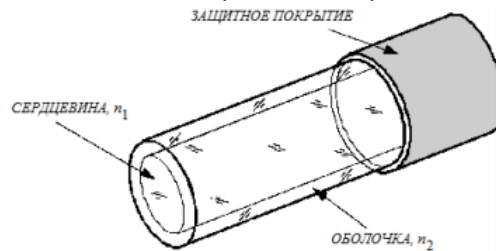


## Оптические волноводы и кабели

Основным элементом оптического кабеля является волоконный световод – круглый стержень из оптически прозрачного диэлектрика, структура которого обеспечивает распространение вдоль него световых волн. Из-за малых размеров поперечного сечения волоконных световодов их обычно называют оптическими волокнами. Оптическое волокно, как правило, имеет двухслойную конструкцию и состоит из сердцевины и оболочки, как показано на рисунке, с разными показателями (коэффициентами) преломления  $n_1 = \sqrt{\varepsilon_1}$  и  $n_2 = \sqrt{\varepsilon_2}$ .

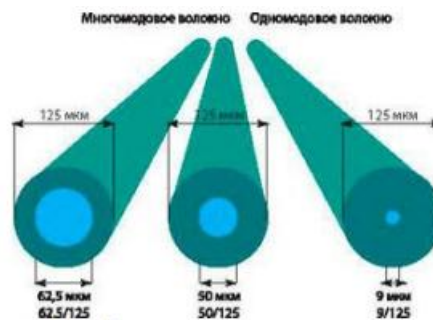


Сердцевина оптического волокна выполнена из оптически более плотного материала - среды с более высоким значением показателя преломления. По сердцевине передается основная часть электромагнитной мощности сигнала. Оболочка выполняется из оптически менее плотного материала и служит для исключения влияния внешних элементов конструкции на процесс передачи электромагнитных волн по световоду. Оболочка имеет одно или несколько защитных покрытий.

Сердцевина и оболочка оптоволокна выполняются из чистого кварцевого стекла, или с примесями химических элементов и их соединений, изменяющих диэлектрическую проницаемость кварцевого стекла. По волокну могут распространяться как одна мода (одномодовый режим), так и много - до 100 000 – мод (многомодовый режим). Режим передачи влияет на дисперсию, а следовательно, и на пропускную способность волокна. Число мод зависит от диаметра и диэлектрической проницаемости волокна.

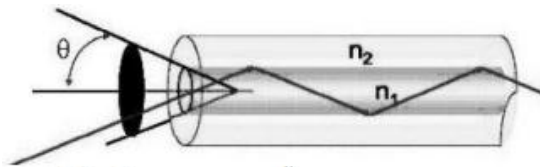
Волоконные световоды делятся на две группы: многомодовые и одномодовые (см. рисунок). В конструктивном плане они различаются диаметром сердцевины.

Диаметр сердцевины одномодового волокна меньше или соизмерим с длиной волны ( $d < \lambda$ ), многомодового – больше длины волны ( $d > \lambda$ ). Практически диаметр сердцевины световода составляет 8-10 мкм у одномодовых и 50 или 62,5 мкм у многомодовых световодов. Диаметр оболочки оптического волокна от группы не зависит и составляет 125 мкм, а диаметр волокна по защитному покрытию – 250 мкм. Оптические волокна



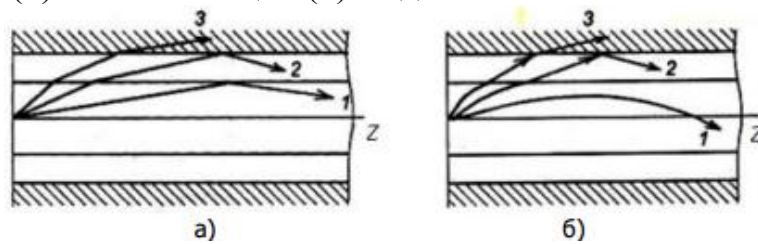
также различаются по профилю показателя преломления – закону изменения показателя преломления вдоль радиуса сердцевины. По данному показателю они делятся на ступенчатые и градиентные. В ступенчатых волокнах показатель преломления в сердцевине постоянен, и имеется резкий переход от  $n_1$  сердцевины к  $n_2$  оболочки. Градиентные оптические волокна имеют непрерывное плавное изменение показателя преломления в сердцевине по радиусу волокна от центра к периферии.

