

## Лабораторная работа № 2

### ИЗУЧЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**Цель работы:** изучить принципы действия оптоволоконных лазеров и диодов, научиться определять апертуру оптического волокна, нормированную частоту, количество мод и эффективность ввода оптического излучения в волокно.

#### Краткие сведения из теории

**Оптические передатчики (ОП)**, применяемые в ВОСП, предназначены для преобразования электрических сигналов в оптические. С этой целью выходное излучение оптического источника модулируется в соответствии с входными электрическими сигналами, поступающими от передающего источника сообщений.

По характеру модуляции оптические передатчики делятся на передатчики с *прямой* (внутренней) и *внешней модуляцией* (рисунок 1).

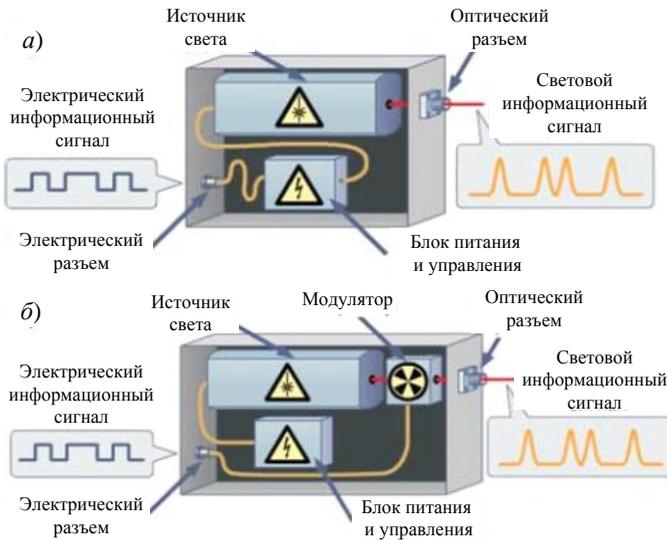


Рисунок 1 – Схемы оптических передатчиков с прямой (а) и внешней (б) модуляцией

В оптических передатчиках с *прямой* модуляцией мощность излучения источника света модулируется внешним электрическим током питания.

В цифровых системах связи на основе передатчиков с прямой модуляцией используется простейший оптический формат передачи данных, при котором логическому нулю соответствует выключенное состояние источника излучения, а логической единице – включенное.

При скоростях передачи 10 Гбит/с и выше используются передатчики с *внешней* модуляцией. Источниками излучения в таких передатчиках, как правило, являются узкополосные одномодовые непрерывные полупроводниковые лазеры. Непрерывное оптическое излучение модулируется внешним модулятором, что обеспечивает формирование оптического сигнала с минимальной спектральной шириной. Кроме того, применение внешней модуляции позволяет использовать более сложные форматы модуляции и применять поляризационное разделение сигналов. Передатчики с внешней модуляцией используются в системах дальней связи, в которых требования к качеству оптического сигнала особенно высоки. Максимальная скорость передачи информации, ограниченная быстродействием модулятора, составляет 40 Гбит/с. Для увеличения скорости передачи по одному каналу свыше 40 Гбит/с была предложена техника оптического временного уплотнения (OTDM). Такие системы работают со специальными источниками излучения – лазерами с синхронизацией мод, которые генерируют непрерывную последовательность ультракоротких импульсов (УКИ) света.

Источниками излучения в оптических передатчиках с прямой модуляцией являются полупроводниковые светоизлучающие диоды (светодиоды) или лазеры. Передатчики на основе светодиодов используются совместно с многомодовым волокном в низкоскоростных системах передачи информации на короткие расстояния, но постепенно вытесняются лазерными передатчиками. Основными недостатками светодиодов являются малая скорость передачи информации, малая выходная мощность, широкая полоса спектра и большая расходимость излучения. С другой стороны, светодиоды – более дешевые и неприхотливые приборы, которые вполне подходят для ряда систем небольшой протяженности или средней протяженности, но с малой скоростью передачи информации (менее 1 Гбит/с). Поэтому они широко используются в замкнутых системах видеонаблюдения, в локальных вычислительных сетях (ЛВС), в измерительных и других сетях, построенных на основе многомодового оптического волокна. Применение светодиодов в аппаратуре связи позволяет существенно удешевить приемопередающее оборудование, что и является причиной использования кабелей с многомодовым волокном при строительстве ЛВС. В настоящее время с учетом снижения стоимости лазеров целесообразно применять вместо многомодового оптического волокна со светодиодами одномодовое оптическое волокно с лазерами в качестве оптических передатчиков. В городских сетях связи и системах дальней связи в качестве источников излучения используются полупроводниковые лазеры, обеспечивающие существенно большую вводимую в одномодовое волокно

мощность, максимальную скорость передачи информации, обладающие существенно более узким спектром излучения по сравнению со светодиодами.

В системах передачи при скоростях до 2,5 Гбит/с применяются многомодовые **лазеры с резонатором Фабри – Перо** (рисунок 2). Роль зеркал-отражателей выполняют торцы полупроводникового кристалла.

