

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(спбгут)**

ФОТОННО-ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ И УСТРОЙСТВА В ИНФОКОММУНИКАЦИЯХ

Конспект лекций

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020**

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ФОТОНИКИ И ИНФОКОММУНИКАЦИЙ.....	6
2. ИСТОЧНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	14
3. ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ МОДУЛЯТОРЫ	25
4. ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	33
5. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИЕ МОДУЛИ	39
6. ОПТИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ.....	50
7. УСТРОЙСТВА ДЛЯ СИСТЕМ СПЕКТРАЛЬНОГО УПЛОТНЕНИЯ ...	61
ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	78

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Фотонно-электронные компоненты и устройства в инфокоммуникациях» является одной из дисциплин учебного плана программы магистратуры по направлению 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». Федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки «11.04.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи», утвержденным приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 22.09.2017 № 958, определены компетенции, формируемые в процессе обучения, в частности:

- способность использовать современную элементную базу и схемотехнику для разработки компонентов и устройств оптической связи, включая интегрально-оптические и фотонно-кристаллические,

- способность к выполнению работы по обеспечению функционирования телекоммуникационного оборудования корпоративных сетей с учетом требований информационной безопасности,

- способность самостоятельно выполнять экспериментальные исследования для решения научно-исследовательских и производственных задач с использованием современной аппаратуры и методов исследования,

- способность использовать современные достижения науки и передовые инфокоммуникационные технологии, методы проведения теоретических и экспериментальных исследований в научно-исследовательских работах в области ИКТиСС, ставить задачи исследования, выбирать методы экспериментальной работы с целью совершенствования и созданию новых перспективных инфокоммуникационных систем.

Процесс изучения дисциплины «Фотонно-электронные компоненты и устройства в инфокоммуникациях» направлен на формирование перечисленных компетенций, приобретение студентами знаний и навыков, необходимых для исследования, разработки, внедрения, эксплуатации фотонно-электронных компонентов и устройств в инфокоммуникациях, развитие творческих способностей студентов, умение формулировать и решать задачи изучаемой специальности, умение творчески применять и самостоятельно повышать свои знания.

При составлении пособия в учебных целях использованы фрагменты оригинальных описаний оборудования, публикаций, специализированная литература, учебные пособия родственных специальностей высших учебных заведений, государственные стандарты, нормативные акты, словари и энциклопедии, материалы форумов, ресурсы информационно-телекоммуникационной сети «Интернет». Перечень использованных источников приведен в конце учебного пособия.

1. ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ФОТОНИКИ И ИНФОКОММУНИКАЦИЙ

Фотоника (англ. photonics) — область науки и техники, которая занимается изучением фундаментальных и прикладных аспектов генерации, модуляции, передачи, усиления, детектирования и обработки оптических сигналов, а также разработкой и созданием оптических, электрооптических и оптоэлектронных устройств различного назначения.

Начиная с 1960-х годов, когда были предложены первые диэлектрические волноводы, с изобретением лазерных диодов и последующим развитием волоконно-оптических систем связи в 1970-х годах фотоника формировалась как область науки. Во многом можно провести аналогию между электроникой и современной фотоникой, использующей вместо электронов кванты света – фотоны. В большинстве практических применений фотоники используется видимый и ближний инфракрасный диапазон длин волн в диапазоне от 0,4 до 1,6 мкм. Особенное значение фотоника имеет в инфокоммуникациях и технологиях волоконно-оптической связи.

Благодаря высокой мировой научной и технической активности и огромной востребованности новых результатов, внутри фотоники возникают новые и новые междисциплинарные направления.

Микроволновая фотоника – изучает взаимодействие между оптическим сигналом и высокочастотным (больше 1 ГГц) электрическим сигналом. Эта область включает основы оптико-микроволнового взаимодействия, работу фотонных устройств при СВЧ, фотонный контроль СВЧ устройств, линий высокочастотной передачи и использование фотоники для выполнения различных функций в микроволновых схемах.

Компьютерная фотоника – объединяет современную физическую и квантовую оптику, математику и компьютерные технологии и находится на этапе активного развития, когда становится возможным реализовать новые идеи, методы и технологии.

Оптоинформатика – область науки и техники, связанная с исследованием, созданием и эксплуатацией новых материалов, технологий и устройств для передачи, приёма, обработки, хранения и отображения информации на основе оптических технологий.

Первое поколение коммерческих волоконно-оптических систем связи было развернуто в 1980-х годах. Эти системы работали по многомодовому оптоволокну (MMF) при скоростях передачи до 45 Мбит/с в диапазоне длин волн первого окна прозрачности (область 850 нм).

В конце 1970-х годов было внедрено стандартное одномодовое волокно MCЭ-G.652 (SSMF). Рабочие длины волн были сдвинуты во второе окно прозрачности (область 1300 нм). Это обеспечило значительно меньшее ослабление оптических сигналов для волокон на основе диоксида кремния по сравнению с предыдущей областью 850 нм, и помимо этого коэффици-

ент хроматической дисперсии в данной спектральной области близок к нулю. Таким образом, в начале 1980-х годов появилось второе поколение волоконно-оптических систем передачи. Системы второго поколения могут работать с битовой скоростью до 1,7 Гбит/с без регенерации на расстоянии порядка 50 км. Дальнейшие исследования и инженерные усилия были направлены на улучшение чувствительности приемника методами когерентного детектирования. Были достигнуты расстояния порядка 60 км в системах без регенерации при битовой скорости до 2,5 Гбит/с. В настоящее время диапазон второго окна прозрачности остается привлекательным для оптических соединений центров обработки данных.

