

Практикум по дисциплине

Материалы и элементная база фотоники и оптических устройств связи

Краткое изложение содержания тем практических (семинарских) занятий

Содержание

Тема 1 Оптические материалы, их параметры, их применения.....	3
Тема 2 Методы изготовления оптических волоконных световодов	8
Тема 3 Методы изготовления планарных диэлектрических волноводов	16
Тема 4 Интегрально-оптические конструктивные элементы.....	19
Тема 5 Активные интегрально-оптические элементы.....	28
Тема 7 Интегрально-оптические элементы.....	41
Перечень основной и дополнительной литературы	45

Тема 1 Оптические материалы, их параметры, их применения

Практическое задание: провести классификацию оптических материалов.

Диаграмма, приведённая на рис.1. отражает разнообразие базовой номенклатуры оптических материалов, используемых при изготовлении компонентов ВОСП и сопутствующих элементов.

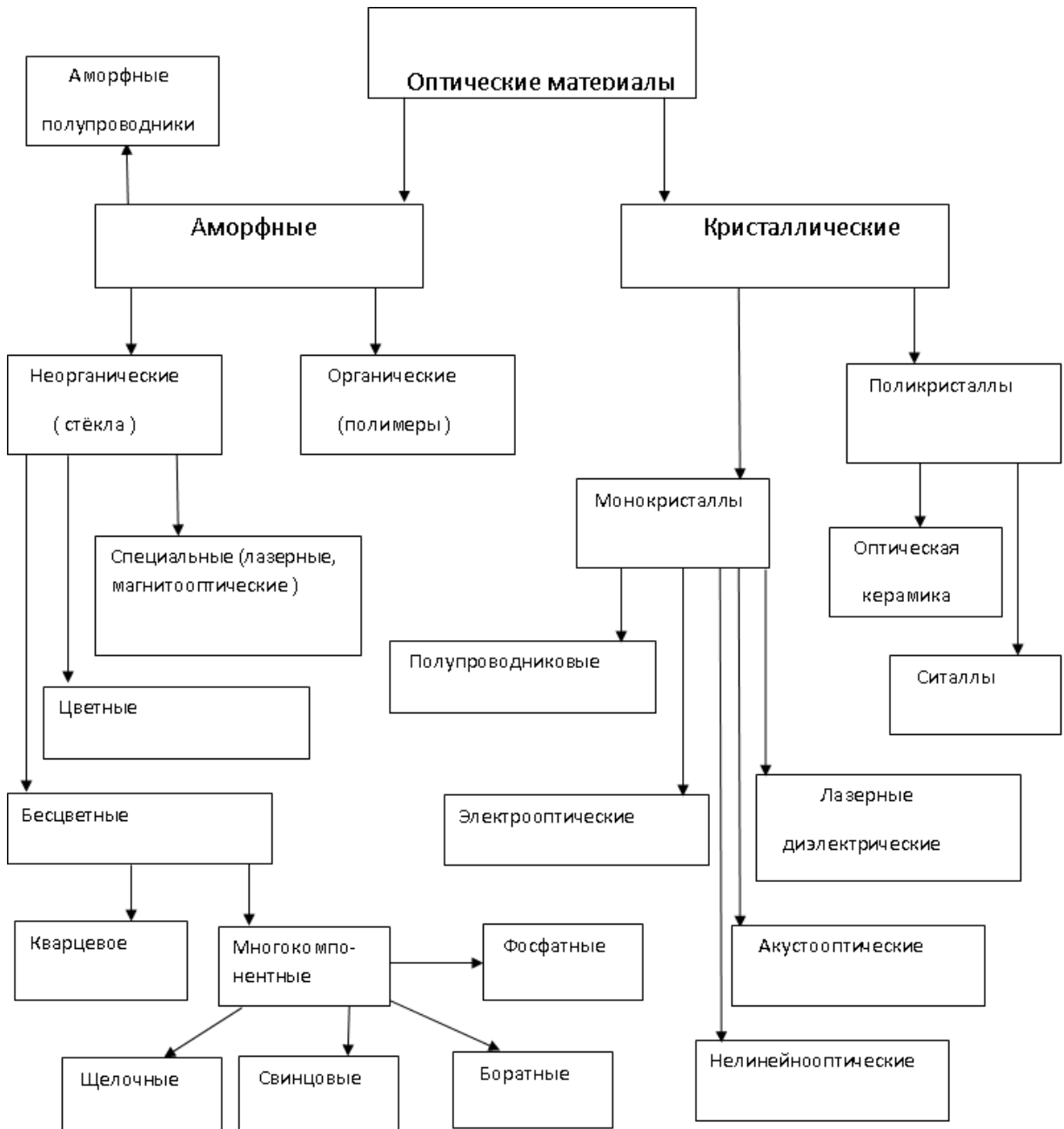


Рис. 1. Классификация оптических материалов

В основу классификации положено разделение материалов на два основных класса – аморфные материалы и кристаллические материалы, так как это разделение наиболее существенно влияет на физико-химические (в том числе оптические) свойства

материалов, методы их изготовления и особенности использования в промышленности и технике оптической связи. Также за рамки приведённой классификации выведены некоторые новейшие классы и типы оптических материалов, такие, как фотонные кристаллы и метаматериалы – отчасти из-за недостаточной разработанности соответствующих материалов и технологий в настоящее время, отчасти по причине неясности перспектив использования таких материалов в существующих ныне системах и технологиях оптической связи.

Применительно к специфике курса МЭБФОУС эту схему целесообразно модифицировать, увязав группы оптических материалов с компонентами оптических систем связи, при изготовлении которых используется тот или иной тип материала, рис.2.



Рис.2. Материалы компонентов оптических систем связи

Ещё одна возможная классификация материалов для оптических систем передачи информации может быть основана на назначении конкретного материала, на той функции, которую данный материал выполняет в той или иной оптической системе или её компонентах. Такая классификация позволяет лучше понять свойства и характеристики материала, необходимые для достижения заданных параметров и свойств оптической системы передачи, а также показывает варианты технологий, потребных для их изготовления, рис. 3.

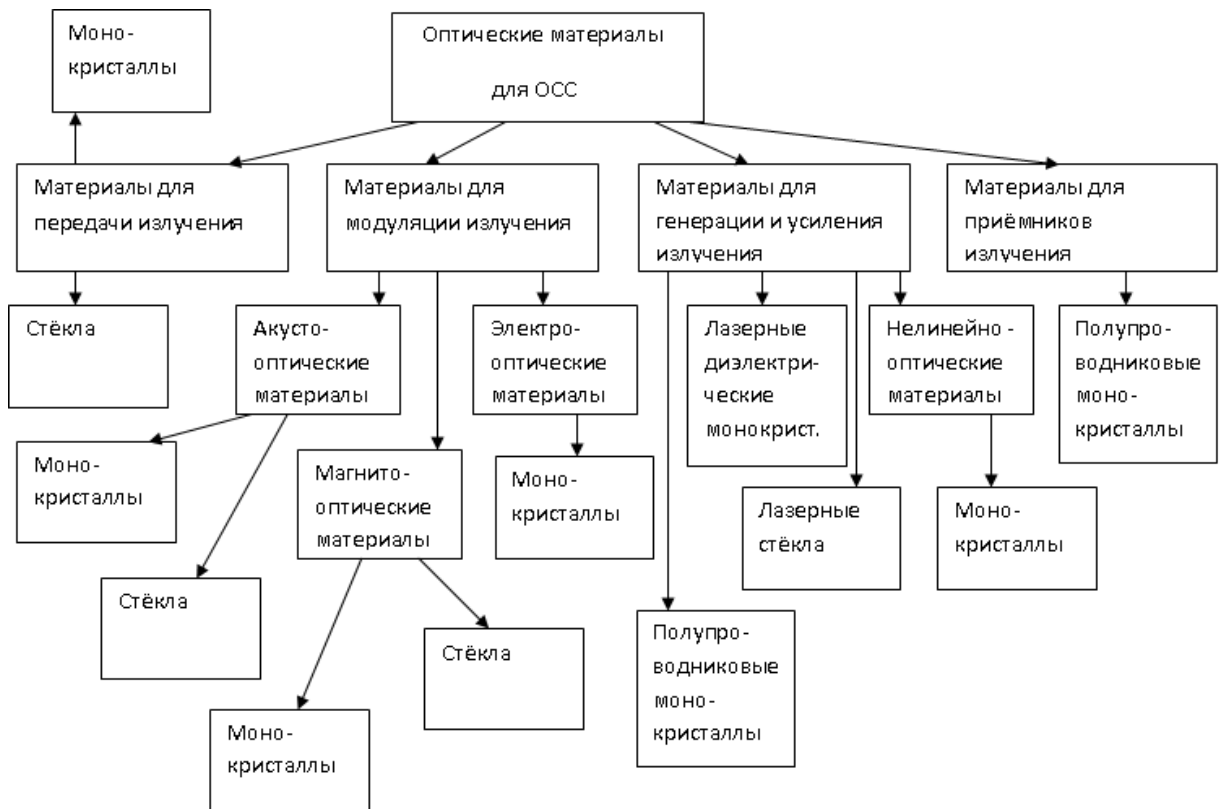


Рис. 3. Классификация материалов по назначению

Анализ этой диаграммы позволяет сделать вывод, что технологически подавляющее большинство элементов оптических систем связи может быть изготовлено с помощью двух основных технологий – технологии многокомпонентных стёкол и технологии монокристаллов. Модификации этих двух базовых технологий позволяют перекрыть весь спектр компонентов фотоники, оптоэлектроники и оптической связи.

Аморфные вещества – (от др.-греч. ἀ «не-» и μορφή «вид, форма») – вещества не имеющие кристаллического строения. Характерной особенностью аморфных тел является их изотропность, т. е. независимость всех физических свойств (механических, оптических и т. д.) от направления внешнего воздействия. Молекулы и атомы в изотропных твердых телах располагаются хаотично, образуя лишь небольшие локальные группы, содержащие несколько частиц (ближний порядок). Аморфное состояние многих веществ получается при высокой скорости затвердевания (остывания) жидкого расплава, или при конденсации паров на охлаждённую заметно ниже температуры плавления поверхность-подложку. Соотношение реальной скорости охлаждения (dT/dt) и характеристической скорости кристаллизации определяет долю поликристаллов в аморфном объёме. Скорость кристаллизации – параметр вещества, слабо зависящий от давления и от температуры (около точки плавления) и сильно зависящий от сложности состава. У металлов и сплавов аморфное состояние формируется, как правило, если расплав охлаждается за время порядка долей-десятков миллисекунд; для стёкол достаточно намного меньшей скорости охлаждения – сотни и тысячи лет. Кварц (SiO_2) также имеет низкую скорость кристаллизации, поэтому отлитые из него изделия получаются аморфными. Однако природный кварц, имевший сотни и тысячи лет для кристаллизации при остывании земной коры или глубинных слоёв вулканов, имеет крупнокристаллическое строение, в отличие от вулканического стекла, застывшего на поверхности и поэтому аморфного. Чистый кварц – прозрачен, как вода. А все его

разновидности имеют разную окраску в зависимости от примесей других минералов. Авантюрин, к примеру – желтовато-белый, зеленый или синий с мелкими вкраплениями. Аметист – имеет фиолетовый цвет, цитрин – желтый. Празем – зеленый. Раухтопаз – это кварц дымчато-серого цвета. Морион – чёрный, непрозрачный. Бывает ещё очень красивый по цвету розовый кварц, голубой и молочный.

В *кристаллических* телах частицы располагаются в строгом порядке, образуя пространственные периодически повторяющиеся структуры во всем объеме тела. Для наглядного представления таких структур используются пространственные кристаллические решетки, в узлах которых располагаются центры атомов или молекул данного вещества. Чаще всего кристаллическая решетка строится из ионов (положительно и отрицательно заряженных) атомов, которые входят в состав молекулы данного вещества.

Понятие ближнего и дальнего порядка.

Дальний и ближний порядок, наличие пространственной корреляции микроструктуры вещества: корреляция в пределах всего микроскопического образца — дальний порядок; корреляция в области с конечным радиусом — ближний порядок. То есть дальний порядок характеризует упорядоченность, повторяющуюся на неограниченно больших расстояниях, ближний порядок — упорядоченность на расстояниях, сравнимых с межатомными. В идеальном газе дальний и ближний порядок отсутствуют, так как расположение атома в какой-либо точке пространства не зависит от расположения других атомов. Жидкости и аморфные тела дальнего порядка не имеют, но в жидкостях и аморфных телах уже существует ближний порядок — некоторая закономерность в расположении соседних атомов. На больших расстояниях порядок «размывается».

Для кристаллов характерна строгая повторяемость во всех направлениях одного и того же структурного элемента (атома, группы атомов, молекулы и т. п.) на протяжении сотен и тысяч периодов кристаллической решетки. Такое правильное чередование атомов на одних и тех же расстояниях друг относительно друга повторяется для сколь угодно отдаленных атомов, т. е. существует дальний порядок и ближний порядок. Основные признаки дальнего порядка — симметрия и закономерность в расположении частиц, повторяющаяся на любом расстоянии от данного атома. Наличие дальнего и ближнего порядка обусловлено взаимодействием между частицами.

В каждой пространственной решетке можно выделить структурный элемент минимального размера, который называется элементарной ячейкой. Вся кристаллическая решетка может быть построена путем параллельного переноса (трансляции) элементарной ячейки по некоторым направлениям.

Кристаллические тела могут быть монокристаллами и поликристаллами. Поликристаллические тела состоят из многих сросшихся между собой хаотически ориентированных маленьких кристалликов, которые называются кристаллитами. Большие монокристаллы редко встречаются в природе и технике. Чаще всего кристаллические твердые тела, в том числе и те, которые получают искусственно, являются поликристаллами.

В отличие от монокристаллов, поликристаллические тела изотропны, т. е. их свойства одинаковы во всех направлениях. Поликристаллическое строение твердого тела можно обнаружить с помощью микроскопа, а иногда оно видно и невооруженным глазом (чугун).

Многие вещества могут существовать в нескольких кристаллических модификациях (фазах), отличающихся физическими свойствами. Это явление называется полиморфизмом. Переход из одной модификации в другую называется полиморфным переходом. Интересным и важным примером полиморфного перехода является

превращение графита в алмаз. Этот переход при производстве искусственных алмазов осуществляется при давлениях 60–100 тысяч атмосфер и температурах 1500–2000 К.

Характеристики оптических материалов

Показатель преломления материала численно равен отношению скорости света в вакууме к фазовой скорости света в данном материале. Для большинства оптических материалов показатель преломления лежит в диапазоне 1,4 (вода) – 4,0 (полупроводники). Показатель преломления может быть выражен через диэлектрическую ϵ и магнитную μ проницаемости материала с помощью формулы.

Показатель преломления оптического материала зависит от длины волны (т.е. от частоты) оптического излучения. Эта зависимость называется дисперсией показателя преломления. Для большинства оптических материалов с увеличением длины волны излучения наблюдается уменьшение показателя преломления. Однако, для ряда оптических материалов встречается ситуация, при которой в достаточно узком спектральном диапазоне показатель преломления увеличивается с ростом длины волны излучения. Такая зависимость называется аномальной дисперсией показателя преломления.

