

СХЕМОТЕХНИКА ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ВОСП

**Материалы для практических занятий
(семинаров)**

1. Шумовые характеристики фотоприёмников и методы управления ими

Кроме шумов фотодиода (дробового, теплового и шума темнового тока) в фотоприёмнике, включённом в ВОЛС, появляются другие составляющие шума.

а) Фооновая засветка.

Свой вклад в общий шум оптического тракта вносит и фооновая засветка – оптическое излучение, попадающее на чувствительную площадку ФД от различных источников, играющих роль помех. Если такой источник создаёт мощность P_3 на чувствительной площадке ФД, то соответствующая ему шумовая составляющая определяется выражением:

$$I_{шз}^2 = 2eP_3S\Delta f. \quad (5.16)$$

б) Модовые шумы.

Кроме рассмотренных выше для ВОЛС характерны также модовые шумы, возникающие за счёт случайных флуктуаций интенсивности в пределах чувствительной площадки ФД. Они проявляются когда когерентный источник излучения (ЛД) используется совместно с многомодовым световодом. В этом случае на выходном торце световода возникает «спекл-картина», являющаяся результатом интерференции различных мод. Эта картина постоянно меняется под воздействием многих факторов: изменения температуры окружающей среды, микродеформации световода при различных механических воздействиях. Любое из приведённых внешних воздействий меняет случайным образом величину геометрического пути, который проходят лучи, соответствующие различным модам световода. Несмотря на то, что это изменение невелико и составляет доли микрометра на километр световода, оно оказывается соизмеримым с длиной волны и существенным образом меняет фазовый набег между различными модами. Этим и определяется изменение распределения интенсивности на выходном торце световода, которое приводит к появлению модового шума. Подобный по проявлению на выходе усилителя ФД шум возникает и при совместном использовании *некогерентного* источника излучения

(СИД) и *одномодового* волокна. Отличие проявляется лишь в том, что случайный характер имеет не пространственная, а временная структура распределения интенсивности на выходном торце световода.

в) *Шум источника излучения.*

Дополнительные шумы создаёт и источник излучения. Они проявляются в флуктуации оптической мощности и случайном характере распределения интенсивности на его излучающей площадке.

С учётом вышеизложенного систему связи можно оптимизировать, исключив причину появления ряда шумов, характерных для оптического диапазона. Используя когерентные источники только совместно с одномодовыми световодами, а некогерентные – с многомодовыми, можно исключить модовые шумы. Применение усовершенствованных технологий при изготовлении ЛД и СИД и разработка схемных решений для источников тока накачки, в которых предусматривается контроль и автоматическая регулировка режима его работы, позволяет свести к минимуму шумы источника излучения.

Исключить квантовые и тепловые шумы сигнала и темнового тока нельзя никакими методами. Они всегда сопутствуют оптическому сигналу и наличие этих шумовых факторов необходимо учитывать при разработке схемных решений для усилителя фототока.

г) *Эквивалентная шумовая схема.*

На рисунке 5.14 показана обобщённая эквивалентная схема фотоприёмника, в которой учтены все главные шумовые источники. Введён генератор тока $I_{шR}$, учитывающий тепловой шум активного сопротивления нагрузки ФД R_1 . Двумя источниками $I_{шy}$ и $U_{шy}$ учтены шумы активного элемента усилителя. Если усилитель строится на основе полевых транзисторов, то:

$$U_{шy}^2 = \xi 4kT \Delta f / g, \quad I_{шy} = 0, \quad (5.17)$$

где g - крутизна входной характеристики транзистора, имеющая смысл входной проводимости;

k

-

постоянная

Больцмана;

$\zeta = 0.7-1.1$ – коэффициент, зависящий от типа полевого транзистора.

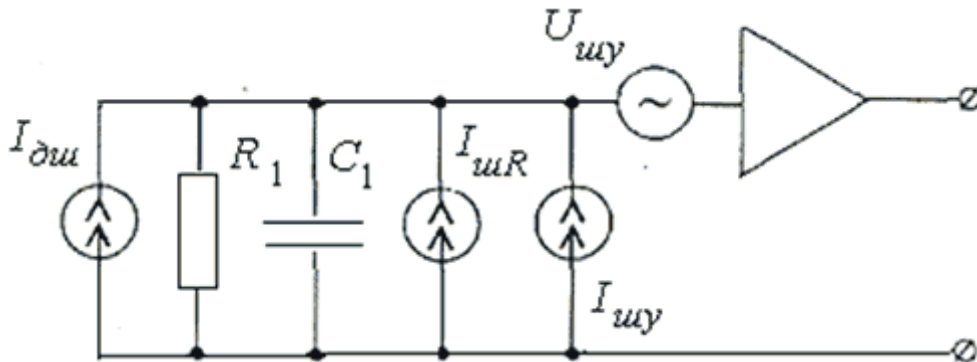


Рисунок 5.14 – Эквивалентная схема приёмника с источниками шума

Для усилителя, построенного на базе биполярных транзисторов

$$U_{шy}^2 = \xi 4(kT)^2 \Delta f / eI_k, \quad I_{шy}^2 = 2eI_{\delta} \Delta f, \quad (5.18)$$

где I_{δ} и I_k - постоянные токи базы и коллектора транзистора.

