

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра радиофизики и электроники

А.П. РУСИНОВ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМУ

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом
государственного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Оренбург 2006

УДК 681.7.068(07)

ББК 22.34я7

Р 88

Рецензент

доктор физико-математических наук, профессор М.Г. Кучеренко

Р 88 Русинов, А.П.

Физические основы волоконных световодов : методические указания к лабораторному практикуму / А.П. Русинов. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2006. – 20 с.

Методические указания содержат необходимые теоретические сведения и задания для выполнения лабораторных работ.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторного практикума по спецдисциплине «Физические основы оптоэлектроники» и «Лазеры и лазерные технологии в медицине» для студентов специальностей 013800 «Радиофизика и электроника» и 014000 «Медицинская физика».

© Русинов А.П., 2006

© ГОУ ОГУ, 2006

1 Электромагнитный спектр

Электромагнитные волны уже более ста лет служат для передачи информации. Это обусловлено тем фактом, что металлический проводник не является абсолютно необходимым в качестве средства их распространения. Они могут также распространяться с высокой скоростью в вакууме или в диэлектрической среде, т.е. в среде, не проводящей электрический ток. Электромагнитные волны разделяются на различные диапазоны по частотам или длинам волн и их применения также различны. Видимый свет занимает лишь узкий диапазон от 380 нм (фиолетовый) до 780 нм (красный), который граничит со стороны более коротких волн с ультрафиолетовым излучением, а со стороны более длинных волн - с инфракрасным излучением.

В оптической связи на основе волоконных световодов используется приграничный с инфракрасным диапазон длин волн от 800 до 1600 нм, при этом предпочтительными являются длины волн 850 нм, 1300 нм и 1550 нм.

2 Отражение света

Когда свет падает на границу раздела двух сред, определенная его часть отражается. Количество отраженного света зависит от угла α_1 между падающим лучом света и нормалью к поверхности падения. Термин "луч света" здесь используется для обозначения пути, по которому проходит световая энергия. Для отраженного луча и угла α_2 , образованного нормалью к поверхности падения и отраженным лучом света (рисунок 1), имеют силу следующие утверждения:

Отраженный луч:

- остается в плоскости падения, образуемой падающим лучом света и нормалью к поверхности падения луча,
- по отношению к падающему лучу света лежит на противоположной стороне от нормали к поверхности падения луча,

— имеет угол отражения по отношению к нормали к поверхности падения, одинаковый с углом падения $\alpha_1 = \alpha_2$.

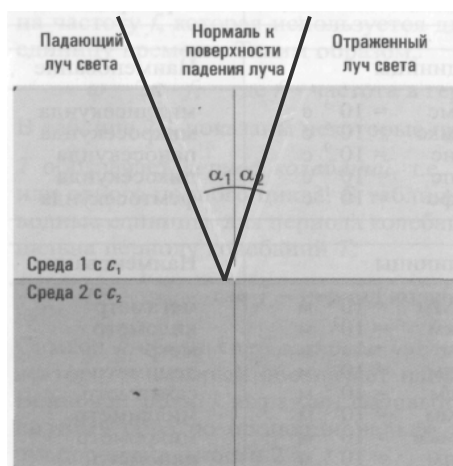


Рисунок 1 – Отражение света

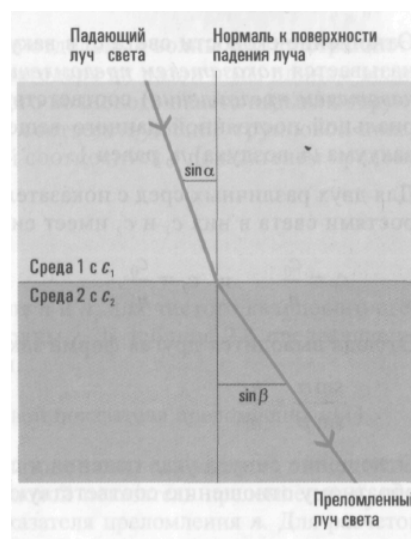


Рисунок 2 – Преломление света

3 Преломление света

Когда луч света входит под углом падения α в оптически более плотную среду (например, стекло или воду) из оптически менее плотной среды (например, воздуха), то его направление распространения по отношению к нормали к поверхности падения изменяется, т.е. он преломляется под углом преломления β .

