

СХЕМОТЕХНИКА ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ВОСП

КОНСПЕКТ

Раздел 1. Конструкции полупроводниковых излучателей. Основы теории квантовых приборов.

Излучающий диод – полупроводниковый диод, излучающий энергию в оптическом диапазоне длин волн в результате спонтанной рекомбинации электронов и дырок [1].

Принцип работы светоизлучающего диода (СИД) основан на излучательной рекомбинации носителей заряда в активной области гетерогенной структуры при пропускании через нее тока, рис. 1 [2].

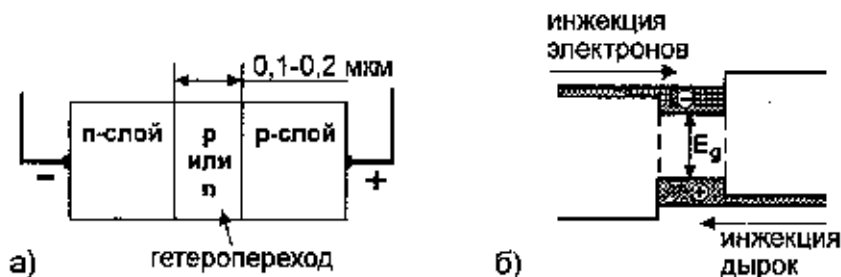


Рис. 1. Двойная гетероструктура: а) гетероструктура, б) энергетическая диаграмма при прямом смещении.

Носители заряда - электроны и дырки – проникают в активный слой (гетеропереход) из прилегающих пассивных слоев (р- и n-слоя) вследствие подачи напряжения на р-п структуру и затем испытывают спонтанную рекомбинацию, сопровождающуюся выделением фотонов, обладающих энергией, равной энергии запрещенной зоны материала полупроводника.

Гетерогенные структуры могут создаваться на основе разных полупроводниковых материалов. Обычно в качестве подложки используется GaAs и InP. Соответствующий композиционный состав активного материала подбирается в зависимости от длины волны излучения и создается посредством напыления на подложку. В отличие от индикаторных светодиодов введение в р-п структуру

дополнительного слоя позволяет сформировать отличающиеся более высоким КПД светоизлучающий диод. Генерация фотонов только в активной области связана с тем, что в материалах с большей энергетической зоной генерация фотонов невозможна. Кроме того, большая запрещенная энергетическая зона предотвращает поглощение фотонов (генерацию электронов и дырок) и делает встроенные слои прозрачными для излучаемых волн.

По конструкции различают светодиоды с поверхностным излучением и торцевым излучением.

При вводе излучения в волокно непосредственно с излучающей поверхности активного слоя, можно считать, что, по крайней мере, половина оптической мощности теряется, т. к. свет с активного слоя распространяется во всех направлениях. Небольшая часть оптической мощности может быть отражена путем базовой металлизации, внося тем самым часть оптической мощности в полезный световой поток. Другой простой путь решения заключается в ограничении излучения небольшой областью внутри кристалла большей площади. Этот подход впервые реализовали Баррас и Доусон и поэтому СИД такой геометрии обычно называют излучателями Барраса (рис. 2).

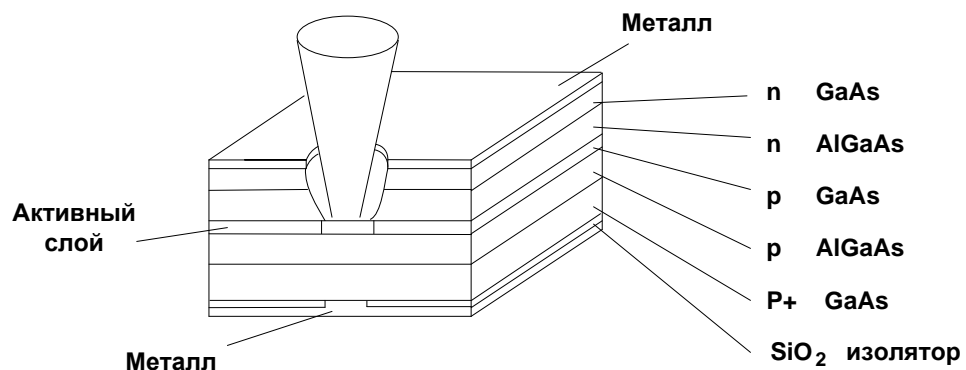


Рис. 2. Структура светодиода Барраса.

В такой конструкции гравированная стенка позволяет минимизировать расстояние между активной зоной и волокном, а соответствующая форма контактов обеспечивает небольшую площадь излучения.

Большинство СИД с поверхностным, близким к ламбертовскому, излучением имеют большую цифровую апертуру, равную приблизительно 0.9. Для ее уменьшения во многих случаях используется особая форма линз, доводя NA до 0.2, но даже в этом случае излучающая поверхность достаточно велика для эффективного ввода излучения в одномодовое волокно. Уровень мощности света, вводимого в волокно, в лучшем случае обычно составляет 20 мкВт для градиентного волокна и 2 мкВт для одномодового волокна.

Лучшей эффективностью ввода излучения в волокно характеризуется СИД с торцевым излучением, обеспечивающим ввод около 50 мкВт (30% доступной оптической мощности) в градиентное волокно и 20 мкВт в одномодовое волокно. Конструкция диода приведена на рис. 3.

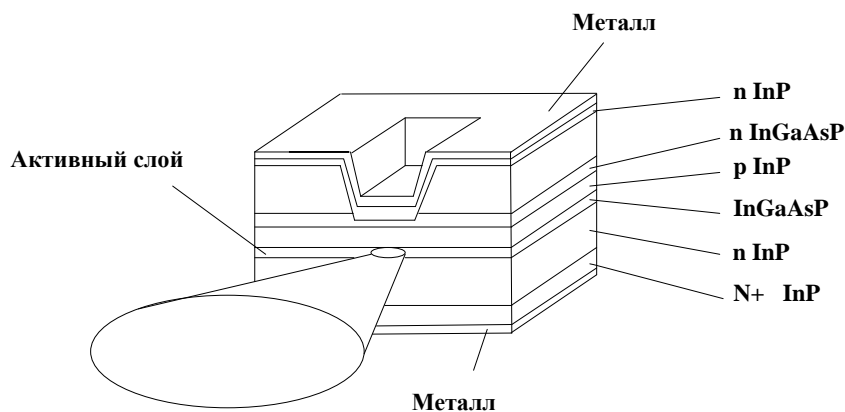


Рис. 3. Структура светодиода с торцевым излучением.

Один из путей построения СИД с торцевым излучением основан на технологии V-образных канавок, которая была разработана для создания лазерных диодов со световодом, сформированным путем распределения усиления. В этом случае обычная двойная гетероструктура покрывается двумя слоями типа n, которые образуют отрицательно смещенный p-n переход, а для создания

проводящей полосы р типа в V-образной канавке напыляется цинк. Наконец, на переднюю грань наносится антиотражательное покрытие, а электрический контакт выполняется короче длины кристалла с тем, чтобы избежать вынужденной эмиссии. Плотность тока и качество оптического резонатора достаточно высоки для создания эмиссии, близкой к вынужденной. Результатом является более узкая ширина спектра (около 20 нм) и более высокая выходная мощность, но при более сильной температурной зависимости. Как правило, с точки зрения спектрального состава излучения СИД имеет достаточно большую ширину спектра, составляющую обычно от 40 до 80 нм на длине волны чистого GaAs, равной 870 нм. Излучение в дальней зоне СИД с торцевым излучением в этом случае эллиптическую форму. Типовые значения углов дальней зоны составляют 50° в вертикальном направлении и 100° в горизонтальном направлении.

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

- 1) сравнительно низкая полоса частот, равная 100 МГц, хотя достигнуты значения полосы частот до 1 ГГц, поэтому быстродействие СИД как минимум в 5 раз ниже по сравнению с лазером;
- 2) широкий спектр излучения, составляющий около 60 нм, что также снижает полосу частот вследствие монохроматической дисперсии;
- 3) низкая эффективность ввода излучения в оптическое волокно, даже для диодов с торцевым излучением.

При постоянном токе возбуждения СИД, имеет отрицательный температурный коэффициент выходной мощности, типовое значение которого находится в пределах от -0.5 до -1.5 %/°C для GaAlAs с $\lambda_0=850$ нм и InGaAs с $\lambda_0=1300$ нм. Поэтому для стабилизации мощности излучения и повышения надежности LED можно использовать термоэлектрические охладители, однако в большинстве случаев необходимость в электронной обратной связи не требуется.

Одной из разновидностей LED являются суперлюминесцентные диоды (SLED), которые отличаются большей по сравнению с лазерными диодами

стабильностью, имеют меньший уровень шумов, а большая ширина спектра решает все проблемы, связанные с оптической интерференцией. Дополнительными преимуществами SLED в этом случае являются: высокая линейность, меньшее потребление энергии и вследствие низкой плотности тока, высокая надежность. Кроме этого, так как SLED не очень чувствительны к перегрузке, для управления ими можно использовать простые схемы управления. По своим характеристикам SLED занимают промежуточное место между СИД и лазерными диодами [3].

1.1 1.2 Лазерные диоды

Принципиальным отличием лазерного диода (ЛД) от СИД является наличие в них встроенного оптического резонатора. Лазерный диод работает при значительно больших значениях токов накачки, чем светодиод. Генерацию света в лазерном диоде определяют два механизма: спонтанная и стимулированная эмиссия. Спонтанная эмиссия имеет место в результате рекомбинации возбужденных электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне, аналогично генерированию излучения в СИД. Из-за высокого показателя преломления активного слоя свет, достигая границ активного слоя, отражается от них и не выходит в другие слои структуры. Фотоны, созданные в результате спонтанной эмиссии, вызывают генерацию дополнительных фотонов путем стимулирования дополнительных рекомбинаций, а те в свою очередь создают дополнительные фотоны, т. е. происходит стимулированная эмиссия. Локализованный таким образом свет усиливается, и, когда сопутствующая этому процессу добавка энергии становится выше потерь, возникает лазерное излучение. Следовательно, при протекании через структуру полупроводникового лазера электрического тока, вначале, аналогично СИД, возникает естественное излучение, по мощности пропорциональное силе тока, но стоит току возрасти до некоторого порогового

значения, мощность излучения резко возрастает, а само излучение становится лазерным.

Так как стимулированные фотоны когерентны с генерирующими фотонами, т. е. имеют одну и ту же длину волны и фазу, такое излучение имеет узкий спектр, а длина волны определяется свойствами материала лазерной структуры. В типовых лазерных диодах высота активной зоны составляет 5-10 мкм, ширина 0.1-0.2 мкм, а длина 300 мкм, при этом грани представляют собой полупрозрачные зеркала, ограничивающие объем резонатора. Эмиссия происходит с обеих граней и имеет идентичные характеристики излучения. Типовые значения порогового тока составляют от единиц до сотен миллиампер, а мощность лазерного излучения несколько десятков милливатт.

Таким образом, для возникновения лазерного излучения необходимо обеспечить определенный уровень тока, а так же выполнить условия электрического и оптического ограничений.

Наибольшее распространение получили лазеры с резонатором Фабри-Перо (FPL), лазер с распределенной обратной связью (DFB) и лазер с распределенным брэгговским отражением (DBR), с внешним резонатором.

В лазерных диодах с резонатором Фабри-Перо (FP лазеры, Fabry-Perot) резонатор образуется торцевыми поверхностями, окружающими с обеих сторон гетерогенный переход. Одна из сторон отражает свет с коэффициентом отражения близким к 100%, другая является полупрозрачной, обеспечивая, таким образом, выход излучения наружу. В спектре FP лазера наряду с главным пиком, в котором сосредоточена основная мощность излучения, существуют побочные максимумы. Этот эффект отсутствует у перечисленных трех других типов лазеров (DFB, EC, DBR)

Лазерные диоды с распределенной обратной связью (DFB лазер) и с распределенным брэгговским отражением (DBR лазер) имеют схожий резонатор с FP лазером, в который добавлена периодическая пространственная модуляционная структура. В DFB лазерах периодическая структура совмещена с активной областью

(рис. 4), а в DBR лазерах периодическая структура вынесена за пределы активной области (рис. 5). Периодическая структура влияет на условия распространения и характеристики излучения. Преимуществами DFB и DBR лазеров по сравнению с FP лазером являются: уменьшение зависимости длины волны лазера от тока инжекции и температуры, высокая стабильность одномодовости и практически 100-процентная глубина модуляции. Температурный коэффициент $\Delta\lambda/\Delta T$ для FP лазера порядка 0,5-1 нм/°С, в то время как для DFB лазера порядка 0.07-0.09 нм/°С [3]. Основным недостатком DFB и DBR лазеров является сложная технология изготовления и, как следствие, более высокая цена.

В лазерном диоде с внешним резонатором (ECL) один или оба торца покрываются специальным слоем, уменьшающим отражение, и соответственно, одно или два зеркала ставятся вокруг полупроводниковой структуры. На рис. 4 показан пример ЕС лазера с одним внешним резонатором. Антиотражательное покрытие уменьшает коэффициент отражения примерно на 4 порядка, в то время как другой торец активного слоя отражает до 30% светового потока. Зеркало, как правило, совмещает функции дифракционной решетки. Для улучшения обратной связи между зеркалом и активным слоем устанавливается линза. Увеличивая или уменьшая расстояние до зеркала, а также одновременно разворачивая зеркало-решетку, это эквивалентно изменению шага решетки – можно плавно изменять длину волны излучения, причем диапазон настройки достигает 120 нм. В силу этого, ЕС лазеры являются незаменимыми при разработке аппаратуры волнового уплотнения и измерительной аппаратуры для ВОЛС. По характеристикам они схожи с DFB и DBR лазерами.

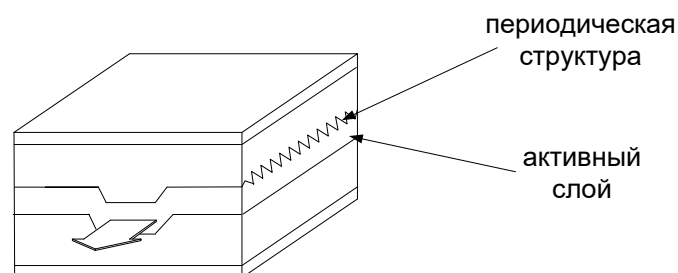


Рис. 4. Структура DFB лазера.

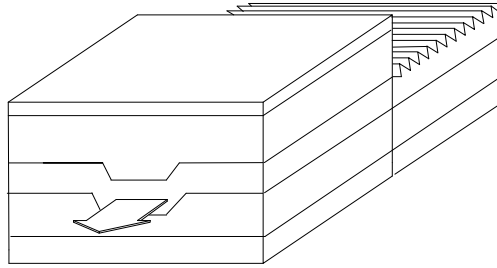


Рис. 5. Структура DBR лазера.

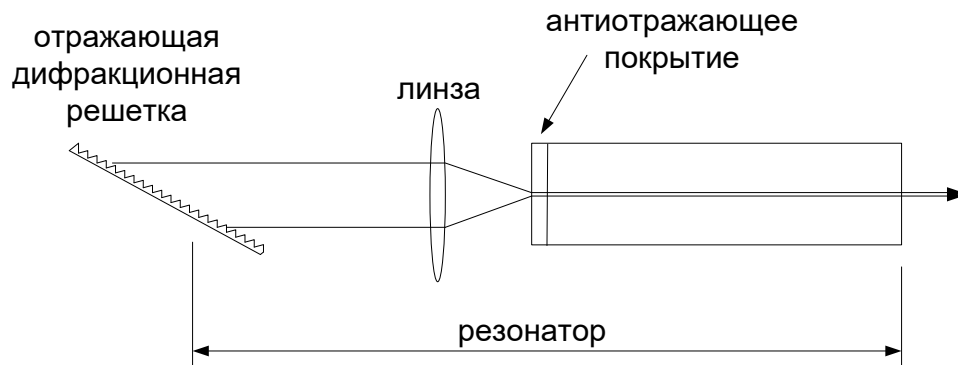


Рис. 6. Лазер с одним внешним резонатором, ЕС лазер.

Тема 2

Основные принципы излучения света в полупроводниках

При рассмотрении взаимодействия света с электронами полупроводников удобной для использования моделью является модель микроскопического момента (в противоположность макроскопической) в кристалле, в которой электроны рассматриваются как имеющие в кристалле моменты, устанавливаемые соотношением

$$p = \frac{\hbar k}{2\pi}, \quad (1)$$

где k - волновой вектор электронного состояния (постоянная Планка $\hbar = 6,624 \cdot 10^{-27}$ эрг*с). Вектор p не является классическим механическим моментом свободного электрона $m v$, где m — масса, а v - скорость. Кристаллический момент p включает в себя воздействие на электроны атомов кристаллической решетки и связан с энергией и скоростью электрона довольно сложным образом. В уравнениях движения электрона в кристалле величина p играет роль момента, а эффективная масса m^* — роль массы по аналогии с классическими уравнениями движения свободного электрона в вакууме. Кристаллический момент и эффективную массу можно определить для дырок в валентной зоне так же, как это делается для электронов в зоне проводимости. Однако в общем случае величины p и m^* для электронов будут отличными от аналогичных величин для дырок в данном материале.

Взаимодействие электронов с дырками в полупроводнике может приводить к фотонам света. Эти дискретные кванты или относительно локализованные единицы оптической энергии сохраняют свою тождественность в качестве таковых во всех процессах эмиссии, передачи, отражения, дифракции, поглощения и т. д. Фотон описывается в микроскопической модели путем установления его массы и момента следующим образом. Первоначально рассмотрим фотон света в вакууме. Энергия E фотона дается уравнением:

$$E = h\nu, \quad (2)$$

где ν - частота излучения (с^{-1}). Если выражение (2) скомбинировать с известным соотношением:

$$c = \nu\lambda_0, \quad (3)$$

где c - скорость света в вакууме, λ_0 - длина волны света в вакууме, то энергию фотона можно выразить как:

$$E = \frac{hc}{\lambda_0}, \quad (4)$$

Часто удобно помнить, что выражение (4) для энергии принимает вид:

$$E = \frac{1,24}{\lambda_0}, \quad (5)$$

где E в обычно используемой системе единиц выражается в электронвольтах (эВ), а длина волны - в микрометрах (мкм).

Таким образом, с помощью выражений (1) - (5) можно описать эквивалентно с помощью энергии, длины волны, частоты, массы или момента. Заметим, что в случае первых четырех параметров полное описание фотона требует указания направления движения. Следует помнить, что также важна фаза фотона в случае рассмотрения когерентного излучения. Уравнения (1) - (5) были выведены для фотона в вакууме. Однако, чтобы воспользоваться ими для описания фотона в твердом теле, достаточно заменить величины c и λ_0 на скорость v и длину волны λ света в материале соответственно. Взаимодействие фотонов излучения с электронами и дырками в полупроводнике можно рассматривать как взаимодействие частиц, используя определения предыдущих разделов. В этом случае оптические процессы регулируются обычными законами сохранения энергии и импульса.