Для пояснения принципа действия световода наряду с точным электродинамическим подходом, рассмотренном ранее, используется упрощенная модель, использующая приближение геометрической оптики. В геометрической оптике электромагнитные волны изображают лучами, распространяющимися от источника. В оптически однородных средах лучи прямолинейны. При падении световой волны под углом  $\varphi_{\text{п}}$  на плоскую границу раздела двух диэлектрических сред в общем случае появляются отраженная волна под углом отражения  $\varphi_{\text{о}}$  и преломленная (прошедшая) волна под углом преломления  $\varphi_{\text{пр}}$ . По законам Снеллиуса, изучаемым в дисциплине "электромагнитные поля и волны", угол падения равен углу отражения (закон отражения) углов преломления и падения, а угол преломления связан с углом падения выражением  $\varphi_{\text{пр}} = \arcsin[(n_1/n_2)\sin\varphi_{\text{п}}]$ . Угол падения, при котором начинает наблюдаться явление полного внутреннего отражения, то есть преломленный луч распространяется вдоль границы раздела сред, не переходя в оболочку, называется критическим углом полного внутреннего отражения (см. рисунок).



Угол полного отражения находится из условия  $\sin\theta = n_2/n_1$ . Если  $\varphi_{\text{п}} > \theta$ , то свет полностью отражается в исходную среду, не проникая в другой материал. Рассмотрим оптоволокно со ступенчатым профилем показателя преломления: Пучок световых лучей от точечного источника на торце оптического волокна преобразуется в два типа лучей: меридиональные, которые пересекают ось волокна, и косые, которые эту ось не пересекают. Часть меридиональных и косых лучей, испытывая полное внутреннее отражение в местах падения на границу «сердцевина-оболочка», распространяется зигзагообразно вдоль оптоволокна. В зависимости от

угла падения лучей, образуемые ими моды делятся на направляемые (1), моды оболочки (2) и вытекающие (3) моды.



Лучи, вся энергия которых сразу же излучается в окружающее пространство (в защитную оболочку) и не распространяется вдоль оптоволокна, называются излучаемыми модами. Лучи, траектории которых полностью лежат в сердцевине, называются направляемыми модами. Лучи, энергия которых частично распространяется вдоль оптоволокна, а частично переходит в оболочку и излучается в окружающее пространство, называются вытекающими модами. Вытекающие моды образуются в первую очередь за счет косых лучей. На рис. показано распространение лучей в а) ступенчатом и б) градиентном ОВ.

Одним из важнейших параметров, характеризующих волокно как среду, в которой происходит распространение волн, является относительная разность показателей преломления сердцевины и оболочки

$$\Delta = \frac{n_2 - n_1}{n_1}.$$

Для одномодовых оптических волокон  $\Delta = 0,3\%$ , а для многомодовых значение  $\Delta = 1-2\%$ .

Максимальный угол ввода луча в оптоволокно, при котором луч удерживается сердцевиной, характеризуется числовой апертурой ступенчатого профиля

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

для градиентного профиля

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

где  $r$  – текущий радиус;  $a$  – радиус сердцевины;  $n_1$  – показатель преломления в центре сердцевины.

*Нормированная частота.* частотой оказывается целесообразным ввести нормированную частоту  $v$ , которая объединяет структурные параметры ОВ и длину волны излучения:

$$v = \pi d_c NA / \lambda,$$

где  $d_c$  – диаметр сердцевины ОВ;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $NA$  – числовая апертура ОВ.

Значение числовой апертуры указывает на то, как свет вводится в волокно и распространяется по нему. Волокно с большим значением числовой апертуры хорошо принимает свет, а в волокно с малым значением можно ввести только узконаправленный пучок света. Если имеются два волокна с одним и тем же диаметром сердцевины, но с

различными числовыми апертурами, волокно с большей апертурой будет принимать больше световой энергии от источника света. Если есть два волокна с одинаковыми апертурами, но различными диаметрами, волокно с большим диаметром примет больше световой энергии. Волокна большими апертурами и диаметрами больше подходят для недорогих передатчиков, таких как светодиоды, которые не способны концентрировать выходную энергию в узкий когерентный пучок, как лазеры, и излучают под большим углом.