Затем на рынок вышли волоконно-оптические системы передачи третьего поколения, которые использовали третье окно прозрачности с наименьшим затуханием (область 1550 нм) и работали с битовой скоростью до 2,5 Гбит/с. Эти системы были коммерчески доступны в 1990-х годах и обеспечивали передачу с расстояниями между повторителями порядка 60–70 км. На этом этапе формирование оптических сигналов было основано на прямой модуляции полупроводниковых лазерных источников.

В начале 1990-х годов после появления волокна, легированного эрбием и эрбиевых усилителей (EDFA), волоконно-оптические системы быстро эволюционировали в системы со спектральным уплотнением каналов (WDM). Технология WDM основана на простой идее: вместо передачи одного сигнала на одной длине волны по волокну одновременно и независимо друг от друга передают несколько сигналов на различных длинах волн. Эти разделенные по спектру оптические сигналы могут быть сформированы по любому протоколу и с любой битовой скоростью. На рисунке 1 приведена обобщенная схема волоконно-оптической системы связи со спектральным разделением каналов.

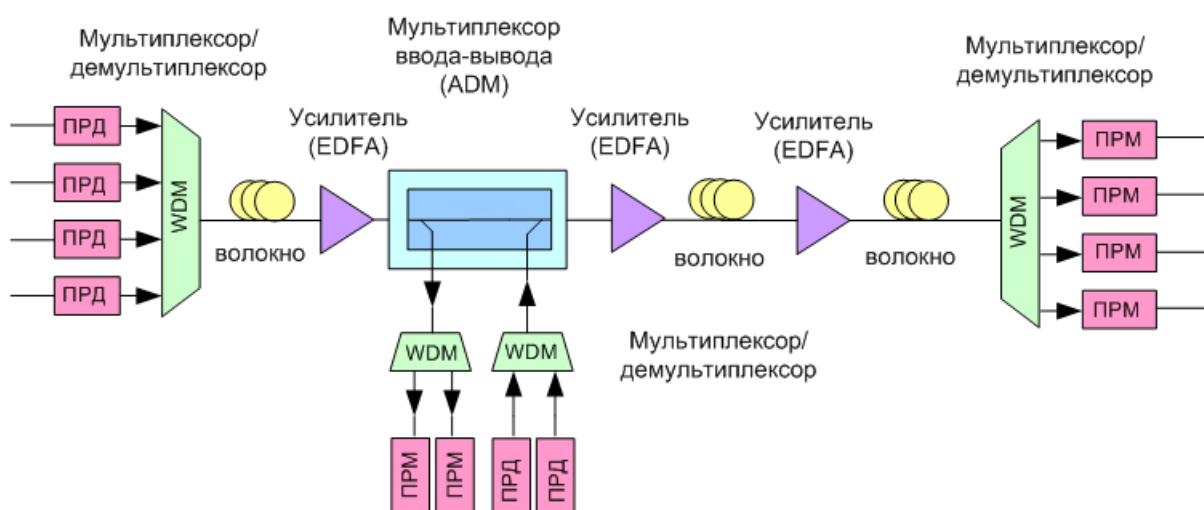


Рисунок 1. Схема системы связи со спектральным уплотнением

На схеме обозначены передатчики (ПРД), приемники (ПРМ), оптические усилители (EDFA), мультиплексоры/демультиплексоры спектральных каналов. Для ввода и выделения спектральных каналов применяются мультиплексоры ввода-вывода (ADM – add-drop multiplexer).

Применение в передатчиках источников с узкой шириной спектра (лазеры DFB), внешних модуляторов, совместное использование спектрального мультиплексирования и оптического усиления вывело на рынок системы, способные предавать по одному волокну несколько независимых каналов 10 Гбит/с.

Системы спектрального уплотнения с разносом оптических несущих на 20 нм, называют CWDM (Coarse Wavelength-division multiplexing – мультиплексирование с разреженным спектральным разделением). Действующая рекомендация МСЭ-T G.694.2, утвержденная 14 декабря 2003 года определяет сетку длин волн для 18 каналов в диапазоне 1271–1611 нм. Номинальные значения центральных длин волн для систем CWDM используются в качестве эталонных значений, с тем чтобы определить граничные значения максимальной и минимальной длин волн для каждого используемого канала. Эти граничные значения определяют пределы длины волны для каждого передатчика и одновременно пределы длины волны, за которыми должны выполняться характеристики оптических мультиплексоров и демультиплексоров. Следует заметить, что пользователи и производители оборудования систем CWDM при обозначении спектральных каналов зачастую указывают значения сетки 1270–1610 нм (сдвинутый на 1 нм) из ранее действующей версии стандарта. Системы CWDM могут использоваться в транспортных сетях в городских зонах для различных пользователей, услуг и протоколов.

Вслед за CWDM на рынке оптических технологий появляется DWDM (Dense Wavelength-division multiplexing, плотное частотное разделение каналов) – системы с разносом оптических несущих на 0,8 нм. Стандарт МСЭ G.694.1 (Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid) определяет частотный план. Определено два рабочих диапазона: С-диапазон 1525–1565 нм (Conventional band или C-band) и L-диапазон 1570–1610 нм (Long wavelength band или L-band). Благодаря тому, что усилители EDFA работают в С-диапазоне этот диапазон получил наибольшее распространение. Дальнейшее увеличение количества мультиплексированных оптических каналов DWDM за счет уменьшения частотного интервала между ними выделило технологию HDWDM (High Dense Wavelength-division multiplexing, высокоплотное частотное разделение каналов) – системы с разносом оптических несущих на 0,4 нм и менее.