Законы сохранения энергии и момента (импульса)

Законы сохранения энергии и момента (импульса) удобно иллюстрировать путем рассмотрения явления поглощения света. Наибольшее поглощение в полупроводниках происходит за счет возбуждения электронов, когда электрон, находящийся на данном энергетическом уровне, поглощает фотон и переходит в более высокое энергетическое состояние. Электронные переходы подчиняются некоторым правилам отбора, большинство из которых базируется на сохранении энергии и импульса электрона и фотона. (С теоретической точки зрения - это сохранение волнового вектора k , являющееся следствием периодичности кристаллической структуры, которая приводит к сохранению момента, определяемого как $\hbar k/2\pi$.) Таким образом, если принимаются во внимание только взаимодействие фотонов и электронов, то:

$$E_i + h\nu_{\text{фот}} = E_f, \quad (6)$$

$$p_i + p_{\text{фот}} = p_f$$

где индексы i и f относятся к начальному и конечному состояниям электрона. Момент фотона в видимой или инфракрасной области спектра во много раз меньше момента электрона при тепловом возбуждении. Следовательно, селективным правилом

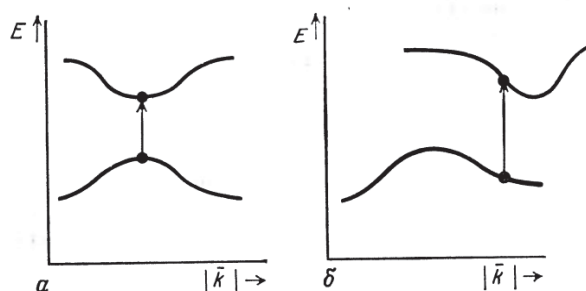


Рисунок 1 - Прямые переходы электронов с поглощением в материалах с прямой (а) и непрямой (б) запрещенными зонами.

отбора является приближенное выполнение равенства $k_i = k_f$, и электрон практически не испытывает никакого изменения момента. Такой тип перехода, включающий лишь электрон и фотон, называется прямым переходом. Этот переход показан на графике $E-k$ (рисунок 1) как вертикальный переход. Заметим, что в общем случае минимумы зон проводимости не совпадают с максимумами валентных зон в одной точке k -пространства. Если совпадение имеет место, то говорят, что материал имеет прямую запрещенную зону. Если совпадения нет, то материал имеет непрямую запрещенную зону.

Хотя фотон не может передать значительную часть момента электрону, можно иметь электронные переходы, в которых изменяется k . В этих процессах участвует также фонон или, говоря другими словами, момент передается или поглощается атомами решетки. Колебательная энергия атомов решетки квантована (как световая энергия) на фононы с энергией $h\nu$, где ν - частота ($1/c$). Фононы характеризуются волновым вектором q . Условия, ограничивающие поглощающий переход, в котором участвуют фотон, электрон и фонон, определяются выражениями:

$$k_i \pm q = k_f,$$

$$E_i + h\nu_{\text{фот}} \pm h\nu_{\text{фон}} = E_f, \quad (7)$$

где в выражении (7) волновым вектором $\mathbf{k} = (2\pi/\lambda_0)\mathbf{u}$ и фотона можно пренебречь. Схемы процесса на графике $E - k$ приведены на рисунке 2.

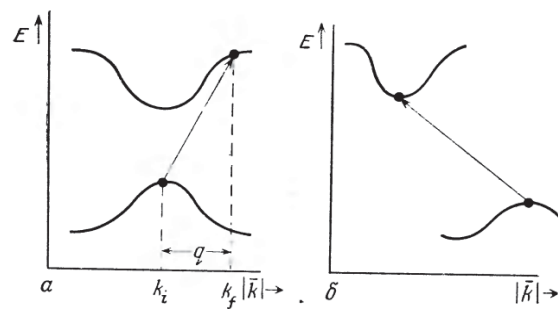


Рисунок 2 - Непрямые переходы электронов с поглощением в материале с прямой (а) и непрямой (б) запрещенными зонами

Электрон поглощает фотон и в то же самое время поглощает или испускает фонон. Такие переходы, называемые непрямыми, выглядят как диагональные переходы на графике $E - k$, представленном на рисунке 2. Так как для не прямых переходов необходимы как фотон, так и фонон, а для того, чтобы вызвать прямой переход, необходим только фотон, прямой переход является более вероятным. По этой причине полупроводники с прямой запрещенной зоной оптически более активны по сравнению с полупроводниками с непрямой запрещенной зоной. Эта особенность очень важна в случае источников света.

На рисунках 1, 2 представлены лишь межзонные переходы (между валентной зоной и зоной проводимости). Однако как прямые, так и не прямые переходы также имеют место внутри зоны (внутризонные) или между энергетическими состояниями, обусловленными атомами примесей и (или) дефектами. Во всех

случаях применимы принципы сохранения энергии и импульса (волнового вектора). Поглощающие переходы такого типа представлены на рисунке 3. Внутрizonное поглощение может иметь место как для электронов в зоне проводимости, так и для дырок в валентной зоне, и поэтому оно называется поглощением на свободных носителях. Такое поглощение обычно включает в себя, переходы электронов из донорных состояний в зону проводимости и переходы дырок из акцепторных состояний в валентную зону. Так как графики соответствуют энергии для электронов, возрастание энергии для дырок соответствует движению по графикам вниз.

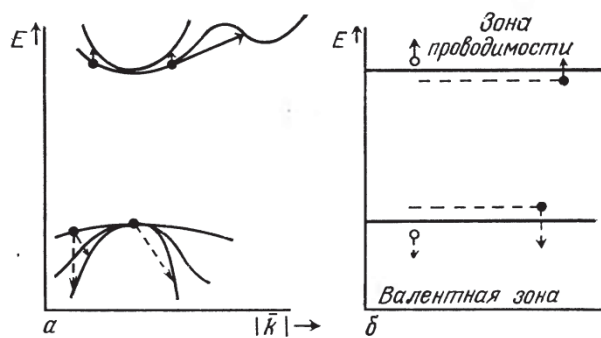


Рисунок 3 - Поглощение на свободных носителях

Действие законов сохранения энергии и импульса, которое проиллюстрировано на примере процессов оптического поглощения, также одинаково применимо к процессам излучения фотонов в полупроводниках. В действительности такое рассмотрение является даже более важным в случае излучения света, как это будет показано в следующем разделе.

Излучение света в полупроводниках

Излучение света в полупроводниках обычно происходит благодаря рекомбинации носителей. Процесс излучения можно разделить на два типа:

спонтанное излучение, в котором дырки и электроны рекомбинируют случайно, и стимулированное излучение, в котором дырки и электроны стимулируются к рекомбинации уже существующими фотонами.

Спонтанное излучение

При поглощении света электрон поглощает фотон и переходит в более высокое энергетическое состояние. При излучении происходит противоположный эффект. Электрон переходит из более высокого энергетического состояния в более низкое и при этом теряет энергию, которая излучается в виде фотона. Переходы с излучением света в полупроводниках являются межзонными переходами; они происходят между зоной проводимости и валентной зоной и (или) определенными состояниями внутри запрещенной зоны, обусловленными легирующими примесями или дефектами. Так как запрещенная зона полупроводников обычно составляет от нескольких десятых до нескольких единиц электронвольта, длина волны излучения обычно лежит в инфракрасной области спектра и приблизительно соответствует длине волны края полосы поглощения в полупроводнике. Как и в случае поглощения, существуют определенные правила отбора, ограничивающие возможные излучательные переходы. В частности, требуется, чтобы выполнялись законы сохранения энергии импульса. Таким образом, для прямых переходов имеют место соотношения

$$E_i - E_f = h\nu_{\text{фот}},$$
$$k_i - k_f = (2\pi / \lambda_{\text{фот}}) \mathbf{u}, \quad (8)$$

где \mathbf{u} - единичный вектор, определяющий лишь направление. Отметим, что для прямых переходов $2\pi/\lambda_{\text{фот}} \ll |k_i|$ и $|k_f|$, так что $|k_i| \approx |k_f|$, как и для прямого перехода с поглощением. Излучение фотона может также происходить при непрямом переходе,

причем в этом случае также требуется выполнение законов сохранения энергии и импульса:

$$k_i - k_f \pm q = (2\pi / \lambda_{\text{фот}}) \mu, \quad (9)$$

где q - волновой вектор поглощаемого или испускаемого фотона. Как и в случае поглощения, необходимость участия фонона приводит к значительному уменьшению вероятности перехода и, следовательно, к генерации фотона. Третьим требованием для излучательного перехода является то, чтобы были заполнены верхние (исходные) энергетические уровни и свободны соответствующие нижние (конечные) энергетические уровни, причем разность в энергии между ними должна равняться энергии излучаемого фотона. Это правило выглядит очевидным и тривиальным, но играет малую роль в случае поглощения ввиду того, что поглощающий материал обычно находится в тепловом равновесии и, следовательно, всегда имеет заполненные нижние энергетические уровни и свободные верхние. (За исключением случая, когда энергия фотонов меньше межзонной. Тогда не существует возможного верхнего состояния для электронов и, следовательно, поглощение не происходит). В случае излучения упомянутое правило является более важным. Например, для характерных полупроводников при тепловом равновесии и комнатной температуре и ниже существует относительно малое число дырок в валентной зоне и электронов в зоне проводимости. В случае легированного полупроводника в зоне проводимости может быть много электронов, как, например, в материале *n*-типа, но при этом очень мало дырок в валентной зоне (вследствие постоянства произведения $n \cdot p$). Противоположная картина имеет место для полупроводников *p*-типа. Следовательно, излучательная рекомбинация, происходящая при тепловом равновесии, дает очень мало фотонов, которые перепоглощаются до того, как покинут кристалл. Для получения значительного светового излучения от полупроводника необходимо каким-либо образом вывести полупроводник из состояния теплового равновесия, чтобы создать больше электронов в зоне

проводимости и дырок в валентной зоне. После накачки до более высоких энергетических уровней электроны и дырки «усаживаются» на состояния, соответствующие краям их зон.

Увеличения концентрации дырок и электронов можно достичь разными путями, и этот процесс обычно называется накачкой материала. Например, если свет большой интенсивности с энергией фотонов, большей энергетической ширины запрещенной зоны, направлен на полупроводник, то происходит межзонное поглощение, в результате чего будет возникать большое количество электронно-дырочных пар. Эти дырки и электроны первоначально горячие, но очень быстро термолизуются, т. е., электроны садятся на дно зоны проводимости, а дырки поднимаются к верхней границе валентной зоны через взаимодействие с решеткой. Переход в тепловое равновесие (термолизация) обычно происходит очень быстро - за время порядка 10^{-14} с. После его установления электроны и дырки рекомбинируют; эта рекомбинация может быть излучательной, приводящей к излучению фотона с энергией, приблизительно равной ширине запрещенной зоны. Время жизни, или время, в среднем необходимое для рекомбинации электронно-дырочных пар после их возникновения, обычно составляет около 10^{-11} с в накачиваемом полупроводнике (с прямой запрещенной зоной). Заметим, что в полупроводниках с непрямой запрещенной зоной переход в тепловое равновесие вынуждает электроны и дырки занимать состояния со значительно различающимися волновыми векторами. Это означает, что, для того чтобы произошла рекомбинация, необходим фонон, так же как и дырка и электрон, а следовательно, это менее вероятный процесс. Типичное время жизни для непрямой рекомбинации достигает 0,25 с. Прежде чем он произойдет, дырка и электрон в среднем уже рекомбинируют в результате безызлучательного процесса с передачей энергии решетке или дефектам и т. д. Следовательно, эффективность непрямой излучательной рекомбинации очень мала. Квантовая эффективность для материала с прямой запрещенной зоной может достигать 1, в то время как для материала с непрямой зоной он обычно составляет 0,001 или менее. Однако не прямые излучательные переходы имеют место, и в некоторых материалах с непрямой за-

прещенной зоной (например, GaP) может происходить вполне измеримое и действительно полезное излучение света. Тем не менее чрезвычайно трудно изготовить лазеры на материалах «с непрямым переходом».

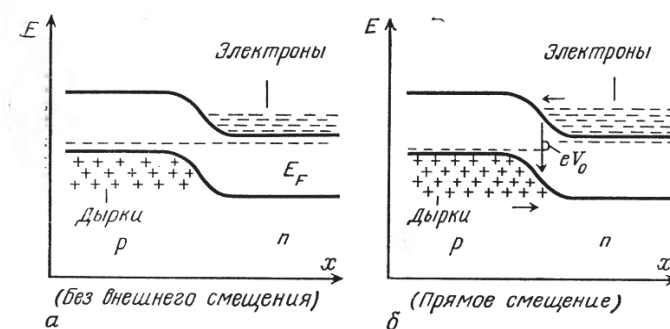


Рисунок 4 - Расположение энергетических зон р-п перехода светодиода.

а) в отсутствие внешнего напряжения смещения; б) внешнее напряжение смещения V_0 приложено в прямом направлении

Метод оптической накачки, который был описан как способ получения необходимого увеличения концентрации электронов и дырок, является сравнительно громоздким, так как требует очень интенсивных источников света; этот процесс малоэффективен, и большая часть энергии превращается в тепло. Кроме того, выходящее излучение необходимо фильтровать, чтобы выделить излучение полупроводника из отраженного света накачки

Другой способ накачки, который одновременно эффективен и очень прост, использует свойства р-п перехода. Расположение энергетических зон светоизлучающего р-п перехода представлено на рисунке 4. В отсутствие напряжения смещения существует много электронов в зоне проводимости на n-стороне и много дырок в валентной зоне на р-стороне, но лишь некоторые из них могут преодолеть барьер и попасть в область перехода. После приложения прямого напряжения смещения V_0 барьер понижается и многие дырки и электроны

проникают (инжектируют) в область перехода, где они рекомбинируют, генерируя фотоны. Свет, излучаемый под воздействием электрического напряжения, называется электролюминесценцией, в то время как свет, получаемый путем накачки оптическим источником с более короткой длиной волны излучения, называется фотолюминесценцией.

Тема 3 Конструкции полупроводниковых фотоприёмников. Схемотехника фотоприёмников.

Одним из базовых компонентов волоконной оптики, посредством которых осуществляется регистрация оптического излучения, являются приемники оптического излучения. Последние выполнены на основе фоточувствительных полупроводниковых элементов, использующих явление фотопроводимости (внутреннего фотоэффекта), которое заключается в увеличении фотопроводимости при возбуждении светом носителей валентной зоны и зоны проводимости полупроводника.

1.1 2.1. Фотодиоды

Фотодиод – это фотоприемник, принцип действия которого основан на фотогальваническом эффекте и фоточувствительный элемент которого содержит структуру полупроводникового диода. В зависимости от топологии р-п перехода различают PIN и лавинные (APD) фотодиоды.

1.1.1 2.1.1 PIN фотодиоды

1.2

Основным отличием данного типа диода от обычных диодов с р-п переходом является наличие между сильнолегированными p^+ и n^+ слоями полупроводника, так называемого i -слоя, который представляет собой слаболегированный полупроводник n -типа, толщиной несколько десятков микрон (рис. 7)

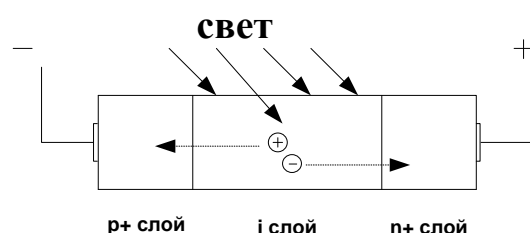


Рис.7. Структура PIN диода.

На сегодняшний день PIN фотодиод является наиболее распространенным типом детектора оптического излучения, что объясняется достаточной простотой его производства и использования, достаточно высокой временной и температурной стабильностью и широкой полосой рабочих частот.

1.2.1 2.1.2 Лавинные фотодиоды

Вследствие присущего APD диодам усиления они имеют более высокую чувствительность, чем PIN диоды, что делает их более привлекательными для использования в коммуникационных приемниках. Основное отличие APD диодов от PIN диодов, имеющих $p^+ - i - n^+$ структуру, заключается в наличии дополнительного p -слоя (рис. 8). При этом создается $p^+ - i - p - n^+$ структура. При попадании фотона в p -зону энергия фотона поглощается, создавая электронно-дырочную пару. Электрон перемещается к положительно заряженному контакту и когда он достигает зоны сильного электрического поля, на p - n переходе создается дополнительная электронно-дырочная пара и начинается лавинный процесс, который приводит к увеличению числа носителей.

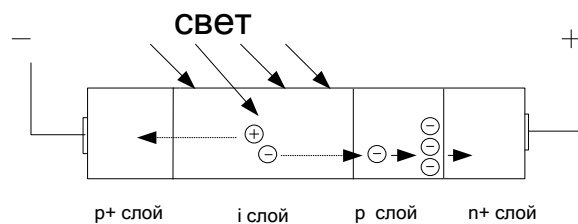


Рис.8. Структура APD диода.

1.3 2.2 Система параметров приемников излучения

Свойства приемников излучения наиболее полно могут быть описаны системой характеристик, выражающих зависимость величины сигнала и шума на выходе ФП от различных факторов: величины, спектрального состава и частоты модуляции возбуждающего излучения, температуры окружающей среды, напряжения питания, наличия фоновых сигналов и др. Основными характеристиками ФП являются:

1. амплитудная (энергетическая или световая), определяющая зависимость величины фототока (фото-ЭДС) от уровня возбуждающего потока.
2. спектральная чувствительность, выражающая зависимость выходного сигнала от длины волны возбуждающего излучения при его постоянном уровне.
3. частотная характеристика, определяющая времена фотоответа в виде зависимости выходного сигнала от частоты модуляции потока излучения.
4. время нарастания, спада выходного сигнала от 0,1 до 0,9 и с 0,9 до 0,1 уровня установившегося максимального значения, соответственно.
5. время задержки при включении, при выключении.
6. емкость перехода
7. коэффициент усиления (для лавинный диодов)
8. темновой ток
9. шумовые параметры и характеристики – зависимость спектральной плотности мощности шума от частоты,
10. вольтамперная – зависимость общего тока через приемник (фототока и темнового тока) от величины приложенных напряжений
11. диаметр светочувствительной поверхности.

Однако не всегда возможно иметь для каждого экземпляра полный набор таких характеристик, в ряде случаев достаточно иметь набор параметров, выражающих свойства ФП при определенных режимах эксплуатации. Вместо амплитудной характеристики, например, для определения фототока достаточно знать величину

спектральной чувствительности к монохроматическому излучению или интегральную чувствительность к источнику со сложным спектром. Частотная характеристика в первом приближении определяется постоянной времени, а шумовая – средним квадратическим значением шума или спектральной плотностью мощности шума на одной фиксированной частоте [4].

Тема 4 Основы теории оптических квантовых усилителей. Основные конструкции оптических квантовых усилителей.

Полупроводниковый оптический усилитель (semiconductor optical amplifier, SOA) - оптоэлектронное устройство, которое при подходящих условиях работы может усилить входной световой сигнал. Энергетический выигрыш в данном устройстве обеспечивается за счет внешнего источника электрического тока. За счет инжекции тока в полупроводник создается инверсия населенности в полупроводнике. Фотоны входящего излучения, попадая на слой активного вещества, вызывают электронную эмиссию, результатом которой является переход электронов с верхнего энергетического уровня на нижний и излучение веществом вторичных фотонов. Один фотон входного сигнала вызывает появление N вторичных фотонов, возникает N -кратное оптическое усиление. В полупроводнике возможны три механизма взаимодействия фотонов падающего излучения с носителями в полупроводнике. Они показаны на рис.1 для материала с энергетической структурой, состоящей из двух энергетических уровней.

