 0 & \text{при } NA_1 \leq NA_2 \end{cases} \quad (7.5)$$

Потери при **различии радиусов сердцевины**  $r_{core1}$  и  $r_{core2}$  соединяемых многомодовых ОВ (рис. 7.3):

$$a_{rc} = \begin{cases} -20 \cdot \lg \frac{r_{core2}}{r_{core1}} & \text{при } r_{core1} > r_{core2} \\ 0 & \text{при } r_{core1} \leq r_{core2} \end{cases} \quad (7.6)$$

Потери при **различии радиусов модовых полей**  $r_{mf1}$  и  $r_{mf2}$  соединяемых одномодовых ОВ (рис. 7.4):

$$a_{mf} = -20 \cdot \lg \frac{2r_{mf1}r_{mf2}}{r_{mf1}^2 + r_{mf2}^2} \quad (7.7)$$

При наличии эксцентриситета сердцевины/оболочки возникает радиальное смещение  $r_{rad}$  центров сердцевины соединяемых ОВ (рис. 7.5), которое приводит к потерям:

для многомодовых ОВ:

$$a_{rad} = -10 \cdot \lg \left( 1 - \frac{2r_{rad}}{\pi r_{core}} \right) \quad (7.8)$$

для одномодовых ОВ:

$$a_{rad} = -10 \cdot \lg \left[ \exp \left( - \frac{r_{rad}}{2r_{mf}} \right)^2 \right] \quad (7.9)$$

Зная технологические отклонения от номинала рассмотренных параметров, можно определить максимальные значения ожидаемых внутренних потерь. В табл. 7.1 и 7.2 приведены параметры многомодового и одномодового волокон фирмы Corning и рассчитанные значения потерь.

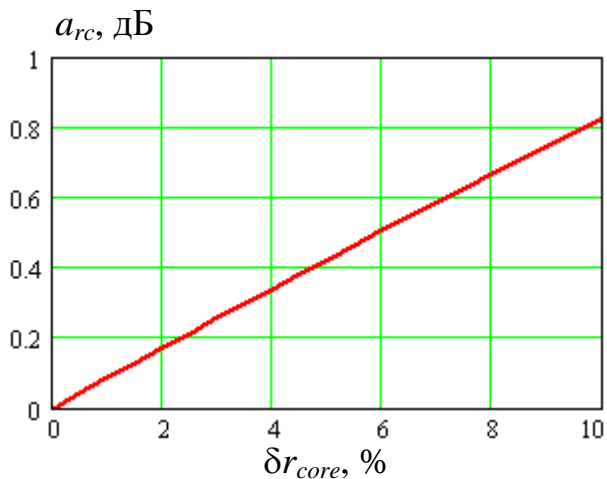
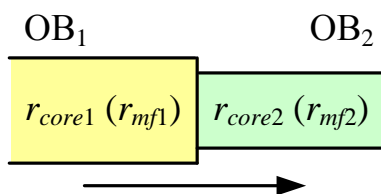


Рис. 7.3. Потери в соединении многомодовых ОВ с разными диаметрами сердцевин

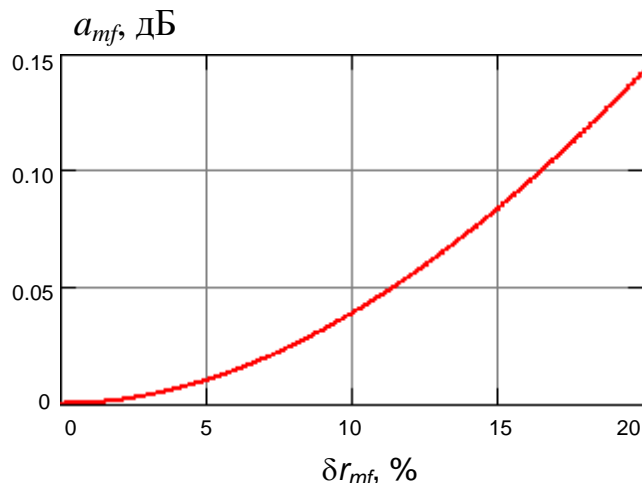


Рис. 7.4. Потери в соединении одномодовых ОВ с разными диаметрами модовых полей

Таблица 7.1

Наименование параметра	Значение параметра	Максимальные вносимые потери, дБ
Диаметр сердцевины, мкм	$50 \pm 3$	1.04
Числовая апертура	$0.2 \pm 0.015$	0.17
Неконцентричность сердцевины и оболочки, мкм	$\leq 3$	1.3

Таблица 7.2

Наименование параметра	Значение параметра	Максимальные вносимые потери, дБ
Диаметр модового поля на длине волны 1550 нм, мкм	$10.4 \pm 0.8$	0.1
Неконцентричность сердцевины и оболочки, мкм	$< 0.5$	0.03

Внешние потери от радиального смещения  $r_{rad}$  соединяемых ОВ также определяются выражениями (7.7-7.8). На рис. 7.5 показаны зависимости потерь от относительного радиального смещения  $x$  соединяемых ОВ, которое для многомодовых ОВ равно  $x = r_{rad} / r_{core}$ , а для одномодовых ОВ  $x = r_{rad} / r_{mf}$ .

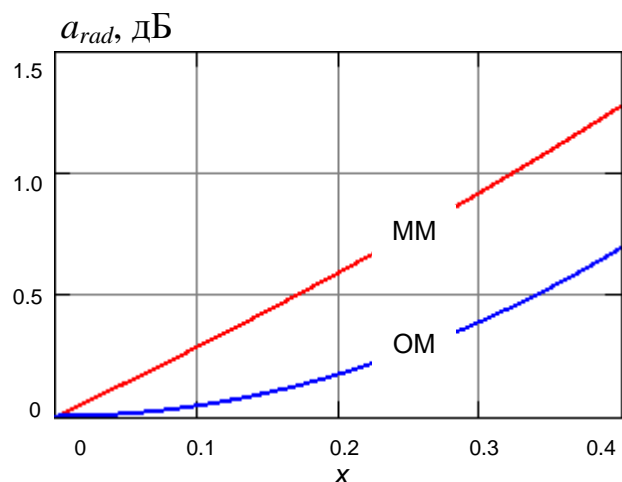
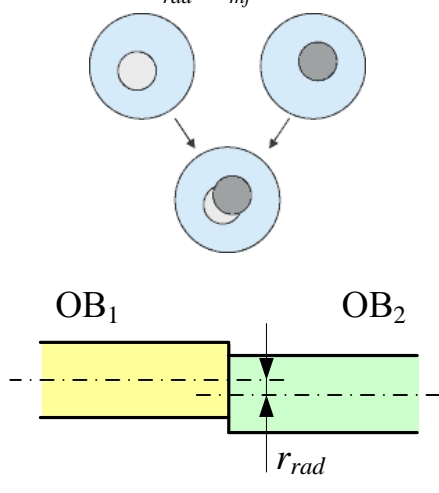


Рис. 7.5. Потери от радиального смещения соединяемых ОВ

Внешние потери, возникающие из-за углового смещения  $\theta$  соединяемых ОВ (рис. 7.6) составляют:

$$\text{для многомодовых ОВ: } a_{ang} = -10 \cdot \lg \left( 1 - \frac{2\theta}{\pi \cdot \arcsin NA} \right) \quad (7.10)$$

$$\text{для одномодовых ОВ: } a_{ang} = -10 \cdot \lg \left[ \exp \left( - \left( \frac{\pi \cdot n_2 \cdot r_{mf} \cdot \theta}{\lambda} \right)^2 \right) \right] \quad (7.11)$$

В (7.10) и (7.11) угол  $\theta$  выражен в радианах.

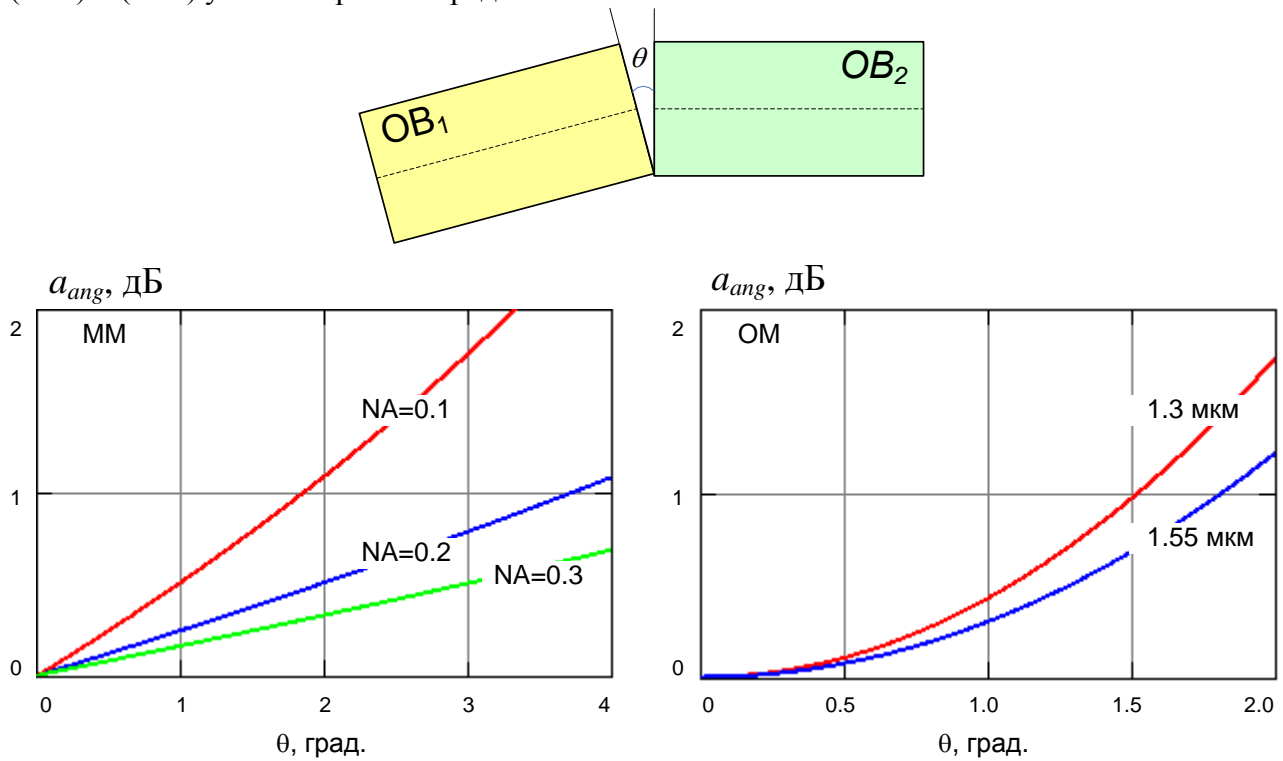


Рис. 7.6. Потери от углового смещения соединяемых ОВ

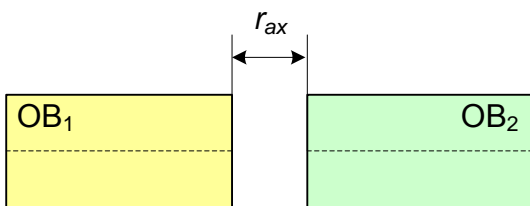


Рис. 7.7. Осевое смещение ОВ.

$$a_{ax} = a_{asb} + a_{mref}^1 \quad (7.12)$$

Потери из-за расходимости светового пучка  $a_{asb}$  (рис. 7.8) составляют:

$$\text{для многомодовых ОВ: } a_{ax} = -10 \cdot \lg \left( 1 - 0.8 \frac{r_{ax} \cdot \sqrt{2\Delta}}{r_{core}} \right), \quad (7.13)$$

$$\text{для одномодовых ОВ: } a_{ax} = -10 \cdot \lg \frac{4r_{mf}^4}{4r_{mf}^4 + \lambda^2 r_{ax}^2 / \pi^2}, \quad (7.14)$$

где  $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$  – высота профиля ОВ (понятие введено в теме 5).

<sup>1</sup> asb - angular spread of beam, mref – multiple refraction.

Средние потери из-за многократных отражений  $\bar{a}_{mref}$  (рис. 7.9) составляют:

$$\bar{a}_{mref} = -10 \cdot \lg \frac{2 \cdot n \cdot n_1}{n^2 + n_1^2}. \quad (7.15)$$

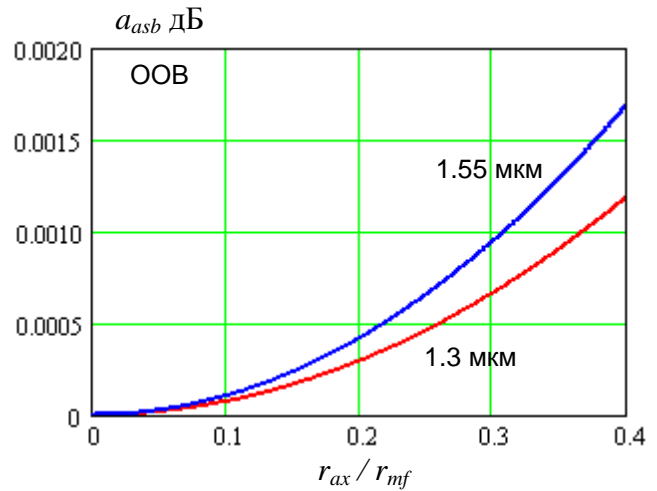
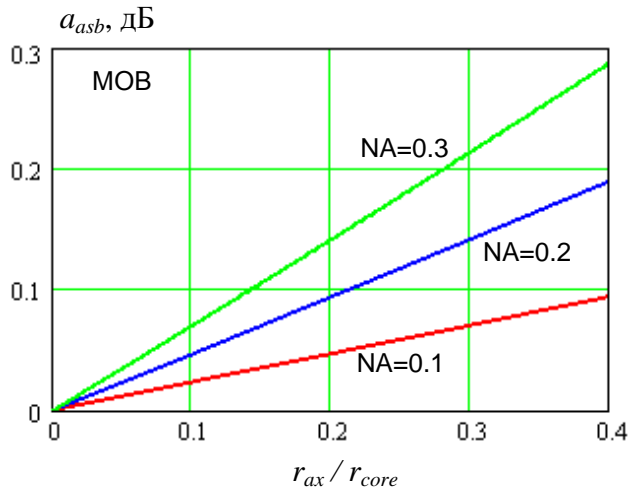


Рис. 7.8. Потери из-за расходимости светового пучка при осевом смещении соединяемых ОВ.

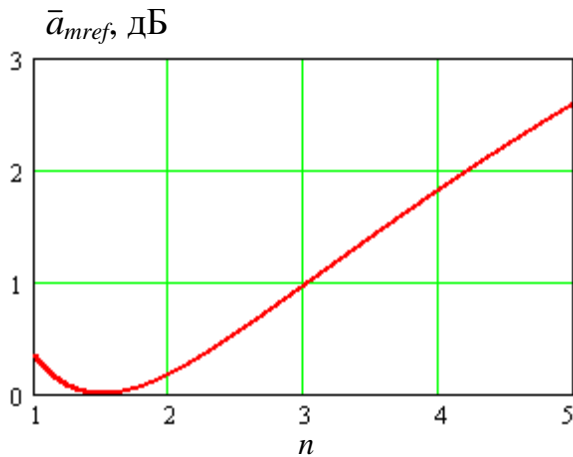


Рис. 7.9. Зависимость средних вносимых потерь от показателя преломления среды в зазоре.

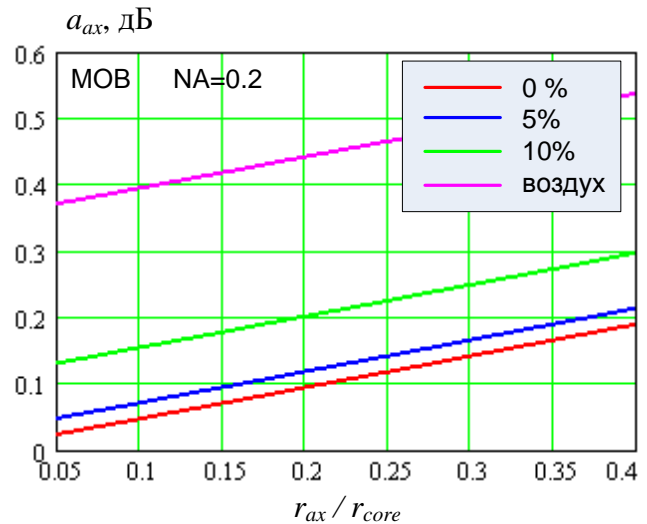


Рис. 7.10. Полные потери из-за осевого смещения соединяемых многомодовых ОВ.

На рис. 7.10 показаны зависимости полных потерь из-за осевых смещений от относительной величины смещения для многомодовых ОВ, рассчитанные по выражениям (7.12) и (7.15) для различных отклонений показателя преломления среды в зазоре от показателя преломления сердцевины ОВ. При расчете показатели преломления сердцевины ОВ полагались одинаковыми и равными 1.5.

### 7.2.2. Возвратные потери в соединениях

Основным фактором, определяющим возвратные потери, являются многократные отражения в зазоре  $s$ . Средние возвратные потери (рис. 7.11) можно рассчитать по выражению:

$$\bar{a}_{RL} = -10 \cdot \lg \frac{(n - n_1)^2}{n^2 + n_1^2} \quad (7.16)$$

Расчет средних возвратных потерь для воздушного зазора между плоскими торцами двух ОВ дает значение  $a_{RL} = 11$  дБ, что является недопустимо малой величиной для большинства применений.



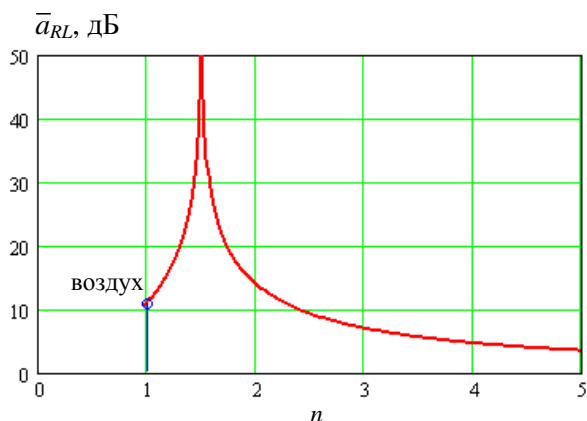


Рис. 7.11. Зависимость средних возвратных потерь от показателя преломления среды в зазоре между плоскими торцами соединяемых ОВ.

Возвратные потери можно дополнительно увеличить при использовании углового физического контакта (angled PC, APC) (рис. 7.12в). Возвратные потери для APC соединителя превышают 60 дБ.

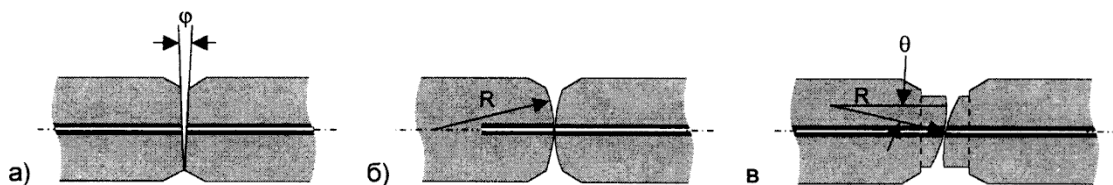
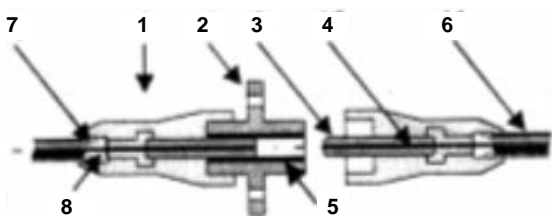


Рис. 7.12. Типы контактов соединителей: а) плоская поверхность, б) сферическая поверхность – физический контакт (PC), в) наклонная сферическая поверхность – угловой физический контакт (APC)

### 7.2.3. Конструкции разъемных соединителей



- 1 — соединитель штекерный
- 2 — соединительная розетка (адаптер)
- 3 — оптический наконечник
- 4 — оптическое волокно
- 5 — центрирующий элемент розетки
- 6 — миникабель
- 7 — кевларовые нити
- 8 — эпоксидный наполнитель

Рис. 7.13. Конструкция симметричного соединителя

При симметричной конструкции (рис. 7.13), которая получила наибольшее распространение, для соединения ОВ необходимы три основных элемента: два штекера и переходная розетка. Главным элементом штекера является наконечник наружным диаметром 2.5 мм с отверстием для ввода ОВ, которое предварительно освобождается от защитных покрытий. Наиболее жесткие требования предъявляются к параметрам отверстия (капилляра) наконечника, которое должно обеспечить минимальный люфт введенного в него ОВ. В соответствии со стандартом диаметр отверстия составляет  $126 +1/-0$  мкм для одномодового ОВ (ООВ) и  $127 +2/-0$  мкм для многомодового ОВ (МОВ). Наконечники изготавливают из нержавеющей стали или из керамики на основе циркония или оксида алюминия. Переходная розетка снабжается центрирующим элементом, выполненным в виде упругой трубки с продольным разрезом. Центрирующий элемент плотно охватывает наконечники, обеспечивая их строгую соосность.

К соединителям предъявляются следующие требования: малые вносимые потери, малое обратное отражение, устойчивость к внешним механическим, климатическим и другим воздействиям, высокая надежность и простота конструкции, незначительное ухудшение параметров после многократных повторных соединений.

Наибольшее распространение получили соединители ST, SC и FC (рис. 7.14-7.16). Все они имеют диаметр наконечника 2.5 мм, сферическую форму торца наконечника и выпускаются с различными типами физического контакта.

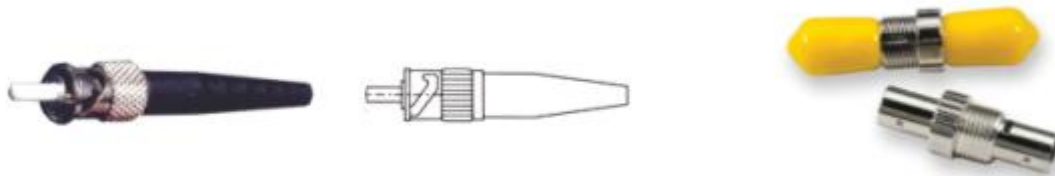


Рис. 7.14. Соединитель ST



Рис. 7.15. Соединитель FC

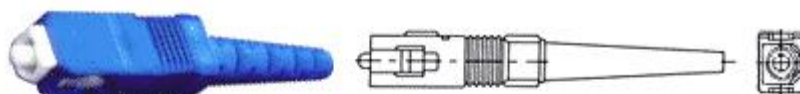


Рис. 7.16. Соединитель SC

Основным недостатком рассмотренных разъемов являются их большие габариты. С целью решения данной проблемы были предложены конструкции малогабаритных оптических разъемов (рис. 7.17-7.20). Увеличение плотности портов при их использовании достигается двумя способами:

- уменьшение размера самого разъема за счет применения наконечников уменьшенного диаметра или отказа от применения наконечников, и/или за счет миниатюризации элементов конструкции разъема;
- применение двух и многоволоконных разъемов.

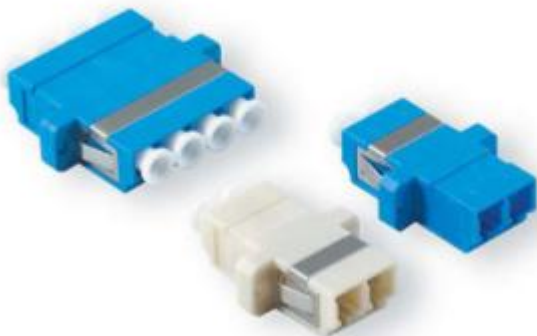
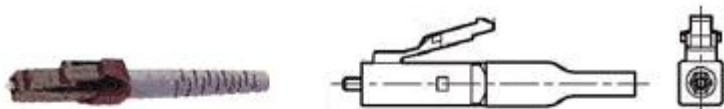


Рис. 7.17. Малогабаритный соединитель LC



Рис. 7.18. Малогабаритный соединитель E-2000



Рис. 7.19. Малогабаритный соединитель MT-RJ

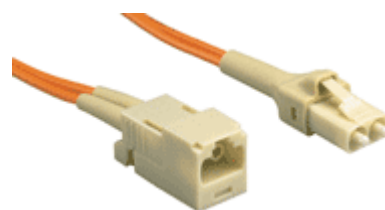


Рис. 7.20. Малогабаритный соединитель FJ

Конструкции оптических разъемов без дорогостоящих центрирующих наконечников призваны уменьшить стоимость разъема (стоимость наконечника составляет около 40% стоимости разъема) и упростить процедуру оконцовки ОВ. Ведущим представителем данной группы малогабаритных разъемов является *соединитель Volition VF-45* (SG) (рис. 7.21), разработанный для сетей Token Ring. Существенный недостаток - не обеспечивается достаточная точность выравнивания волокон, что приводит к ухудшению параметра уровня отраженного сигнала.



Рис. 7.21. Малогабаритный соединитель VF-45

Характеристики рассмотренных разъемных соединителей приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3.

Тип коннектора	Материал наконечника	Диаметр наконечника, мм	Тип фиксации	Наличие дуплексного варианта конструкции	Среднее значение потерь (дБ) на длине волны 1300 нм		Основное назначение
					Многомодовый	Одномодовый	
Стандартного размера							
ST (Straight Tip)	Керамика	2,5	Байонетный	нет	0,25	0,3	СКС
FC (Fiber Connector)	Керамика	2,5	Резьбовой	нет	0,2	0,25	Сети кабельного ТВ
SC (Subscriber Connector)	Керамика	2,5	Защелка с фиксатором	путем объединения двух вилок	0,2	0,3	СКС
Малогабаритные							
LC (Link Control)	Керамика	1,25	Защелка рычажного типа	да	0,1	0,1	СКС, магистральные сети
MT-RJ (Mass Termination)	Керамика	2×1,25	Защелка	только дуплексный	0,2	0,3	СКС
FJ (Fiber Jack)	Керамика	2,5	Защелка рычажного типа	только дуплексный	0,2	0,3	Магистральные сети
E-2000 (Europe 2000)	Мельхиор	1,25	Защелка рычажного типа	да	0,2	0,25	СКС
VF-45	-	-	Защелка	н/д	0,4	0,5	СКС

### 7.2.4. Неразъемные соединения оптических волокон

На протяженных линиях используются только сварные соединения. Такое соединение обеспечивает вносимые потери от 0.01 до 0.05 дБ, а возвратные потери более 70 дБ.

Сварка ОВ производится с помощью специального устройства – сварочного аппарата. Процесс сварки состоит из следующих этапов:

1. **Подготовка ОВ** – удаления оболочки, очистки поверхности на расстоянии 10-15 мм и подготовки торцов свариваемых ОВ с помощью скалывателя – специального инструмента с алмазной режущей кромкой, который осуществляет скол ОВ перпендикулярно его оси.



Рис. 7.22. Подготовка волокна к сварке: снятие защитных покрытий и скалывание волокна.

2. **Юстировка свариваемых ОВ** в сварочном аппарате. Одним из методов автоматической юстировки является **система PAS** (Profile Alignment System). Юстировочное устройство (рис. 7.23) представляет собой две калиброванные V-образные канавки, которые могут перемещаться как по оси Z так и по осям X и Y (одна канавка по оси X, другая – по оси Y). ОВ освещаются сбоку параллельным пучком света так, что оболочка и сердцевина фокусируют свет, действуя как цилиндрические линзы. Видеокамера формирует изображение, на котором видны границы оболочек ОВ. Анализ изображения анализируется позволяет вычислить и скорректировать остаточные смещения ОВ. Качество юстировки, а также качество подготовки торцов волокон можно контролировать визуально по изображениям волокон на экране сварочного аппарата.

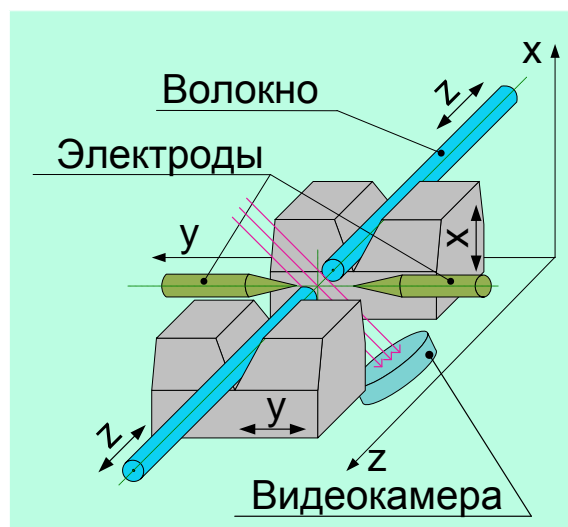


Рис. 7.23. Юстировка волокон методом PAS-системы

3. **Сварка ОВ** осуществляется в поле электрической дуги, возникающей между двумя электродами (рис. 7.23). Дуговой разряд обеспечивает нагрев концов свариваемых ОВ до температуры плавления кварца (1600-2000°C).

4. **Оценка потерь в сварном соединении**



Рис. 7.24. Защита места сварки

5. **Защита места сварки ОВ** от механических влияний и воздействий окружающей среды. С целью защиты оголенного участка ОВ оно помещается в герметичную термоусадочную гильзу, армированную стальным стержнем (рис. 7.24). Термоусадка производится в специальной печи сварочного аппарата. Поскольку в термоусаживающей печи градиент температуры направлен от ее центра к краям, то в процессе усадки гильза выдавливает весь воздух, герметизируя тем самым место сварного стыка.

Современные сварочные аппараты позволяют достичь потерь в сварке 0.02 дБ для ОМ ОВ и 0.01 для ММ ОВ.

В сварочных аппаратах, как правило, предусматривается возможность тестирования сварки на разрыв с усилием 2 или 4.5 Н.

Помимо сварных соединений могут применяться клеевые соединения волокон и соединения с помощью механических соединителей.

**Метод склеивания оптических волокон** был разработан практически одновременно с методом сварки. Для получения клеевого соединения два волокна совмещают в капилляре, который затем заполняется специальным клеем. Достоинствами этого метода являются простота, хорошие механические свойства, отсутствие деформации сердцевин соединяемых волокон, небольшие вносимые потери. Недостатки - ограниченный срок службы, нестабильность характеристик во времени, высокая чувствительность к повышению температуры и воздействию влажности.

**Механические соединители оптических волокон** (рис. 7.25) имеют относительно простую конструкцию. Основными узлами соединителя являются направляющие для двух оптических волокон и устройство фиксации волокон. Внутреннее пространство соединителя заполняется тиксотропным гелем для защиты открытых участков оптических волокон от воздействия влаги. Одновременно гель обладает иммерсионными свойствами. Для получения соединения два волокна вводят в соединитель через отверстия с направляющими, юстируют, а затем фиксируют внутри соединителя обычно путем его обжима. Вносимое такими соединителями затухание существенно меньше, чем у разъемных соединителей, они обеспечивают стабильность характеристик и высокую надежность.



Механический соединитель RMS производства AT&T



Механический соединитель Fibrlok II производства 3M



Механический соединитель Corelink производства AMP



Механический соединитель ленточных элементов оптических волокон производства Lucent Technologies

Рис. 7.25. Механические соединители

### 7.3. Оптические фильтры

Оптические фильтры (волновые селекторы) предназначены пропускания или отклонения излучения в определенном диапазоне длин волн. В зависимости от пропускаемых длин волн различают фильтры нижних частот (длинноволновые), верхних частот (коротковолновые), заграждающие и полосовые фильтры.

Наиболее распространенными являются интерференционные фильтры на основе тонких пленок. Тонкопленочный фильтр состоит из нескольких слоев прозрачного диэлектрического материала с различными показателями преломления, нанесенных последовательно друг за другом на оптическую подложку. На каждой границе раздела между слоями из-за различия их показателей преломления часть падающего светового пучка отражается обратно. Отраженный свет интерферирует с падающим, усиливая или подавляя его в зависимости от длины волны. Подбрав показатель преломления и толщину каждого слоя, можно получить фильтр, который будет пропускать любой заданный диапазон длин волн и отражать все остальные

К основным параметрам оптических фильтров относятся:

- полоса пропускания,  $\lambda_1 \div \lambda_2$ ,

- полоса задерживания,  $\lambda_3 \div \lambda_4$ ,
- переходная полоса
- вносимое затухание в полосе пропускания,  $a_{IL_p}$ ,
- затухание в полосе задерживания,  $a_{IL_s}$ ,
- возвратные потери,  $a_{RL}$ ,
- тип ОВ.

Для современных интерференционных фильтров типовые значения вносимых потерь составляют 0.5-0.8 дБ, затухания в полосе задерживания 25-50 дБ, а возвратные потери 50 дБ. У узкополосных оптических фильтров полоса пропускания имеет 1-8 нм, а у широкополосных достигает 60 нм.

Фильтры применяются в WDM системах, волоконно-оптических усилителях, системах мониторинга и контроля ОВ.

## 7.4. Оптические изоляторы

Оптический изолятор служит для передачи оптического излучения только в одном направлении, в котором он имеет небольшое вносимое затухание порядка 0.5-1.2 дБ. Для света распространяющегося в противоположном направлении оптический изолятор имеет затухание порядка 16-45 дБ. Изоляторы обычно используются для подавления отраженных от неоднородностей волоконного тракта сигналов, которые могут нарушить работу одномодового лазера, а также для подавления остаточного излучения накачки в оптических усилителях.

Принцип действия: На входе оптического изолятора (рис. 7.26) перпендикулярно световому пучку устанавливается первый поляризатор, который имеет две ортогональные оси в плоскости поляризатора: пропускания и задерживания. На выходе из поляризатора свет имеет линейную поляризацию с направлением вектора  $E$ , определяемым осью пропускания поляризатора.

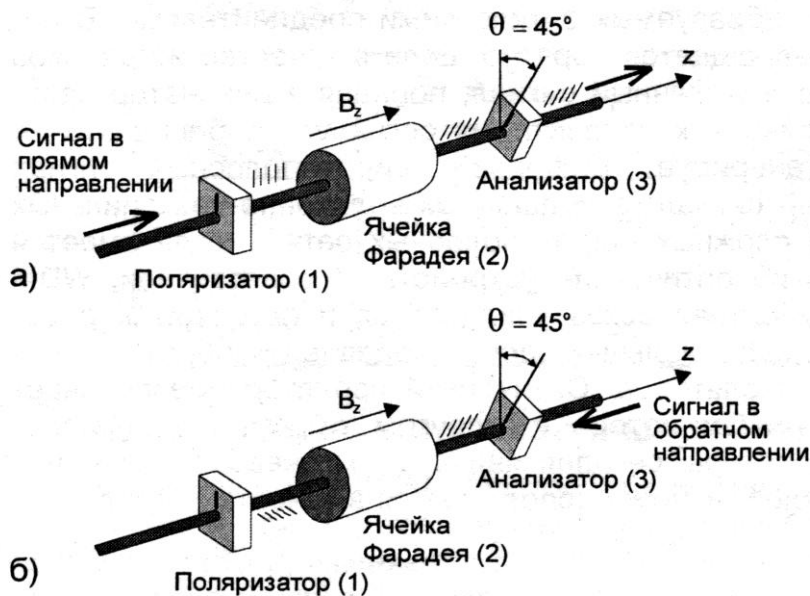


Рис. 7.26. Схема оптического изолятора.

Далее линейно поляризованный свет проходит далее через ротатор (ячейку Фарадея), который поворачивает вектор  $E$  на  $45^\circ$ . поэтому затем свет беспрепятственно проходит через второй поляризатор - анализатор.

Отраженный свет имеет ту же поляризацию, что и прямое излучение и также беспрепятственно проходит через анализатор. В ячейке Фарадея его вектор  $E$  поворачивается еще на  $45^\circ$ , то есть суммарный поворот плоскости поляризации отраженного света по сравнению с прямым

составит  $90^\circ$  и отраженный свет оказывается поляризованным в плоскости задерживания первого поляризатора. Поэтому первый поляризатор не пропустит отраженный свет.

Изолятор характеризуется вносимым затуханием (прямого излучения), затуханием отраженного излучения, возвратными потерями, центральной длиной волны, на которой обеспечивается максимальная разность затуханий в обратном и прямом направлениях, и диапазоном длин волн в котором эта разность лежит в допустимых пределах. Возвратные потери изолятора обычно превышают 55 дБ.