д) *Отношение сигнал/шум (С/Ш).*

Общепринятым способом выражения качества сигнала в системе является отношение сигнал/шум (С/Ш). Это отношение средней энергии сигнала к средней энергии шумов различной природы. Если сигнал имеет мощность 50мВт, а мощность шума равна 50мкВт, то данное отношение равно 1000, или 30дБ. Все рассмотренные выше шумовые источники в первом приближении считаются независимыми. Поэтому результирующая мощность шума на выходе усилительного каскада может быть определена в результате суммирования вкладов, вносимых отдельными источниками. При прохождении сигнала через усилитель к нему добавляются собственные шумы усилителя и отношение мощности сигнала P_c к мощности шумов $P_{ш}$ на выходе станет больше чем на входе.

Отношение С/Ш зависит от мощности принимаемого оптического сигнала P и может быть увеличено за счёт её роста. Если шумы оптического тракта сравнимы с шумами электронной части фотоприёмника, то рост отношения С/Ш можно обеспечить за счёт увеличения эквивалентного сопротивления нагрузки R_l фотодетектора.

Но при росте R_I уменьшается полоса пропускания фотоприёмника в целом. Поэтому одновременное увеличение С/Ш и сохранение прежней полосы пропускания невозможно без существенного усложнения электронной схемы первого каскада усилителя. Она требует введения высокочастотной коррекции его амплитудно-частотной характеристики.

е) Эквивалентная мощность шума $P_{ш}$ (Вт).

Это одна из наиболее важных характеристик, учитывающих шумовые свойства фотоприёмников. Она определяет минимальную мощность оптического сигнала на входе фотоприёмника, при которой отношение С/Ш равно единице и вычисляется по формуле:

$$P_{ш} = I_{ш} / S, \quad (5.19)$$

где $I_{ш}$ – полный шумовой ток;

S – токовая чувствительность.

Как известно, эквивалентная мощность шума пропорциональна квадратному корню из полосы пропускания. $P_{ш}$ можно пронормировать, поделив на $\sqrt{\Delta f}$. Такая нормированная эквивалентная мощность шума имеет размерность Вт / Гц^{1/2} и не зависит от полосы пропускания.

Эквивалентная мощность шума $P_{ш} \approx 10^{-14}$ Вт.

2. Специальные типы полупроводниковых излучателей ,их конструкции и параметры.

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

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

составляют от единиц до сотен миллиампер, а мощность лазерного излучения несколько десятков милливатт.

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

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

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

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

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

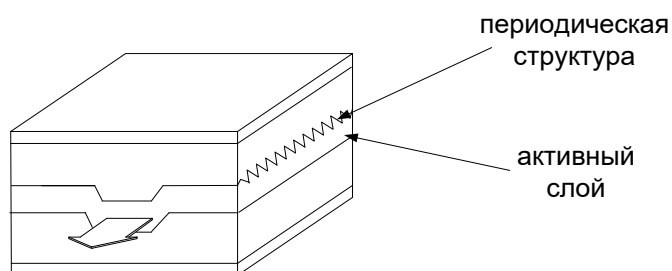


Рис. 4. Структура DFB лазера.

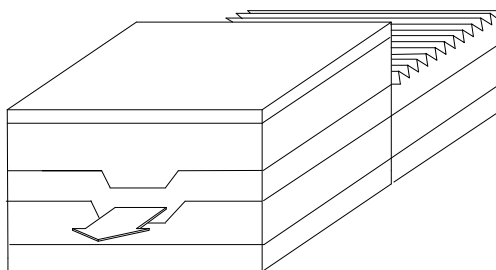


Рис. 5. Структура DBR лазера.

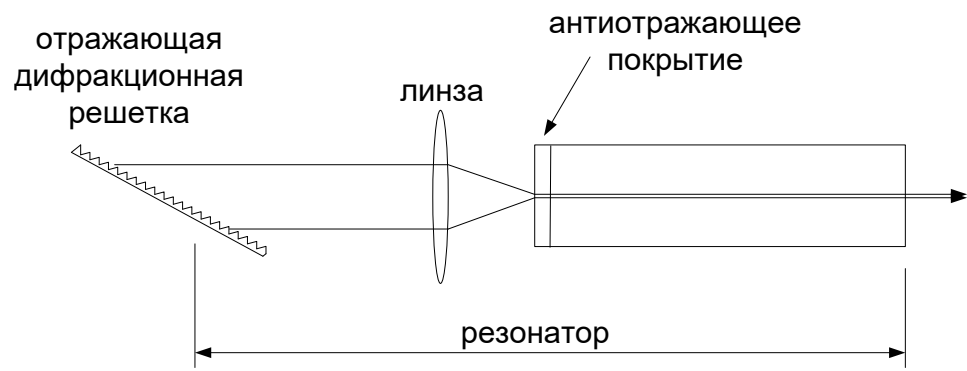


Рис. 6. Лазер с одним внешним резонатором, ЕС лазер.

3. Спектральные характеристики полупроводниковых излучателей и методы управления ими.

Зависимость параметров излучения от длины волны оптического излучения называется спектральной характеристикой СИД. Длина волны излучения определяется разностью двух энергетических уровней, между которыми происходит переход электронов при люминесценции. Каждая рекомбинация заряда при переходе сопровождается излучением фотона, длина волны которого связана с шириной запрещенной зоны E_g , эВ соотношением [9]:

$$\lambda = 1,2398 / E_g, \text{ мкм} \quad (29)$$

В связи с разной шириной запрещенной зоны у различных материалов длина волны излучения различна в различных типах СИД. Примеры спектральных характеристик приведены на рис. 23.