Для изотропной среды, т.е. материала или вещества, имеющего одинаковые свойства во всех направлениях, применим закон преломления Снеллиуса:

Отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления β является величиной постоянной и также идентично отношению c_1/c_2 скоростей света c_1 в первой среде и c_2 во второй среде (рисунок 2):

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}.$$

Из двух прозрачных сред оптически более плотной называется та, в которой скорость света меньше. При переходе из вакуума (воздуха), в котором

свет распространяется со скоростью c_0 , в среде со скоростью света c имеет силу следующее соотношение:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_0}{c} = n.$$

Отношение скорости света c_0 в вакууме к скорости света c в среде называется показателем преломления n (более точно, фазовым показателем преломления) соответствующей среды и является материальной постоянной данного вещества. Показатель преломления вакуума (воздуха) n_0 равен 1. Для двух различных сред с показателями преломления n_1 и n_2 и скоростями света в них c_1 и c_2 выводится другая форма закона преломления Снеллиуса:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно обратному отношению соответствующих показателей преломления.

Показатель преломления n среды зависит главным образом от длины волны света. Для длин волн в инфракрасном диапазоне, которые важны для оптической связи с использованием кварцевого стекла, он постоянно уменьшается по мере увеличения длины волны.

Величина n относится к световым волнам, которые распространяются только на одной длине волны и с постоянной амплитудой и поэтому не могут передавать какую-либо информацию. Лишь модуляция этих волн делает возможным передавать информацию. В цифровой оптической связи для этой цели используются световые импульсы. Это короткие по времени волновые пакеты, которые содержат световые волны с различными длинами волн.

Внутри таких волновых пакетов отдельные волны распространяются с различными скоростями благодаря их различным длинам волн. Скорость распространения такого волнового пакета называют групповой скоростью. Определен и соответствующий групповой показатель преломления n_g , который соотносится с показателем преломления следующим образом:

$$n_g = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}.$$

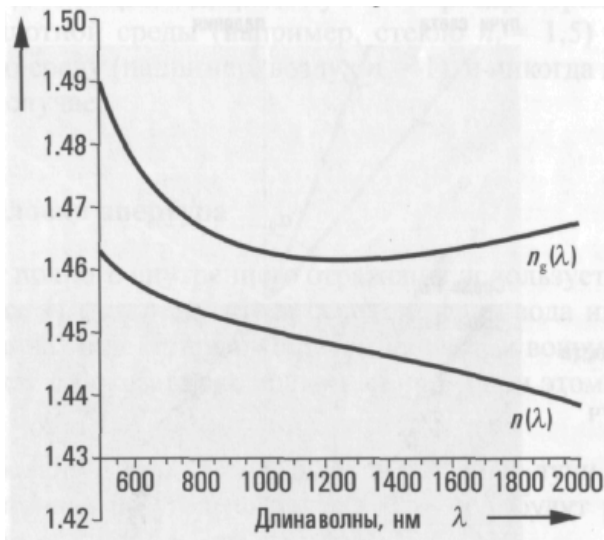


Рисунок 3 – Показатель преломления $n(\lambda)$ и групповой показатель преломления $n_g(\lambda)$

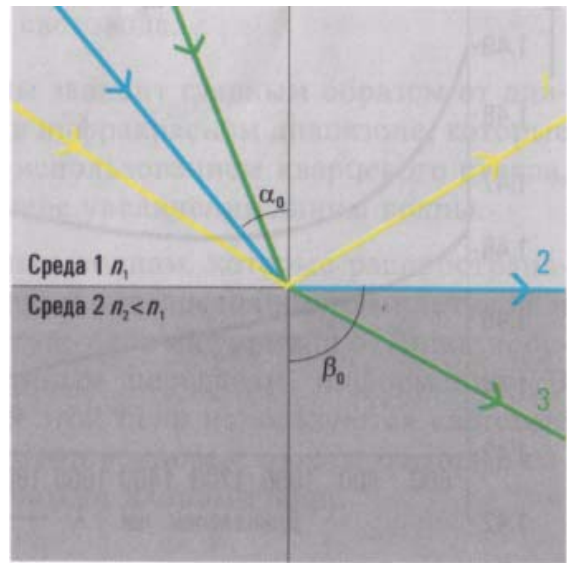


Рисунок 4 – Полное внутреннее отражение

На рисунке 3 показаны кривые для n и n_g для чистого кварцевого стекла в зависимости от длины волны λ . Выражение $dn/d\lambda$ — дает наклон кривой показателя преломления $n(\lambda)$, который в рассматриваемом диапазоне длин волн является нисходящим (отрицательным). Поэтому групповой показатель преломления n_g при любой длине волны больше показателя преломления n .

Полезно отметить, что групповой показатель преломления достигает своего минимума вблизи длины волны 1300 нм. Как указано выше, этот диапазон длин волн является особенно удобным для оптической связи.