## 7.5. Оптические аттенюаторы

Аттенюаторы используются для уменьшения мощности оптического сигнала. Различают аттенюаторы с фиксированным и переменным затуханием. Фиксированные аттенюаторы (рис. 7.27) имеют установленное изготовителем значение затухания. Затухание может вноситься посредством радиальных смещений или изменения воздушного зазора двух ОВ, а также с помощью поглощающего фильтра, встроенного в зазор между ОВ. Существует разнообразные конструкции фиксированных аттенюаторов: аттенюаторы шнуры, аттенюаторы розетки и аттенюаторы переходники, устанавливаемые между розеткой и шнуром. Аттенюаторы изготавливаются для установки в разъемы типов ST, SC, FC и других.

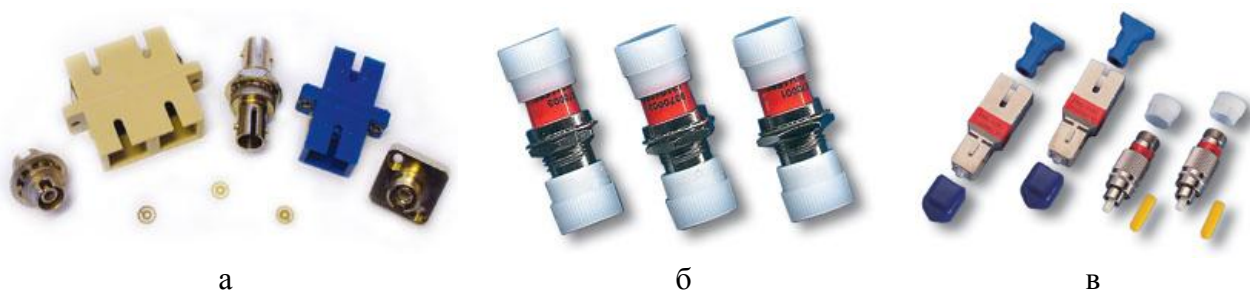


Рис. 7.27. Фиксированные аттенюаторы розетка-розетка (а, б) и вилка-розетка (в).

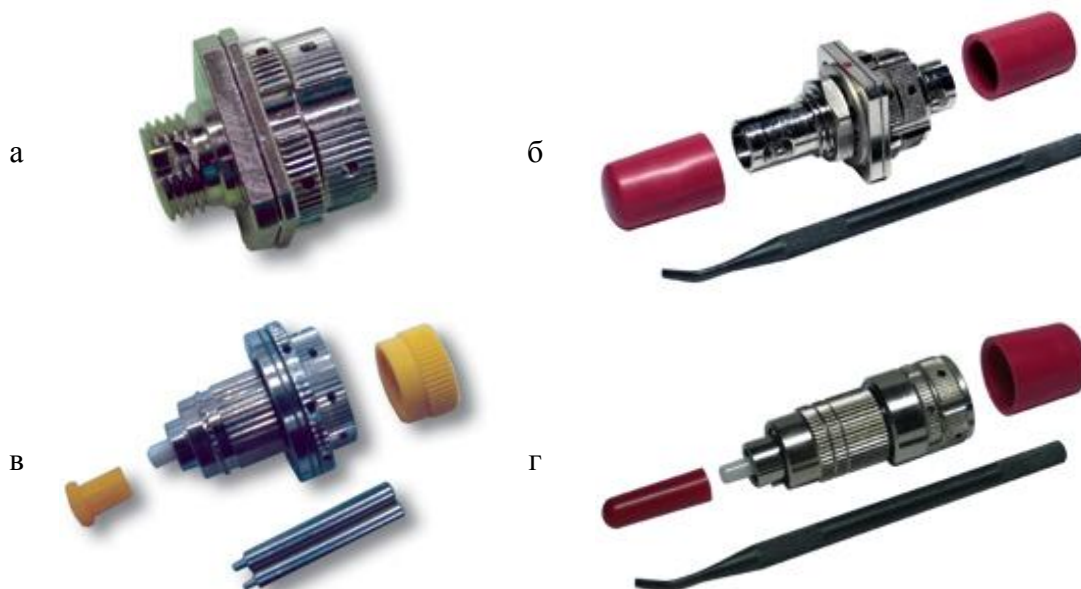


Рис. 7.28. Перестраиваемые аттенюаторы розетка-розетка (а, б) и вилка-розетка (в, г).

Аттенюаторы с переменным затуханием (рис. 7.28) позволяют изменять величину затухания в пределах 0-20 (50) дБ. Существуют конструкции переменных аттенюаторов с плавным и ступенчатым изменением затухания.

Вносимым затуханием переменного аттенюатора принято называть величину начального затухания порядка 0.5-1 дБ. Возвратные потери аттенюаторов обычно превышают 50 дБ.

## 7.6. Оптические разветвители. Матрица потерь многопортового компонента

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

Оптические разветвители можно разделить на древовидные, звездообразные и ответвители (рис. 7.29).

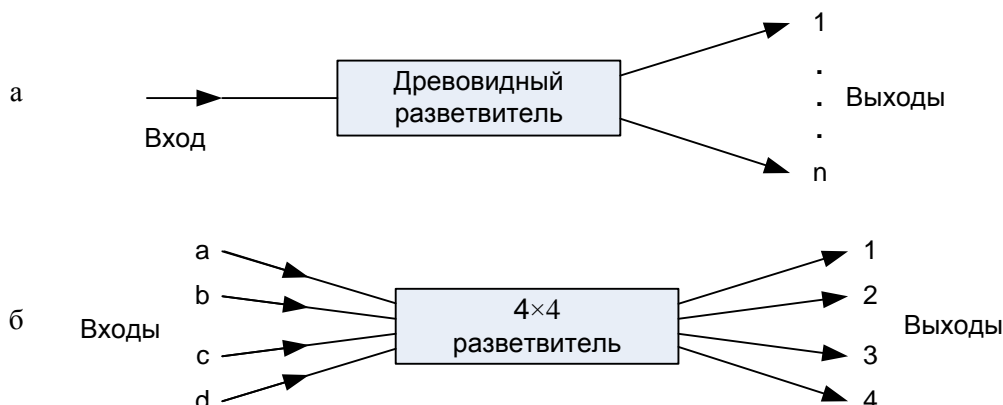


Рис. 7.29. Типы разветвителей: а) древовидный, б) звездообразный.

Древовидный разветвитель  $1 \times m$  расщепляет один оптический сигнал на  $m$  направлений или выполняет обратную функцию объединения нескольких оптических сигналов в один общий сигнал. Такие разветвители распределяют оптический сигнал в равной степени между всеми выходными портами.

Звездообразные разветвители  $n \times m$  обычно имеют одинаковое количество входных  $n$  и выходных  $m$  портов. Оптический сигнал, пришедший на один из входов, равномерно распределяется между выходными портами. Обычно входные порты звездообразного разветвителя обозначают латинскими буквами (a, b, c, d), а выходные цифрами (1, 2, 3, 4).

**Ответвителями** называют древовидные разветвители, у которых входная оптическая мощность распределяется между выходными портами неравномерно. Обычно большая часть мощности выходит через порт магистрального канала, а меньшая часть (менее 50%) ответвляется в другие каналы. Выходные каналы нумеруются в порядке убывания мощности.

Многопортовые компоненты, к которым относится разветвитель, принято характеризовать **матрицей потерь**. Матрица потерь является квадратной, а ее размер определяется числом портов. Если компонент имеет  $n$  входных и  $m$  выходных портов, то его матрица потерь будет иметь размер  $(n+m) \times (n+m)$ . Структура матрицы потерь приведена на рис. 7.30.

Коэффициент матрицы потерь  $a_{ij}$  представляет собой:

- возвратные потери, если  $i = j$ ;
- вносимые потери между портами  $i$  и  $j$ , если выполнены следующие условия: 1)  $i \neq j$ , 2)  $i$  – номер входного, а  $j$  – выходного порта или  $j$  – номер входного, а  $i$  – выходного порта, 3) путь от порта  $i$  к порту  $j$  является разрешенным;
- переходные потери на ближнем конце, если выполнены следующие условия: 1)  $i \neq j$ , 2)  $i$  и  $j$  – номера входных портов или  $i$  и  $j$  – номера выходных портов;
- переходные потери на дальнем конце, если выполнены следующие условия: 1)  $i \neq j$ , 2)  $i$  – номер входного, а  $j$  – выходного порта или  $j$  – номер входного, а  $i$  – выходного порта, 3) путь от порта  $i$  к порту  $j$  является запрещенным.



Порты		Входные				Выходные			
		1	2	...	$n$	$n+1$	$n+2$	...	$n+m$
Входные	1	$a_{11}$	$a_{12}$	...	$a_{1n}$	$a_{1(n+1)}$	$a_{1(n+2)}$	...	$a_{1(n+m)}$
	2	$a_{21}$	$a_{22}$	...	$a_{2n}$	$a_{2(n+1)}$	$a_{2(n+2)}$	...	$a_{2(n+m)}$
	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	$n$	$a_{n1}$	$a_{n2}$	...	$a_{nn}$	$a_{n(n+1)}$	$a_{n(n+2)}$	...	$a_{n(n+m)}$
Выходные	$n+1$	$a_{(n+1)1}$	$a_{(n+1)2}$	...	$a_{(n+1)n}$	$a_{(n+1)(n+1)}$	$a_{(n+1)(n+2)}$	...	$a_{(n+1)(n+m)}$
	$n+2$	$a_{(n+2)1}$	$a_{(n+2)2}$	...	$a_{(n+2)n}$	$a_{(n+2)(n+1)}$	$a_{(n+2)(n+2)}$	...	$a_{(n+2)(n+m)}$
	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	$n+m$	$a_{(n+m)1}$	$a_{(n+m)2}$	...	$a_{(n+m)n}$	$a_{(n+m)(n+1)}$	$a_{(n+m)(n+2)}$	...	$a_{(n+m)(n+m)}$

Рис. 7.30. Структура матрицы потерь для компонента, имеющего  $n$  входов и  $m$  выходов.

В табл. 7.4 приведена типовая матрица потерь для звездного разветвителя  $4 \times 4$ .

Табл. 7.4. Матрица потерь оптического разветвителя  $a_{ij}$

Вход ( $i$ )	Выход ( $j$ )							
	$a$	$b$	$c$	$d$	1	2	3	4
$a$	45.5	48.5	47.2	49.7	6.8	6.9	6.7	6.7
$b$	47.6	46.1	47.4	49.7	6.9	6.8	6.8	6.6
$c$	49.8	47.6	45.9	46.9	6.6	6.8	6.8	6.7
$d$	50.5	48.2	48.9	46.2	6.6	6.7	6.8	6.7
1	6.7	6.8	6.9	6.7	47.1	47.3	48.9	46.6
2	6.7	6.8	6.8	6.7	47.8	46.5	49.7	48.3
3	6.7	6.9	6.8	6.7	48.3	46.5	47.7	48.5
4	6.7	6.6	6.9	6.8	47.3	46.7	49.1	47.9

Коэффициенты матрицы потерь можно рассчитать по экспериментально измеренным мощностям  $P_i$  на входе  $i$  и  $P_j$  на выходе  $j$  или соответствующим уровням  $y_i$  и  $y_j$  по выражению

$$a_{ij} = 10 \cdot \lg \frac{P_i}{P_j} = y_i - y_j \quad (7.17)$$

Если индексы  $i$  и  $j$  расположены с противоположных сторон разветвителя, то коэффициент матрицы соответствует вносимым потерям (желтые ячейки) при передаче сигнала от порта  $i$  к  $j$ .

Если индексы  $i$  и  $j$  расположены с одной стороны разветвителя, то коэффициент матрицы определяет переходное затухание разветвителя (голубые ячейки) на ближнем конце между входами  $i$  и  $j$ .

Если индексы  $i$  и  $j$  совпадают, то коэффициент матрицы соответствует возвратным потерям (красные ячейки) порта  $i$ .

В симметричном разветвителе минимально возможные вносимые потери, обусловленные разделением входной мощности сигнала на несколько выходных портов, составляют

$$a_{\min} = 10 \cdot \lg(m). \quad (7.18)$$

## 7.7. Устройства волнового уплотнения (мультиплексирования)

Устройства волнового (спектрального) уплотнения WDM (Wavelength Division Multiplexing) предназначены для мультиплексирования (объединения) оптических сигналов разных длин волн из нескольких ОВ в одно ОВ или демультиплексирования (разделения) оптических сигналов разных длин волн из одного ОВ в несколько ОВ.

Для объединения и разделения оптических сигналов в устройствах WDM используются интерференционные фильтры или дифракционные решетки.

Мультиплексоры WDM делятся на терминальные и мультиплексоры ввода/вывода (OADM – Optical Add/Drop Multiplexer) (рис. 7.31), которые отличаются от терминальных тем, что некоторые каналы проходят через них транзитом.

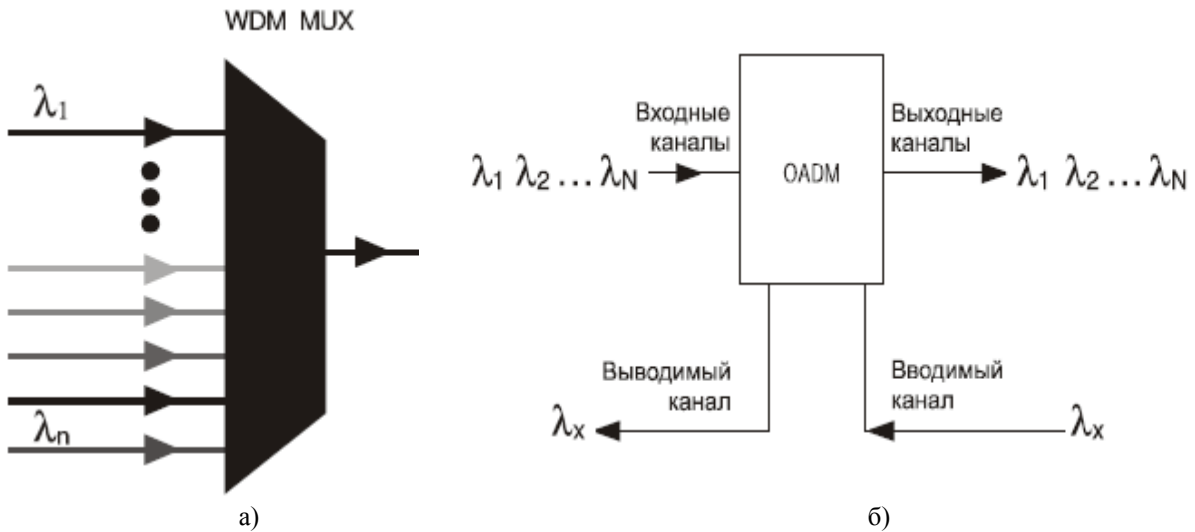


Рис. 7.31. Структура матрицы потерь для компонента, имеющего  $n$  входов и  $m$  выходов.

Если устройство WDM предназначено для мультиплексирования всего двух длин волн (устройство WDM  $1 \times 2$ ), оно может использоваться для организации дуплексной связи по одному ОВ (рис. 7.32а). Так организована связь в пассивных оптических сетях PON.

Другая область применения устройств WDM – линии связи с использованием спектрального мультиплексирования. В этом случае дуплексная связь организуется по двум ОВ на двух и более длинах волн. На рис. 7.32б показана организация дуплексной связи по двум ОВ на двух длинах волн с помощью устройства WDM  $1 \times 2$ .

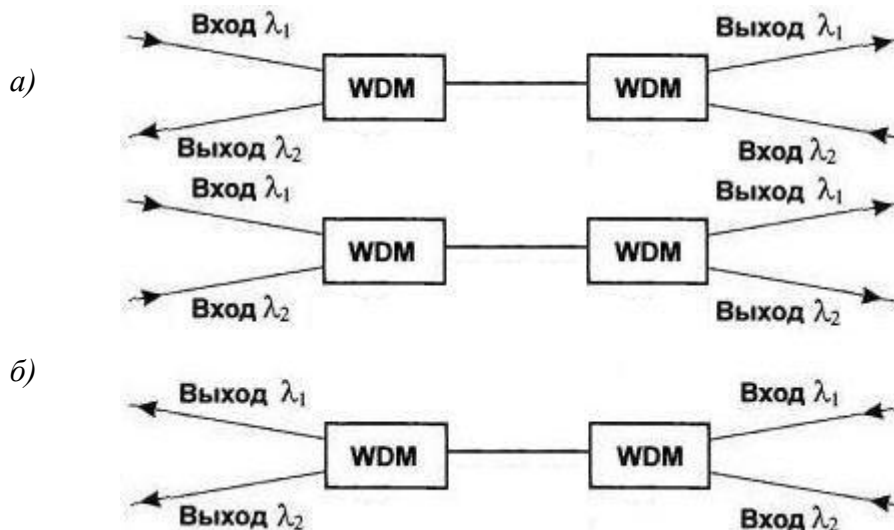


Рис. 7.32. Использование мультиплексоров/демультиплексоров WDM для ВОСП, работающих по одному (а) и по двум ОВ (б).

Наиболее полной характеристикой WDM также как для разветвителя является матрица потерь. В табл. 7.5 приведена типовая матрица потерь для WDM устройства  $1 \times 2$ .

Табл. 7.5 Матрица потерь WDM устройства  $a_{ij}$

Входы / выходы $i$	Входы / выходы $j$ , $\lambda_1=1310$ нм			Входы / выходы $j$ , $\lambda_2=1550$ нм		
	1	2	3	1	2	3
1	50	25	1.5	50	-	-
2	-	50	-	25	50	1.5
3	1.5	25	50	25	1.5	50

Основными параметрами WDM являются:

- вносимые потери (желтые ячейки)  $a_{13}$  и  $a_{31}$  для  $\lambda_1$  и  $a_{23}$  и  $a_{32}$  для  $\lambda_2$ , которые обычно составляют 1.5-3.5 дБ,
- переходное затухание на ближнем конце (темно-голубые ячейки)  $a_{12}$  для  $\lambda_1$  и  $a_{21}$  для  $\lambda_2$ , которое лежит в пределах 20-30 дБ;
- переходное затухание на дальнем конце (светло-голубые ячейки)  $a_{32}$  для  $\lambda_1$  и  $a_{31}$  для  $\lambda_2$ , которое лежит в пределах 20-30 дБ;
- возвратные потери (красные ячейки)  $a_{11}$ ,  $a_{22}$  и  $a_{33}$ , которые обычно превышают 50 дБ.

## 7.8. Оптические циркуляторы

Оптический циркулятор (рис. 7.33) представляет собой 3-х портовое устройство с изолированными однонаправленными портами, обладающее возможностью разделения встречных лучей света и распределения их по соответствующим портам: сигнал с порта 1 циркулятора передается на порт 2 и с порта 2 на порт 3.

В основе работы оптического циркулятора лежит следующая особенность распространения света в оптической среде: световые волны, поляризованные в различных плоскостях, распространяясь в одной и той же среде, не взаимодействуют. Данное утверждение верно и для световых волн с одинаковой длиной волны.

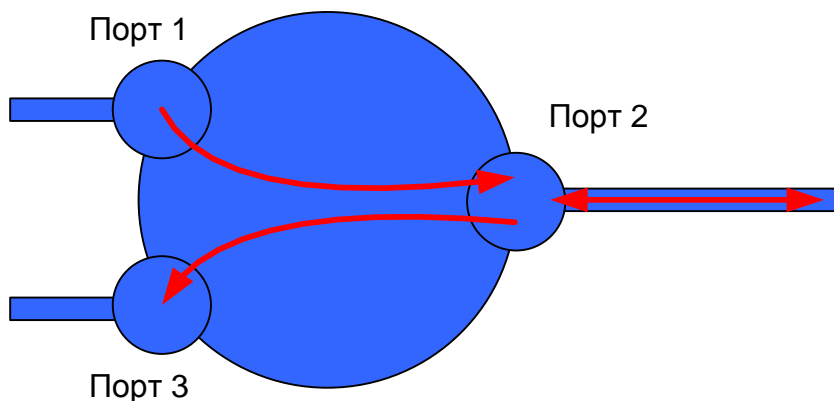


Рис. 7.33. Оптический циркулятор.

Оптические циркуляторы могут иметь одно или два окна пропускания, рассчитанные на передачу сигналов на длинах волн 1310 и 1550 нм. Вносимые циркулятором потери составляют 0.8-1.6 дБ, а возвратные потери – 40-45 дБ.

Оптические циркуляторы наиболее часто используются для организации дуплексной связи по одному ОВ (рис. 7.34). На рис. 7.34а показана схема организации одного дуплексного канала на длине волны  $\lambda_1$  с помощью двух циркуляторов. На рис. 7.34б показана схема организации двух дуплексных каналов на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  с помощью четырех циркуляторов. В этой схеме используются оптические циркуляторы с двумя окнами пропускания. Длины волн объединяются в одном ОВ с помощью широкополосного устройства WDM.

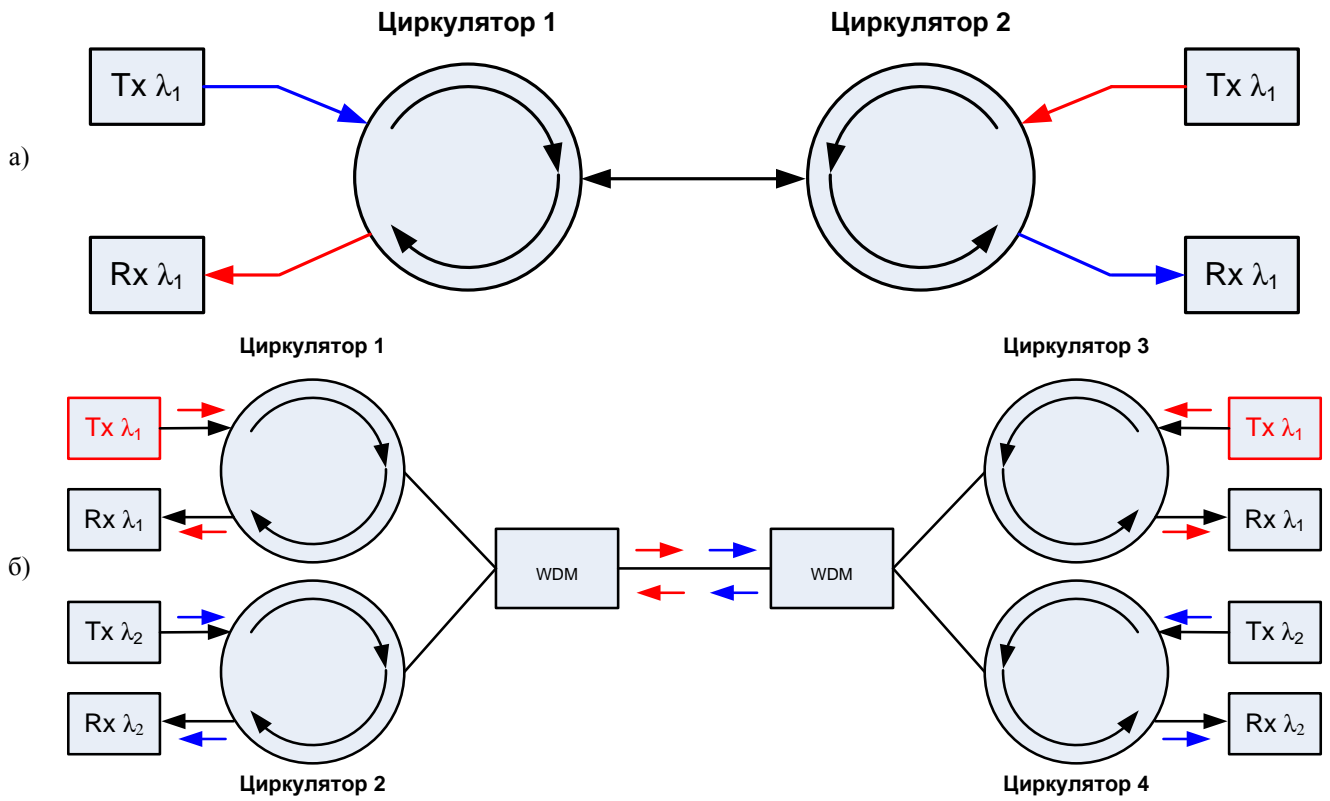


Рис. 7.34. Использование циркуляторов для организации дуплексной связи по одному ОВ на одной длине волны:  
а – организация одного канала, б – организация двух каналов.

## 8. Передающие устройства ВОЛС

### 8.1. Источники излучения для ВОЛС

#### 8.1.1. Виды, параметры и принцип действия источников излучения

В связи используется два вида источников излучения – полупроводниковые светоизлучающие диоды (СИД) и полупроводниковые лазерные диоды (ЛД) или полупроводниковые лазеры. Основным элементом конструкции полупроводникового источника излучения является р-п переход.

СИД и ЛД можно характеризовать следующими основными параметрами и характеристиками:

- **Средняя длина волны излучения  $\lambda_0$ .**
- **Ширина спектра излучения  $\Delta\lambda$ .**
- **Пространственные характеристики:** размеры и форма излучающей площадки и диаграмма направленности излучения.
- **Ваттамперная характеристика** – зависимость мощности излучения  $P$ , введенной в ОВ, от тока через р-п переход.
- **Вольтамперная характеристика** – зависимость тока через р-п переход от напряжения.
- **Быстродействие.**
- **Кoeffициент полезного действия.**

Кроме того, к ИИ предъявляются обычные требования:

- надежность.
- устойчивость к изменениям условий окружающей среды,
- малые габариты и масса,
- небольшая стоимость.

В р-п переходе параллельно идут два процесса:

1. Генерация свободных носителей заряда – электронов и дырок, происходящая с поглощением кванта энергии.

2. Рекомбинация электронов и дырок, происходящая с выделением кванта энергии. Квант энергии может выделиться в виде фотона (излучательная рекомбинация) или в виде тепла или увеличения кинетической энергии третьего носителя (безызлучательная рекомбинация).

В состоянии равновесия переходы, сопровождающиеся излучением и поглощением света, уравниваются друг друга, и излучения света не происходит. Непременное **условие возникновения излучения** из р-п перехода – его **прямое смещение**. Говорят, что к р-п переходу приложено **прямое напряжение** или, что переход смещен в прямом направлении, если «+» источника подан на р-область, а «-» — на п-область. Напряжение обратной полярности называют **обратным** и говорят, что переход смещен в обратном направлении.

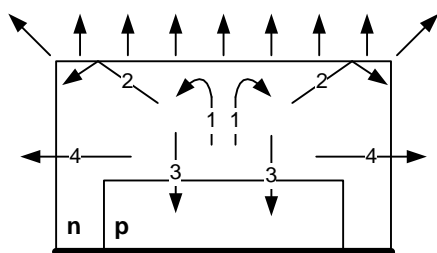


Рис. 8.1. Вывод излучения

Хороший источник должен иметь **высокую вероятность излучательной рекомбинации**. Однако этого недостаточно, необходимо также эффективно вывести излучение из перехода. Можно выделить несколько основных причин, по которым нельзя вывести из перехода все возникшие фотоны (рис. 8.1).

1. Излучение, возникающее в результате излучательной рекомбинации, характеризуется

отсутствием направленности. Часть его вообще не достигает излучающей поверхности источника, образуя обратное (лучи 3 на рис. 8.1) и торцевое (лучи 4) излучение.

2. К излучающей поверхности свет подходит под разными углами. Поэтому для части излучения (лучи 2) выполняется условие полного внутреннего отражения и оно остается внутри полупроводника. Кроме того, на границе раздела возникают и обычные потери на отражение.

3. Наконец, часть излучения поглощается материалом полупроводника (лучи 1).

Отношение числа фотонов, вышедших из полупроводника, к общему числу актов рекомбинации, называется **квантовой эффективностью** или квантовым выходом.

### 8.1.2. Спонтанная и вынужденная люминесценции

Генерация света в *p-n* переходе при пропускании через него электрического тока называется электролюминесценцией. Люминесценция бывает спонтанной (рис. 8.2) и вынужденной (рис. 8.3).

При спонтанной люминесценции (рис. 8.2) электроны, поглотившие кванты энергии и перешедшие из валентной зоны в зону проводимости, самопроизвольно возвращаются в валентную зону в результате рекомбинации с дырками. При этом они отдают поглощенную энергию в виде фотона.

Поскольку акты излучательной рекомбинации происходят самопроизвольно, фотоны излучаются независимо друг от друга. Это значит, что частота, фаза (момент испускания), направление распространения и поляризация родившегося фотона случайны, то есть излучение некогерентно.

Излучение СИД возникает в основном за счет спонтанной люминесценции, то есть СИД является некогерентным источником излучения.

Генерация когерентного<sup>1</sup> излучения возможна только при **вынужденной люминесценции** (рис. 8.3). Для того чтобы возникло вынужденное излучение необходимо, чтобы излучательная рекомбинация произошла не самопроизвольно, а в результате воздействия на возбужденный электрон фотона с частотой  $\nu_{12}$ .

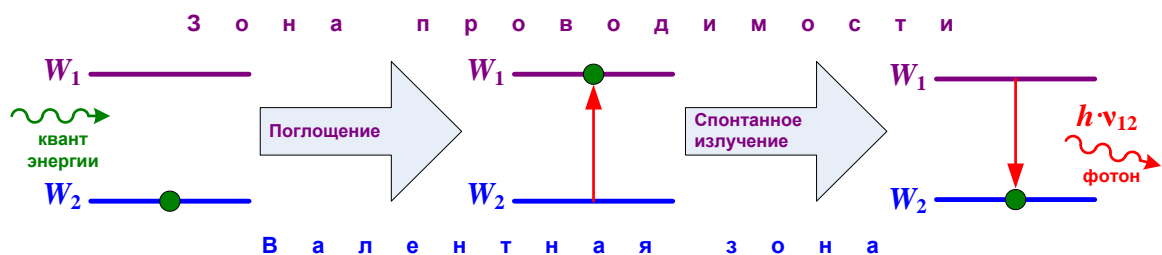


Рис. 8.2. Спонтанная люминесценция

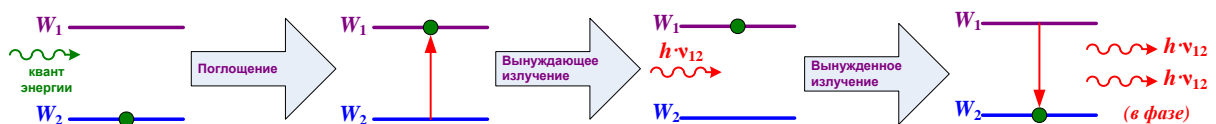


Рис. 8.3. Вынужденная люминесценция

Вынужденное излучение имеет ту же частоту, ту же поляризацию, ту же фазу и то же направление, что и вынуждающее излучение. Поэтому оно усиливает вынуждающее излучение, не искажая его. На явлении вынужденной люминесценции основана работа ЛД.

<sup>1</sup> О когерентности см. п. 8.1.4.1.

### 8.1.3. Светоизлучающие диоды

#### 8.1.3.1. Оптические параметры и характеристики СИД

##### *Спектр излучения, средняя длина волны, ширина спектра излучения*

Минимальная энергия фотонов, возникающих в результате излучательной рекомбинации электрона и дырки, равна ширине запрещенной зоны полупроводниковой структуры  $W_g$ . Однако, поскольку электроны и дырки обладают кинетической (тепловой) энергией, среднее значение которой равно  $kT$  ( $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана,  $T$  – температура р-п перехода в К), будут возникать фотоны и с большей энергией. На рис. 8.4 показан теоретический спектр излучения СИД – зависимость интенсивности излучения от энергии фотонов.

Максимальная интенсивность излучения СИД соответствует фотонам с энергией  $W_g + kT/2$ . Эти фотоны имеют длину волны  $\lambda_0$ , которую называют средней излучаемой длиной волны:

$$\lambda_0 = \frac{h \cdot c}{W_g + \frac{kT}{2}} \approx \frac{h \cdot c}{W_g}, \quad (8.1)$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме,  $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка. Приближенное равенство справедливо, если тепловая энергия электронов и дырок мала по сравнению с шириной запрещенной зоны, то есть при  $W_g \ll kT$ . Для большинства полупроводниковых материалов при нормальной температуре это условие выполняется, поэтому далее будем использовать приближенное соотношение (8.1)

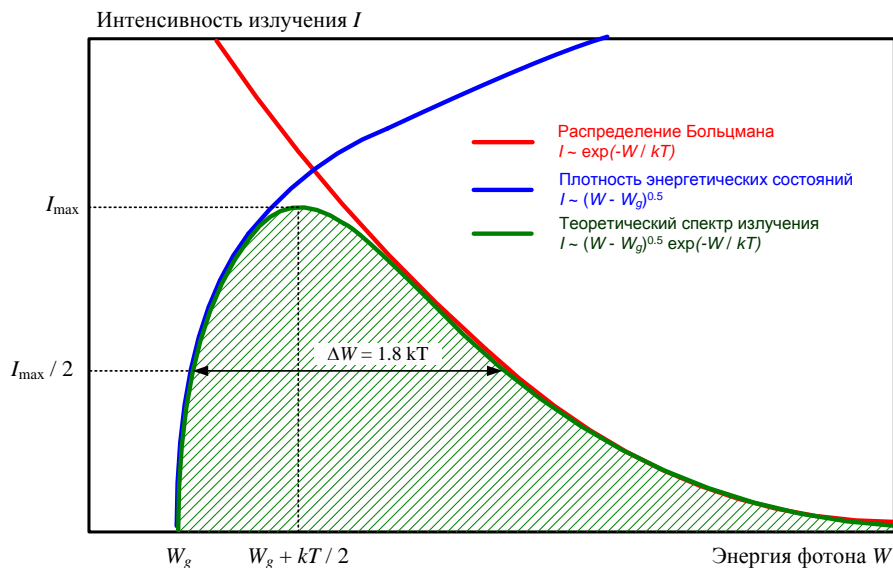


Рис. 8.4. Теоретический спектр излучения р-п перехода.

Ширина запрещенной зоны  $W_g$  в (8.1) выражена в единицах СИ – Дж. В инженерных расчетах для измерения малых значений энергии часто используют другую единицу – электрон-Вольт (эВ)<sup>2</sup>. Ширина запрещенной зоны  $E_g$  в эВ равна:

$$E_g = \frac{W_g}{k_e}, \quad (8.2)$$

где  $k_e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Дж/эВ. Из (8.1) и (8.2) получаем:

<sup>2</sup> Электрон-вольт (эВ) - внесистемная единица энергии, равная энергии, приобретаемой элементарным зарядом (электроном) под действием разности потенциалов 1 В (1эВ =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж).

$$\lambda_0 = \frac{b_e}{E_g}, \quad (8.3)$$

где  $b_e = hc / k_e = 1.243 \cdot 10^{-6}$  эВ·м.

Параметры наиболее часто используемых для ИИ материалов приведены в табл. 8.1.

Ширина спектра излучения  $p$ - $n$  перехода на уровне, равном половине максимальной интенсивности  $I_{\max}$ , приблизительно определяется соотношением

$$\Delta\lambda \approx \frac{1.8 \cdot k \cdot T}{W_g} \lambda_0 = \frac{1.8T}{\tau_e} \lambda_0^2 \quad (8.4)$$

где  $\tau_e = 0.014$  К·м. Второе равенство в (8.4) получено с учетом (8.1).