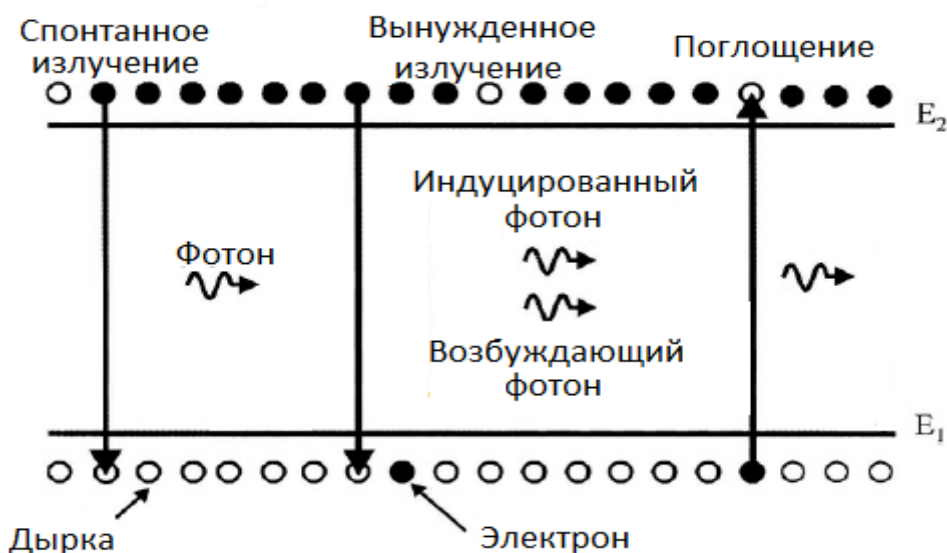


Рис. 1. Спонтанные и вынужденные процессы в двухуровневой энергетической системе.

При поглощении фотон падающего света достаточной энергии может переместить носитель из валентной зоны в зону проводимости. Это процесс

приводит к угасанию падающего фотона, и как следствие, к потерям во входящем сигнале.

Если фотон света подходящей энергии падает на полупроводник, он может вызвать вынужденную рекомбинацию носителя с дыркой. Рекомбинирующий носитель теряет свою энергию в виде фотона света. Этот новый стимулированный фотон будет идентичен во всех отношениях индуцирующему фотону. Они будут обладать идентичной фазой, частотой и направлением, то есть будут когерентны. И исходный фотон, и вторичный фотоны могут приводить к дальнейшим случаям вынужденной рекомбинации. Если ток инжекции достаточно велик, в полупроводнике создается инверсия населенности, и количество носителей в зоне проводимости значительно превышает количество таковых в валентной зоне. В этом случае вероятность вынужденного излучения больше вероятности поглощения, и полупроводник будет демонстрировать оптическое усиление.

В процессе прохождения излучения через полупроводник также существует вероятность того, что носители зоны проводимости будут спонтанно рекомбинировать с дырками в валентной зоне, тем самым приводя к излучению фотона со случайной фазой и направлением. Спонтанно излучаемые фотоны имеют широкий диапазон частот. Фотоны спонтанного излучения являются шумами, а также принимают участие в уменьшении числа носителей, служащих для оптического усиления. Спонтанное излучение является процессом, который нельзя предотвратить. То же справедливо и для процесса поглощения падающего излучения. Следовательно, невозможно создать бесшумный усилитель. Вынужденные процессы пропорциональны интенсивности индуцирующего излучения, в то время как процесс спонтанного излучения не зависит от него.

1 2. Структура

Конструкция полупроводникового усилителя представляет собой две металлические подложки, между которыми располагаются слои вещества с р- и n-типом проводимости, через которые проходит электрический ток накачки, а так же слой активного вещества. Торцы этой конструкции покрыты антиотражающим покрытием. Данная структура представлена на рис.2. SOA можно разделить на два основных типа: усилитель Фабри-Перо (FP-SOA), где отражение от торцевых граней является значительным (т.е. сигнал множество раз проходит через усилитель), и усилитель бегущей волны (TW-SOA), где отражение мало (т. е. сигнал проходит через усилитель один раз). TW-SOA не так чувствительны, как FP-SOA, к флуктуациям тока смещения, температуры и поляризации сигнала. Структура SOA оказывает большое влияние на его производительность. SOA-структуры выбираются так, чтобы данное устройство приближалось к идеальным характеристикам или чтобы подчеркнуть конкретную характеристику, желательную для конкретных целей. Требования к характеристикам идеального полупроводникового оптического усилителя:

1. Большой коэффициент усиления
2. Широкая полоса пропускания
3. Незначительные потери при отражении от торцевых покрытий
4. Малая поляризационная чувствительность
5. Высокая выходная мощность насыщения
6. Ограничение аддитивных шумов теоретическим пределом
7. Нечувствительность к скорости и модуляционным характеристикам входного сигнала
8. Многоканальное усиление без перекрестных помех
9. Отсутствие нелинейных эффектов

1.1 2.1. Основы структуры SOA

Изначально в основе структуры SOA лежали полупроводниковые лазерные диоды с двойной гетероструктурой (DH). В этом типе структуры активная область помещается между областями оболочки n-типа и p-типа. Связь между активной областью и областями оболочки осуществляется гетеропереходами. Гетеропереход характеризует разницу между двумя полупроводниковыми материалами с разной энергией запрещенной зоны. Области оболочки имеют более широкие запрещенной зоны и более низкие показатели преломления по сравнению с активной областью.

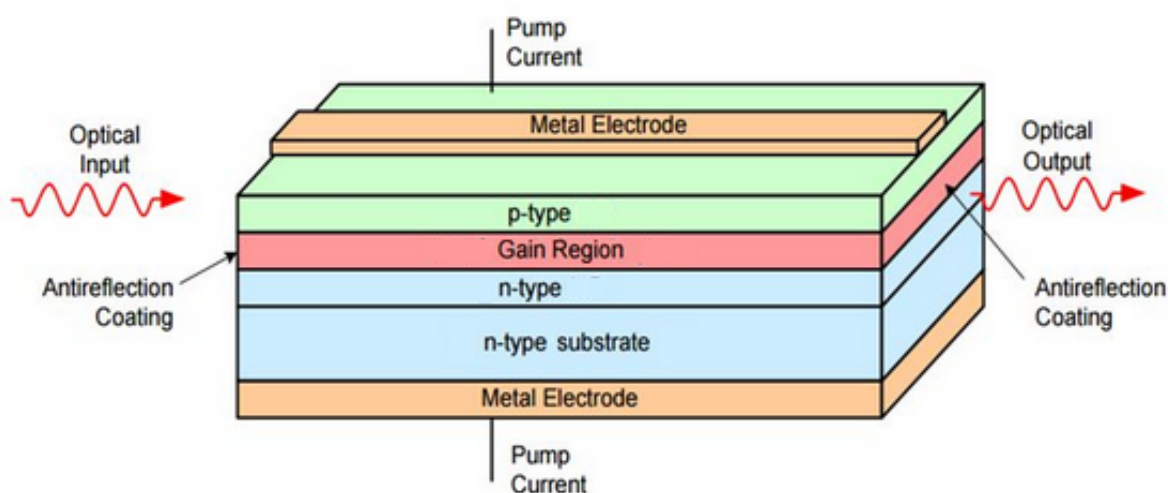


Рис. 2. Структура полупроводникового усилителя.

Носители вводятся в активную область устройства благодаря подаваемому току смещения. Инжектированные носители должны пробиваться сквозь окружающие слои полупроводника прежде, чем они достигнут активной области полупроводника. Если бы не было ограничение, создаваемое гетеропереходами, носители распространялись бы по всему устройству. Поскольку активная область относительно невелика, это означает, что только небольшой процент

инжектированных несущих в конечном итоге обеспечит усиление распространяющегося светового сигнала. Это приводит к неэффективной работе устройства. Для преодоления этого эффекта необходимо удержание носителей в активном регионе. В структуре ДН это достигается за счет разницы между шириной запрещенной зоны активнослоя и областями оболочки. Это ограничивает носителей в области между барьерами. В результате только в центральной внутренней области плотность носителей будет достаточно велика, чтобы придать усилению распространяющемуся световому сигналу. Ограничение носителей в малой области имеет дополнительное преимущество, заключающееся в том, что устройство может работать при более низком токе смещения, таким образом уменьшая потери мощности и уменьшая требования к регулированию температуры. В структуре ДН активная область имеет более высокий показатель преломления, чем области оболочки, и поэтому активная область ведет себя как диэлектрический волновод с прямоугольным поперечным сечением. Это помогает ограничить свет, проходящий через устройство. Величина волноводного сигнала количественно определяется коэффициентом оптического ограничения, определяемым как доля энергии конкретной моды волновода, ограниченная активной областью. Волноводные моды являются решениями уравнений Максвелла для электрического и магнитного полей в волноводе, подчиняющегося волноводным граничным условиям.

Если волновод достаточно узкий, он будет поддерживать только одну поперечную моду с двумя возможными поляризациями, поперечной электрической (TE) модой, где электрическое поле поляризовано вдоль плоскости гетероперехода и поперечной магнитной (TM) моды, где магнитное поле поляризовано плоскости гетероперехода. Режим является поперечным, потому что связанные с ним электрическое и магнитное поля нормальны к направлению распространения. Работа в режиме одиночного поперечного режима помогает уменьшить зависимость от модального усиления, поскольку коэффициент оптического ограничения

(коэффициент Γ ($0 \leq \Gamma \leq 1$) показывает, какая доля мощности моды в поперечном сечении волновода испытывает усиление) зависит от режима, а также улучшает эффективность связи между устройствами оптическим волокном. Зависимость Γ от поляризации увеличивается с увеличением толщины активной области. Это объясняется тем, что в направлении вдоль активного волновода разница между показателями преломления активной зоны и оболочки не постоянна. Носители заряда вследствие электрооптического эффекта изменяют показатель преломления вещества, в котором распространяются. Так как концентрация инжекционных носителей внутри активного слоя неравномерна, то и изменение показателя преломления активной области носит неравномерный характер.

1.2 2.2. Улучшение структуры. Поляризационная чувствительность.

Методы снижения поляризационной чувствительности включают использование активных волноводов квадратного сечения и напряженных сверхрешеток. Три наиболее распространенных метода: прямоугольный поперечный волновод, гребневой волновод и сверхрешётки с напряженными слоями.

Нечувствительные к поляризации SOA желательны, потому что состояние поляризации входного сигнала может медленно меняться со временем. На ранних этапах разработки SOA для снижения поляризационной чувствительности использовались гибридные конструкции, использующие две или более SOA. Эти методы теперь заменены одноэлементными решениями, которые в основном сосредоточены на улучшении дизайна активной области. Если активная область SOA имеет размеры, намного большие длины волны де Бройля λ_B , это усилитель с объемной структурой. К этому типу усилителей относятся все усилители, создаваемые до 1980 года. Преимуществом данной структуры заключается в том, что она обладает высоким коэффициентом удержания. Кроме того, они демонстрируют сильную амплитудно-фазовую связь по сравнению с

другими структурами, что важно для преодоления таких искажений, как фазовая кросс-модуляция.

В SOA с квантовыми ямами (QW-SOA) размер активной области сводится к точке, где носители ограничены двумя измерениями, при этом масштаб третьего измерения составляет порядка λ_B . В результате функция концентрации электронов принимает форму ступенчатой. Это приводит к уменьшению зависимости усиления SOA от энергии фотонов и, следовательно, к расширению спектра усиления. Пороговый ток QW-SOA значительно уменьшается по сравнению с SOA с объемной структурой. Коэффициент ограничения активной области меньше, чем у объемной активной области из-за малых размеров квантовой ямы. Чтобы компенсировать это, создается структура из множества квантовых ям, при этом между ними размещают слой материала оболочки.

Одним из наиболее современных является SOA с квантовыми точками. Квантовые точки (QD) - это полупроводниковые кристаллы с размерами порядка нанометров. Носители в квантовых точках ограничены во всех направлениях. Они улучшают полосу усиления и мощности насыщения, демонстрируемые QW-SOA, а также демонстрируют лучшие свойства восстановления усиления, чем другие типы SOA. Динамика восстановления QD-SOA ускоряется за счет захвата носителей из более высокоэнергетического состояния. Благодаря этому время восстановления усилителя становится порядка пикосекунд.

1.3 2.3. Улучшение структуры. Максимальная выходная мощность.

Для определения факторов, влияющих на усиление SOA при высоких входных мощностях, приведём упрощенную формулу расчета выходной мощности насыщения.

$$P_{\text{вых нас}} = \frac{A \cdot I_{s \text{ вых}} |_{-3\text{дБ}}}{\Gamma} (1)$$

где A – площадь поперечного сечения активной зоны, $I_{s \text{ вых}}$ – выходная интенсивность насыщения (берется по уровню -3дБ от передельного значения усиления, подробнее см. рис.3).

(1) показывает, что выходная мощность насыщения SOA может быть улучшена путем увеличения выходной интенсивности насыщения.

$$I_s = \frac{h \cdot \nu}{A_g \cdot \tau} (2)$$

где A_g – дифференциальный коэффициент усиления материала, τ – время жизни носителей, h – постоянная Планка, ν – частота оптического сигнала.

Формула (2) показывает, что этого можно добиться за счет уменьшения A_g и τ . На практике τ обратно пропорционально плотности носителей, поэтому работа при высоких токах смещения приводит к увеличению выходной мощности насыщения. Однако, по мере увеличения плотности носителей, коэффициент усиления также будет увеличиваться. Однопроходное усиление сохранить свой уровень за счет уменьшения коэффициента оптического ограничения или длины усилителя. Это может быть не всегда допустимо, так как пик коэффициента усиления материала сдвигается в сторону более коротких длин волн по мере увеличения плотности носителей.

Выбор материала усиления также может влиять на поведение насыщения усилителя через A_g . В материалах с квантовыми ямами могут быть созданы условия, когда усиление относительно нечувствительно к изменениям в плотности носителей. Это приводит к высокой выходной мощности насыщения. Однако объемные структуры более чувствительны к изменениям плотности носителей. Можно также увеличить выходную мощность насыщения за счет увеличения отношения A/Γ . Концепция заключается в том, чтобы увеличить ширину волновода усилителя по направлению к выходной грани. Это к увеличению размера модового поля на выходе усилителя.(рис.3)

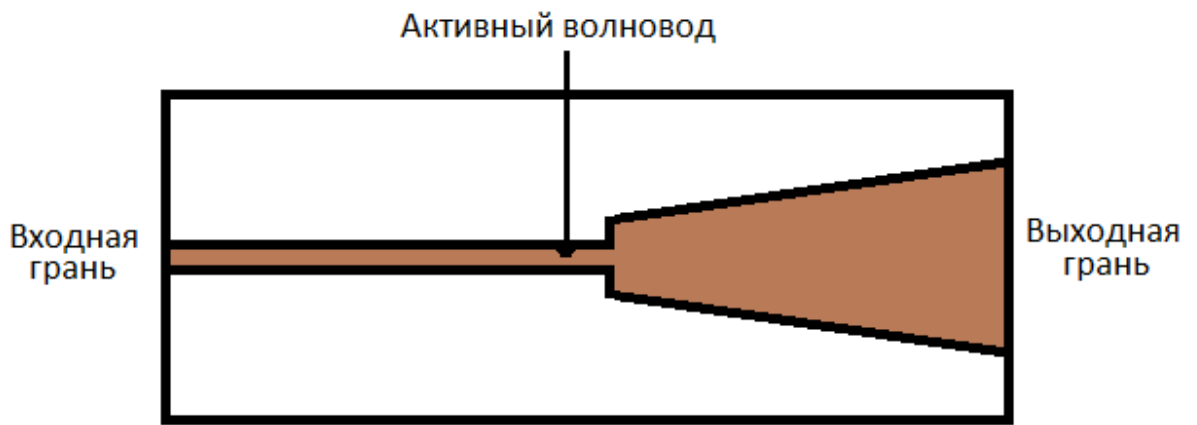


Рис. 3. Увеличение ширины волновода

Улучшение выходной мощности насыщения также может быть достигнуто путем введения непрерывного светового потока длины волны накачки вместе с сигналом. Однако длину волны сигнала накачки нужно выбирать так, чтобы она находилась на нижнем краю полосы усиления усилителя и была меньше длины волны сигнала. Однако этот метод не является экономически эффективным.

1.4 2.4. Материалы для создания активной области

Тип материала, используемый в активной области SOA, определит его спектр усиления и эксплуатационные характеристики. SOA используются в основном в областях длин волн и изготавливаются из тех же материалов, которые используются для изготовления лазерных источников в этих областях. Эти материалы представляют собой полупроводники III-IV группы, которые включают InP, InGaAs, InGaAsP, AlGaAs и InAlGaAs. Материалы, которые наиболее часто используются для создания усилителей, предназначенных для волоконно-оптических систем связи, представлены в табл. 1. В ней представлены усилители для трех основных окон прозрачности кварцевого волокна, и предназначенные для предварительного приема сигнала или для увеличения мощности передатчика.

Одним из существенных плюсов полупроводниковых усилителей является то, что варьируя активное вещество мы можем создать усилитель, работающей на любой длине волны и подходящий не только для ВОЛС, но и для множества иных оптических систем.

Окна прозрачности, нм	820-850		1280-1330		1530-1560	
Химическое соединение	AlGaAs/GaAs		InGaAsP/InP		AlGaAsPSb/GaSb	
Назначение	Предвар. приёма	Мощн. перед.	Предвар. приёма	Мощн. перед.	Предвар. приёма	Мощн. перед.
Величина усиления, дБм	35-40	10-15	33	12-16	20-27	10-12
Полоса частот, нм	200-250	200-250	60-90	60-90	30-50	30-50
Мощность накачки, Вт	0.1-0.15	0.1-0.15	0.45-0.5	0.08-0.15	0.5-0.7	0.8-0.2

1.1 Общие сведения о EDFA

История волоконно-оптических усилителей, легированных редкоземельными элементами, восходит к 1960 годам, когда впервые был продемонстрирован оптический усилитель на стеклянном волокне с покрытием из ниодима с рабочей длиной волны 1.06 мкм. По прошествии ряда лет было выполнено объединение физических принципов, положенных в основу работы одномодового стеклянного волокна и полупроводникового лазера, создавших условия для появления волоконно-оптического усилителя на 1.55 мкм в 1987 году.

Так как оптические потери в кремниевом стеклянном волокне при $\lambda=1.55$ мкм имеют наименьшее значение (-0.2 дБ/км), данная длина волны стала наиболее часто использоваться для дальних телекоммуникаций. Эрбиевые волоконно-оптические усилители (EDFA) по сравнению с полупроводниковыми и рамановскими волоконными усилителями оптических сигналов обладают следующими преимуществами:

1. малые (меньше 1 дБ) вносимые потери при высоком коэффициенте усиления, который не чувствителен к поляризации усиливаемого света;
2. малые перекрестные помехи при усилении нескольких сигналов;
3. вносимые шумы на уровне квантового предела ($\sim 3 \dots 4$ дБ);
4. спектральная зависимость усиления хорошо воспроизводится от образца к образцу и слабо зависит от температуры.