4 Полное внутреннее отражение

Если луч света падает на поверхность раздела между оптически плотной средой с показателем преломления n_1 и оптически менее плотной средой с показателем преломления n_2 со все увеличивающимся углом падения α , то при определенном угле падения α_0 угол преломления становится равным $\beta_0=90^\circ$ (рис. 4). В этом случае луч света (2) распространяется параллельно

поверхности раздела двух сред. Угол падения α_0 называется критическим (предельным) углом для двух сред. Для критического угла α_0 имеет силу следующее отношение:

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1},$$

т.е. критический угол зависит от отношения показателей преломления n_1 и n_2 двух сред. Для всех лучей, у которых угол падения α больше критического угла α_0 не существует соответствующих преломленных лучей в оптически менее плотной среде. Эти лучи света полностью отражаются на поверхности раздела обратно в оптически более плотную среду. Такое явление называется полным внутренним отражением (луч света 1).

Полное внутреннее отражение может происходить на поверхности раздела сред только тогда, когда луч света распространяется из оптически более плотной среды (например, стекло $n=1,5$) в оптически менее плотную среду (например, воздух $n_0=1$), и никогда не происходит в обратном случае.

5 Числовая апертура

Эффект полного внутреннего отражения используется в оптических волноводах за счет того, что в середине световода имеется «стеклянная сердцевина» с показателем преломления n_1 , и вокруг нее – «стеклянная оболочка» с показателем преломления n_2 , при этом n_1 несколько выше n_2 (рис. 5). Из требования $\sin \alpha_0 = n_2/n_1$ вытекает, что все лучи, отклоняющиеся от оси световода на угол не более $(90^\circ - \alpha_0)$, будут распространяться в сердцевине. Для того чтобы ввести свет снаружи (воздух с показателем преломления $n_0=1$) в сердцевину, угол ввода между лучом света и осью световода можно определить в соответствии с законом преломления:

$$\frac{\sin \theta}{\sin(90^\circ - \alpha_0)} = \frac{n_1}{n_0}$$

и следовательно:

$$\sin \theta = n_1 \cdot \cos \alpha_0 = n_1 \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_0}.$$

С учетом требования относительно критического угла $\sin \alpha_0 = n_2/n_1$ результат будет следующим:

$$\sin \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

Максимально возможный угол ввода (лучей на торец световода) θ_{\max} называется входной угловой апертурой световода. Она зависит только от, двух показателей преломления n_1 и n_2 . Синус входной угловой апертуры называется числовой апертурой NA световода:

$$NA = \sin \theta_{\max}.$$

Эта величина очень важна для ввода света в волоконный световод.

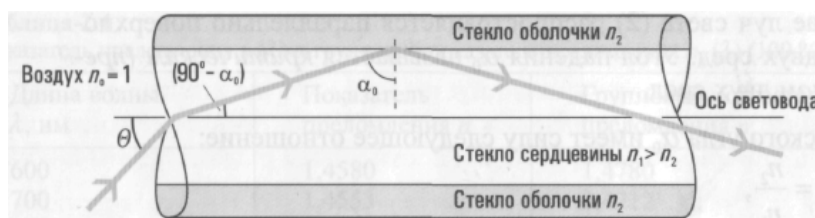


Рисунок 5 – Распространение света в волоконном световоде

6 Распространение света в волоконном световоде

Законы оптики позволили описать полное внутреннее отражение света на поверхности раздела между стеклом сердцевины и стеклом оболочки оптического волокна. При этом основным допущением является линейное распространение света в форме лучей. Для того чтобы более близко рассмотреть различные возможные пути распространения света внутри стекла сердцевины, необходимо рассмотреть явления, характерные для волновой оптики. Это оказывается необходимым в связи с тем, что диаметр сердцевины оптического волокна обычно равен примерно 10 мкм и поэтому лишь ненамного больше длины волны (примерно 1 мкм) света, направляемого по световоду. Вследствие этого возникают явления интерференции, которые могут быть объяснены с помощью волновой оптики.

Наложение двух или более волн и их слияние в одну волну обычно называют интерференцией. Чистую картину интерференции двух волн можно получить лишь тогда, когда обе волны имеют одинаковую длину и постоянную разность фаз по отношению друг к другу в любое время. Такие волны называются когерентными. Если две волны отличаются по фазе в определенной точке пространства на целое, кратное их длине λ , то происходит сложение их амплитуд. С другой стороны, при разности фаз, равной кратному половине длины волны $\lambda/2$, происходит вычитание амплитуд, а в случае двух волн с одинаковой амплитудой они гасятся в этой точке.

Явление интерференции в оптическом волноводе приводит к тому, что свет распространяется в стекле сердцевины только под определенными углами, а именно в направлениях, в которых введенные световые волны при их наложении усиливаются. Разрешенные световые волны, которые могут распространяться в оптическом волокне, называются модами (собственными волнами). Математически точнее эти моды могут быть описаны с помощью уравнений Максвелла.