DWDM может применяться не только для организации магистральных систем связи между крупными населенными пунктами, но и в городских оптических сетях. Появление новых приложений (видео, облачные

технологии, центры обработки данных и др.) подталкивают операторов к внедрению технологии DWDM для увеличения емкости существующих волоконно-оптических сетей с наибольшей экономической эффективностью. Технология DWDM является экономичной, гибкой и масштабируемой для увеличения пропускной способности волоконной сети. За последние десять лет сети WDM эволюционировали от простых систем «точка-точка», пройдя этап однокольцевых сетей, к передовым взаимосвязанным ячеистым архитектурам.

Как и в большинстве транспортных систем, в системах DWDM существуют требования по добавлению и удалению трафика на участках сети. Системы спектрального уплотнения поддерживают два типа структур добавления/выделения оптических каналов: фиксированные оптические мультиплексоры ввода/вывода (FOADM) и перестраиваемые Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers (ROADM).

ROADM – это коммутационный элемент, позволяющий оператору удаленно добавлять и/или выделять длину волны в/из потока DWDM без необходимости прерывать трафик. ROADM дали возможность удаленного переключения трафика в системах WDM на уровне длин волн. ROADM дороже чем FOADM и поэтому используются в сетях, где маршруты трафика не полностью известны или часто меняются и где этот уровень автоматизации экономит значительные затраты с течением времени.

На рисунке 2 приведена схема построения сети WDM с применением перестраиваемых мультиплексоров (ROADM).

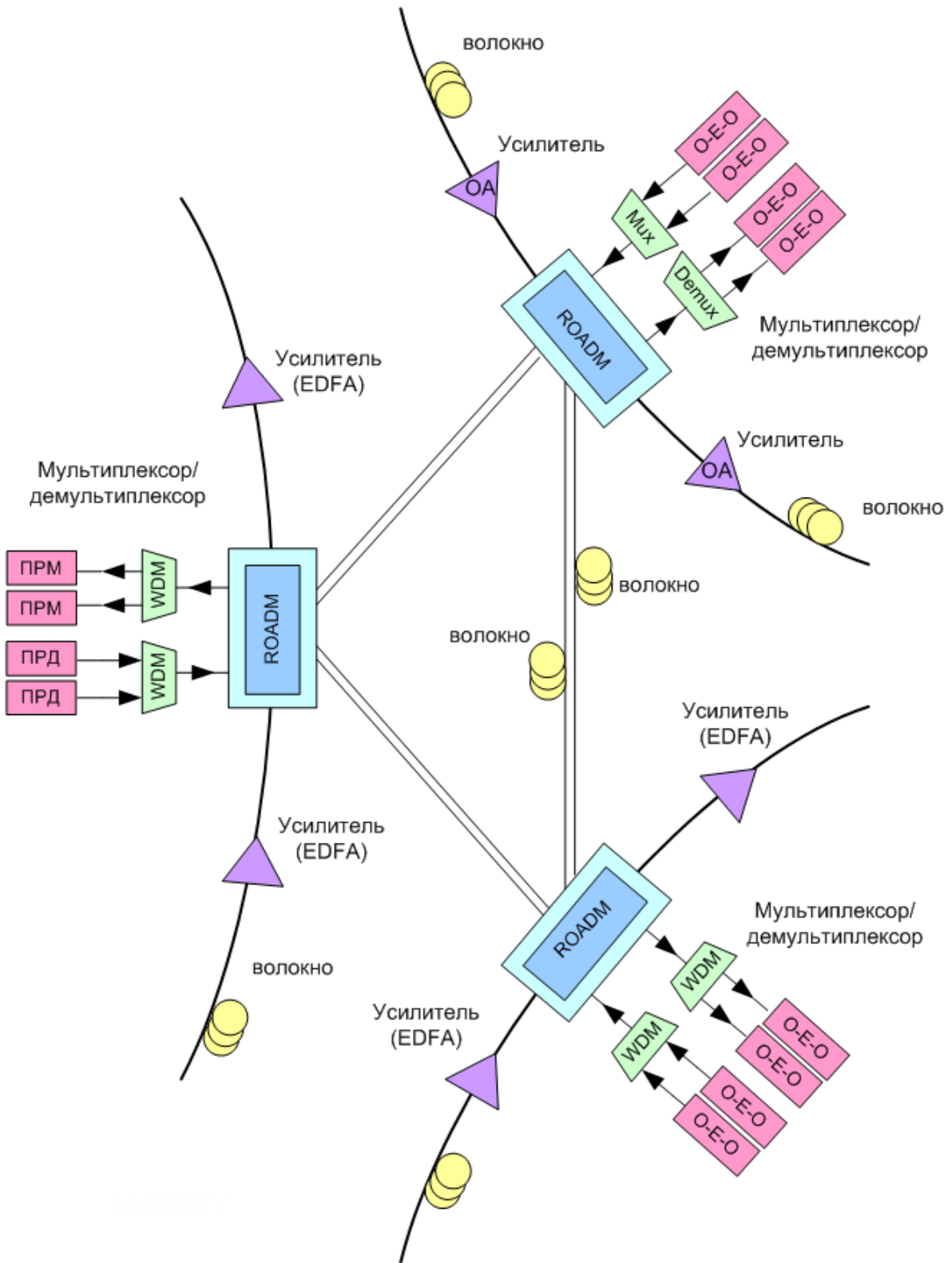


Рисунок 2. Схема системы связи со спектральным уплотнением и ROADM

Развитие технологий спектрального уплотнения в данный момент направлено на обеспечение динамического управления шириной каждого канала. Новая идеология «FlexGrid» предполагает уход от фиксированной сетки частот. Существующий план, основанный на МСЭ G.694, хорошо зарекомендовал себя в отрасли на протяжении многих лет. Но по мере того, как индустрия внедряет еще более быстрые интерфейсы 400G, а в конечном итоге и оптические интерфейсы 1Тбит/с, необходимо принять более крупные размеры каналов и более гибкий план сетки каналов WDM. Дело в том, что при спектральном объединении в одном волокне каналов с разной скоростью и, соответственно различной спектральной полосой при фиксированной сетке возникают «потери» спектрального ресурса, снижается эффективность использования оптического волокна, рисунок 3.