К недостаткам EDFA следует отнести:

1. возможность усиления только вблизи $\lambda_n=1.53$ мкм;
2. необходимость мощного источника оптической накачки и селективного ответвителя;
3. невозможность интегрального исполнения и необходимость применения волокон большой длины.[1]

Большую популярность в оптических сетях получили усилители EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier: оптический усилитель, легированный эрбием). Длины волн, усиливаемых простыми EDFA оптических сигналов, лежат в диапазоне от 1525нм до 1565нм, что идеально подходит для усиления мощности излучения в «С-диапазоне» DWDM систем. Для усиления сигналов из «L-диапазона» используются LWEDFA (Long Wavelength EDFA: длинноволновые EDFA), работающие в диапазоне от 1570нм до 1605нм. Использование усилителей EDFA для увеличения мощности сигнала в системах DWDM позволило конструктивно упростить эти системы и снизить общую стоимость комплекса оборудования DWDM.

EDFA (англ. Erbium Doped Fiber Amplifier) — волоконно-оптический усилитель на оптическом волокне, легированном ионами эрбия. Применяется в волоконно-оптических линиях передачи для восстановления уровня оптического сигнала. Преимуществом эрбиевых усилителей является отсутствие преобразования в электрический сигнал, возможность одновременного усиления сигналов с разными длинами волн (что обуславливает возможность усиления спектрально-мультиплексированного сигнала), практически точное соответствие рабочего диапазона эрбиевых усилителей области минимальных оптических потерь световодов на основе кварцевого стекла, сравнительно низкий уровень шума и простота включения в волоконно-оптическую систему.

По сравнению с другими типами оптических усилителей (рамановскими и полупроводниковыми), EDFA используется наиболее широко.

Основные характеристики усилителей EDFA

- Мощность насыщения (saturation output power)
- Коэффициент усиления G (gain)
- Мощность усиленного спонтанного излучения ASE (amplified spontaneous emission)
- Шум-фактор NF (noise figure)

Ниже определяются ключевые параметры, характеризующие EDFA: мощность насыщения, коэффициент усиления, мощность усиленного спонтанного излучения и шум-фактор.

Мощность насыщения $P_{s.o.}$ (*saturation output power*) - определяет максимальную выходную мощность усилителя. Большее значение мощности позволяет увеличивать расстояние без ретрансляционного участка. Этот параметр варьируется в зависимости от модели оптического усилителя. У мощных EDFA он может превосходить 36 дБм.

Коэффициент усиления G (*gain*) определяется из отношения мощности (полезных) сигналов на входе и выходе усилителя. Величина коэффициента усиления зависит от входной мощности и стремится к своему максимальному пределу по мере уменьшения мощности входного сигнала

Мощность усиленного спонтанного излучения ASE (*amplified spontaneous emission*). В отсутствие входного сигнала EDFA является источником спонтанного излучения фотонов. Спектр излучения зависит от формы энергетической зоны атомов эрбия и от статистического распределения заселенностей уровней зоны. Спонтанно образованные фотоны, распространяясь по волокну в активной зоне усилителя EDFA, тиражируются, в результате чего создаются вторичные фотоны на той же длине волны, с той же фазой, поляризацией и направлением распространения. Результирующий спектр спонтанных фотонов называется усиленным спонтанным излучением. Его мощность нормируется в расчете на 1 Гц и имеет размерность Вт/Гц.

Если на вход усилителя подается сигнал, от лазера, то определенная доля энергетических переходов, ранее работавшая на усиленное спонтанное излучение, начинает происходить под действием сигнала от лазера, усиливая входной сигнал. Таким образом, происходит не только усиление полезного входного сигнала, но и ослабление ASE, (рисунок 1.1).

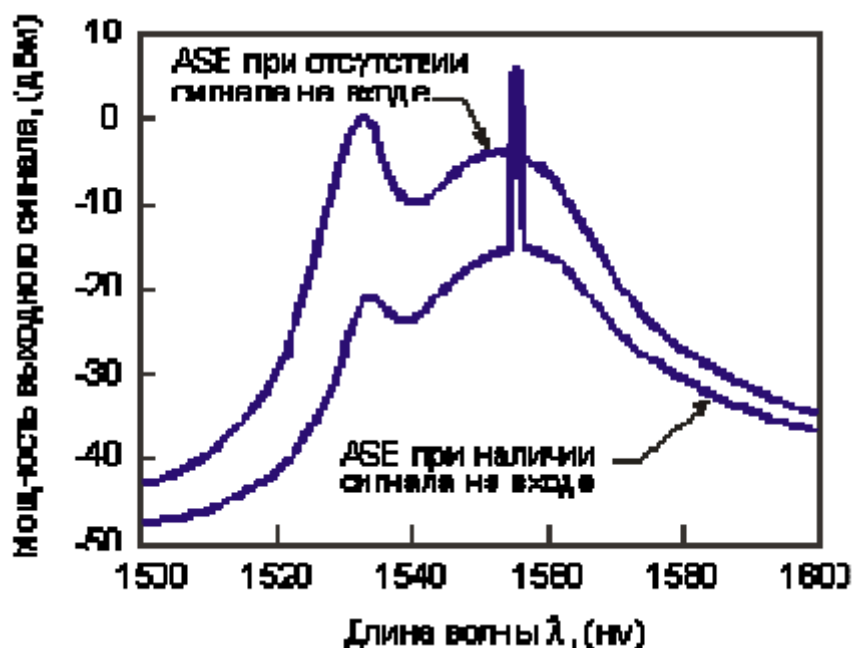


Рисунок 1.1 - Выходной спектр EDFA, снятый спектральным анализатором (ASE - спектральная плотность шума)

Оптические линии с каскадом EDFA проявляют себя лучше, когда мультиплексный сигнал представлен более узкими в спектральном отношении отдельными каналами. Использование узкополосных фильтров непосредственно перед приемным оптоэлектронным модулем, настроенных на рабочую длину волны, также помогает уменьшить уровень шума от усиленного спонтанного излучения.

Большие собственные временные постоянные EDFA - постоянная времени перехода в метастабильное состояние ~ 1 мкс, время жизни метастабильного состояния ~ 10 мкс - устраняют кросс-модуляцию ASE в усилителе и делают более стабильной работу каскада оптических усилителей.

Шум-фактор NF (*noise figure*) определяется как отношение сигнал/шум на входе (SNR_{in}) к сигнал/шум на выходе (SNR_{out}). Часто при описании EDFA значение шум - фактора указывается в дБ. Типичные значения шум - фактора составляют 5,5 дБ.

1.2 Легированное эрбием волокно (EDFA)

Основной принцип EDFA

Относительно мощный пучок света, называемый лучом накачки, смешивается с входным сигналом, используя ответвитель с селекцией по длине волн. Входной сигнал и луч накачки должны иметь существенно отличающиеся длины волн.

Условная схема простого волоконно-оптического усилителя

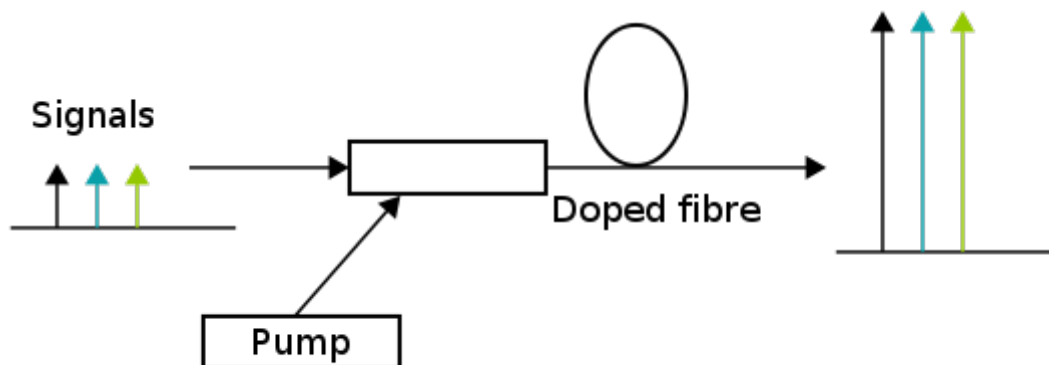


Рисунок 1.2- Условная схема простого волоконно-оптического усилителя

Смешанный свет попадает в область волокна, легированную ионами эрбия. Мощный луч накачки воздействует на ионы эрбия, переводя их внешние(оптические) электроны в возбужденные состояния, то есть происходит процесс увеличения(накопления) энергии в системе, за счет энергии квантов излучения накачки. Таким образом в системе создается инверсная заселенность энергетических уровней эрбия. Когда в систему входит фотон полезного (усиливаемого) сигнала, он, взаимодействуя с возбужденным атомом эрбия, вынуждает его излучить запасенную энергию в виде дополнительного кванта излучения, свойства которого, идентичны свойствам изначального кванта полезного сигнала. То есть из одного начального фотона, после процесса вынужденного излучения получается два, а сам процесс вынужденного излучения, можно сравнить с процессом клонирования, потому что в каждом элементарном акте вынужденного излучения, получаются два фотона с одинаковыми свойствами: энергией, фазой, поляризацией и направлением распространения, то есть фотоны когерентны. Выходит, что количество фотонов полезного(входного) сигнала, проходящих через

среду с инверсной заселенностью, резко увеличивается, пропорционально количеству актов вынужденного излучения, а так как все рожденные фотоны когерентны, то их совокупность представляет собой электромагнитную волну, отличающуюся от электромагнитной волны входного сигнала, только большей интенсивностью, при этом атомы эрбия, отдав запасенную энергию в ходе вынужденного излучения, возвращаются в основное, невозбужденное состояние, и процесс повторяется сначала. Среда с инверсной заселенностью является одной из главных составных частей лазера, другой необходимой частью является система оптической обратной связи, которая, за счет отражения, возвращает часть излучения обратно и тем самым создает непрерывную лазерную генерацию. Процесс непрерывной лазерной генерации превращает усилитель в лазер и полностью нарушает структуру входного сигнала, что препятствует передаче информации и поэтому от обратной оптической связи стараются избавиться: путём введения в систему оптических "изоляторов", в тех местах где обратная связь, обусловленная отражением, может появляться, например на выходе из усилителя, в месте присоединения к усилителю оптического волокна, которое представляет собой границу раздела, на которой, ввиду механической неоднородности, возникает отражение.

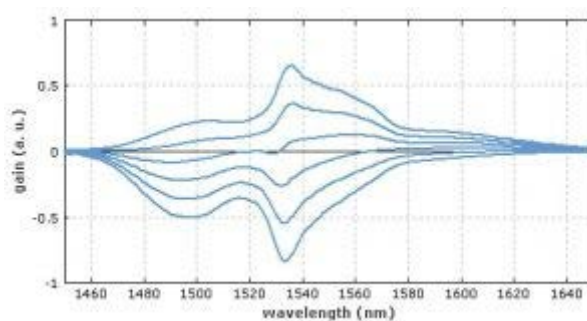


Рисунок 1.3 - Спектр усиления

Форма спектра усиления эрбия зависит от сечений поглощения и излучения, которые зависят от стекла матрицы. Кроме того, спектральная форма усиления, и не только ее величина, существенно зависит от средней степени возбуждения ионов эрбия, поскольку генерация осуществляется по "квази-трехуровневый" переход. На Рис. 2 показан спектр усиления для наиболее распространенного типа стекла, который является некоторой разновидностью кварца с дополнительными примесями, например, чтобы избежать кластеризации ионов эрбия. В других стеклах спектр может существенно отличаться.

Сильный трехуровневый режим (с прозрачностью, достигаемой при уровне возбуждения более 50 %), наблюдается на 1535 нм. В этом спектральном диапазоне ненакачанное волокно показывает существенные потери, но высокое поперечное сечение перехода обеспечивает высокое усиление при сильном возбуждении. На более длинных волнах (например, 1580 нм), для получения усиления требуется более низкий уровень возбуждения, но при этом максимальное усиление меньше. Максимальное усиление, как правило, наблюдается в диапазонах длин волн приблизительно 1530-1560 нм.

Локальный уровень возбуждения зависит от сечений поглощения и испускания, от уровня накачки и интенсивности задающего сигнала. Средний уровень возбуждения по всей длине волокна зависит от накачки и мощности задающего сигнала, но также и от длины волокна и концентрации ионов эрбия. Выбор этих параметров (вместе с выбором стекла) используются, чтобы оптимизировать EDFAs для заданной области длины волны, например для областей L или C.

Равномерность (плоская форма спектра) усиления в широком диапазоне длин волн, как требуется, например, для спектрального уплотнения передаваемой информации, может быть получена при использовании оптимизированных стеклянных матриц (например, теллуридных или фторидных волокон или некоторой комбинации нескольких секций усилителя с различными стеклами) или

комбинацией с соответствующими оптическими фильтрами, такими как длиннопериодными брэгговскими решетками.

Описание продукции YOFC

YOFC предлагает полную серию легированных эрбием волокон, которые могут удовлетворить самые строгие проектные требования усилителя для C-диапазона и L-диапазона. Используя насосную технологию 1480 нм или 980 нм, YOFC легированное эрбием волокно может реализовать 35 нм пропускную способность усиления и поддерживать постоянство усиления в диапазоне пропускной способности, достигает идеальной эффективности преобразования мощности. YOFC легированное эрбием волокно специально разработано для оптоволоконных усилителей с требованиями высокой производительности, низкого уровня шума, например: предусилитель, усилитель мощности и линейный усилитель в системе связи WDM. YOFC легированное эрбием волокно было оптимизировано за счет совместного легирования эрбием и алюминием для обеспечения высокого качества продукции.

Применение продукции

- DWDM усилители
- CATV усилители
- 980 нм или 1480 нм насосы
- Наземные и подводные телекоммуникации
- В оборонной, военной и аэрокосмической отраслях

Особенности продукции

- Отличная волоконная однородность
- Высокая эффективность преобразования мощности и низкий уровень шума
- Ведущие геометрические свойства в отрасли
- Низкий PMD
- Двухслойное покрытие DLPC9 для обеспечения превосходных механических свойств волокна

- Хорошее сопротивление к водородным потерям
- Низкие потери при сращивании

1 1.3 Разновидности усилителей EDFA

В зависимости от применения различают:

- усилители мощности (бустеры) (1)
- предварительные усилители (2)
- линейные усилители (3)

Усилители мощности (бустеры) устанавливаются непосредственно после лазерных передатчиков и предназначены для дополнительного усиления сигнала до уровня, который не может быть достигнут на основе лазерного диода. Бустеры могут также устанавливаться перед оптическим разветвителем (например, при передаче нисходящего трафика в гибридных волоконно-коаксиальных архитектурах кабельного телевидения).

Предварительные усилители (предусилители) используются непосредственно перед приёмником сигнала и способствуют увеличению отношения сигнал/шум на выходе электронного каскада усиления в оптоэлектронном приёмнике. Оптические предусилители часто используются в качестве замены сложных и дорогих когерентных оптических приёмников.

Линейные усилители устанавливаются в промежуточных точках протяженных линий связи между регенераторами или на выходе оптических разветвителей с целью компенсации ослабления сигнала, которое происходит из-за затухания в оптическом волокне или из-за разветвления в оптических разветвителях, ответвителях, мультиплексорах xWDM. Линейные усилители заменяют оптоэлектронные повторители и регенераторы в тех случаях, когда нет необходимости в точном восстановлении сигнала.

Таблица 1.1 - Изменение характеристик усилителей EDFA в зависимости от типа

Параметр	Предусилитель	Линейный усилитель	Усилитель мощности
Коэффициент усиления (G)	высокий	средний	низкий
Коэффициент шума (NF)	низкий	средний	низкий
Мощность насыщения ($P_{out sat}$)	низкая	средняя	высокая
Нелинейность	низкая	низкая	низкая
Зона усиления	узкая	широкая	широкая

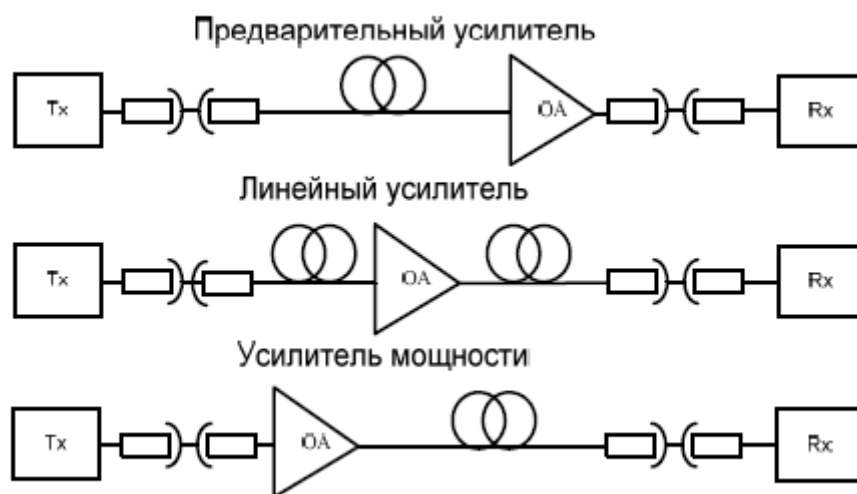


Рисунок 1.4 - Применение разных типов оптических усилителей

1.4 Сфера использования EDFA

Принцип работы эрбиевого усилителя основывается на способности волокна, легированного эрбием, усиливать сигналы за счет внешнего излучения, формируемого «лазерами накачки» (именно развитие схем «накачки» позволило создать усилители LWEDFA). В усилителях EDFA могут использоваться волокна на кварцевой или на фторидной основе. Использование волокон на фторидной основе позволяет обеспечить более насыщенное легирование эрбием и добиться более равномерного усиления сигналов на всех длинах волн. Усилители EDFA на базе оптических волокон с кварцевой основой обладают меньшим уровнем шума.

Излучение на длинах волн 1480 и 980 нм отлично поглощается активной средой усилителя - одномодового волокна, сердцевина которого легируется примесями редкоземельных элементов с целью создания трехуровневой атомной системы. Лазер накачки возбуждает электронную подсистему примесных атомов. В результате чего электроны с основного состояния (уровень 1) переходят в возбужденное состояние (уровень 2). Далее происходит релаксация электронов с уровня 2 на промежуточный уровень 3. Когда заселенность промежуточного уровня 3 становится достаточно высокой, так что образуется инверсная заселенность уровней 1 и 3, система начинает индуцированно усиливать входной оптический сигнал в определенном диапазоне длин волн.