Табл. 8.1. Параметры материалов, используемых для производства ИИ

Материал	Ширина запрещенной зоны при $T = 300$ К, эВ	Средняя длина волны излучения, мкм	Показатель преломления	Коэффициент излучательной рекомбинации, $\text{см}^3/\text{с}$	Характеристическая температура, К
Арсенид галлия GaAs	1,42	0,87	3.32	$2.7 \cdot 10^{-10}$	360
Антимонид галлия GaSb	0,73	1,7	3.8	$2.4 \cdot 10^{-10}$	266
Фосфид индия InP	1,34	0,93	3.1	$1.3 \cdot 10^{-9}$	425
Арсенид алюминия-галлия $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$	1,424 - 2,168	0,57 - 0,87	$3.3 - 0.53x + 0.09x^2$	$1.8 \cdot 10^{-10}$	$370 + 54x + 22x^2$
Фосфид арсенида индия и галлия $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	0,74 - 1,35	0,92 - 1,67	$3.1 + 0.46y$	$1.2 \cdot 10^{-10}$	$425 - 103y$

На рис. 8.5 показаны относительные спектральные характеристики излучения различных  $p$ - $n$  переходов. Расчеты проведены в предположении, что спектр излучения СИД имеет форму:

$$F(\lambda) = F_0 \frac{(\Delta\lambda/2)^2}{(\lambda - \lambda_0)^2 + (\Delta\lambda/2)^2}. \quad (8.5)$$

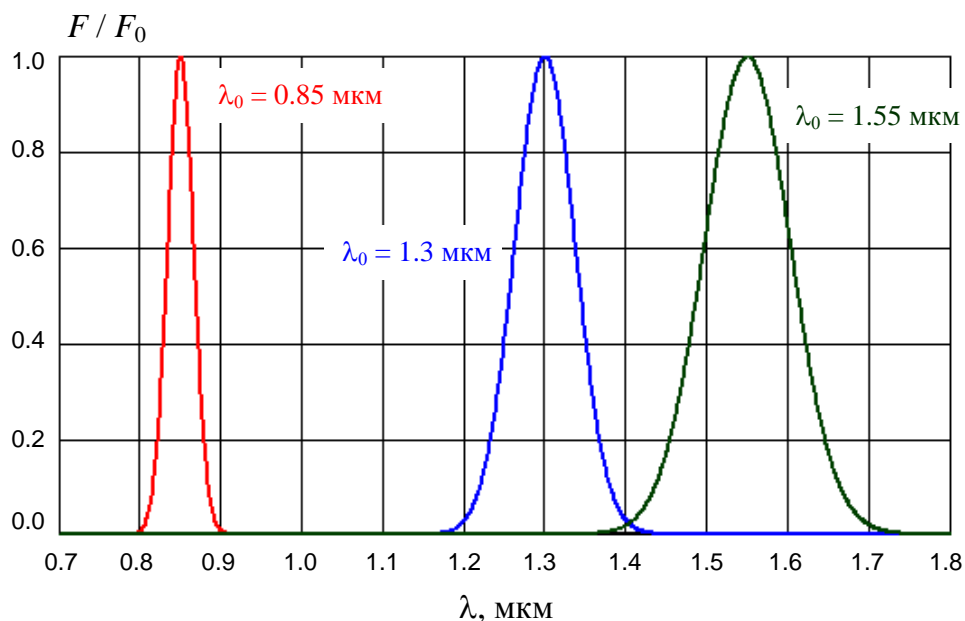


Рис. 8.5. Относительные спектральные характеристики излучения  $p$ - $n$  переходов.



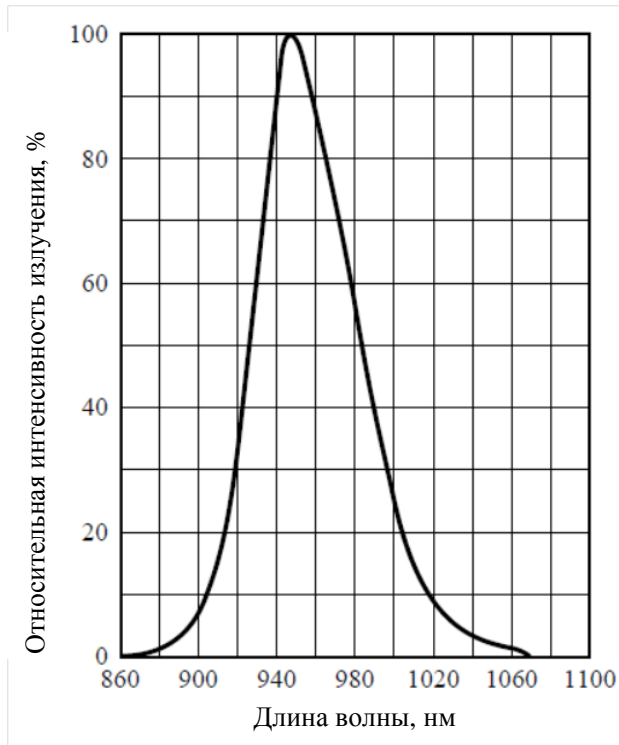


Рис. 8.6. Спектр излучения реального СИД.

С ростом температуры уменьшается ширина запрещенной зоны полупроводника и увеличивается средняя длина волны излучения  $\lambda_0$  и ширина спектра излучения  $\Delta\lambda$  СИД. Температурное смещение  $\lambda_0$  обычно составляет  $\Delta\lambda_0 / \Delta T = 0.2$  нм/К.

Форма реальной спектральной характеристики СИД несколько отличается от (8.5). На рис. 8.6 представлен спектр излучения СИД на основе GaAs с центральной длиной волны 950 нм.

**Ваттамперная (излучательная, модуляционная) характеристика**

Ваттамперная характеристика – это зависимость мощности излучения от прямого тока через  $p$ - $n$  переход. По ваттамперной характеристике можно определить силу тока, необходимую для получения определенной мощности излучения. Типичная статическая излучательная характеристика СИД приведена на рис. 8.7 (экспериментальные данные).

излучательная характеристика СИД приведена на рис. 8.7 (экспериментальные данные).

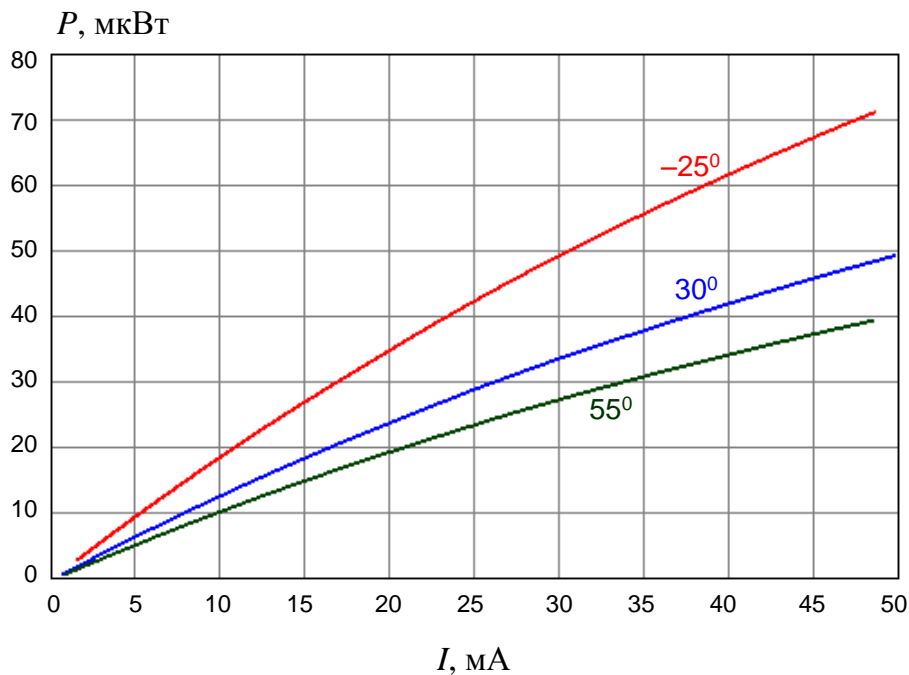


Рис. 8.7. Излучательные характеристики СИД.

Излучательная характеристика СИД линейна в рабочей области. Поток излучения с ростом температуры уменьшается. Мощность излучения уменьшается примерно на 1% при увеличении температуры на 1°C.

### Диаграмма направленности

Диаграмма направленности излучения СИД показывает распределение энергии излучения в пространстве. Ее принято угловой расходимостью, которая оценивается по уровню уменьшения мощности излучения в пространстве в два раза. Угловую расходимость определяют в двух взаимно перпендикулярных плоскостях –  $z, x$  ( $\varphi_x$ ) и  $z, y$  ( $\varphi_y$ ) (рис. 8.8, 8.9).

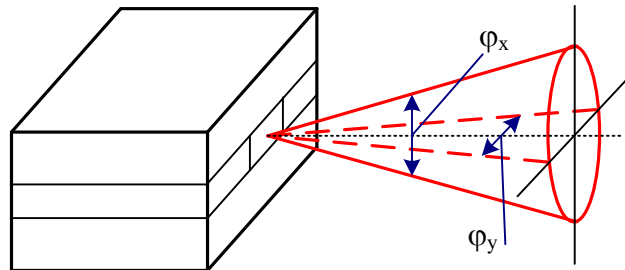


Рис. 8.8. Угловая расходимость излучения СИД

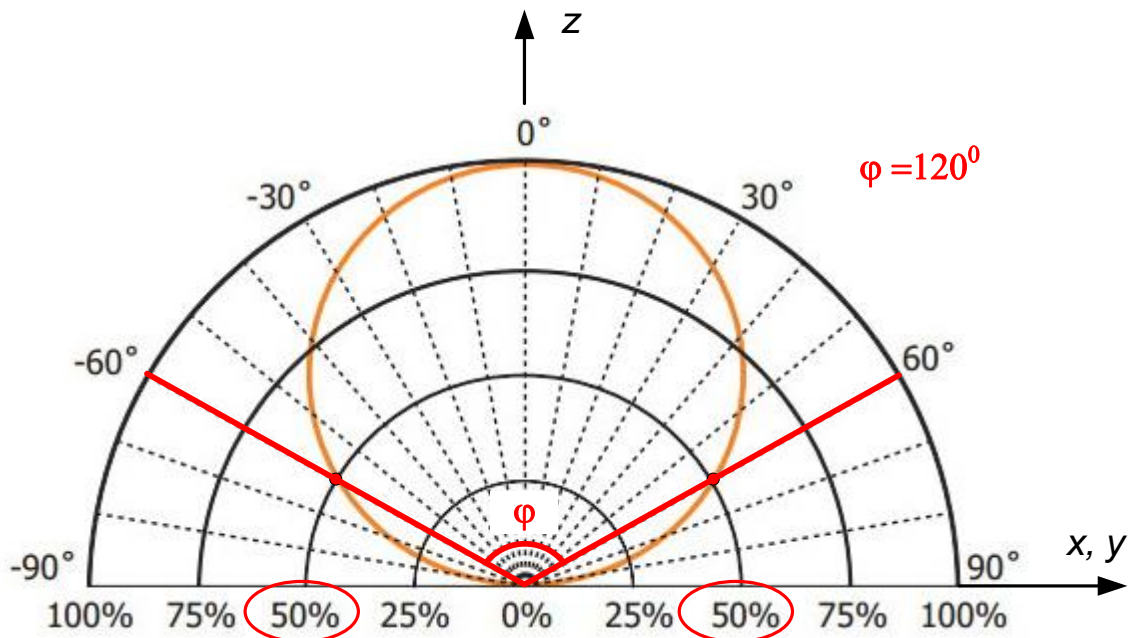


Рис. 8.9. Определение угловой расходимости излучения по диаграмме направленности

### 8.1.3.2. Электрические параметры и характеристики СИД

#### Вольтамперная характеристика

Важной характеристикой СИД, как элемента электрической цепи, является его **вольтамперная характеристика**, которая аналогична характеристике диода и имеет вид

$$I = I_0 \left( \exp \left( \frac{U}{m \cdot \varphi_T} \right) - 1 \right), \quad (8.6)$$

где  $I_0$  – тепловой обратный ток;  $\varphi_T = k \cdot T / q_e$  – температурный потенциал;  $q_e = 1.602 \cdot 10^{-19}$  – заряд электрона, Кл;  $m$  – коэффициент рекомбинации, зависящий от электрофизических свойств полупроводника (для Ge  $m = 1$ , для Si  $m = 2$ , для GaAs  $m = 3$ ).

Ток  $I_0$  называют тепловым обратным током в соответствии с механизмом его образования и сильной зависимостью от температуры. Функцию  $I_0(T)$  характеризуют темпера-

турой удвоения  $T_y$ , то есть приращением температуры, вызывающим удвоение тока. Если нам известен тепловой ток  $I_0(T_0)$  при температуре перехода  $T_0$ , для другой температуры  $T$  тепловой ток  $I_0(T)$  можно рассчитать по выражению:

$$I_0(T) = I_0(T_0) \cdot 2^{\Delta T/T_y}, \quad (8.7)$$

где  $\Delta T = T - T_0$ . Температуру удвоения  $T_y$  можно рассчитать по выражению:

$$T_y = \frac{k \cdot T_0^2}{W_g} \cdot \ln(2), \quad (8.8)$$

На рис. 8.8 приведены вольт-амперные характеристики  $p$ - $n$  переходов для наиболее распространенных материалов.

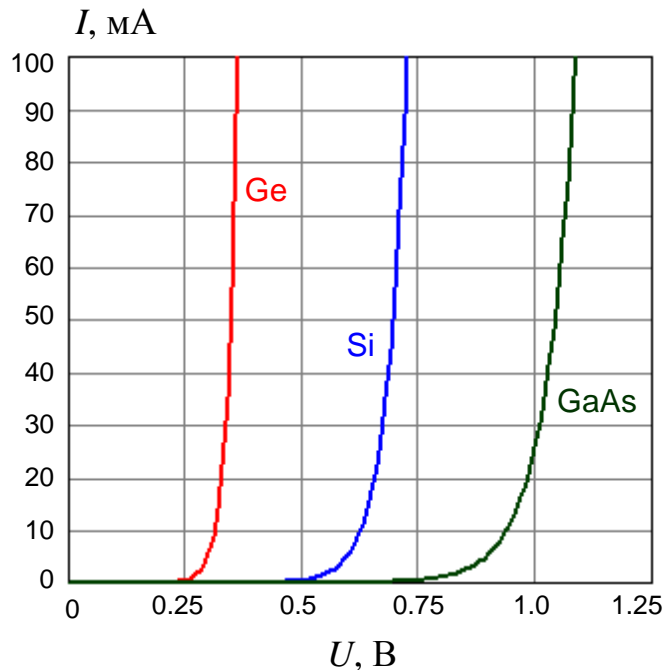


Рис. 8.8. Вольт-амперные характеристики  $p$ - $n$  переходов

### Амплитудно-частотная характеристика и быстродействие СИД

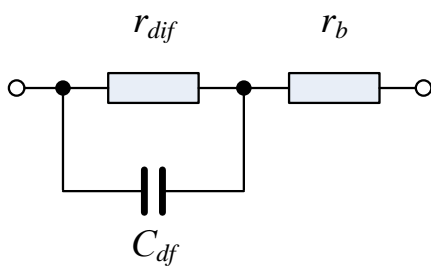


Рис. 8.9. Упрощенная эквивалентная схема излучающего  $p$ - $n$  перехода.

На рис. 8.9 показана упрощенная эквивалентная схема СИД. В схему входят  $r_b$  - сопротивление базы<sup>3</sup> диода ( $p$ -области), которое определяется сопротивлением материала полупроводника, контактов и выводов,  $r_{dif}$  - дифференциальное сопротивление  $p$ - $n$  перехода, которое может быть определено из выражения (8.6)

$$r_{dif} = \frac{dU}{dI} \approx \frac{\varphi_T}{I} \quad (8.9)$$

и  $C_{df}$  - диффузионная емкость, появление которой связано с диффузией в  $p$ - $n$  переход неосновных носителей заряда.

Диффузионная емкость определяет инерционные свойства СИД. При  $U \gg \varphi_T$  для нее справедливо

Диффузионная емкость определяет инерционные свойства СИД. При  $U \gg \varphi_T$  для нее справедливо

<sup>3</sup>  $n$ -область СИД называют эмиттером,  $p$ -область - базой.

$$C_{df} \approx \frac{k_x \cdot I \cdot \tau_{eff}}{\varphi_T}, \quad (8.10)$$

где  $k_x = 0.5 - 1$  – безразмерный коэффициент, зависящий от толщины базы  $W_b$  ( $k_x = 0.5$  для  $W_b \gg L_p$  и  $k_x = 1.0$  для  $W_b \ll L_p$ , где  $L_p$  – длина диффузии);  $\tau_{eff}$  – эффективное время диффузии (время жизни) неосновных носителей заряда в базе, с:

$$\tau_{eff} \approx \sqrt{\frac{q_e \cdot d \cdot S}{I \cdot B}}, \quad (8.11)$$

где  $d$  – толщина активного слоя, см;  $S$  – площадь поперечного сечения базы, см<sup>2</sup>;  $B$  – коэффициент излучательной рекомбинации, см<sup>3</sup>/с. Значения  $B$  для различных материалов приведены в табл. 8.1.

Для определения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) найдем из (8.9–8.11) постоянную времени источника излучения  $\tau_s$ :

$$\tau_s = r_{dif} \cdot C_{df} = k_x \cdot \tau_{eff} = k_x \cdot \sqrt{\frac{q_e \cdot d \cdot S}{I \cdot B}}. \quad (8.12)$$

В первом приближении АЧХ СИД при малых сигналах может быть представлена в виде

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_s^2}}. \quad (8.13)$$

На рис. 8.10 показано семейство АЧХ СИД для различных значений среднего тока через  $p$ - $n$  переход:

$$Y = 10 \cdot \lg \frac{F(\omega)}{F(\omega_0)}. \quad (8.14)$$

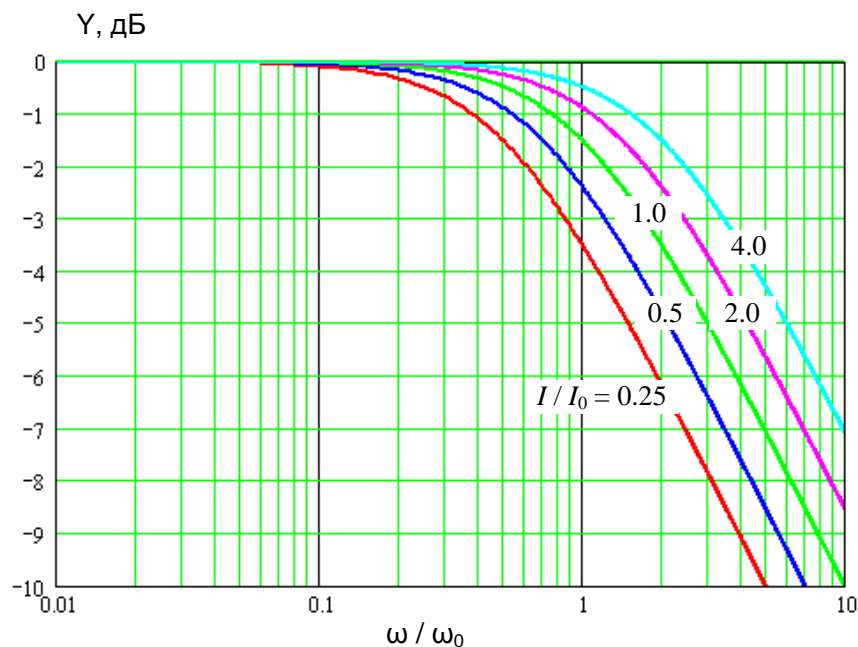


Рис. 8.10. Семейство амплитудно-частотных характеристик СИД при малых входных сигналах

Полоса пропускания СИД (связанная с максимальной скоростью передачи сигналов) может быть определена по срезу АЧХ на уровне -3 дБ. Видно, что с увеличением среднего тока через СИД его полоса пропускания возрастает.

### 8.1.3.3. Конструкции СИД

Конструкция СИД должна обеспечивать эффективность вывода излучения из  $p$ - $n$  перехода и ввода его в оптическое волокно. По конструкции различают СИД с плоскостным или поверхностным (рис. 8.11) и торцевым (рис. 8.12) выводом излучения.

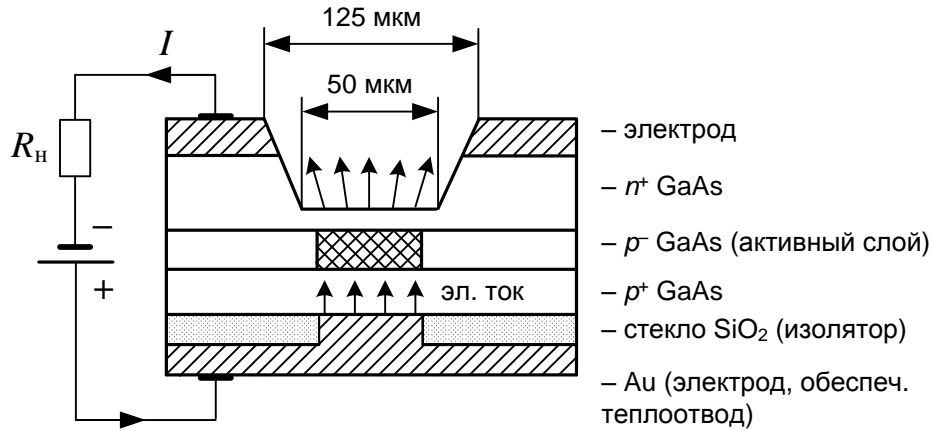


Рис. 8.11. Конструкция и схема включения СИД с плоскостным выводом излучения

В плоскостном СИД спонтанное излучение возникает в тонком слое  $p$ - $n$  перехода и выходит в том же направлении, в котором течет электрический ток (рис. 8.11), то есть перпендикулярно плоскости перехода через подложку. От момента возникновения до выхода из  $p$ - $n$  перехода фотоны проходят очень маленький путь (доли мкм).

Выходящее в подложку излучение будет частично поглощаться материалом подложки, снижая квантовую эффективность. Чтобы уменьшить этот эффект в подложке делается отверстие, через которое торец ОВ практически вплотную приближается к активной области СИД.

Такие СИД имеют широкую примерно симметричную диаграмму направленности ( $\varphi_x \approx \varphi_y$ ) с расходимостью излучения  $120$ – $150^\circ$  и вследствие этого низкую эффективность ввода излучения в волокно. Ширина спектра излучения плоскостного СИД составляет  $30$  –  $60$  нм.

СИД с торцевым выводом излучения (рис. 8.12) имеют лучшие характеристики. У простейшего торцевого СИД активный слой имеет форму параллелепипеда длиной  $L$ , шириной  $w$  и толщиной  $d$  ( $L > w \gg d$ ). На рис. 8.12 показан СИД с двойной гетероструктурой. Название «двойная гетероструктура» обозначает, что эта конструкция имеет двойной слой различных по свойствам (ширине запрещенной зоны) полупроводников, прилегающих к активному слою, которые отличают эту конструкцию от простейшего ЛД с  $p$ - $n$  переходом. Показатель преломления активного слоя выше показателей преломления полупроводниковых слоев оболочек, поэтому создаются условия для удержания и распространения в нем возникающих фотонов. В результате возникшие фотоны проходят в активном слое значительный путь, так как  $L$  может составлять  $50$ – $1000$  мкм. На этом пути спонтанно возникшие фотоны способны вызвать стимулированные ими же фотоны. В результате излучение СИД становится слабокогерентным. При этом увеличивается общая излучаемая мощность, сужается спектр излучения и диаграмма направленности.

Торцевые СИД имеют ширину спектра  $10$  –  $30$  нм, диаграмму направленности, в поперечном сечении представляющую собой эллипс с углами расходимости по меньшей оси  $30^\circ$ , а по большей  $120^\circ$ .

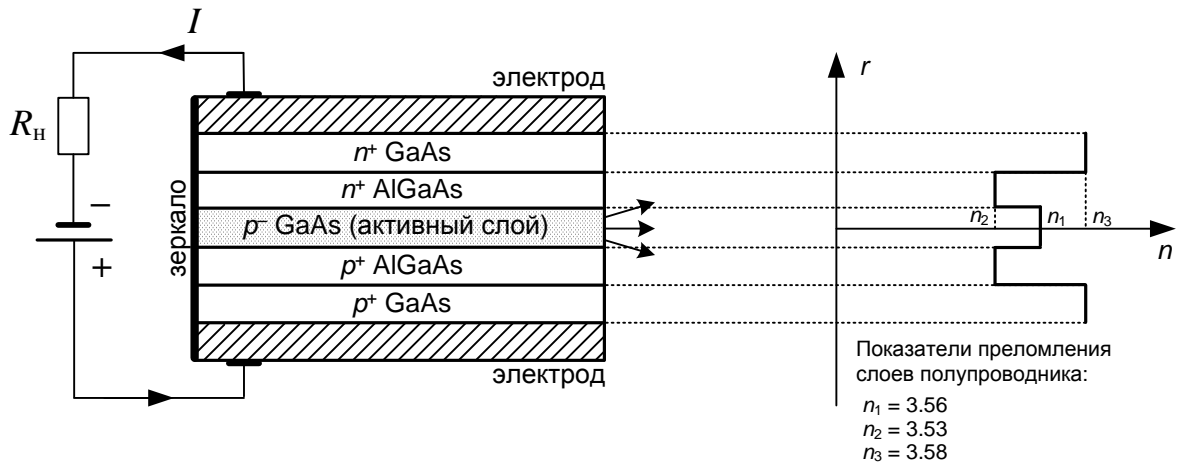


Рис. 8.12. Конструкция и схема включения СИД с торцевым выводом излучения

На основе торцевых СИД созданы суперлюминесцентные диоды, конструкция которых оптимизирована с целью увеличения доли когерентного излучения. Суперлюминесцентные диоды по своим параметрам занимают промежуточное место между обычными СИД и ЛД.

#### 8.1.3.4. Недостатки СИД

При использовании СИД для передачи цифровых сигналов они характеризуются рядом недостатков, основными из которых являются:

- 1) низкое по современным понятиям быстродействие, ограничивающее максимальную скорость передачи на уровне 100- 500 Мбит/с.
- 2) широкий спектр излучения, что резко снижает скорость передачи по одномодовым ОВ вследствие хроматической дисперсии;
- 3) низкая эффективность ввода излучения в оптическое волокно, даже для СИД с торцевым излучением.

### 8.1.4. Лазерные диоды

#### 8.1.4.1. Принцип действия ЛД

Главной особенностью ЛД является когерентный характер его излучения. Когерентность характеризует согласованность между фазами колебаний в различных точках пространства в один и тот же момент времени – пространственная когерентность или между фазами колебаний в одной и той же точке пространства в различные моменты времени – временная когерентность. Абсолютно когерентным является монохроматический точечный источник излучения. Степень когерентности реального источника характеризуется временем когерентности  $\tau_k$  и длиной когерентности  $L_k$ :

$$L_k = c \cdot \tau_k. \quad (8.15)$$

Работа ЛД основана на явлении вынужденной люминесценции. Само слово лазер изначально являлось не самостоятельным словом, а аббревиатурой: **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation – усилитель света путем вынужденного излучения.

#### *Условия, при которых возникает усиление света*

Пока кристалл полупроводника находится в состоянии равновесия переходы, сопровождающиеся излучением и поглощением света, уравниваются друг друга, и усиления света не происходит. Для того чтобы в кристалле могло возникнуть усиление света, нужен внешний источник энергии – источник **накачки**. Необходимо также, чтобы кристалл получил от этого источника количество дополнительной энергии, достаточное для

того чтобы вынужденное излучение начало преобладать над спонтанным. Критерием служит возникновение **инверсии населенностей** энергетических уровней – состояния, когда число возбужденных атомов превышает число невозбужденных.

В полупроводниковых лазерах чаще всего электрическая накачка – пропускание через кристалл электрического тока. Инверсия населенностей возникает после достижения током накачки некоторого порогового значения. Типовые значения порогового тока составляют от единиц до сотен миллиампер.

### **Условия, при которых возникает генерация света**

Для того, чтобы от режима усиления перейти к режиму генерации света, в лазере используют положительную обратную связь. Обратная связь создается с помощью оптического резонатора, который в простейшем случае представляет собой пару параллельных зеркал – такой лазер называют лазером с резонатором Фабри-Перо или просто лазером Фабри-Перо (в зарубежной литературе FP – Fabry-Perot). Возникновение генерации в простейшем резонаторе длиной  $L$ , состоящем из двух полупрозрачных зеркал с коэффициентами отражения  $R_1$  и  $R_2$ , поясняется рис. 8.13.

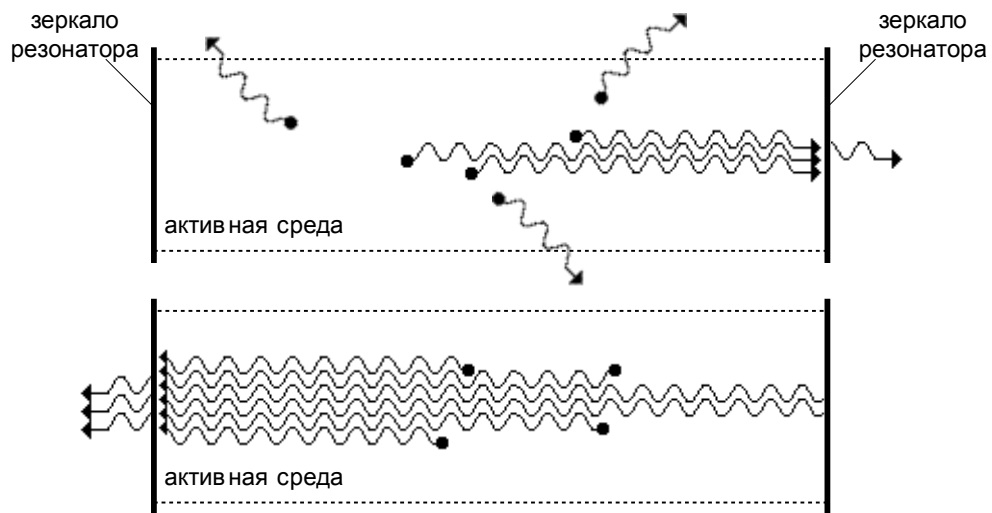


Рис. 8.13. Возникновение генерации в оптическом резонаторе.

### **Первое условие генерации (амплитудное)**

Для возникновения генерации, во-первых, необходимо, чтобы *усиление света* за счет вынужденного излучения в инвертированной среде *превышало величину потерь*, которые складываются из затухания в активной среде и потерь на отражения от полупрозрачных зеркал. В простейшем случае, полагая, что резонатор лазера полностью заполнен активной средой, первое условие генерации можно записать в виде:

$$R_1 R_2 \exp((g - \alpha) \cdot L) \geq 1, \quad (8.16)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – коэффициенты отражения от зеркал резонатора (по амплитуде световой волны),  $g$  – коэффициент усиления света в инвертированной активной среде,  $\alpha$  – коэффициент затухания света в активной среде,  $L$  – длина резонатора (расстояние между зеркалами).

### **Первое условие генерации (фазовое)**

Генерация при выполнении первого условия возможна только для волн совпадающих друг с другом по фазе. Для этого необходимо, чтобы на длине резонатора укладывалось целое число полувольт генерируемого излучения:

$$L = i \cdot \frac{\lambda_a}{2} = i \cdot \frac{\lambda}{2n_a}, \quad (8.17)$$

где  $i$  – целое число,  $\lambda_a$  – длина волны генерируемого излучения в активной среде,  $\lambda$  – длина волны генерируемого излучения в вакууме,  $n_a$  – показатель преломления активной среды.

**Лазер работает следующим образом** (рис. 8.13). Сначала источник накачки, воздействуя на активную среду создает в ней инверсию населенностей. Затем инвертированная среда начинает спонтанно излучать кванты света. Под действием спонтанного излучения начинается процесс вынужденного излучения света.

Потоки света, идущие в боковых направлениях, быстро покидают активную среду, не успев набрать значительную энергию. В то же время световая волна, распространяющаяся вдоль оси резонатора, переотражаясь между зеркалами, многократно проходит активный элемент, непрерывно набирая энергию. Благодаря инверсии населенностей этот процесс носит лавинообразный характер и приводит к экспоненциальному усилению света.

Благодаря частичному пропусканию света одним из зеркал резонатора (или обоими зеркалами), излучение выводится наружу, образуя лазерный луч.

Мощность лазерного излучения может составлять от долей и единиц мВт до нескольких сотен милливатт.

#### 8.1.4.2. Оптические параметры и характеристики ЛД

##### **Модовый состав излучения**

В ЛД структура электромагнитного поля определяется, в основном, параметрами резонатора. В резонаторе условия генерации выполняются для нескольких типов колебаний, каждое из которых характеризуется своей частотой. Такие типы колебаний называют модами. Каждую отдельную моду характеризуют тремя целыми числами ( $i, j, k$ ), которые называются модовыми числами и соответствуют числу максимумов распределения электромагнитного поля в резонаторе по трем взаимно перпендикулярным направлениям.

Полезными являются продольные моды, частоты которых определяются в основном показателем преломления активной среды  $n_a$  и длиной резонатора  $L$ .

Рассмотрим модовый состав излучения на примере ЛД с резонатором Фабри-Перо. Для него частоты  $\nu_i$  и длины волн  $\lambda_i$  продольных мод можно найти из фазового условия (8.17):

$$\lambda_i = \frac{2 \cdot L \cdot n_a}{i}, \quad \nu_i = \frac{i \cdot c}{2 \cdot L \cdot n_a}, \quad (8.18)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме,  $n_a$  – показатель преломления активной среды,  $L$  – длина резонатора,  $i$  – продольное модовое число (число полуволн, укладываемых на длине резонатора),  $\lambda_i$  – длина волны в вакууме. На рис. 8.14 показан спектр излучения лазера с резонатором Фабри-Перо.

Интервал по частоте  $\Delta \nu_m$  между соседними продольными модами  $i$  и  $i+1$  составляет:

$$\Delta \nu_m = \frac{c}{2 \cdot L \cdot n_a} [(i+1) - i] = \frac{c}{2 \cdot L \cdot n_a}. \quad (8.19)$$

Величине  $\Delta \nu_m$  соответствует интервал  $\Delta \lambda_m$  между соседними модами:

$$\Delta \lambda_m = \frac{\Delta \nu_m \cdot \lambda_0^2}{c} \quad (8.20)$$

При  $\lambda_0 = 1.55$  мкм,  $n_a = 4$ ,  $L = 200$  мкм получаем  $\Delta \lambda_m = 1.5$  нм.



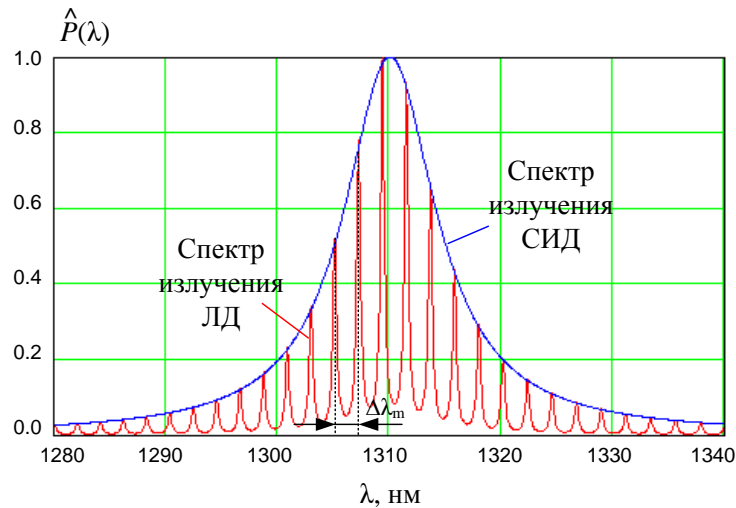
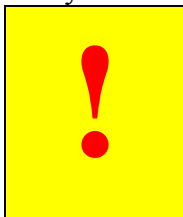


Рис. 8.14. Спектр излучения ФР лазера

Лазер Фабри-Перо сам по себе является многомодовым. Уменьшение длины резонатора  $L$  приводит к возрастанию межмодового интервала  $\Delta\lambda_m$ , поэтому в пределы линии усиления будет попадать меньше мод, а значит, мощность каждой моды будет выше. По этой причине предпочтительнее короткие резонаторы (менее 100 мкм). Они дают возможность работать с одной продольной модой при более высокой выходной мощности.

На рис. 8.14 показан спектр излучения ФР лазера. Общая ширина огибающей спектра усиления лазера и ее центральная длина волны приблизительно определяются выражениями (8.4) и (8.1). Пока лазер не вышел в режим генерации, он ведет себя как СИД, излучая в относительно широком спектре длин волн.