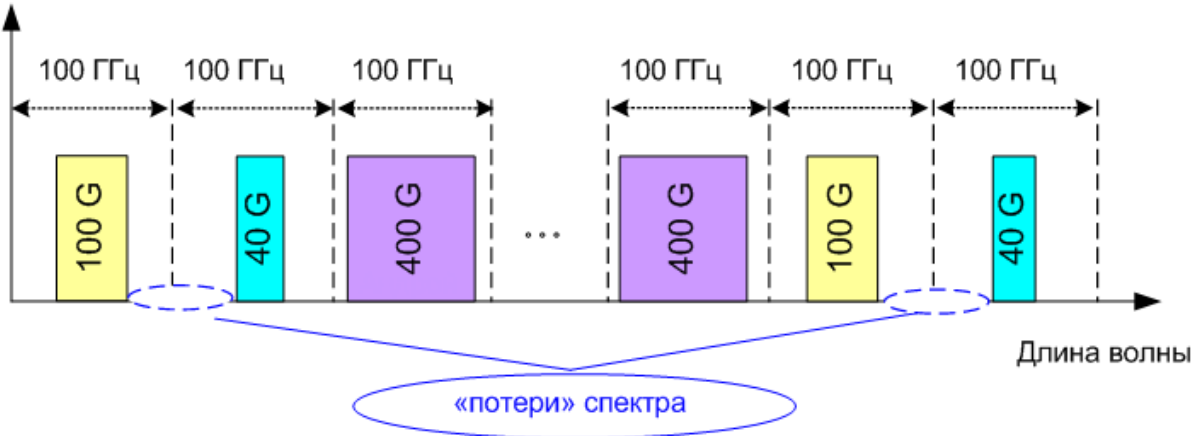


Рисунок 3. Потери спектрального ресурса при фиксированной сетке частот

Технология Flexgrid в настоящее время имеет существенное значение для эффективного использования оптической полосы пропускания, особенно для высоких скоростей передачи данных и применении сложных форматов модуляции.

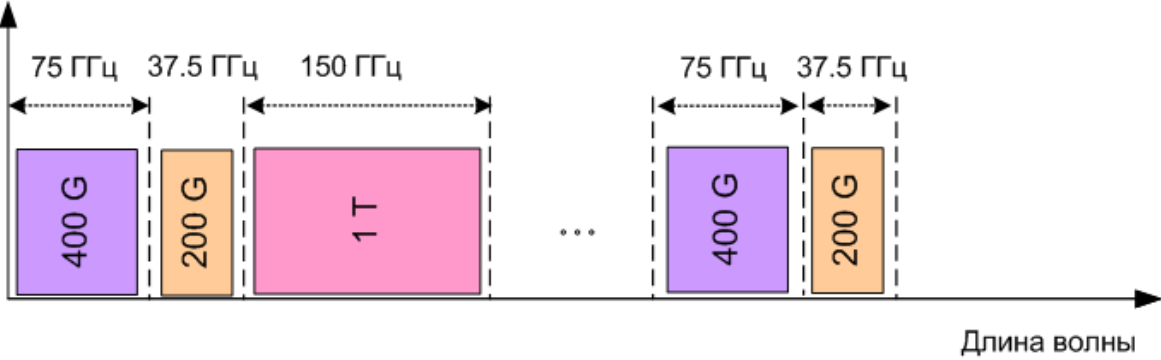


Рисунок 4. Гибкая сетка частот систем спектрального уплотнения

Например, достижения в области технологий в скором времени втиснут поток 400G в пределах канала 75 ГГц или поток 200G в полосу канала 37.5 ГГц, рисунок 4.

Международный союз электросвязи признал необходимость использования гибких сетевых технологий для обеспечения большей спектральной эффективности для приложений WDM. С новым стандартом ITU G.694.1 системы могут выделять частоты за сеткой ITU 50 и 100 ГГц для оптимизации каждого канала для требований к пропускной способности конкретной скорости передачи и схемы модуляции. Чтобы соответствовать определению гибкой сетки WDM в G.694.1, оборудование должно быть в состоянии поддерживать степень разделения каналов 12,5 ГГц, рисунок 5. Системы, которые не могут поддерживать шаг 12,5 ГГц, не смогут обеспечить значительную экономию капитальных затрат с помощью гибких сеток частот.