Слабый входной оптический сигнал проходит через оптический изолятор, пропускающий свет в прямом направлении и предотвращающий распространение обратного рассеянного излучения. Сигнал проходит через блок фильтров, которые блокируют световой поток на длине волны накачки и пропускают остальное излучение. Затем сигнал попадает в катушку с волокном, легированным примесью из редкоземельных элементов, в случае усилителей EDFA - это эрбий. Длина такого

участка волокна составляет несколько метров. Этот участок волокна подвергается сильному непрерывному излучению одного или нескольких полупроводниковых лазеров накачки. Излучение лазера накачки возбуждает атомы примеси, которые в возбужденном состоянии имеют большое время релаксации, для спонтанного перехода в основное состояние. При наличии слабого сигнала происходит индуцированный переход атомов примесей из возбужденного состояния в основное с излучением света на той же длине волны и с той же самой фазой, что и повлекший это сигнал. Далее разветвитель перенаправляет усиленный полезный сигнал в выходное волокно. Оптический изолятор на выходе усилителя предотвращает попадание обратного рассеянного сигнала из выходного сегмента в активную область оптического усилителя.

Усилители EDFA не имеют зависимости от используемых для передачи данных протоколов, скорости передачи данных. Эта особенность EDFA является еще одним аргументом в пользу их использования в DWDM системах, в которых зачастую совмещается множество разнородных каналов. Так же EDFA не зависят от типа сигнала, будь он дискретный цифровой или аналоговый. Поэтому усилители EDFA нашли применение и в сетях кабельного телевидения, в которых, в силу специфики, повышенные требования к мощности сигнала и его качеству (например, отношению сигнал/шум).

Технология FTTH подразумевает отсутствие необходимости использования дорогостоящего оборудования на стороне клиента и для снижения стоимости абонентских устройств в них используются приёмники с низкой чувствительностью. Поэтому сигнал у клиента должен быть достаточно сильным. А пассивные оптические сети (PON) с большим числом абонентов, со сложной структурой делителей и огромными потерями, при этом экономически эффективные, сложно представить без оптических усилителей.

2 Литература:

1. Шарангович С.Н. Мультиплексорное и усилительное оборудование многоволновых оптических систем связи. Компьютерный лабораторный практикум: учеб.метод. пособие. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2010. – 158 с.
2. Группа компаний ПРОИНТЕХ <http://www.prointech.ru/kb/usiliteli-i-mediakonvertery/usilenie-opticheskikh-signalov.html>
3. Интернет-ресурс: Википедия <https://ru.wikipedia.org/wiki/EDFA>
4. OptiSystem Tutorials - Volume 1 Optical Communication System Design Software

Раздел 6. Активные компоненты ВОСП- оптические модуляторы. Теоретические основы методов модуляции параметров оптического излучения.

Использование SOA в качестве функционального элемента.

Конвертер длин волн.

Преобразователи оптической длины волны играют важную роль в широкополосных оптических сетях связи. Их самая важная функция состоит в том, чтобы избежать перекрестных помех в оптических кросс-соединениях в сетях WDM. Преобразователи длины волны увеличивают гибкость и пропускную способность сети, использующей фиксированный набор длин волн. В сетях с коммутацией пакетов настраиваемые преобразователи длины волны могут использоваться для разрешения конфликтов пакетов и снижения требования к буферизации. Эффект кросс-модуляции усиления (XGM) в SOA может использоваться для создания преобразователя длины волны. Эффект фазовой кросс-модуляции (XPM) так же может также использоваться для преобразования длины волны, если SOA размещены в конфигурации с интерферометрами Маха-Зендера. Такие преобразователи длины волны имеют большую энергетическую эффективность по сравнению с этими же устройствами на основе XGM. Преобразователь на основе кросс-модуляции усиления мы подробнее рассмотрим на стадии моделирования.

В преобразователе длин волн XPM вход лазера вспомогательного сигнала (под вспомогательным сигналом здесь и далее подразумевается сигнал CW лазера, с длиной волны, на которую мы желаем перестроить сигнал) на λ_2 асимметрично распределяется по каждому плечу интерферометра Маха-Зендера с помощью ответвителя. Модулированный по интенсивности сигнал λ_1 насыщает каждый SOA, вызывая различные фазовые сдвиги во входном CW сигнале. Выходной элемент связи рекомбинирует разделенные CW-сигналы, где они могут вмешиваться конструктивно или деструктивно. Фактическое состояние помех зависит от

относительной разности фаз между плечами интерферометра, которая зависит как от токов смещения SOA, так и от входных оптических мощностей. [10,11]

Эффект четырёхволнового смешения в SOA также может использоваться для построения преобразователей длины волны. Основная схема и принцип его работы так же будут рассмотрены на этапе моделирования. Эффективность преобразования этого прибора относительно. Для более эффективного ЧВС преобразования в SOA поляризационные состояния информационного и вспомогательного сигнала должны быть одинаковыми. В случае, когда половина мощности вспомогательного сигнала подается на каждый SOA вместе с составляющей сигнала той же поляризации, они смешиваются для получения сопряженного сигнала. Ортогонально поляризованные сопряженные сигналы после SOA разделяются на выходе в поляризационном светоделителе. Если SOA имеют одинаковые коэффициенты усиления и преобразования, то схема будет независимой от поляризации. [10]

Основное преимущество преобразования частоты на основе ЧВС является независимость от формата модуляции и скорости передачи в битах. Дополнительным преимуществом этого метода является инверсия спектра сигнала и полученный в результате чирпинг. Это свойство может быть использовано для достижения компенсации дисперсии. Основным недостатком преобразователя ЧВС является его низкая эффективность преобразования. [5]

На рисунке 1 представлена схема модуляции, позволяющая наблюдать перестройку частоты сигнала с помощью ЧВС.

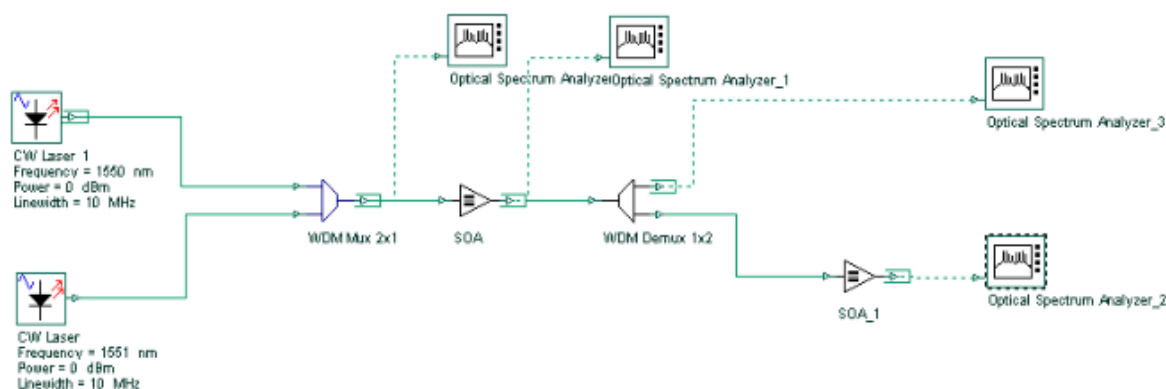


Рис. 1. Схема моделирования четырехволнового смешения

Схема включает в себя два источника излучения с длинами волн 1550 нм (сигнал накачки) и 1551 нм (основной сигнал), с уровнем мощности излучения 0 дБ. Сигналы этих источников мультиплексируются, и усиливаются с помощью полупроводникового усилителя. В процессе прохождения через усилитель, фотоны с длинами волн 1550 нм и 1551 нм взаимодействуют друг с другом, приводя к появлению фотонов с длинами волн 1549 нм и 1552 нм. После этого новый сигнал на частоте 1552 нм демультиплексируется, и вновь подвергается усилению. На рисунке 2 представлен процесс изменения спектра сигнала (спектр мультиплексированного сигнала до прохождения усилителя, после прохождения усилителя и после демультиплексирования и последующего усиления). В результате мы видим, что сигнал с длиной волны 1551 нм был преобразован в сигнал с длиной волны 1552 нм. Однако данный способ позволяет лишь незначительно перестраивать частоты, так как с увеличением межканального интервала значительно уменьшается эффективность ЧВС.

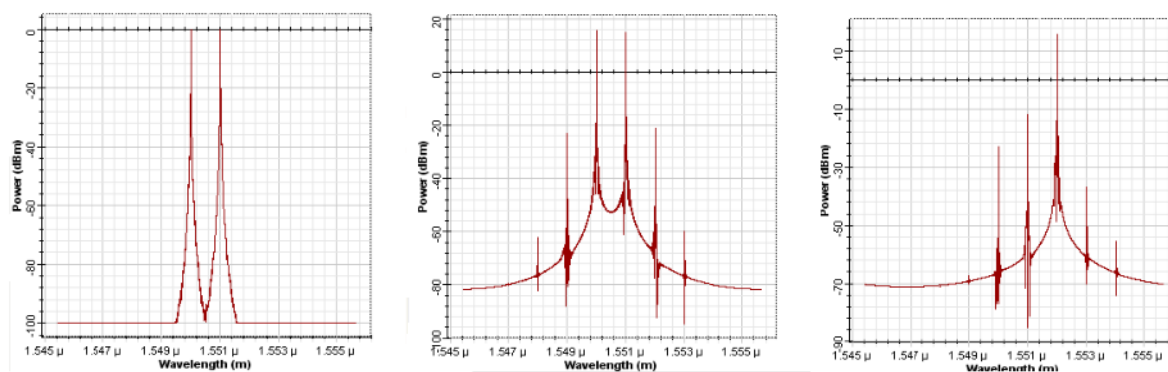


Рис. 2. Изменение спектра сигнала

В основе принципа использования кроссмодуляции усиления для перестройки частоты сигнала лежит уменьшение коэффициента усиления усилителя. Этот эффект наблюдается при прохождении через усилитель двух и более волн. Каждая

из волн приводит к уменьшению инверсии населенности в активной среде там большей, чем выше их оптическая мощность. [9] Благодаря этому эффекту непрерывный сигнал на выбранной длине волны можно подвергнуть модуляции по интенсивности, в результате чего он будет нести в себе ту же информацию, что и модулирующий сигнал. Непрерывный сигнал может быть запущен в линию связи как сонаправлено с модулирующим сигналом, так и в противоположном направлении. [6, 7]

Схема на рисунке 3 рассматривает случай сонаправленного введения непрерывного сигнала.

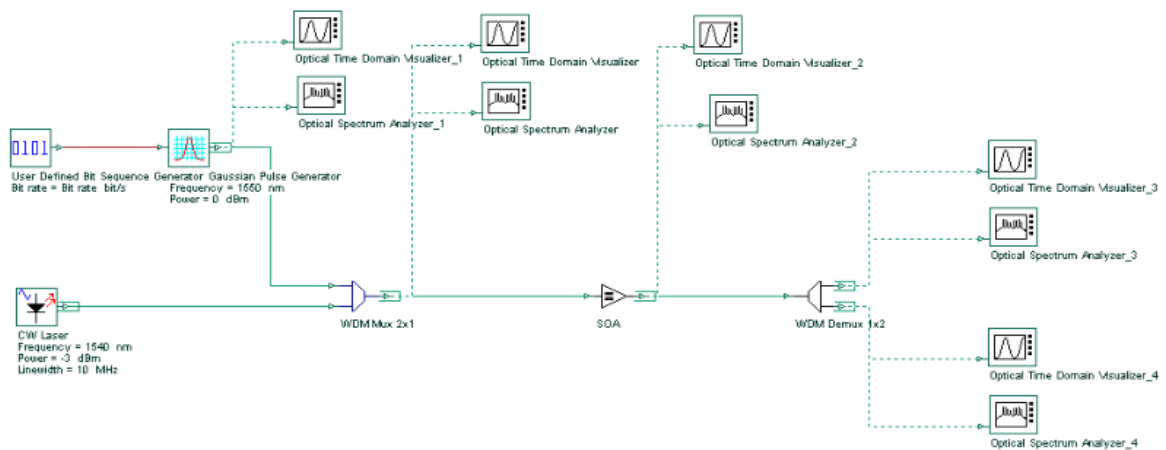


Рис. 3. Схема исследования конвертора на кроссмодуляции усиления

На вход мультиплексора, помимо непрерывного оптического сигнала с длиной волны 1540 нм, поступает последовательность гауссовских импульсов с длиной волны 1550 нм, рисунок 4, Vizualizer 1.

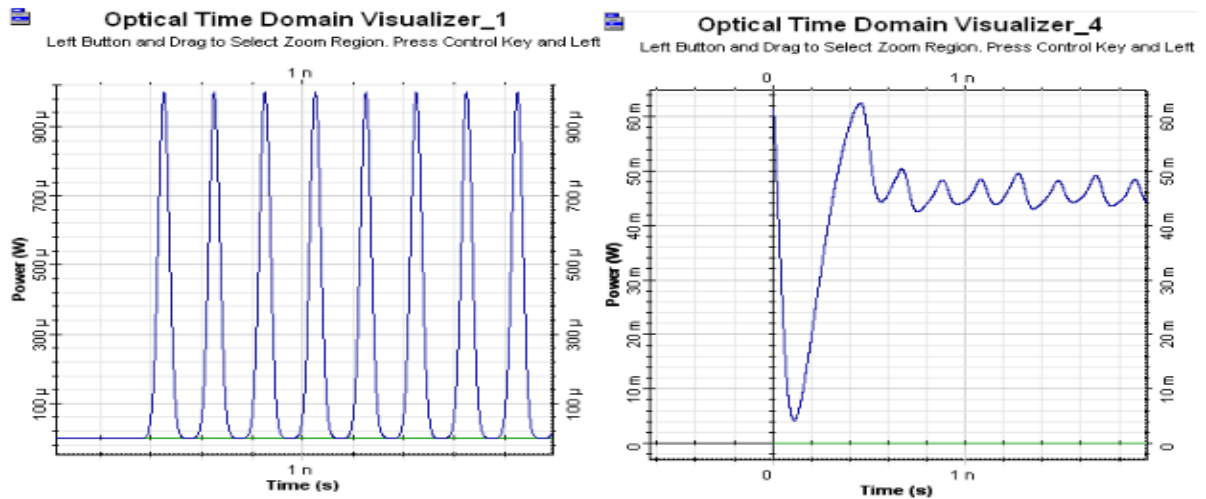


Рис. 4. Гауссовские импульсы и промодулированный ими сигнал

Его форма после демультиплексирования показана на рисунке 4, Vizualizer 4. Превращение спектра в процессе преобразования сигнала продемонстрировано на рисунке 5 (мультиплексированный сигнал до прохождения усилителя, после прохождения усилителя и после демультиплексирования).

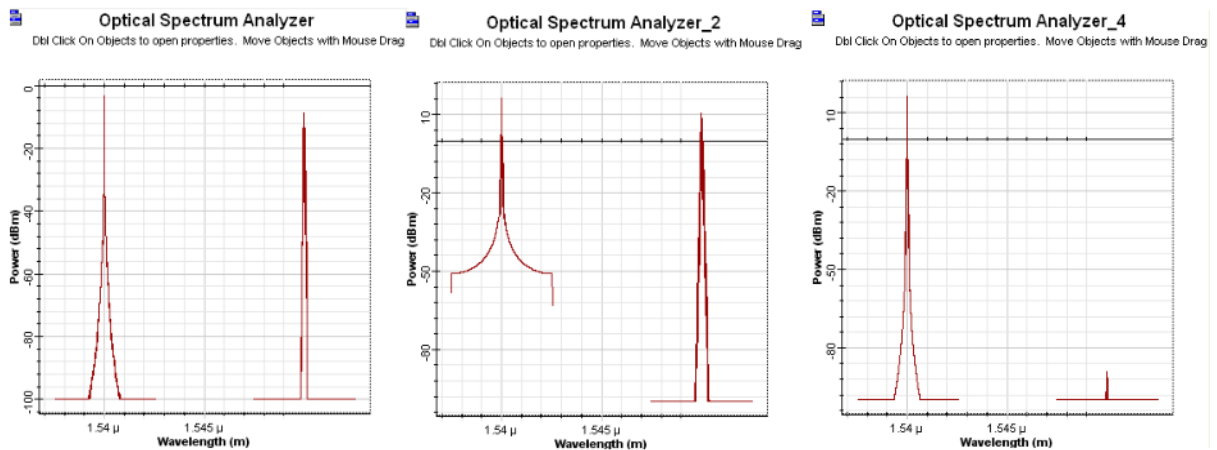


Рис.5. Изменение спектра сигнала при прохождении тракта

Использование нелинейных явлений в полупроводниковых оптических усилителях позволяет реализовать полностью оптические конвертеры длин волн.

Подобные устройства очень важны для увеличения пропускной способности и гибкости оптических сетей с временным и спектральным уплотнением каналов.

Логический элемент

Высокоскоростные оптические сети связи WDM и TDM требуют высокоскоростных оптических переключателей, которые могут быть либо оптически, либо электрически управляемыми. Такие оптические коммутаторы могут быть построены с использованием SOA. Самый простой способ управления SOA-затвором - включить или отключить питание устройства. Большим преимуществом SOA-переключателей является то, что они могут быть интегрированы для формирования матриц. В коммутационном модуле 2 x 2, показанном на рис. 5, входящий сигнал может быть маршрутизирован в любой выходной порт путем включения соответствующей SOA. [3]

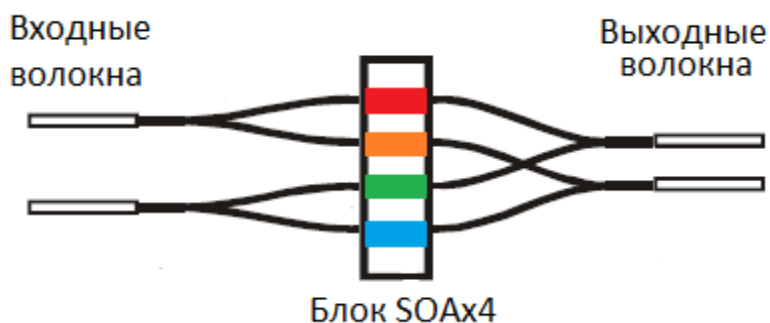


Рис. 1. Логический оптический элемент на основе SOA

Время переключения электрически коммутируемого SOA составляет порядка 100 пс. Значительно меньшее время переключения может быть достигнуто при использовании SOA, размещенного в нелинейных кольцевых зеркалах. Переключение достигается путем размещения смещённого от центра оптического зеркала SOA и ввода данных в петлю через соединитель 50:50. Два потока импульсов данных поступают в SOA асинхронно. Импульс переключения синхронизируется так, чтобы прибыть после одного импульса данных, но до прибытия второго. Мощность импульсов переключения настраивается так, чтобы придать фазовое смещение равное π радиан второму сигналу. Поток данных

погашается, когда два встречных компонента возвращаются в соединитель. В итоге, когда импульс переключения подается, на выходе мы получаем измененный по фазе входной информационный сигнал, когда же импульс переключения не подается, противоположенные сигналы в петле компенсируют друг друга, и петля в преобразовании не участвует. Это устройство также известно как TOAD, поскольку оно также может использоваться для демультиплексирования высокоскоростных импульсных потоков TDM.

Мультиплексеры и демультиплексоры

Демультиплексоры с временным разделением каналов и мультиплексоры ввода / вывода являются ключевыми компонентами, необходимыми для создания сетевых узлов с мультиплексированием с временным разделением.