7 Профили волоконных световодов

Если рассматривать показатель преломления n волоконного световода как функцию радиуса r , то используется термин профиль распределения показателя преломления. С его помощью описывается радиальное изменение показателя преломления от оси волокна в стекле сердцевины в направлении стекла оболочки $n=n(r)$. Распространение мод в волоконном световоде зависит от формы этого профиля распределения показателя преломления.

Ступенчатый профиль распределения показателя преломления

Для того чтобы свет направлялся в стекле сердцевины волоконного световода со ступенчатым профилем показателя преломления благодаря полному внутреннему отражению, необходимо иметь показатель преломления n_1 стекла сердцевины немного больше показателя преломления n_2 стекла оболочки

на границе раздела двух стеклянных сред. Если показатель преломления n_1 одинаков по всему поперечному сечению сердцевины, то тогда говорят, что показатель преломления имеет ступенчатый профиль, так как при переходе от стекла оболочки к стеклу сердцевины показатель преломления возрастает ступенеобразно и остается там неизменным. Такой волоконный волновод называется световодом со ступенчатым профилем показателя преломления или ступенчатым световодом.

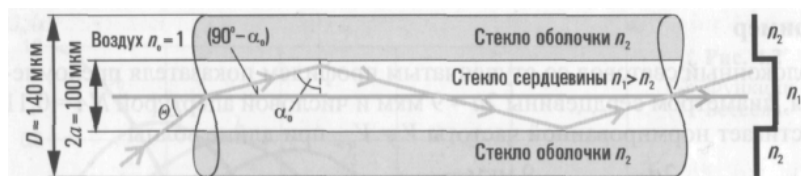


Рисунок 6 – Световод со ступенчатым профилем показателя преломления

На рисунке 6 приведены ступенчатый профиль показателя преломления волоконного световода, а также распространение луча света с соответствующими углами.

Типичные размеры многомодового световода со ступенчатым профилем показателя преломления: диаметр сердцевины $2a=100$ мкм, диаметр оболочки $D=140$ мкм, показатель преломления сердцевины $n_1=1,48$, показатель преломления оболочки $n_2=1,46$.

Такой волоконный световод является многомодовым. Импульс света, распространяющийся в нем, состоит из многих составляющих, направляемых в отдельных модах световода. Каждая из этих мод возбуждается на входе волновода под своим определенным углом ввода в световод и направляется по нему в пределах стекла сердцевины соответственно по различным траекториям движения луча. Каждая мода проходит разное расстояние оптического пути и поэтому приходит на выход световода в разное время. Наибольшее время прохождения соотносится с наименьшим временем прохождения так же, как соотносятся показатели преломления стекла сердцевины и оболочки, и поэтому такое отношение имеет величину такого же порядка, как нормированная разность показателей преломления, т.е. выше 1 %.

Искажения, обусловленные дисперсией времени задержки отдельных мод, называются модовой дисперсией. Она обуславливает тот факт, что короткий световой импульс уширяется (во времени) по мере прохождения по ступенчатому световоду. Это является недостатком для оптических систем передачи информации, так как уменьшает скорость передачи (скорость передачи битов) и полосу пропускания передачи. Это влияние смягчается благодаря тому факту, что отдельные моды при прохождении по световоду воздействуют друг на друга и обмениваются энергией. Такое смешение мод, или связь мод, проявляется особенно интенсивно в местах неоднородностей стекла сердцевины, например на микроизгибах или на стыках волоконных световодов.

Модовая дисперсия может быть полностью исключена, если структурные параметры ступенчатого световода подобрать таким образом, что в нем будет направляться только одна фундаментальная (основная) мода.

Однако основная мода также уширяется во времени по мере ее прохождения по такому световоду. Это явление называется хроматической дисперсией. Поскольку она является свойством материала, она, как правило, имеет место в любом оптическом световоде. По сравнению с дисперсией мод хроматическая дисперсия в диапазоне длин волн от 1200 до 1600 нм относительно мала или отсутствует. Для изготовления ступенчатого волоконного световода с малым затуханием, который направляет только фундаментальную моду в диапазоне длин волн более 1200 нм, диаметр сердцевины волновода должен быть уменьшен до поперечных размеров поля моды $2w_0$ (около 9 мкм). Такой ступенчатый волоконный световод называется одномодовым оптическим волокном.

Типичные размеры одномодового волоконного световода: диаметр сердцевины $2a=10$ мкм, диаметр оболочки $D=125$ мкм, показатель преломления сердцевины $n_1=1,46$, показатель преломления оболочки $n_2=1,457$.