### Характеристики одномодовых ОВ

ФИРМА		Lucent Technologies		Corning		Fujikura		
ПАРАМЕТРЫ		SM-9/125	TrueWave RS	LEAF	SMF-28	SM-10/125	DSM-8/125	DSMNZ-9/125
Фирменное обозначение		SM-9/125	TrueWave RS	LEAF	SMF-28	SM-10/125	DSM-8/125	DSMNZ-9/125
Тип волокна		SMF	NZDSF	NZDSF	SMF	SMF	DSF	NZDSF
Соответствие ITU-T		G.652	G.655	G.655	G.652	G.652	G.653	G.655
Диаметр модового пятна, мкм, на $\lambda$ , нм	1300	9.3±0.5	—	—	9.3±0.5	8.5±9.6	—	—
	1550	10.5±1.0	8.4±0.6	9±1.0	10.5±1.0	—	8.1	9.5±0.5
Длина волны отсечки, нм	волокна	1150±1350	—	—	—	1180±1350	—	1450
	кабеля	≤1260	≤1260	≤1260	≤1260	—	—	—
Диаметр оболочки, мкм		125,0±1.0	125,0±1.0	125,0±1.0	125,0±1.0	125,0±1.0	125,0±1.0	125,0±1.0
Диаметр покрытия, мкм		245,0±10	245,0±10	245,0±10	245,0±10	245,0±10	245,0±10	245,0±10
Неконцентричность сердцевин и оболочки, мкм		≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 0,6	1	1	1
Некруглость оболочки, %		≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0	1,0	≤ 1,0	≤ 1,0
Неконцентричность покрытия, мкм		≤ 12	≤ 12	≤ 12	≤ 12	—	—	—
Длина волны нулевой дисперсии, нм		1300÷1322 1312(ном)	>1450	—	1301.5-1321.5 1312(ном)	1301 - 1322	1525 - 1575	—
Наклон кривой дисперсии пс/(нм <sup>2</sup> ·км)		0,092 0.088(ном)	0,045	—	0,092	0,092	0,092	—
Коэффициент хроматической дисперсии, пс/(нм·км)		≤ 18 (1550 нм)	-9(1310нм) 4,52(1550нм)	—	1,0÷6,0 (1530÷1565 нм)	≤3,5(1285-1330нм) ≤18(1550нм)	3,5(1525-1575нм)	1,0÷6,0 (1550нм)
Поляризационная модовая дисперсия, пс/√км		< 0.2	≤ 0.5 (1550 нм)	≤ 0.2 (1550 нм)	≤ 0.5	—	≤ 0.5	≤ 0.5
Максимальное затухание на длине волны (дБ/км) на $\lambda$ , нм	1310	0.21±0.40	—	≤0.5	≤ 0.34	≤ 0.34	—	≤ 0.45
	1550	0.35±0.30	0.22±0.25	≤0.25	≤ 0.2	≤ 0.22	≤ 0.30	≤ 0.25
Максим. превышение затухания в диапазоне 1285 ÷ 1330нм, относительно затухания на $\lambda=1310$ нм		Менее чем на 1.0	—	—	Менее чем на 0.05	Менее чем на 0.05	Менее чем на 0.05	—
Максим. превышение затухания в диапазоне 1525 ÷ 1575нм, относительно затухания на $\lambda=1550$ нм		Менее чем на 0.05	Менее чем на 0.27-0.3	Менее чем на 0.05	Менее чем на 0.05	Менее чем на 0.05	Менее чем на 0.05	<0.25
Затухание в пике ОН (1383±3нм)		<2.0	<2.0	<1.0	<2.1	<1.0	<1.0	—
Механическая прочность (ГПа) при перемотке с удлинением, %		0.7 (1% удлинения)	≥0.7 (1% удлинения)	≥0.7 (1% удлинения)	≥0.7 (1% удлинения)	0.8 (1% удлинения)	0.8 (1% удлинения)	0.8 (1% удлинения)
Сила снятия покрытия, Н		1.3 ...8.9	1.3 ...8.9	3.2	3.2	—	—	—
Эффективный групповой показатель преломления для волн, нм	1310	1.466	1.471	—	1.4675	1.465	1.468	—
	1550	1.467	1.470	1.469	1.4681	1.465	1.468	1.469
Числовая апертура		0.12	—	—	0.13	—	—	—
Разность показателей преломления, %		0.33	—	—	0.36	0.36	—	—
Собственный радиус изгиба, м		≥ 2	≥ 2	≥ 4	≥ 4	—	≥ 4	≥ 4
Профиль показателя		ступенька	—	треугольн	ступенька	ступенька	—	—