Коммутаторы с интерферометром Маха-Зендера, содержащие SOA, могут использоваться в качестве ADM. Существует множество возможных конфигураций для таких устройств. Возможность добавления и удаления каналов в сетях WDM полезна для маршрутизации длин волн. Функция мультиплексоров ввода / вывода состоит в том, чтобы отделить канал конкретной длины волны без помех от соседних каналов. Это может быть достигнуто использованием интегральной схемы, включающей в себя SOA с настраиваемым фильтром. Фильтр можно настроить, изменив его ток. Выбранный канал длин волн выделяется фильтром, проходит предварительное усиление и извлекается через нужный порт при помощи циркулятора. Остальные каналы проходят через секцию фильтра. Теперь к ним можно добавить новый канал.

Генератор оптических импульсов

Для высокоскоростных линий связи ODM WDM требуются генераторы большой частоты. При высоких частотах (> 10 ГГц) сложно и дорого создавать такие импульсы с помощью электронных устройств. Оптический метод состоит в

использовании лазера с волоконно-кольцевым синхронизатором мод, включающего SOA.

Лазер Фабри-Перо переключается по усилению с помощью синусоидальной модуляции на частоте 10 ГГц. После передачи через 150 метров волокна с высокой дисперсией каждый спектральный элемент в импульсах с переключением усиления задерживается на 25 пс относительно другого, ближайшего к нему элемента. Поэтому каждый диспергированный импульс создает последовательность импульсов с разными длинами волн, разделенных 25 пс, что дает эффективную частоту повторения 40 ГГц. Импульсы могут быть преобразованы в импульсы одной и той же настраиваемой длины волны с использованием волоконного кольцевого лазера с SOA в качестве активного элемента. Поток оптических импульсов 40 ГГц вводится в кольцо циркулятором, вызывая усиление оптической модуляции SOA. Этот режим блокирует лазер. Выбирая подходящую частоту модуляции лазера ν , можно заблокировать режим лазера на частоте $4 \cdot \nu$ ГГц. Выходная длина волны волоконного лазера выбирается с использованием волоконного фильтра Фабри-Перо. Выходная мощность связана с оптоволоконным кольцом с помощью оптоволоконного соединителя. [3,12]

Восстановление оптической синхронизации

В системах OTDM восстановление синхронизации требуется в оптических приемниках и в 3R регенераторах. При высоких скоростях восстановление частоты лучше всего достигается с помощью оптических решений без участия преобразований. Для этого можно использовать цикл с фазовой автоподстройкой частоты с использованием интерферометрического переключателя на основе SOA. В этой конфигурации сигнал данных OTDM связан с зеркальным SOA-контуром, который управляется посредством последовательности импульсов оптического управления, генерируемых лазером с настраиваемым режимом синхронизации, частота повторения которого определяется управляемым напряжением генератором.

Выходной сигнал от кольцевого зеркала детектируется медленным фотодиодом. Часть входного сигнала переключается из кольцевого зеркала с частотой повторения управляющих импульсов. Когда частота генератора равна базовой частоте входного сигнала, переключаемые составляющие входного сигнала имеют постоянную фазу в течение временного интервала. В этом случае выходной сигнал от фотодиода становится сигналом постоянного тока, амплитуда которого пропорциональна разности фаз между импульсами входного сигнала и последовательностью импульсов управления, то есть оптический переключатель действует как фазовый компаратор. Однако этот сигнал ошибки имеет только одну полярность, поэтому нет различий между отрицательными и положительными разностями фаз. Эта проблема может быть преодолена путем детектирования сигнала с использованием второго медленного фотодиода. Выходной сигнал от этого фотодиода вычитается из сигнала ошибки. Результирующий сигнал посылается на генератор через фильтр нижних частот. Это закрывает петлю и фиксирует частоту генератора до базовой частоты входного сигнала данных. [7,12]

Литература

1. Дмитриев А.Л. Оптические системы передачи информации // Учебное пособие. – СПб: СПбГУИТМО, 2007. – 72 с
2. H.Ghafouri-Shiraz, The Principles Of Semiconductor Laser Diodes And Amplifier // Imperial College Press, 2004.
3. Kevin Carney Investigation of In-Situ Parameter Control in Novel Semiconductor Optical Amplifiers // A thesis for the Degree of Doctor of Philosophy. School of Electronic Engineering Faculty of Engineering and Computing Dublin City University, 2012, - pp. 212
4. В.Г. Фокин. Когерентные оптические сети // Учебное пособие. - Новосибирск: СибГУТИ, 2015. – 244 с
5. P. Bettotti, Nanodevices for Photonics and Electronics // Taylor & Francis Group, LLC 2016
6. Дураев В., Казаков А., Медведев С. Полупроводниковый оптический усилитель // Фотоника, 2010. №1. С.16–18.
7. Michael J. Connelly Semiconductor Optical Amplifiers and their Applications // Kluwer Academic Publishers, 2004.
8. H. Soto, D. Erasme, and G. Guekos. 5-Gb/s XOR Optical Gate Based on Cross-Polarization Modulation in Semiconductor Optical Amplifiers / IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 13, No. 4, April 2001
9. Г.Агравал, Нелинейная волоконная оптика //Москва “Мир” 1996
10. Vikas Thakur, Ms. Geetanjali Pandove, Tarun Gupta Optical wavelength converters based on cross gain modulation and cross phase modulation in SOA // International Journal of Electronics and Computer Science Engineering, Volume 1, Number 3.
11. T.T. Ng, A. Pérez, S. Sales, D.J. Richardson, P. Petropoulos Characterization of XGM and XPM in a SOA-MZI using a Linear Frequency Resolved Gating Technique // Lasers and Electro-Optics Society, 2007. LEOS 2007. The 20th Annual Meeting of the IEEE.
12. M. Jamal Deen, P. K. Basu, Silicon Photonics Fundamentals and Devices // John Wiley & Sons Ltd 2012.

Тема 7 Активные компоненты ВОСП- оптические модуляторы. Практические конструкции оптических модуляторов для высокоскоростных ВОСП

1.1 Модуляторы

Оптические модуляторы применяются при внешней модуляции уже сформированного светового луча. Различают следующие типы модуляторов:

- акустооптические, использующие законы акустооптики;
- электрооптические, использующие законы электрооптики;
- электрооптические, использующие полупроводниковые усилители.

Акустооптические модуляторы

Принцип действия акустооптического модулятора (АОМ) основан на зависимости показателя преломления оптически прозрачных материалов (например, ниобата лития LiNbO_3) от давления. Это давление может быть создано акустическими (ультразвуковыми – УЗ) волнами, генерируемыми пьезоэлектрическим преобразователем – пьезокристаллом (ПК). ПК наклеивают на акустооптический материал для создания акустооптической ячейки (АОЯ), являющейся основным элементом модулятора (рисунок 6.4).



Рисунок 4.1.1 – Схема прохождения пучка света в АОМ

Акустическая волна создаёт в оптической среде структуру с периодически изменяющимся показателем преломления, играющую роль дифракционной решётки. Линии равного показателя преломления (на рисунке 6.4 они показаны сплошными горизонтальными линиями) отстоят на длину акустической волны $\lambda_{ав}$. Чтобы не было отражённой акустической волны, применяют поглотитель.

При входе падающего пучка в АОЯ в результате его взаимодействия с фронтом звуковой волны от ПК возникает дифракция света на ультразвуке, приводящая к расщеплению падающего пучка на проходящий и дифрагированный. Характер взаимодействия зависит от соотношения диаметра пучка δ , длины световой волны λ и угла падения θ . В оптических модуляторах используются условия возникновения дифракции Брэгга, т.е. когда выполняется соотношение

$$\lambda_{ав} \sin \theta = m \lambda,$$

где $\lambda_{ав}$ играет роль постоянной решётки d ;

m – порядок дифракции ($m=0,1,2,\dots$);

λ – длина световой волны.

Для целей модуляции обычно используется дифрагированный свет, так как полная (100%) модуляция проходящего света требует очень большой акустической мощности. Модуляция создаётся амплитудно-модулированной звуковой волной, взаимодействие с которой и модулирует интенсивность дифрагированной волны, играющей роль выходной волны для модулятора. Быстродействие модулятора определяется временем прохождения звукового сигнала через поперечное сечение светового пучка и имеет порядок 10^{-7} с.

АОМ является достаточно простым и надёжным устройством, хотя и имеет определённые недостатки, основные из них следующие:

- нелинейность характеристики преобразования;
- уменьшение реализуемой глубины модуляции с ростом частоты модуляции, что ограничивает их использование в высокоскоростных схемах;
- смещение частоты модулированного лазерного излучения на величину акустической модулирующей частоты;
- невысокая эффективность дифракции, определяемая как отношение интенсивностей дифрагированного и падающего пучков (её увеличение достигается за счёт увеличения мощности акустического сигнала).

АОЯ может быть использована в различных типах акустооптических приборов: дефлекторах, сканнерах, модуляторах, фильтрах и процессорах – в зависимости от того, каким параметром оптического луча осуществляется управление.

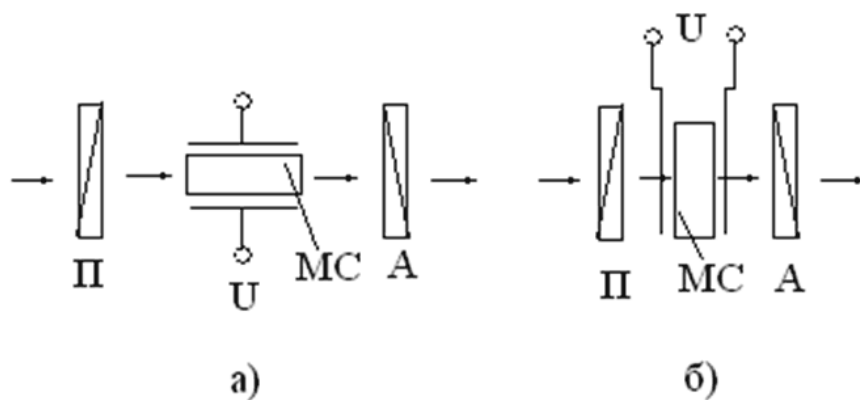
Электрооптические модуляторы

Оптические характеристики любой среды, например, такие, как показатель преломления, влияют на характер и поляризацию света, зависят от распределения связанных зарядов (электронов и ионов) в среде. Под действием приложенного электрического поля оно может меняться, что приводит к изменению так

называемого эллипсоида показателя преломления и состояния поляризации. В средах, не имеющих центральной симметрии, указанное действие проявляется в виде линейного электрооптического эффекта Поккельса. В средах с центральной симметрией, напротив, наблюдается квадратичный электрооптический эффект Керра. Эти два наиболее значительных электрооптических эффекта могут быть использованы при построении электрооптических модуляторов.

а) Электрооптические модуляторы на основе эффекта Керра.

Для модуляции света широко используют хорошо изученный электрооптический эффект Керра (1875 г.), состоящий в возникновении оптической анизотропии под действие внешнего электрического поля в изотропном веществе. Для наблюдения эффекта (рисунок 6.5,а) прозрачное диэлектрическое вещество помещают между обкладками плоского конденсатора, к которому прикладывают напряжение U , создающее в модулирующей среде МС достаточно сильное электрическое поле E . Ячейку Керра помещают между скрещенными поляризатором Π и анализатором A . При $U = 0$ интенсивность света на выходе устройства также равна нулю, однако при наложении напряжения модулирующая среда становится в оптическом отношении подобной двулучепреломляющему кристаллу с оптической осью, параллельной направлению электрического поля.



Π – поляризатор, A – анализатор, МС – модулирующая среда

Рисунок 4.1.2 – Работа оптических модуляторов на основе эффекта Керра (а) и продольного эффекта Поккельса (б)

Поэтому, пройдя через ячейку Керра, световая волна распадается на две линейно поляризованные составляющие. Одна из них поляризована так, что её электрический вектор ориентирован перпендикулярно внешнему полю (обыкновенная волна), а другая – параллельно (необыкновенная волна). Для обеспечения максимальной глубины модуляции нужно, чтобы главная плоскость поляризатора П составляла с вектором угол 45° . Обыкновенная и необыкновенная волны имеют различные показатели преломления (n_o и n_e) и поэтому распространяются в среде с различными скоростями. Пройдя ячейку Керра, свет оказывается эллиптически поляризованным и в большей или меньшей мере проходит через анализатор.

Теория и опыт показывают, что различие n_o и n_e пропорционально E^2

$$\Delta n_o = n_e - n_o = k_k E^2,$$

где k_k – коэффициент, не зависящий от E .

Разность фаз между обыкновенными и необыкновенными лучами после прохождения пути l в модулирующей среде составляет:

$$\varphi = 2\pi \frac{n_e - n_o}{\lambda} \cdot l = 2\pi \frac{k_k E^2 l}{\lambda} = 2\pi V l E^2,$$

где $V = k_k/\lambda$ – так называемая постоянная Керра.

Квадратичный эффект Керра объясняется оптической анизотропией молекул модулирующей среды, т.е. отличием их способности к поляризации электрическим полем световой волны в различных направлениях. В отсутствие внешнего электрического поля анизотропные молекулы ориентированы хаотически и вещество в целом изотропно. Если молекулы обладают собственным электрическим дипольным моментом, то достаточно сильное электрическое поле вызывает их преимущественную ориентацию и вещество становится макроскопически анизотропным.

В веществах, состоящих из молекул, не обладающих собственным дипольным моментом, внешнее электрическое поле может его индуцировать, причём из-за анизотропии молекул дипольный момент не обязательно совпадает с направлением электрического поля. Возникает пара сил, заставляющая молекулы ориентироваться определенным образом относительно электрического поля. В соответствии со сказанным различают ориентационный и поляризационный эффекты Керра. Время ориентационной релаксации дипольных молекул по порядку величины составляет 10 пс. Это означает, что при частотах модуляции, больших 100 МГц–1 ГГц, ориентационный эффект Керра практически не проявляется и остается эффективным только поляризационный эффект, быстрое действие которого ограничено временем 0,1–1 нс.

б) Электрооптические модуляторы на основе эффекта Поккельса.

Электрооптические явления наблюдаются не только в изотропных веществах, но и в кристаллах, обладающих естественной оптической анизотропией. Чтобы двойное лучепреломление не проявлялось при $E = 0$, одноосный кристалл вырезают так, чтобы образовались грани, перпендикулярные его оптической оси, а свет направляют вдоль нее. Управляющее электрическое поле создают в направлении, перпендикулярном направлению распространения света, т. е. так же, как и в ячейке Керра (рисунок 6.5,а). Возможно также модулирующее устройство, в котором электрическое поле направлено параллельно распространению света. Для этого на соответствующие грани анизотропного кристалла наносят прозрачные электроды (рисунок 6.5,б). В соответствии с рисунком 6.5 используют термины – продольный и поперечный электрооптические эффекты. Изменение двойного лучепреломления анизотропного кристалла, помещённого в электрическое поле, называют эффектом Поккельса – по имени обнаружившего его физика (1894 г.). В отличие от эффекта Керра разность n_o и n_e в эффекте Поккельса пропорциональна первой степени E :

$$\Delta n_o = n_e - n_o = k_{\text{п}} E ,$$

где $k_{\text{п}}$ – электрооптический коэффициент, отличающийся от $k_{\text{к}}$ в формуле (6.11) и по значению, и по размерности.

Как и для эффекта Керра эффекту Поккельса свойственна малая инерционность, позволяющая моделировать свет до частот порядка 10МГц. Следует, однако, иметь ввиду, что верхняя граница частоты модуляции чаще всего определяется не процессами в веществе, а ёмкостью устройства и оказывается на несколько порядков ниже.

Таким образом, ячейка Поккельса позволяет осуществить модуляцию световой волны по интенсивности за счёт эффекта Поккельса при амплитудной модуляции подаваемого на неё напряжения. Глубина модуляции – до 99,9%. Реализация такого типа модуляторов характерна для использования объёмной оптики, тогда как для интегральной оптики более характерным является применение управляемых направленных ответвителей и модуляторов, использующих схему интерферометра Маха-Цендера.

в) Электрооптические модуляторы на основе интерферометра Маха-Цендера.

Такой модулятор в соответствии со схемой интерферометра Маха-Цендера (ИМЦ) состоит из двух идентичных плеч интерферометра (рисунок 6.6).

На схеме показаны два типа электродов: электроды для создания модулирующего электрического поля и электроды для создания постоянного электрического поля, позволяющего задавать рабочую точку на передаточной характеристике такого модулятора.

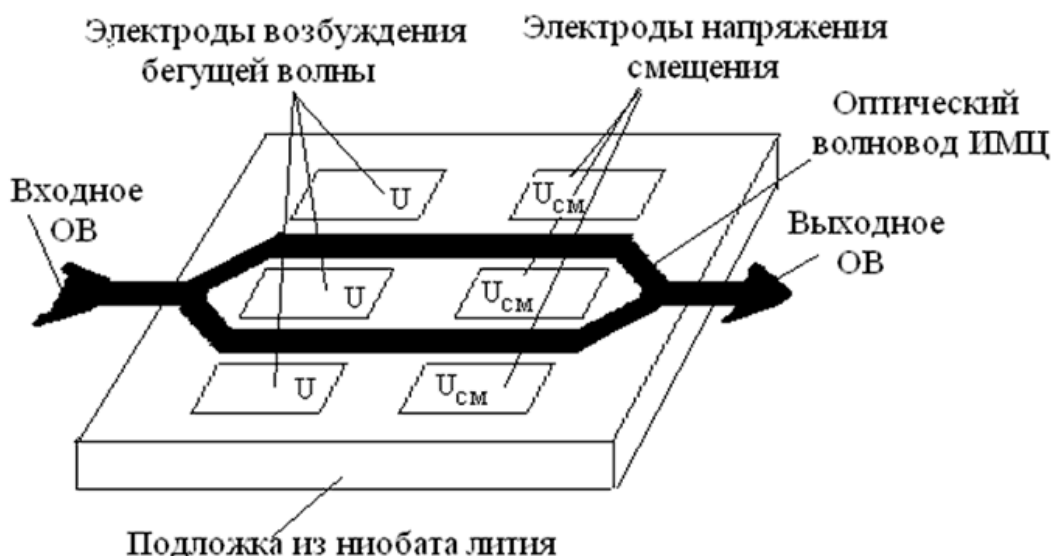


Рисунок 4.1.3– Схема электрооптического модулятора типа интерферометра Маха-Цендера

Модулирующее напряжение U должно быть разнополярным. В зависимости от полярности приложенного напряжения происходит изменение показателя преломления среды, в результате чего изменяется скорость прохождения сигнала. Движение оптической несущей замедляется в одном плече и ускоряется в другом.

Модулирующие электроды достаточно протяжены для обеспечения эффективного распределённого (на длине L) взаимодействия полей электрической и оптической волн.

В зависимости от приложенного к электродам напряжения U и длины L в зоне взаимодействия полей, распространяющиеся по этим плечам моды приобретают сдвиг фаз

$$\Delta\varphi = k_m \Delta n_{\text{эфф}} L,$$

где $\Delta n_{\text{эфф}} = n_{\text{эфф}} r E / 2$ – амплитуда изменения эффективного показателя преломления моды;

$n_{\text{эфф}}$ – эффективный показатель преломления моды;

r – электрооптический коэффициент рабочей оптической среды;

E – напряженность электрического поля, создаваемая напряжением U ;

k_m – волновой вектор моды.