Показатель поглощения, характеризует уменьшение интенсивности оптического излучения при распространении его по оптической среде. Причиной же такого уменьшения может быть как поглощение излучения, так и рассеяние. При поглощении происходит захват квантов оптического излучения атомами или молекулами оптического материала и превращение энергии оптического излучения в энергию тепловых колебаний кристаллической решетки матрицы материала. При рассеянии же исчезновения квантов не происходит. Из-за взаимодействия с частицами оптического материала кванты оптического излучения изменяют своё первоначальное направление и не попадают на выход из среды. Как правило, в большинстве объёмных оптических материалов рассеяние невелико, однако в ряде случаев (например, в оптическом волокне в определённых спектральных диапазонах) оно может стать определяющим. Показатель поглощения оптического материала также существенно зависит от длины волны излучения.

Знание причин и особенностей поглощения и рассеяния является важным, так как позволяет осознанно бороться с негативными последствиями этого явления. Собственное поглощение, вызванное взаимодействием квантов света с атомами и молекулами собственно оптического материала, является принципиально неустранимым, и для его уменьшения необходимо использование другого материала или переход в другой спектральный диапазон. Примесное же поглощение, вызванное взаимодействием квантов света с атомами и молекулами чужеродных примесей, не входящих в собственно матрицу оптического материала, почти всегда оказывается устранимым технологически путем тщательной очистки материала и совершенствования технологического процесса. Аналогичным образом, рассеяние может быть разделено на рассеяние на макронеоднородностях (трещины, пузырьки, инородные включения в материале), что устранимо технологически, и рассеяние на микронеоднородностях – статистических вариациях плотности частиц в материале, размер которых много меньше длины волны излучения.

Тема 2 Методы изготовления оптических волоконных световодов

Оптическое волокно

Волоконный световод – это двухслойная цилиндрическая структура такого типа, рис. 1. Внутренний слой – сердцевина – имеет больший показатель преломления n_1 (типичное значение 1,47); внешний слой – оболочка – обладает меньшим показателем преломления n_2 (типичное значение 1,46). Такая структура способна при определённых условиях удерживать в сердцевине и направлять (канализовать) оптическое излучение с достаточно малыми потерями. Волоконные световоды отличаются друг от друга материалами сердцевины и оболочки, геометрическими размерами сердцевины и оболочки, конструкцией сердцевины и оболочки, оптическими параметрами сердцевины и оболочки и волокна в целом. Соответственно будут различными и технологии изготовления волоконных световодов и области их применения.



Рис. 1. Оптическое волокно

Технологии производства оптических волокон

К материалу сердцевины (отчасти и оболочки) оптического волокна предъявляются как общие требования, необходимые для большинства оптических материалов, так и специфические, обусловленные особенностями использования оптических волоконных световодов в современной технике оптической связи. Основные требования к материалам для изготовления ОВ следующие :

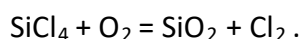
1. Малое затухание в оптическом диапазоне длин волн .
2. Малая дисперсия показателя преломления в оптическом диапазоне длин волн .
3. Доступность и малая стоимость материалов для производства ОВ.
4. Наличие и коммерческая разработанность технологий производства ОВ .
5. Высокие механические и технологические характеристики материала ОВ.

В настоящее время наиболее полно всем этим требованиям отвечает кварцевое стекло – аморфный плавный кварц, подробно рассмотренный в предыдущем разделе. Однако традиционные технологии производства этого материала, описанные выше, не позволяют получить оптическое волокно с параметрами, удовлетворяющими требованиям, предъявляемым условиями использования ОВ в технике оптической связи. Типичный показатель поглощения объёмных образцов кварцевого стекла, изготовленных из природных монокристаллов горного хрусталя тигельной плавкой составляет, в среднем, $0,05 \text{ см}^{-1}$. В соответствии с определением показателя поглощения это приводит к ослаблению интенсивности излучения в e – раз на расстоянии около 20 см. Для большинства объёмных оптических элементов, работающих на прохождение, такой степени прозрачности вполне достаточно, однако, оптические волокна для систем

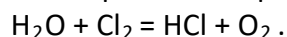
оптической связи требуют длины передающей среды от нескольких километров до сотен километров между соседними пунктами регенерации. Это приводит к необходимости разработки новых способов производства кварцевых ОВ со сверхнизкими потерями в спектральных областях, для которых существуют эффективные источники и приёмники излучения. В настоящее время наиболее разработанным является метод химического осаждения из газовой (паровой) фазы – CVD (chemical vapour deposition) . Суть этого метода - в окислении газообразных хлоридов кремния (и других сопутствующих соединений) и осаждении мелкодисперсной двуокиси кремния в виде пористой субстанции. Так как хлориды кремния представляют собой легкокипящие низкотемпературные жидкости, они могут быть очищены многократной перегонкой. При этом требования к чистоте исходных материалов очень высоки – концентрация примесей не должна превышать долей ppm (part pro million) – частей на миллион. Конечно, достичь такой чистоты в процессе с использованием природного сырья невозможно, да и тигельная плавка вносит свой вклад в загрязнение. Применение методов CVD позволяет обойти эти ограничения. Основные разновидности методов CVD следующие:
MCVD – осаждение из паровой фазы на внутреннюю поверхность опорной трубки.
OVD – outside vapour deposition – осаждение на внешнюю поверхность затравочного стержня.

VAD - vapour axial deposition – осевое осаждение на торцевую поверхность заготовки.

В основе всех методов химического осаждения из газовой (паровой) фазы лежит реакция окисления :



Исходный компонент – четырёххлористый кремний взаимодействует с кислородом при температуре 1500 – 1700 С⁰ и окисляется до двуокиси кремния. Мелкодисперсный порошок двуокиси кремния выпадает в осадок, образуя на подложке пористый слой, который в дальнейшем оплавляется до прозрачной стеклообразной массы – сверхчистого плавленого кварца – аморфного кварцевого стекла. Образующийся при реакции газообразный хлор взаимодействует с парами воды, попадающими в зону реакции:



Этот процесс называется осушкой. Хлористый водород уходит из зоны реакции с потоками газов, а кислород вновь вступает в окислительный процесс. Это позволяет увеличить степень использования реагентов и частично удалить из образующейся пористой стекломассы ионы гидроксидов ОН⁻ - основной источник примесного поглощения. Схема технологического процесса MCVD показана на рис. 2.

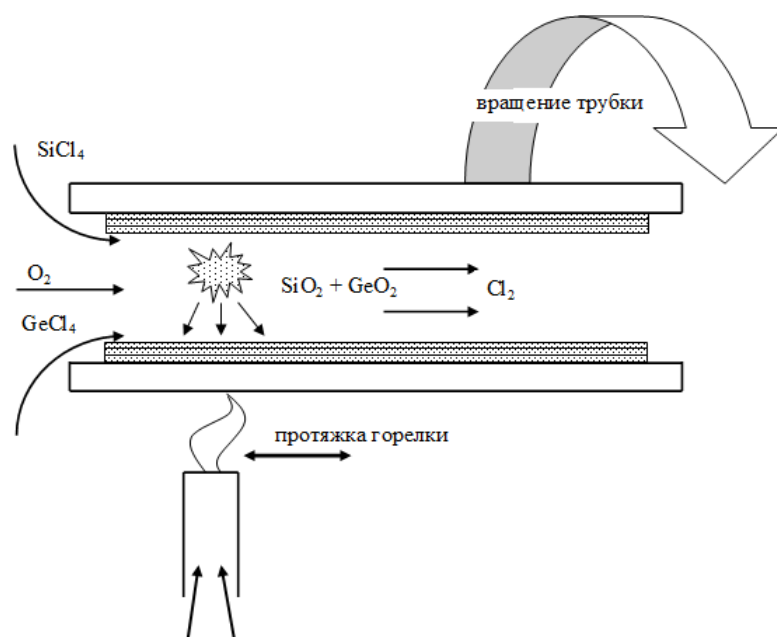


Рис.2 Схема технологического процесса MCVD

Основой заготовки ОВ здесь является кварцевая опорная трубка, изготовленная из чистого природного кварца. Напыление пористых слоёв сверхчистого кварца производится на внутреннюю поверхность опорной трубки. При этом материал опорной трубки образует наружный слой оболочки, удалённый от сердцевины, поэтому его поглощение не столь критично и оказывает малое влияние на общие потери в волокне. Поток сверхчистых исходных реагентов направляется внутрь опорной трубки. Зона реакции нагревается снаружи пламенем кислородно – водородной горелки до температур $1500 - 1700 \text{ C}^0$. Опорная трубка вращается вокруг своей оси (60 об./мин.), горелка движется вдоль трубки со скоростью 20 см/мин. При каждом проходе на внутренней стенке трубки осаждается пористый слой сверхчистой двуокиси кремния. Толщина пористого слоя, образующегося за один проход, зависит от температуры процесса и скоростей вращения и продольной протяжки (обычно это 1 – 10 мкм). Так как степень чистоты природного кварца опорной трубки недостаточна для получения сверхнизких потерь, в первую очередь на внутреннюю поверхность опорной трубки наносится несколько сотен слоёв сверхчистой двуокиси кремния, которые впоследствии образуют внутренние слои оболочки волокна, непосредственно примыкающие к сердцевине и существенно влияющие на поглощение излучения поля мод сердцевины. После формирования нужного количества слоёв оболочки в поток реагентов добавляется хлорид легирующей примеси, например, тетрахлорид германия GeCl_4 , окисляющийся в потоке кислорода до двуокиси германия: $\text{GeCl}_4 + \text{O}_2 = \text{GeO}_2 + \text{Cl}_2$. Добавка двуокиси германия в матрицу плавящегося кварца приводит к увеличению показателя преломления образующегося стекла, что и позволяет сформировать слои сердцевины волокна. Вместо двуокиси германия можно добавлять некоторые другие легирующие примеси. Их влияние на показатель преломления плавящегося кварца показано на рис. 3.

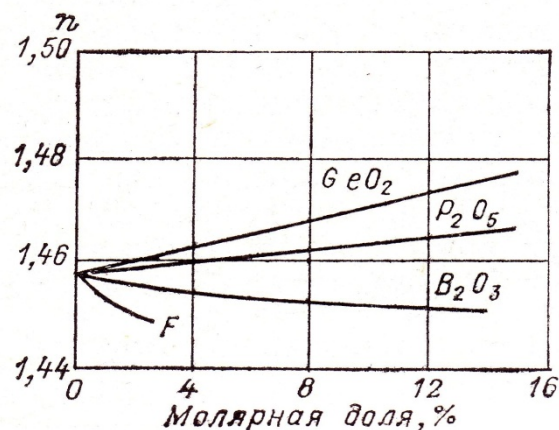


Рис.3. Зависимость показателя преломления плавленого кварца от концентрации легирующих добавок

Варьируя концентрацию $GeCl_4$ в потоке реагентов, можно плавно изменять показатель преломления сердцевинки и его профиль – закон изменения $n(r)$ в поперечном сечении волокна, то есть формировать нужные волноводные свойства волокна (в частности, регулировать межмодовую и внутримодовую дисперсию). После формирования необходимого числа слоев сердцевинки и осушки образовавшейся структуры продувкой хлора, полученная заготовка – преформа – нагревается до температуры около 2000 C^0 . Под действием сил поверхностного натяжения трубчатая преформа “схлопывается” – сжимается в сплошной стержень, распределение показателя преломления которого повторяет изменения показателя преломления слоёв. Далее заготовка перетягивается в оптическое волокно. При схлопывании и в процессе вытяжки происходит частичная диффузия легирующих добавок между слоями, что приводит к сглаживанию первоначального ступенчатого распределения профиля показателя преломления, вызванного послойным осаждением пористого стекла с разной концентрацией примесей. При нарушении температурного режима схлопывания в центре сердцевинки может образовываться “провал” – область уменьшения показателя преломления, вызванный избыточным испарением добавок GeO_2 из центральных слоёв заготовки (GeO_2 имеет большую летучесть паров, чем SiO_2). Появление провала в профиле приводит к резкому (в разы) увеличению межмодовой дисперсии волокна. Известны варианты метода MCVD с нагреванием активной зоны излучением ВЧ – индукторов и СВЧ – резонаторов.

Технологии производства специальных оптических волокон

К специальным оптическим волокнам относят ОВ, легированные ионами редкоземельных элементов (эрбий, иттербий, неодим и другие), волокна с наведённым двулучепреломлением (другое название – ОВ с сохранением поляризации), монокристаллические оптические волокна и фотонно – кристаллические волокна. Области использования специальных ОВ – высокоскоростные ВОЛС, ВОСП с когерентным приёмом, волоконно - оптические измерительные системы.

В оптическом волокне всегда в какой-то степени присутствует двулучепреломление, даже, если оно имеет центрально-симметричную конструкцию, поскольку на практике всегда есть некоторое механическое напряжение или другие эффекты, которые нарушают симметрию волокна. Как следствие, поляризация света и длина волны излучения, распространяющегося в волокне, постепенно меняются случайным образом. Процесс зависит также от каких-либо изгибов волокна и от его температуры. Волокна с

наведённым двулучепреломлением (с сохранением поляризации), применяются в устройствах, где нежелательно изменение состояния поляризации, например, в результате изменений температуры. Обычный метод создания сильного двулучепреломления - включение в заготовку двух (не обязательно цилиндрических) стержней напряжения с измененным составом стекла (с другой степенью теплового расширения) по разные стороны от ядра.

Когда волокно вытягивается из такой преформы, эти дополнительные элементы вызывают механическое напряжение с четко определенной ориентацией. Другим методом является использование эллиптического ядра, вызывающего двулучепреломление. В фотоннокристаллическом волокне сильное двулучепреломление может быть получено введением асимметричного расположения отверстия для воздуха. В любом случае, константа взаимодействия мод (beat length) может быть настолько мала (несколько миллиметров или даже меньше), что дополнительное механическое напряжения может вызывать только низкий уровень смешения состояний поляризации. Конструкций волокон такого типа несколько. Наиболее часто используемые:



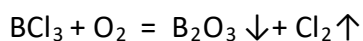
Рис. 4. Поперечное сечение волоконных световодов конфигураций «галстук-бабочка», «панда» и с эллиптической оболочкой

Затемнённые элементы здесь – участки кварцевого стекла с высоким содержанием трёхоксида бора B_2O_3 . Такое стекло обладает меньшим показателем преломления и большим коэффициентом термического расширения. При схлопывании преформы и вытяжке волокна бор – содержащие области сильно сжимают окружающие слои и создают механические напряжения внутри сердцевинки. Эти напряжения различны для осей x и y , что и создаёт анизотропию оптических свойств за счёт упругооптического эффекта. Эффективный показатель преломления оказывается больше для волны, поляризованной вдоль оси сжатия (медленная ось), соответственно, фазовая постоянная для этой поляризации также будет больше, чем для ортогональной:

$$\beta = 2\pi n_{\text{эфф}} / \lambda$$

Технология изготовления таких волокон несколько отличается от стандартного MCVD – метода. Например, для волокна типа bow – tie (галстук – бабочка) процесс включает несколько стадий (рис. 6):

1. На внутреннюю поверхность опорной трубки (из чистого синтетического кварца) осаждают кольцо легированного бором кварца. Для этого в схему введён ещё один поток реагентов – трёххлористый бор BCl_3 . Реакция окисления та же, что и для двуоксида кремния:



2. После сформирования бор – содержащего кольца вращение заготовки останавливают, и пропускают через трубку пары травителя – обычно гексафторид серы SF_6 . Его распыляют узконаправленным распылителем. Меняя угол распыления, можно менять форму вытравленных напрягающих секторов.

3. После вытравливания нужных секторов вращение возобновляют, и осаждают слои внутренней оболочки и сердцевину. Для формирования нужного профиля показателя преломления к двуокиси кремния добавляют пятиокись фосфора P_2O_5 и фтор. На конечной стадии полученную преформу схлопывают в атмосфере азота.