Данный тип лазеров позволяет получить излучение на желаемой длине волны, а также боковые моды меньшей амплитуды, отделенные промежутками порядка 1 нм. Полная выходная мощность стабильна, однако имеет место изменение мощности отдельных мод, что, в свою очередь, приводит к возрастанию хроматической дисперсии, и, как следствие, к возрастанию уровня шумов в выходном сигнале. Следует отметить чувствительность данного типа лазеров к отражениям от внешних поверхностей оптических разъемов. Данное свойство также влияет на распределение мощности сигнала по отдельным модам.

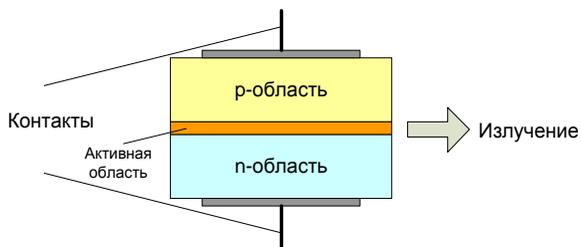


Рисунок 2 – Структура лазеров с резонатором Фабри – Перо

При скоростях передачи 2,5 Гбит/с и выше применяются **лазеры с распределенной обратной связью** (Distributed Feed Back – DFB). В их структуре используется брэгговская дифракционная решетка для дополнительного уменьшения ширины линии генерации, которая служит механизмом обратной связи. Формируется она в активной зоне между двумя слоями лазерной структуры (рисунок 3).

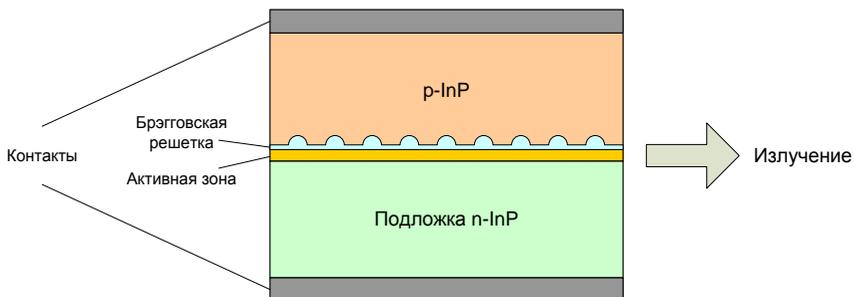


Рисунок 3 – Структура DFB-лазеров

Таким образом, DFB-лазер имеет встроенные возможности выбора длины волны благодаря механизму обратной связи. Обратная связь не локализована в одном месте, а распределена по длине резонаторной полости.

Лазеры с распределенной обратной связью позволяют ослабить влияние хроматической дисперсии, т. к. они работают в одномодовом одночастотном режиме, а в этом случае достигается минимальная ширина спектра излучения.

Достигается данный эффект размещением зеркал на концах усиливающей области. В ней самой создается периодическая решетка показателя преломления. Период решетки  $d$  подобран так, чтобы условие Брэгга выполнялось для отражения в обратном направлении. С учетом показателя преломления  $n$  условие Брэгга имеет вид:

$$2nd = \lambda. \quad (1)$$

Условие отражения от периодической структуры выполняется для лучей обоих направлений. Таким образом, периодическая решетка создает обратную связь в обоих направлениях, распределенную по всей длине лазера. Поскольку обратная связь, создаваемая периодической решеткой, является селективной, то в DFB-лазерах обеспечивается режим одномодовой генерации. Еще одно преимущество DFB-лазеров – возможность размещать их непосредственно на поверхности полупроводниковой подложки и подключать к ОБ на поверхности этой подложки, создавая интегральные оптические устройства.

В процессе работы параметры брэгговской решетки могут изменяться (нагрев, изменение тока накачки, влияние отражений от оптических разъемов и т. д.), что приводит к существенному изменению длины волны излучения лазера. Данные проблемы решаются путем добавления некоторых компонентов в структуру лазера: фотодиода для мониторинга выхода, термоэлектрического охладителя, схемы обратной связи для управления выходом и поддержания желаемой частоты.

**Лазер с распределенными брэгговскими отражателями** (Distributed Bragg Reflector – DBR) содержит селективный элемент – брэгговскую решетку, расположенную в неактивной зоне (рисунок 4).

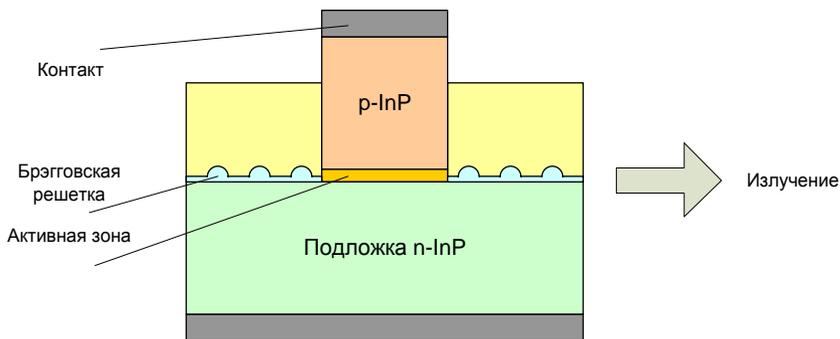


Рисунок 4 – Структура DBR-лазеров

Таким лазером обеспечивается более узкая, по сравнению с предыдущими типами, ширина спектра. 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 можно добиться того, что условия генерации будут выполняться только для одной моды. Это обеспечивает поддержание режима одночастотной одномодовой генерации.