На выходе ИМЦ происходит модуляция входного светового потока по интенсивности ввиду интерференции достигших его световых мод.

При фазовом сдвиге до $\Delta\varphi = \pi$ и более произойдёт ослабление сигнала на выходе модулятора порядка 20дБ.

Передаточная характеристика ИМЦ (рисунок 6.7) представляет собой отрезок синусоиды, из которой для управления процессом модуляции выбирают одну из полуволн, задавая на ней определённое напряжение смещения $U_{см}$ с помощью системы электродов напряжения смещения. Это напряжение может быть выбрано как для работы в линейной, так и в квадратичной области передаточной характеристики.

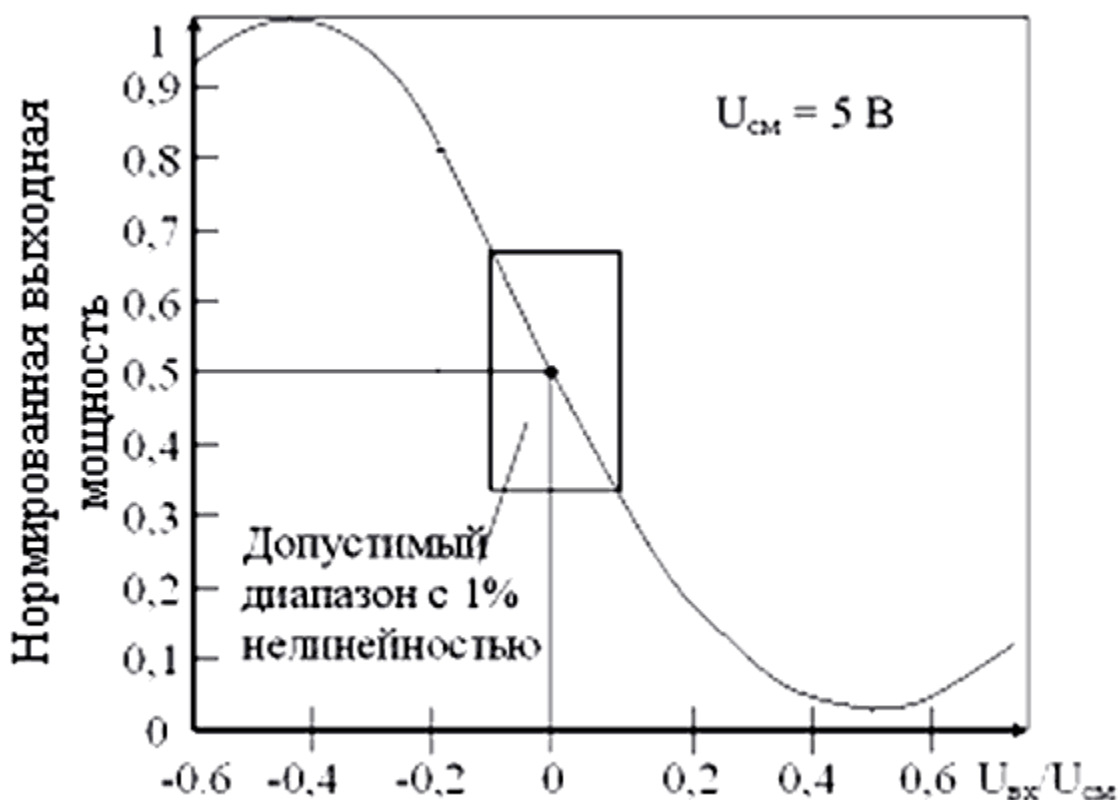


Рисунок 4.1.4 – Передаточная характеристика модулятора типа ИМЦ

Такой тип модулятора наиболее широко используется в различных приложениях, и прежде всего в системах нового поколения и мультиплексирования по длинам волн.

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ АМПЛИТУДНЫЕ МОДУЛЯТОРЫ МАХА–ЦЕНДЕРА НА ОСНОВЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

Амплитудный электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха–Цандера является основным вариантом внешнего модулятора в аналоговых и в цифровых волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС). К преимуществам данного устройства относятся: высокая частота модуляции; компактность; надежность. Модуляторы также используются в волоконно-оптических датчиках, измерительном оборудовании, передаче радиосигнала по оптоволокну, радиофотонике.

Волоконно-оптические линии связи имеют существенные преимущества для авиации: малый вес и объем, невосприимчивость к электромагнитным наводкам, полная взрывобезопасность, широкая полоса пропускания. Замена медных проводников оптоволокомом позволяет не только снизить вес и повысить надежность летательных аппаратов, но и снизить общую стоимость системы передачи информации на воздушном судне.

К недостаткам электрооптических модуляторов Маха–Цандера относят их высокую стоимость, а также подверженность разнообразным дрейфовым явлениям.

Модуляторы интенсивности излучения Маха–Цандера изготавливаются компаниями: iXBluePhotonics (Франция), LumentumHoldingsInc. (США), Optilab (США), Covega (США), EOSpase (США), Thorlabs (США), Oclaro (США), Laser 2000 (Великобритания), JENOPTIK (Германия), SumitomoOsakaCement (Япония), Fujitsu (Япония), OKI ElectronicsComponents (Япония), LucentTechnologies (Китай), SWT (Китай), ECI (Израиль), НПК «Оптолинк» (Россия). Список неполный.

Электрооптические модуляторы Маха–Цандера (MMZ) – модуляторы интенсивности интерферометрического типа. Схематическое изображение чипа модулятора компании iXBluePhotonics (Франция) приведено на рис. 4.1.5

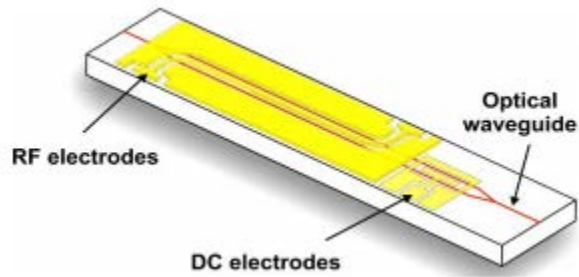


Рис. 4.1.5 - Схематическое изображение чипа модулятора компании iXBlue Photonics1 [4]: RF electrodes – электроды модуляции; DC electrodes – электроды смещения; Opticalwaveguide – оптический волновод (световод)

ОАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» производит электрооптические модуляторы интенсивности света на ниобате лития для широкополосных систем радиофотоники и телекоммуникаций МЗМ-Х-015, МЗМ-Х-016 и МЗМ-Х-017 (рис. 4.1.6). Рабочая длина волны 1540–1560 нм. Температура эксплуатации от минус 60 до плюс 70 °С

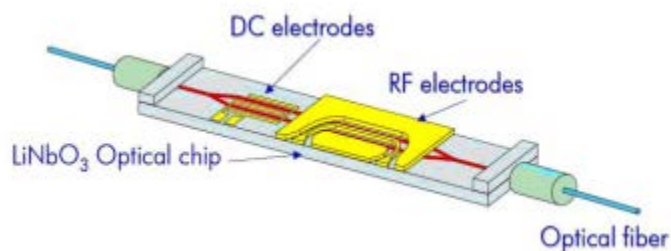


Рис. 4.1.6 - Интегрально-оптический СВЧ-модулятор Маха–Цендера Пермской научнопроизводственной приборостроительной компании [6]: LiNbO₃ Opticalchip – кристаллическая подложка (электрооптический кристалл); DC electrodes – DC-электроды смещения; RF electrodes – СВЧ-электроды в виде копланарной линии бегущей волны; Opticalfiber – оптическое волокно

Модулятор представляет собой интегрально-оптическую схему, состоящую из системы канальных оптических волноводов и параллельной им системы электродов. Лазерное излучение входного световода разделяется на два пути, которые соединяются в выходном световоде (составляющие складываются когерентно). Эти

два пути образуют два плеча интерферометра. Около световодов напыляют две пары электродов: RF – электроды модуляции и DC – электроды смещения рабочей точки. Для формирования электродов используется золото, в качестве адгезионного слоя используется хром. При подаче на электроды напряжения происходит изменение показателя преломления в световодах. Лазерное излучение в плечах распространяется с разными скоростями и приобретает разность фаз.

Компания LumentumHoldingsInc. (JDSU) выпускает 10 Gb/s DualDriveMach-Zehnder (DDMZ) modulator, в котором электроды модулирующего сигнала RF и электроды напряжения смещения DC совмещены.

Модуляторы для аналоговой и цифровой модуляции серии AM компании JENOPTIK (Германия) также имеют совмещенные RF- и DC электроды [8]. Вариант схемы цепей напряжения модулирующего сигнала RF и напряжения смещения рабочей точки (bias) приведен на рис. 4.1.7.

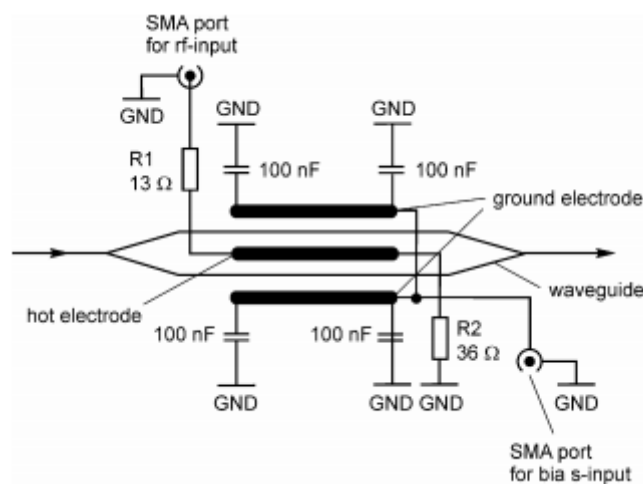


Рис. 4.1.7. Схема подключения электродов модулятора AM 1550 компании JENOPTIK

Передаточной функцией интерферометра называется зависимость выходной интенсивности излучения от набегающей в плечах разности фаз. Передаточная функция интенсивности модулятора от приложенного к электродам напряжения $V(t)$ имеет вид:

$$I_{\text{out}}(t) = T_{\text{mod}} \frac{I_{\text{in}}}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{V_{\pi}} V(t) - \varphi \right) \right],$$

где $I_{out}(t)$ – Output intensity – интенсивность выходного излучения;

I_{in} – Input intensity – интенсивность входного излучения;

T_{mod} – optical transmission of the device – коэффициент передачи модулятора;

V_{π} – half-wave voltage of the modulator – полуволновое напряжение модулятора (при котором разность фаз интерферирующего излучения равна π);

ϕ – phase term – фаза.

Для идеального (со сбалансированными оптическими путями) модулятора Маха–Цендера фаза ϕ равна нулю. Однако в реальности всегда существует разница между двумя оптическими путями из-за неоднородности материала и допусками на изготовление. Этот дисбаланс учитывается введением фазы ϕ (phase term) в передаточной функции модулятора.

Передаточная функция интенсивности идеального модулятора Маха–Цендера с симметричной топологией волноводов (или при компенсации фазы ϕ с подачей напряжения смещения на DC-электроды) и при равенстве интенсивностей излучения в плечах интерферометра приведена на рис. 4.1.8

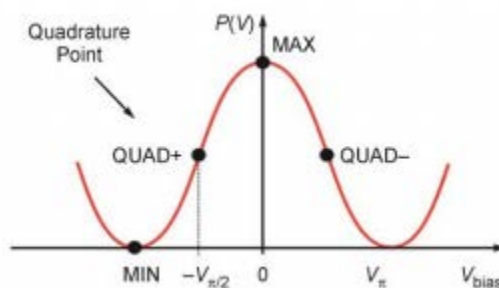


Рис. 4.1.8.- Передаточная функция идеального модулятора Маха–Цендера :
 $P(V)$ – интенсивность выходного излучения модулятора; V_{bias} – постоянное DC напряжение смещения; V_{π} – полуволновое напряжение; Quadrature Point (QUAD+, QUAD-) – точки квадратуры

Различают $V_{\pi DC}$ – полуволновое напряжение для напряжения смещения на DC электроды и $V_{\pi RF}$ – полуволновое напряжение для модулирующего напряжения на RF электроды.

Рабочая точка модулятора (MIN, QUAD+, MAX, QUAD-) в зависимости от целевого применения выбирается подачей постоянного напряжения V_{bias} на DC электроды. В рабочих точках QUAD+ и QUAD максимальна крутизна передаточной функции и минимальны нелинейные искажения.

Компания iXBluePhotonics (Франция) производит электрооптические модуляторы Маха–Цендера на основе кристаллов ниобата лития $LiNbO_3$ для длин волн лазера 800, 1060, 1300, 1550 и 2000 нм [10]. Основные характеристики модуляторов приведены в табл. 1.

Основные параметры модуляторов Маха–Цендера: рабочий диапазон длин волн, полоса модуляции, вносимые потери, полуволновое напряжение, коэффициент экстинкции. Коэффициент экстинкции (Extinctionratio) – отношение максимального коэффициента пропускания оптического модулятора к минимальному.

Основные характеристики модуляторов Маха–Цендера компании iXBluePhotonics

Тип модулятора	NIRMX80	NIRMX95	NIR-	MX	MXAN	MX200
Параметры	0- -LN-20	0- -LN-20	MX- -LN-20	1300 -LN-40	-LN-40	0 -LN-10
Operatingwavelength	800 nm (780–850)	900 nm (850-960)	1060 nm (980-1150)	1310nm (1270-1330)	1550nm (1530-1625)	2050nm (1900-2200)
Electro-opticalbandwidth	25 GHz	25 GHz	18 GHz	30 GHz	30 GHz	12 GHz
V_{π} RF@ 50 kHz	3,5 V	3,5 V	3,5 V	4 V	5 V	9,5 V
V_{π} DC electrodes	3,9 V	3,9 V	4,5 V	5,5 V	6,5 V	11 V
Opticalinputpower, max	13 dBm (20 мВт)	10 dBm (10 мВт)	20 dBm(100 мВт)	20 dBm(100 мВт)	20 dBm(100 мВт)	20 dBm(100 мВт)
RF inputpower,	28 dBm	28 dBm	28 dBm	28 dBm	28 dBm	28 dBm

max						
Biasvoltage	-20÷+20 V	-20÷+20 V	– 20÷+20 V –	– 20÷+20 V –	– 20÷+20 V –	– 20÷+20 V –
DC extinctionratio	22 dB	25 dB	25 dB	22 dB	22 dB	22 dB

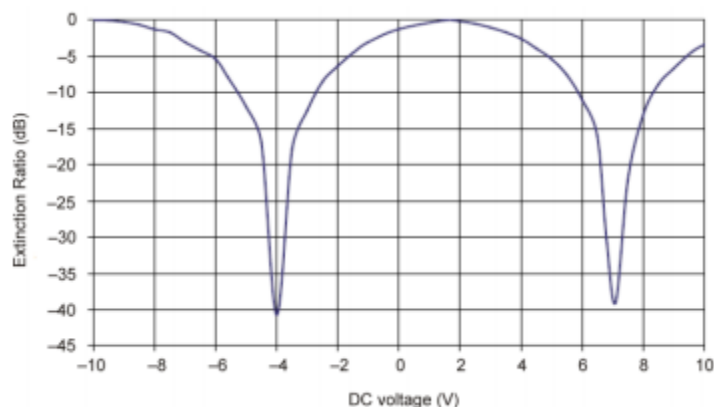


Рис. 4.1.9.-. Extinctionratio – коэффициент экстинкции модулятора MXER-LN-

20

Компания EoSpace (США), например, предлагает в 2017 году под параметры заказчика амплитудные модуляторы на длины волн: 0,65; 0,78; 0,85; 0,98; 1,06; 1,3; 1,55; 1,7 и 2 мкм со скоростями передачи данных до 60 ГГц.

С рабочим диапазоном длин волн 1530–1625 нм компанией iXBluePhotonics выпускаются амплитудные электрооптические модуляторы Маха–Цендера (модуляторы интенсивности): аналоговые модуляторы серии MXAR-LN, цифровые модуляторы серии MX-LN, двойной параллельный модулятор MXIQ-LN. Выпускаются модуляторы для специальных применений: IMZI – с высокой разностью хода (длиной оптического пути) между двумя плечами, Y-JPX-LN – модулятор для волоконно-оптических гироскопов (длина волны 1460–1610 нм, полоса модуляции 30 МГц, полуволновое напряжение 7В).



Рис. 4.1.10. Модулятор IMZI с высокой разностью хода между двумя плечами

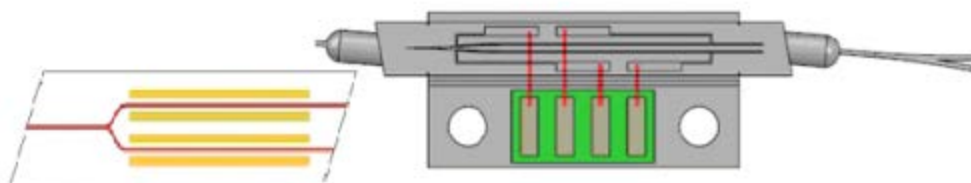


Рис. 4.1.11. Модулятор Y-JPX-LN для волоконно-оптических гироскопов

Компания Optilab (США) выпускает для гироскопов модулятор МЮС-1550-PG [19]. Научно-производственная Компания «Оптолинк» (г. Зеленоград, Россия) производит многофункциональные интегрально-оптические элементы для волоконно-оптических гироскопов, выполняющие функции поляризатора, разветвителя и электрического фазового модулятора оптического излучения с длиной волны 830 и 1550 нм.

Для обеспечения модуляторов соответствующими по параметрам электрическими напряжениями (DC напряжением смещения и RF модулирующим напряжением) компания iXBluePhotonics выпускает MBC (ModulatorBiasController) контроллеры рабочей точки и DRдрайверы (формирователи) модулирующего сигнала.

Тема 8 Пассивные компоненты ВОСП

В мультиплексорах DWDM применяются интегрально выполненные дифракционные фазовые решетки, или дифракционные структуры (Arrayed Waveguide Grating, AWG). Функции пластин в них выполняют оптические волноводы или волокна. Приходящий мультиплексный сигнал попадает на входной порт (рис., а). Затем этот сигнал проходит через волновод-пластину и распределяется по множеству волноводов, представляющих дифракционную структуру AWG. По-прежнему сигнал в каждом из волноводов остается мультиплексным, а каждый канал ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$) остается представленным во всех волноводах.

1.1 2.1. Принцип работы.

Входной сигнал, который содержит излучение разных длин волн, попадает во входной разветвитель. Там он расщепляется на N оптических лучей, каждый из которых попадает в отдельный волноводный канал. Все N волноводных каналов, образующих волноводную матрицу, имеют разную длину и вносят в сигнал разные фазовые сдвиги, зависящие от длины волны. После этого световые пучки из отдельных волноводных каналов вновь объединяются в выходном разветвителе и интерферируют таким образом, что излучение разных длин волн попадает в разные выходные волноводы.