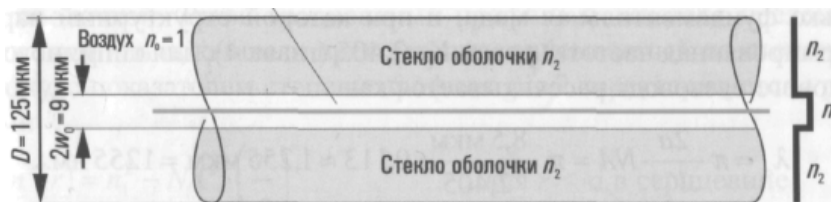


Рисунок 7 – Одномодовый волоконный световод

На рисунке 7 показано прохождение луча света и профиль показателя преломления одномодового световода.

Здесь полезно отметить, что не только диаметр сердцевины, но и числовая апертура и вследствие этого также входная угловая апертура намного меньше, чем соответствующие параметры у многомодового ступенчатого световода, что делает относительно трудным введение света в одномодовый световод. Если одномодовые световоды имеют изгибы или соединения, то размер диаметра поля моды является важным фактором, влияющим на характеристики затухания. Так, увеличение диаметра поля моды приводит к ухудшению пропускания света в изгибах, но уменьшает потери в разъёмных и неразъёмных соединениях.

Градиентный профиль распределения показателя преломления

В многомодовом ступенчатом световоде моды распространяются по оптическим путям различной длины и поэтому приходят к концу световода в разное время. Эта нежелательная модовая дисперсия может быть значительно уменьшена, если показатель преломления стекла сердцевины уменьшается параболически от максимальной величины n_1 у оси световода до величины показателя преломления n_2 на поверхности раздела с оболочкой. Оптический волновод с таким градиентным профилем показателя преломления также называется градиентным волоконным световодом.

Типичные размеры световода с градиентным профилем показателя преломления: диаметр сердцевины $2a=50$ мкм, диаметр оболочки $D=125$ мкм, максимальный показатель преломления сердцевины $n_1=1,46$, показатель преломления оболочки $n_2=1,45$.

На рисунке 8 представлены ход световых волн различного порядка и профиль показателя преломления градиентного световода.

Лучи света проходят по оптическому волокну по волно- или винтообразным спиральным траекториям. В противоположность ступенчатому профилю показателя преломления, они распространяются уже не зигзагообразно. Вследствие непрерывного изменения показателя преломления $n(r)$ в стекле сердцевины лучи непрерывно преломляются, и поэтому их направление распространения меняется, за счет чего они распространяются по волновым траекториям. Лучи, колеблющиеся вокруг оси световода, проходят более длинный путь, чем луч света вдоль оси световода.

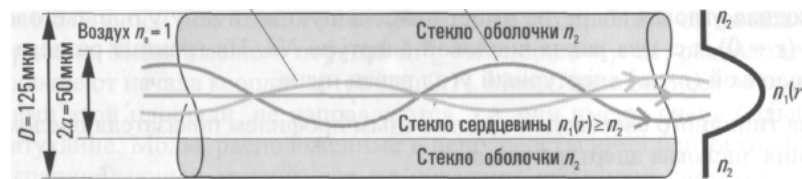


Рисунок 8 – Оптическое волокно с градиентным профилем показателя преломления

Однако, благодаря меньшему показателю преломления в отдалении от оси оптического волокна эти лучи распространяются соответственно быстрее, благодаря чему более длинные оптические пути компенсируются меньшим временем прохождения. В результате различие временных задержек различных лучей почти полностью исчезает. При точном изготовлении параболического профиля показателя преломления разность временных задержек по результатам измерений в градиентном световоде составляет немногим более 0,1 нс при времени прохождения света 5 мкс на расстояние 1 км.

Поскольку показатель преломления $n(r)$ градиентного волоконного световода зависит от расстояния r от оси световода, то входная угловая апертура θ_{\max} , играющая важную роль для ввода света в сердцевину, является функцией r . Входная угловая апертура имеет наибольшую величину у оси световода ($r=0$), т.е. она равна числовой апертуре NA . На границе раздела с оболочкой ($r=a$) апертурный угол равен нулю.

Площадь, ограниченная кривой максимальной входной угловой апертуры θ_{\max} , пропорциональна световой мощности, которая может быть введена в сердцевину. Понятно, что при одной и той же числовой апертуре NA и оди-

наковом радиусе сердцевины a эта мощность в волоконном световоде со ступенчатым профилем показателя преломления в два раза больше, чем в градиентном волоконном световоде.

8 Передатчики

В волоконной оптике используется два типа источников света, это светодиоды и инжекционные лазеры.

Полупроводниковый диод, излучающий свет на основе спонтанного излучения, называется светодиодом. Эффективность преобразования электрического тока в свет описывается внешним квантовым выходом, с помощью которого обозначается отношение испускаемых за единицу времени фотонов к числу носителей заряда, транспортируемых через р-п-переход в полупроводниковом диоде (для GaAs обычно от 0,5 до 1,0%).