Обратите внимание, что центральная длина волны огибающей спектра усиления лазера в общем случае не совпадает с длиной волны центральной полосы генерации лазера, положение которой определяется фазовым условием (8.17).

Ширина полосы генерации лазера  $\Delta\nu$  связана с **добротностью резонатора**, под которой понимают величину:

$$Q = \frac{\nu_0}{\Delta\nu}, \quad (8.21)$$

где  $\nu_0$  – частота, соответствующая центральной полосе генерации лазера. Для резонатора Фабри-Перо добротность может быть рассчитана по выражению:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_a \cdot L \cdot \nu_0 \cdot \sqrt[4]{R_1 R_2}}{c \cdot (1 - \sqrt{R_1 R_2})}, \quad (8.22)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – коэффициенты отражения от зеркал резонатора. Из (8.21) и (8.22) получаем:

$$\Delta\nu = \frac{\nu_0}{Q} = \frac{c \cdot (1 - \sqrt{R_1 R_2})}{2 \cdot \pi \cdot n_a \cdot L \cdot \sqrt[4]{R_1 R_2}}. \quad (8.23)$$

Это соответствует:

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta\nu \cdot \lambda_0^2}{c} \quad (8.24)$$

При возрастании температуры длина волны  $\lambda_0$ , соответствующая максимуму огибающей спектра лазера, сдвигается в сторону больших значений. Ширина огибающей спектров излучения лазеров и температурные изменения длины волны приведены в табл. 8.2. Из таблицы видно, что температурные коэффициенты, также как и расстояние между

продольными модами, изменяются примерно обратно пропорционально квадрату длины волны.

Табл. 8.2. Параметры ЛД

Параметр	Значения		
Длина волны, соответствующая максимуму огибающей спектра, $\lambda_0$ , нм	850	1300	1550
Ширина огибающей спектра, $\Delta\lambda$ , нм	2,0	5,0	7,0
Расстояние между продольными модами ( $L = 200$ мкм), $\Delta\lambda$ , нм	0,4	1,0	1,5
Температурный коэффициент изменения $\lambda_0$ , $d\lambda_0/dT$ , нм/град	0,22	0,5	0,73

Одним из недостатков резонаторов Фабри-Перо является наличие в них поперечных мод, искажающих спектр генерации лазера и обуславливающих флуктуации мощности (шумы) излучения. Эти моды проявляются как сателлиты (спутники) каждой продольной моды. Межмодовые интервалы для поперечных мод составляют 0,01...0,02 нм. Число поперечных боковых (lateral) мод и значения пороговых токов для их возникновения зависят от ширины резонатора. Уменьшение его ширины до 10 мкм и менее увеличивает пороги возникновения поперечных мод высоких порядков до уровней тока, превышающих возможности лазера, т.е. они не возникают. Высота активного слоя в ЛД на двойной гетероструктуре всегда менее одного микрометра, что в большинстве случаев меньше длины волны. В результате в резонаторе может возбуждаться только одна низшая поперечная (transverse) мода.

#### **Ваттамперная (излучательная, модуляционная) характеристика**

Ваттамперная характеристика – это зависимость мощности излучения от прямого тока, который в случае ЛД называют током накачки. ЛД имеет нелинейную ваттамперную характеристику, которую можно в первом приближении разбить на два участка (рис. 8.15)

$$P(I_p) = \begin{cases} k_1 \cdot I_p & \text{при } I_p < I_{th} \\ k_2 \cdot (I_p - I_{th}) + k_1 \cdot I_p & \text{при } I_p \geq I_{th} \end{cases} \quad (8.21)$$

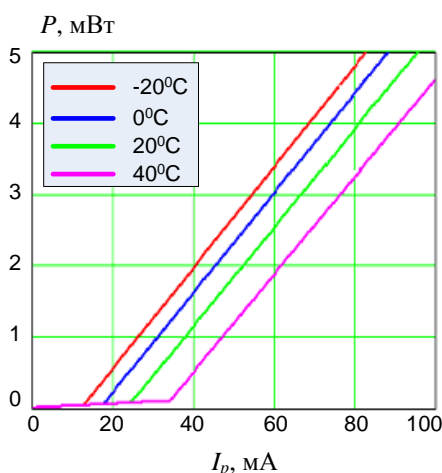


Рис. 8.15. Ватт-амперная характеристика ЛД

На первом участке при малых токах накачки (меньше порогового тока  $I_{th}$ ) ЛД фактически работает как торцевой СИД с малой крутизной ватт-амперной характеристики ( $k_1 = dP/dI_p$ ). При больших токах накачки (больше порогового тока  $I_{th}$ ) ЛД работает в режиме лазерной генерации с высокой крутизной ватт-амперной характеристики ( $k_2 = dP/dI_p$ ).

При приложении напряжения от внешнего источника лазерный диод не сразу переходит в режим генерации излучения. При токе меньше порогового имеет место спонтанное излучение с большой шириной спектра излучения – несколько десятков мкм (синяя огибающая на рис. 8.14). ЛД работает как СИД. При достижении током накачки порогового значения ЛД переходит в режим генерации (красная кривая на рис. 8.14), при этом испус-

<sup>4</sup> threshold value – пороговое значение, pump - накачка

каемое излучение существенно сужается одновременно по ширине спектра и по пространственной расходимости. С дальнейшим увеличением тока накачки ширина спектра сужается до 2-5 нм для многомодовых ЛД. С увеличением тока также может сдвигаться центральная длина волны из-за повышения температуры  $p-n$  перехода.

Пороговый ток в значительной степени зависит от температуры:

$$I_{th} = I_{th0} \cdot \exp(\Delta T / T_D) \quad (8.22)$$

где  $T_D$  - характеристическая температура или температура Дебая (см. табл. 8.1),  $I_{th0}$  - пороговый ток при температуре  $T_D$ . Обычно пороговый ток для ЛД с мощностью до нескольких мВт составляет 45-80 мА.

По ваттамперной характеристике можно определить ток накачки, необходимый для получения требуемой мощности излучения.

#### ***Диаграмма направленности***

На пространственное распределение поля излучения, в основном, оказывает влияние наличие боковых поперечных мод. Угловая расходимость излучения зависит от толщины активного слоя и скачка показателя преломления в гетероструктуре. Обычно диапазон углов, в котором интенсивность превышает половину максимальной, составляет примерно  $40^\circ$  в плоскости, перпендикулярной плоскости  $p-n$  перехода, и  $5^\circ \dots 10^\circ$  в плоскости, параллельной  $p-n$  переходу.

### **8.1.4.3. Электрические параметры и характеристики ЛД**

#### ***Вольтамперная характеристика***

По вольтамперной характеристике можно определить напряжение, которое нужно приложить к ЛД, чтобы через него потек нужный ток. Вольтамперная характеристика ЛД принципиально не отличается от вольтамперной характеристики СИД. Напряжение на ЛД в режиме лазерной генерации при номинальном токе накачки составляет 1.5–2 В для GaAlAs ЛД ( $\lambda=0.85$  мкм) и около 1.2 В для InGaAsP/InP ЛД ( $\lambda=1.3-1.55$  мкм).

#### ***Коэффициент полезного действия***

Коэффициент полезного действия ЛД при номинальном режиме составляет 10-15%. Он определяется отношением излучаемой оптической мощности к потребляемой электрической мощности. Квантовый выход ЛД непрерывного излучения достигает 40-60%.

### **8.1.4.4. Конструкции ЛД**

#### ***ЛД с резонатором Фабри-Перо***

На рис. 8.16а показана конструкция лазера с резонатором Фабри-Перо (FP), изготовленного на основе арсенида галлия. Конструкция этого лазера в целом аналогична конструкции торцевого СИД. Отличие заключается в наличии второго зеркала, формирующего резонатор. Зеркала (френелевские отражатели) получают шлифовкой торцевых поверхностей кристалла или простым скалыванием искусственного кристалла вдоль атомных плоскостей, перпендикулярных оси резонатора. Толщина активного слоя составляет от 0.1 до 1 мкм.

Его номинальная излучаемая длина волны составляет 871 нм (табл. 8.1). Однако ею можно управлять в диапазоне примерно от 750 до 880 нм, например, изменяя соотношение галлия и алюминия в оболочках (параметр  $x$ , см. табл. 8.1) и/или размеры активной области. На рис. 8.16б показан спектр такого ЛД с центральной длиной волны 817.5 нм.

Такой ЛД является многомодовым, то есть наряду с главным пиком, в котором сосредоточена основная мощность излучения, существуют побочные максимумы. Ширина спектра обычно составляет 2-3 нм. При пороговом токе порядка 10 мА они имеют выход-

ную мощность 5 – 10 мВт. Температурный дрейф длины волны у лазера без термостабилизации составляет  $0.4 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ .

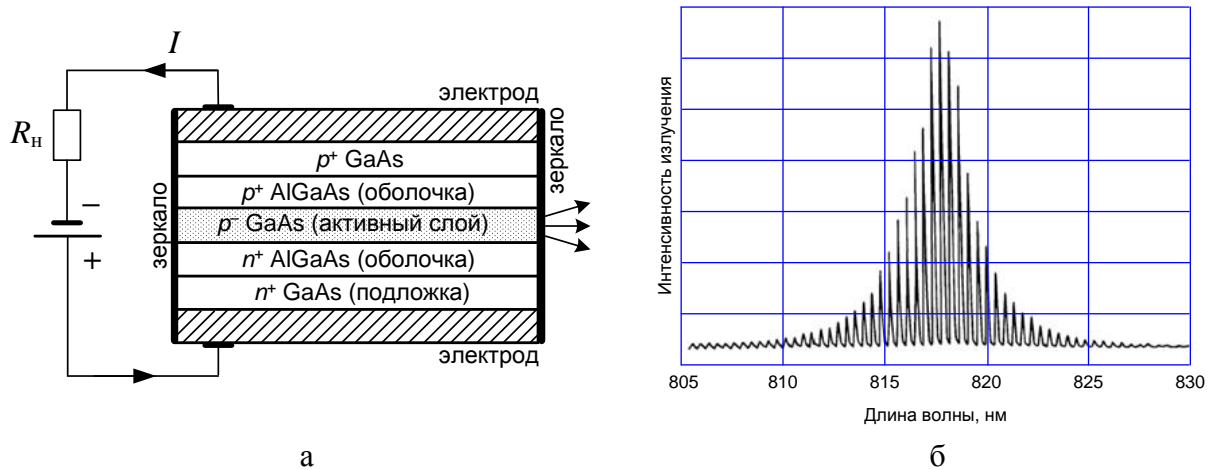


Рис. 8.16. Конструкция и схема включения ЛД с резонатором Фабри Перо (а) и типичный спектр его излучения (б)

Основным достоинством такого лазера является простота конструкции и малая стоимость. Основные недостатки, ограничивающие использование этих источников в ВОСП: большая ширина спектра излучения и большая температурная зависимость излучаемых длин волн.

Лазеры FP находят применение на линиях небольшой протяженности (локальные сети) при прямой модуляции излучения током через  $p$ - $n$  переход ЛД.

ЛД Фабри-Перо является многомодовым. Для использования его в качестве одномодового можно использовать оптический фильтр. Однако для одномодовой работы чаще используют одномодовые ЛД:

- с распределенной обратной связью (DFB - distributed feedback laser),
- с распределенным брэгговским отражением (DBR - distributed Bragg reflector),
- с вертикальным резонатором (VCSEL - Vertical-Cavity Surface Emitting Laser).

### ***ЛД с распределенной обратной связью***

Резонатор ЛД DFB состоит из активной среды, включающей в себя периодическую отражающую структуру – решетка Брэгга, которая либо наносится на поверхность волновода, либо вытравливается в нем. В этой структуре возникает брэгговское отражение (рис. 8.17).

Период решетки  $\Lambda$  подбирается так, чтобы от нее отражалась нужная длина волны  $\lambda$ . Для этого должно выполняться фазовое условие Брэгга:

$$2n_{eff}\Lambda \sin \theta_B = \lambda, \quad (8.23)$$

где  $n_{eff}$  – средний показатель преломления решетки Брэгга вдоль оптической оси резонатора  $z$ ,  $\theta_B$  – угол между нормалью к плоскости решетки и осью  $z$ . Поскольку  $\theta_B$  в данном случае равен  $90^\circ$ , (8.23) принимает вид:

$$2n_{eff}\Lambda = \lambda, \quad (8.24)$$

Условие отражения от периодической структуры (8.24) выполняется для лучей обоих направлений. Таким образом, периодическая решетка создает селективную обратную связь в обоих направлениях, распределенную по всей длине ЛД, то есть она одновременно является и резонатором и фильтром. Благодаря селективности обратной связи в ЛД DFB обеспечивается режим одномодовой генерации. Спектр DFB лазера с длиной волны 1590 нм показан на рис. 8.18.

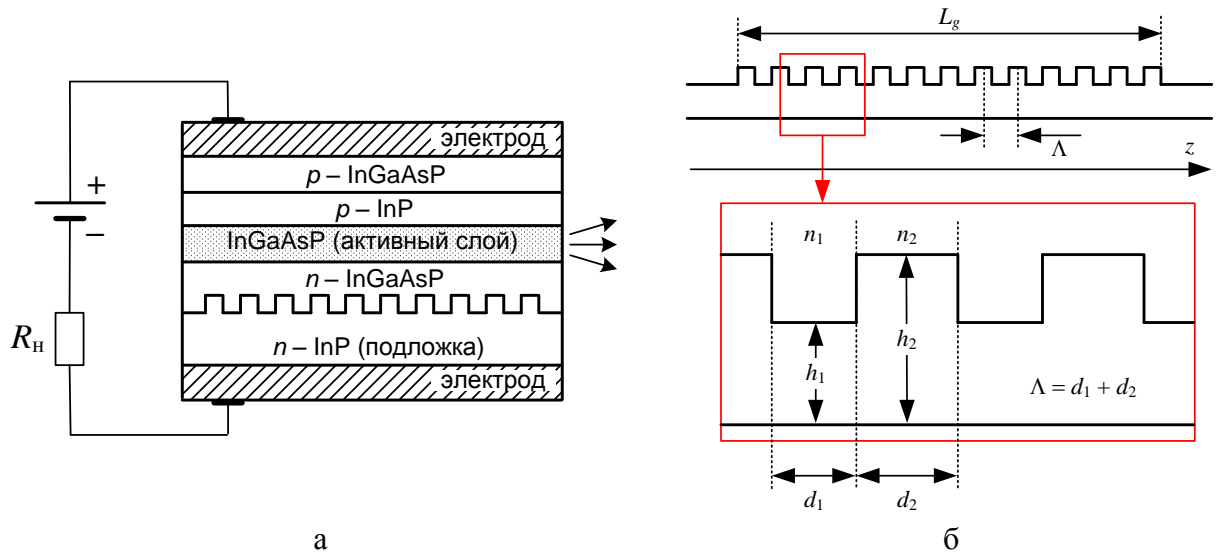


Рис. 8.17. Конструкция и схема включения ЛД DFB (а) и конструкция решетки Брэгга (б)

ЛД DFB способны излучать в различных спектральных диапазонах, от 0.8 мкм до 2.8 мкм. При использовании стабилизации температуры у ЛД DFB наблюдается высокая стабильность длины волны. Выходная мощность может составлять десятки милливатт.

Ширина спектра излучения  $\Delta\lambda$  лазера DFB оценивается на уровне  $-20$  дБ от максимального значения интенсивности. В настоящее время существуют ЛД DFB с  $\Delta\lambda = 0.01$  нм. В спектре излучения ЛД DFB наблюдаются боковые моды, величина подавления которых SMSR (Side Mode Suppression Ratio) должна быть не менее 30 дБ.

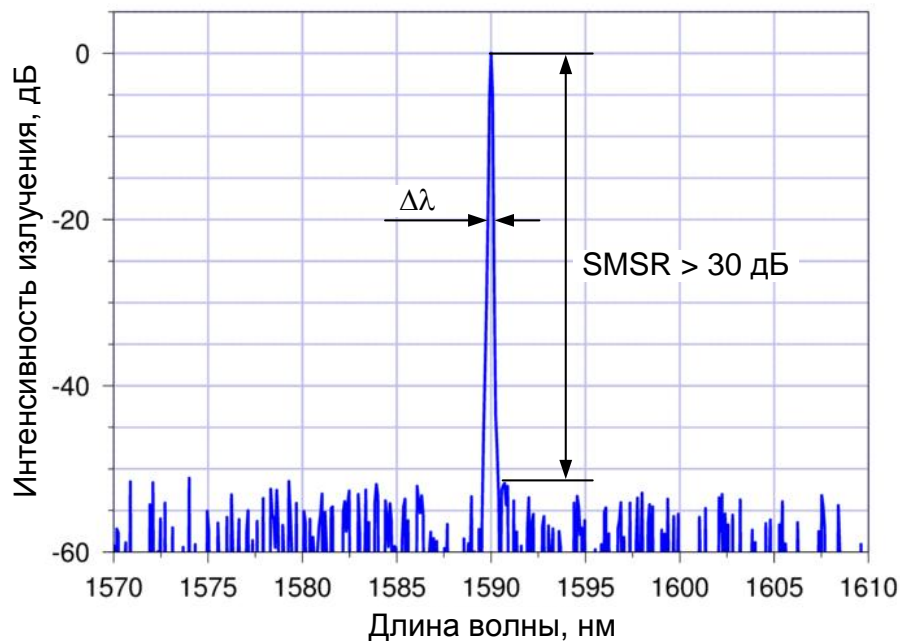


Рис. 8.18. Спектр излучения ЛД DFB

Лазер DFB можно сделать перестраиваемым. Известно, что коэффициент температурной зависимости длины волны излучения такого лазера составляет около  $0.07-0.09$  нм/К<sup>5</sup>. Поэтому, управляя температурой лазера, можно управлять длиной волны. Достоин-

<sup>5</sup> Изменение длины волны с изменением температуры происходит из-за температурной зависимости показателя преломления.

ством такого перестраиваемого источника является простота реализации. Однако диапазон перестройки длины волны составляет всего около 400 ГГц (несколько нанометров).

Ограниченная область перестройки является одним из основных недостатков этих лазеров. Лучшими возможностями обладают ЛД DBR с распределенным брэгговским отражением

### ***ЛД с распределенным брэгговским отражением***

В ЛД DBR в качестве зеркал резонатора также, как и у ЛД DFB, используется решетка Брэгга, но она вынесена за пределы активной среды резонатора.

На рис. 8.19 показана одна из возможных конструкций ЛД DBR с двумя решетками Брэгга. Решетки Брэгга ведут себя как зеркала, которые могут отражать свет только одной длины волны. Однако для получения узкого спектра отражения решетка должна быть относительно больших размеров и с небольшой глубиной модуляции, поэтому резонатор ЛД DBR (и DFB) обычно длиннее, чем у ЛД FP<sup>6</sup>.

Спектр излучения ЛД DBR имеет такой же вид, как и спектр ЛД DFB. Однако за счет большей свободы при формировании внешних решеток Брэгга в лазере DBR легче достичь узкой ширины спектра излучения.

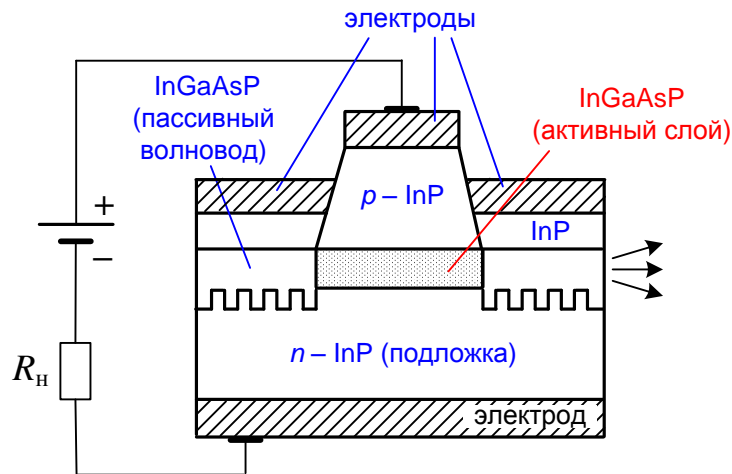


Рис. 8.19. Конструкция ЛД DBR

Лазер DBR можно перестраивать за счет изменения показателей преломления решеток. Для этого к боковым электродам прикладывается управляющее напряжение, которое изменяет ток через области решеток, при этом изменяются их показатели преломления и решетки перестраиваются на другую длину волны. Поскольку показатель преломления существенно зависит от управляющего тока, лазер DBR перестраивается в широких пределах.

Еще одним достоинством DBR лазеров является высокая стабильность длины волны при осуществлении высокоскоростной модуляции.

### ***ЛД с вертикальным резонатором***

ЛД VCSEL в отличие от ранее рассмотренных излучают свет в направлении, перпендикулярном поверхности кристалла.

<sup>6</sup> Спектр отражения брэгговского отражателя определяется числом интерферирующих отраженных пучков, которое равно числу штрихов решетки. С увеличением числа интерферирующих пучков ширина спектра отражения уменьшается. Поэтому увеличением числа штрихов (длины решетки) можно добиться того, что условия генерации будут выполняться только для одной моды. Длина резонатора DBR – менее 2 мм, DFB – менее 1 мм

Современные варианты конструкции ЛД VCSEL основаны на использовании вертикальных оптических микрорезонаторов с зеркалами на основе чередующихся слоев полупроводниковых материалов различного состава (например, твердых растворов AlGaAs с различным содержанием Al). Один из вариантов конструкции представлен на рис. 8.20.

В отличие от обычных лазеров у вертикально излучающего очень малая угловая расходимость луча и хорошая симметричность диаграммы направленности выходного излучения. Излучающая площадка такого ЛД может иметь форму квадрата, эллипса или круга и размер от 1 до 100 мкм в зависимости от применения. Поэтому при использовании VCSEL можно подобрать такую структуру излучения, которая обеспечит намного лучшее согласование с ОВ, чем в случае ЛД с торцевым излучением или СИД. Дополнительным преимуществом является стабильность температуры и параметров излучения.

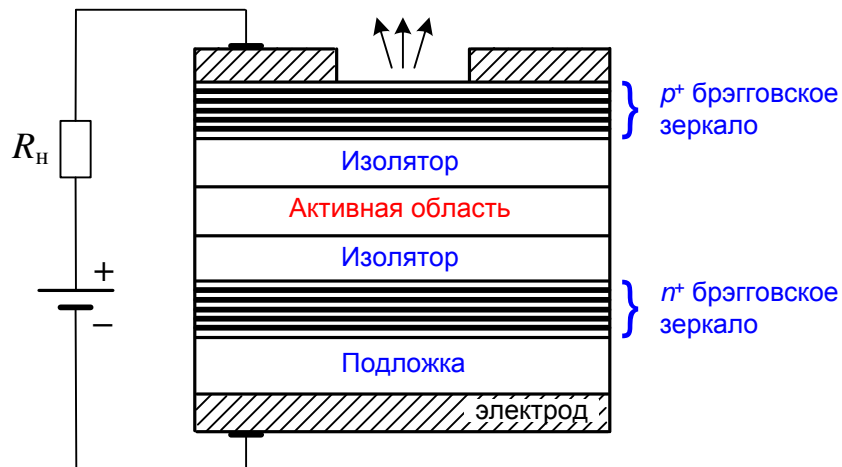


Рис. 8.20. Конструкция ЛД VCSEL

Типичная ширина спектра ЛД VCSEL больше, чем у ЛД DFB и DBR и составляет 0.8 нм на уровне половины максимальной интенсивности.

С точки зрения технологичности производства большим достоинством является возможность на одной пластине изготавливать лазеры VCSEL большими группами (рис. 8.21).

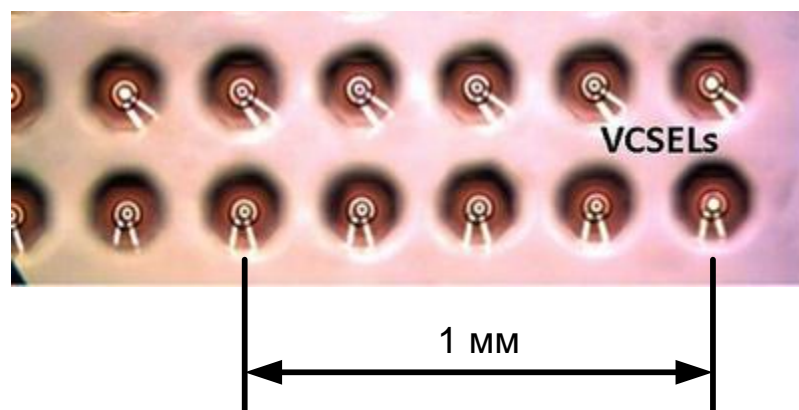


Рис. 8.21. ЛД VCSEL, размещенные на одной подложке

В настоящее время массово производятся ЛД VCSEL, обеспечивающие работу ВОСП со скоростями до 10 Гбит/с. В 2013 году американские ученые заявили о создании ЛД VCSEL для ВОСП со скоростью 40 Гбит/с.

## 8.2. Модуляция оптического излучения

### 8.2.1. Функции передающего оптического модуля. Внутренняя и внешняя модуляция

Одним из важнейших узлов оптических систем связи являются передающие оптические модули (ПОМ), которые выполняют следующие функции:

- Генерация оптического излучения в источнике излучения (ИИ).
- Модуляция оптического излучения передаваемым электрическим сигналом.
- Ввод оптического излучения в среду передачи с помощью устройств согласования с ОВ.

Различают ПОМ с внутренней или прямой модуляцией и ПОМ с внешней модуляцией (рис. 8.22). Внутренняя модуляция осуществляется путем изменения тока накачки через  $p$ - $n$  переход ИИ (СИД или ЛД). Для осуществления внешней модуляции используются специальные устройства – оптические модуляторы.

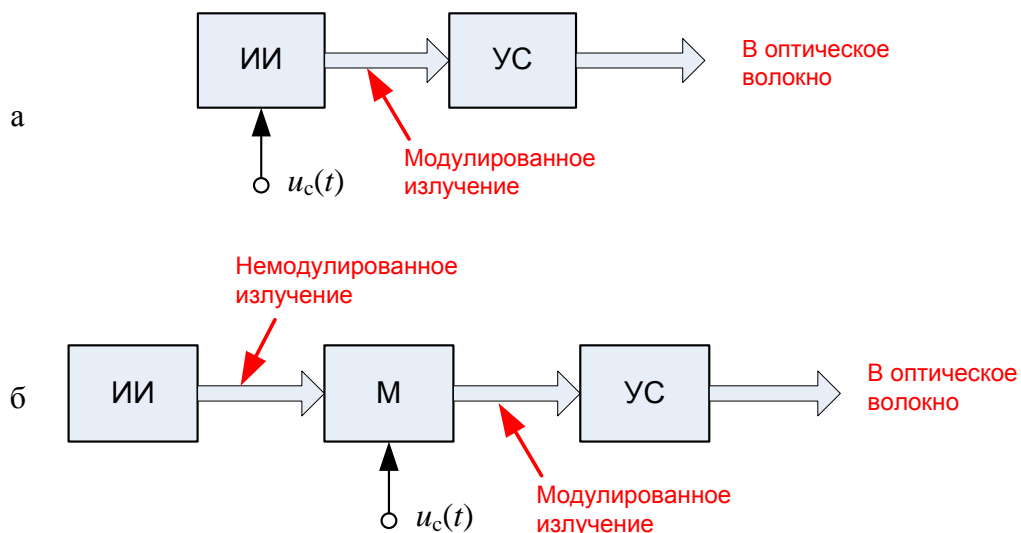


Рис. 8.22. Структурные схемы ПОМ с внутренней (прямой) (а) и внешней (б) модуляцией: ИИ – источник излучения, М – модулятор, УС – устройство согласования.

Передающие устройства на основе СИД используют обычно только внутреннюю модуляцию. Передающие устройства на основе ЛД могут иметь как внутреннюю модуляцию, так и внешний модулятор.

### 8.2.2. Получение цифрового сигнала

Большинство современных систем связи являются цифровыми. Преобразование аналоговых сигналов (например, речи или видео) в цифровую форму происходит в несколько этапов (рис. 8.23):

1. Дискретизация аналогового сигнала. Дискретизация основана на теореме Котельникова, в соответствии с которой по каналу связи можно передавать вместо непрерывного аналогового сигнала его отдельные отсчеты.

**!** Теорема Котельникова утверждает, что любая функция с ограниченным частотой  $f_{up}$  спектром может быть представлена в виде последовательности отсчетов, взятых через интервал времени  $\Delta t \leq 1/(2 \cdot f_{up})$ . Эта последовательность может быть без погрешности вновь превращена в исходный сигнал, если ее пропустить через идеальный ФНЧ.



2. Квантование отсчетов сигнала. Для этого диапазон возможных изменений амплитуды отсчетов разделяется на  $2^n$  уровней квантования (обычно  $n = 8$ ) и каждому отсчету приписывается значение, соответствующее ближайшему нижнему уровню.

3. Кодирование отсчетов сигнала. На этом этапе каждый отсчет кодируется  $n$ -разрядным кодом. Код представляет собой номер уровня квантования, соответствующего отсчету, в двоичной форме.

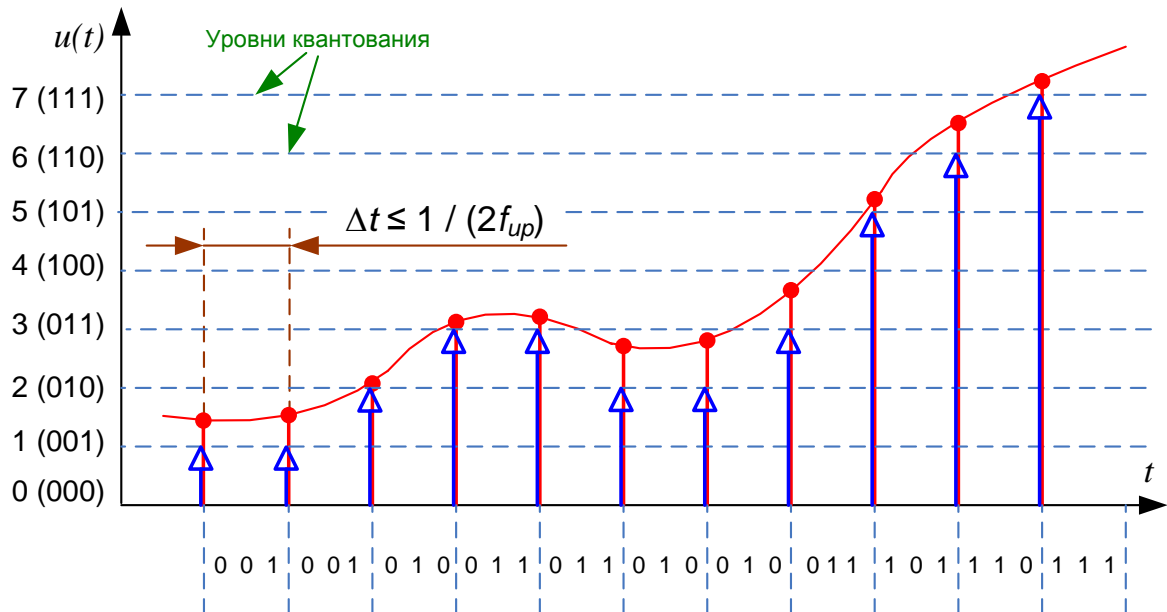


Рис. 8.23. Получение цифрового сигнала

Описанная процедура позволяет превратить любой аналоговый сигнал в последовательность единиц и нулей, из которой затем формируется модулирующий сигнал.

### 8.2.3. Получение модулирующего электрического сигнала

Модулирующий сигнал получается из последовательности логических единиц и нулей путем линейного кодирования и представляет собой последовательность электрических импульсов, которая используется либо для непосредственного воздействия на ИИ (при внутренней модуляции), либо для воздействия на оптический модулятор (при внешней модуляции).

Рассмотрим два наиболее популярных линейных кода: без возвращения к нулю NRZ (Non Return to Zero) и с возвращением к нулю RZ (Return to Zero) (рис. 8.24).

Код NRZ является безызбыточным двухуровневым кодом. В нем логической единице соответствует более высокий уровень напряжения  $U_1$ , а логическому нулю – более низкий  $U_0$  (или наоборот). Отличительной особенностью NRZ является то, что уровень сигнала не изменяется в течение тактового интервала  $t_T$  (время, отводимое на передачу одного бита):

$$t_T = \frac{1}{B_b}, \quad (8.25)$$

где  $B_b$  – скорость передачи данных в бит/с.

Достоинствами кода NRZ являются простая реализация (исходный сигнал не надо ни специально кодировать на передающем конце, ни декодировать на приемном конце), а также минимальная среди других кодов пропускная способность линии связи, требуемая при данной скорости передачи. Наиболее частое изменение сигнала в сети будет при непрерывном чередовании единиц и нулей (при передаче последовательности

1010101010...). Период такой последовательности составляет  $T_{NRZ} = 2t_T$ , то есть требуемая пропускная способность линии в Гц составит

$$\Delta F_{NRZ} = \frac{1}{T_{NRZ}} = \frac{1}{2t_T} = \frac{B_b}{2}. \quad (8.26)$$

Отметим, что последнее равенство в (8.25) получено с учетом (8.26).

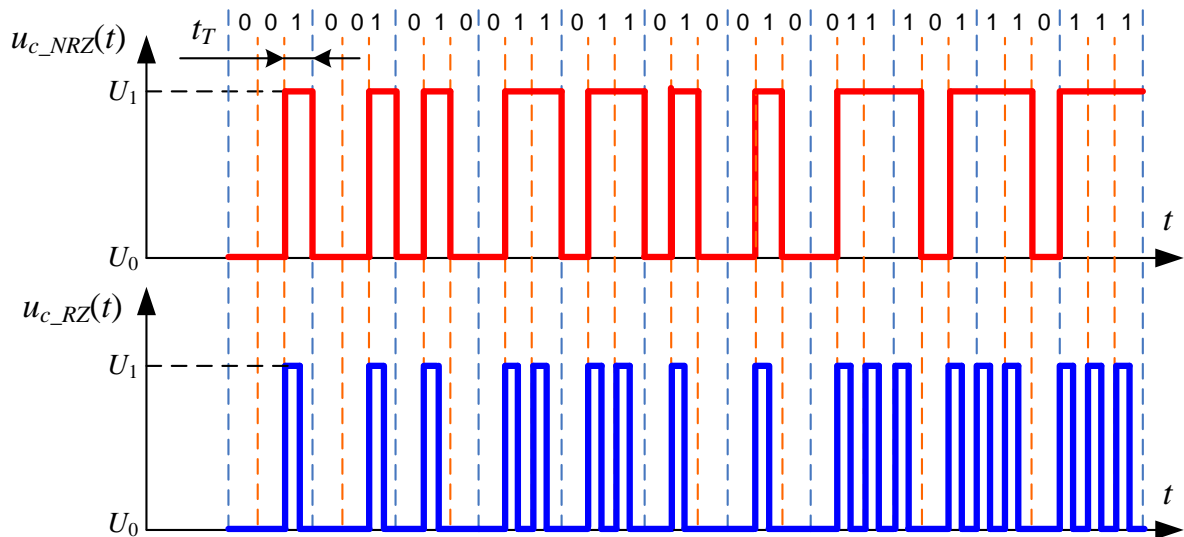


Рис. 8.24. Получение модулирующего сигнала

При формировании кода *RZ* между элементами сигнала создаются защитные промежутки – после значащего уровня сигнала в первой половине битового интервала следует возврат к некоторому «нулевому» уровню. В зависимости от того, как выбран «нулевой» уровень, этот код может быть двухуровневым («нулевой» уровень совпадает с одним из значащих уровней, например, с более низким) и трехуровневым («нулевой» уровень не совпадает ни с одним из значащих уровней и выбирается обычно посередине между значащими уровнями). В оптике чаще используется двухуровневый вариант (именно этот вариант показан на рис. 8.24).

В зависимости от соотношения длительностей значащего и «нулевого» уровней в тактовом интервале говорят о кодах *RZ-50* (длительность значащего уровня составляет 50% от  $t_T$ ), *RZ-33* (длительность значащего уровня составляет 33% от  $t_T$ ), *RZ-67* (длительность значащего уровня составляет 67% от  $t_T$ ).