Лучевое представление направляемых мод, хоть и является наглядным и простым, не учитывает свойств света как электромагнитной волны и во многих случаях не позволяет получить правильные результаты. Согласно волновой теории свет представляет собой электромагнитное колебание очень высокой частоты ( $10^{14}$ - $10^{15}$  Гц), и следовательно, процесс передачи световых сигналов может рассматриваться как процесс распространения электромагнитных волн. Особенность структуры электромагнитного поля направляемых мод характеризуется индексами  $n$  и  $m$  (например,  $HE_{nm}$  или  $HN_{nm}$ ). Индекс  $n=0,1,2\dots$  характеризует азимутальные свойства волны, т.е. число полных изменений поля по окружности, а  $m=1,2\dots$  – радиальные, т.е. число изменений поля по диаметру сердцевинки волокна. Чем меньше диаметр сердцевинки  $d_c$ , тем меньше сечение светового потока, поступающего в оптическое волокно, тем меньше различных типов колебаний (обусловленных множеством решений уравнений Максвелла), или мод, возникает в нём. В ОМ волокном световоде поддерживается только одна гибридная мода  $HE_{11}$ , называемая *основной модой*. В ММ волоконном световоде поддерживаются различные, как гибридные моды так и Е- и Н-моды. Не все моды указанных наборов можно реализовать. Чтобы понять, какие моды могут возникнуть, нужно провести достаточно сложный и кропотливый анализ. Сопоставляя волновую теорию с геометрической оптикой, следует отметить, что симметричные моды  $E_{0m}$  и  $H_{0m}$  соответствуют *меридиональным* лучам, несимметричные (смешанные) моды  $HE_{nm}$  и  $EH_{nm}$  – *косым* лучам.

В волоконном световоде для основной волны может быть реализован одноволновый или одномодовый режим в пределах от критической частоты основного типа до критической частоты волны ближайшего типа. Если на заданной рабочей частоте параметры световода выбрать так, чтобы следующие высшие моды  $E_{01}$ ,  $H_{01}$ ,  $HE_{21}$  с более высокими частотами отсечки не могли распространяться, то получим одномодовый световод, т.е. световод с одной только распространяющейся модой  $HE_{11}$ . В этом случае должно выполняться условие одномодовости для двухслойного световода. Расчёт на основе уравнений Максвелла позволяют найти простой критерий распространения одной основной моды:

$$0 < V < 2,405.$$

то есть для следующей высшей моды  $V_{kp}=2,405$ . Точное значение константы в правой части неравенства определяется первым нулём функции Бесселя  $J_1(g_1, a)$ , где  $g_1$  – поперечное волновое число для сердцевинки с показателем преломления  $n_1$ ,  $a=d_c/2$ . Если  $V > 2,405$ , то режим работы волоконного световода многомодовый. На этой стадии удобно перейти к рассмотрению ненормированных критических параметров. Для определения критической частоты и критической длины волны мод более высоких порядков можно воспользоваться следующими формулами:

$$v_{кр} = \frac{c P_{nm}}{\pi d_c \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}, \text{ ТГц и } \lambda_{кр} = \frac{\pi d_c \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{P_{nm}}, \text{ мкм,}$$

где  $P_{nm}$  – нули функции Бесселя  $J_l(g_l, a)$ .

Поскольку условие ( $V > 0$ ) выполняется всегда, мода  $HE_{11}$  существует и распространяется при любой длине волны и структурных параметрах. Она образуется лучом, направленным вдоль оси оптоволокна. В кабелях связи применяются в основном слабонаправляющие оптические волокна, у которых показатели преломления сердцевины и оболочки отличаются менее, чем на 1%, т.е.  $n_1 \approx n_2$ . Подобное приближение приводит к возникновению более чем одной моды с одинаковыми скоростями распространения. Это

по

звolyет составить линейную комбинацию гибридных мод, которая имеет линейную поляризацию, является преимущественно поперечной, и перейти непосредственно к линейно-поляризованным модам  $LP_{nm}$ . Структура линейно-поляризованных мод имеет следующий вид:

$LP_{01} \rightarrow HE_{11}$

$LP_{11} \rightarrow E_{01}, H_{01}, HE_{21}$

$LP_{21} \rightarrow EH_{11}, HE_{31}$

$LP_{02} \rightarrow HE_{12}$

Фазовые скорости направляемых мод всегда находятся в пределах

$$\frac{1}{n_1} \leq \frac{v_{\phi}}{c} \leq \frac{1}{n_2}.$$

При заданных структурных параметрах оптоволокна можно определить длину волны отсечки – минимальную длину волны, при которой в оптоволокне распространяется только одна мода

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{2,405} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = 2,61a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

Если рабочая длина волны меньше длины волны отсечки ( $\lambda < \lambda_c$ ), оптоволокно становится многомодовым.

# Характеристики многомодовых оптических волокон

ФИРМА ПАРАМЕТРЫ		Lucent Technologies	Corning		Fujikura			Sumitomo Electric	
Диаметр сердцевины, мкм		62,5±3,0	62,5±3,0	50±3,0	50±3,0	50±3,0	50±3,0	62,5±3,0	
Неконцентричность сердцевины, %		≤6,0	≤5,0	≤5,0	—	—	—	—	
Диаметр оболочки, мкм		125,0±1,0	125,0±0,2	125,0±0,2	125,0	125,0±0,2	125,0±0,2	125,0±0,2	
Диаметр покрытия, мкм		245,0±10	245,0±10	245,0±10	250,0	250,0±10	250,0±10	250,0±10	
Неконцентричность сердцевины и оболочки, мкм		≤3,0	≤3,0	≤3,0	—	—	—	—	
Некруглость оболочки, %		≤2,0	≤2,0	≤2,0	—	—	—	—	
Неконцентричность покрытия, мкм		≤12	≤12	≤12	—	—	—	—	
Длина волны нулевой дисперсии, нм		1328±1350	1332±1354	1297±1316	—	—	—	—	
Наклон кривой дисперсии пс/(нм² км)		0,11	0,097	≤0,101	—	—	—	—	
Максимальное затухание (дБ/км) на λ, нм	850	2,8±3,5	2,8±3,0	≤2,5 2,4±2,5	3,0	3,0		3,5	3,5
	1300	1,7±1,0	0,6±0,7	≤0,8 0,5±0,8	1,0	1,0	2,5	1,5	1,5
Максим. превышение затухания на λ=1380нм, относительно затухания на λ=1300нм		Менее чем на 1,0	Менее чем на 1,0	Менее чем на 0,3	—	—	—	—	
Затухание на изгибе (100 витков радиусом в 75 мм) на λ, нм	850	—	≤5,0	≤5,0	—	—	—	—	
	1300	—	≤5,0	≤5,0	—	—	—	—	
Ширина полосы пропускания (МГц·км) на λ, нм	850	160÷250	160÷200	400÷600		200 400		150	150
	1300	400÷1000	200÷600	400÷1000	200÷500	500	600	500	200
Прочность, ГПа		≥0,7 (1% удлинения)	≥0,7 (1% удлинения)	≥0,7 (1% удлинения)	—	—	—	—	
Сила снятия покрытия, Н		1,3 ...≤8,9	3,2	3,2	—	—	—	—	
Вид покрытия		D-LUX двойной слой улучшенного УФ-акрилата	СРС6 улучшенное двойное покрытие из акрилата	СРС6 улучшенное двойное покрытие из акрилата	УФ - акрилат или силикон + нейлон	УФ - акрилат или силикон + нейлон	УФ - акрилат или силикон + нейлон		
Собственный радиус изгиба, м		≥ 2	—	—	≥ 2	—	—	—	
Диапазон рабочих температур, °C		-60,...+85	-60,...+85	-60,...+85	-60,...+85	—	—	—	
Разность показателей преломления, %		2,0	2,0	1,0	—	—	—	—	
Эффективный показатель преломления на λ, нм	850	1,496	1,496	1,490	—	—	—	—	
	1300	1,491	1,487	1,486	—	—	—	—	
Числовая апертура		0,275±0,015	0,275±0,015	0,200±0,015	—	0,210±0,02	0,275±0,15		
ППП		градиентный	градиентный	градиентный	градиентный	градиентный	градиентный	градиентный	