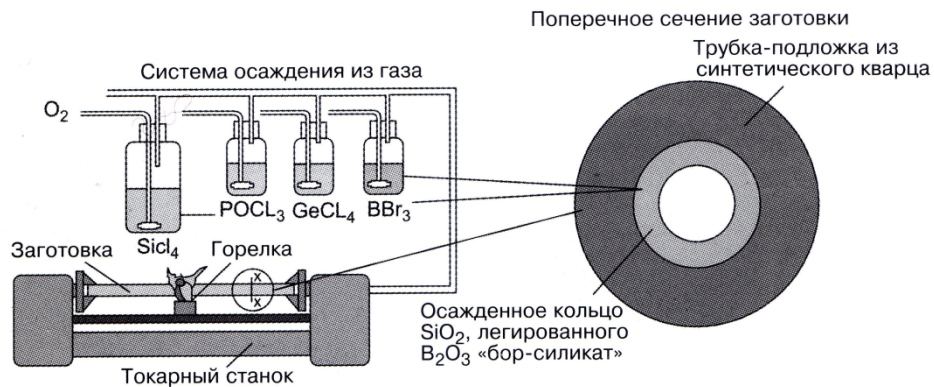


Рис. 5. Осаждение легированного бором кольца методом модифицированного химического парофазного осаждения (MCVD)

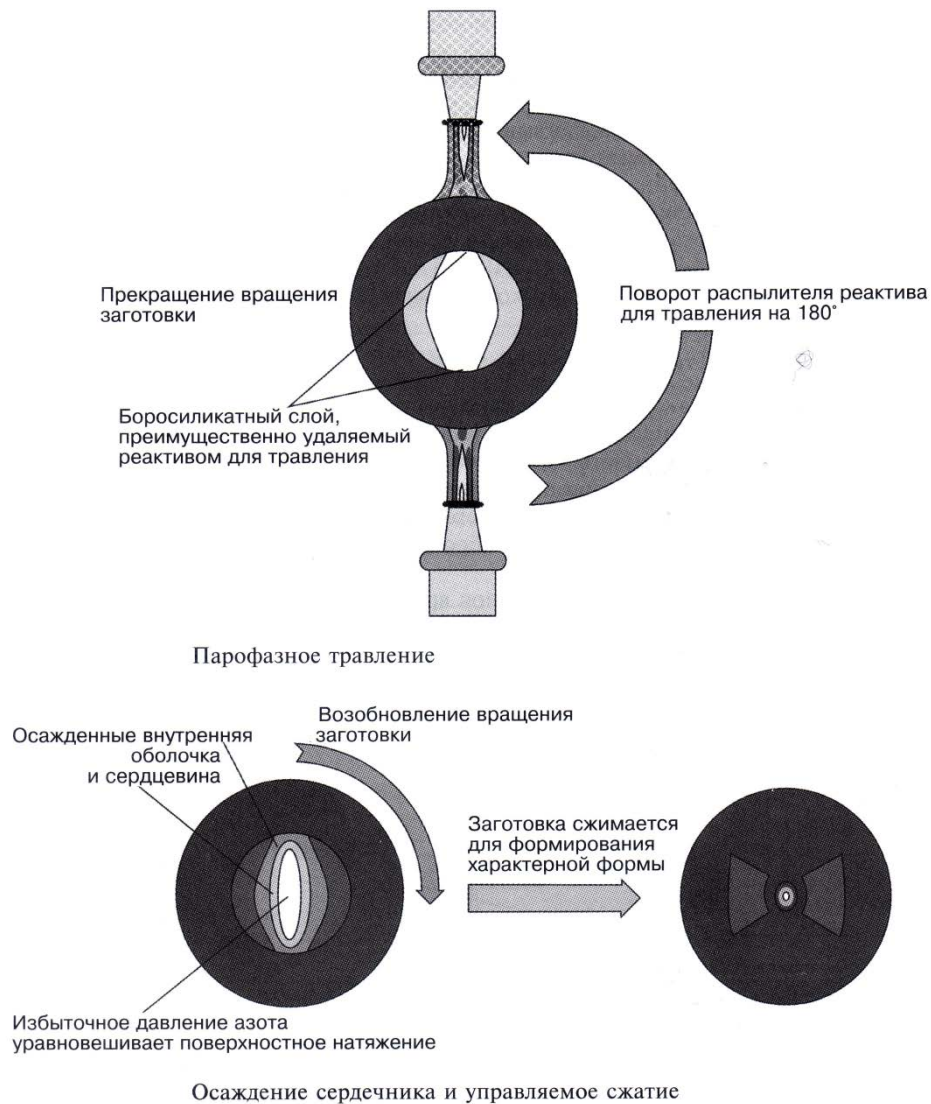


Рис. 6. Парофазное травление. Осаждение сердечника и управляемое сжатие

Волокно типа «панда» изготавливают более сложным способом. Исходная заготовка – преформа – такая же, как и для обычного стандартного одномодового волокна. В этой заготовке высверливаются два осевых канала, симметричных относительно оси сердцевины. Затем в каждое отверстие вставляется усиливающий стержень, создающий в дальнейшем механическое напряжение. Стержни изготовлены методом MCVD или «золь - гель» из кварцевого стекла, легированного трёхоксидом бора B_2O_3 . При вытяжке и последующем застывании волокна напрягающие элементы создают избыточное давление на сердцевину (из-за большего коэффициента термического расширения). Возникающий при этом эффект фотоупругости приводит к появлению наведённого двулучепреломления в сердцевине (рис. 7).

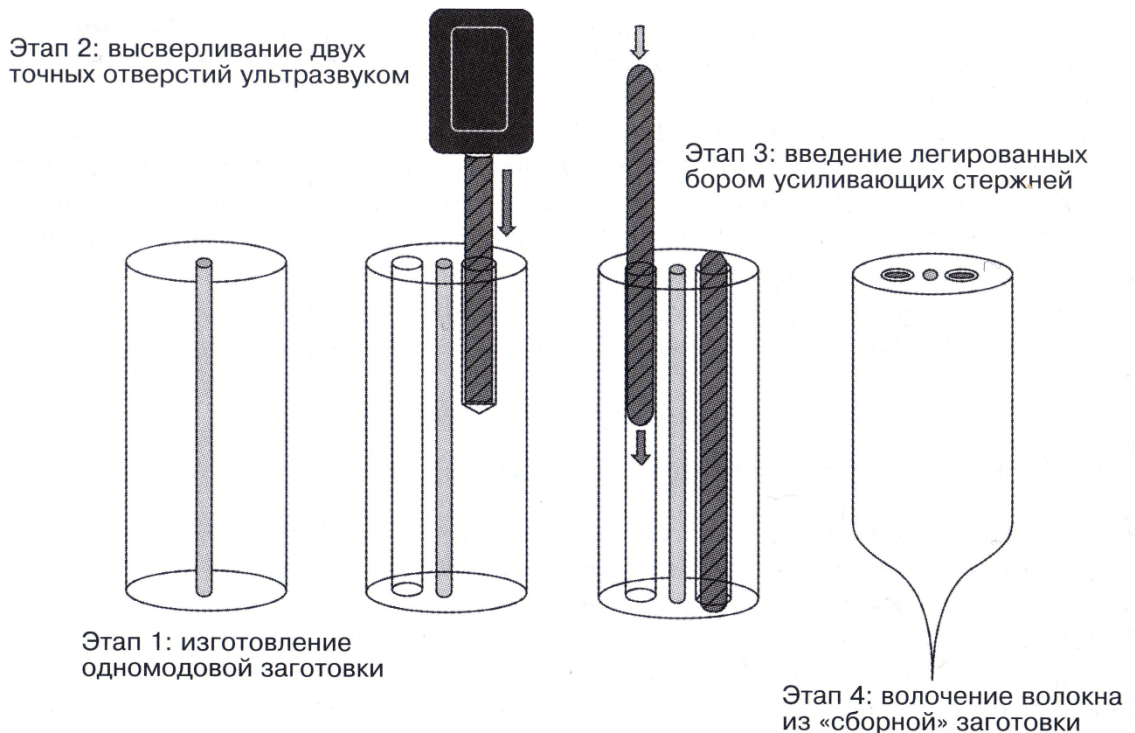


Рис. 7. Производство заготовки типа «панда» (PANDA) методом механической обработки и введения усиливающих стержней

Волокно с напрягающей эллиптической оболочкой сочетает отдельные этапы обеих предыдущих технологий. На первом этапе методом MCVD изготавливается заготовка – преформа с внутренним напрягающим кольцом (кварц, легированный бором) вокруг сердцевины (как в технологии галстук – бабочка, только без вытравливания секторов). Затем ультразвуковым фрезерованием с противоположных сторон заготовки срезают сегменты внешней оболочки. Круговая симметрия заготовки при этом нарушается (рис. 7).

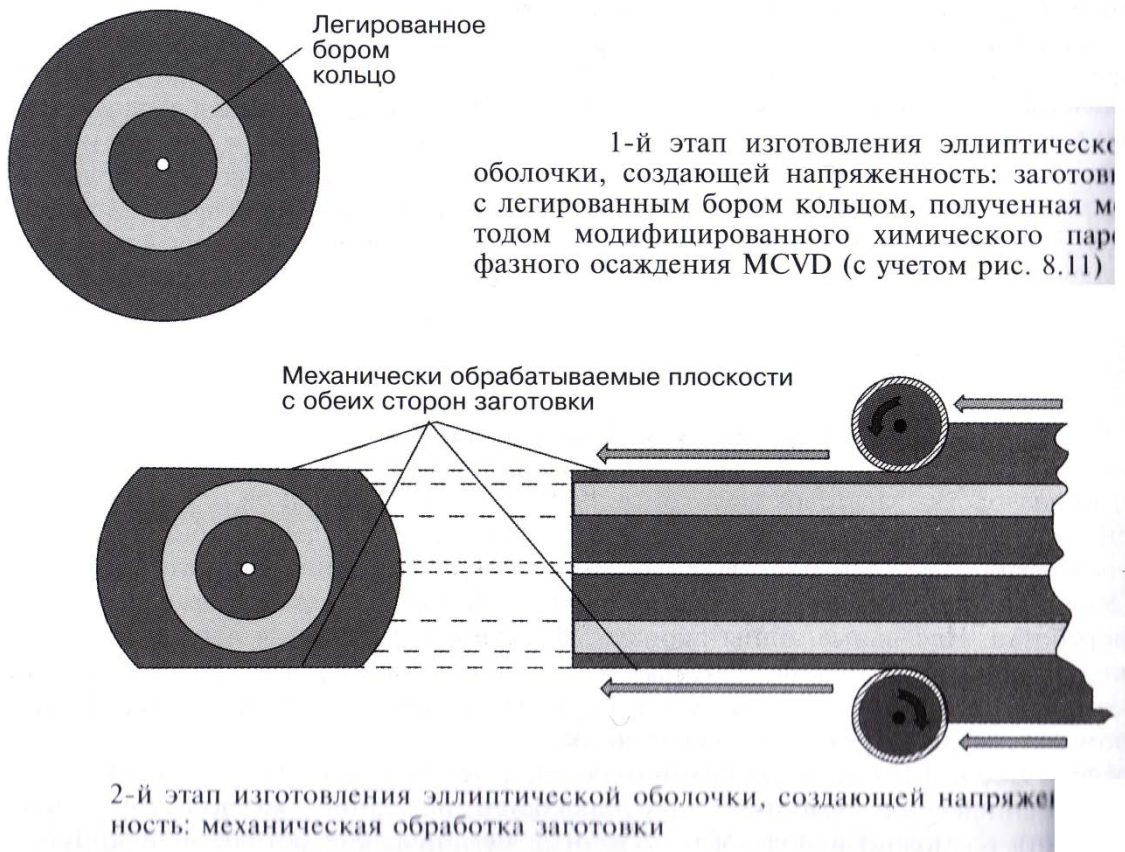


Рис. 7. Первый и второй этап изготовления оболочки

При вытягивании волокна за счёт сил поверхностного натяжения происходит округление наружной оболочки и превращение внутреннего напрягающего кольца в эллипс, который и создаёт наведённое двулучепреломление (рис. 8)

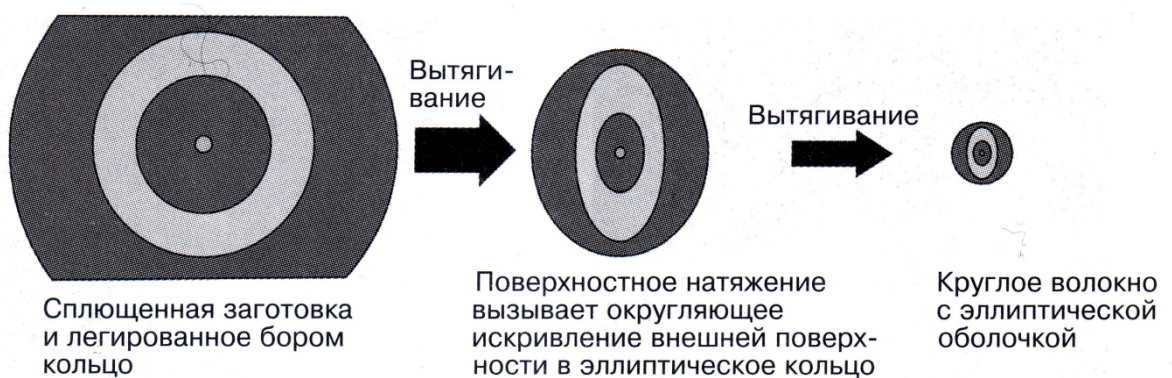


Рис. 8. Третий этап изготовления оболочки

Тема 3 Методы изготовления планарных диэлектрических волноводов

Планарный волновод

Основной структурой, предназначенной для передачи электромагнитного излучения в интегральной оптике, является тонкопленочный волновод. Он представляет собой аналог контактной металлизации электронных схем и выполняет функции информационных магистралей, по которым оптический сигнал направляется в ту или иную область пространства или часть схемы. Существуют планарные и трехмерные (канальные и полосковые) волноводы различной геометрии.

Трехмерные волноводы в отличие от планарных обеспечивают дополнительное ограничение излучения в поперечном направлении. Такое ограничение дает возможность значительно повысить степень локализации волноводного канала, что приводит к снижению управляющих напряжений волноводных модуляторов и переключателей, рабочих мощностей инжекционных лазеров, входящих в структуру интегрально–оптических схем. Применение трехмерных волноводных структур обеспечивает большую компактность и универсальность интегрально–оптических устройств за счет более высокой степени изоляции каналов друг от друга. Применение трехмерных волноводов расширяет функциональные возможности интегрально–оптических схем как за счет усложнения их схемотехнических конфигураций, так и за счет большего функционального разнообразия самих волноводных элементов, выполняемых на их основе (модуляторы и переключатели, излучающие структуры, многоканальные разветвители и др.).

Простейший планарный диэлектрический волновод представляет собой пленку прозрачного на данной длине волны диэлектрика, нанесенную на подложку из материала с более низким показателем преломления. Третьим слоем волновода (покровным) может служить воздух или любая другая среда. Чтобы удержать электромагнитную волну, показатель преломления волноводного слоя должен удовлетворять неравенствам $n_2 > n_3 > n_1$ где n_3, n_1 – показатели преломления соответственно материалов подложки и покровного слоя, рис. 1

Если показатели преломления подложки и покровного слоя равны, такой волновод называется симметричным, в противном случае – асимметричным.