Поскольку для кода *RZ* изменение уровня сигнала происходит внутри тактового интервала период чередования уровней при наиболее частой их смене (последовательность 1111111...) будет равен тактовому интервалу  $T = T_{RZ}$ .

$$\Delta F_{RZ} = \frac{1}{T_{RZ}} = \frac{1}{t_T} = B_b. \quad (8.27)$$

### 8.2.4. Внутренняя модуляция

Простейшим и наиболее распространенным способом модуляции излучения ИИ является внутренняя модуляция, которая осуществляется путем изменения тока накачки через *p-n* переход ИИ (СИД или ЛД).

Одной из важных характеристик ИИ, как мы уже знаем, является ваттамперная или модуляционная характеристика (рис. 8.7 и 8.15). Из графиков видно, что при изменении тока изменяется выходная оптическая мощность ИИ, то есть, управляя током, можно за-

ставить выходную мощность изменяться по нужному закону (*NRZ* или *RZ*) (рис. 8.25). Поэтому такая модуляция является модуляцией по мощности или интенсивности.

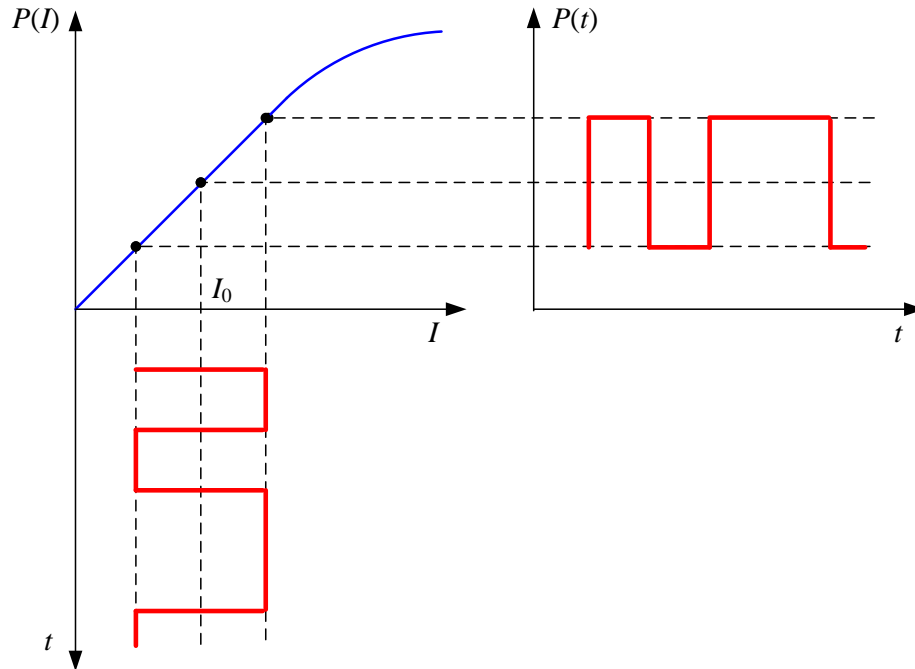


Рис. 8.25. Внутренняя модуляция излучения СИД

Главное преимущество передающих устройств с внутренней модуляцией – существенно меньшая стоимость по сравнению с устройствами с внешней модуляцией.

Обобщенная структурная схема ПОМ представлена на рис. 8.26. В ней можно выделить три петли управления:

- управление рабочей температурой источника,
- управление средней мощностью (мощностью излучения при передаче логического 0) выходных оптических импульсов,
- управление амплитудой (мощностью излучения при передаче логической 1) выходных оптических импульсов.

Конкретная схема управления может содержать одну, две или все три петли управления. Сформированный модулирующий сигнал  $u_{c\_NRZ}(t)$  или  $u_{c\_RZ}(t)$  подается на вход  $U_{in}$ .

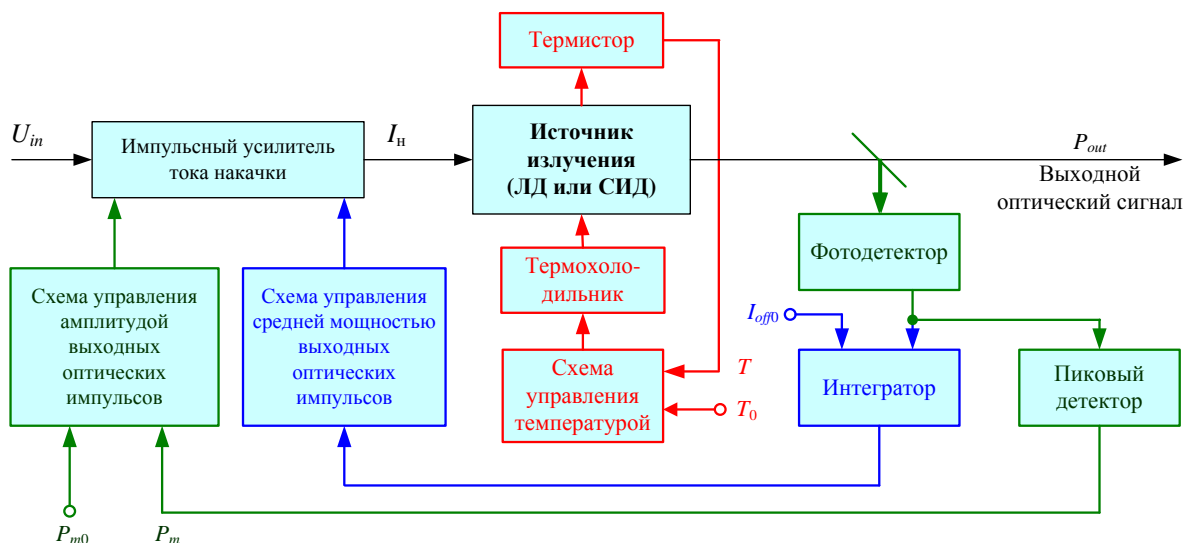


Рис. 8.26. Структурная схема ПОМ с внутренней модуляцией.

**Схема стабилизации температуры** показана на рис. 8.26 красным цветом. При изменении температуры меняются средняя длина волны излучения (8.1), ширина спектра излучения СИД (8.4), ширина огибающей спектра излучения ЛД, а также вольтамперные (8.6) и ваттамперные (рис. 8.7 и 8.15) характеристики. Поэтому температуру источника излучения, особенно лазерного нужно стабилизировать.

Схема стабилизации температуры включает схему управления температурой, термистор и термохолодильник. Нужное значение температуры  $T_0$  подается на один вход схемы управления температурой. Измерение текущей температуры источника  $T$  осуществляется датчиком температуры на основе термистора<sup>7</sup>. Результат измерения поступает на второй вход схемы управления температурой. Схема управления сравнивает значения температуры, поступившие на ее входы и в зависимости от результата сравнения управляет работой термохолодильника. Обычно применяются полупроводниковые термохолодильники на основе эффекта Пельтье<sup>8</sup>.

**Схема стабилизации амплитуды выходных оптических импульсов** показана на рис. 8.26 зеленым цветом. Она включает фотодетектор, пиковый детектор и схему управления амплитудой выходных оптических импульсов. На один вход схемы управления амплитудой импульсов подается нужное значение амплитуды импульсов  $P_{m0}$  (мощности излучения при передаче логической 1), на другой – текущее значение этой величины  $P_m$ . Для измерения текущего значения часть излучения источника с помощью ответвителя или полупрозрачного зеркала отводится на фотодетектор. Измерение амплитуды осуществляется пиковым детектором. Схема управления амплитудой импульсов сравнивает  $P_m$  и  $P_{m0}$  и в зависимости от результата сравнения управляет коэффициентом усиления импульсного усилителя тока накачки.

**Схема стабилизации средней мощности излучения** (при бинарном коде с равной вероятностью передачи 1 и 0 средняя мощность равна  $P_0 + (P_1 - P_0) / 2$ , где  $P_0$  и  $P_1$  – мощности излучения при передаче 0 и 1 соответственно) показана на рис. 8.26 синим цветом. Средняя мощность стабилизируется путем регулирования тока смещения импульсного усилителя тока накачки.

С помощью ответвителя или полупрозрачного зеркала часть излучения источника отводится на фотодетектор. С фотодетектора принятый сигнал (фототок) поступает на один вход интегратора, на другой его вход поступает то значение тока смещения, которое мы будем поддерживать. Выходной сигнал интегратора возрастает при увеличении средней мощности принимаемых фотодетектором импульсов, и уменьшается при ее уменьшении. Схема управления средней мощностью оптических импульсов уменьшает ток смещения при возрастании поступающего с интегратора сигнала и увеличивает ток смещения при его уменьшении.

ПОМ на основе СИД имеют невысокое быстродействие и применяются только в относительно низкоскоростных системах передачи. Однако применение ПОМ с внутренней модуляцией на основе ЛД в высокоскоростных системах передачи также ограничено. Это связано с одним из недостатков внутренней модуляции, заключающимся в возникновении паразитной частотной модуляции («чирпинга») выходного излучения ПОМ. Физическая причина этого эффекта заключается в том, что показатель преломления полупроводникового материала, а значит и излучаемая длина волны (частота) зависят от протекающего тока (8.17). Паразитная частотная модуляция приводит к расширению спектра излучения ПОМ и увеличению искажений сигнала в ОВ. Поэтому внутренняя модуляция

<sup>7</sup> Полупроводниковый резистор, сопротивление которого существенно изменяется с изменением температуры.

<sup>8</sup> Эффект Пельтье – выделение или поглощение тепла при прохождении электрического тока через контакт двух различных проводящих материалов. Выделение тепла сменяется поглощением при изменении направления тока. Открыт Ж. Пельтье в 1834 г. Величина выделяемого или поглощаемого тепла зависят от вида контактирующих веществ, силы и времени прохождения тока.

используется при скоростях передачи до 10 Гбит/с. При более высоких скоростях передачи используется внешняя модуляция, которая исключает «чирпинг».

## 8.2.5. Внешняя модуляция

### 8.2.5.1. Параметры оптического модулятора

**Оптический модулятор** – это оптоэлектронное устройство, предназначенное для ввода информации в несущее излучение за счет изменения во времени одной из его характеристик. Принципиально возможными являются амплитудная, частотная, фазовая и поляризационная модуляция. Все эти виды модуляции находят применение в оптических системах связи.

Основными параметрами оптического модулятора являются:

- глубина или степень модуляции
- полоса пропускания и время переключения
- вносимые потери
- потребляемая электрическая мощность

**Глубина или степень модуляции**  $\eta$  является одной из самых важных характеристик модулятора и определяет степень изменения модулируемого параметра.

Для модулятора интенсивности величина  $\eta$  определяется выражением:

$$\eta = \frac{\Delta I_{\max}}{I_{\max}}, \quad (8.28)$$

где  $\Delta I_{\max}$  – максимальное изменение интенсивности излучения в модулированном сигнале,  $I_{\max}$  – максимальная интенсивность излучения в модулированном сигнале.

Для фазового модулятора величина  $\eta$  определяется выражением:

$$\eta = \sin^2 \frac{\Delta \varphi_{\max}}{2}, \quad (8.29)$$

где  $\Delta \varphi_{\max}$  – максимальное изменение фазы модулированного сигнала.

**Полоса пропускания**  $\Delta f$ . Этот параметр определяет диапазон частот модуляции, в котором может работать устройство. Полоса пропускания определяется разностью между верхней и нижней частотами, при которых глубина модуляции уменьшается на 50% от максимальной величины. С полосой пропускания  $\Delta f$  связан параметр, называемый временем переключения модулятора  $t_s$  и характеризующий его быстродействие:

$$t_s = \frac{2\pi}{\Delta f}, \quad (8.30)$$

**Вносимые потери**  $a_{\text{Л}}$ . Потери, вносимые модулятором, определяются формулами:

$$a_{\text{Л}} = 10 \lg \frac{I}{I_{\max}}, \quad (8.31a)$$

$$a_{\text{Л}} = 10 \lg \frac{I}{I_0}, \quad (8.31б)$$

где  $I$  – интенсивность света, генерируемого ИИ (в отсутствие модулятора),  $I_0$  – интенсивность света на выходе модулятора в отсутствие электрического модулирующего сигнала. Формула (8.31a) справедлива для модулятора, в котором при приложении электрического сигнала увеличивается интенсивность проходящего света, а (8.31б) – для модулятора, в котором при приложении электрического сигнала уменьшается интенсивность проходящего света.

**Потребляемая электрическая мощность.** Модулятор является активным компонентом, то есть для обеспечения его работы необходимо затрачивать электроэнергию. Потребляемая модулятором мощность возрастает с ростом частоты модуляции, поэтому принято оценивать не абсолютное значение потребляемой мощности  $P_{el}$ , а отношение  $P_{el} / \Delta f$ .

### 8.2.5.2. Физические явления, на которых может быть основана работа оптического модулятора

Внешняя модуляция может быть основана на следующих физических явлениях:

- Электрооптический эффект Поккельса – изменение параметров показателя преломления некоторых материалов (например, ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$ ) под действием электрического напряжения. Используется для фазовой и амплитудной модуляции.
- Магнитооптический эффект Фарадея – вращение плоскости поляризации излучения в некоторых материалах (аморфных и кристаллических) под действием магнитного поля, создаваемого электрическим током. Используется для фазовой и амплитудной модуляции.
- Акустооптический эффект – изменение параметров показателя преломления некоторых материалов под действием акустической (или механической) волны, создаваемой модулирующим сигналом (эффект Брэгга, эффект Рамана – Ната). Используется для фазовой и амплитудной модуляции, а также в качестве коммутатора оптических пучков.
- Электроабсорбционный эффект Франца-Келдыша – изменение затухания в некоторых материалах под действием электрического поля. Используется для амплитудной модуляции.

Наиболее широкое применение в ВОСП получили электрооптический (ЭОМ), и электроабсорбционный (ЭАМ) модуляторы, которые используются при скоростях передачи от 2,5 Гбит/с до 100 Гбит/с и выше.

### 8.2.5.3. Электрооптический модулятор

Рассмотрим принцип действия ЭОМ (рис. 8.27). Он основан на линейном электрооптическом эффекте или эффекте Поккельса, заключающемся в том, что показатель преломления некоторых материалов (ниобат лития, арсенид галлия и др.) линейно изменяется при приложении внешнего электрического поля:

$$n(E) = n_0 + \Delta n(E) = n_0 + k_p n_0^3 \frac{E}{2}, \quad (8.32)$$

где  $n_0$  – показатель преломления электрооптического материала в отсутствие электрического поля,  $k_p$  – упругооптическая постоянная или постоянная Поккельса электрооптического материала (для ниобата лития  $k_p = 3.7 \cdot 10^{-12}$  м/В),  $E$  – напряженность электрического поля.

Из (8.32) следует, что показатель преломления электрооптического материала является функцией приложенного к кристаллу напряжения  $U_s$  (создающего в кристалле напряженность поля  $E = U_s / d$ ).

При проходе через кристалл длиной  $L$  фаза излучения изменится на величину:

$$\varphi(E) = \frac{2\pi L}{\lambda} n(E). \quad (8.33)$$

Пусть на ячейку Поккельса подается переменное напряжение  $u_{c\_NRZ}(t)$ , представляющее собой последовательность прямоугольных импульсов. В этом случае в течение каждого тактового интервала  $U_s$  может принимать одно из двух значений –  $U_0$  или  $U_1$ , что соответствует напряженностям электрического поля в кристалле  $E_0 = U_0 / d$  или  $U_1 = U_1 / d$ .

*d.* При этом фаза, приобретаемая немодулированным излучением при проходе через кристалл, изменится на  $\varphi_0(E_0)$  или  $\varphi_1(E_1)$ , то есть возникнет фазовая модуляция.

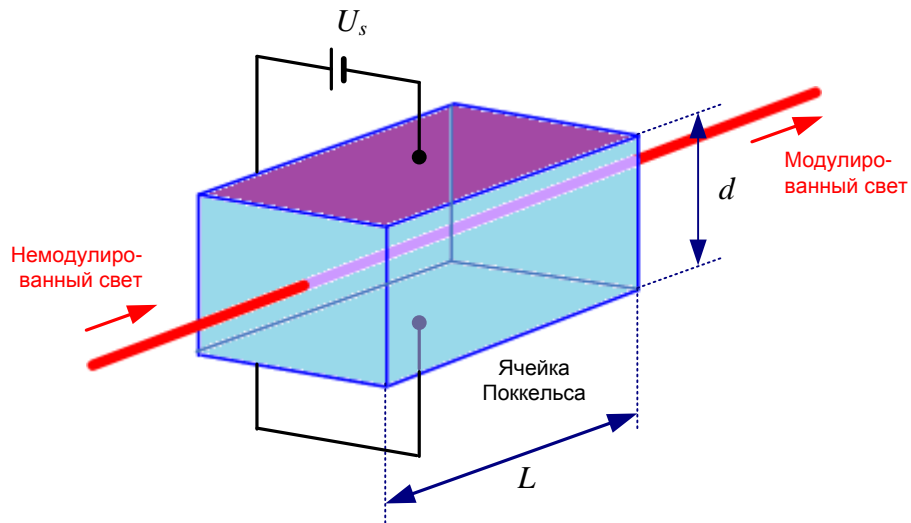


Рис. 8.27. Электрооптический фазовый модулятор

Амплитуда изменения фазы составит

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi L}{\lambda} (n(E_1) - n(E_0)) = \frac{\pi \cdot k_p n_0^3 L (U_1 - U_0)}{\lambda \cdot d} = \frac{\pi \cdot k_p n_0^3 L \cdot \Delta U}{\lambda \cdot d}. \quad (8.34)$$

Значение  $\Delta U = \Delta U_\pi$ , при котором  $\Delta\varphi = \pi$ , называют полуволновым напряжением.

$$\Delta U_\pi = \frac{\lambda \cdot d}{k_p n_0^3 L}. \quad (8.35)$$

Для получения большой амплитуды изменения фазы необходимы довольно высокие напряжения.

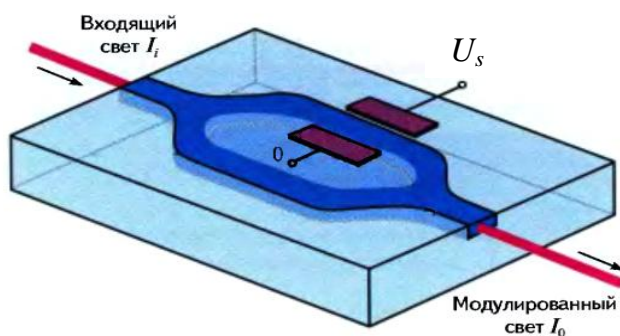


Рис. 8.28. Электрооптический модулятор интенсивности

входная интенсивность  $I_i$  в интерферометре делится пополам, то интенсивности выходящего  $I_0$  и входящего  $I_i$  света связаны следующим образом

$$I_0 = \frac{I_i + I_i \cdot \cos(\Delta\varphi)}{2} = I_i \cdot \cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) = I_i \cdot \cos^2\left(\frac{\pi \cdot k_p n_0^3 L \cdot \Delta U}{2\lambda \cdot d}\right). \quad (8.36)$$

При размахе модулирующего напряжения равном полуволновому обеспечивается 100% модуляция.

С помощью ячейки Поккельса можно получить не только фазовую модуляцию, но и модуляцию по интенсивности. Фазовая задержка сама по себе не влияет на интенсивность светового пучка, однако фазовый модулятор, помещенный в одно плечо интерферометра Маха-Цендера (ИМЦ), может действовать как модулятор интенсивности (рис. 8.28).

Планарный волновод, формирующий ИМЦ изготавливается из электрооптического материала. Если

#### 8.2.5.4. Электроабсорбционный модулятор

Рассмотрим принцип действия ЭАМ (рис. 8.29) на основе эффекта электропоглощения Франца-Келдыша в анизотропных средах. Эффект Франца-Келдыша состоит в смещении спектра поглощения полупроводникового кристалла в сторону более длинных волн под действием напряженности электрического поля. На рис. 8.30 показаны спектры поглощения при выключенном (OFF) и включенном (ON) электрическом поле. Видно, что на определенной длине волны можно получить большую глубину модуляции по интенсивности.

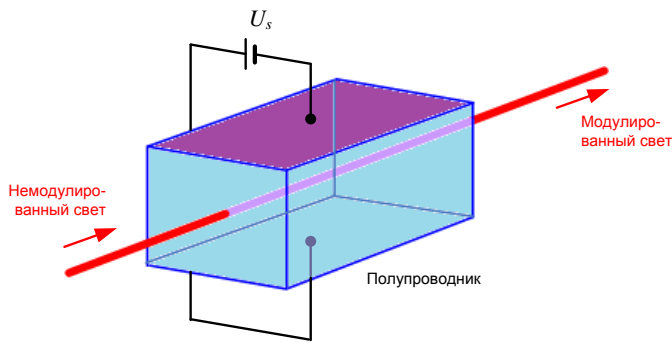


Рис. 8.29. Электроабсорбционный модулятор интенсивности

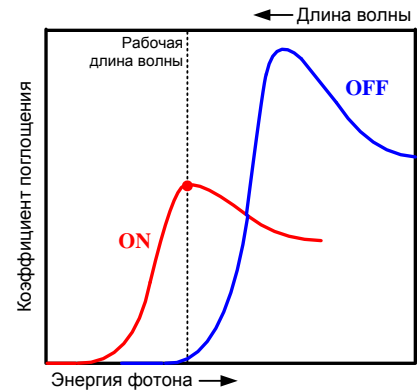


Рис. 8.30. Эффект электропоглощения

Достоинствами ЭАМ являются высокие скорости и глубина модуляции, малые управляющие напряжения, а также технологичность, позволяющая интегрировать модулятор с ЛД DFB и ЛД VCSEL.



## 9. Фотоприемные устройства

### 9.1. Приемники оптического излучения

#### 9.1.1. Общие сведения о фотодиодах. Основные параметры фотодиода

Основным элементом фотоприемного устройства (ФПУ), осуществляющего преобразование оптического сигнала в электрический и первичную обработку электрического сигнала, является фотоприемник (ФП) или фотодетектор. В качестве фотоприемников в ОСП в настоящее время используются квантовые ФП – фотодиоды (ФД).

Фотодиод характеризуют следующими основными параметрами:

- Внешней квантовой эффективностью или квантовым выходом
- Токовой чувствительностью
- Спектральной характеристикой чувствительности

ФД представляет собой *p-n*-переход. Работа ФД основана на явлении внутреннего фотоэффекта – поглощении оптического излучения материалом полупроводника, сопровождающемся генерацией подвижных носителей заряда. При наличии замкнутой цепи в *p-n*-переходе возникает ток, называемый фототоком.

Если мощность падающего оптического излучения частотой  $f$  равна  $P$ , то число фотонов, падающих на ФД в единицу времени, равно:

$$n_{ph} = \frac{P}{hf}, \quad (9.1)$$

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

**В идеальном ФД** число рождаемых в единицу времени электронов  $n_{epr}$  равно числу падающих в единицу времени фотонов  $n_{ph}$  и все электроны вносят вклад в фототок  $I_{ph}$ :

$$\text{идеальный ФД} - n_{epr} = n_{ph}, \quad (9.2)$$

$$\text{идеальный ФД} - I_{ph} = n_{epr} \cdot q_e, \quad (9.3)$$

где  $q_e = 1.602 \cdot 10^{-19}$  – заряд электрона.

**В реальном ФД** часть падающих на ФД фотонов не поглощается и не каждый электрон, родившийся в результате поглощения фотона, вносит вклад в фототок:

$$\text{реальный ФД} - n_{epr} < n_{ph} \quad (9.4)$$

$$\text{реальный ФД} - I_{ph} = n_e \cdot q_e, \quad (9.5)$$

где  $n_e < n_{epr}$  – число электронов, давших за единицу времени вклад в фототок.

**Внешней квантовой эффективностью (квантовым выходом)  $\eta$**  называют безразмерную величину, представляющую собой отношение числа «полезных» электронов  $n_e$ , рождающихся в единицу времени, к числу фотонов  $n_{ph}$ , падающих на ФД в единицу времени:

$$\eta = \frac{n_e}{n_{ph}}, \quad (9.6)$$

Очевидно, что для идеального ФД  $n_e = n_{epr} = n_{ph}$  и  $\eta = 1$ . Для реального ФД  $n_e < n_{epr} < n_{ph}$  и  $\eta < 1$ .

**Токовой чувствительностью  $S$**  ФД называют отношение возникшего в нем фототока  $I_{ph}$  к мощности падающего на него оптического излучения  $P$ :

$$S = \frac{I_{ph}}{P}. \quad (9.7)$$

Токовую чувствительность принято выражать в А/Вт.

Токовая чувствительность ФД зависит от длины волны (частоты) падающего оптического излучения. Из (9.5), (9.6) и (9.1) следует:

$$S(f) = \eta \frac{q_e}{hf}, \quad S(\lambda) = \eta \frac{q_e \lambda}{hc} \quad (9.8)$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме,  $f$  – частота падающего на ФД оптического излучения,  $\lambda$  – длина волны падающего на ФД оптического излучения в вакууме. Зависимость токовой чувствительности от длины волны называют **спектральной характеристикой чувствительности**.

Идеальный ФД имеет неограниченный спектральный диапазон чувствительности, то есть он может принимать излучение любой длины волны. Спектральный диапазон чувствительности реального ФД ограничен минимальной  $\lambda_{\min}$  и максимальной  $\lambda_{\max}$  длинами волн.

Максимальная длина волны  $\lambda_{\max}$  оптического излучения определяется красной границей фотоэффекта. Максимальная длина волны  $\lambda_{\max}$ , при которой еще наблюдается фотоэффект соответствует квантам света с энергией, равной ширине запрещенной зоны полупроводника:

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{W_g} = \frac{b_e}{E_g}, \quad (9.9)$$

где  $W_g$  и  $E_g$  – ширина запрещенной зоны в Дж и эВ соответственно,  $b_e = 1.243 \cdot 10^{-6}$  эВ·м.

Нижняя граница диапазона чувствительности, со стороны коротких длин волн, обусловлена сильным поглощением излучения вблизи поверхности полупроводникового кристалла.

На рис. 9.1 показаны спектральные характеристики чувствительности различных ФД.

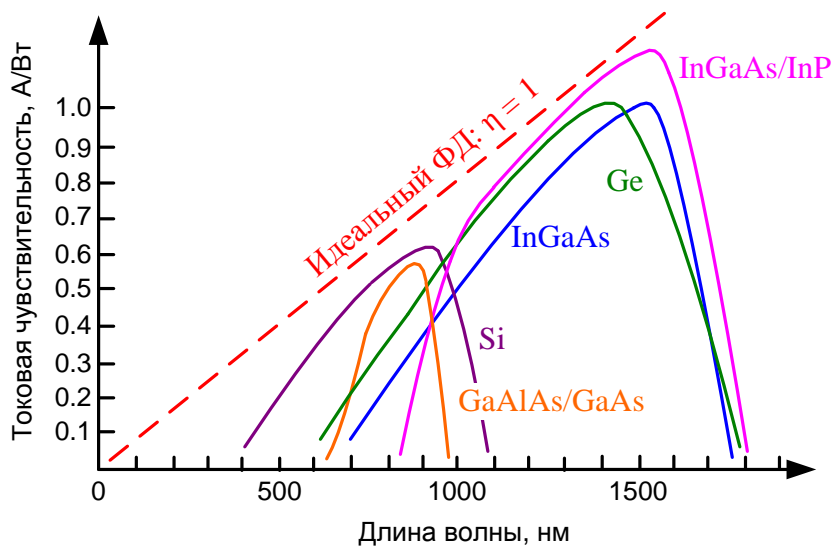


Рис. 9.1. Спектральные характеристики чувствительности идеального и реальных ФД с  $p$ - $i$ - $n$  структурой

ФД работает при приложении к нему обратного напряжения смещения, когда «+» подается на  $n$ -слой, а «-» – на  $p$ -слой.

### 9.1.2. Виды фотодиодов

Можно показать, что ФД на основе простого  $p$ - $n$  перехода обладают низкой квантовой эффективностью, а значит и низкой чувствительностью. Поэтому в ОСП используют усовершенствованные виды ФД – ФД с  $p$ - $i$ - $n$  структурой и лавинные ФД.

Два варианта структуры  $p$ - $i$ - $n$  ФД показаны на рис. 9.2. В этих ФД между  $p$  и  $n$  слоями помещен еще один слой, слаболегированный донорной (рис. 9.2а) или акцепторной (рис. 9.2б) примесью. Концентрация примеси в дополнительном слое так мала, что его можно считать собственным  $i$  полупроводником. Слой  $i$  называют поглощающим, так как именно поглощенные в нем фотоны дают основной вклад в фототок.

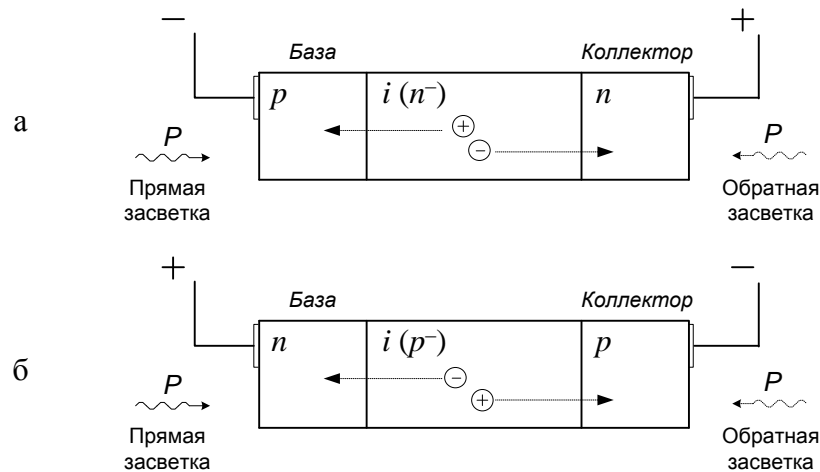


Рис. 9.2. ФД с  $p-i-n$  структурой

В  $p-i-n$  ФД может быть реализована прямая засветка, когда принимаемое оптическое излучение падает на базу, и обратная, когда оно падает на коллектор. База обычно имеет меньшую толщину, чем коллектор, поэтому ФД с прямой засветкой обычно имеют большее быстродействие.

На рис. 9.3 показана конструкция типичного  $p-i-n$  фотодиода с гетеропереходом на основе фосфида индия InP.

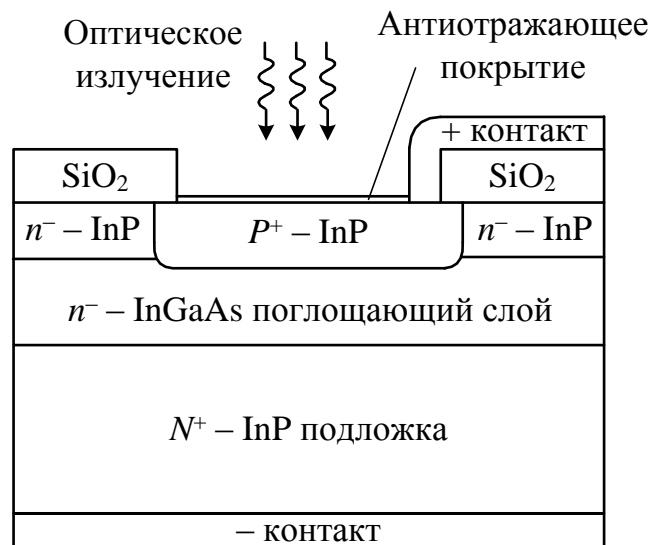


Рис. 9.3.  $p-i-n$  ФД с прямой засветкой на основе фосфида индия

Приемник ОСП должен принимать излучение малой мощности, ослабленное в процессе распространения по физической среде передачи. Поэтому фототок, возникающий в ФД, очень мал. Увеличить фототок перед усилением можно двумя способами:

1. увеличить мощность падающего на ФД излучения с помощью предварительного оптического усилителя;
2. увеличить непосредственно фототок, реализовав механизм его лавинного умножения.

Второй способ реализуется в лавинных ФД (ЛФД). Для этого в  $p-i-n$  структуре к сильно легированным слоям  $p^+$  и  $n^+$  добавляют средне легированный  $n$ -слой (рис. 9.4а) или  $p$ -слой (рис. 9.4б). Толщина  $i$ -слоя увеличивается по сравнению с  $p-i-n$  структурой.

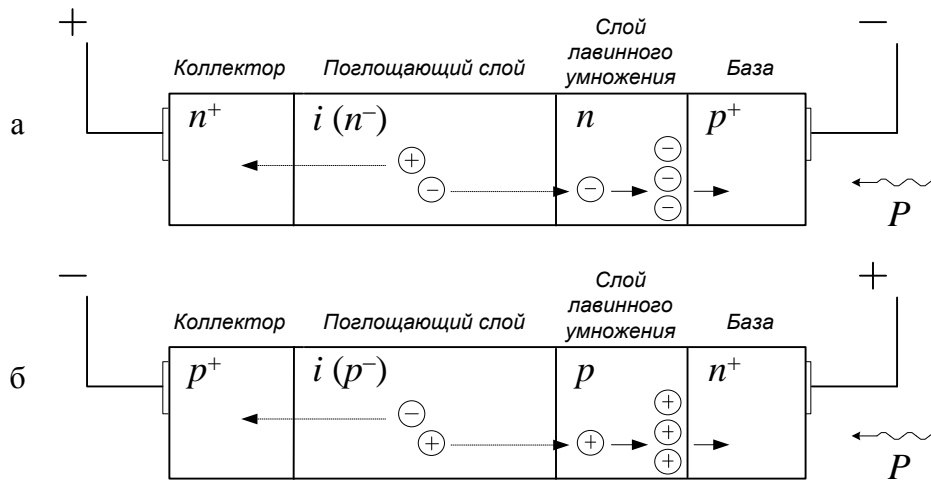


Рис. 9.4. Лавинные ФД

За счет увеличения напряжения смещения до значений, близких к пробивным, в *i*-слое происходит эффективное ускорение носителей заряда, родившихся в результате поглощения падающего излучения, и в дополнительный слой попадают носители заряда с большой кинетической энергией. Этой энергии оказывается достаточно для осуществления ударной ионизации атомов дополнительного слоя. Возникшие в результате ударной ионизации носители в свою очередь осуществляют ударную ионизацию, вызывая рождение новых носителей. Этот процесс приводит к тому, что концентрация носителей лавинно нарастает. В результате фототок увеличивается в *M* раз. Величину *M* называют коэффициентом лавинного умножения.

### 9.1.3. Вольтамперная характеристика ФД

На рис. 9.5 показано семейство вольтамперных характеристик ФД при разных значениях мощности *P* падающего на него излучения. Семейство вольтамперных характеристик (ВАХ) ФД *p-i-n* структуры описывается выражением

$$I = I_0 \left( \exp \frac{U}{\varphi_T} - 1 \right) - S \cdot P = I_{bc} + I_{ph}, \quad (9.10)$$

где  $I_0$  – тепловой обратный ток, А;  $U$  – напряжение смещения, В,  $\varphi_T = k \cdot T / q_e$  – температурный потенциал, Дж/Кл;  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура, К;  $S$  – токовая чувствительность ФД, А/Вт.

Как мы уже знаем из темы 8, ток  $I_0$  сильно зависит от температуры и его принято характеризовать температурой удвоения тока.

Первый член в (9.10) описывает темновой ток<sup>1</sup>  $I_{bc}$  (ток в отсутствие оптического излучения), второй член представляет собой фототок  $I_{ph}$ .

По семейству ВАХ можно определить токовую чувствительность ФД (рис. 9.5).

Выражение (9.10) не учитывает возможный пробой ФД при очень больших значениях обратного напряжения смещения, который характеризуется быстрым увеличением тока (рис. 9.6). Напряжение, начиная с которого наблюдается возрастание тока, называется напряжением пробоя (breakdown)  $U_{bd}$ . Для кремниевых ФД оно составляет 200–300 В, для германиевых – 20–60 В.