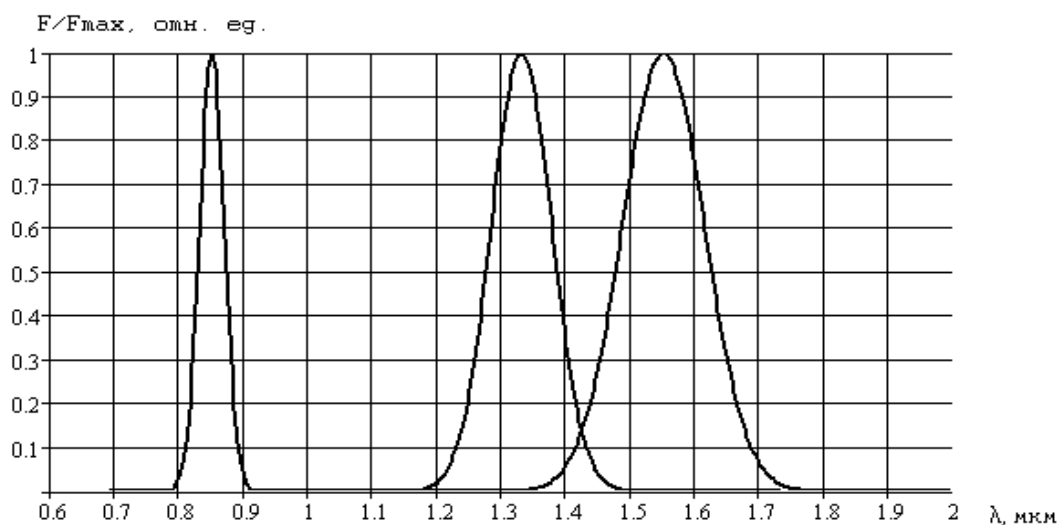


Рис. 23. Спектральные характеристики различных материалов.

С ростом температуры обычно несколько увеличивается длина волны излучения λ_{max} СИД. Это увеличение определяется тем, что с ростом температуры уменьшается ширина запрещенной зоны полупроводника. В результате длина волны

излучения полупроводника увеличивается. Типичное значение смещения длины волны составляет $0,2 \text{ нм/}^\circ\text{С}$.

Так как переход электронов при рекомбинации носителей заряда обычно происходит не между двумя энергетическими уровнями, а между двумя группами энергетических уровней, то спектр излучения оказывается размытым. Спектральный диапазон СИД характеризуют шириной спектра излучения $\Delta\lambda_{0,5}$, измеряемого на высоте $0,5$ максимума характеристики. Если предположить, что в распределении инжектированных носителей внутри энергетической зоны наибольший вклад в излучение СИД вносят носители в энергетической полосе шириной $3kT$, тогда полная ширина спектральной полосы на полувысоте будет иметь вид [10]:

$$\Delta\lambda_{0,5} = \frac{3kT}{hc} \cdot \lambda^2, \quad (30)$$

- где k - постоянная Больцмана
 T - абсолютная температура
 h - постоянная Планка
 c – скорость света

На рис. 4 приведена зависимость ширины спектральной полосы $\Delta\lambda_{0,5}$ на полувысоте от длины волны, построенная по (30)

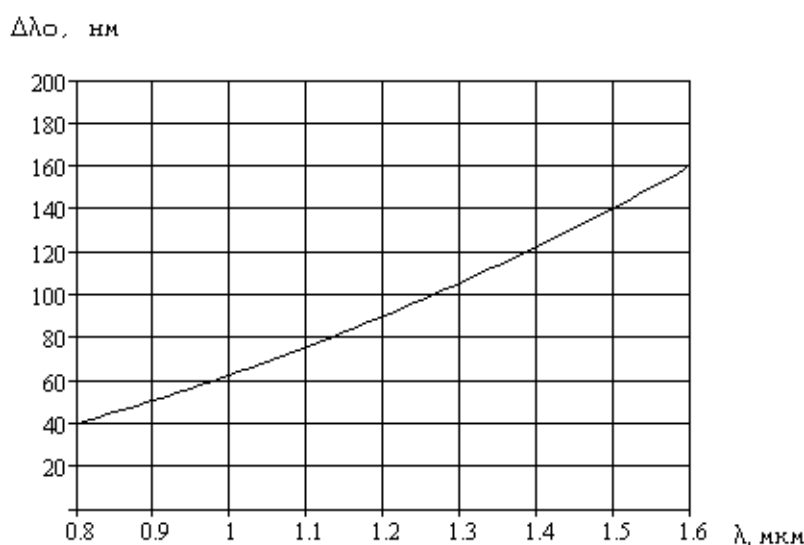


Рис. 24. Зависимость ширины спектральной полосы от длины волны.

4. Оптические квантовые усилители, их конструкции и параметры

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.

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

Табл. 2. Типичные параметры SOA и их характеристики

1.1 3.1. 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.

1.2 3.2. 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.

1.3 3.3. 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 (TE) и поперечными магнитными (TM) модами. Состояние поляризации входного сигнала обычно находится где-то между этими двумя крайностями. Поляризационная

чувствительность SOA определяется как величина разности между коэффициентом усиления TE-режима и коэффициентом усиления TM-моды, т.е.

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

1.4

1.5 3.4. 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.

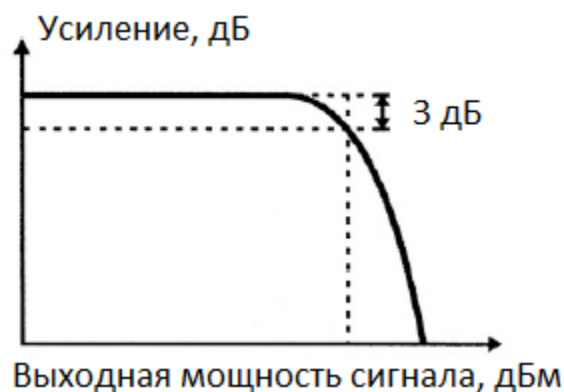


Рис. 1. Зависимость усиления сигнала от его выходной мощности.