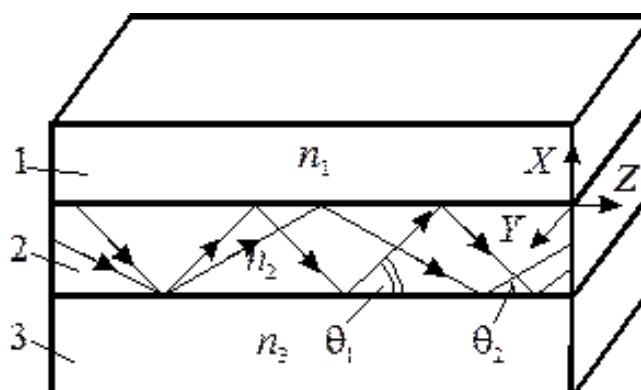


Рис. 1. Структура диэлектрического волновода, 1 – покровный слой; 2 – волновод; 3 – подложка

В простейшем случае ограничивающие свет слои с показателями преломления n_1 и n_3 распространяются до бесконечности в направлениях $+x$ и $-x$ соответственно. Главное достоинство подобного предположения состоит в том, что в направлении x нет необходимости учитывать отражение, за исключением отражения, существующего на границах $n_1 - n_2$ и $n_2 - n_3$. Плоские волноводы, находят достаточно широкое применение в различных прикладных областях интегральной оптики, несмотря на то, что с их помощью можно обеспечить ограничение оптических полей только в одном измерении. Однако другие области применения требуют ограничения оптического поля в двух измерениях. По степени локализации излучения волноводы делятся на планарные и трехмерные. В планарных область распространения света ограничена только в одном, вертикальном направлении – волноводный слой покрывает всю поверхность подложки и горизонтальный размер во много раз больше вертикального. В трехмерных волноводах оптический канал ограничен также и в поперечном направлении, так как горизонтальный размер волноводного слоя много меньше вертикального. В каждом конкретном случае выбор того или иного типа волновода определяется спецификой создаваемого прибора или устройства. Поэтому и планарные, и трехмерные волноводные структуры широко применяют в том большом разнообразии устройств, которым сегодня располагает интегральная оптика.

В интегральной оптике ограничение светового канала в одной плоскости ухудшает согласование микроволноводов с другими компонентами и стекловолоконными световодами и кабелями, осложняет локализацию оптических связей, снижает эффективность волноводных устройств. Большими степенями свободы характеризуются трехмерные волноводы, которые получили основное распространение в интегральной оптике. Основные типы трехмерных интегральных волноводов схематически представлены на рис. 2.

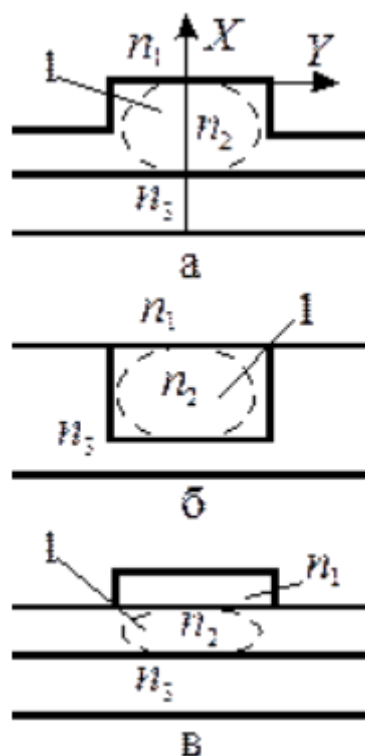


Рис. 2. Основные типы трехмерных волноводов:
а, б – канальные; в – полосковый; L – область оптического канала.

Деление трехмерных волноводов на полосковые и каналные в некоторой степени условно, тем не менее, оно отражает конструктивные особенности структур, влияющие на возможное число волноводных мод, специфику распределения полей и, следовательно, на основные их характеристики.

В канальных волноводах гребенчатого типа (рис. 2, а) значительный скачок показателя преломления в поперечном направлении, как правило, приводит к многомодовому их режиму. Погруженные канальные структуры (рис. 2, б) характеризуются промежуточными свойствами по сравнению с гребенчатыми канальными и полосковыми волноводами. Число распространяющихся мод в них определяется размером канала и разностью показателей преломления материалов, образующих волновод.

Полосковый волновод, или волновод с наложенной полоской (рис. 2, в), представляет собой планарный тонкопленочный или диффузионный волновод с узкой диэлектрической областью, нанесенной на его поверхность. Здесь практически вся световая мощность локализована под полоской диэлектрика и почти не проникает в нее. В результате неровности границ раздела между полоской и волноводом не приводят к значительным потерям излучения. В полосковых волноводах легко реализуется одномодовый или маломодовый режим работы.

Наиболее перспективны для интегральной оптики полосковые и погруженные канальные волноводы. Основные их достоинства связаны с широкими технологическими и конструктивными возможностями создания эффективных волноводных структур на их основе. К положительным характеристикам полосковых структур следует отнести слабую чувствительность к нарушениям границ диэлектрической полоски и увеличение допуска на ее формат в одномодовом режиме. В интегрально-оптических схемах ее ширина может достигать десяти и более микрон, что в значительной степени упрощает операцию стыковки волноводов.

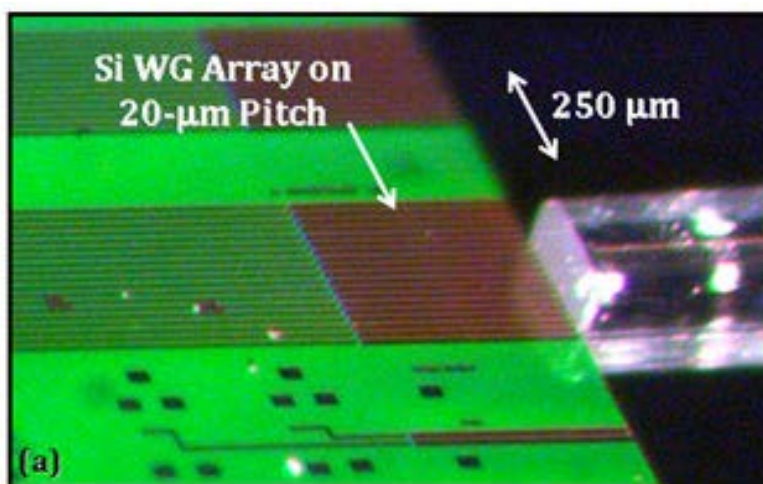


Рис. 3. Массив из 10 волноводов

Как любая направляющая структура, интегрально-оптический волновод в первую очередь характеризуется набором электромагнитных колебаний (мод), которые могут распространяться в нем. Моду диэлектрического волновода на частоте ω можно определить как решение волнового уравнения.

В зависимости от назначения, волноводные структуры, в интегральной оптике выполняются либо на пассивных, либо на активных подложках. В последнем случае волновод становится управляемым, что дает возможность выполнять на основе

волноводных компонент модуляторы, переключатели, ответвители и другие элементы интегральной оптики.

Тема 4 Интегрально-оптические конструктивные элементы

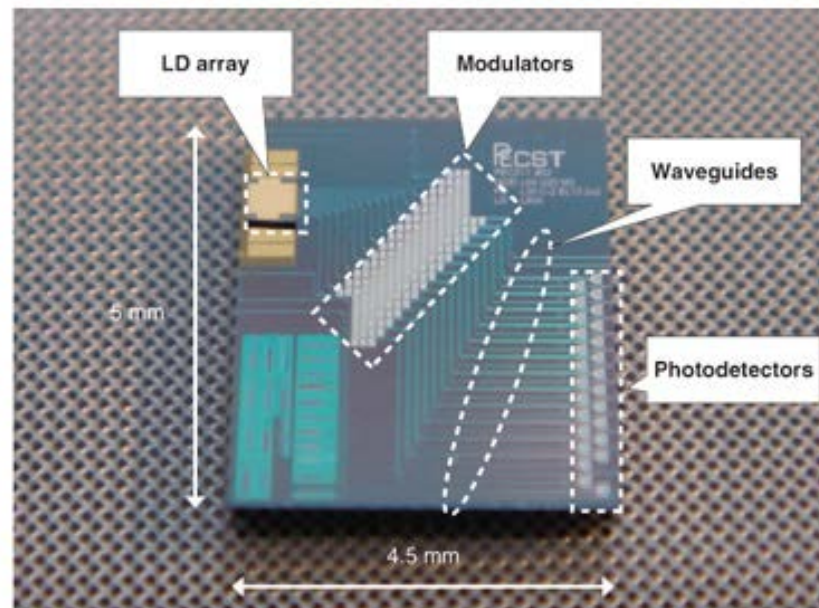


Рис. 4 Оптическая интегральная схема

Для выполнения пассивных волноводных функций используются, как правило, волноводы на стеклянных подложках. Это обусловлено относительной простотой изготовления оптических элементов в таких волноводах и стыковки их с оптическими волокнами, а также доступностью и низкой стоимостью исходного материала.

Формулировка общих принципов и поиск оптимальных вариантов согласования устройств интегральной оптики тесно связаны с основными характеристиками согласуемых волноводных структур, такими, как профили полей, спектр и количество волноводных мод и т. д. Варианты согласования можно разделить на две группы. Первая включает задачи согласования многомодовых волноводных структур, вторая — одномодовых. Для согласования волноводных структур широко применяют два основных метода: непосредственной (так называемая стыковка в торец) и распределенной связи посредством исчезающего поля поверхностной волны.

Стыковка в торец, несмотря на критичность к точности совмещения и качеству сочленяемых торцов, сегодня, по-видимому, самая распространенная. Как правило, применяют ее тогда, когда абсолютные значения и профили показателей преломления структур существенно различны: связь волокно – волновод, волновод – источник (приемник излучения и т. д.).

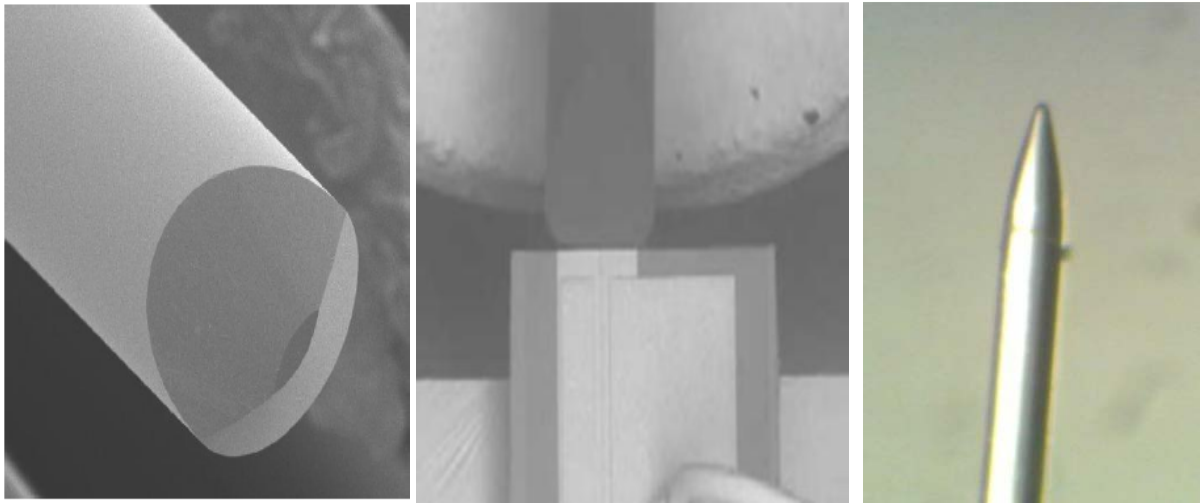


Рис. 5 Стыковка в торец

В случае распределенной связи мощность возбуждающей поверхностной волны туннелирует через боковую поверхность волноводной структуры на длине зоны связи. Метод распределенной связи свободен от жестких допусков на позиционирование согласуемых элементов. Однако применим он главным образом для структур с одинаковыми или близкими значениями показателей преломления, поскольку необходимо обеспечить совпадение постоянных распространения мод (т. е. осуществить фазовое согласование). Теоретически метод распределенной связи обеспечивает большую эффективность по сравнению со стыковкой в торец.

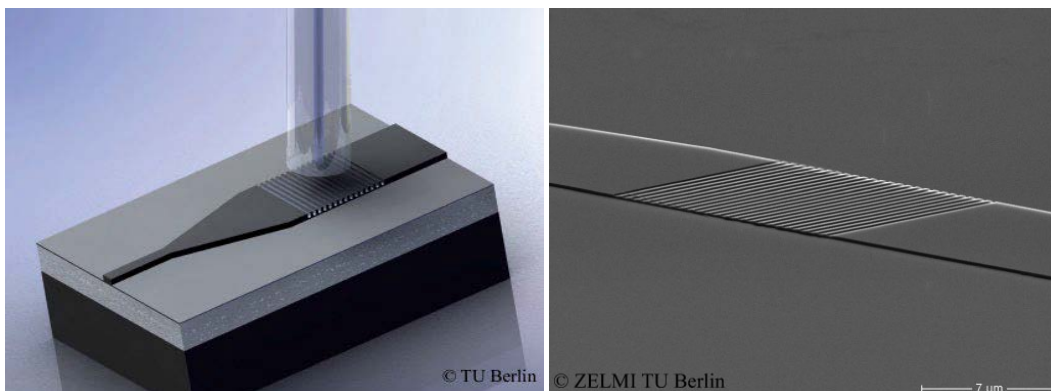


Рис. 6 Сопряжение волноводов

Мультиплексоры/демультиплексоры на основе планарных интегральных устройств. Наиболее простой способ мультиплексирования/ демультиплексирования на основе планарных технологий - на оптоволоконных направленных разветвителях (ОВНР). Она построена путем каскадного соединения одноступенчатых ячеек разветвителей типа 2:1 (два входа – один выход), дающего в итоге мультиплексор $n:1$ (рис.1.1). Такой метод построения схемы имеет значительный недостаток: высокий уровень вносимых потерь. Его можно компенсировать высоким уровнем входных оптических сигналов и установкой на выходе оптического усилителя, но такое решение годится только для мультиплексора, но непригодно для демультиплексора, входные уровни сигналов которого малы.[1]

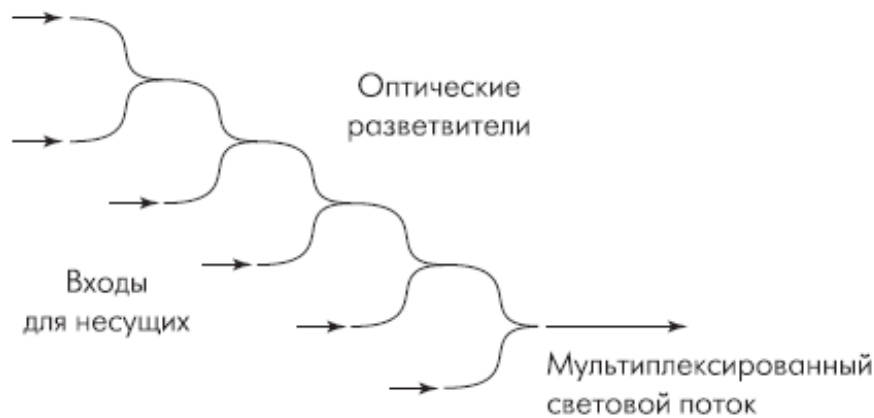


Рис.1.1. Схема мультиплексирования WDM на ОБНР.