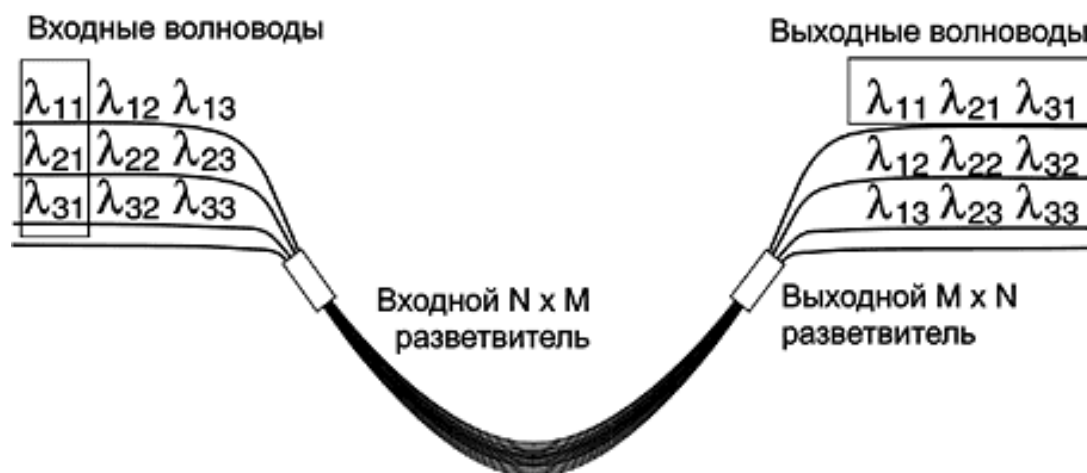


Рис. 2.1.1 Решетка на основе массива волноводов AWG – принцип работы.

Решетки на основе массива волноводов AWG используются для того, чтобы перераспределять сигналы различных длин волн (каналы) между двумя наборами волокон (рис. 2.1.1) или выделить (демультиплексировать) отдельные каналы составного сигнала в отдельные волокна. Эта технология сейчас становится основной для производителей мультиплексоров и демультиплексоров систем DWDM. Благодаря легко масштабируемой структуре, она может широко применяться в системах с сотнями каналов.

Решетки AWG еще также называют “драконовыми маршрутизаторами” (Dragon Routers), фазовыми матрицами или фазарами.

1.2 2.2. Конструкция мультиплексора, достоинства, недостатки.

В основе технологий AWG (рис. 2.2.1) лежит обобщенный принцип интерферометра Маха-Цендера.



Рис. 2.2.1 Схема мультиплексора с входным и выходным разветвителями.

Мультиплексор AWG состоит из двух многопортовых разветвителей (входного и выходного), соединённых массивом оптических волноводов (МПОВ). Длина каждого волновода отличается от соседних на фиксированную величину. Из этого следует, что каждую пару волноводов вместе с входным и выходным разветвителями можно рассматривать как интерферометр Маха-Цендера, а AWG в целом как обобщенный интерферометр Маха-Цендера, т.е. устройство, генерирующее копии входного сигнала (с помощью входного разветвителя), распространяющихся в одинаковых средах различной длины, и складывающее эти

сигналы, пришедшие с разными фазовыми сдвигами, на выходе (с помощью выходного разветвителя).

AWG может использоваться как мультиплексор ($n:1$), осуществляющий объединение n входных сигналов с группы входных портов в один выходной или демультиплексор ($1:n$), осуществляющий разбиение входного потока на отдельные несущие, и подачу их на группу выходных портов n .

Схему AWG, конечно, можно было бы реализовать с помощью соединения $n/2$ MZI, однако ее проще было бы сделать в виде планарной схемы с помощью интегральных оптических технологий, так как входной и выходной разветвители и массив волноводов можно реализовать на одной кремниевой подложке. Волноводы реализуются в виде планарных оптоволоконных световодов (диоксид кремния, легированный Ge или Ta), сформированных на этой же подложке.

Многоканальные AWG (16—64 канала) выпускаются в виде готовых модулей, отличающихся малыми габаритами и средним уровнем вносимых потерь (см. таблицу). Данный вид технологии с успехом применяется в DWDM, этому поспособствовало ее свойство менять размер, сохраняя способность работы с множеством каналов. Технология имеет один существенный недостаток - использование стабилизаторов температуры, т.к. она имеет температурный коэффициент равный $0,01 \text{ нм}/^\circ\text{C}$.

Промышленностью выпускаются широкий ассортимент мультиплексоров. Например, мультиплексор DWDM MD-2F-40R- это пассивный DWDM-мультиплексор/демультиплексор предназначен для создания сорока дуплексных оптических каналов по двум одномодовым волокнам. Устройство мультиплексирования используется для совместной работы с источниками DWDM-сигналов с несущими длинами волн, образуя 40 каналов передачи данных на 80-ти длинах волн.

Оптические мультиплексоры организуют физическую среду передачи данных, поэтому они не зависят от типа передаваемых данных и протоколов.

Мультиплексор DWDM MD-2F-40R имеет следующие характеристики, приводимые в документации изготовителя [1]:

- Тип модуля: Мультиплексор/демультиплексор
- Технология производства: Athermal AWG Gaussian (AAWGG)
- Диапазон длин волн: 1528,77-1566,31 нм с шагом 0,8 нм
- Точность длины волны: ITU \pm 0,01 нм
- Количество волокон: 2
- Количество организуемых дуплексных каналов: 40
- Минимальные вносимые затухания: 3,75 дБ
- Максимальные вносимые затухания: 4,95 дБ
- Вносимые затухания на порту расширения: —
- Возвратные потери: UPC >40 дБ, APC >45 дБ
- Изоляция смежных каналов: 27 дБ
- Изоляция несмежных каналов: 30 дБ
- Направленность: >50 дБ
- Суммарная проводимая оптическая мощность: <500 мВт
- Тип оптических разъемов: LC/FC/SC
- Варианты исполнения:
 - — корпус для телекоммуникационной стойки 19"
 - — в металлическом корпусе LGX для установки шасси
 - — в пластиковом корпусе "ABC box" с оптическими выводами
- Диапазон рабочих температур: -5...+70°C

Особенности мультиплексора DWDM MD-2F-40R:

- Одновременное мультиплексирование и демультиплексирование входящих сигналов
- Пассивное устройство, не требует

- Низкие вносимые потери
- Полное соответствие рекомендациям Telcordia 1209/1221 и RoHS

1.3 3.1 Анализ свойств AWG мультиплексора

1. Фокусировка

Фокусировка достигается путем выбора разницы длины волны ΔL между соседними массивами волноводов равной целому числу длин волн, измеренных внутри массива волноводов

$$\Delta L = m * \frac{\lambda_c}{N_g} = \frac{m * c}{N_g * f_c} \quad (3.1.1)$$

в которых, m порядок фазированной решетки, $\lambda_c (f_c)$ является центральной длиной волны (частоты) в вакууме, и N_g является эффективным показателем моды волновода. С этого момента массив действует как линза с изображения и объекта плоскостях на расстоянии R_a от массива апертур. Входные и выходные апертуры в фазированной решетке являются типичными примерами. Фокусной линии такого нарастания, которое определяет плоскость изображения, является круг с радиусом $R_a/2$. Передатчик и приемник волноводов должны располагаться на этой линии.

2. Дисперсии и свободный спектральный диапазон

Из Рис. 3.1.2 видно, что дисперсия угла θ при разность фаз $\Delta\Phi$ между соседними волноводами можно выразить как

$$\theta = \left(\frac{(\Delta\Phi - m * 2\pi) / \beta_{FPR}}{d_a} \right) \approx \frac{\Delta\Phi - m * 2\pi}{\beta_{FPR} * d_a} \quad (3.1.2)$$

, где $\Delta\Phi = \beta * \Delta L$, β и β_{fpr} это постоянная распространения моды волновода и в моды перекрытия в области свободного распространения, соответственно, и d_a является боковым интервалом (по центру строк) волновода в апертуру.

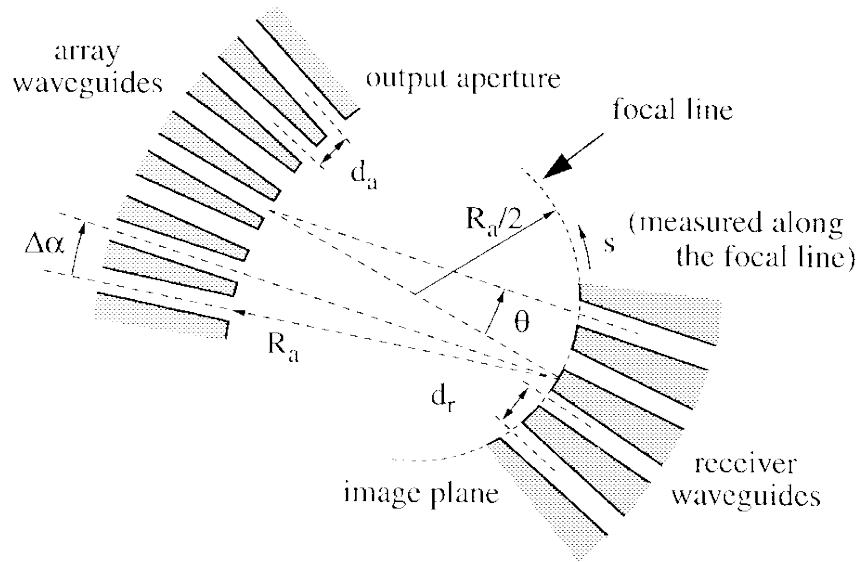


Рис. 3.1.1 Геометрия приемной стороны

Дисперсия D из массива описывается как боковое смещение ds фокального пятна вдоль плоскости изображения на единицу изменения частоты. Рис. 3.1.2, следует (после некоторых манипуляций), что

$$D = \frac{ds}{df} - R_a * \frac{d\theta}{df} = \frac{1}{f_c} * \frac{\tilde{N}_g}{N_{FPR}} * \frac{\Delta L}{\Delta\alpha} \quad (3.1.3)$$

в которой f_c является центральной частоты, N_{fpr} это индекс моды в области свободного распространения, ΔL -длина приращения массива волновод, f как описано ранее, $\Delta\alpha = d_a/R_a$ -это угол расхождения между массивом волноводов с выхода и входа, а \tilde{N}_g -это групповой показатель преломления моды волновода,

$$\tilde{N}_g = N_g + f \frac{dN_g}{df} \quad (3.1.4)$$

Видно, что R_a не появляется в правой части выражения в (3.1.3) это объясняется тем, что заполнение пространства между массивами волноводов возле апертуры не влияют на дисперсионные свойства мультиплексора.

Из (3.1.3) видно, что реакция фазированной решетки является периодической. После каждого шага $2\pi\Delta\Phi$ поля будет отображен на той же позиции. Период в частотной области называется свободным спектральным диапазоном (полной

шкалы). Встречается в виде частотного сдвига, для которой фазовый сдвиг $\Delta\Phi$ равен 2π

$$\frac{2\pi \cdot \Delta f_{FSR}}{c} * \tilde{N}_g * \Delta L = 2\pi \quad (3.1.5)$$

из которого находим

$$\Delta f_{FSR} = \frac{c}{\tilde{N}_g * \Delta L} = \frac{f_c}{m'} \quad (3.1.6)$$

, где $m' = (\tilde{N}_g / N_g) * m$.

Правая часть уравнения, которая хорошо известна из теории решеток, следует представить как $\tilde{N}_g \Delta L - m' * c / f_c$. Отмечается, что для фазированных решеток, отличающихся от решеток, свободный спектральный диапазон (FSR) не относящихся к порядку массива, но измененный номер порядка m' , которые можно назвать порядок пучка(луча).

А точную зависимость между Θ и $\Delta\Phi$ является нелинейной, (3.1.6) является приближительной и FSR будет немного зависит от входного и выходного портов.

3. Вносимые потери и неравномерность.

На Рис. 3.1.2 показаны области в плоскости изображения на четырех различных длинах волн. Это сумма-областей поля в дальней зоне всех отдельных массивов волноводов. Как далеко напряжённость поля отдельных волноводов уменьшается от центра плоскости изображения, показано на рисунке, фокусное сумма-поля будет делать то же самое.

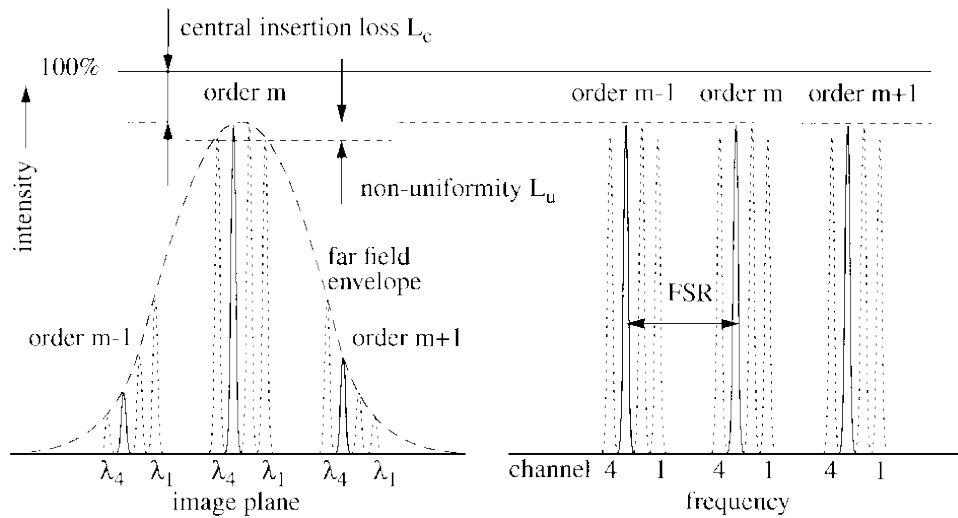


Рис. 3.1.2 Потеря центральной вставки, неоднородности.

Если длина волны меняется, она будет двигаться по плоскости изображения и следовать за огибающей описывающей дальнее поле отдельных массивов волновода. Если мы приблизим модальное поле массива волноводов к виду Гауссова пучка, и будем пренебрегать эффектами сцепления на форму луча, мы можем получить некоторые простые аналитические соотношения для оценки вносимых потерь, неравномерности канала и полосы пропускания.

$I(\theta) = I_{0c}^{-2*\theta/\theta_0} C$ помощью Гауссова пучка аппроксимации интенсивность дальнего поля находится из

(3.1.7)

, в котором θ - ширина эквивалентного Гауссова дальнего поле

$$\theta = \frac{\lambda}{N_{FPR}} * \frac{1}{\omega_0 * \sqrt{2\pi}} \quad (3.1.8)$$

Где w_c эффективная ширина модального поля (как описано в приложении а). Неравномерность L_u определяется как отношение интенсивности (в дБ) между наружным и центральным каналом. Используя (3.1.7), вносимые потери приемника относительно центрального канала легко найти, подставляя угол

θ_{max} ($\theta_{max} \approx s_{max} / R_a$), соответствующий внешнему приемнику волновода.

$$L_u = -10 \log \left(c^{2 * \frac{\theta_{max}^2}{\theta_0^2}} \right) \approx 8.7 * \theta_{max}^2 / \theta_0^2 \quad (3.1.9)$$

Если FSR выбирается равным N раз ширина канала Δf , а в длине волны маршрутизаторы, избыточная потеря L_u внешние каналы будет близка к 3 дБ по соображениям энергосбережения: а для большого числа каналов приемника волновода 1 и виртуальный приемник N+1 будут испытывать примерно те же потери, каждый из них имеет по крайней мере 3-дБ превышение потерь относительно центрального канала. При малых значениях ситуация может быть немного лучше. Минимизация L_u таким образом доходит до увеличения FSR.

$\theta_{FSR} = \frac{\Delta s_{FSR}}{R_a} = \frac{D}{R_a} * \Delta f_{FSR}$ Вносимые потери L от центрального канала определяется в основном дифракцией света на нежелательные заказы. Соседние приказы главного фокусного пятна будет нести долю $\exp(-2 * \Delta \theta_{FSR}^2 / \theta_0^2)$, с

$$(3.1.10)$$

в которой дисперсии. Если мы пренебрегаем силой в сочетании с другими заказами суммарные потери L_0 можно оценить из

$$L_0 = -10 \log \left(1 - 4 * e^{-2 * \frac{\Delta \theta_{FSR}^2}{\theta_0^2}} \right) + L_p \approx 17 * e^{-\frac{4\pi \omega c^2}{d_a^2}} + L_p \quad (3.1.11)$$

в которой было сделано предположение, что $\exp(-2 * \Delta \theta_{FSR}^2 / \theta_0^2) \ll 1$. Коэффициент 4- это из-за того, что мощность теряется в два порядка, а равно потери происходят (потому что взаимности) на входе и выходе из массива. Термин L_p обозначает суммарные потери при распространении в массиве, как и в FSR за счет поглощения и рассеяния. Из этого уравнения видно, что для низких-потеря устройств волновода расстояние d_a в отверстия массива должно быть минимальным. Для полупроводниковых устройств лучше всего заявленного убытка составляет порядка 2 дБ. Следует отметить, что (3.1.11) в худшем случае предполагает: соединение между массивом волноводов позволит снизить потери.

4. Полосы

Если длина волны изменяется фокальной области PHASAR движется вдоль приемник волноводов. АЧХ разных каналов вытекает из наложения этой области модального поля приемника волноводов.

Если предположить, что в фокальной области является хорошей копией модального поля на входе, и что входной и выходной волноводы идентичны, (логарифмическая) КПП $T(\Delta f)$ вокруг канала максимальная $T(f_c)$ следует как перекрытие модального поля с самим собой, перемещенных на расстояние $\Delta s(\Delta f) = D\Delta f$

$$T(\Delta f) = T(f_c) + 20 \log \int_{-\infty}^{+\infty} U(s) * U(s - D\Delta f) ds. \quad (3.1.12)$$

в которой $U(s)$ является нормализованных модальным полем, дисперсии, как это определено, t -время передачи дБ на максимуме канала.

При малых значениях Δs (меньше, чем эффективный режим ширина ω_c) интеграл перекрытие может быть вычислен аналитически путем аппроксимации модального поля в Гауссовой поля

$$T(\Delta f) - T(f_c) = 20 \log \left(e^{-\frac{D\Delta f^2}{\omega_0^2}} \right) \approx -6.8 \left(\frac{D\Delta f}{\omega_e} \right)^2. \quad (3.1.13).$$

L -дБ полоса пропускания Δf_L в два раза превышает значение Δf , для которой $T(\Delta f) - T(f_c) = L$ дБ

$$\Delta f_L = 0.77 \frac{\omega_e}{d_r} \Delta f_{ch} \sqrt{L}. \quad (3.1.14)$$

Последнее тождество следует путем подмены $D = d_r / \Delta f_{ch}$. Если мы заменим $\frac{\omega_e}{d_r} = 0.4$ в качестве представителя значением (наводки из-за приемника) интервал 40 дБ, см. раздел II-E), 1-дБ полоса пропускания окажется $0.31 \Delta f_{ch}$. На разнос каналов 100 ГГц, таким образом, мы находим 1-дБ полоса пропускания 31 ГГц.

1 1 DWDM-мультиплексор/демультиплексор двухволоконный 40-канальный
[Электронный ресурс:] URL: [http:// prointech.ru/](http://prointech.ru/)