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.

1.6 3.5. 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. 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.

1.7 3.6. 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.

1.8 3.7. 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.

5. Оптические модуляторы, их конструкции и параметры.

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ АМПЛИТУДНЫЕ МОДУЛЯТОРЫ МАХА–ЦЕНДЕРА НА ОСНОВЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

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

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

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

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

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

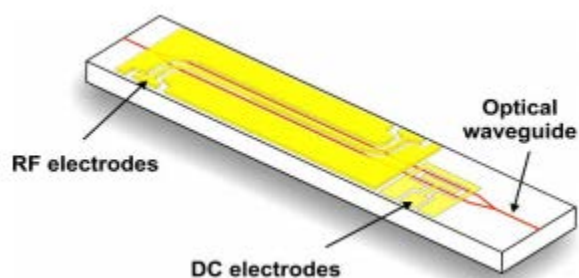


Рис. 4.1.5 - Схематическое изображение чипа модулятора компании iXBlue Photonics1 [4]: RF electrodes – электроды модуляции; DC electrodes – электроды смещения; Optical waveguide – оптический волновод (световод)

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

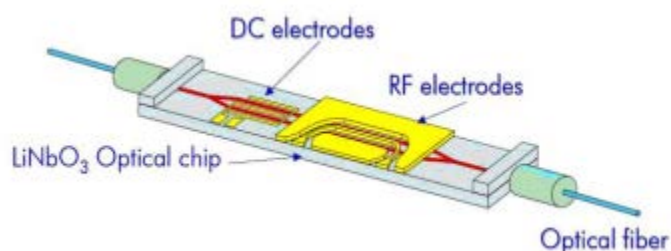


Рис. 4.1.6 - Интегрально-оптический СВЧ-модулятор Маха–Цендера Пермской научнопроизводственной приборостроительной компании [6]: LiNbO₃ Optical chip – кристаллическая подложка (электрооптический кристалл); DC electrodes – DC-электроды смещения; RF electrodes – СВЧ-электроды в виде копланарной линии бегущей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

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

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

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

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

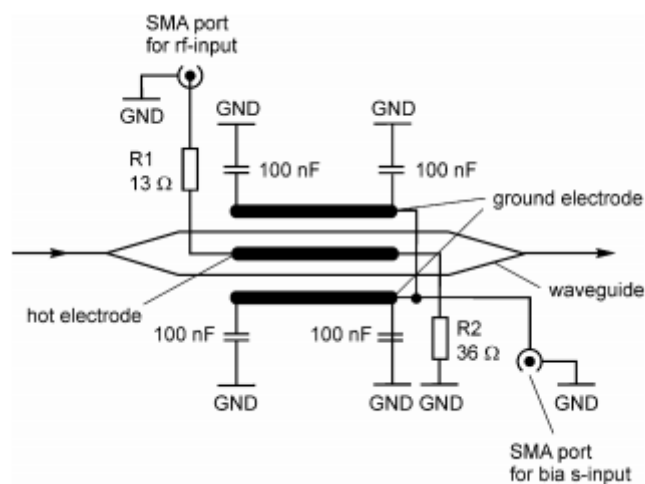


Рис. 4.1.7. Схема подключения электродов модулятора AM 1550 компании JENOPTIK

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

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

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

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

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

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

ϕ – phase term – фаза.

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

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

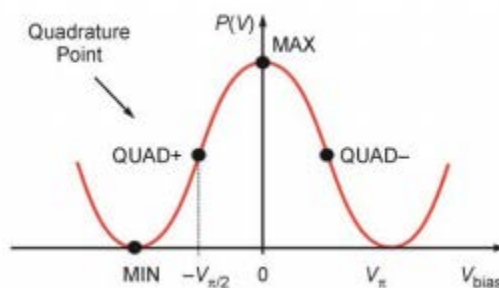


Рис. 4.1.8.- Передаточная функция идеального модулятора Маха–Цендера :
 $P(V)$ – интенсивность выходного излучения модулятора; V_{bias} – постоянное DC напряжение смещения; V_{π} – полуволновое напряжение; Quadrature Point (QUAD+, QUAD-) – точки квадратуры