Развитием этого способа является использование интерферометров Маха – Цендера для демультиплексов вместо разветвителей (рис. 1.2). [2]

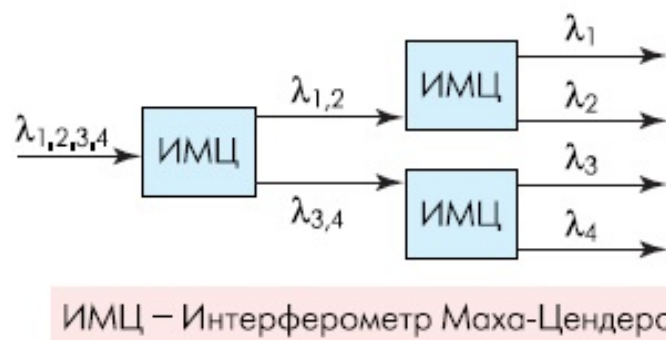


Рис. 1.2. Демультиплексор WDM на интерферометрах Маха – Цендера.

Демультиплексор построен по схеме бинарного дерева, поэтому может быть использован в системах WDM с числом несущих, равных величине 2^n . Явное преимущество этого способа – планарность схем интерферометра Маха-Цендера и простота его реализации в виде оптической интегральной схемы.

Принципы из предыдущих двух способов были объединены для создания технологии, основанной на формировании дифракционной решетки на массиве волноводов (фазосогласованных волноводных решеток) – AWG (Arrayed Waveguide Grating). [3]

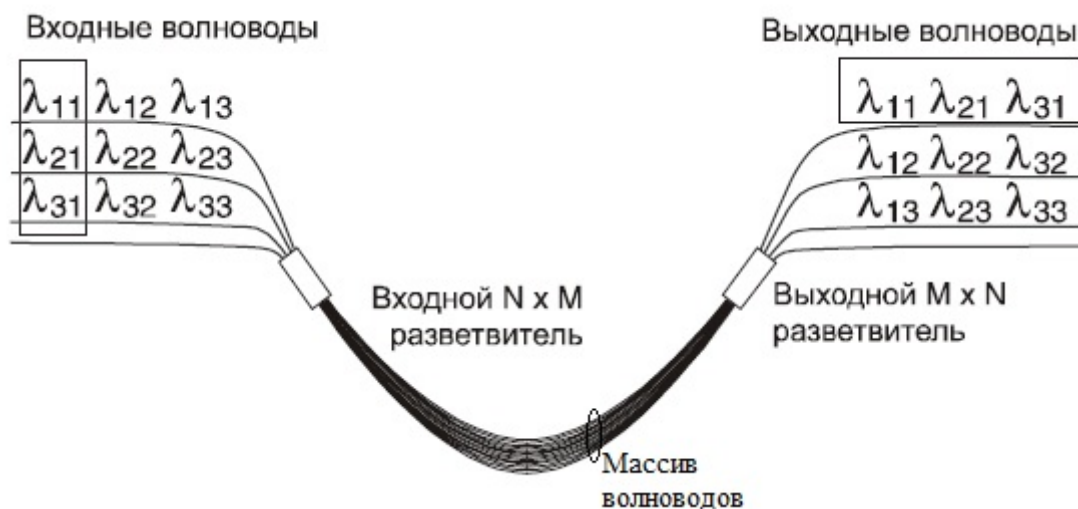


Рис. 1.3. Решетка на основе массива волноводов AWG.

Решетки на основе массива волноводов AWG используются для того, чтобы перераспределять сигналы различных длин волн (каналы) между двумя наборами волокон (рис. 1.3) или выделить (демультиплексировать) отдельные каналы составного сигнала в отдельные волокна. [2,3]

Входной и выходной разветвители и массив волноводов в рассмотренной конструкции можно реализовать на одной кремниевой подложке, что важно для функциональной связки с другими оптоэлектронными элементами схемы (фотодетектором и др.).

Волноводы реализуются в виде планарных оптоволоконных световодов (диоксид кремния, легированный Ge или Ta), сформированных на этой же подложке. На рис. 1.4 представлен внешний вид демультиплексора AWG в интегрально-оптическом исполнении.

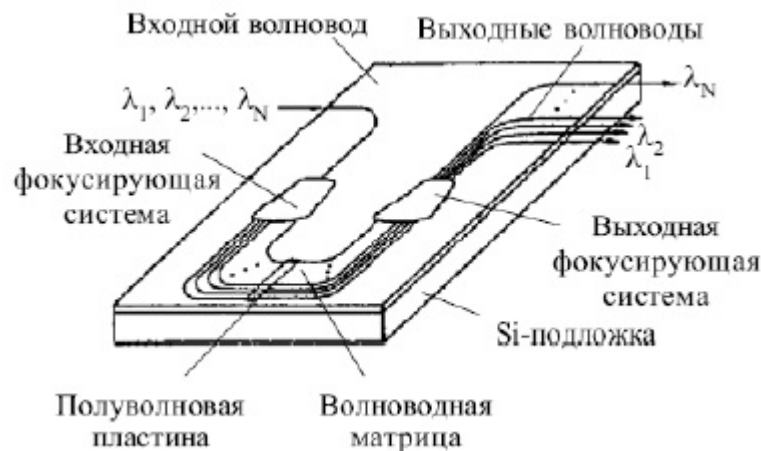


Рис. 1.4. Планарный демультиплексор AWG

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.

Принцип работы и основные параметры мультиплексора AWG

Мультиплексор $N \times N$ на основе фазированной решетки волноводов AWG (Arrayed Waveguide Grating) широко используется в оптических сетях с применением технологии WDM, которая позволяет увеличить общую пропускную способность одного оптического волокна.

В устройствах, основанных на фазированных массивах, дисперсионные и фокусирующие свойства, необходимые для демультиплексирования, обеспечиваются массивом волноводов, длина которых выбрана такой, чтобы получить требуемые изображения и дисперсионные характеристики. Устройства на фазированных массивах реализуются на обычных волноводных технологиях и не требуют этапа вертикального травления, необходимого в производстве устройств на решетках, поэтому они получают более надежными и технологичными при производстве. [4]

AWG состоит из входных и выходных волноводов, двух пластин (разветвителей), внутри которых происходит фокусировка излучения, и фазированной решетки, образованной группой волноводных каналов разной длины (рис. 2.1).

Длина каждого волноводного канала L_i отличается от соседних на фиксированную величину ΔL и вычисляется по формуле:

$$L_i = L_{i-1} + \Delta L. \quad (2.1)$$

В первой пластине расположены выходы N_{ch} входных волноводов, расстояние между которыми обозначено D_1 , и входы волноводов фазированной решетки, расстояние между которыми обозначено d_1 . Радиус кривизны обозначен f_1 . Во второй пластине расположены выходы волноводов фазированной решетки и входы N_{ch} выходных волноводов. Параметры волноводов в первой и второй пластине в общем случае различны, поэтому на рис. 2.1 для них введены другие обозначения: расстояние между соседними выходными волноводами обозначено D , расстояние между соседними волноводами фазированной решетки обозначено d , радиус кривизны обозначен f .

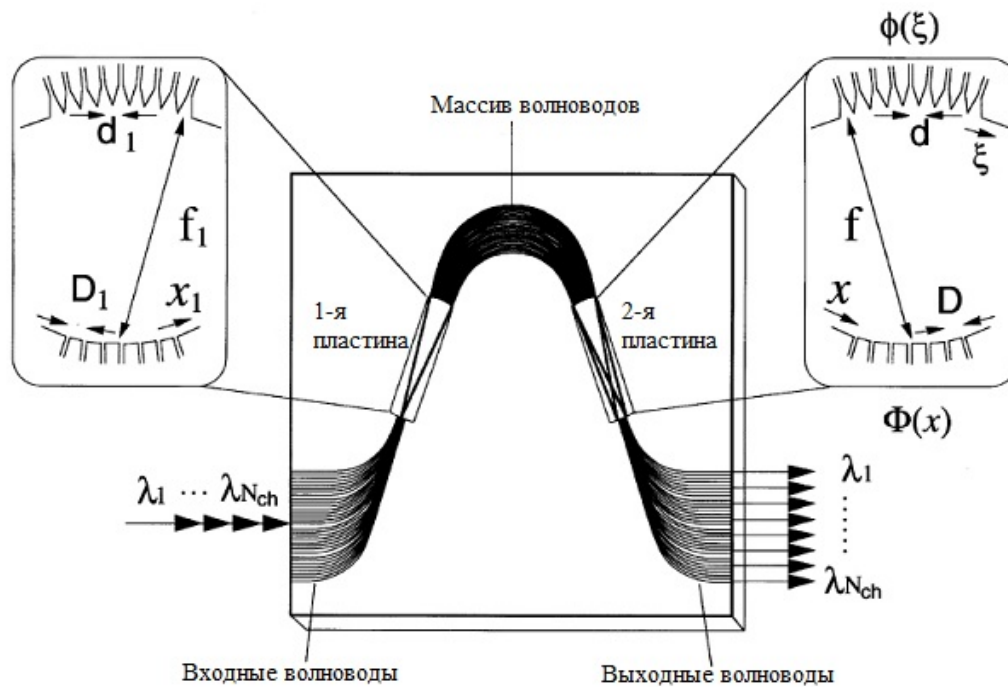


Рис. 2.1. Конструкция AWG мультиплексора

Излучение попадает в первую пластину из входного волновода, расположенного на расстоянии x_1 (x_1 отсчитывается от центра входных волноводов против часовой стрелки, см. рис. 4.1), и возбуждает волноводы фазированной решетки. В каждом из волноводов решетки возникает электрическое поле с амплитудой a_i ($i = 1 - N$), где N – число волноводов в решетке. Амплитуда электрического поля a_i имеет обычное Гауссово распределение.

После прохождения через решетку волноводов лучи света выходят во вторую пластину и в результате интерференции фокусируются в выходной волновод, расположенный на расстоянии x (x отсчитывается от центра выходных волноводов против часовой стрелки, см. рис. 2.1). Величина x зависит от длины волны сигнала, так как относительная фазовая задержка, приобретаемая излучением в каждом волноводе решетки, пропорциональна $\Delta L/\lambda$.

Пространственное разделение каналов, отличающихся по длине волны, получают размещением принимающих волноводов в надлежащие позиции вдоль плоскости изображения.

На рис. 2.2 в увеличенном масштабе показана вторая пластина. Рассмотрим интерференцию двух световых лучей, прошедших через $(i - 1)$ -ый и i -ый волноводы решетки.

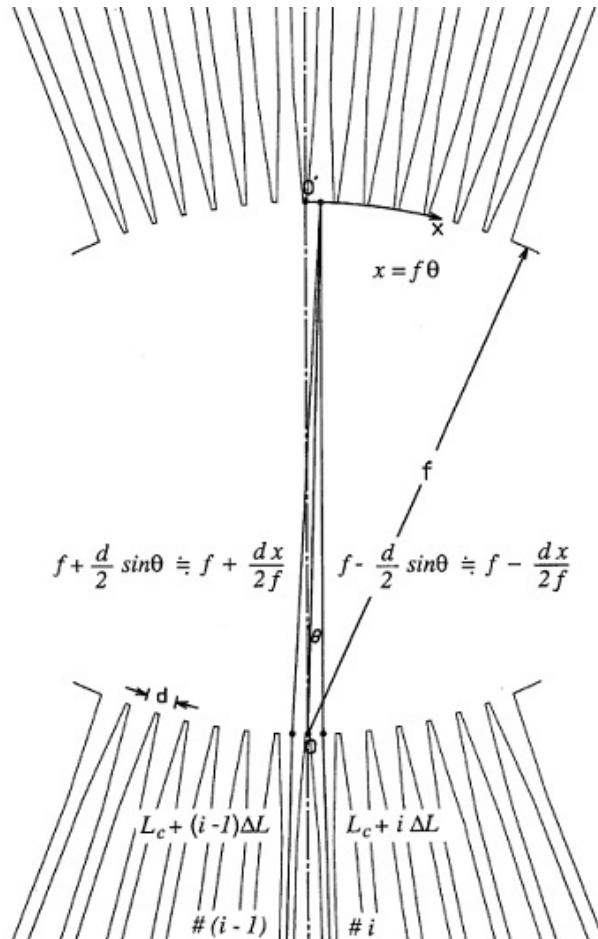


Рис. 2.2. Вторая пластина в увеличенном масштабе

На рис. 2.2 приведены точные и приближенные выражения для геометрических расстояний, которые проходят эти лучи во второй пластине. Приближение заключается в том, что угол θ мал, и можно считать, что $\sin \theta \approx \theta$. Аналогичные соотношения можно получить и для первой пластины. Для того чтобы рассматриваемые лучи в точке x сложились в фазе, их разность фаз должна быть кратна 2π . Соответствующее условие для центрального канала с длиной волны λ_0 имеет вид:

$$\beta_s(\lambda_0) \left(f_1 - \frac{d_1 * x_1}{2f_1} \right) + \beta_c(\lambda_0) [L_c + (i-1) * \Delta L] + \beta_s(\lambda_0) \left(f + \frac{d * x}{2f} \right) = \beta_s(\lambda_0) \left(f_1 + \frac{d_1 * x_1}{2f_1} \right) + \beta_c(\lambda_0) [L_c + i * \Delta L] + \beta_s(\lambda_0) \left(f - \frac{d * x}{2f} \right) - 2m\pi, \quad (2.2)$$

где β_s и β_c – постоянные распространения пластины и решетки, m – целое число (порядок дифракции), λ_0 – длина волны центрального канала системы WDM, L_c – длина самого короткого волновода решетки.

Из (2.2) путем простых преобразований получаем:

$$\beta_s(\lambda_0) \frac{d_1 * x_1}{f_1} - \beta_s(\lambda_0) \frac{d * x}{f} + \beta_c(\lambda_0) \Delta L = 2m\pi. \quad (2.3)$$

Если выполняется условие $\beta_s(\lambda_0) \Delta L = 2m\pi$, то есть для λ_0 справедливо соотношение

$$\lambda_0 = \frac{n_c \Delta L}{m}, \quad (2.4)$$

то соотношение между x_1 и x должно удовлетворять условию:

$$\frac{d_1 * x_1}{f_1} = \frac{d * x}{f}. \quad (2.5)$$

В (2.4) n_c – эффективный показатель преломления волновода решетки ($n_c = \beta_c / k$, где k – волновое число в вакууме).

Обычно параметры волноводов в первой и второй пластинах одинаковы, то есть $d_1 = d$ и $f_1 = f$. Из (2.5) следует, что в этом случае $x_1 = x$. Смещение x в зависимости от длины волны при фиксированном x_1 можно найти, про дифференцировав (2.3) по λ :

$$\frac{\Delta x}{\Delta \lambda} = -\frac{N_c * f * \Delta L}{n_s * d * \lambda_0}, \quad (2.6)$$

где n_s – эффективный показатель преломления пластины, N_c – групповой показатель эффективного показателя преломления n_c волновода решетки ($N_c = n_c - \lambda \cdot dn_c / d\lambda$).