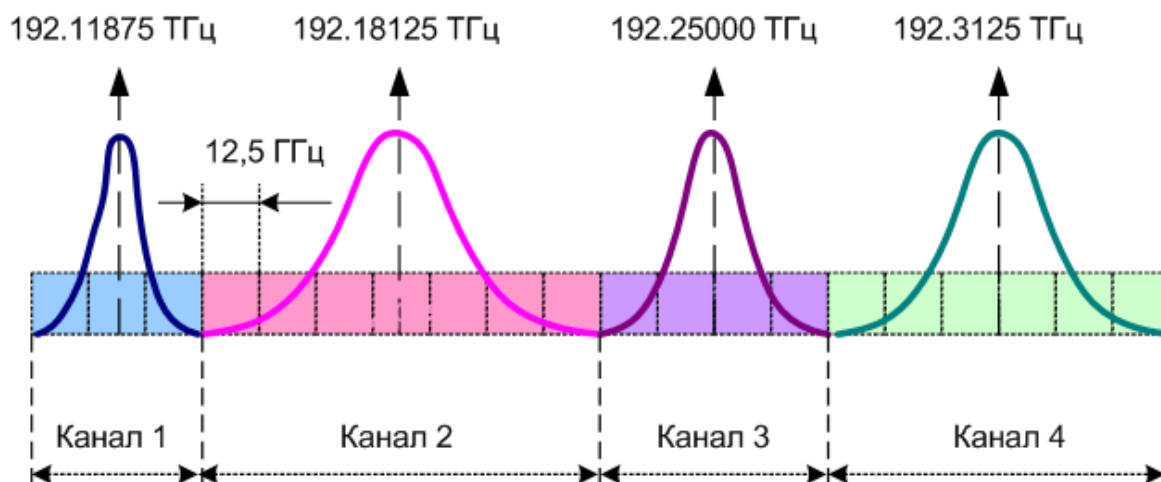


Рисунок 5. Степень разделения каналов (гранулярность) 12,5 ГГц

Внедрение технологии потребует применения соответствующих компонентов системы связи со спектральным уплотнением, но в последствие, после развертывания, планы каналов настраиваются «на лету», что означает, что пропускная способность канала может быть скорректирована для наиболее эффективного переноса будущего спроса по мере его возникновения. МСЭ признал необходимость использования гибких сетевых технологий для обеспечения большей спектральной эффективности для приложений DWDM с меньшим оборудованием и с меньшими затратами. Они также смогут соответствовать стандартам следующего поколения, которые будут разрабатываться для поддержки скорости передачи данных до терабит в секунду, что гарантирует длительный срок службы оборудования и высокую рентабельность инвестиций.

Внедрение новых технологий требует применения соответствующих фотонно-электронных компонентов и устройств. Оборудование сетей связи со спектральным уплотнением (WDM), в том числе с опцией перестраиваемого канального плана сети, активно развивается и является достаточно инновационным продуктом. Оно образует так называемый «фотонный уровень» транспортной сети.

Развитие волоконно-оптической связи движется к созданию полностью оптических «фотонных» сетей, в которых все процессы передачи, приема, обработки и коммутации сигналов осуществляются на чисто фотонном уровне, без участия электронных процессов и электронных устройств. Для этого уже разработаны такие фотонные устройства, как оптические усилители с удаленной накачкой, оптические коммутаторы с оптическим управлением. Очевидна тенденция к интеграции оптических компонентов и внедрению фотонных интегральных схем.

Важными фотонно-электронными компонентами и устройствами современных оптических сетей (рисунок 2) являются оптические приемопередатчики (О-Е-О, транспондеры), мультиплексоры/ демультиплексоры (Mux, Demux), усилители (OA, EDFA), мультиплексоры ввода/вывода (ADM, FOADM, ROADM). Именно этим компонентам будет уделено внимание в рамках дисциплины «Фотонно-электронные компоненты и устройства в инфокоммуникациях».

В соответствии с ГОСТ Р 54417-2011 «Компоненты волоконно-оптических систем передачи. Термины и определения» *компонентом волоконно-оптической системы передачи* (компонент ВОСП) называют изделие оптики, оптоэлектроники или оптико-механическое изделие, являющееся частью волоконно-оптической системы передачи, которое может быть выделено как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации, и предназначенное для выполнения одной или нескольких функций по передаче, распределению, ответвлению, объединению, коммутации, задержке, преобразованию, формированию, усилению, модуляции оптического сигнала.

Различают пассивные и активные компоненты.

Пассивный компонент ВОСП – компонент волоконно-оптической системы передачи, не воздействующий на оптическое излучение при выполнении определенных функций.

Активный компонент ВОСП – компонент волоконно-оптической системы передачи, воздействующий на оптическое излучение при выполнении определенных функций.

2. ИСТОЧНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Одним из основных компонентов волоконно-оптической системы связи является приемопередающий модуль, включающий в себя источник и приемник излучения. От параметров этих элементов во многом зависит качество и надежность работы всей системы передачи в целом.

Наиболее распространение получили три основных типа источников, использующих прямую модуляцию: лазеры Фабри-Перо (Fabry-Perot, FP), вертикально-излучающие лазеры (Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, VCSEL) и лазеры с распределенной обратной связью (Distributed Feedback, DFB).

Светоизлучающие диоды

Излучающий диод – полупроводниковый диод, излучающий энергию в оптическом диапазоне длин волн в результате спонтанной рекомбинации электронов и дырок. Принцип работы светоизлучающего диода (СИД) основан на излучательной рекомбинации носителей заряда в активной области гетерогенной структуры при пропускании через нее тока.

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

Гетерогенные структуры могут создаваться на основе разных полупроводниковых материалов. Обычно в качестве подложки используется GaAs и InP. Соответствующий композиционный состав активного материала подбирается в зависимости от длины волны излучения и создается посредством напыления на подложку. В отличие от индикаторных светодиодов введение в р-п структуру дополнительного слоя позволяет сформировать отличающиеся более высоким КПД светоизлучающий диод. Генерация фотонов только в активной области связана с тем, что в материалах с большей энергетической зоной генерация фотонов невозможна. Кроме того, большая запрещенная энергетическая зона предотвращает поглощение фотонов (генерацию электронов и дырок) и делает встроенные слои прозрачными для излучаемых волн.