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

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

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

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

Основные характеристики модуляторов Маха–Цендера компании iXBluePhotonics

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

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

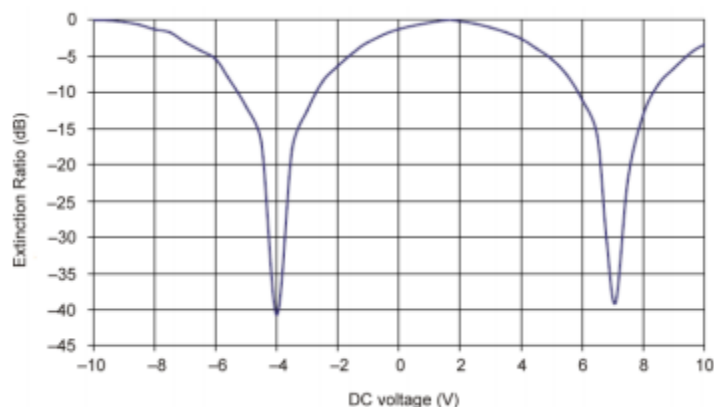


Рис. 4.1.9.-. Extinctionratio – коэффициент экстинкции модулятора MXER-LN-

20

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

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



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

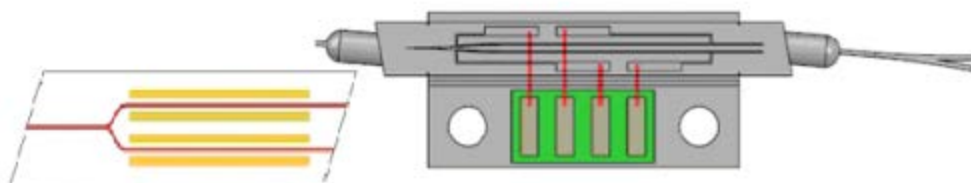


Рис. 4.1.11. Модулятор Y-JPX-LN для волоконно-оптических гироскопов

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

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

6 Оптические мультиплексоры и демультиплексоры, их конструкции и параметры.

Оптический мультиплексор_демультиплексор или просто мультиплексор (OADM, Optical Add/Drop Multiplexer) – это устройство, на входе и выходе которого по n волокон, и каждое из них передает по m оптически мультиплексированных каналов. В состав со временных OADM входят: электронный мультиплексор-демультиплексор ввода-вывода (ADM), оптические демультиплексор (divider) и мультиплексор (или комбайнер – combiner). Для увеличения мощности в устройство включают оптический предусилитель на входе и мощный оптический усилитель – на выходе.

Электронный мультиплексор выполняет функции ввода/вывода трибов (SDH, PDH, SONET), компонентных сигналов (ATM) и потоков.

Оптический демультиплексор:

- выделяет транзитный поток из нескольких несущих и передает его непосредственно на оптический мультиплексор;
- выделяет оптические несущие (обычно по одной с каждого волокна) для передачи зарезервировавшим их пользователям, имеющим оптические интерфейсы к оптоволоконным каналам;
- выделяет оптические несущие и передает их на электронный мультиплексор для оптоэлектронного преобразования и электронного демультиплексирования каналов (трибов или компонентных сигналов), зарезервированных пользователями.

Оптический мультиплексор формирует выходной поток, объединяя транзитный поток от демультиплексора (оптические несущие) с оптическими потоками от электронного демультиплексора и с прямыми оптическими каналами от пользователей.

У современных мультиплексоров (первого поколения) есть

ряд недостатков. Так, число оптических несущих, которое можно ввести-вывести в OADM, ограничено из-за сложности устройств оптического ввода-вывода. Причины этого в основном экономические: для вывода оптических несущих используются модули оптических фильтров, для ввода – пассивные WDM-модули, стоимость которых 1000–2000 долл. на несущую. Возможность реконфигурации несущих практически удваивает эту цену .

Поскольку модули оптических фильтров реализованы аппаратно, они не перестраиваемые. Из-за этого OADM работают на фиксированных частотах, и их нельзя динамически реконфигурировать. В

большинстве случаев OADM не могут конвертировать длины волн входных несущих. А проблемы с фильтрацией оптических несущих ограничивают скорость обмена в системах WDM на уровне STM_16 (2,5 Гбит/с).

Перечисленные недостатки постепенно преодолеваются, в первую очередь благодаря появившейся возможности конвертации длин

волн входных несущих. Оптические конверторы и перестраиваемые лазерные источники позволяют реконфигурировать оптические

каналы. Но сложнее всего оказалось создать оптический кросс-коммутатор, который сделал бы OADM таким же гибким и полнофункциональным, как и ADM.

Оптическое мультиплексирование и демуплексирование основано на комбинированных или расположенных последовательно друг за другом узкополосных фильтрах. В частности, для фильтрации применяют тонкопленочные фильтры, волоконные или объемные брэгговские дифракционные решетки, сварные биконические волоконные разветвители, фильтры на основе жидких кристаллов, устройства интегральной оптики (матрицы фазовых волноводных дифракционных решеток или фазары).

1.1 1.3. Виды, конструкции, принцип работы

Тонкопленочный фильтр состоит из нескольких слоев прозрачного диэлектрического материала с различными показателями преломления, нанесенных последовательно друг за другом на оптическую подложку. На каждой границе раздела между слоями из-за различия их показателей преломления часть падающего светового пучка отражается обратно. Этот отраженный свет усиливает или подавляет падающий (отраженная волна интерферирует с падающей) в зависимости от длины волны. Надлежащим образом подобрав показатель преломления и толщину каждого слоя, можно получить фильтр, который будет пропускать любой заданный диапазон длин волн и отражать все остальные (рис. 1.3.1).