Аналогично смещение x_1 в зависимости от длины волны при фиксированном x определяется выражением:

$$\frac{\Delta x_1}{\Delta \lambda} = \frac{N_c * f_1 * \Delta L}{n_s * d_1 * \lambda_0}. \quad (2.7)$$

Если $\Delta \lambda$ – расстояние между соседними каналами WDM, то для расстояний между входными и выходными волноводами должны быть справедливы соотношения $|\Delta x_1| = D_1$ и $|\Delta x| = D$, соответственно. Подставляя эти соотношения в уравнения (2.6) и (2.7), получим при фиксированном x_1 :

$$\Delta \lambda_{out} = \frac{n_s * d * D * \lambda_0}{N_c * f * \Delta L}, \quad (2.8)$$

при фиксированном x :

$$\Delta \lambda_{in} = \frac{n_s * d_1 * D_1 * \lambda_0}{N_c * f_1 * \Delta L}. \quad (2.9)$$

Обычно параметры волноводов в первой и второй пластинах одинаковы, то есть $D_1 = D$, $d_1 = d$ и $f_1 = f$. В этом случае $\Delta \lambda_{out} = \Delta \lambda_{in} = \Delta \lambda$ и из (2.8) или (2.9) получаем:

$$\Delta L = \frac{n_s * d * D * \lambda_0}{N_c * f * \Delta \lambda}. \quad (2.10)$$

Пространственное разделение m -го и $(m+1)$ -го порядков дифракции для излучения одной и той же длины волны можно получить из (2.3):

$$X_{FSR} = x_m - x_{m+1} = \frac{\lambda_0 * f}{n_s * d}. \quad (2.11)$$

Величина X_{FSR} (Free Spatial Range of AWG) позволяет рассчитать максимально возможное число спектральных каналов N_{ch} :

$$N_{ch} = \frac{X_{FSR}}{D} = \frac{\lambda_0 * f}{n_s * d * D}. \quad (2.12)$$

На рис. 2.3 показаны результаты моделирования методом BPM (Beam Propagation Method) процесса распространения излучения во второй пластине для центральной длины волны λ_0 (рис. 2.3a) и для более короткой длины волны $\lambda < \lambda_0$ (рис. 2.3b). Из рисунка видно, что для сигнала с длиной волны λ появляются более высокие или более низкие порядки дифракции. Так как используется обычно один из двух дифракционных порядков, вносимые потери для боковых спектральных каналов оказываются на 2-3 дБ выше, чем для центрального канала.

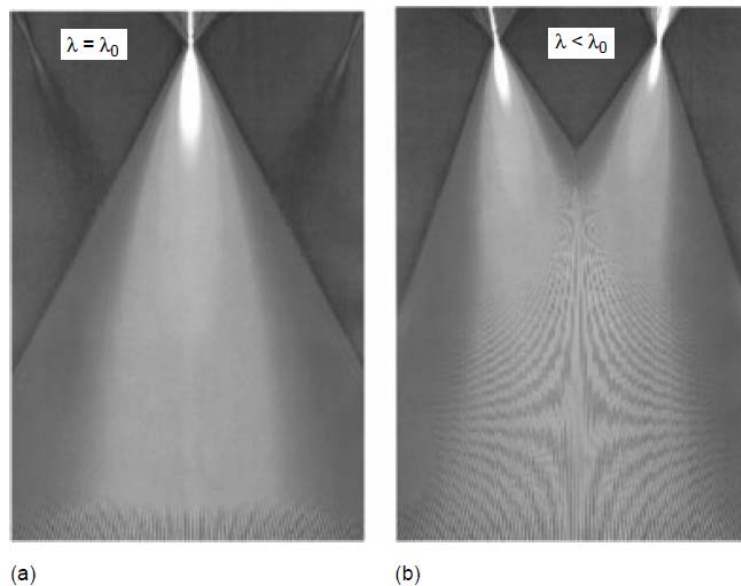


Рис. 2.3 Моделирование процессов распространения излучения во второй пластине: а – для центрального канала, б – для периферийного канала.

Распределение сфокусированного электрического поля $\Phi(x)$ на входах выходных волноводов мультиплексора AWG (рис. 2.1) можно получить, просуммировав распределения полей каждого из волноводов решетки в дальней зоне. Следовательно $\Phi(x)$ является суммой пространственных преобразований Фурье φ_i , где φ_i – распределения полей на выходах волноводов решетки. Порядок проведения операций суммирования и преобразования Фурье в линейной системе может быть любым, то есть распределение сфокусированного электрического поля $\Phi(x)$ является преобразованием Фурье всего профиля электрического поля $\varphi(\xi)$ на выходах волноводов решетки. На рисунке 2.4 схематически показано распределение электрического поля в волноводной решетке. По горизонтальной оси отложен нормированный номер волновода i/N ($i=1-N$), где N – число волноводов в решетке. Для того чтобы повысить эффективность захвата излучения решеткой волноводов (снизить потери), число волноводов в решетке должно быть достаточно большим. На рис. 2.5 показан нормированный частотный отклик AWG. Поскольку электрическое поле в волноводной решетке сегментировано (рис. 2.4) и не имеет гладкого гауссового распределения, его преобразование Фурье в фокальной позиции имеет боковые лепестки, которые видны на рис. 2.5. Эти боковые лепестки определяют теоретический уровень перекрестных помех в мультиплексоре AWG. Теоретический уровень мощности перекрестных помех в типичном мультиплексоре AWG составляет около -60 дБ. Он зависит от числа каналов AWG, а также конструкции волноводов. [5]

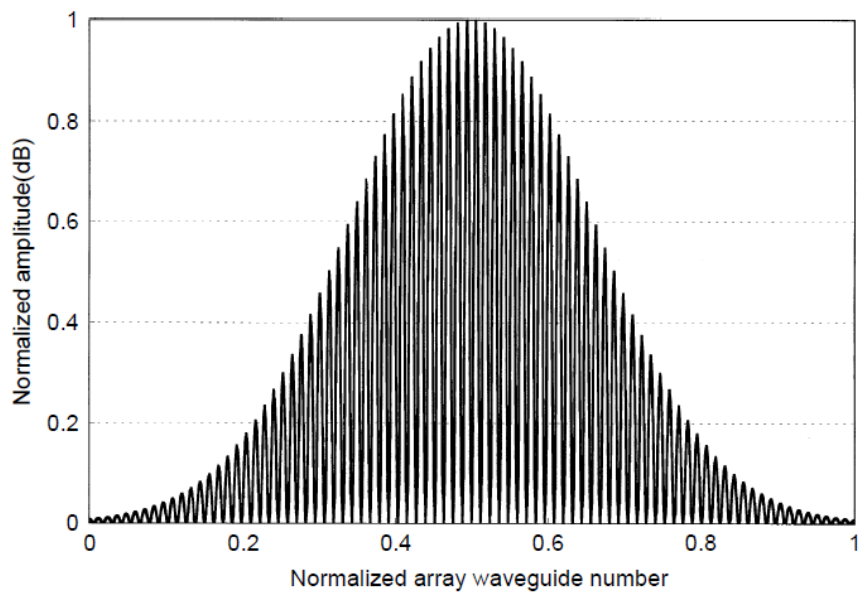


Рис. 2.4 Распределение электрического поля в решетке волноводов

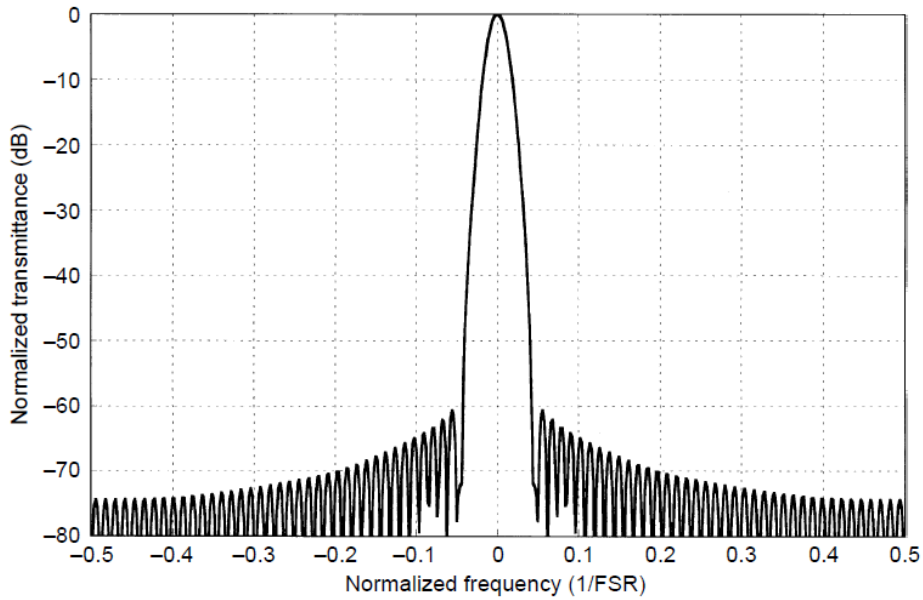


Рис. 2.5 Нормализованный частотный отклик решетки волноводов.

Тема 5 Активные интегрально-оптические элементы

Оптические усилители

В современных волоконно-оптических системах связи основными ограничивающими факторами являются затухание, дисперсия и нелинейные оптические эффекты. Для компенсации потерь оптической мощности в тракте используют такие устройства как оптические усилители.

Поскольку затухание сигнала и дисперсия возрастают по мере увеличения длины волокна, в какой-то момент в волоконно-оптической линии связи оптический сигнал необходимо будет регенерировать. Изначально в основе регенерации лежит принцип 3R (reshaping-retiming-retransmission). Он включает детектирование (опто-электронное преобразование), электрическое усиление, синхронизацию, формирование импульсов и повторную передачу (электро-оптическое преобразование).

Этот метод имеет ряд недостатков. Это связано с нарушением оптической связи и зависимости от формата модуляции сигнала и битовой скорости. Подобный процесс восстановления сигнала не является оптически прозрачным. В идеальном случае усилитель не должен зависеть от свойств входного оптического сигнала.

Существует два наиболее распространенных типа оптических усилителей: SOA и OFA. Данные усилители обеспечивают увеличение мощности оптического излучения без промежуточного преобразования оптического сигнала в электрический. OFA получили гораздо более широкое распространение благодаря тому, что их параметры почти во всем превосходят аналогичные в SOA. Однако полупроводниковые оптические усилители представляют интерес в качестве функциональных элементов в оптических сетях. Полупроводниковые оптические усилители компактны, относительно дешевы и являются универсальными устройствами. Они имеют преимущество перед другими оптическими усилителями в том, что включают возможности обработки сигналов с помощью нелинейных эффектов в полупроводнике, а так же могут быть использованы при создании интегральных оптических схем.

Полупроводниковые оптические усилители

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.

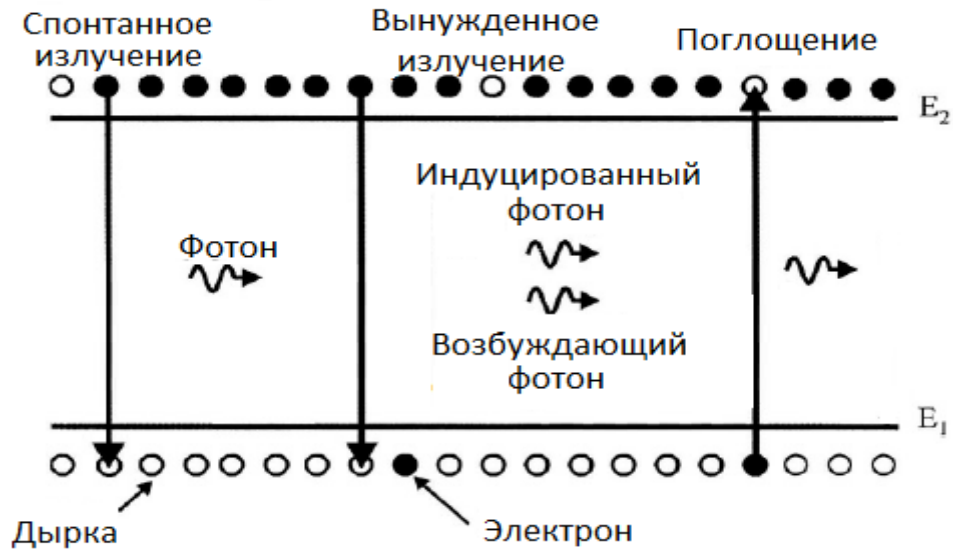


Рис. 1. Спонтанные и вынужденные процессы в двухуровневой энергетической системе.

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.

Конструкция полупроводникового усилителя представляет собой две металлические подложки, между которыми располагаются слои вещества с p- 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 являются 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:

Большой коэффициент усиления

Широкая полоса пропускания

Незначительные потери при отражении от торцевых покрытий

Малая поляризационная чувствительность

Высокая выходная мощность насыщения

Ограничение аддитивных шумов теоретическим пределом

Нечувствительность к скорости и модуляционным характеристикам входного сигнала

Многоканальное усиление без перекрестных помех

Отсутствие нелинейных эффектов

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 р-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. [2]

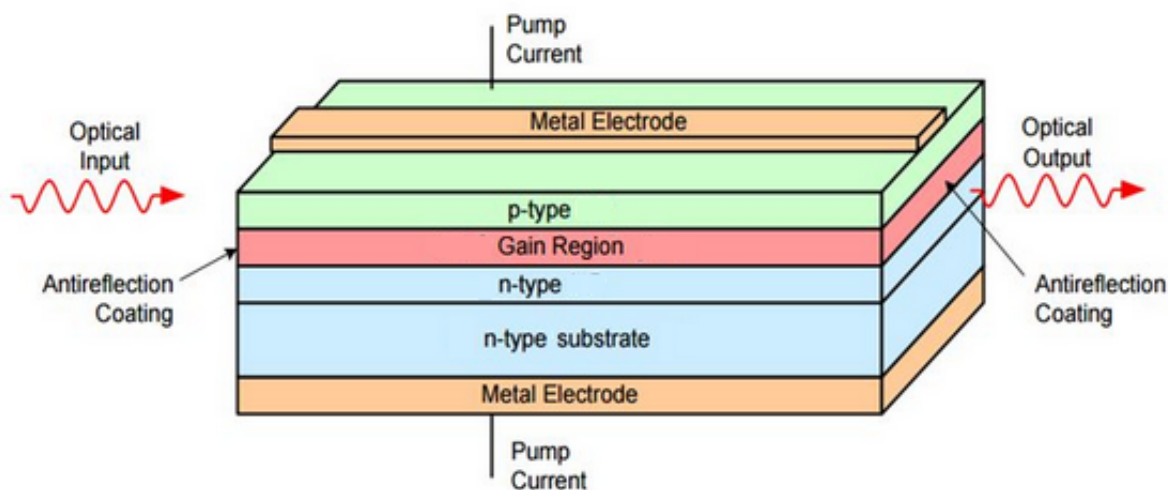


Рис. 2. Структура полупроводникового усилителя.

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 DH это достигается за счет разницы между шириной запрещенной зоны активного слоя и областями оболочки. Это ограничивает носителей в области между барьерами.

В результате только в центральной внутренней области плотность носителей будет достаточно велика, чтобы придать усиление 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 DH 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) модой, где магнитное поле поляризовано плоскости гетероперехода. Режим является поперечным, потому что связанные с ним электрическое и магнитное поля нормальны к направлению распространения. [3]

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. [4]

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. [2,5]

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. [4,6]

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

Таблица 1 - Материалы для SOA в ВОЛС

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
----------------------	----------	----------	----------	-----------	---------	---------

Основные параметры и их влияние на работу усилителя

Наиболее распространенным применением SOA является блок оптического усиления. Для такого назначения список желаемых свойств приведен в главе 2. Цель большинства исследований и SOA - реализовать эти свойства в практических устройствах. Основные параметры представлены в табл.2.