**В лазерах с вертикальным резонатором и поверхностным излучением (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser – VCSEL)** излучение направлено перпендикулярно  $p$ - $n$ -слою (рисунок 5).

Вертикальная структура состоит из ряда слоев  $p$ -типа, активной области и ряда слоев  $n$ -типа. Сверху и снизу от активной среды расположены слои полупроводников с периодически изменяющейся величиной показателя преломления, которые изготавливаются из комбинации  $\text{In} + \text{Ga} + \text{As} + (\text{Al} \text{ или } \text{P})$ . Слои выполняют функции лазерных зеркал, и излучение лазера направлено вертикально вверх, то есть перпендикулярно плоскости слоев. Число слоев зависит от желаемой длины волны излучения. Например, комбинация  $\text{In} + \text{Ga} + \text{As} + \text{P}$  используется для лазеров с оптическим излучением в окне длин волн 1310–1550 нм.

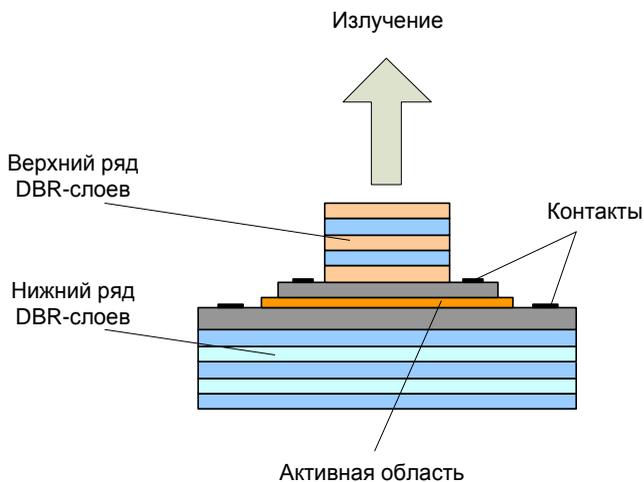


Рисунок 5 – Структура VCSEL-лазеров

Лазеры работают в одномодовом (продольная мода) режиме, используя резонатор исключительно малой длины (порядка 1 мкм), для которого разнесение мод превышает полосу частот усиления. Они излучают свет в направлении, перпендикулярном плоскости активного слоя, аналогично тому, как это делается в СИД с излучающей поверхностью. Работа такого лазера в одномодовом (поперечная мода) режиме может быть реализована путем уменьшения диаметра VCSEL до 2–3 мкм. Выходная мощность и ширина полосы лазеров типа VCSEL, как правило, ниже, чем аналогичные показатели DFB-лазеров.

Важнейшее преимущество VCSEL-лазеров состоит в их технологичности, так как на одном чипе можно разместить матрицу лазеров, каждый из которых может излучать заданную длину волны согласно сетке частот. Еще одним достоинством подобных систем является более простая технология стабилизации параметров, осуществляемая для всех лазеров массива одновременно.

Принципы работы **перестраиваемых лазеров** такие же, как и у лазеров с фиксированной длиной волны генерации. Основными элементами любого лазера являются усилитель и резонатор. В перестраиваемых лазерах применяются те же активные элементы, что и в обычных, поэтому свойства таких лазеров определяются конструкциями используемых перестраиваемых селективных резонаторов.

Перестраиваемые лазеры характеризуются двумя особенностями. Во-первых, спектр усиления их активного вещества должен быть достаточно широким для того, чтобы обеспечить генерацию во всем требуемом диапазоне

перестройки. Во-вторых, резонатор лазера должен обладать высокой селективностью для выделения одной длины волны и его конструкция должна обеспечивать возможность перестройки в заданном диапазоне.

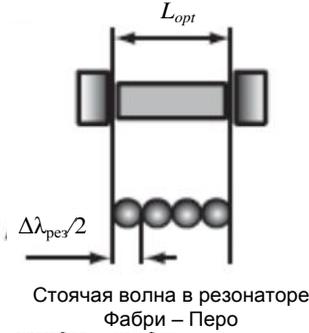


Рисунок 6 – Схема лазера с резонатором Фабри – Перо

Простейший резонатор для создания обратной связи – резонатор Фабри – Перо, образованный двумя плоскопараллельными зеркалами или отражателями любого другого типа (рисунок 6). На длине резонатора  $L_{opt}$  расположено целое число  $q$  периодов стоячей волны, равных  $\lambda_{рез}/2$ . В частности, в простейшем полупроводниковом лазере роль отражателей играют торцы активного элемента – полупроводникового кристалла.

Сами отражатели в таких лазерах являются неселективными, поэтому резонансные частоты  $\nu_q$  определяются резонансными свойствами интерферометра Фабри – Перо:

$$\nu_q = \frac{qc}{2L_{opt}} \text{ или } \lambda_q = \frac{2L_{opt}}{q}, \quad (2)$$

где  $q$  – целое положительное число;  
 $L_{opt}$  – оптическая длина резонатора.

Оптическая длина резонатора с расстоянием между зеркалами  $L$  (геометрическая длина), заполненного однородным прозрачным материалом, с показателем преломления  $n$  определяется выражением  $L_{opt} = nL$ .