Спектральная ширина излучения светодиода приблизительно пропорциональна квадрату длины волны λ . Поэтому она сильно увеличивается в области более длинных волн.

Инжекционный лазер (лазерный диод) — это излучатель, использующий индуцированное (вынужденное) излучение.

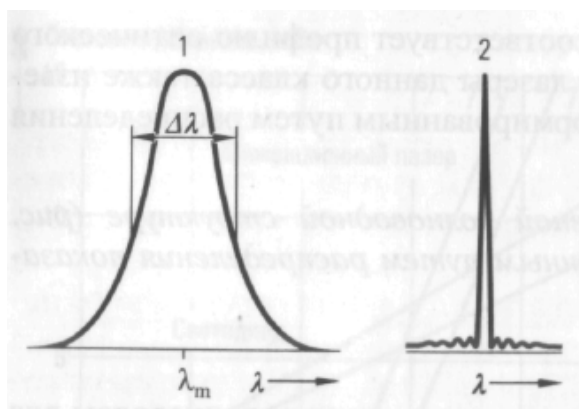


Рисунок 9 – Спектральное распределение излучения светодиода (1) и инжекционного лазера (2)

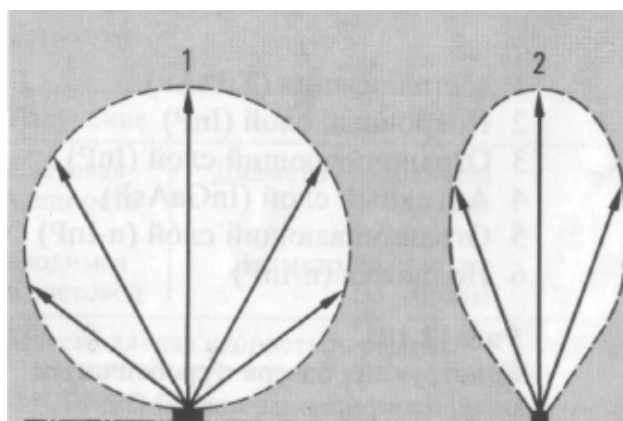


Рисунок 10 – Пространственное распределение излучения светодиода (1) и инжекционного лазера (2)

В противоположность светодиодам с их широким спектральным распределением излучение в лазерном режиме сужается до одной или нескольких спектральных линий (рисунок 9). Отметим, что хроматическая дисперсия волоконных линий связи при этом также уменьшается пропорционально ширине спектральной линии, и при использовании лазерных источников имеет незначительную величину. Также излучение инжекционного лазера благодаря тому, что оно индуцированное, является пространственно когерентным. Из-за индуцированного характера излучения в лазере повышается квантовый выход излучателя до величин в 5 – 10%. Лепесток диаграммы направленности излучения значительно уже, чем у светодиода, что облегчает введение света в волоконный световод (рисунок 10).

Диаграмма направленности световой энергии светодиода дается выражением $I(\theta) = I_0 \cos \theta$, где I_0 – интенсивность, испускаемая светодиодом прямо перед собой, θ – угол по отношению к нормали. Так как в световоде распространяются лучи попадающие в некоторый угол θ_{\max} (см. парагр. № 5). можно рассчитать $K.П.Д.(\eta)$ ввода света в волновод. $K.П.Д.$ есть отношение всей мощности излучаемой светодиодом P_0 к полезной мощности, введенной в волокно P_1 – $\eta = P_1/P_0$. Мощность можно найти, проинтегрировав выражение для $I(\theta)$ по соответствующему телесному углу:

$$P_0 = \int_{2\pi} I_0 \cos \theta \cdot d\Omega = I_0 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \theta \cdot d\theta = 2\pi I_0 \cdot \left(\sin \frac{\pi}{2} - \sin \left(-\frac{\pi}{2}\right) \right) = 4\pi I_0,$$

$$P_1 = \int_{2\pi} I_0 \cos \theta \cdot d\Omega = I_0 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{-\theta_{\max}}^{\theta_{\max}} \cos \theta \cdot d\theta = 2\pi I_0 \cdot (\sin \theta_{\max} - \sin(-\theta_{\max})) = ,$$

$$= 4\pi I_0 \sin \theta_{\max} = 4\pi I_0 \cdot NA$$

и отсюда $\eta_s = P_1/P_0 = NA$.

Отсюда хорошо видно, что $K.П.Д.$ светодиодов равен их числовой апертуре. Если также учесть, что квантовый выход светодиода около 1% то общий $K.П.Д.$ преобразования электрической энергии в световую будет очень низок.

Как уже было отмечено у лазера квантовый выход на порядок выше, к тому же диаграмма направленности лазера обычно выражается как $I(\theta) = I_0 \cos^N \theta$, где N – показатель степени, характеризующий качество лазерного излучателя. Для большинства полупроводниковых лазеров N можно считать равным 3 или 5.