По конструкции различают светодиоды с поверхностным излучением и торцевым излучением.

При вводе излучения в волокно непосредственно с излучающей поверхности активного слоя, можно считать, что, по крайней мере, половина оптической мощности теряется, т. к. свет с активного слоя распространяется во всех направлениях. Небольшая часть оптической мощности может быть отражена путем базовой металлизации, внося тем самым часть оптической мощности в полезный световой поток. Другой простой путь ре-

шения заключается в ограничении излучения небольшой областью внутри кристалла большей площади. Этот подход впервые реализовали Баррас и Доусон и поэтому СИД такой геометрии обычно называют излучателями Барраса (рисунок 6).

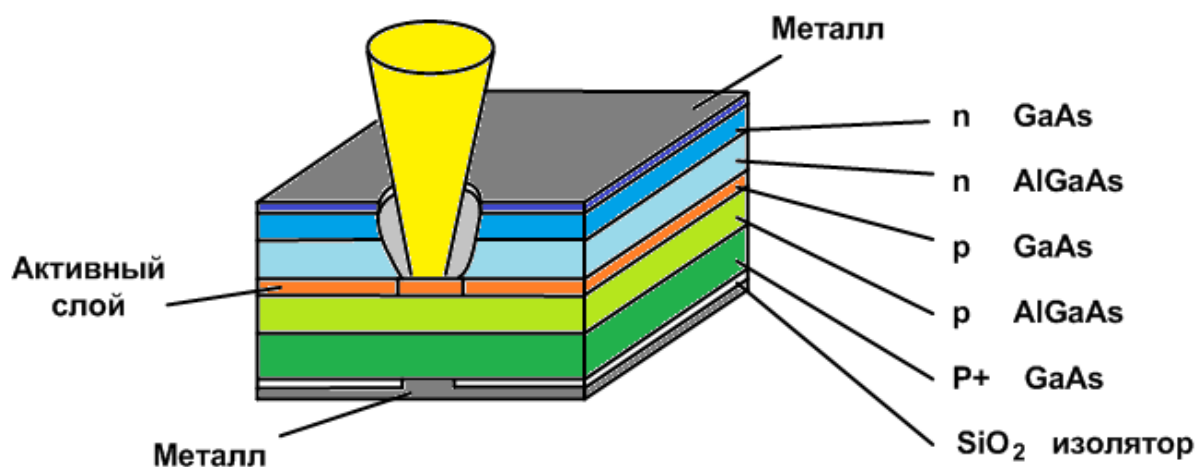


Рисунок 6. Структура светодиода Барраса

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

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

Лучшей эффективностью ввода излучения в волокно характеризуется СИД с торцевым излучением, обеспечивающим ввод около 50 мкВт (30% доступной оптической мощности) в градиентное волокно и 20 мкВт в одномодовое волокно. Конструкция диода приведена на рисунке 7.

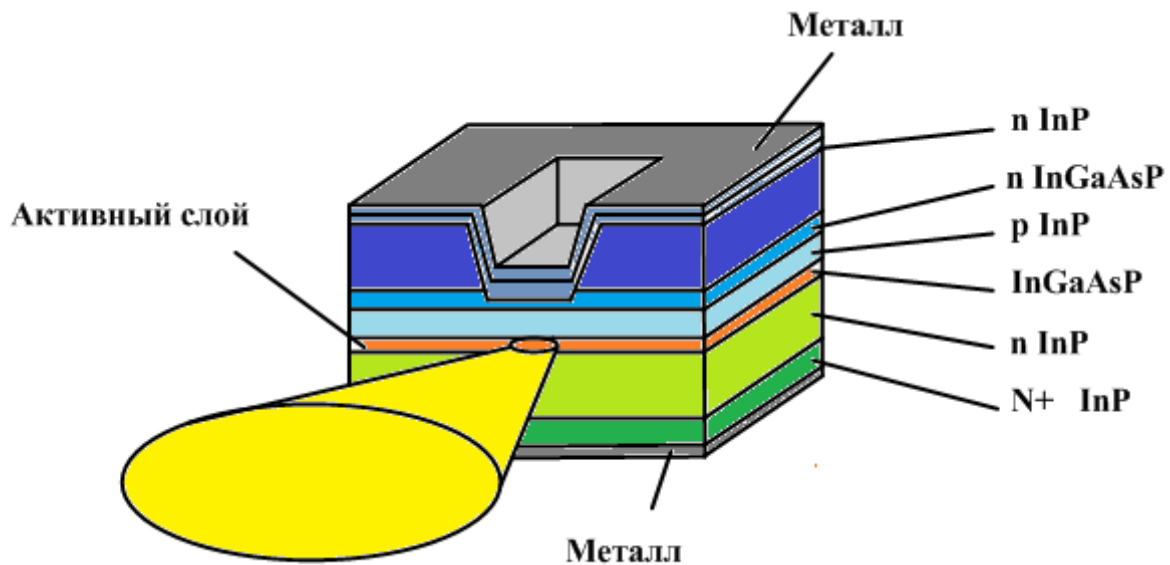


Рисунок 7. Структура светодиода с торцевым излучением.

Один из путей построения СИД с торцевым излучением основан на технологии V-образных канавок, которая была разработана для создания лазерных диодов. В этом случае обычная двойная гетероструктура покрывается двумя слоями типа n, которые образуют отрицательно смещенный p-n переход, а для создания проводящей полосы p типа в V-образной канавке напыляется цинк. Наконец, на переднюю грань наносится антиотражающее покрытие, а электрический контакт выполняется короче длины кристалла с тем, чтобы избежать вынужденной эмиссии. Плотность тока и качество оптического резонатора достаточно высоки для создания эмиссии, близкой к вынужденной. Результатом является более узкая ширина спектра (около 20 нм) и более высокая выходная мощность, но при более сильной температурной зависимости. Как правило, с точки зрения спектрального состава излучения СИД имеет достаточно большую ширину спектра, составляющую обычно от 40 до 80 нм, рисунок 10.