Частотный интервал  $\Delta\nu_{mm}$  между соседними резонансами (межмодовый интервал):

$$\Delta\nu_{mm} = \frac{c}{2L_{opt}} \text{ или } \Delta\lambda_{mm} = \frac{\Delta\nu\lambda_{mdl}}{c}. \quad (3)$$

Только в лазерах с вертикальным резонатором обеспечивается одномодовый режим генерации, так как типичные размеры резонатора имеют величину несколько микрометров.

**Перестраиваемый лазер с селектором на основе дифракционной решетки.** Широкое применение для перестройки полупроводниковых лазеров

нашли селекторы на основе дифракционной решетки, используемой по модифицированной схеме Литтмана-Меткалфа, так как такие селекторы обладают уникальным сочетанием узкополосности фильтра с широким диапазоном перестройки. В лазере с внешним резонатором из-за большой длины резонатора и плотного расположения продольных мод для обеспечения одномодового режима требуется достаточно узкополосный селектор, обеспечивающий необходимый уровень вносимых потерь для нерабочих продольных мод. Механизм селекции частоты лазера с внешним резонатором и комбинированным селектором на основе дифракционной решетки приведен на рисунке 7.

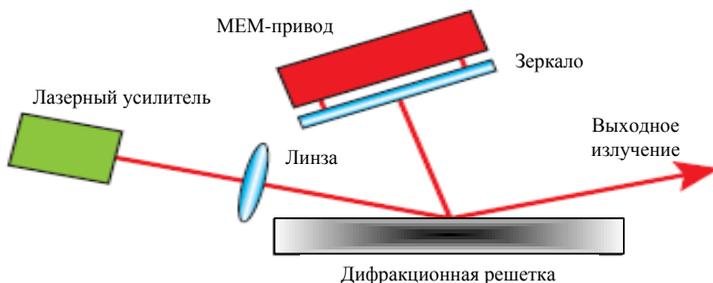


Рисунок 7 – Схема перестраиваемого лазера с селектором на основе дифракционной решетки

Резонатор лазера образован одним из торцов лазерного чипа, дифракционной решеткой и перестраиваемым зеркалом. Дифракционная решетка работает на одном из больших порядков дифракции, что обеспечивает ее высокую дисперсию и, следовательно, селективность. Различные спектральные компоненты отражаются от решетки под разными углами. Генерация осуществляется на той длине волны, для которой дифрагированный на решетке луч перпендикулярен поверхности зеркала. Перестройка частоты достигается изменением наклона зеркала с помощью микроэлектромеханического привода.

**Перестраиваемые лазеры с брэгговскими решетками.** Активная среда полупроводниковых лазеров представляет собой диэлектрический волновод, ограничивающий световой пучок в поперечном к оптической оси сечении. Для создания перестраиваемых волноводных лазеров необходимо использовать волноводные перестраиваемые селекторы. Роль селекторов играют периодические отражающие структуры с пространственным периодом порядка половины длины световой волны. Такие резонансные периодические структуры используются для создания обратной связи (брэгговские решетки). Они наносятся на поверхность волновода либо вытравливаются в них.

В лазерах с распределенной обратной связью (DFB-лазеры) решетка создается в активной среде. Обратная связь возникает вследствие брэгговского отражения, распределенного равномерно по всей активной области (рису-

нок 8, а). В лазерах с распределенными брэгговскими отражателями (DBR-лазеры) периодические структуры используются в качестве резонансных отражателей, размещенных вне активной среды (рисунок 8, б). Поскольку селективно отражающая и активная (усиливающая) области пространственно разделены, такие лазеры предоставляют больше возможностей для управления спектром излучения.

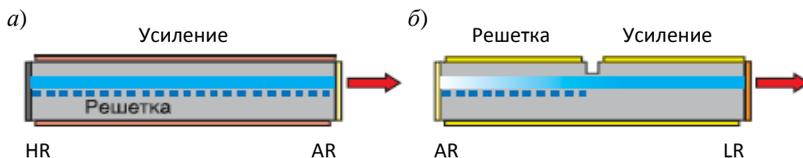


Рисунок 8 – Структурные схемы волноводных лазеров с периодическими структурами (решетками), используемыми для создания обратной связи:  
*а* – DFB-лазер; *б* – DBR-лазер

На основе DFB- или DBR-лазеров можно создавать интегрированные на одной планарной структуре фотонные устройства, включающие в себя перестраиваемый лазер, модулятор и усилитель.

**Перестраиваемые лазеры с вертикальными резонаторами.** В лазерах с вертикальным резонатором (VCSEL) ось резонатора перпендикулярна плоскости слоев гетероструктуры, выполняющей роль активной усиливающей области. Поперечный размер активного слоя – доли микрометра, поэтому длина резонатора VCSEL тоже очень мала. Благодаря этому, во-первых, обеспечивается селекция одной продольной моды, а во-вторых, перестройка длины волны может быть осуществлена изменением оптической длины резонатора. Наиболее простой способ изменения оптической длины резонатора состоит в механическом перемещении одного из зеркал резонатора.