ФД *p-i-n* структуры работают при обратных напряжениях смещения по модулю существенно меньших  $U_{bd}$ . ЛФД работают при обратных напряжениях смещения, близких к  $U_{bd}$ . Для темнового тока и фототока ЛФД справедливы соотношения:

$$I_{bc} = M \cdot I_{bcm} + I_{bcnm}, \quad (9.11)$$

<sup>1</sup> black current

$$I_{ph} = M \cdot S \cdot P, \quad (9.12)$$

где  $M$  – коэффициент лавинного умножения,  $I_{bcm}$  – умножаемая составляющая темнового тока, а  $I_{bcnm}$  – его неумножаемая составляющая.

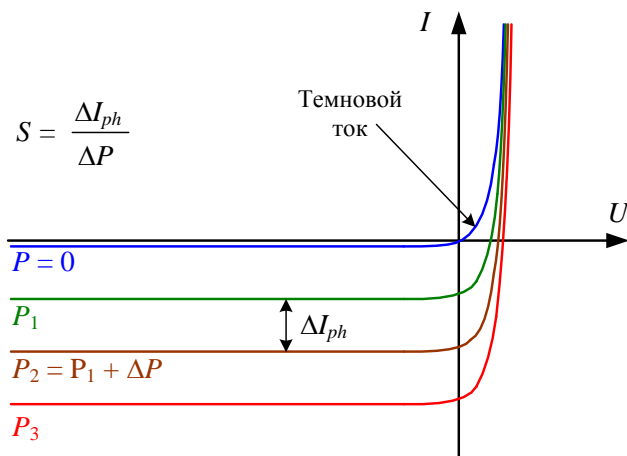


Рис. 9.5. Вольтамперные характеристики ФД  $p-i-n$  структуры. Определение токовой чувствительности по ВАХ

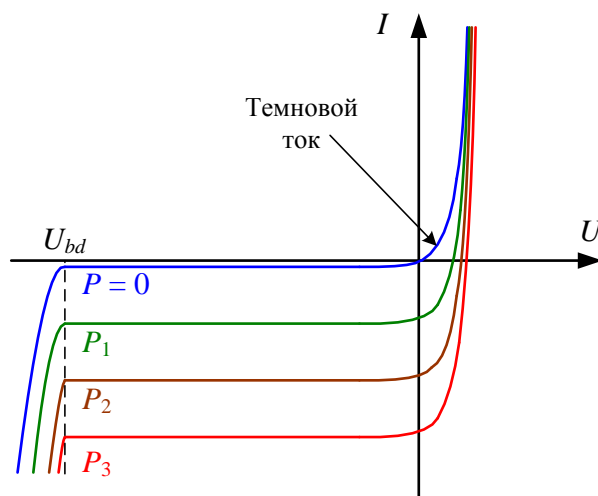


Рис. 9.6. Вольтамперные характеристики с учетом пробоя

Коэффициент лавинного умножения ЛФД сильно зависит от напряжения смещения и от температуры, то есть эти параметры нужно стабилизировать.

#### 9.1.4. Схемы включения ФД

Падающее оптическое излучение в соответствии с ВАХ преобразуется в ФД в электрический сигнал – ток и напряжение. Чаще всего этот сигнал мал, поэтому основной задачей электрической схемы, в которую включается ФД, является его усиление.

Усилить можно как напряжение, тогда схема будет содержать усилитель напряжения (УН), так и ток, тогда в состав схемы войдет усилитель фототока (УФТ). Выходным сигналом усилителя в обоих случаях должно быть напряжение.

##### 1. Схемы с УН

###### 1.1. Схема с УН без обратного смещения ФД (фотовольтаическая)

Схема, показанная на рис. 9.8а называется фотовольтаической. В этой схеме ФД просто подключается ко входу усилителя напряжения (рис. 9.8а). ФД в ней работает в режиме холостого хода, ток через него будет равен 0, так как входное сопротивление УН очень велико.

Напряжение на ФД (на входе усилителя напряжения) в этом случае равно:

$$U = \varphi_T \ln \left[ -\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right]. \quad (9.15)$$

Усилитель напряжения просто усиливает напряжение  $U$  на фотодиоде. Поэтому выходное напряжение в этой схеме будет равно:

$$U_{out} = K \cdot U, \quad (9.16)$$

где  $K$  – коэффициент усиления усилителя.

Недостатком этой схемы является нелинейная связь между фототоком, а, следовательно, и оптической мощностью и выходным напряжением.

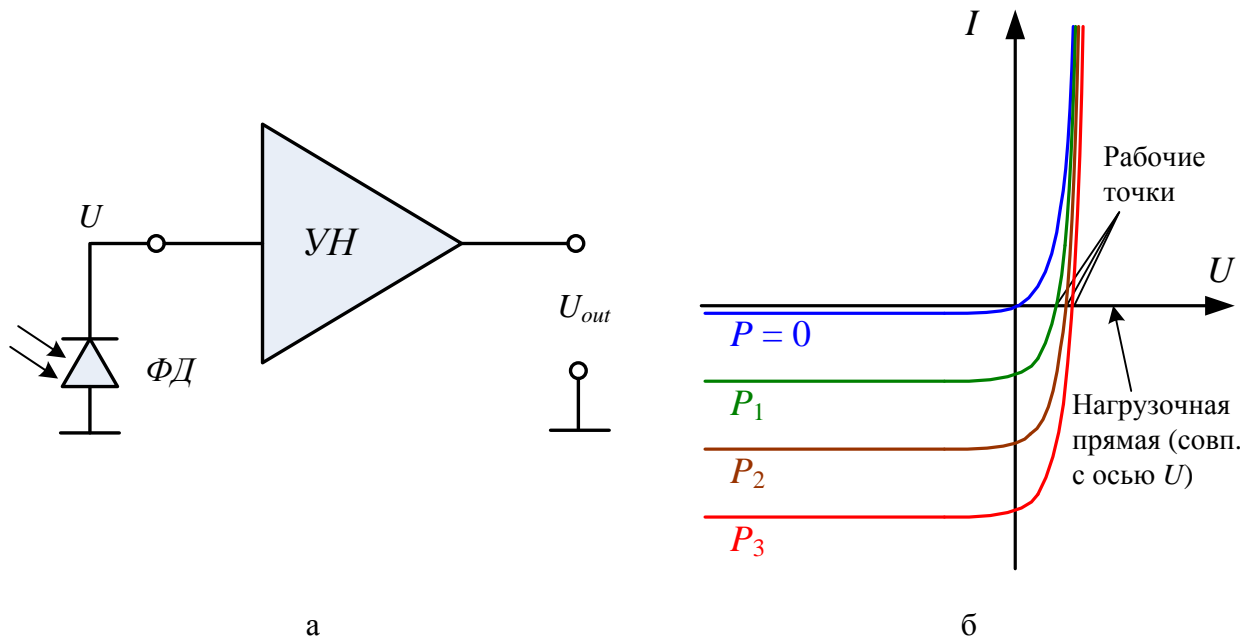


Рис. 9.8. Фотовольтаическая схема (а) и семейство ее рабочих точек на ВАХ (б)

### 1.2. Схема с УН с обратным смещением ФД

В схеме рис. 9.9а ток через ФД преобразуется в напряжение, которое затем усиливается в УН с высоким входным сопротивлением. Для преобразования фототока во входное напряжение УН используется резистор  $R$ .

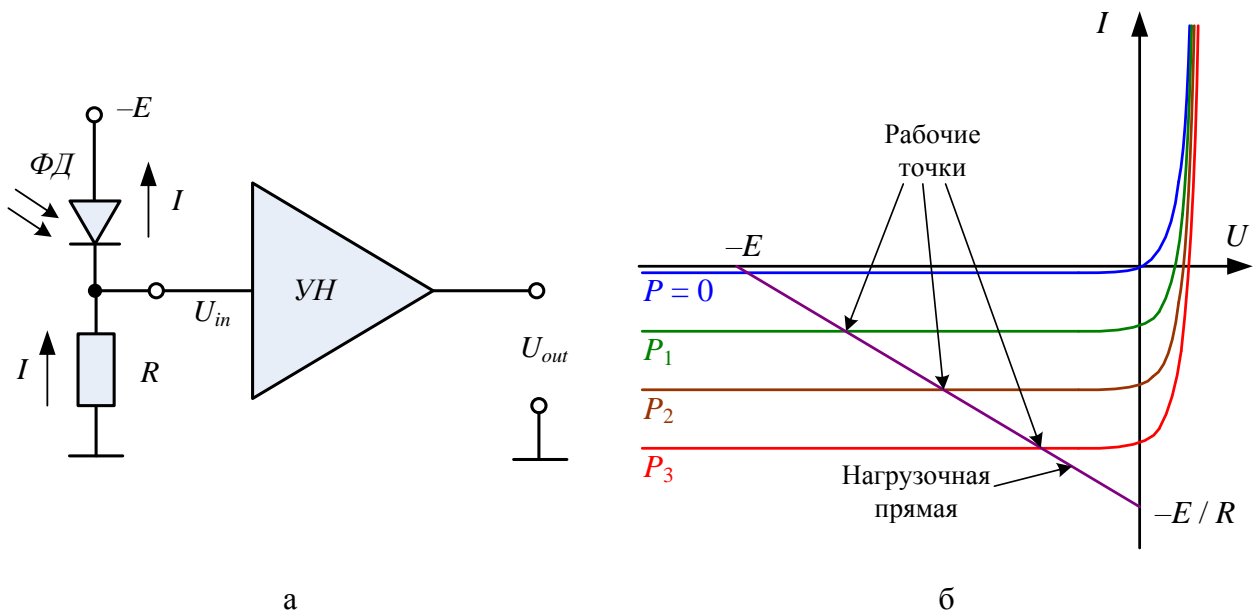


Рис. 9.9. Схема с УН и обратным смещением ФД (а) и семейство ее рабочих точек на ВАХ (б)

При таком включении семейство рабочих точек ФД будет лежать на нагрузочной прямой, показанной на рис. 9.9б.

Выходное напряжение в этой схеме будет равно:

$$U_{out} = K \cdot U_{in} = -K \cdot I \cdot R, \quad (9.18)$$

где  $K$  - коэффициент усиления УН. В этой схеме существенное значение имеют входные сопротивление и емкость УН.

## 2. Схемы с УФТ

Чаще всего используются схемы с УФТ. Схема (рис. 9.10а и 9.11а), в которой ФД подключается к входу УФТ, выполненного на основе операционного усилителя и резистора  $R$  в цепи отрицательной обратной связи, называется трансимпедансной, так как ее коэффициент передачи, равный отношению выходного напряжения к входному току имеет размерность сопротивления (импеданса).

### 2.1. Трансимпедансная схема без обратного смещения ФД

На рис. 9.10а показана трансимпедансная схема, в которой ФД работает без обратного смещения. ФД в ней работает в режиме короткого замыкания, напряжение на нем равно 0..

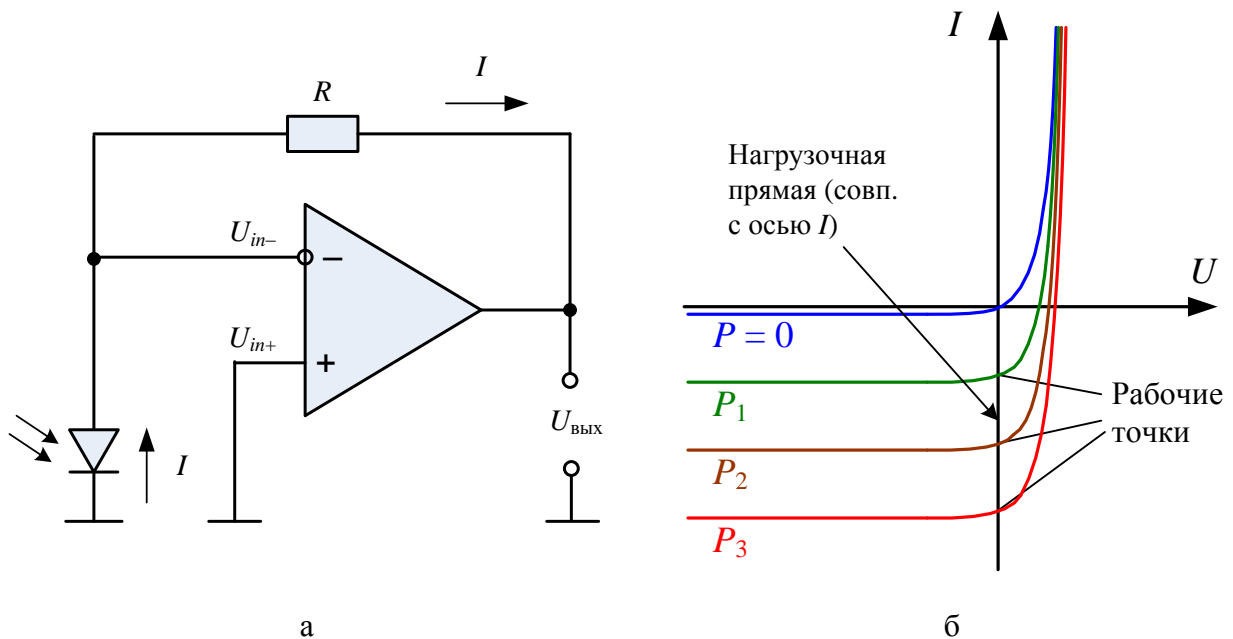


Рис. 9.10. Трансимпедансная схема без обратного смещения ФД (а) и семейство ее рабочих точек на ВАХ (б)

Из (9.10) следует, что при  $U = 0$  темновой ток  $I_{bc}$  тоже будет равен 0. Тогда через ФД будет течь только фототок  $I_{ph}$ :

$$I = I_{ph} = -S \cdot P \quad (9.19)$$

Выходное напряжение будет равно:

$$U_{out} = I \cdot R = -S \cdot P \cdot R \quad (9.20)$$

Достоинствами этого варианта трансимпедансной схемы включения являются высокая линейность преобразования оптической мощности в выходное напряжение, а также исключение шума темнового тока, который в этой схеме отсутствует.

### 2.2. Трансимпедансная схема с обратным смещением ФД

В схеме рис. 9.11а показана трансимпедансная схема, в которой ФД работает с обратным смещением. По переменному току ФД в этой схеме также работает в режиме короткого замыкания.

В этой схеме напряжение на фотодиоде  $U$  равно  $-E$ , поэтому из (9.10) следует, что ток через него равен:

$$I = I_0 \cdot \left( \exp\left(\frac{-E}{\phi_T}\right) - 1 \right) - S \cdot P \quad (9.21)$$

Выходное напряжение в этой схеме, также как в предыдущей, равно:

$$U_{out} = I \cdot R. \quad (9.22)$$

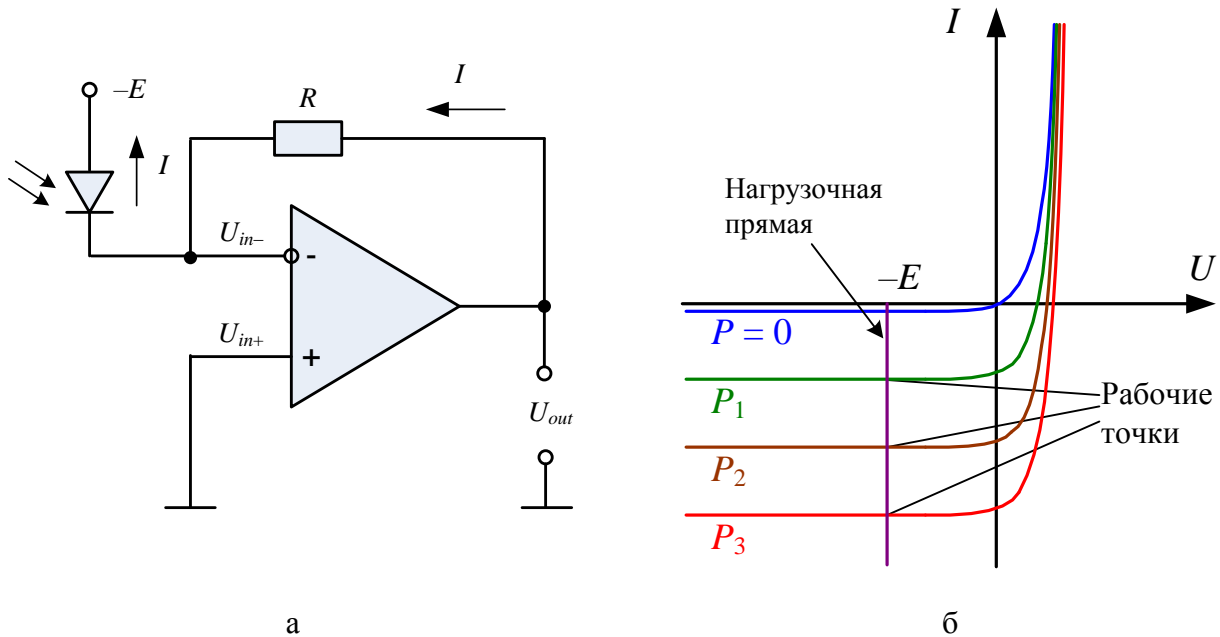


Рис. 9.11. Трансимпедансная схема с обратным смещением ФД (а) и семейство ее рабочих точек на ВАХ (б)

Достоинствами этого варианта трансимпедансной схемы включения являются высокая линейность преобразования оптической мощности в выходное напряжение, а также более высокое по сравнению с предыдущим вариантом быстродействие.

ФД в ВОСП почти всегда работают в режиме с обратным напряжением смещения (рис. 9.9а и 9.11а), так как в таких схемах существенно выше быстродействие ФД.

### 9.1.5. Шумы ФД

Основным источником шумов в ФД является **дробовой шум**. К возникновению дробового шума приводит дискретный характер тока. Среднеквадратическое значение шумового тока  $\sigma(I_d)$ , обусловленное дробовым шумом в полосе частот  $\Delta f$  для ФД *p-i-n* структуры можно рассчитать по выражению:

$$\sigma^2(I_d) = 2 \cdot q_e \cdot I \cdot \Delta f = 2 \cdot q_e \cdot (I_{ph} + I_{bc}) \cdot \Delta f \quad (9.23)$$

В ЛФД к дробовым шумам добавляются шумы лавинного умножения и для среднеквадратического значения шумового тока справедливо выражение:

$$\sigma^2(I_d) = 2 \cdot q_e \cdot [M^2 \cdot F(M) \cdot (I_{ph} + I_{bcm}) + I_{bcnm}] \cdot \Delta f, \quad (9.24)$$

где  $\Delta f$  – полоса пропускания ФПУ, которая должна быть не меньше полосы частот модулирующего сигнала,  $F(M)$  – шум-фактор или коэффициент шума лавинного умножения

Дробовой шум имеет нормальное распределение и является белым, то есть его спектральная плотность  $S$  (Вт/Гц) не зависит от частоты сигнала, кроме низкочастотных сигналов, где проявляются избыточные шумы (рис. 9.12).

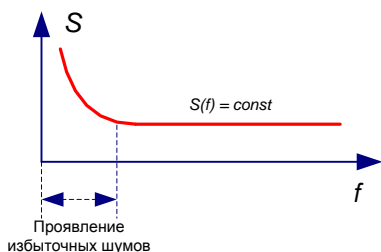


Рис. 9.12. Спектральная плотность дробовых шумов



### 9.1.5. Эквивалентная схема ФД с входной цепью усилителя

Эквивалентная схема для переменного тока (рис. 9.13) отрицательно смещенного ФД при слабых сигналах включает в себя генераторы фототока  $I_{ph}$  и шумового  $I_n$  тока, дифференциальную проводимость  $G_D$  и емкость перехода  $C_D$ .

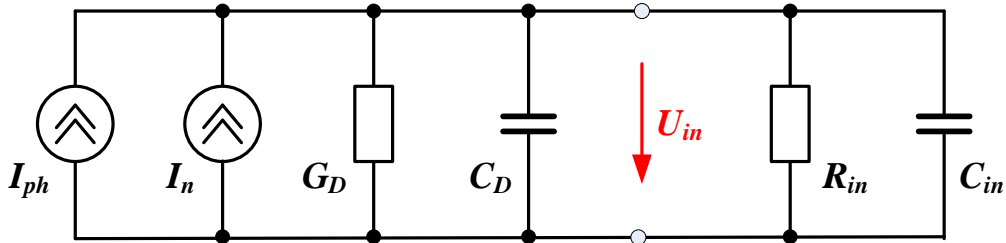


Рис. 9.13. Эквивалентная схема ФД с входной цепью усилителя

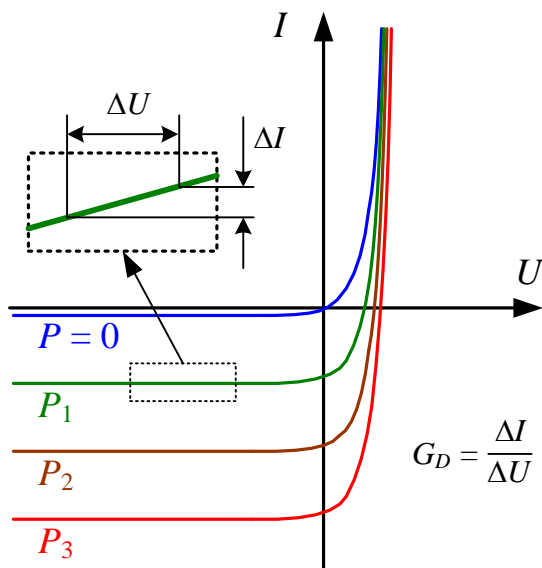


Рис. 9.14. Определение дифференциальной проводимости по ВАХ

Если ФД работает при отрицательном смещении, шунтирующая проводимость  $G_D$  в схемах на рис. 9.9а, 9.10а и 9.11а имеет небольшую величину, которая соответствует наклону вольтамперной характеристики при отрицательном смещении (рис. 9.14), то есть ее сопротивление велико и она практически не влияет на  $U_{in}$ . В схеме на рис. 9.8а величина  $G_D$  наоборот велика.

К емкости перехода  $C_D$  параллельно подключены входное сопротивление  $R_{in}$  и входная емкость  $C_{in}$  усилителя фототока, которая включает в себя также емкость монтажа.  $R_{in}$  для схемы 9.8а  $R_{in}$  бесконечно велико, для схемы 9.9а – равно  $R$ , для схем 9.10а и 9.11а – равно 0).

Быстродействие ФД в первом приближении определяется постоянной времени

$$\tau = R_{in} \cdot (C_D + C_{in}). \quad (9.25)$$

Если мощность излучения, падающего на фотодиод изменяется быстро (высокоскоростные сигналы), емкости будут влиять на  $U_{in}$ , внося

инерционность и снижая быстродействие. Если мощность излучения, падающего на фотодиод изменяется медленно (низкоскоростные сигналы), то влиянием емкостей можно пренебречь.

## 9.2. Приемные оптические модули

### 9.2.1. Принципы приема оптических сигналов

По принципу регистрации и первичной обработки информации, содержащейся в оптическом сигнале, различают два метода приема оптического излучения:

- метод прямого детектирования, то есть непосредственного преобразования оптического излучения в электрический сигнал (энергетический прием),
- метод приема со смещением оптических сигналов на фотодетекторе (когерентный прием).

Оба метода реализуются фотоприемными устройствами (ФПУ) на основе фотодиодов (ФД) –  $p-i-n$  структуры или лавинных (рис. 9.15).

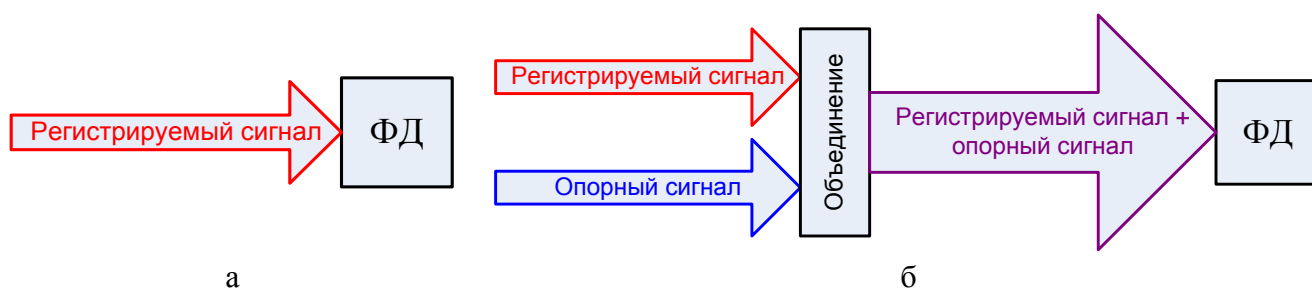


Рис. 9.15. Принципы прямого детектирования (а) и когерентного приема (б)

**При прямом детектировании** на фоточувствительную площадку ФД падает непосредственно регистрируемое оптическое излучение (рис. 9.15а). Напряженность электрического поля световой волны на фоточувствительной площадке ФД имеет вид:

$$E = E_0 \exp(-i(\omega t + \varphi)), \quad (9.26)$$

где  $E_0$ ,  $\omega$  и  $\varphi_0$  – амплитуда, круговая частота и фаза волны.

Мощность излучения можно связать с напряженностью электрического поля:

$$P = v \cdot A \cdot \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{2} \cdot E \cdot E^* = v \cdot A \cdot \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{2} \cdot E_0^2, \quad (9.27)$$

где  $v$  – скорость света в среде,  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды,  $A$  – площадь чувствительной площадки фотодетектора,  $E^*$  – комплексно-сопряженная величина напряженности электрического поля.

Это оптическое излучение вызовет фототок, пропорциональный его мощности  $P$ :

$$I_{ph} = -S \cdot M \cdot P = -S \cdot M \cdot v \cdot A \cdot \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{2} E_0^2, \quad (9.28)$$

где  $S$  – токовая чувствительность ФД,  $M$  – коэффициент лавинного умножения (для ФД  $p-i-n$  структуры равен 1).

Таким образом, при прямом детектировании сигнал на выходе ФД пропорционален квадрату амплитуды световой волны (интенсивности) и не несет никакой информации о ее частоте и фазе.

**При когерентном детектировании** на фоточувствительной площадке ФД интерферируют две световой волны – волна регистрируемого излучения  $E$  (9.26) и опорная волна  $E_r$  (reference) от опорного лазера (гетеродина):

$$E_r = E_{r0} \exp(-i(\omega_r t + \varphi_r)), \quad (9.29)$$

В этом случае мощность излучения на фоточувствительной площадке окажется равной:

$$P = v \cdot A \cdot \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{2} \cdot (E + E_r) \cdot (E^* + E_r^*). \quad (9.30)$$

Подставляя в (9.30) выражения (9.26) и (9.29), получим:

$$P = v \cdot A \cdot \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{2} \cdot [E_0^2 + E_r^2 + 2E_0 E_r \cos((\omega - \omega_r)t + \varphi - \varphi_r)]. \quad (9.31)$$

С учетом (9.28) получим:

$$I_{ph} = -S \cdot M \cdot v \cdot A \cdot \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{2} \cdot [E_0^2 + E_r^2 + 2E_0 E_r \cos((\omega - \omega_r)t + \varphi - \varphi_r)]. \quad (9.32)$$

Таким образом, выходной ток ФД содержит постоянные составляющие, обусловленные прямым фотодетектированием исследуемого и опорного полей, а также составляющую на разностной частоте  $(\omega - \omega_r)$ . Так как амплитуда фототока на разностной частоте зависит от мощности опорного излучения, существует возможность «усиления» слабого полезного сигнала за счет мощного опорного излучения. Кроме того, в фототоке сохраняется информация о частоте и фазе принимаемой световой волны.

Третьей особенностью является перенос информации о частоте и фазе принимаемого излучения из оптического диапазона ( $\omega$ ) в область радиочастот ( $\omega - \omega_r$ ). В ФПУ когерентного приема на эту частоту настраивается последующий усилитель, который называют усилителем промежуточной частоты (УПЧ). УПЧ отфильтровывает и усиливает эту составляющую фототока. С выхода УПЧ сигнал поступает на демодулятор.

### 9.2.2. Квантовый предел детектирования

Квантовым пределом детектирования называют пороговую мощность, которую можно зарегистрировать с помощью идеального ФПУ. Под идеальным ФПУ понимают квантовый счетчик, не создающий шумов и имеющий квантовую эффективность, равную 1. Квантовый предел детектирования обусловлен только статистической природой излучения света (так называемыми фотонными или квантовыми шумами).

ФПУ считает фотоны в течение некоторого интервала времени, называемого временем наблюдения. Для цифровых систем связи с временным уплотнением это время равно длительности тактового интервала  $t_T$ .

Предположим, что на фоточувствительную площадку ФД падает поток излучения с постоянной интенсивностью  $J$ , то есть среднее число фотонов  $N_{ph}$ , принимаемых ФПУ за время  $t_T$ , постоянно, независимо от положения  $t_T$  на оси времени<sup>1</sup>. Тогда вероятность регистрации за время  $t_T$  некоторого числа фотонов, равного  $n_{ph}$ , будет подчиняться закону Пуассона:

$$p(n_{ph}, t_T) = \frac{(N_{ph})^{n_{ph}} e^{-N_{ph}}}{n_{ph}!} . \quad (9.33)$$

Дисперсия числа фотонов для распределения Пуассона равна:

$$\sigma^2(n_{ph}) = N_{ph} . \quad (9.34)$$

Поскольку квантовая эффективность идеального ФПУ равна 1, число возникающих за время  $t_T$  свободных электронов  $n_e$ , создающих фототок будет равно числу фотонов  $n_{ph}$ , а распределение  $n_e$  также будет распределением Пуассона. Это значит, что дисперсия  $n_e$  будет равна дисперсии  $n_{ph}$ :

$$\sigma^2(n_e) = N_{ph} . \quad (9.35)$$

Выражение (9.35) представляет собой дисперсию фототока, обусловленную квантовым шумом, то есть отношение сигнала к шуму S/N для фототока будет равно:

$$S/N = \frac{\bar{I}_{ph}^2}{\sigma^2(I_{ph})} = \frac{N_{ph}^2}{N_{ph}} = N_{ph} . \quad (9.36)$$

При прямом детектировании среднее значение мощности падающего излучения будет равно:

$$\bar{P} = hf \cdot \frac{N_{ph}}{t_T} , \quad (9.37)$$

где  $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка,  $f$  – частота оптического излучения. С учетом (9.36) запишем (9.37) в виде:

$$\bar{P} = hf \cdot \frac{S/N}{t_T} . \quad (9.38)$$

Квантовый предел детектирования достигается при  $S/N = 1$ , то есть при пороговой мощности  $P_q$  равной:

$$P_q = \frac{hf}{t_T} . \quad (9.39)$$

Из (9.39) следует, что для детектирования оптического излучения достаточно, чтобы на фоточувствительную площадку ФД за время  $t_T$  попал хотя бы один фотон.

<sup>1</sup>  $N_{ph}$  растет с ростом длительности  $t_T$ , поэтому в (5.9) неявно входит зависимость от  $t_T$ .

Если квантовая эффективность ФПУ равна  $\eta < 1$ , она появится в выражении для пороговой мощности  $P_q$ :

$$P_q = \frac{hf}{\eta t_T}. \quad (9.40)$$

Рассмотрим теперь случай, когда падающее на фоточувствительную площадку ФД излучение модулировано двухуровневым цифровым сигналом, в котором логическая 1 представляется излучением некоторой интенсивности  $J$  в течение интервала  $t_T$ , а логический 0 – отсутствием излучения в течение интервала  $t_T$  (излучением нулевой интенсивности). Предположим, что вероятности появления логической 1 и логического 0 одинаковы и равны 0.5.

Тогда при приеме логической 1 в течение  $t_T$  будет зарегистрировано  $n_{ph}$  фотонов. Среднее число зарегистрированных фотонов будет равно  $N_{ph}$ , а дисперсия числа зарегистрированных фотонов будет определяться выражением (9.34). При приеме логического 0 будет зарегистрировано 0 фотонов, причем и среднее число зарегистрированных фотонов будет равно 0 и дисперсия числа зарегистрированных фотонов будет равна 0.

Вероятность ошибки  $p_e$  в этом случае будет равна:

$$p_e = 0.5 \cdot p(0|1), \quad (9.41)$$

где  $p(0|1)$  – вероятность того, что при приеме логической 1 в течение  $t_T$  не будет зарегистрировано ни одного фотона. Из (9.33) получаем:

$$p(0|1) = e^{-N_{ph}}. \quad (9.42)$$

Из (9.41) и (9.42) можно получить минимально необходимое число фотонов для получения заданной вероятности ошибки:

$$N_{ph} = \ln 0.5 - \ln p_e. \quad (9.43)$$

Для ФПУ с квантовой эффективностью  $\eta$  (9.43) примет вид:

$$N_{ph} = \frac{\ln 0.5 - \ln p_e}{\eta}. \quad (9.45)$$

Из (9.44) можно получить выражение для пороговой мощности излучения в рассматриваемом случае:

$$P_q = \frac{hf}{\eta t_T} (\ln 0.5 - \ln p_e) = \frac{hf}{\eta} B_b \cdot (\ln 0.5 - \ln p_e), \quad (9.46)$$

где  $B_b = 1 / t_T$  – скорость передачи данных в бит/с.

Когерентный прием при достаточной мощности гетеродина позволяет достичь квантового предела детектирования.

## 10. Измерения на ВОЛС

### 10.1. Классификация измерений

В процессе строительства и эксплуатации ВОЛС проводятся следующие виды измерений:

#### 1. Измерения в процессе строительства

- ◆ входной контроль;
- ◆ оценка качества строительных работ с целью доведения параметров до установленных нормативов;
- ◆ приемно-сдаточные испытания.

#### 2. Измерения в процессе эксплуатации

- ◆ профилактические измерения;
- ◆ аварийные измерения;
- ◆ входной контроль;
- ◆ контрольные измерения после аварийно-восстановительных работ
- ◆ непрерывный мониторинг с помощью встроенного в ВОСП контрольно-измерительного оборудования.

*Входной контроль* производится перед проведением строительных и ремонтных работ, связанных с заменой кабеля и прочих компонентов ВОЛС. В ходе этих измерений контролируется качество строительных длин кабеля и других компонентов. При входном контроле измеряют вносимое затухание и по известной строительной длине по нему рассчитывают коэффициент затухания, измеряют потери в контрольных сварках различных строительных длин между собой и для паспортизации регистрируют рефлектограммы всех ОВ строительной длины.

*Оценка качества строительных работ* включает измерение вносимого затухания всех ОВ на смонтированных участках, потерь во всех неразъемных соединениях.

*Приемно-сдаточные испытания, профилактические и контрольные измерения после аварийно-восстановительных работ* включают измерение вносимого затухания всех ОВ кабельного участка, потерь в стыках, коэффициентов затухания на разных участках, а также паспортизацию кабельного участка по результатам измерений и его рефлектограмме.

*Аварийные измерения* проводятся для определения характера повреждения и расстояния до него.

Для определения параметров ВОСП необходимо проводить различные измерения в проходящем и рассеянном свете.

### 10.2. Измерения проходящего через линейный тракт излучения

В проходящем свете проводятся измерения следующих величин:

1. Параметров ИИ: мощности оптического излучения и параметров формы оптических импульсов.
2. Параметров ФПУ: чувствительности и динамического диапазона;
3. Параметров оптического линейного тракта: вносимого затухания, дисперсионных искажений;
4. Параметров регенерационного участка: энергетического запаса, ширины глаз-диаграммы;
5. коэффициента ошибок.

### 10.2.1. Измерение мощности или абсолютного уровня мощности оптического излучения

Для измерения мощности излучения  $P$  и ее абсолютного уровня  $\gamma$  (понятие введено в теме 4) используют специальные приборы – измерители оптической мощности (ИОМ) или оптические ваттметры.

ИОМ используются для определения мгновенных, средних и максимальных значений мощности на выходах излучателя  $P_{из}$  или ВТ (входе ФПУ)  $P_{\phi}$ .