Излучение в дальней зоне СИД с торцевым излучением в этом случае эллиптическую форму. Типовые значения углов дальней зоны составляют 50° в вертикальном направлении и 100° в горизонтальном направлении. При использовании СИД для передачи данных они характеризуются рядом недостатков, основными из которых являются:

- сравнительно низкая полоса частот, равная 100 МГц, хотя достигнуты значения полосы частот до 1 ГГц, поэтому быстродействие СИД как минимум в 5 раз ниже по сравнению с лазером;

- широкий спектр излучения, составляющий около 60 нм, что также снижает полосу частот вследствие монохроматической дисперсии;

низкая эффективность ввода излучения в оптическое волокно, даже для диодов с торцевым излучением.

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

Одной из разновидностей LED являются суперлюминесцентные диоды (SLED, СЛД), которые отличаются большей по сравнению с лазерными диодами стабильностью, имеют меньший уровень шумов, а большая ширина спектра решает все проблемы, связанные с оптической интерференцией. Дополнительными преимуществами SLED в этом случае являются: высокая линейность, меньшее потребление энергии и вследствие низкой плотности тока, высокая надежность. Кроме этого, так как SLED не очень чувствительны к перегрузке, для управления ими можно использовать простые схемы управления. По своим характеристикам SLED занимают промежуточное место между СИД и лазерными диодами.

Лазерные диоды

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

Так как стимулированные фотоны когерентны с генерирующими фотонами, т. е. имеют одну и ту же длину волны и фазу, такое излучение

имеет узкий спектр, а длина волны определяется свойствами материала лазерной структуры. В типовых лазерных диодах высота активной зоны составляет 5-10 мкм, ширина 0.1-0.2 мкм, а длина 300 мкм, при этом грани представляют собой полупрозрачные зеркала, ограничивающие объем резонатора. Эмиссия происходит с обеих граней и имеет идентичные характеристики излучения. Типовые значения порогового тока составляют от единиц до сотен миллиампер, а мощность лазерного излучения несколько десятков милливатт.

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

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

В лазерных диодах с резонатором Фабри-Перо (FP лазеры, Fabry-Perot) резонатор образуется торцевыми поверхностями, окружающими с обеих сторон гетерогенный переход. Одна из сторон отражает свет с коэффициентом отражения близким к 100%, другая является полупрозрачной, обеспечивая, таким образом, выход излучения наружу, рисунок 8.

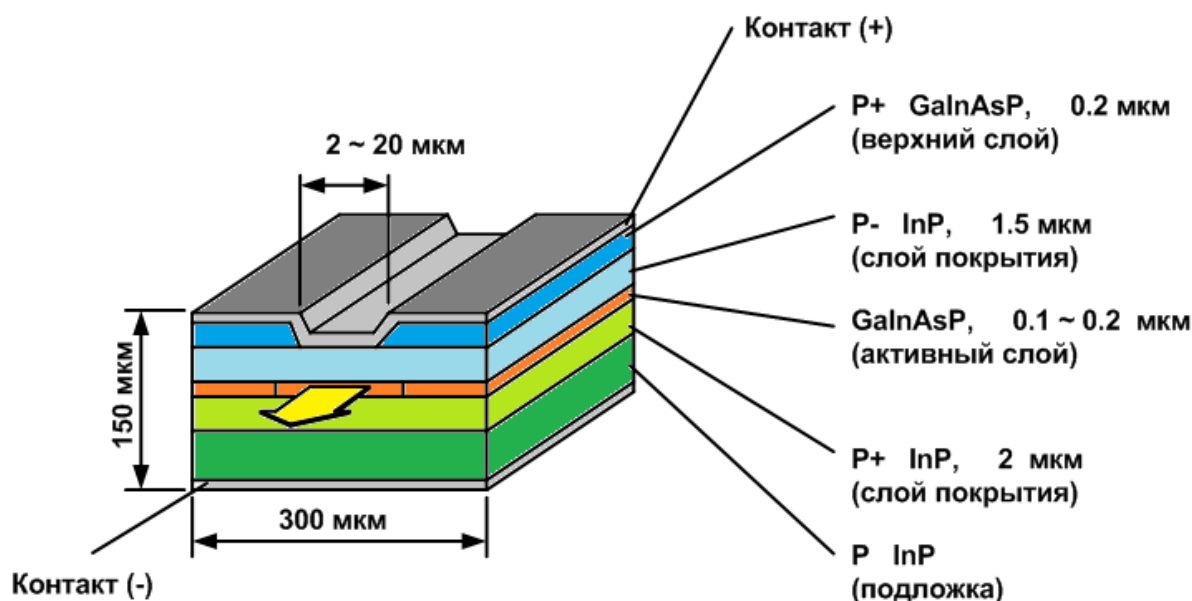


Рисунок 8. Конструкция лазерного диода Фабри-Перо

В диапазоне 1310 нм FP-лазеры изготавливают на подложке из фосфида индия (InP) с активными слоями из InGaAsP. В спектре FP лазера наряду с главным пиком, в котором сосредоточена основная мощность излучения, существуют побочные максимумы, рисунок 9.