На рисунке 9 приведен перестраиваемый VCSEL мембранного типа, а на рисунке 10 – VCSEL консольного типа. Перестройка осуществляется перемещением верхнего подвижного зеркала, отделенного от пассивной *n*-области небольшим воздушным зазором. Перемещение зеркала, как и в других типах микроэлектромеханических устройств, осуществляется электростатическими силами при создании разности потенциалов между перемещающимся зеркалом и верхней частью полупроводниковой гетероструктуры. Для крепления зеркала используются механические устройства консольного или мембранного типа. Область перестройки VCSEL может достигать сотен нанометров и совпадать с шириной полосы усиления активного элемента.

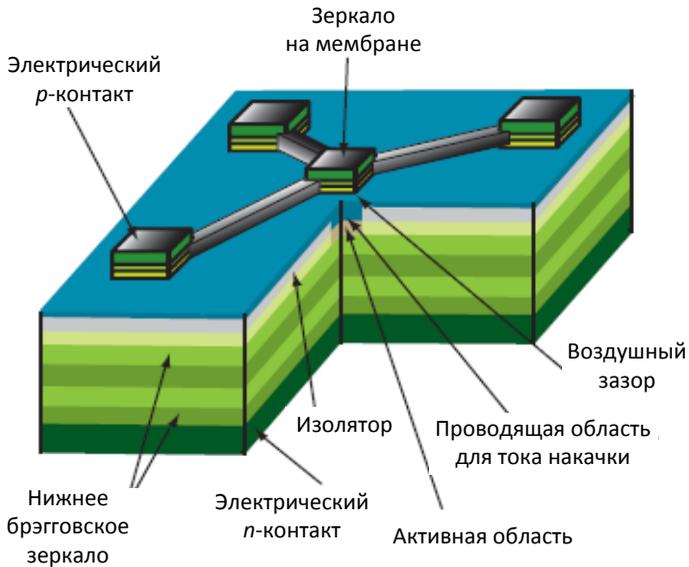


Рисунок 9 – Структурная схема перестраиваемого лазера с вертикальным резонатором мембранного типа (диапазон настройки – 30 нм)

Скорость перестройки и диапазон управляющих напряжений определяются конструкцией подвижного зеркала. Перемещение подвижного зеркала перестраиваемого VCSEL осуществляется за счет изменения электростатического притяжения подвижного зеркала и подстилающей области полупроводника при изменении разности потенциалов между ними. Типичные значения времени перестройки лежат в диапазоне от сотен микросекунд до единиц миллисекунд, включая время срабатывания цепи обратной связи для точной подстройки частоты.

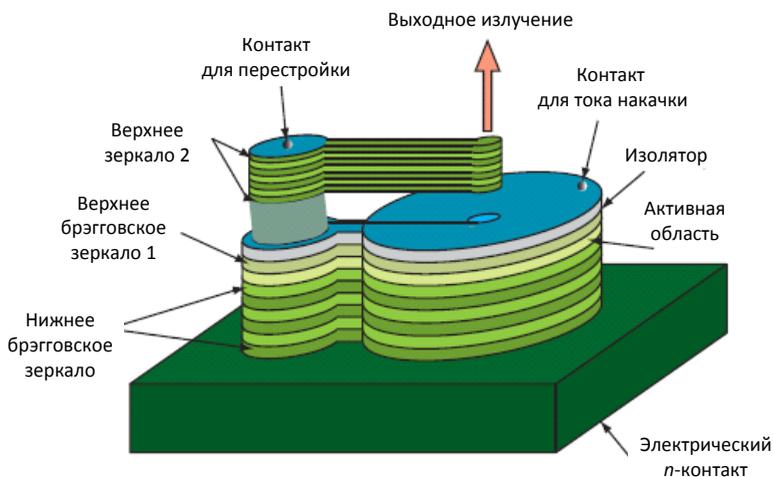


Рисунок 10 – Структурная схема перестраиваемого лазера консольного типа

Диапазон перестройки VCSEL равен минимальному из четырех спектральных диапазонов:

- диапазона перестройки резонатора, определяемого конструкцией крепления перемещаемого зеркала;
- области свободной дисперсии резонатора;
- ширины спектра усиления активного вещества;
- спектра отражения брэгговского зеркала.

Так же, как и в VCSEL с фиксированной длиной волны, в перестраиваемых VCSEL удастся выделить одну поперечную моду с коэффициентом подавления боковых мод более 20 дБ за счет уменьшения апертуры рабочей области до относительно малых размеров. Уменьшение рабочей области ограничивает достижимую выходную мощность, типичные значения которой лежат в диапазоне десятых долей милливатта.

При падении луча света на границу раздела двух сред в общем случае появляются эффекты отражения и преломления волны. Среда, у которой показатель преломления больше, называется оптически более плотной, а вторая – менее плотной. В соответствии с законом Снеллиуса углы падения  $\alpha$ , отражения  $\beta$  и преломления  $\gamma$  (рисунок 11) связаны следующими соотношениями:

- закон отражения –  $\alpha = \beta$ ;
- закон преломления –  $n_c \sin \alpha = n_o \sin \gamma$ .

Если луч переходит из оптически более плотной среды в менее плотную  $n_c > n_o$ , то  $\gamma > \alpha$ . Путем увеличения угла падения можно достичь состояния, при котором преломленный луч будет скользить по границе раздела сред, не переходя в другую среду.