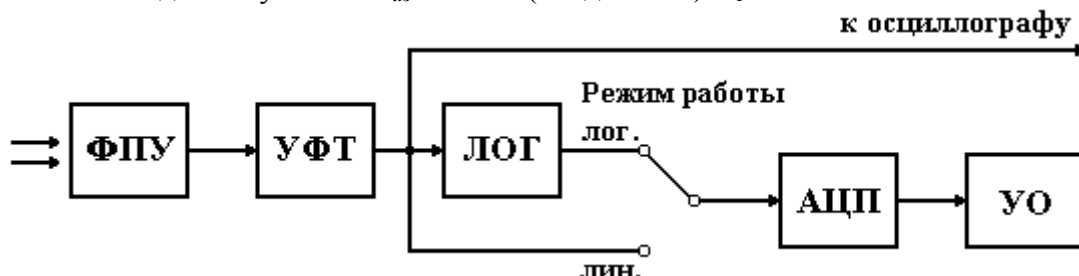


Рис. 10.1. Структурная схема измерителя оптической мощности.

ИОМ (рис. 10.1) состоит из:

- фотоприемника (ФП), который преобразует мощность оптического излучения в электрический сигнал (обычно фототок),
- усилителя фототока (УФТ), на выходе которого с помощью осциллографа можно наблюдать сигнал, пропорциональный мгновенному значению мощности,
- логарифматора (ЛОГ),
- аналого-цифрового преобразователя (АЦП),
- устройства отображения (УО).

При измерении средних значений мощности после УФТ устанавливают усредняющий фильтр нижних частот (ФНЧ), а при измерении максимальных значений - амплитудный детектор.

ФП должен иметь фоточувствительную площадку, достаточную для регистрации всего потока излучения, выходящего из источника излучения или ОВ.

Чувствительность ФП должна быть однородна по площади, а характеристика преобразования – линейной во всем диапазоне измеряемых мощностей. Чувствительность должна мало зависеть от температуры.

ФП должен обладать малым уровнем шума, низким порогом реагирования. Для этого он должен иметь малый уровень темнового тока.

УФТ имеет автоматически или вручную переключаемый коэффициент передачи для выбора диапазона измерения. Для получения результата измерения на УО в цифровой форме используется АЦП. Для вывода результата в логарифмических единицах перед АЦП устанавливается ЛОГ.

ИОМ в сочетании с другими приборами могут использоваться для определения параметров ФПУ:

- чувствительности ФПУ  $P_{R \min}$  или  $\gamma_{R \min}$ ,
  - уровня перегрузки ФПУ  $P_{R \max}$  или  $\gamma_{R \max}$ ,
  - динамического диапазона ФПУ  $D_R$
- и параметров регенерационного участка ВОСП:
- вносимого затухания  $a$ ,
  - энергетического запаса  $\Delta a_r$ .

### 10.2.2. Измерение параметров ФПУ

Для определения чувствительности ФПУ кроме ИОМ используют оптический аттенуатор с регулируемым затуханием и измеритель коэффициента ошибок (ИКО). Схема измерения чувствительности ФПУ приведена на рис. 10.2.



Рис. 10.2. Схема измерения параметров ФПУ.

С помощью оптического аттенюатора уменьшается уровень сигнала на входе ФПУ. При этом контролируется уровень средней мощности  $y_R$  и коэффициент ошибок  $k_e$ . За величину чувствительности ФПУ принимают уровень сигнала  $y_{R \min}$  на входе ФПУ, при котором  $k_e$  соответствует заданному уровню, например  $10^{-9}$ .

Такая же процедура может использоваться для определения уровня перегрузки ФПУ  $y_{R \max}$ . Однако при этом мы ищем не минимальный, а максимальный уровень входного сигнала, при котором коэффициент ошибок соответствует заданному уровню.

Динамический диапазон ФПУ определяется разностью полученных значений

$$D_R = y_{R \max} - y_{R \min} \quad (10.1)$$

### 10.2.3. Измерение энергетического запаса

Под энергетическим запасом  $\Delta a_r$  регенерационного участка понимают величину возможного увеличения затухания участка, при котором коэффициент ошибок не превосходит допустимого значения.

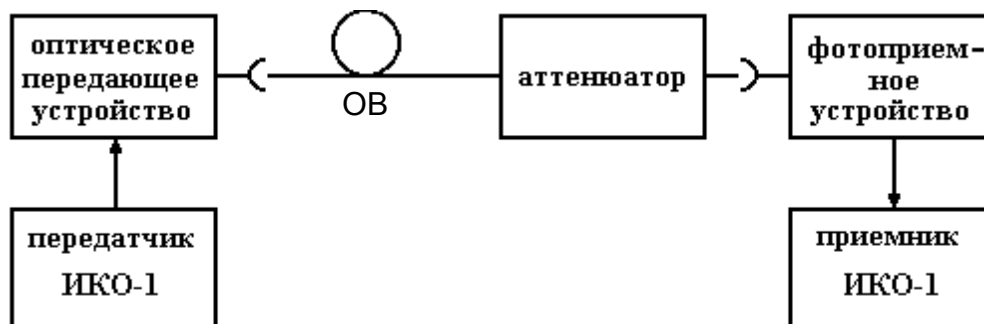


Рис. 10.3. Схема измерения энергетического запаса.

Этот параметр может быть определен по результатам измерений вносимого затухания  $a$ , уровня выходной мощности излучателя  $y_S$  и чувствительности ФПУ  $p_{R \min}$ :

$$\Delta a_r = y_S - a - y_{R \min} \quad (10.2)$$

Энергетический запас также может быть измерен непосредственно. Схема измерения показана на рис. 11.3. Эта схема отличается от схемы измерения параметров ФПУ тем, что оптический аттенюатор включен последовательно с оптическим линейным трактом. Величина энергетического запаса определяется затуханием аттенюатора, при котором значение коэффициента ошибок равно допустимой величине.

### 10.2.4. Измерение вносимого затухания и коэффициента затухания

#### 10.2.4.1. Метод сравнения уровней или метод вносимых потерь

Метод основан на последовательном измерении мощности оптического излучения на выходе измеряемого ОВ и на выходе источника излучения, который присоединяется к ИОМ с помощью оптического поводка (ОП) – вспомогательного короткого ОВ, армированного оптическими соединителями. Схема измерения приведена на рис. 10.4.

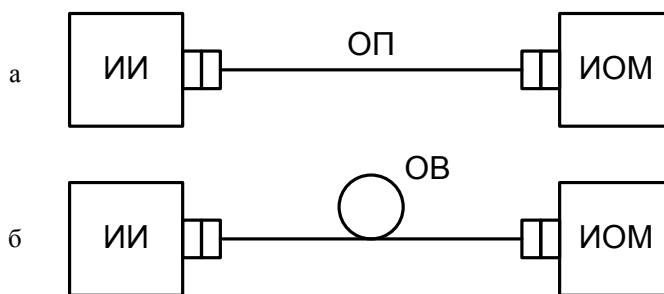


Рис. 10.4. Схема установки для измерения вносимых потерь

Оптические соединители, которыми армированы измеряемый ОВ и ОП, должны иметь известный уровень потерь  $a_p$  при соединении. Должна быть также известна длина ОВ  $L$ . При подготовке к измерениям необходимо протереть торцы всех сочленяемых соединителей спиртом.

Проводятся два измерения. При первом (рис. 10.4а) ОП непосредственно подключается к ИОМ и измеряется уровень оптической мощности  $y_1$ . При втором измерении вместо ОП между источником излучения и ИОМ включается измеряемый ОВ и измеряется уровень оптической мощности  $y_2$ . За вносимое ОВ затухание принимается величина:

$$a = y_1 - y_2. \quad (10.3)$$

По известной длине ОВ определяется коэффициент затухания:

$$\alpha = \frac{a}{L}. \quad (10.4)$$

Результаты измерений оформляются протоколом, в котором указывают:

- результаты измерения затухания и коэффициента затухания в каждом ОВ;
- длину волны и спектральную ширину источника излучения;
- марку и длину оптического кабеля;
- тип, заводские номера и дату поверки (аттестации) использованного оборудования;
- погрешность результата измерения при выбранной доверительной информации.

При измерении вносимых потерь обычно используют специальные приборы - оптические тестеры (ОТ), состоящие из источника излучения и ИОМ. Проведение измерений на протяженной линии осуществляют два человека. Для координации их действий необходимо устройство служебной связи. Некоторые оптические тестеры помимо измерения вносимого затухания выполняют также функцию оптического телефона.

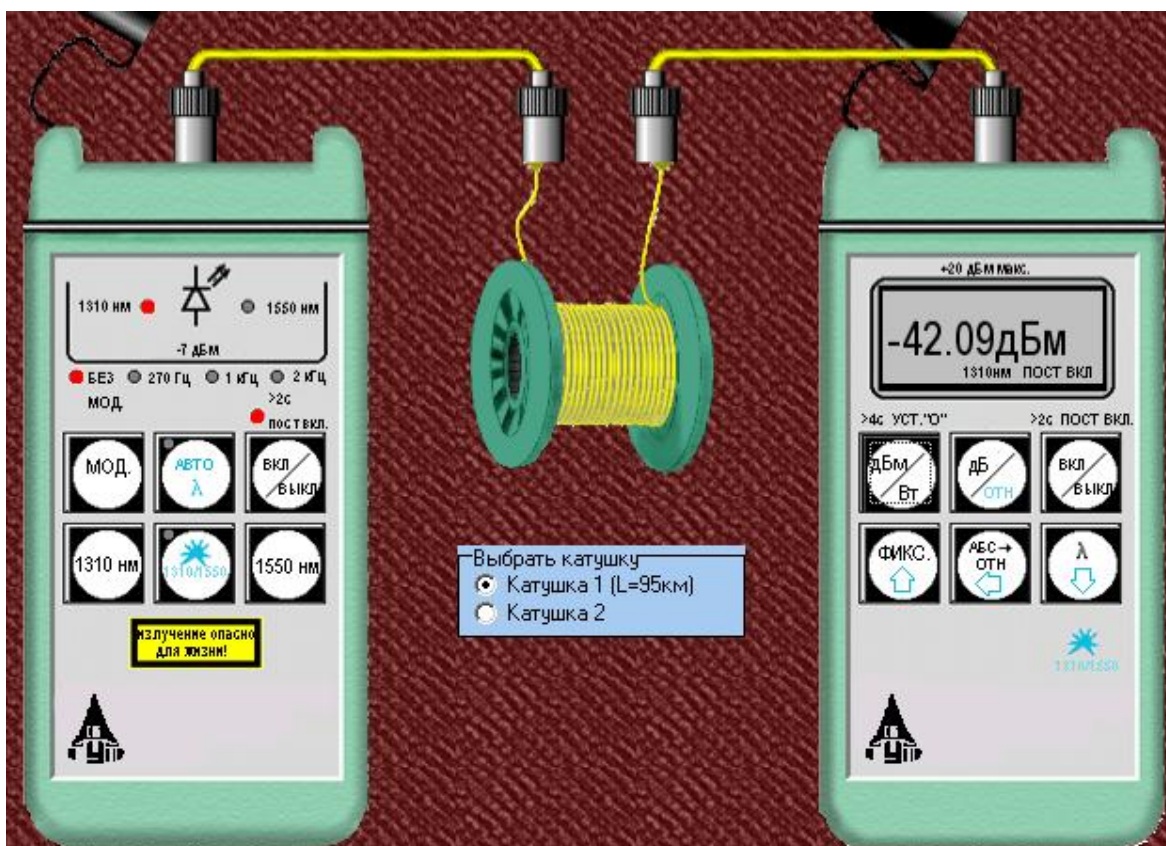
#### 10.2.4.2. Метод замещения

Для реализации этого метода необходим регулируемый оптический аттенюатор. Также необходимо провести два измерения. При первом измерении (рис. 10.5а) измеряемое ОВ или другой объект подключают между выходом источника и ИОМ и проводят измерение мощности  $P_1$  или ее абсолютного уровня  $y_1$ .

При втором измерении вместо измеряемого объекта между выходом источника и измерителем оптической мощности подключают регулируемый оптический аттенюатор (рис. 10.5б). Изменяя затухание аттенюатора, контролируют показания измерителя оптической мощности. Когда уровень сигнала на ИОМ будет равен  $y_1$ , фиксируют затухание оптического аттенюатора. За вносимое затухание объекта измерения принимается затухание оптического аттенюатора.



а



б

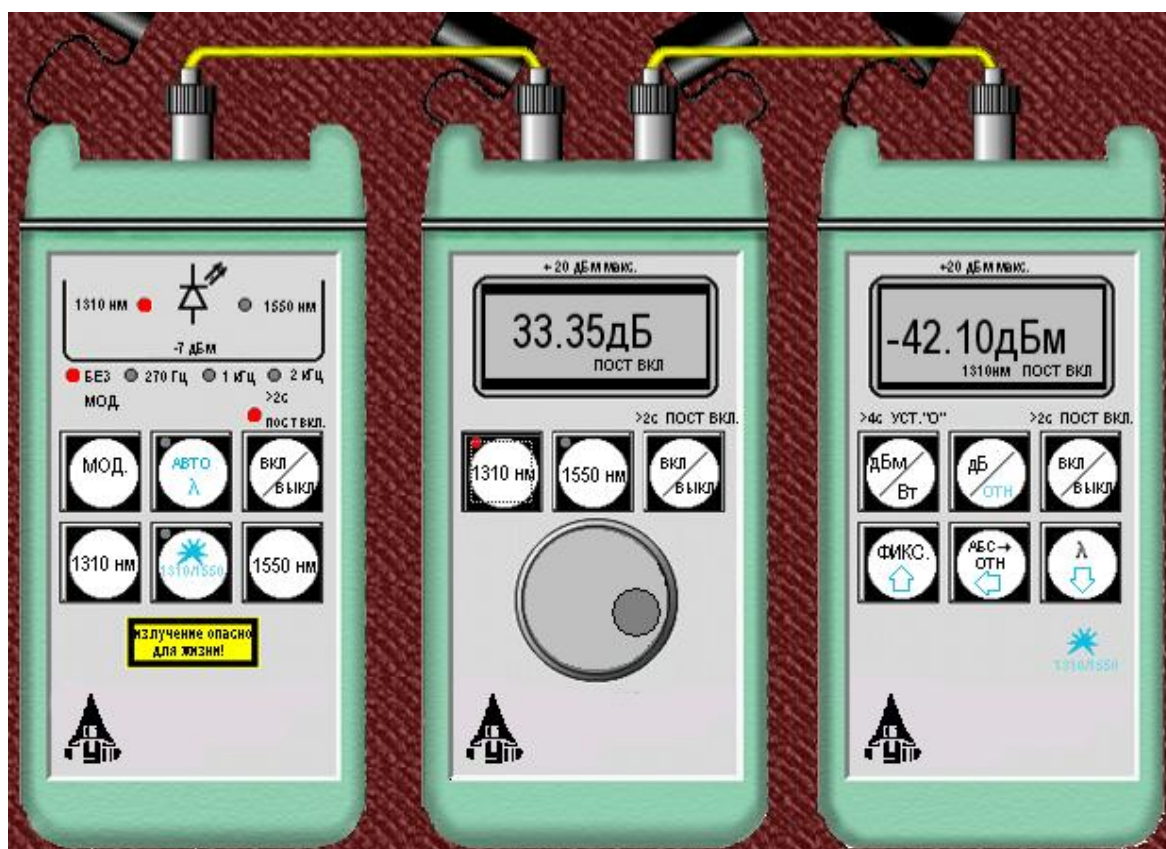


Рис. 10.5. Схема установки для измерения вносимых потерь методом замещения

### 10.2.5. Измерение коэффициента ошибок

Одним из наиболее важных интегральных параметров ВОСП является коэффициент ошибок, который служит экспериментальной оценкой вероятности ошибки в линейном тракте ВОСП. Основными причинами ошибок являются шумы ФПУ и его перегрузка входным оптическим сигналом.

Вероятность ошибок при равновероятной передаче «единиц» и «нулей» можно представить в виде:

$$p_e = 0.5 \cdot [p(0/1) + p(1/0)], \quad (10.5)$$

где  $p(0/1)$  - вероятность приема «0» при передаче «1» (вероятность пропуска «единицы»);  $p(1/0)$  - вероятность приема «1» при передаче «0» (вероятность приема ложной «единицы»).

В соответствии с международным стандартом на цифровые телефонные каналы связи (Рекомендация МСЭ-Т G.821) в линии протяженностью 2500 км допускается не более двух ошибок при передаче  $10^7$  бит информации. Это означает, что для каждые 10 км линии связи средняя вероятность ошибки должна поддерживаться на уровне  $0.8 \cdot 10^{-9}$ . В современных ВОСП коэффициент ошибок лежит в пределах  $10^{-9} \div 10^{-12}$ .

Измерение коэффициента ошибок в цифровых ВОСП осуществляется двумя методами:

- побитным сравнением единичных элементов принятого цифрового сигнала с единичными элементами посланного измерительного цифрового сигнала от генератора псевдослучайной последовательности (ПСП);
- выявлением нарушений алгоритма формирования кода в принятом цифровом сигнале.

Приборы, в которых ошибки обнаруживаются при поэлементном сравнении переданного и принятого сигналов (первый метод), являются измерителями коэффициента ошибок первого типа ИКО-1. Измерение коэффициента ошибки методом посимвольного сравнения с помощью ИКО-1 предполагает обязательный перерыв связи и проводится в процессе пуско-наладочных, ремонтных и регламентных работ.

Коэффициент ошибок в ИКО-1 определяется отношением числа ошибочных символов  $m$ , зафиксированных за интервал времени измерения, к общему числу принятых символов  $n$ :

$$k_e = \frac{m}{n}. \quad (10.6)$$

Приборы, в которых ошибки выявляются при обнаружении нарушений алгоритма кода в принятом сигнале (второй метод), являются измерителями коэффициента ошибок второго типа ИКО-2, входят в состав штатной аппаратуры ЦСП и позволяют проводить измерения коэффициента ошибок без прерывания связи. Принцип работы такого прибора (ИКО-2) основан на определении числа импульсов, нарушающих структуру линейного кода. Число нарушений, подсчитанное относительно общего числа импульсов, прошедших линейный тракт, определяет коэффициент ошибки.

Время, необходимое для измерения коэффициента ошибок  $k_e$  определенной величины с заданной доверительной вероятностью  $p_d$  и точностью измерений  $\delta$  определяется выражением:

$$T_{\text{изм}} = \frac{t_d^2}{\delta^2 \cdot B_b \cdot k_e}, \quad (10.7)$$

где  $B_b$  - скорость передачи информации, бит/с; а значения  $t_d$  в зависимости от  $p_d$  приведены в табл/ 10.1.

Табл. 10.1. Параметры для оценки времени измерения коэффициента ошибок

$p_d$	0.8	0.9	0.95
$t_d$	1.282	1.643	1.960

Измерения с помощью ИКО-1 проводятся двумя способами: «по шлейфу» и «по направлению». При измерениях «по шлейфу» генератор испытательного сигнала и управляемый им анализатор кодовой последовательности находятся на одном конце тракта, а

«шлейф» создается либо в регенераторе, либо соединением соответствующих волокон. В случае измерения «по направлению» генератор испытательного сигнала и анализатор находятся на различных концах тракта, при этом в анализаторе вырабатывается сигнал, аналогичный испытательному сигналу генератора и синхронный с входным сигналом.

Измерение коэффициента ошибок или контроль за его значениями необходимы при измерении параметров ФПУ и ВОСП. В 10.2.2 и 10.2.3 рассматривались методы измерения чувствительности, уровня перегрузки и динамического диапазона ФПУ и энергетического запаса регенерационного участка, предусматривающие определение коэффициента ошибок в линейном тракте. Для таких измерений используют ИКО-1.

### 10.2.6. Измерение параметров формы оптических импульсов

Параметры формы оптических импульсов на выходе излучателя и на входе ФПУ обычно измеряют с помощью глаз-диаграммы (рис. 10.6). Для контроля за формой импульса используют шаблоны, которые совмещают с глаз-диаграммой. Схема измерения параметров формы оптических импульсов по глаз-диаграмме представлена на рис. 10.7. Импульсы от тактового генератора (ТГ) с тактовой частотой ВОСП поступают на генератор псевдослучайной последовательности (ГПСП), управляющий источником излучения (ИИ). Оптические импульсы с помощью ФПУ преобразуются в напряжение, поступающее на вход Y осциллографа (ОСЦ). На вход C синхронизации ОСЦ поступают импульсы от ТГ. Длительность развертки обычно выбирается равной двум периодам ТГ. При этом на экране одновременно можно наблюдать все возможные формы импульсов. Их количество определяется числом элементов в одном периоде ПСП, который выбирается в соответствии с используемой в ВОСП системы кодирования (наибольшим числом подряд идущих единиц и нулей).

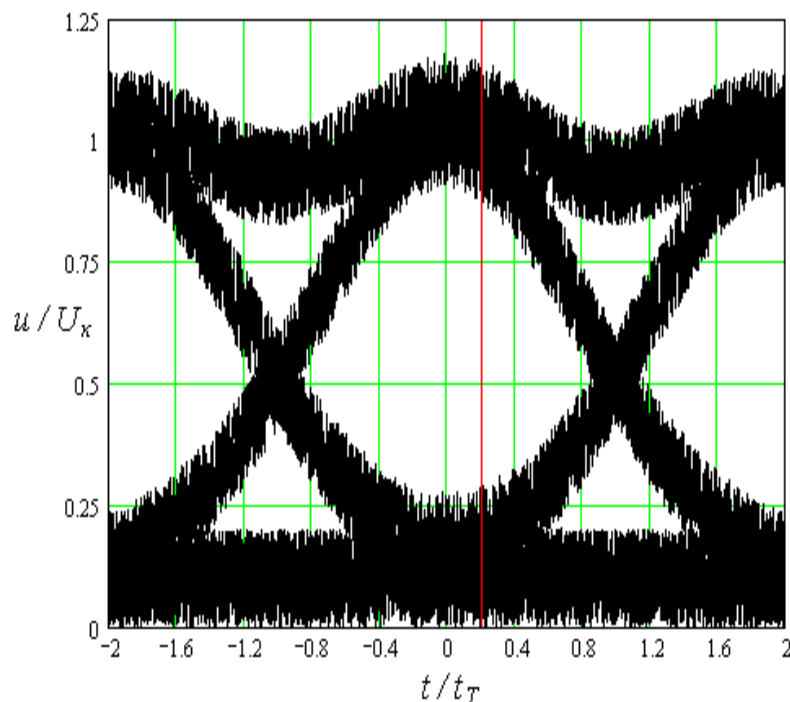


Рис. 10.6. Глаз-диаграмма бинарного оптического сигнала

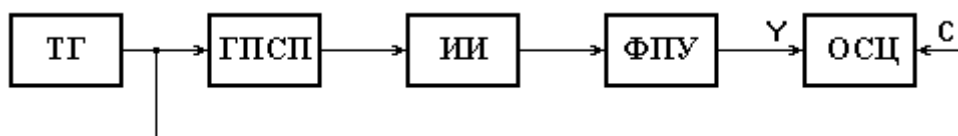


Рис. 10.7. Схема получения глаз-диаграммы

Анализ глаз-диаграмм позволяет определять значительное количество параметров формы импульсов:

Для излучателя

- длительность и форму импульса,
- длительности переднего и заднего фронтов,
- относительную ширину глаз диаграммы,
- коэффициент гашения.

Для приемника

- длительность и форму импульса,
- длительности переднего и заднего фронтов,
- относительную ширину глаз диаграммы.

Сопоставление результатов измерения по глаз-диаграммам на выходе излучателя и на входе приемника позволяет оценить дисперсионные искажения в линейном тракте (уширение импульса).

### 10.3. Измерения рассеянного в линейном тракте излучения

#### 10.3.1. Основы оптической рефлектометрии

Наиболее универсальным и информативным методом измерений параметров ОВ и волоконного тракта (ВТ) является метод обратного рассеяния (МОР). Сущность МОР основана на введении в волокно импульсного оптического излучения и последующем анализе той малой части светового потока, которая возвращается на фотоприемник в результате обратного рассеяния и отражений распространяющейся в волокне световой волны. Сигнал, зарегистрированный фотоприемником, носит название сигнала обратного рассеяния (СОР). В результате математической обработки этого сигнала на экране формируется изображение, представляющее собой зависимость уровня СОР от расстояния вдоль волокна. Это изображение называют рефлектограммой (от английского reflect – отражать, давать отражение) и оно позволяет определять одновременно ряд важных характеристик волоконно-оптической линии связи.

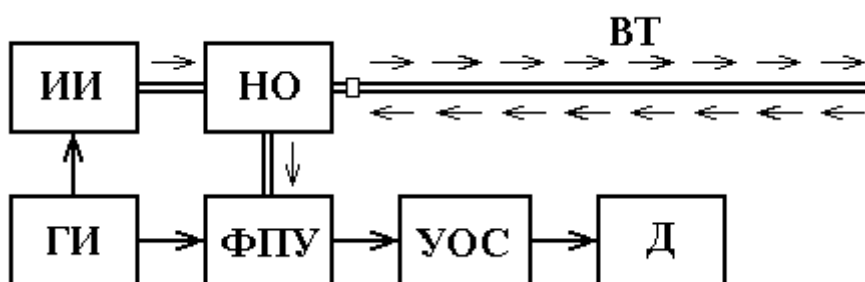


Рис. 10.8. Упрощенная структурная схема оптического рефлектометра

ИИ - источник излучения; НО - направленный ответвитель; ВТ - исследуемый волоконный тракт;  
ГИ - генератор импульсов; ФПУ - фотоприемное устройство; УОС - устройство обработки сигнала; Д - дисплей

Приборы, основанные на МОР, называются оптическими рефлектометрами (ОР). Для импульсных ОР в зарубежной литературе принята аббревиатура OTDR (Optical Time Domain Reflectometer- оптический рефлектометр во временной области).

Упрощенная схема ОР представлена на рис. 10.8. Короткий оптический импульс мощного лазера через одно плечо направленного ответвителя (НО) поступает в исследуемый ОВ. Обрато на вход ОР приходит СОР, который, как уже было сказано, представляет собой совокупность рассеянного и отраженного излучения. Через второе плечо НО он поступает на вход высокочувствительного ФПУ.

#### 1. Мощность отраженного сигнала.

Отраженное излучение формируют оптические импульсы, отраженные от локальных неоднородностей исследуемого ОВ. Их называют френелевскими отражениями. Мощность отраженного импульса  $P_r$  приходящего на вход ОР с учетом коэффициента затухания ОВ  $\alpha$  и расстояния до неоднородности  $l$  составляет

$$P_r = P_0 R K_{on} 10^{-\frac{\alpha l}{5}} = P_0 R K_{on} 10^{-\frac{\alpha \cdot ct}{5 \cdot 2n_1}} \quad (10.8)$$

здесь  $P_0$  – мощность, введенная в ОВ,  $R$  – коэффициент отражения от неоднородности,  $K_{on}$  – коэффициент оптических потерь НО,  $l$  – расстояние до неоднородности,  $t$  – временной интервал между зондирующим и отраженным импульсами:

$$t = \frac{2 \cdot l \cdot n_1}{c}, \quad (10.9)$$

$n_1$  – эквивалентный показатель преломления сердцевины ОВ,  $c$  – скорость света в вакууме.

Длительность отраженных импульсов без учета дисперсии будет равна длительности зондирующего импульса  $t_p$ .

## 2. Мощность рассеянного сигнала.

Проходящий по ОВ зондирующий импульс рассеивается в любом сечении ОВ, а рассеянное излучение распространяется равномерно во все стороны. Это рассеяние называют рэлеевским. Для мощности излучения, рассеянного с участка  $\Delta l$ , расположенного на расстоянии  $l$  от ОР справедливо

$$P_s = P_0 K_{on} \alpha_s G \Delta l \cdot 10^{-\frac{\alpha \cdot l}{5}}, \quad (10.10)$$

здесь  $\alpha_s$  – коэффициент рассеяния,  $G$  – фактор обратного рассеяния, определяющий долю рассеянного излучения, которая возвращается обратно к ОР,  $\Delta l$  – протяженность участка ОВ, с которого одновременно вызывает рассеяние оптический импульс длительностью  $t_p$ , проходящий по ОВ.

Фактор обратного рассеяния  $G$  зависит от апертурных свойств ОВ. Для ОВ со ступенчатым ППП:

$$\text{ММ: } G = \frac{NA^2}{4n_1^2}, \quad (10.11)$$

$$\text{ОМ: } G = \frac{3}{2} \left( \frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{n_1 d_{mf}^2}, \quad (10.12)$$

где  $NA$  – числовая апертура ОВ,  $d_{mf}$  – диаметр модового поля.

Для  $\Delta l$  можно записать:

$$\Delta l = \frac{c \cdot t_p}{2n_1}. \quad (10.13)$$

После усиления в ФПУ, выделения СОР из шумов (накопления) и логарифмирования в устройстве обработки сигнала (УОС) преобразованный СОР как функция времени задержки (или расстояния) отображается в графической форме в виде рефлектограммы на экране дисплея (Д).

## 3. Уровень сигнала обратного рассеяния.

Принимая некоторое значение оптической мощности  $P_z$  за уровень 0 дБ, запишем выражения для уровней обратно рассеянного  $Y_s$  и отраженного  $Y_r$  сигналов в зависимости от расстояния  $l$  и временного интервала  $t$  между зондирующим сигналом и СОР

$$Y_s = 5 \lg \frac{P_0}{P_z} + 5 \lg K_{on} + 5 \lg (\alpha_s G \Delta l) - \alpha l = 5 \lg \frac{P_0}{P_z} + 5 \lg K_{on} + 5 \lg \frac{\alpha_s G \cdot ct_{p0}}{2n_1} + 5 \lg \frac{t_p}{t_{p0}} - \alpha \frac{ct}{n_1}$$

$$Y_r = 5 \lg \frac{P_0}{P_z} + 5 \lg R - \alpha l = 5 \lg \frac{P_0}{P_z} + 5 \lg R - \alpha \frac{ct}{n_1}, \quad (10.14)$$

где  $t_{p0}$  - длительность зондирующего импульса, при которой нормируется относительный уровень СОР  $Y_{s0}$  в ближней зоне ВТ:

$$Y_{s0} = 5 \lg \frac{\alpha_s G \cdot ct_{p0}}{2n_1}. \quad (10.15)$$

В таблице 10.2 приведены типичные значения относительного уровня СОР в ближней зоне ВТ при длительности зондирующего импульса 1 нс.

Из выражений для  $Y_s$  и  $Y_r$  следует, что СОР возрастает с увеличением мощности  $P_0$  и длительности  $t_p$  зондирующего импульса, т.е. с увеличением его энергии. Кроме того, СОР возрастает с уменьшением оптических потерь  $a_{on} = -5 \lg K_{on}$ .

Таблица 10.2

Тип ВС	Длина волны, мкм	$Y_{s0}$ , дБ
МВС	0.85	-35
	1.3	-37.5
ОВС	1.31	-39.5
	1.55	-40.5

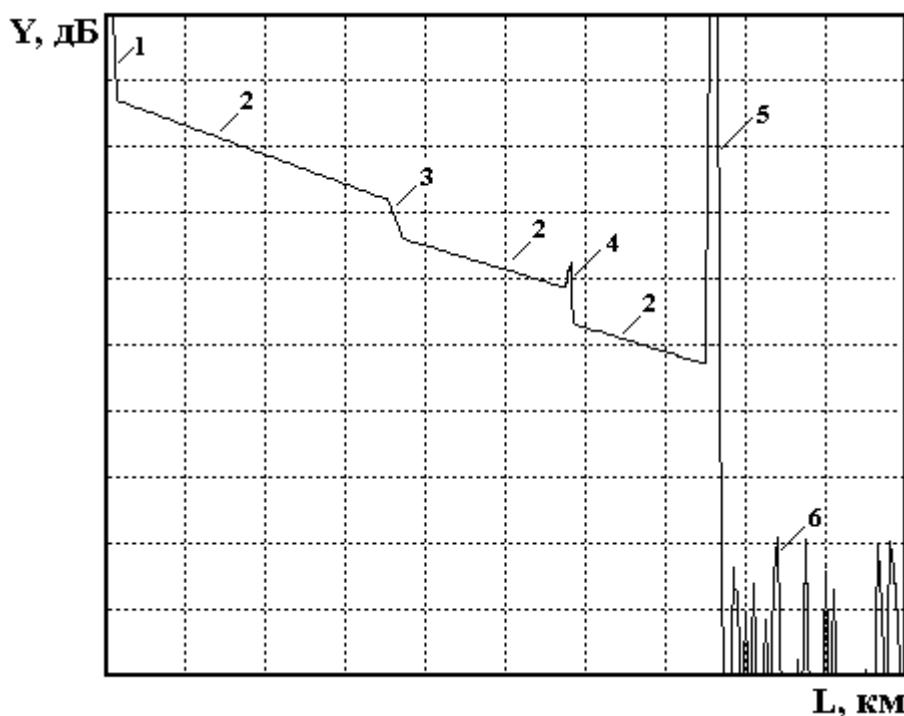


Рис.10.9. Сигнал обратного рассеяния

Типичная рефлектограмма СОР для ВТ приведена на рис 10.9. На ней можно выделить однородные участки (2) ВТ (без неоднородностей) с постоянным коэффициентом затухания  $\alpha$ , на которых СОР после логарифмирования выглядит, как прямая линия, наклон которой определяет коэффициент затухания. Наряду с линейным изменением уровня СОР на рефлектограмме имеются особенности, обусловленные различными неоднородностями. Начальный выброс сигнала (1) вызван френелевским отражением от входного торца исследуемого ОВ. Как правило, он вводит ФПУ в насыщение, а время выхода из него определяет важный параметр ОР – мертвую зону, т.е. расстояние  $\Delta l_m$ , на котором невозможно обнаружить неоднородности и измерить коэффициент затухания. Выброс сигнала с перепадом затухания (4) возникает при наличии в тракте разъемного соединителя, а также при наличии в волокне маленьких включений инородных примесей или пузырьков воздуха.

Неразъемные соединения (сварные, клеевые и механические сrostки волокон), в которых обычно отсутствуют отражения, отображаются на рефлектограмме ступенькой (3). Конец ВТ или его обрыв определяется по отраженному от заднего торца импульсу<sup>1</sup> (5) и следующему за ним участку (6) с резкими случайными перепадами уровня регистрируемого сигнала, обусловленных шумами ФПУ.

Метод обратного рассеяния обладает весьма ценными для практики свойствами:

- возможность по одной рефлектограмме определять одновременно целый ряд основных параметров ВТ;
- возможность измерения при одностороннем доступе к ВТ;
- возможность измерения не только общего затухания, но и распределения потерь вдоль ВТ;
- возможность выявления дефектных, например замокших участков, характеризующихся скачкообразным изменением сигнала обратного рассеяния;
- возможность диагностирования текущего состояния ВТ и прогнозирования аварийных ситуаций путем сравнения только что зарегистрированной и паспортной рефлектограмм ВТ.

### 10.3.2. Измерение расстояния вдоль линейного тракта

Расстояние  $L$  определяется по рефлектограмме, на которой с помощью одного или чаще двух курсоров отмечаются характерные точки, между которыми необходимо найти расстояние. Несмотря на то, что горизонтальная шкала рефлектометра градуируется непосредственно в единицах длины, прибор измеряет не расстояние, а интервал времени  $t$  между двумя точками. Результат измерения пересчитывается рефлектометром в расстояние через скорость света в волокне по выражению:

$$L = \frac{c \cdot t}{n_1}, \quad (10.16)$$

где  $c$  - скорость света в вакууме;  $n_1$  – эквивалентный показатель преломления сердцевины ОВ.

Таким образом, для определения расстояния  $L$  необходимо точно измерить интервал времени  $t$  и задать эквивалентный показатель преломления  $n_1$ . Современная электроника позволяет достаточно точно измерять временные интервалы. Задание же эквивалентного показателя преломления  $n_1$  производит оператор. Если эта величина задана неправильно, расстояние будет измерено неверно.

### 10.3.3. Измерение различных видов затухания

#### 10.3.3.1. Измерение затухания и коэффициента затухания участка ВТ

Измерение затухания с помощью ОР основано на том факте, что каждая точка однородного участка ОВ дает один и тот же уровень СОР. Уменьшение уровня СОР с увеличением расстояния, наблюдаемое на рефлектограмме вызвано общим затуханием, а не только рассеянием света.

Затухание сигнала  $a$  между двумя точками 1 и 2 (рис. 10.10) определяется как:

$$a = Y_1 - Y_2, \text{ дБ} \quad (10.17)$$

где  $Y_1$  и  $Y_2$  - уровни СОР (дБ) в точках 1 и 2 соответственно.