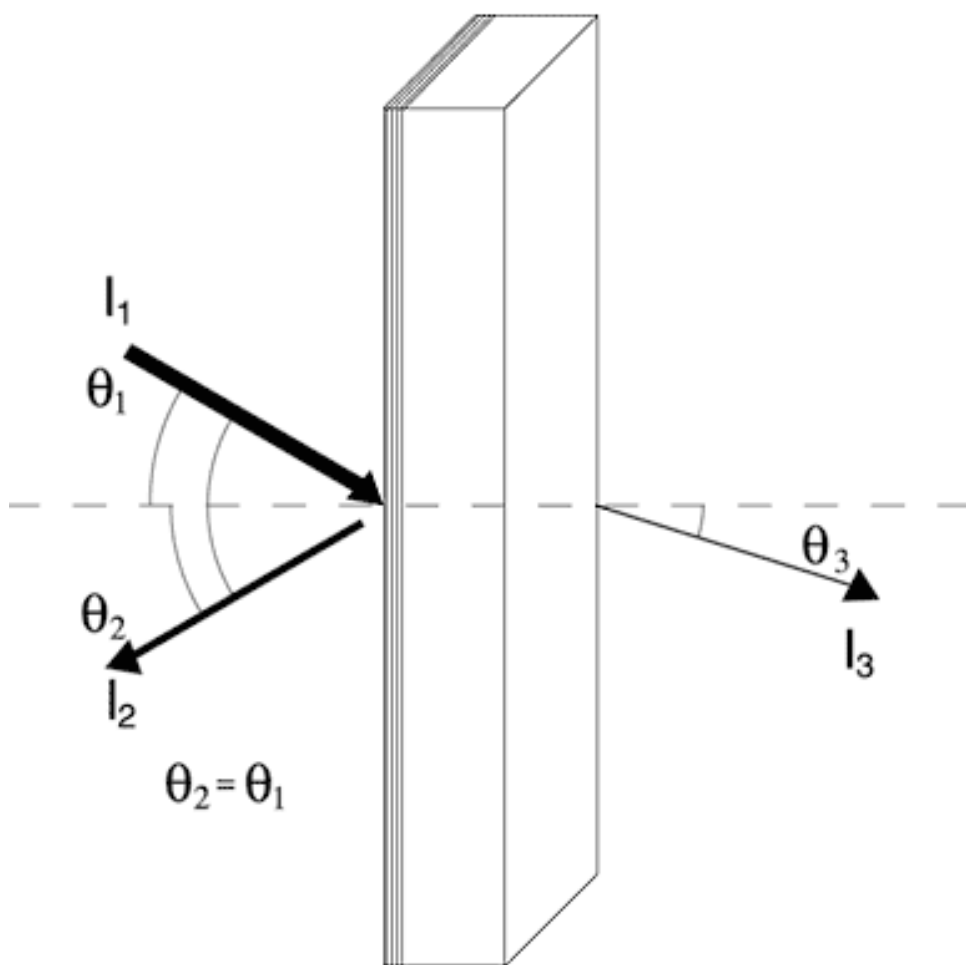


Рис.1.3.1 – падающая волна, I_2 – отраженная, I_3 – прошедшая. Методы выбора параметров и техника нанесения диэлектрических слоев хорошо известны в оптической промышленности десятки лет. Выбор диэлектрических материалов ограничен, так как многие материалы с хорошими оптическими свойствами имеют физические качества, далекие от требуемых. В общем случае, чем жестче

требования к фильтру, тем большее число слоев необходимо нанести на подложку. Несмотря на имеющиеся сложности, эта технология позволяет, незначительно изменяя процесс производства, создавать недорогие фильтры с различными специальными спектральными свойствами.

В мультиплексорах и демультиплексорах используются обычно одноступенчатые тонкопленочные фильтры, каждый из которых выделяет из составного сигнала (или добавляет в него) один канал. Фильтры расположены под наклоном к оптической оси, чтобы отраженный свет не попадал обратно в систему. Наклонное расположение фильтров изменяет эффективную толщину слоев и меняет таким образом полосу пропускания, что необходимо учитывать при проектировании фильтров. Для обработки многоволновых сигналов используют многоступенчатые системы фильтров, в которых свет, отраженный от каждого фильтра, попадает на вход следующего фильтра, что придает исключительную важность вопросу их выравнивания (рис. 1.3.2).

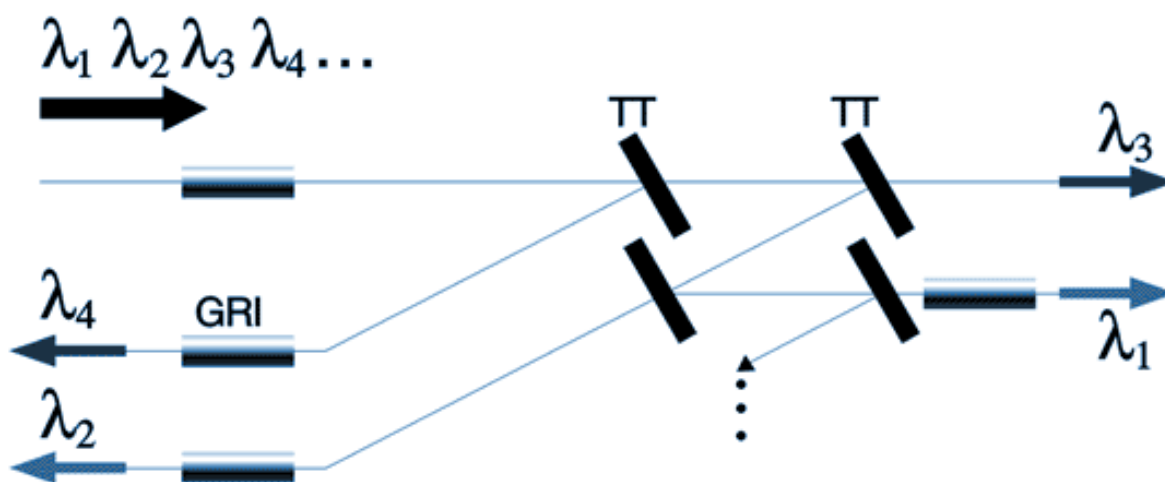


Рис. 1.3.2 Многоступенчатая система тонкопленочных фильтров для демультиплексирования составного сигнала

Тонкопленочные фильтры имеют достаточно узкую полосу пропускания и используются в системах WDM с 16-ю или 32-мя каналами. В современных системах с более плотным расположением каналов используют другие технологии.