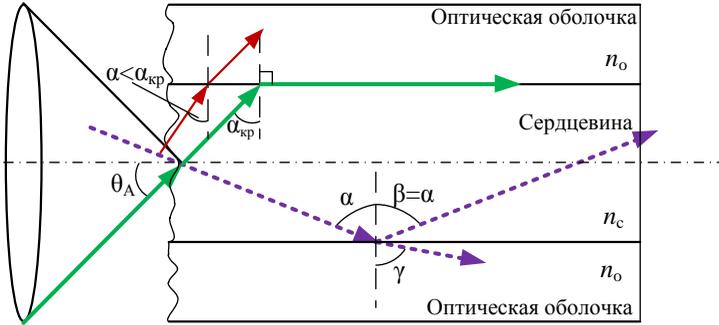


Рисунок 11 – Прохождение луча через границу раздела двух сред

Угол падения, при котором имеет место данный эффект, называется критическим углом  $\alpha_{кр}$  полного внутреннего отражения (см. рисунок 11). Для критического угла  $\alpha_{кр}$  имеет место следующее отношение:

$$\sin \alpha_{кр} = \frac{n_o}{n_c} \quad (4)$$

Для всех углов падения, больших критического ( $\alpha > \alpha_{кр}$ ), будут наблюдаться явления полного внутреннего отражения. Вся мощность светового луча практически полностью возвращается в область более плотной среды. На этом эффекте основан принцип передачи оптического излучения по ОБ.

Свет, попадающий на границу под углом меньше критического, будет проникать в оптическую оболочку и затухать по мере распространения в ней. Оптическая оболочка обычно не предназначена для переноса света, и свет в ней достаточно быстро затухает.

Таким образом, для обеспечения условия полного внутреннего отражения при распространении световых лучей необходимо обеспечить ввод излучения в торец ОБ под углом меньше  $\theta_A$  (см. рисунок 11).

Угол  $\theta_A$  между оптической осью и одним из лучей, образующих световой конус, для которого в дальнейшем выполняется условие полного внутреннего отражения, носит название апертуры ОБ.

Физически апертура характеризует эффективность ввода оптического излучения в ОБ, а для ее числовой оценки используется понятие числовой апертуры  $NA$

$$NA = \sin \theta_A \quad (5)$$

Для теоретических расчетов числовой апертуры ступенчатого ОБ используется следующая формула:

$$NA = \sqrt{n_c^2 - n_o^2}. \quad (6)$$

Для практических расчетов числовой апертуры учитывается коэффициент  $k$ , который в соответствии со стандартом EIA-455-29 и EIA-455-44 равен 0,98 и 0,94 соответственно:

$$NA = k\sqrt{n_c^2 - n_o^2}. \quad (7)$$

Для градиентных ОВ вводится понятие локальной числовой апертуры, которая показывает, что максимальный угол ввода оптического излучения в этом случае определяется тем, в какой точке сердцевины ОВ находится вершина конуса, иными словами, захват ОВ вводимого луча света зависит от того, в какой точке сердечника он вводится в градиентное ОВ.

Для градиентного волокна с параболическим профилем показателя преломления локальная числовая апертура определяется выражением

$$NA = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{n_c^2 - n_o^2}. \quad (8)$$

Фактически количество оптической мощности, воспринимаемой ОВ, изменяется пропорционально квадрату  $NA$ . Числовая апертура ОВ не зависит от его физических размеров.

Из последнего выражения видно, что с увеличением разности показателей преломления сердечника и оболочки значение  $NA$  возрастает и, следовательно, улучшается эффективность ввода излучения в ОВ.

От значения  $NA$  зависят эффективность ввода излучения лазера или светодиода в волоконный световод, потери на микроизгибах, дисперсия импульсов, число распространяющихся мод.

Внутреннее отражение служит основой для распространения света вдоль обычного ОВ. Однако при анализе происходящих процессов учитываются только меридианные лучи, проходящие через центральную ось волокна после каждого отражения. Другие лучи, называемые асимметричными, движутся вдоль волокна, не проходя через его центральную ось. Траектория асимметричных лучей представляет собой спираль, накручивающуюся вокруг центральной оси. Асимметричные лучи, как правило, игнорируются в анализе большинства волоконно-оптических процессов.

Если рассматривать показатель преломления  $n$  как функцию радиуса  $r$ , то используется термин **профиль показателя преломления**. С его помощью описывается радиальное изменение показателя преломления сердечника от оси ОВ в направлении стекла оболочки.

$$n = n(r). \quad (9)$$

Распространение мод в ОВ зависит от распределения профиля показателя преломления.

У ОВ со ступенчатым профилем показатель преломления  $n(r) = n_1$  в стекле сердечника остается постоянным. Световоды с параболическим профилем называются градиентными (рисунок 12).

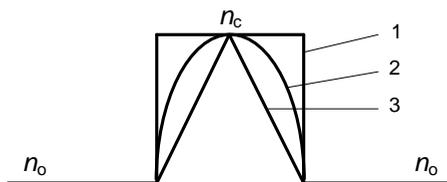


Рисунок 12 – Зависимость формы профиля от показателя степени профиля:

1 – ступенчатый профиль ( $g \rightarrow \infty$ ); 2 – параболический профиль ( $g = 2$ );

3 – треугольный профиль ( $g = 1$ )

Другой важной величиной для описания волоконного световода является структурный параметр, или нормированная частота  $V$ :

$$V = \frac{\pi d}{\lambda} \cdot NA, \quad (10)$$

где  $d$  – диаметр сердечника;

$\lambda$  – длина волны;

$NA$  – числовая апертура.