Расчет $K.П.Д.$ в этом случае производится аналогично, за исключением того, что расчет интегралов мощности производится более сложно ($N=3$):

$$P_0 = 2\pi I_0 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^3 \theta \cdot d\theta = 2\pi I_0 \cdot \left(\sin \theta - \frac{\sin^3 \theta}{3} \right) \Big|_{-\pi/2}^{\pi/2} = \frac{8}{3} \pi I_0,$$

$$P_1 = 2\pi I_0 \int_{-\theta_{\max}}^{\theta_{\max}} \cos^3 \theta \cdot d\theta = 2\pi I_0 \cdot \left(\sin \theta - \frac{\sin^3 \theta}{3} \right) \Big|_{-\theta_{\max}}^{\theta_{\max}} = 4\pi I_0 \cdot \left(\sin \theta_{\max} - \frac{\sin^3 \theta_{\max}}{3} \right) \text{ и}$$

$$\text{тогда } \eta_L = P_1/P_0 = \frac{3}{2} \left(\sin \theta_{\max} - \frac{\sin^3 \theta_{\max}}{3} \right) = \frac{3}{2} \left(NA - \frac{NA^3}{3} \right).$$

$$\text{Для случая } N=5 \text{ имеем } \eta_L = P_1/P_0 = \frac{15}{8} \left(NA - \frac{2 \cdot NA^3}{3} + \frac{NA^5}{5} \right).$$

Легко видеть, что $\eta_L > \eta_S$ при любых NA . Таким образом, системы передачи данных с лазерными источниками намного эффективнее и лучше, чем со светодиодными, поэтому и развиваются наиболее бурно.

Лабораторная работа № 1. Апертурный угол и апертура волновода. Моды ступенчатого волновода

Цель работы: Рассмотреть схематическое устройство ступенчатых волоконных световодов и понять принцип их работы. Уяснить основные закономерности и распространения света в световоде.

Теоретическая часть: параграфы №4- №7, лекции.

Практическая часть: Программа «Appertura_1»

Подготовительная часть

Задание 1. Рассмотреть теорию обсуждаемых явлений.

Задание 2. Освоить работу с программой «Appertura_1»

Программа отображает на экране схематическое изображение световода в виде сердцевины и оболочки и внешней среды. Программа позволяет изменять показатели преломления, всех трех сред в широких пределах тем самым появляется возможность исследовать световоды сделанные из различных материалов и помещенные в различные среды, причем есть возможность исследовать самые экзотические случаи (алмазный световод) и сравнивать их с реальными волокнами. Полосой прокрутки можно изменять положение источника относительно волокна, тем самым, возбуждая различные моды волновода, программно отображаемые различным цветом. После нажатия кнопки «ОК» моделируется распространение света по волокну согласно законам геометрической оптики и визуализируется в виде световых лучей. Кнопка «Очистить» позволяет убрать с экрана все предыдущие результаты.

Основная часть

Задание 3. Найти положения источника света, при которых в волноводе возбуждается моды утечки, моды оболочки и моды волокна. Рассчитать апертурный угол и числовую апертуру волокна. Сравнить полученные значения с теоретически вычисленными (Параграф 5). Примечание: значения n_1 , n_2 задаются индивидуально.

Задание 4. Произвести измерения числовой апертуры волновода при изменении n_1 от 1.3 до 1.6 шагом 0.04, построить график данной зависимости, произвести сравнение с теоретической зависимостью (Параграф 5), сделать вывод. Примечание: значение n_2 положить равной $n_1-0.04$.

Задание 5. Произвести измерения числовой апертуры волновода при постоянном n_1 и изменении n_1-n_2 от 0.01 до 0.1 шагом 0.01, построить график данной зависимости, произвести сравнение с теоретической зависимостью (Параграф 5), сделать вывод. Рассмотреть поведение моды оболочки и моды утечки волновода при увеличении разности показателей преломления n_1-n_2 .

Задание 6. Посмотреть, как изменятся результаты измерений в заданиях 3-5 если внешняя среда не воздух, а вода (глицерин), сделать вывод.

Контрольные вопросы:

Законы отражения и преломления. Полное внутреннее отражение. Строение оптического волновода. Апертурный угол и числовая апертура волновода. Моды утечки, моды оболочки и моды волновода (рабочие моды). Одномодовые и многомодовые волноводы.

Лабораторная работа № 2. Эффективность ввода излучения в световод. К.П.Д. светодиодного и лазерного источника

Цель работы: Подробно рассмотреть основные закономерности ввода света в световод. Рассчитать К.П.Д. ввода света для светодиодов и лазеров.

Теоретическая часть: параграфы №5- №8, лекции.