Волоконные брэгговские решетки

Волоконная брэгговская решетка – это, по сути, оптический интерферометр, встроенный в волокно. Волокно, легированное некоторыми веществами (обычно германием), может изменять свой показатель преломления под воздействием ультрафиолетового света. Если облучить такое волокно ультрафиолетовым излучением с определенной пространственной периодической структурой, то волокно превращается в своего рода дифракционную решетку. Другими словами, это волокно будет практически полностью отражать свет определенного, наперед заданного диапазона длин волн, и пропускать свет всех остальных длин волн.

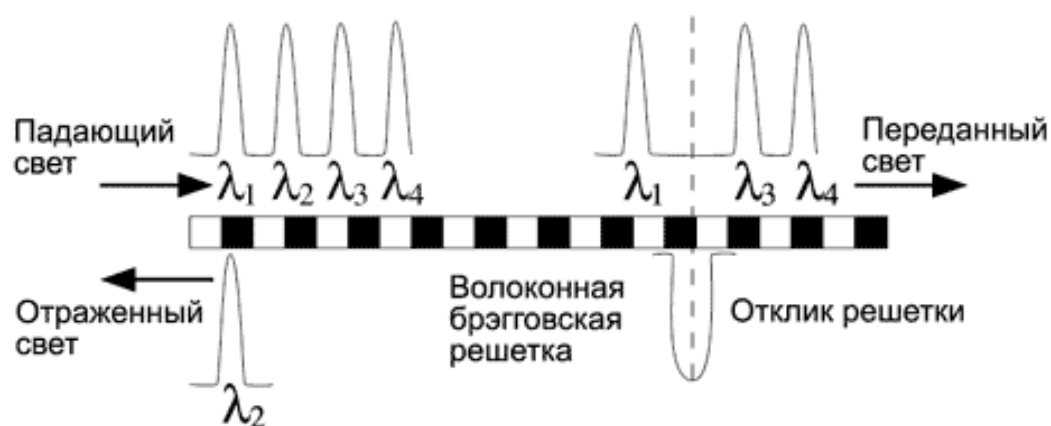


Рис. 1.3.3 Волоконная брэгговская решетка выделяет из составного сигнала канал определенной длины волны

Если структура не вполне периодическая, и период модуляции ее показателя преломления изменяется монотонно (происходит чирпирование), то получается дифракционная решетка с линейно изменяющимся периодом. Такие решетки используются для компенсации хроматической дисперсии в волоконной линии связи или для коррекции чирпированного сигнала лазерного источника.

Центральная длина волны фильтра на основе регулярной волоконной брэгговской решетки определяется ее периодом, полоса пропускания обратно пропорциональна ее длине. Оба этих параметра зависят от температуры, поэтому такие фильтры должны быть помещены в термостат или другое устройство, контролирующее температуру. Волоконная брэгговская решетка может использоваться как оптический фильтр в устройствах мультиплексирования и

демультиплексирования, как компенсатор хроматической дисперсии, или в комбинации с циркуляторами в мультиплексорах ввода/вывода каналов (рис. 1.3.3).

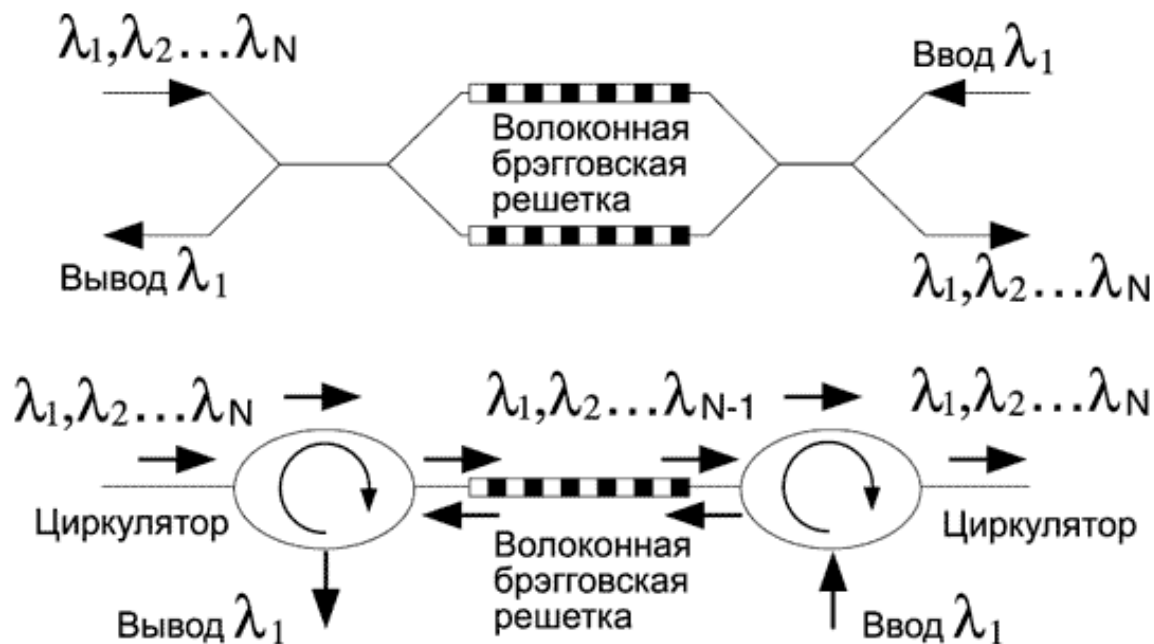


Рис. 1.3.4 Использование волоконных брэгговских решеток в мультиплексорах ввода/вывода каналов