В случае, если рассчитанное значение  $V < 2,405$  (для ступенчатого профиля) или  $V < 3,53$  (для параболического профиля), возможно распространение единственной моды. Величина 2,405 равна функции Бесселя  $I_0(x)$  при ее первом нулевом значении. Кривые функций Бесселя  $I_n(x)$  выглядят как затухающие синусоидальные колебания. Это математическая функция для описания электрического поля в цилиндрических волноводах, таких как волоконные световоды. Минимальная длина волны, при которой в волокне распространяется фундаментальная мода, называется длиной волны отсечки, значение которой легко определяется из условия одномодовости. Для ступенчатого профиля минимальная длина волны

$$\lambda_{\text{мин}} = \frac{\pi d}{2,405} \cdot NA. \quad (11)$$

Минимальная длина волны для параболического профиля

$$\lambda_{\text{мин}} = \frac{\pi d}{3,53} \cdot NA. \quad (12)$$

В случае, если рассчитанное значение  $V > 2,405$  (для ступенчатого профиля) или  $V > 3,53$  (для параболического профиля), возможно распространение

нескольких мод. Тогда значение нормированной частоты округляется до большего целого числа и минимальная длина волны определяется:

$$\lambda_{\text{мин}} = \frac{\pi d}{V} \cdot NA. \quad (13)$$

Оценить частоту можно при помощи формулы:

$$\lambda_{\text{мин}} = \frac{c}{f_{\text{мин}}}, \quad (14)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме,  $c = 2,9979 \cdot 10^8$  м/с,  
 $f_{\text{мин}}$  – частота, Гц.

При стыковке одномодовых ОВ между собой важную роль играет диаметр модового поля, который более точно оценивает размеры поперечного распределения энергии основной моды. В многомодовых ОВ размер сердцевинки принято оценивать ее диаметром, однако в одномодовых волокнах применяется понятие диаметра модового поля. Это связано с тем, что энергия основной моды в ОВ распространяется не только в сердцевине, но и частично в оболочке, захватывая ее приграничную область.

Радиус поля моды  $W$ , мкм, определяется следующим соотношением:

$$W = r \left( 0,65 + 1,62V^{-\frac{3}{2}} \right), \quad (15)$$

где  $r$  – радиус сердцевинки ОВ, мкм.

Диаметр модового поля

$$D = 2W. \quad (16)$$

В случае если  $V > 2,405$  или  $V > 3,53$ , рассчитывается количество мод  $N$ , распространяемых в сердечнике, для любого профиля показателя преломления, описываемого по степенному закону

$$N \approx \frac{V^2}{2} \left( \frac{g}{g+2} \right), \quad (17)$$

где  $g$  – показатель степени профиля;

$V$  – нормированная частота.

В лабораторной работе исследуется эффективность ввода когерентного излучения с помощью линзы в многомодовое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления. Излучение лазера с диаметром пучка  $a$  вводится в волокно с помощью линзы с фокусным расстоянием  $F$ . Представим фокальное пятно, формируемое этой линзой, как вторичный источник, излу-

чающий с постоянной мощностью в пределах конуса излучения с углом при вершине  $\theta$  (угол между осью конуса и крайним лучом) (рисунок 13).

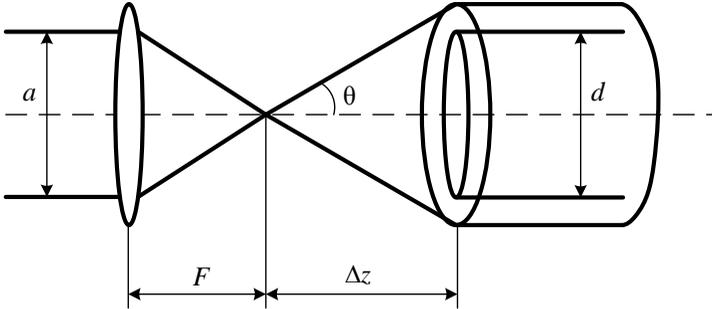


Рисунок 13 – Ввод излучения в оптоволокно

Угол  $\theta$ , как видно из рисунка 13, зависит от фокусного расстояния и диаметра пучка по закону:

$$\theta = \arctg\left(\frac{a}{2F}\right). \quad (18)$$

Если оси светового конуса и оптического волокна совпадают, а фокальное пятно смещено на расстояние  $\Delta z$  относительно входного торца световода, то в плоскости входного торца источником будет освещаться круг диаметром  $a$ .

Однако следует иметь в виду, что количество введенной в волокно оптической мощности существенно зависит от числовой апертуры волокна  $NA$ .

Световод захватывает только те лучи, которые заключены внутри конуса с максимальным углом  $\theta_A$ , определяемым полным внутренним отражением на границе сердечник – оболочка. Поэтому для ввода в волоконный световод всей оптической мощности излучателя (без учета потерь на отражение) должно выполняться условие  $\theta < \theta_A$ .