Средний коэффициент затухания между точками 1 и 2 ОВ можно рассчитать по формуле:

---

<sup>1</sup> Коэффициент отражения для границы раздела кварц/воздух достигает значительной величины 4%. Однако, если поверхность неровная или загрязненная, коэффициент отражения может иметь значительно меньшую величину и отражение от обрыва или заднего торца ВТ не всегда можно обнаружить.

$$\alpha = \frac{Y_1 - Y_2}{L_2 - L_1}. \quad (10.18)$$

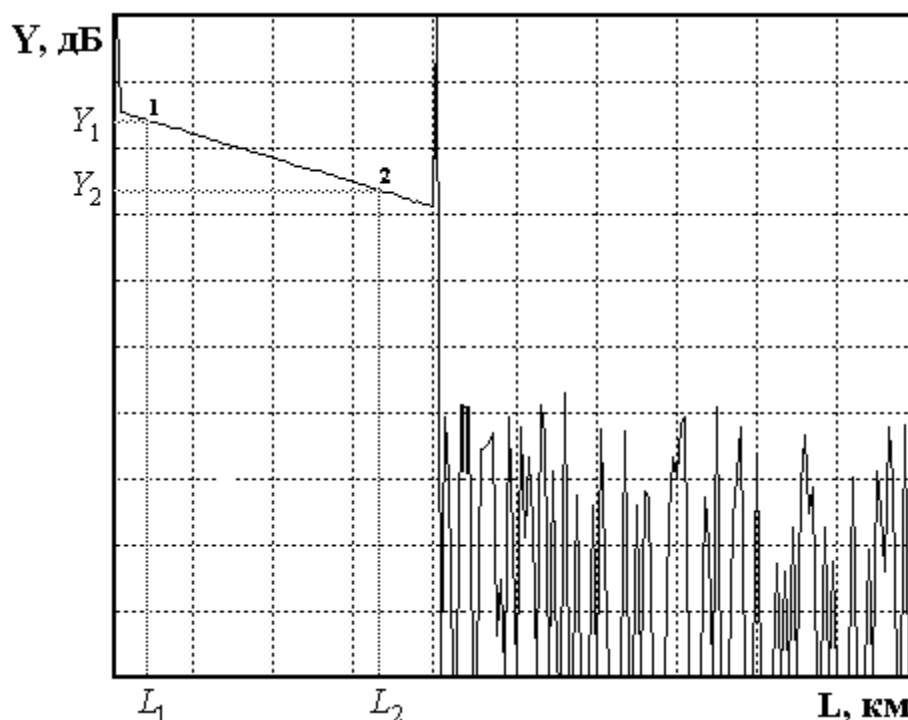


Рис. 10.10. Измерение затухания между двумя точками однородного участка ВТ

Выбор точек, между которыми определяется затухание, осуществляется с помощью двух курсоров, перемещаемых оператором по экрану дисплея. В современных ОР расстояние между курсорами, разность уровней и средний коэффициент затухания между этими точками СОР постоянно отображается на дисплее. Если точки 1 и 2 лежат на однородном участке ОВ, то средний коэффициент затухания соответствует коэффициенту затухания ОВ на этом участке.

При измерении затухания между двумя точками неоднородного ВТ возникает методическая погрешность, которая обусловлена тем, что абсолютный уровень СОР зависит от таких параметров ОВ, как коэффициент рассеяния, числовая апертура, диаметр модового поля и т.п. Например, если точки, между которыми измеряется затухание, принадлежат разным ОВ с отличающимися параметрами, то при измерении затухания возникает методическая погрешность, которую можно исключить, проведя измерения с двух концов ВТ и усреднив результат измерения.

### 10.3.3.2. Измерение потерь в разъемном и неразъемном соединениях

В разъемных и неразъемных соединениях ОВ в общем случае возникают вносимые и возвратные потери (тема 7). При определении вносимого затухания также как при измерении затухания между двумя точками возникает методическая погрешность, если параметры соединяемых ОВ отличаются. При значительном отличии параметров ОВ могут наблюдаться, так называемые, отрицательные потери (рис.10.11) - увеличение уровня СОР после соединения.



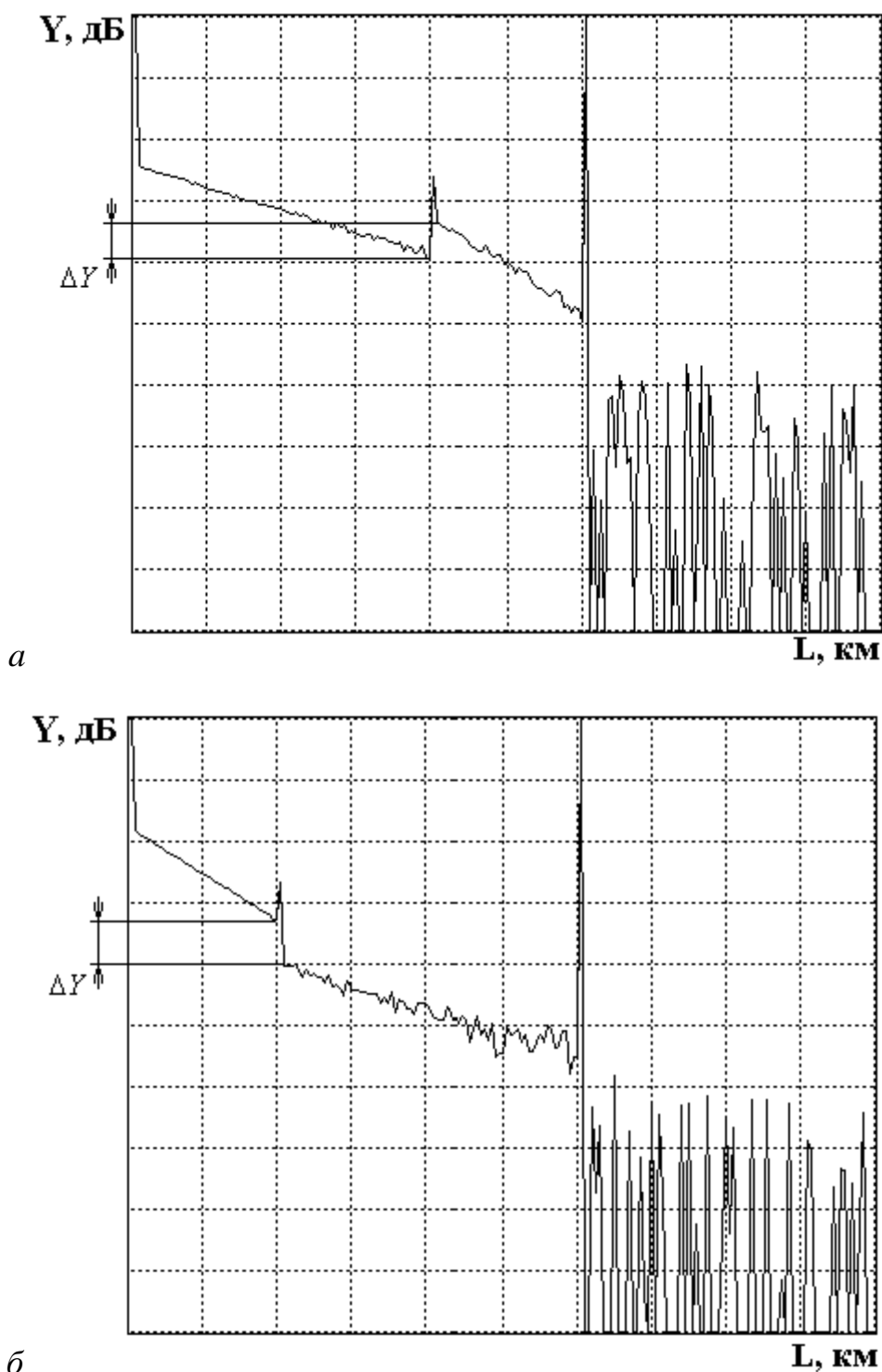


Рис.10.11. Рефлектограммы, зарегистрированные с обоих концов ВТ

Основным фактором, вызывающим такой эффект, является разница коэффициентов рассеяния соединяемых ОВ. Если последующее по ходу распространения излучения волокно будет иметь несколько более высокий коэффициент рассеяния, чем предыдущее, оно будет рассеивать большее количество света. ОР обнаружит это увеличение и зафиксирует его на рефлектограмме. Кроме того, причиной может быть отличие диаметров сердцевин: меньшее по диаметру принимающее ОВ будет рассеивать меньше света, чем больший ОВ будет передавать.

При этом измерения с другой стороны ВТ дадут в этом стыке потери положительные, превосходящие по абсолютной величине зафиксированные отрицательные.

Поэтому для правильного определения потерь в соединениях измерение с помощью ОР должно проводиться также с обоих концов ВТ (независимо от того, имел место эффект усиления или нет) при последующем усреднении полученного результата. В этом случае эффект направленности исключается.

По рефлектограмме, зарегистрированной с одного конца ВТ, потери можно определить методом пяти курсоров. На рис. 10.12 показана типичная рефлектограмма для неразъемного соединения ВС.

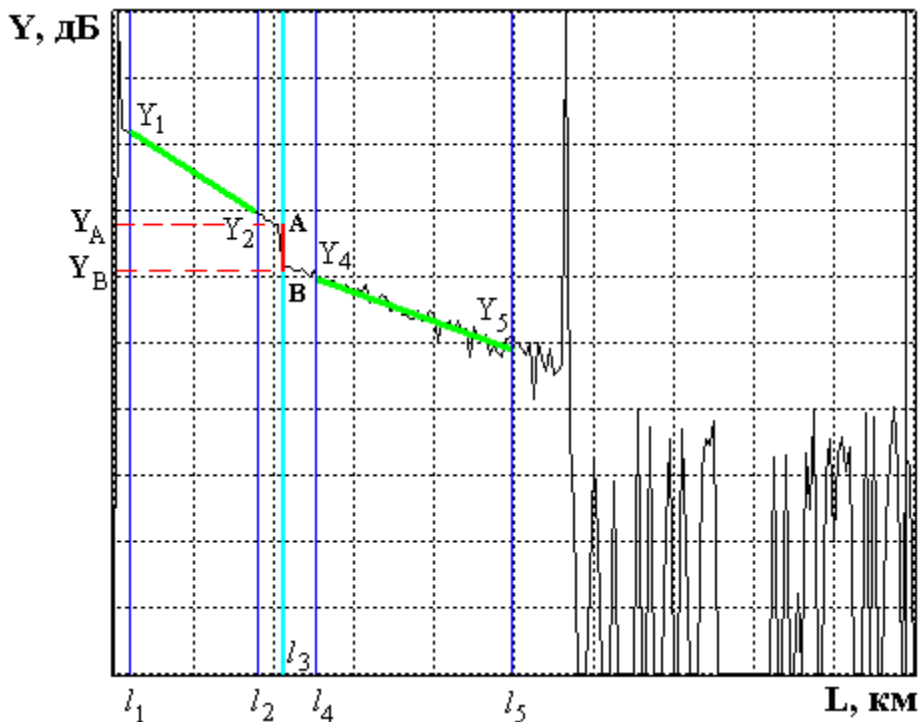


Рис. 10.12. Измерение вносимых потерь в соединении методом пяти курсоров

Для курсоров 1, 2, 4 и 5 фиксируют соответствующие уровни сигналов  $Y_1, Y_2, Y_4, Y_5$  и расстояния  $l_1, l_2, l_4, l_5$ , для курсора 3 фиксируют только расстояние  $l_3$ . За потери в неразъемном соединении принимается разность уровней  $Y_A$  и  $Y_B$ . Точки А и В находятся на пересечении прямых, аппроксимирующих сигнал обратного рассеяния на участках до и после соединения, с курсором 3. Аппроксимация производится по двум точкам, определяемым курсорами 1-2 и 4-5 соответственно, либо по большему количеству точек методом наименьших квадратов. Аппроксимация методом наименьших квадратов дает более точные результаты при значительном уровне шума.

Действительные потери в соединении могут быть рассчитаны как среднее значение двух, измеренных с разных концов значений потерь с учетом знака. Если на рефлектограмме в месте соединения имеется френелевское отражение, оно при измерении вносимого стыком затухания игнорируется.

Пятикурсорный метод измерения потерь в соединении используют современные оптические рефлектометры. Расчет потерь производится ими автоматически по аналитическому выражению, которое может быть получено, исходя из геометрических соображений.

Для вычислений, производимых вручную можно использовать упрощенную трехкурсорную методику (рис. 10.13).

Для курсоров 1, 2 и 3 фиксируют соответствующие уровни сигналов  $Y_1, Y_2, Y_3$  и расстояния  $l_1, l_2, l_3$ . За потери в соединении принимается разность уровней  $Y_A = Y_1$  и  $Y_B$ . Точка А находится в точке начала стыка на расстоянии  $l_1$ , а точка В находится на пересечении курсора 1 с прямой, аппроксимирующей сигнал обратного рассеяния на участке ВТ после соединения. Аппроксимация производится по двум точкам, определяемым курсорами 2 и 3. Курсор 2 следует располагать непосредственно после стыка, в точке, которая лежит на

линейном участке сигнала обратного рассеяния. Курсор 3 должен лежать, как можно дальше от стыка, но на линейном участке сигнала обратного рассеяния. Тогда для вносимых потерь в разъемных и неразъемных соединениях будет справедливо:

$$a_{IL} = Y_1 - Y_2 \cdot \frac{l_3 - l_1}{l_3 - l_2} + Y_3 \cdot \frac{l_2 - l_1}{l_3 - l_2}. \quad (10.19)$$

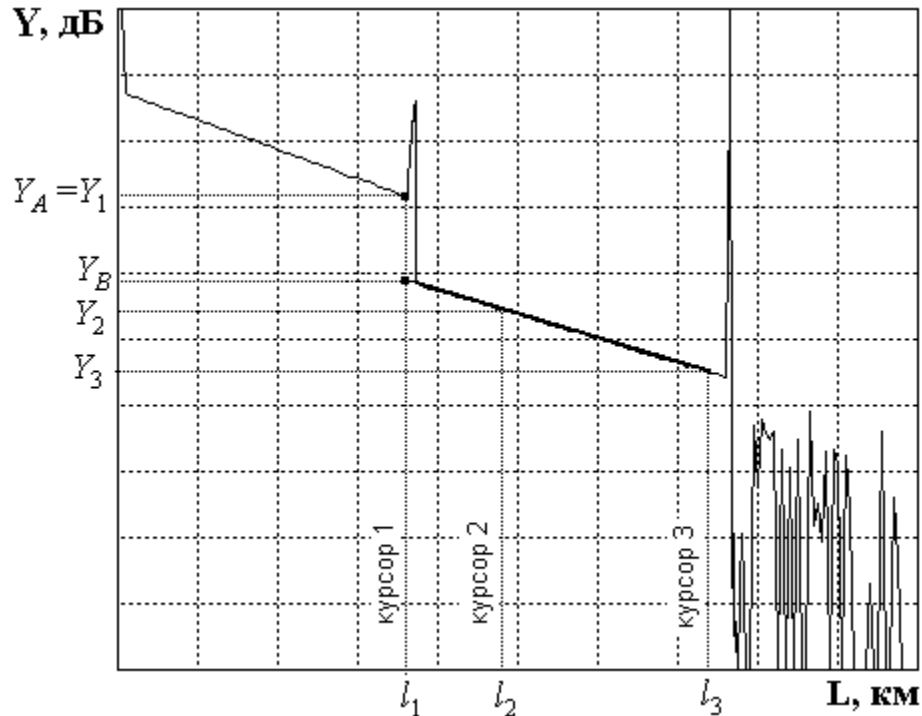


Рис. 10.13. Измерение вносимых потерь в соединении методом трех курсоров

### 10.3.3.3. Измерение возвратных потерь

Возвратные потери могут быть рассчитаны по выражению (см. тему 7):

$$a_{RL} = -10 \cdot \lg R, \quad (10.20)$$

где  $R$  – коэффициент отражения.

Наличие отражающих неоднородностей может приводить к появлению на рефлектограмме ложных всплесков, вызванных многократными отражениями сигнала. Для хороших разъемных соединителей амплитуда отраженного сигнала слишком мала для создания такой ложной картины, но поцарапанные или грязные соединители могут давать значительный уровень отражения.

Для определения возвратных потерь с помощью ОР необходимо получить рефлектограмму, на которой виден выброс сигнала, обусловленный френелевским отражением в разъемном соединении (рис. 10.14). Этот выброс не должен вызывать перегрузку фотоприемного устройства. По рефлектограмме измеряют уровни  $Y_S$  и  $Y_F$ .

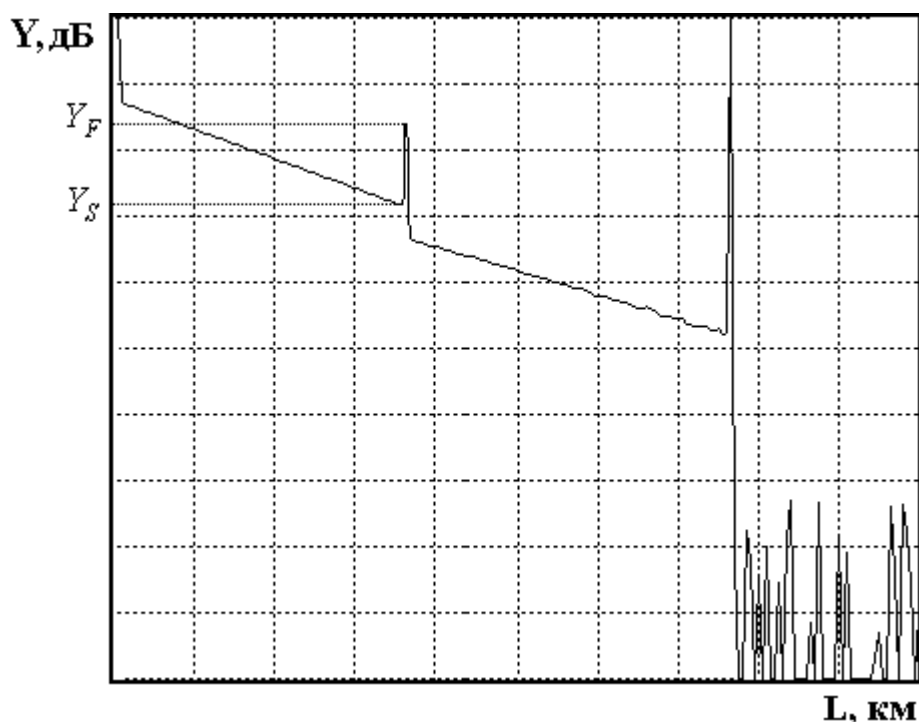


Рис. 10.14. Методика измерения возвратных потерь

Для расчета возвратных потерь по рефлектограмме используют выражение:

$$a_{RL} = -2 \cdot Y_{s0} - 10 \cdot \lg \frac{t_p}{t_{p0}} - 10 \cdot \lg \left( 10^{\frac{Y_F - Y_S}{5}} - 1 \right), \quad (10.21)$$

где  $Y_{s0}$  – относительный уровень СОР при длительности зондирующего импульса  $t_{p0}$ ;  $t_p$  – длительность зондирующего импульса, при которой была зарегистрирована рефлектограмма.

Для  $t_{p0}=1$  нс типичные значения затухания обратного рассеяния  $Y_{s0}$  для стандартных ОВ приведены в таблице 10.2. Более точные значения для ОВ конкретного производителя должны определяться экспериментально.

Современные ОР, как правило, позволяют проводить измерение возвратных потерь в автоматическом режиме.

### 10.3.4. Параметры современных ОР

В настоящее время существует большой выбор ОР. Все современные ОР имеют устройства для накопления СОР от отдельных точек ВТ, логарифмирования СОР, оперативное запоминающее устройство для хранения результатов измерения СОР в каждой точке. В состав ОР входит графический дисплей, позволяющий по зарегистрированной рефлектограмме с помощью одного или нескольких курсоров и встроенных функций определять различные параметры ВТ. Большинство ОР имеют возможность обмениваться данными с компьютером через стандартный интерфейс.

Наиболее важными параметрами ОР, определяющими его соответствие потребностям измерителя, являются динамический диапазон, время измерения, пространственное разрешение и ширина мертвой зоны.

#### 10.3.4.1. Динамический диапазон

Динамический диапазон, определяющий максимальную длину ОВ, которую можно измерить с помощью ОР, является основным параметром ОР, представляющим интерес для пользователя. Динамический диапазон определяет максимальное затухание ВТ, при котором отношение СОР к шуму  $\geq 1$ .

Строго говоря, динамический диапазон не является параметром ОР. Он зависит от типа и параметров исследуемого ОВ и используемой длины волны. Динамический диапазон возрастает с увеличением мощности  $P_0$  и длительности зондирующего сигнала  $t_p$ , увеличения числа накоплений  $N$  и времени измерения, а также с уменьшением уровня шума ФПУ.

Для динамического диапазона справедливо

$$D = Y_{sm} - Y_{nop} = 51 \lg \frac{P_0}{P_{nop0}} + Y_{s0} + 7.51 \lg \frac{t_p}{t_{p0}} + 2.51 \lg N - a_{on}, \quad (10.22)$$

где  $Y_{sm}$  – максимальный уровень обратного рассеяния,  $P_{nop0}$  – минимальная (пороговая) мощность, которую может зарегистрировать ФПУ ОР при длительности зондирующего импульса  $t_{p0}$ ,  $a_{on}$  – оптические потери НО.

Динамический диапазон может быть определен экспериментально по зарегистрированной рефлектограмме, как показано на рис. 10.15.

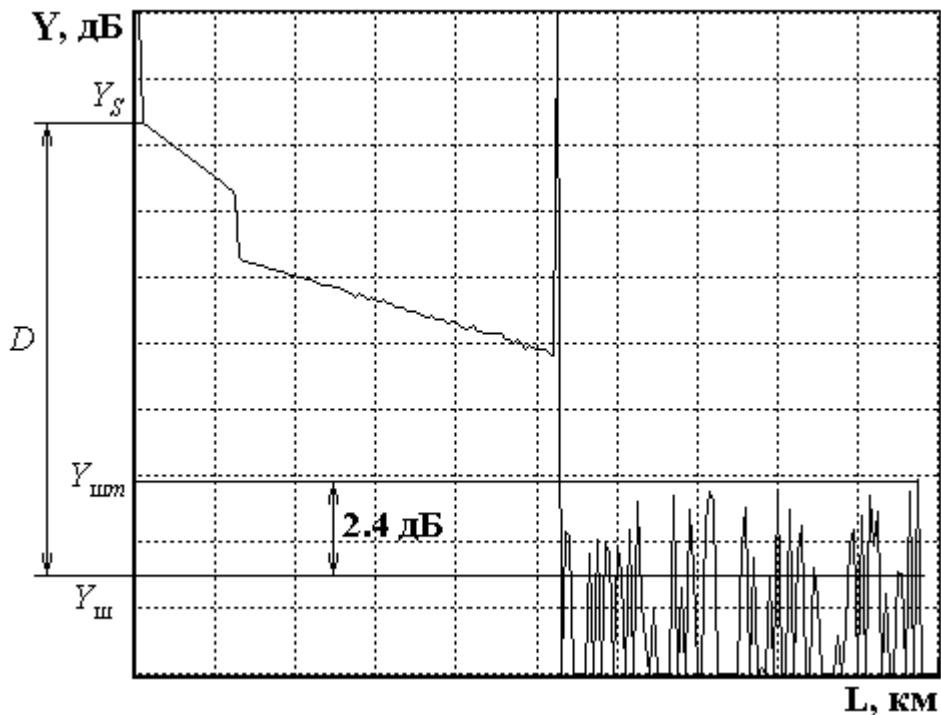


Рис. 10.15. Экспериментальное определение динамического диапазона

### 10.3.4.2. Время измерения

Регистрация рефлектограмм происходит не в реальном масштабе времени, так как для выделения сигнала из шума необходимо накопление СОР. Время измерения зависит от числа накоплений  $N$  и периода следования зондирующих импульсов  $T_0$ . Последняя величина зависит от максимальной длины ВТ  $L_m$ , которая, также как и  $N$ , устанавливается тем или иным способом оператором. Время измерения  $T_{meas}$  можно определить по выражению

$$T_{meas} = N \cdot T_0 = \frac{N \cdot L_{max} \cdot n_1}{c}. \quad (10.23)$$

Отметим, что время измерения по этому выражению будет определяться при параллельном накоплении СОР во всех точках рефлектограммы (параллельное накопление). Это наиболее эффективное (быстрое) накопление. Однако оно требует использование быстродействующей элементной базы для накопителя. Это затрудняет использование параллельного накопления для малогабаритных полевых рефлектометров. Рефлектометры предыдущих поколений использовали последовательное накопление, когда за один период зондирования измеряется СОР только в одной точке рефлектограммы. В этом случае время измерения возрастает в  $M$  раз, где  $M$  – число точек на рефлектограмме.

Кроме параллельного и последовательного накоплений находит применение и параллельно-последовательное накопление. Время измерения при этом имеет промежуточное значение между двумя крайними случаями.

### 10.3.4.3. Пространственное разрешение

Пространственное разрешение определяется минимальным расстоянием между двумя локальными неоднородностями, которые можно видеть на рефлектограмме раздельно. Пространственное разрешение в первую очередь зависит от длительности зондирующего импульса. В этом случае пространственное разрешение может быть определено по выражению:

$$\Delta l = \frac{c \cdot t_p}{2n_1}. \quad (10.24)$$

Недостаточная полоса пропускания ФПУ приводит к искажению (уширению) отраженных от неоднородностей импульсов и, следовательно, к ухудшению пространственного разрешения. Значительная дисперсия может также ухудшать пространственное разрешение. Кроме того, пространственное разрешение ухудшается, если две неоднородности сильно отличаются по коэффициенту отражения. Тогда неоднородность с большим коэффициентом отражения маскирует неоднородность с малым коэффициентом отражения. Пространственное разрешение ухудшается также при насыщении ФПУ отраженными от неоднородностей сигналами. Для улучшения пространственного разрешения в ближней зоне ВТ необходимо уменьшать длительность зондирующего импульса, не допускать насыщения ФПУ, уменьшая мощность зондирующего импульса или коэффициент передачи ФПУ.

При рефлектометрических измерениях всегда имеет место компромисс между дальностью измерений и разрешающей способностью.

### 10.3.4.4. Мертвая зона

Мертвая зона возникает на рефлектограмме на участке, следующим за крупной отражающей неоднородностью, которая вводит ФПУ в насыщение. Для восстановления чувствительности после такой перегрузки ФПУ требуется время. Это приводит к потере информации после насыщения. В результате определенный сегмент волокна оказывается исключенным из процесса тестирования.

Обычно самое большое отражение, которое насыщает ФПУ, возникает от входного торца ВТ. Отраженный импульс сильно расширяется и пока ФПУ не выйдет из насыщения другие неоднородности нельзя обнаружить. Ширина этого импульса  $\Delta l_m$  определяет ширину мертвой зоны ОР. Различают мертвую зону по обратному рассеянию  $\Delta l_{ms}$  и по отражению  $\Delta l_{mr}$ , как показано на рис. 10.16.

Мертвая зона по отражению определяется расстоянием между началом отраженного импульса и точкой с уровнем  $-1.5$  дБ по отношению к насыщению. За этой мертвой зоной могут быть идентифицированы последующие отражательные события.

Мертвая зона по рассеянию определяется расстоянием между началом отраженного импульса и точкой с уровнем, который отличается от уровня сигнала обратного рассеяния на  $\pm 0.5$  дБ. Для уменьшения мертвой зоны в ближней зоне ВТ в выходной разъем ОР вводят иммерсионную жидкость, уменьшают длительность и мощность зондирующего импульса, включают между ОР и исследуемым ВТ дополнительную бухту ОВ.

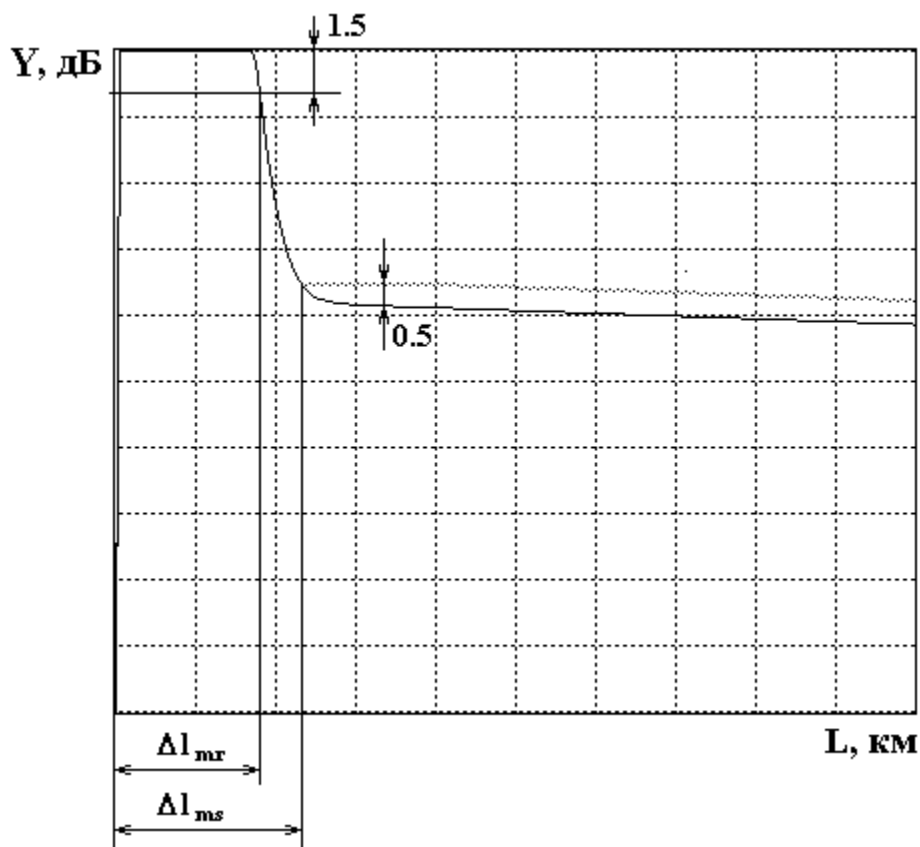


Рис. 10.16 Мертвая зона

Один из основных факторов, от которого зависит ширина мертвой зоны, - длительность зондирующего импульса. Кроме того, ширина мертвой зоны увеличивается с ограничением ширины полосы пропускания приемника. Ширина мертвой зоны по отражению зависит от расстояния до отражающей неоднородности и коэффициента отражения от нее. Чем больше расстояние до отражающей неоднородности, тем меньше уровень отраженного сигнала, приходящего на ФПУ. Следовательно, если неоднородность характеризуется значительным коэффициентом отражения, но находится достаточно далеко, она может как привести, так и не привести к образованию мертвой зоны.

#### 10.3.4.5. Оптимальный выбор параметров ОР

Одной из основных целей рефлектометрических измерений является измерение коэффициентов затухания на различных участках ВТ (на различных строительных длинах) и вносимых и возвратных потерь в разъемных и неразъемных соединениях. При этом очень важно иметь малую погрешность определения относительных уровней  $SOP$  на больших расстояниях от ОР. Это требует большого динамического диапазона, для увеличения которого необходимо увеличивать длительность зондирующего импульса, что приводит к ухудшению пространственного разрешения.

Другой основной целью рефлектометрических измерений является измерение расстояний до различных неоднородностей, в качестве которых можно рассматривать конец ВТ, обрыв, разъемные и неразъемные соединения, локальные дефекты. Для увеличения точности этих измерений необходимо уменьшать длительность зондирующего импульса.

Повышению точности измерений и успешному достижению обеих целей способствует увеличение числа накоплений и времени измерения.

Выбор длительности зондирующего импульса должен производиться с учетом конкретной измерительной задачи. Для получения более полной информации о ВТ желательно регистрировать рефлектограммы с двух сторон ВТ и при разных длительностях зондирующего импульса. Время измерения и число накоплений желательно увеличивать для уменьшения погрешности измерений.

### Длина волны:

Оптическое волокно обычно используется и тестируется только на трех диапазонах длин волн: 850 нм, 1300 (1310) нм и 1550 нм. Многомодовые волокна работают в диапазонах 850 нм и 1300 нм. Одномодовые волокна – только в диапазонах 1310 нм и 1550 нм.

Длина волны для тестирования – одна из важных характеристик ОР. Крайне важно тестировать сеть волоконно-оптической связи на рабочей длине волны. Однако для получения полной информации может оказаться полезным тестирование и на других длинах волн.

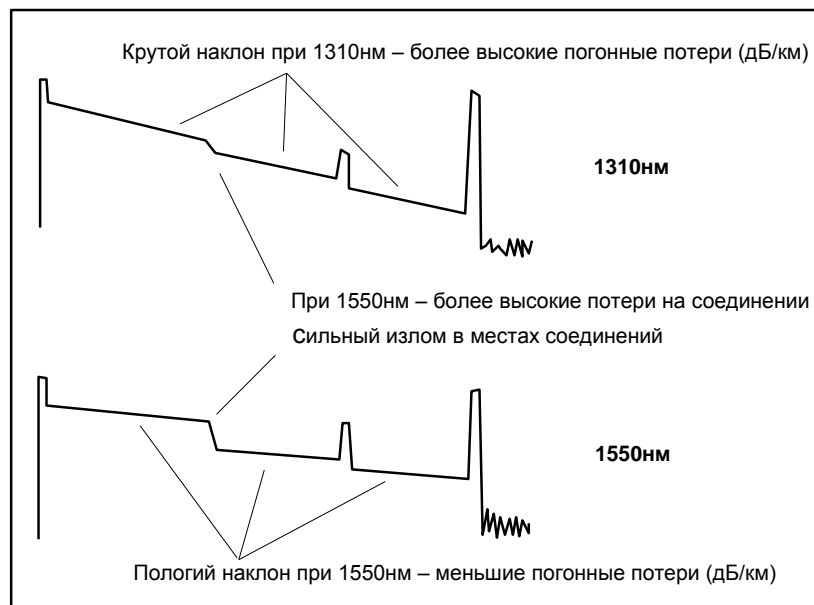


Рис. 10.20. Сравнение рефлектограмм, снятых на разных длинах волн

Яснее всего зависимость потерь от длины волны можно видеть при сравнении двух рефлектограмм одного и того же волокна, снятых на двух различных длинах волн. Разницу между двумя рефлектограммами можно видеть на рис. 10.17. На рефлектограмме, снятой на более длинной из этих двух волн, общие потери будут ниже, чем на рефлектограмме, снятой на более короткой волне, так как у нее меньше потери на рассеяние. Это выглядит как более пологий наклон рефлектограммы (более низкие погонные, или удельные потери – дБ/км). Однако на более длинной волне наблюдается тенденция к большим потерям световой энергии на изгибах волокна. Сравнивая две рефлектограммы, сделанные на этих двух длинах волн, можно легко определить, возникло ли в волокне напряжение из-за изгибов. Чрезмерные изгибы часто имеют место на стыках, в соединительных кожухах, на изгибах кабеля на трассе, а также в концевых разъемах.

В некоторых случаях оказывается полезным протестировать волокно на других длинах волн, не входящих в рабочие диапазоны. Ряд современных рефлектометров позволяют проводить измерения на 1244 и 1625 нм. Эти длины волн называют внеполосными.

Длина волны 1244 нм используется для тестирования волокон, работающих на длине волны 1310 нм, в области «водяного максимума». Если затухание в этой области возрастает вследствие необычной химической активности в волокне, то оно может вскоре затронуть и рабочий диапазон.

Длина волны 1625 нм используется для мониторинга волокна, работающего на длине волны 1550 нм. Тестирование на этой длине волны обычно проводится на работающем волокне посредством ввода и вывода тестирующего светового излучения в волокно при помощи WDM-устройства (светоделительного мультиплексора). Потери на длине волны 1625 нм аналогичны потерям на 1550 нм, но выше чувствительность к потерям на изгибы, то есть эта проблема может быть выявлена до того, как она начнет влиять на работу сети.