Таблица 2 - Типичные параметры SOA и их характеристики

Параметры SOA	Характеристика
Максимальный коэффициент усиления, дБ	30
Вносимые потери, дБ	6-10
Поляризационная чувствительность, дБ	4
Тип накачки	Электрическая
Полоса усиления, нм	30-50
Нелинейные эффекты	Сильно выражены
Выходная мощность насыщения, дБм	5-20
Коэффициент шума, дБ	7-12
Возможность использования в качестве функционального элемента	Есть

Коэффициент усиления

В общем случае для SOA существуют два основных определения усиления. Первый - это внутреннее усиление SOA, которое является просто отношением мощности входного сигнала на входном торце усилителя к мощности сигнала на выводном торце. Второе определение - коэффициент усиления от волокна к волокну, который включает потери на входе и выходе. Эти выигрыши обычно выражаются в дБ. Спектр усиления конкретного SOA зависит от его структуры, материалов и рабочих параметров. Для большинства применений требуется высокое усиление и широкая полоса усиления. Типичные максимальные внутренние выигрыши, достигаемые в практических устройствах, находятся в пределах от 30 до 35 дБ.

Полоса усиления

Ширина полосы усиления усилителя определяется как диапазон длин волн, при котором усиление сигнала не менее половины его пикового значения. Широкополосные SOA-полосы особенно полезны в системах, где требуется многоканальное усиление, например, в сетях WDM. Широкая полоса усиления может быть достигнута в SOA с активной областью, изготовленной из материала с квантовыми ямами. Типичные полосы усиления малого сигнала находятся в диапазоне от 30 до 60 нм.

Поляризационная чувствительность

В общем случае коэффициент усиления SOA зависит от состояния поляризации входного сигнала. Эта зависимость обусловлена рядом, факторов, в том числе структурой волновода, зависящей от поляризации характером антиотражающих покрытий и усиливающего материала. SOA, построенные по каскадному принципу, усиливают эту поляризационную зависимость. Усилительный волновод характеризуется двумя взаимно

ортогональными поляризационными модами, называемыми поперечными электрическими (ТЕ) и поперечными магнитными (ТМ) модами. Состояние поляризации входного сигнала обычно находится где-то между этими двумя крайностями. Поляризационная чувствительность SOA определяется как величина разности между коэффициентом усиления ТЕ-режима и коэффициентом усиления ТМ-моды, т.е.

$$G_{TE|TM} = |G_{TE} - G_{TM}|(\text{дБ}) \quad (3)$$

Выходная мощность насыщения

Коэффициент усиления SOA зависит как от мощности входного сигнала, так и от внутреннего шума, генерируемого процессом усиления. По мере увеличения мощности сигнала носители в активной области истощаются, что приводит к уменьшению коэффициента усиления усилителя. Это насыщение усиления может вызвать значительное искажение сигнала. Оно также может ограничить выигрыш, достигаемый при использовании SOA в качестве многоканального усилителя. На рис. 3 продемонстрирован вид зависимости усиления полупроводникового усилителя от выходной мощности сигнала. После достижения определенного предельного уровня, усиление утрачивает линейную зависимость и стремительно убывает. Именно этот предельный уровень и характеризуется выходной мощностью насыщения. [7]

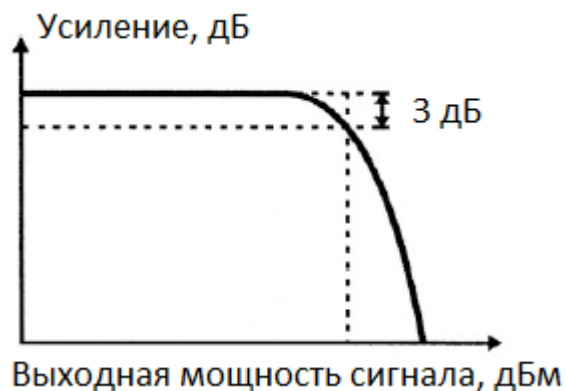


Рис. 3. Зависимость усиления сигнала от его выходной мощности.

Полезным параметром для количественного определения насыщения усиления является величина, которая определяется как мощность выходного сигнала усилителя, при которой коэффициент усиления усилителя вдвое меньше коэффициента усиления малого сигнала. Значения в диапазоне от 5 до 20 дБм для типичны для практических устройств.

Коэффициент шума

Полезным параметром для количественного определения шума оптического усилителя является показатель шума F , определяемый как отношение отношения входных и выходных сигналов к шуму:

$$F = \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{ВХ}}}{\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{ВЫХ}}} \quad (4)$$

Отношение сигналов к шуму представлены для случая, когда входная и выходная мощности усилителя обнаруживаются идеальным фотоприемником. [1]

Типичные собственные шумовые показатели практических SOA находятся в диапазоне от 7 до 12 дБ. Показатель шума ухудшается за счет потерь на входе усилителя. Потери связи

обычно составляют порядка 3 дБ, поэтому коэффициент шума типичных SOA составляет от 10 до 15 дБ.

Динамические эффекты

SOA обычно используются для усиления модулированных световых сигналов. Если мощность сигнала высока, тогда происходит насыщение усиления. Это не было бы серьезной проблемой, если бы динамика усиления усилителя была медленным процессом. Однако в SOA динамика усиления определяется временем жизни рекомбинирующих носителей (среднее время рекомбинации несущей с дыркой в валентной зоне). Это время жизни обычно составляет несколько сотен пикосекунд. Это означает, что коэффициент усиления усилителя будет быстро реагировать на изменение мощности входного сигнала. Это динамическое усиление может вызвать искажение сигнала, которое становится более серьезным по мере увеличения полосы частот модулированного сигнала. Эти эффекты еще более усугубляются в многоканальных системах, где динамическое усиление приводит к межканальным перекрестным помехам. В легированных волоконных усилителях времена жизни рекомбинации составляют порядка миллисекунд, что приводит к незначительному искажению сигнала.

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 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.

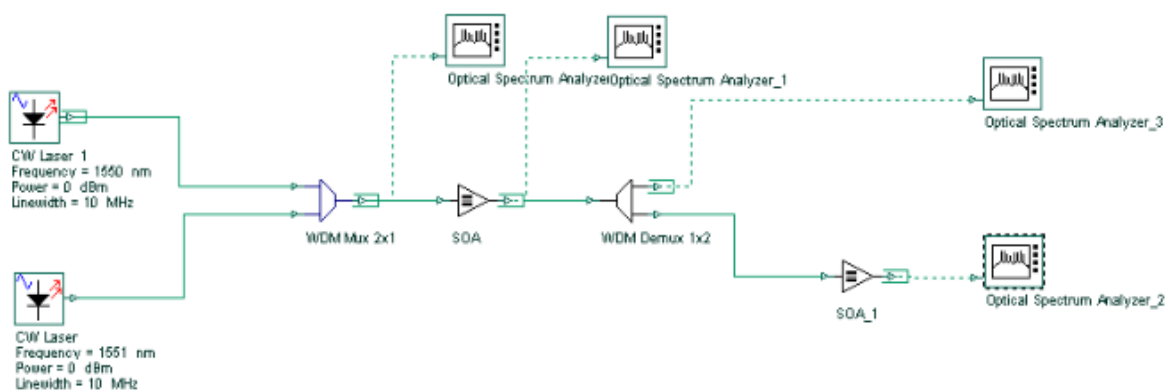


Рис. 1. Схема моделирования четырехволнового смешения

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 демultipлексируется, и вновь подвергается усилению. На рисунке 2 представлен процесс изменения спектра сигнала (спектр мультиплексированного сигнала до прохождения усилителя, после прохождения усилителя и после демultipлексирования 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.

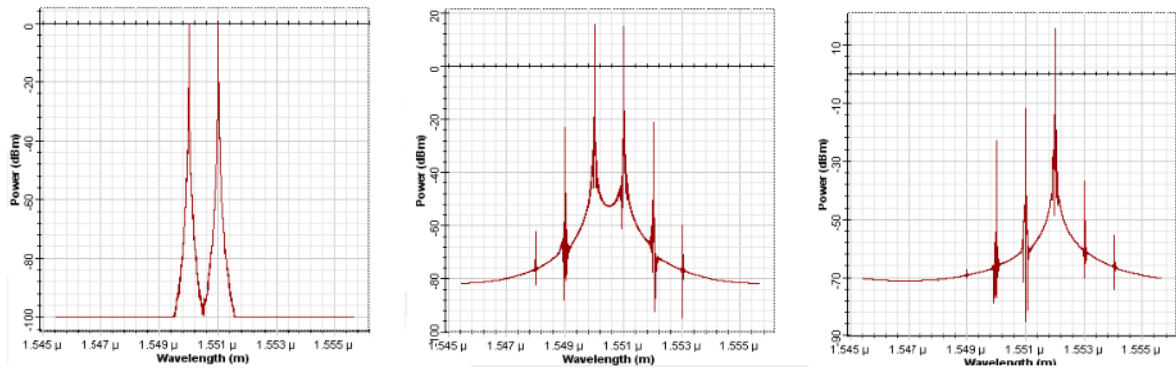


Рис. 2. Изменение спектра сигнала

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 тем 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.

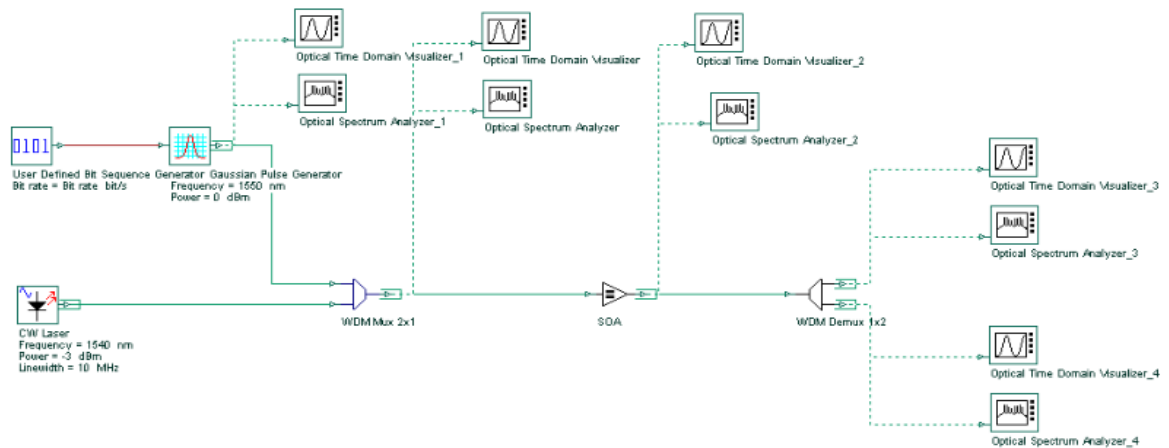


Рис. 3. Схема исследования конвертора на кроссмодуляции усиления

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.

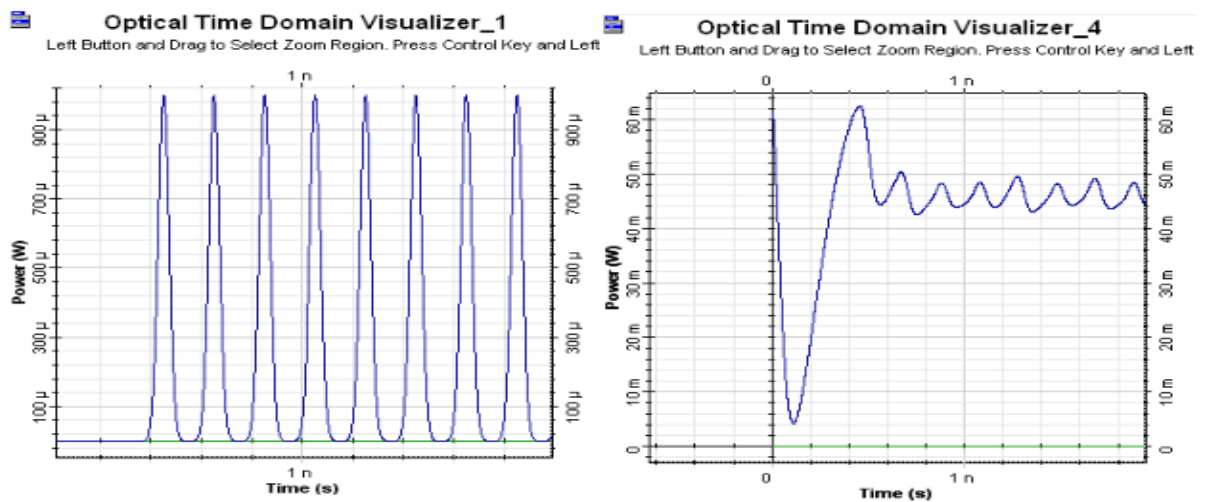


Рис. 4. Гауссовские импульсы и промодулированный ими сигнал

Его форма после демultipлексирования 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 демultipлексирования).

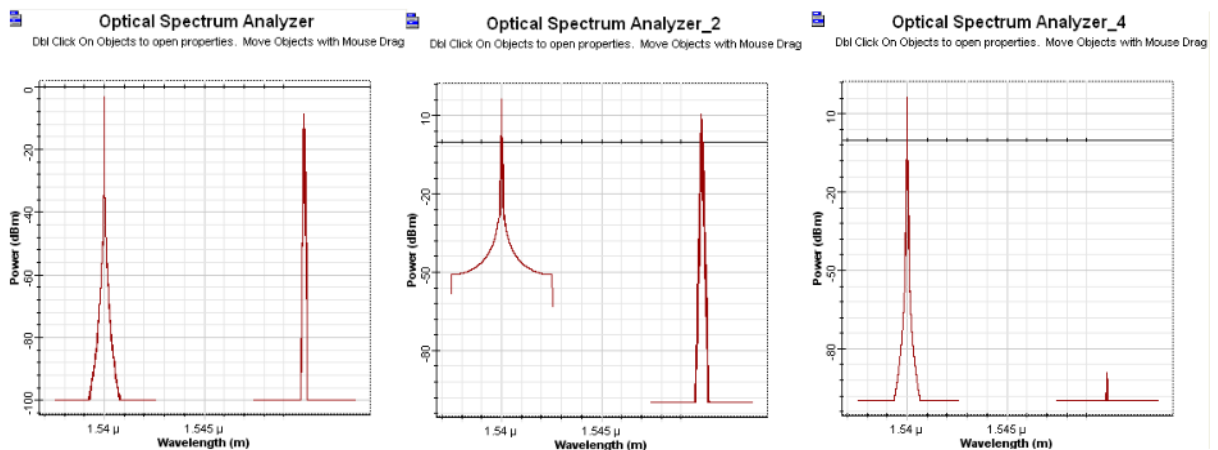


Рис.5. Изменение спектра сигнала при прохождении тракта

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]

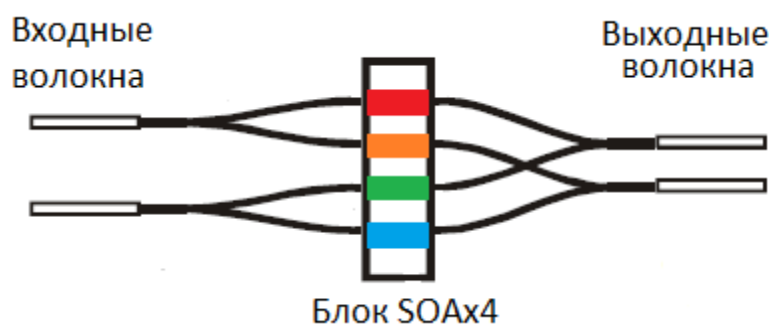


Рис. 4. Логический оптический элемент на основе SOA

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 смещенного 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, противонаправленные 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 демультиплексеры

Демультиплексеры с временным разделением каналов и мультиплексеры 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

Нелинейность

SOA также демонстрируют высокую чувствительность к нелинейным эффектам. Эти процессы могут вызывать такие проблемы, как частотная генерация продуктов нелинейности второго и третьего порядка. Однако нелинейные эффекты также могут быть полезны при использовании SOA в качестве функциональных устройств, таких как преобразователи длины волны. Подробнее об этом способе использования полупроводниковых усилителей будет рассказано при моделировании данного устройства.