Подставив в условие  $\theta < \theta_A$  выражение для  $\theta$  и  $\theta_A$  из (5) и (18), получаем условие максимальной эффективности возбуждения световода:

$$\arctg\left(\frac{a}{2F}\right) < \arcsin(NA). \quad (19)$$

Эффективностью ввода  $\eta$  называют отношение оптической мощности излучения, введенной в световод  $P_{ов}$ , к оптической мощности источника излучения  $P_{и}$ :

$$\eta = \frac{P_{ов}}{P_{и}}. \quad (20)$$

Эффективность ввода находится в пределах  $0 \leq \eta \leq 1$ .

Из рисунка 13 следует, что источником излучения является вторичный источник, мощности которого  $P_{и}$  соответствует максимальное напряжение на выходе фотоприемника  $U_{\max}$ . Величина мощности  $P_{об}$  зависит от осевого смещения  $\Delta z$ , поперечного и углового смещений источника света. Этой мощности соответствует напряжение  $U$  на выходе фотоприемника. Таким образом, эффективности  $\eta$  будет соответствовать эффективность выражению:

$$\eta = \frac{P}{P_{\max}} = \left( \frac{U}{U_{\max}} \right)^2. \quad (21)$$

Для определения эффективности ввода излучения, в зависимости от смещения  $\Delta z$ , используют выражение:

$$\eta = \frac{d^2}{4 \cdot (\Delta z)^2 \cdot \text{tg}^2 \theta}. \quad (22)$$

### Порядок выполнения работы

1 Изучите краткие сведения из теории и ответьте на контрольный вопрос, заданный преподавателем.

2 Выберите и запишите исходные данные для расчета из таблицы 1 в соответствии с заданным вариантом.

3 Используя формулы (4)–(8), определите критические углы. Изобразите рисунок 11 и отметьте на нем рассчитанные значения углов.

4 Используя выражения (10)–(17), определите нормированную частоту, минимальную длину волны, частоту, радиус и диаметр модового поля, количество мод. Результаты расчета сведите в таблицу 2.

Таблица 1 – Исходные данные

Номер варианта	Рабочая длина волны $\lambda$ , мкм	Диаметр сердцевины $d$ , мкм	$k$	$n_c$	$n_o$	Профиль показателя преломления	$F$ , мкм	$a$ , мкм
1	1,31	8,3	0,98	1,468	1,462	С*	90	20
2	1,55	62,5		1,464	1,457	П	150	30
3	1,31	50,0		3,600	3,550	П	200	100
4	1,55	50,0		1,464	1,457	П	150	30
5	1,31	8,7	0,98	1,467	1,460	С	110	30
6	1,55	8,8	0,94	3,580	3,450	С	200	150
7	1,31	8,5	0,94	1,469	1,463	С	100	20
8	1,55	62,5		1,470	1,439	П	150	50
9	1,31	50,0		1,460	1,442	П	200	50

Окончание таблицы 1

Номер варианта	Рабочая длина волны $\lambda$ , мкм	Диаметр сердцевины $d$ , мкм	$k$	$n_c$	$n_o$	Профиль показателя преломления	$F$ , мкм	$a$ , мкм
10	1,55	8,3	0,94	1,468	1,463	С	110	20
11	1,31	8,0	0,98	1,500	1,495	С	300	50
12	1,55	50,0		1,474	1,468	П	150	20
13	1,31	50,0		1,450	1,449	П	300	20
14	1,55	50,0		1,493	1,450	П	300	20

\* С – ступенчатый, П – параболический профиль показателя преломления

5 С помощью выражения (18) определите угол ввода оптического излучения в волокно. Используя выражение (22), постройте график зависимости  $\eta(\Delta z)$  и по нему определите оптимальное смещение и эффективность ввода. Изобразите рисунок 13 и отметьте на нем рассчитанные значения.

6 Сделайте вывод по результатам расчета.

Таблица 2 – Результаты расчета

Номер варианта	
Значение критического угла $\alpha_{кр}$ , град	
Угол полного отражения $\theta_d$ , град	
Нормированная частота $V$	
Минимальная длина волны $\lambda_{мин}$ , мкм	
Диаметр модового поля $D$ , мкм	
Количество мод $N$	
Угол ввода оптического излучения $\theta$ , град	

**Содержание отчета**

- 1 Ответ на контрольный вопрос.
- 2 Исходные данные для выполнения расчета.
- 3 Подробные расчеты.
- 4 График зависимости  $\eta(\Delta z)$ .
- 5 Рисунок с отмеченными на нем рассчитанными значениями.
- 6 Вывод.

**Контрольные вопросы**

- 1 Отличие передатчиков с прямой и внешней модуляцией.
- 2 Виды источников излучения и их отличия.
- 3 Принцип действия лазера с резонатором Фабри-Перо.
- 4 Лазер с распределенной обратной связью.
- 5 Лазер с распределенными брэгговскими отражателями.
- 6 Лазер с вертикальным резонатором и поверхностным излучением.
- 7 Особенности перестраиваемых лазеров.
- 8 Перестраиваемый лазер с селектором на основе дифракционной решетки.

- 9 Перестраиваемые лазеры с брэгговскими решетками.
- 10 Перестраиваемые лазеры с вертикальными резонаторами мембранного типа.
- 11 VCSEL консольного типа.
- 12 Понятие апертуры оптического волокна.
- 13 Профили показателя преломления.
- 14 Эффективность ввода излучения в оптическое волокно.