Практическая часть: Программа «Appertura_2»

Подготовительная часть

Задание 1. Рассмотреть теорию обсуждаемых явлений.

Задание 2. Освоить работу с программой «Appertura_2»

Программа отображает на экране схематическое изображение световода в виде сердцевины и оболочки и внешней среды. Программа также позволяет изменять показатели преломления всех трех сред. Две полосы прокрутки

предназначены для изменения точки и угла входа луча в световод. После нажатия кнопки «ОК» моделируется распространение света по волокну согласно законам геометрической оптики и визуализируется в виде световых лучей. Кнопка «Очистить» позволяет убрать с экрана все предыдущие результаты.

Основная часть

Задание 3. Получить различные моды волновода (моды утечки, моды оболочки и моды волокна) для данного положения точки входа луча и данных показателей преломления сердцевины и оболочки. Вычислить числовую апертуру волокна. Сравнить полученные значения с теоретически вычисленными (Параграф 5). Примечание: значения n_1 , n_2 задаются индивидуально.

Задание 4. Исследовать поведение числовой апертуры волновода при изменении n_1 и изменении разности показателей преломления $n_1 - n_2$, зафиксировать результаты таблично или графически.

Задание 5. Произвести измерения числовой апертуры волновода при изменении положения точки входа светового луча в световод, построить график и сделать вывод.

Задание 6. Рассчитать КПД ввода света в волновод при помощи полупроводникового светодиода (см. парагр. 8) при нескольких (4-5) различных значениях n_1 и n_2 . Сделать заключение о зависимости КПД от n_1 и n_2 (Пользоваться результатами задания 4). Провести аналогичные вычисления для случая инжекционного лазера, для которого диаграмма направленности излучения дается выражением $I(\theta) = I_0 \cos^3 \theta$. Как изменится результат, если выражение запишется как $I(\theta) = I_0 \cos^5 \theta$.

Контрольные вопросы:

Ввод света в волновод. Связь КПД источника с числовой апертурой. Затухание света в волноводе. Рассеяние и поглощение. Хроматическая и межмодовая дисперсии света. Поляризационная модовая дисперсия. Взаимосвязь дисперсии и максимальной скорости передачи данных

Лабораторная работа № 3. Градиентный световод. Эффективность ввода излучения в градиентный световод

Цель работы: Подробно рассмотреть основные особенности градиентного световода. Рассчитать К.П.Д. ввода света для светодиодов и лазеров.

Теоретическая часть: параграфы №5- №8, лекции.

Практическая часть: Программа «Gradient»

Подготовительная часть

Задание 1. Рассмотреть теорию обсуждаемых явлений.

Задание 2. Освоить работу с программой «Gradient»

Работа с этой программой аналогична работе с предыдущей, за одним исключением: в ней моделируется более сложный, градиентный, волновод, траектории световых лучей в котором представляют сложную кривую.

Основная часть

Задание 3. Получить различные моды волновода (моды оболочки и моды волокна) для данного положения точки входа луча и данных показателей преломления сердцевины и оболочки. Вычислить максимальную числовую апертуру волокна. Сравнить полученные значения с теоретически вычисленными (Параграф 5). Примечание: значения n_1 , n_2 задаются индивидуально.

Задание 4. Исследовать поведение числовой апертуры волновода и периода колебаний светового поля при изменении n_1 и изменении разности показателей преломления n_1-n_2 . Зафиксировать результаты графически.

Задание 5. Произвести измерения числовой апертуры волновода при изменении положения точки входа светового луча в световод, построить график и сделать вывод.

Задание 6. Рассчитать КПД ввода света в волновод при помощи полупроводникового светодиода (см. парагр. 8) при нескольких (4-5) различных значениях n_1 и n_2 . Сделать заключение о зависимости КПД от n_1 и n_2 (Пользо-

ваться результатами задания 4). Провести аналогичные вычисления для случая инжекционного лазера, для которого диаграмма направленности излучения дается выражением $I(\theta) = I_0 \cos^3 \theta$. Как изменится результат, если данное выражение запишется как $I(\theta) = I_0 \cos^5 \theta$. (Примечание: так как в градиентном световоде апертурный угол зависит от положения точки ввода света в волокно расчет интегралов в парагр. 8 сильно усложняется. Но, однако, эти формулы можно использовать если вместо максимального апертурного угла θ_{\max} брать его среднее значение по радиусу, очевидно, что оно будет равно $\theta_{\max} / 2$. В этом случае числовую апертуру также необходимо пересчитывать.)

Контрольные вопросы:

Ступенчатый и градиентный профили показателя преломления волноводов. Диаметр поля моды. Распределение интенсивности по сечению волновода. Лазерные и светодиодные источники света. Фотоприемники волоконно-оптических линий