Тема 7 Интегрально-оптические элементы

Интегральная оптическая схема или фотонная интегральная схема (ФИС) (англ. photonic integrated circuit или integrated optical circuit, сокр. PIC) — многокомпонентное фотонное устройство, изготовленное на подложке и выполняющее функции обработки оптических сигналов. Компоненты, которые могут присутствовать на ФИС, включают волноводные межсоединения, делители мощности, оптические усилители, оптические модуляторы, фильтры, лазеры и детекторы. На сегодняшний день оптические интегральные схемы находят самое широкое применение.

Устройства, все компоненты которых изготовлены путём введения примесей или структурирования материала подложки, называются монолитными ФИС. В качестве материала подложек для монолитных ФИС обычно используются GaAs или InP, которые называются AIII BV соединениями, так как состоят из элементов, расположенных в III и V столбцах периодической таблицы Менделеева. В устройствах, изготавливаемых на подложках из AIII BV соединений, используются примеси, позволяющие управлять шириной запрещённой зоны и, следовательно, рабочей длиной волны активных устройств — лазеров и усилителей.

Некоторые функциональные устройства (к примеру, полупроводниковые лазеры) проще приклеить, чем интегрировать в материал подложки и сформировать гибридные ФИС. Гибридные ФИС изготавливают на подложке из ниобата лития, кремния, стекла, реже — на подложке из полимеров. Ниобат лития используется в качестве подложки ввиду его высокого электрооптического коэффициента. Кремний — очень перспективный материал для создания ФИС, так как позволяет использовать технологии, разрабатываемые для электронных интегральных схем и, вероятно, самое главное, — позволяет объединять фотонные и электронные интегральные схемы. Стекло или оргстекло (полиметил метакрилат) имеют низкую себестоимость и широко распространены; кроме того, на основе ряда стекол, легированных редкоземельными элементами, можно изготавливать лазеры и оптические усилители.

На сегодняшний день оптические интегральные схемы имеют самое широкое применение, при этом ключевой областью их использования являются оптические сети и системы связи, а также оборудование стойкое к воздействию электромагнитного импульса.

Реконфигурируемые мультиплексоры ввода–вывода для систем оптической связи являются примером фотонных интегральных схем, которые заменили собой мультиплексоры на основе дискретных элементов. Другой пример широко используемой в оптических системах связи ФИС — оптический передатчик, в котором на одном чипе объединены его основные компоненты: полупроводниковый лазер с распределённой обратной связью, электрооптический модулятор и полупроводниковый усилитель. Использование ФИС позволяет изготавливать более компактные и сравнительно высокопроизводительные оптические системы (по сравнению с системами на основе дискретных оптических компонентов), а также предоставляет возможность их интеграции с электронными схемами для миниатюризации многофункциональных оптико-электронных систем и приборов.

Технология производства ФИС похожа на технологию, используемую при производстве электронных ИС. При изготовлении элементов интегральной оптики могут применяться следующие технологии: вакуумное напыление, ионное легирование, ионный обмен, диффузия, золь-гель технологии, эпитаксия, литография, фотолитография, лазерная

литография, рентгеновская литография, электронно-лучевая и ионно-лучевая литографии, голографическая фотолитография.

Литография применяется для разметки подложки с целью проведения травления и нанесения необходимых материалов. Литография (lithography) – технология переноса рисунка с шаблона на конкретную поверхность (полимерную пластину, полупроводниковую подложку и т.д.) с помощью светового излучения (фотолитография), рентгеновского излучения (рентгенолитография), потока электронов/ионов (электронно-лучевая/ионно-лучевая).

В основе литографических процессов лежит нанесение фоточувствительного слоя (фоторезиста), экспонирование на покрытие соответствующего рисунка и последующее травление или изменение физических и оптических свойств подложки через отверстия в маске, сформированной на ее поверхности. В результате травления на подложке формируется рельефный рисунок, повторяющий рисунок маски. В литографии применяют процессы влажного (химического) травления в жидких средах и сухого травления в плазме. После завершения процесса травления маску из фоторезиста удаляют путем растворения в ином растворителе. Подложку тщательно промывают, высушивают и проводят контроль качества травления. Наиболее детально отработаны процессы травления кремния, так как он широко используется в микроэлектронике и интегральной оптике.

Гетероструктуры из тонких слоев полупроводниковых материалов можно выращивать посредством эпитаксии.

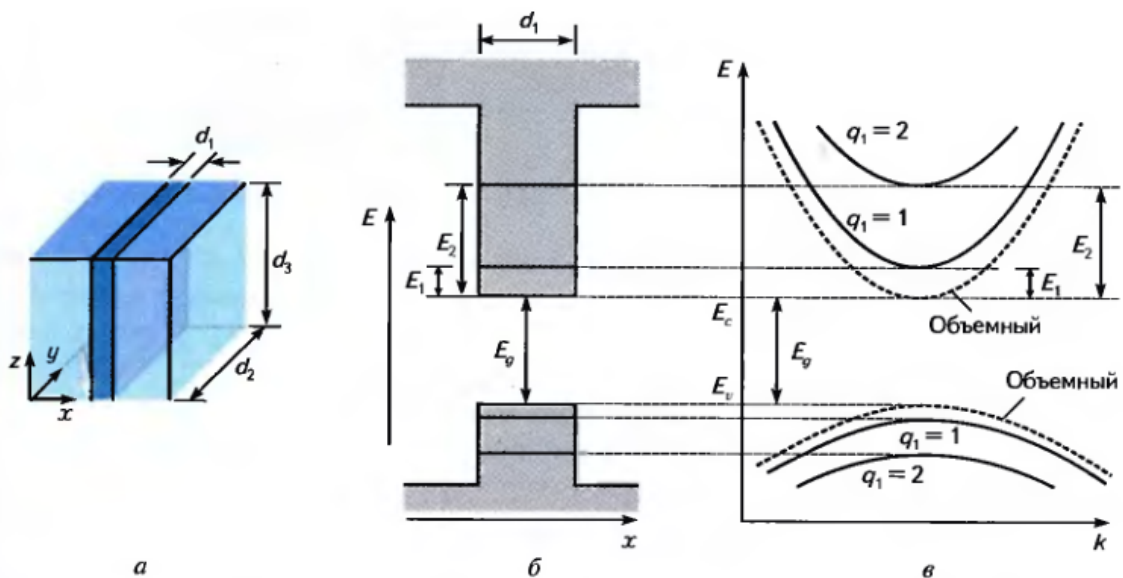
Эпитаксия — это закономерное нарастание одного кристаллического материала на другом (от греч. «на» и «упорядоченность»), то есть ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого (подложки). Строго говоря, рост всех кристаллов можно назвать эпитаксиальным: каждый последующий слой имеет ту же ориентировку, что и предыдущий. Различают гетероэпитаксию, когда вещества подложки и нарастающего кристалла различны (процесс возможен только для химически не взаимодействующих веществ, например, так изготавливают интегральные преобразователи со структурой кремний на сапфире), и гомоэпитаксию, когда они одинаковы. Эпитаксия особенно легко осуществляется, если различие постоянных решёток не превышает 10 %. При больших расхождениях сопрягаются наиболее плотноупакованные плоскости и направления. При этом часть плоскостей одной из решёток не имеет продолжения в другой; края таких оборванных плоскостей образуют дислокации несоответствия.

Существует целый ряд технологических методов и приемов эпитаксии, позволяющих вырастить монокристаллические слои полупроводников и диэлектриков на монокристаллических подложках: молекулярно-лучевая эпитаксия, эпитаксия из жидкой фазы, газофазная эпитаксия и др. Технология молекулярно-лучевой эпитаксии является эффективной для изготовления структур с очень малыми размерами. Она позволяет укладывать атомы с точностью до одного-двух слоев, создавать искусственные кристаллы, молекулы и даже атомы с заданными свойствами. Молекулярно-лучевая эпитаксия основана на химическом взаимодействии исходных компонентов пленки с нагретой монокристаллической подложкой при осаждении этих компонентов с помощью нескольких молекулярных пучков. Установка молекулярно-лучевой эпитаксии состоит из вакуумной камеры с несколькими источниками молекулярных пучков. Каждый из источников формирует пучок заданного химического состава. Одновременная реакция реагентов из нескольких пучков с нагретой монокристаллической подложкой позволяет формировать сложные многокомпонентные эпитаксиальные слои. Эпитаксия проводится в сверхвысоком вакууме. Скорость потоков из каждого источника и температура

подложки модулируются по заданной программе, что позволяет создавать эпитаксиальные слои с контролируемой толщиной с точностью. Скорость эпитаксиального наращивания в данном методе очень мала – не более 1 мкм/ч, однако, данный метод позволяет создавать наиболее совершенные и сложные эпитаксиальные структуры.

Такие структуры назвали квантово-размерными, так как электроны в этих структурах ведут себя как квантовые объекты. Можно выделить три основных типа квантово-размерных структур: квантовые ямы, нити и точки.

Рассмотрим основную идею размерного квантования на примере электронов, находящихся в очень тонкой полупроводниковой пленке. Структура типа квантовой ямы показана на рис. 1. – двойная гетероструктура, состоящая из ультратонкого слоя полупроводникового материала, ширина запрещенной зоны которого меньше, чем у окружающего материала. В качестве примера может служить тонкий слой GaAs, окруженный AlGaAs.



Геометрия структуры с квантовой ямой (а). Схема энергетических уровней электронов и дырок в квантовой яме (б). Сечение $E-k$ -диаграммы в направлении k_2 или k_3 (в). Энергетические подзоны нумеруются своим квантовым числом $q_1 = 1, 2, 3, \dots$. Сечение $E-k$ -диаграммы для объемного полупроводника показано штриховыми линиями

Рис. 1. Геометрия структуры с квантовой ямой

То обстоятельство, что в обычных условиях носители сосредоточены в пленке и не выходят из нее в окружающую среду, означает, что материал пленки (металл или полупроводник) представляет собой потенциальную яму для электронов глубиной, равной работе выхода E , и шириной d_1 . Согласно законам квантовой механики, энергия электронов в такой яме квантуется, т.е. может принимать лишь некоторые дискретные значения E_q , где q имеет целочисленные значения $1, 2, 3, \dots$. Эти дискретные значения называют уровнями размерного квантования.

В отличие от объемного полупроводника структура с квантовой ямой имеет значительную плотность состояний при наименьшем возможном значении энергии в зоне проводимости и при наибольшем возможном – в валентной зоне. Это свойство оказывает существенное влияние на оптические характеристики материала.

Квантовая нить (англ. quantum wire) — объект нитеобразной формы с поперечными размерами, удовлетворяющими условию размерного квантования. Потенциальная энергия электрона в таком объекте ниже, чем за его пределами, и за счет малых поперечных размеров (обычно 1–10 нм) движение электрона ограничено в двух измерениях. Движение вдоль оси нити остается свободным, в то время как движение в других направлениях квантуется, и его энергия может принимать лишь дискретные значения.

Под квантовыми точками понимают очень маленькие объекты, в нашем случае полупроводниковые нанокристаллы с характерными размерами в несколько десятков нанометров, помещенные во внешнюю среду. Замечательной особенностью квантовых точек является то обстоятельство, что их физические свойства определяются не только материалом, из которого они созданы, но и их размерами и формой, а также, естественно, материалом окружающей среды (матрицы). При столь сильном уменьшении размеров кристаллов происходит радикальная перестройка энергетического спектра носителей — их движение квантуется (отсюда название “квантовые” точки), причем энергия этого размерного квантования легко доступна для экспериментального наблюдения. Как оказалось, изменяя размеры квантовых точек, можно изменять их свойства в очень широких пределах.

Лазеры на квантовых структурах очень экономичны, нежели другие полупроводниковые лазеры, и дают больше света на единицу потребляемой энергии — до 60% электрической мощности преобразуется в свет. Среди других полезных оптических свойств квантовых точек следует отметить температурную стабильность излучения.

Перечень основной и дополнительной литературы

Основная литература:

1. Орликов, Л. Н. Технология приборов оптической электроники и фотоники [Электронный ресурс] : учебное пособие / Орликов Л. Н. - Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. - 87 с. - ISBN 2227-8397 : Б. ц. Книга находится в Премиум-версии ЭБС IPRbooks.
2. Астахов, А. В. Оптическое материаловедение [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. В. Астахов, Е. В. Полякова, В. Е. Стригалева ; рец.: Н. Л. Урванцева, И. В. Гришин ; Федеральное агентство связи, Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича". - СПб. : СПбГУТ, 2014. - 96 с. : ил. - Б. ц.
3. Астахов, Александр Владимирович. Оптическое материаловедение [Текст] : учебное пособие / А. В. Астахов, Е. В. Полякова, В. Е. Стригалева ; рец.: Н. Л. Урванцева, И. В. Гришин ; Федеральное агентство связи, Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича". - СПб. : СПбГУТ, 2014. - 97 с. : ил. - 446.98 р.
4. Астахов, Александр Владимирович. Материалы и элементная база фотоники и оптических устройств связи [Текст] : учебное пособие / А. В. Астахов, Е. В. Полякова, В. Е. Стригалева ; рец.: А. К. Канаев, И. В. Гришин ; Федеральное

агентство связи, Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича". - СПб. : СПбГУТ, 2017. - 78 с. : ил. - 429.87 р.

Дополнительная литература:

1. Панов, М. Ф. Физические основы интегральной оптики [Текст] : учебное пособие / М. Ф. Панов, А. В. Соломонов, Ю. В. Филатов ; рец.: С. Ю. Давыдов, А. Д. Яськов. - М. : Академия, 2010. - 432 с. - Библиогр. : с. 422-423. - ISBN 978-5-7695-59 76-1 : 564.74 р., 529.21 р.
2. Игнатов, А. Н. Оптоэлектроника и нанофотоника [Текст] : учебное пособие / А. Н. Игнатов. - СПб. : Лань, 2011. - 538 с. : ил. - ISBN 978-5-8114-1136-8 : 856.02 р.
3. Игнатов, Александр Николаевич. Оптоэлектроника и нанофотоника [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. Н. Игнатов. - Москва : Лань, 2011. - 538 с. : ил. ; 22. - ISBN 978-5-8114-1136-8 : 799.92 р. Рекомендовано Сибирским региональным отделением учебно-методического объединения высших учебных заведений РФ по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации для межвузовского использования в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлению подготовки «Электроника и наноэлектроника» и «Телекоммуникации». Библиогр.: с. 526-530 (90 назв.)
4. Хансперджер, Роберт. Интегральная оптика : Теория и технология [Текст] : пер. с англ. / Р. Хансперджер ; пер.: В. Ш. Берикашвили, А. Б. Мещеряков ; ред. В. А. Сычугов. - М. : Мир, 1985. - 379 с. : ил. - 2.40 р.