В мультиплексорах ввода/вывода каналов волоконная брэгговская решетка может использоваться вместе с двумя циркуляторами. редко используются в пассивных компонентах систем DWDM сами по себе. Со стороны порта вывода канала циркулятор выделяет отраженную волну и направляет ее в порт вывода (рис. 1.3.4, слева). Со стороны порта ввода циркулятор добавляет в передаваемый составной сигнал один канал на той же длине волны, что была выделена (рис. 1.3.4, справа). Такие устройства часто используются на границе между магистральным каналом и сетью городского или регионального масштаба. В магистральном канале обычно очень много длин волн, в то время как в городских или региональных сетях их намного меньше.

Волоконные брэгговские решетки в последнее время также стали использоваться в устройствах мультиплексирования идемультиплексирования вместе с интерферометрами типа Маха-Цендера и в комбинации с другими типами фильтров. Наряду с мультиплексорами и демультиплексорами, рассмотренная

технология узкополосной фильтрации оптических каналов также используется для выравнивания спектра сигнала перед усилителями EDFA, для стабилизации длины волны и в волновых стабилизаторах.

Дифракционные решетки

Наиболее распространенные в оптике обычные дифракционные решетки отражают световой пучок под разными углами в плоскости падения, причем угол, в которых отраженный свет достигает максимальной интенсивности, зависит от длины волны. В дифракционных решетках используется тот же физический принцип, что и в тонкопленочных фильтрах – подавление или усиление света за счет интерференции падающих и отраженных волн (рис. 1.3.5).



Рис. 1.3.5 Отражение составного сигнала дифракционной решеткой

Представим, что в падающем свете присутствует излучение разных длин волн. Можно выбрать угол падения таким образом, что волны определенной длины при отражении от отдельных линий решетки будут отличаться по фазе друг от друга ровно на одну длину волны. В этом случае все отраженные волны будут усиливать

друг друга. Такой угол будет углом максимального пропускания для заданной длины волны падающего света.

В устройствах мультиплексирования и демultipлексирования дифракционные решетки располагаются на пути света таким образом, чтобы сигнал нужной длины волны мог быть выделен из составного сигнала или добавлен в него. Хотя устройства на основе дифракционных решеток дороги и сложны в производстве, вносимые ими потери практически не зависят от числа каналов, что делает эту технологию одной из наиболее привлекательных для использования в системах с большим числом каналов. Однако при этом требуется тщательно контролировать поляризацию падающего оптического излучения.

Сварные биконические разветвители

Простейший биконический разветвитель FBT (Fused Biconic Tapered) представляет собой пару одномодовых оптических волокон, на определенном участке сваренных друг с другом по длине. Основная мода волокна, которая распространяется по сердцевине одного из оптических волокон, при прохождении области сварки преобразуется в моды оболочки. Когда волокна снова разделяются, моды оболочки снова преобразуются в моды волокна, распространяющиеся по сердцевине каждого из выходных волокон. В результате получается разветвитель, практически не вносящий потерь. Выходные сигналы не обязательно имеют равную мощность, соотношение их мощностей определяется интерференцией в области сварки волокон и зависит от длины этой области.

Если два таких разветвителя расположены последовательно (рис.рис. 1.3.6), и два рукава имеют разные оптические пути между местами сварки, то такая комбинация действует подобно интерферометру Маха-Цендера. Мощность входного сигнала распределяется между выходными волноводами в зависимости от длины волны с определенной периодичностью. Если составной входной сигнал содержит оптические каналы двух различных длин волн, то при определенном

подборе параметров эти каналы на выходе окажутся в разных выходных волокнах. Второе входное волокно не используется.



Рис. 1.3.6 Входной сигнал распределяется между двумя выходами

Если на вход поступает составной сигнал, который содержит большое количество каналов на разных частотах (с одинаковыми расстояниями между ними), на выходе в каждом волокне будет по половине каналов с расстоянием между частотами в два раза больше.

Используя последовательно несколько разветвителей, можно вывести каждый канал в отдельное волокно.

Массивы таких устройств, отдельные секции которых иногда заменены брэгговскими решетками, используются для выделения каналов определенной частоты из многоканальных систем WDM и DWDM или для добавления каналов в каком-либо узле оптической сети. Поскольку они являются полностью пассивными устройствами и имеют низкие потери, допустимо применение достаточно больших наборов таких устройств.

Устройства интегральной оптики

Интегральные оптические устройства мультиплексирования и демультиплексирования – это оптический эквивалент интегральных схем в электронике. Оптические волноводы в несколько слоев помещаются на подложку из кремния или ниобата лития. В таком небольшом блоке содержится множество оптических компонентов, взаимосвязанных друг с другом. При использовании современного полностью автоматизированного оборудования возможно массовое производство таких блоков.

Интегральная оптика – относительно новая технология. Для того чтобы полностью использовать ее потенциал, требуются дальнейшие научные исследования и конструкторские разработки. В настоящее время интегральная оптика используется при производстве оптических разветвителей, коммутаторов, модуляторов, эрбиевых и легированных различными редкоземельными элементами волноводных усилителей, брэгговских решеток и других компонентов систем DWDM.

Интегральная оптика успешно применяется для создания решеток на основе массива планарных волноводов (более 100) различной длины между двумя планарными линзами смесителями AWG (Arrayed Waveguide Gratings).