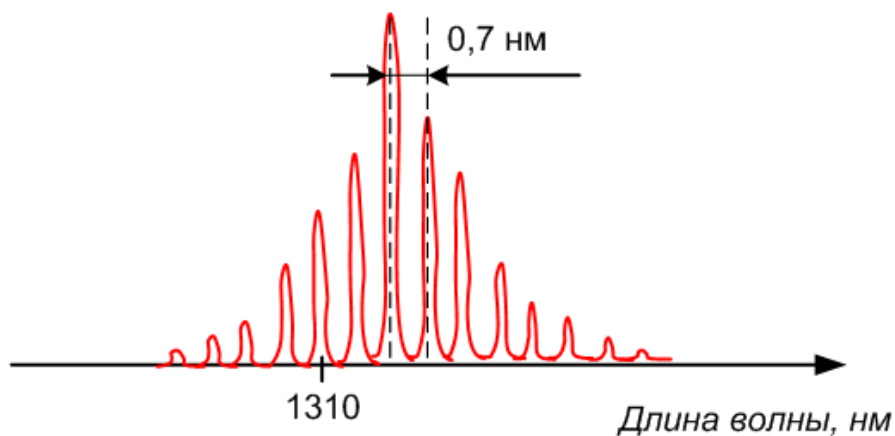


Рисунок 9. Спектр лазера Фабри-Перо

Этот эффект отсутствует у перечисленных трех других типов лазеров (DFB, ЕС, DBR), рисунок 10.

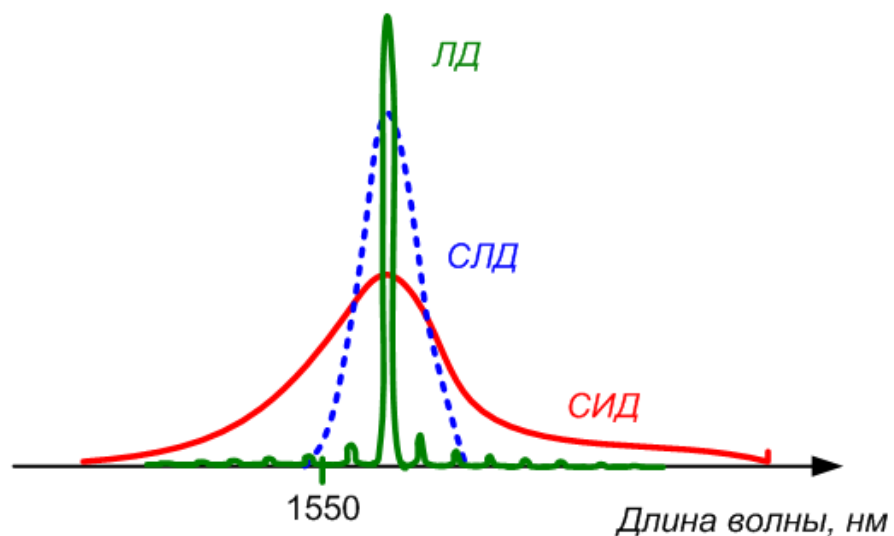


Рисунок 10. Сравнение распределения спектральной интенсивности светоизлучающего диода (СИД), суперлюминисцентного диода (СЛД), лазерного DFB, DBR диода (ЛД)

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 (рисунок 11), а в DBR лазерах периодическая структура вынесена за пределы активной области (рисунок 12).

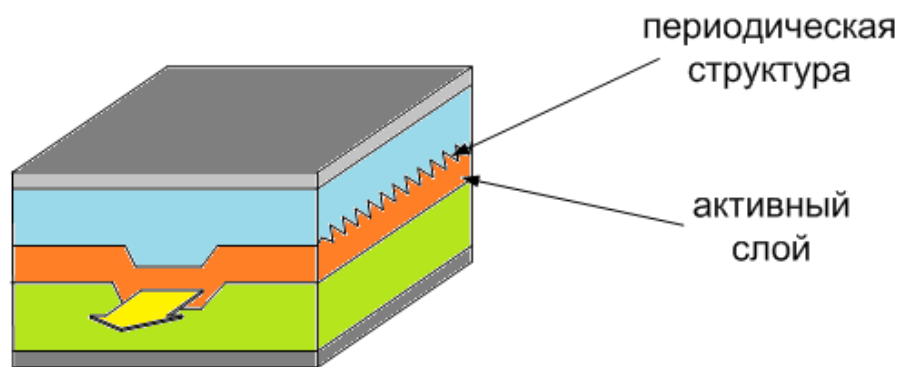


Рисунок 11. Структура DFB лазера

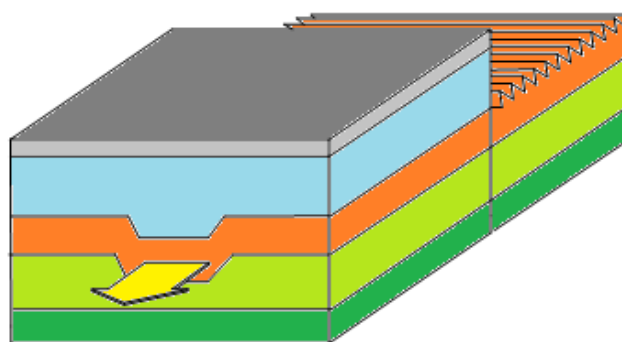


Рисунок 12. Структура DBR лазера

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

Вертикально-излучающие лазеры

Вертикально-излучающие лазеры (VCSEL) – «Поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором» – разновидность диодного полупроводникового лазера, излучающего свет в направлении, перпен-

дикулярном поверхности кристалла, в отличие от обычных лазерных диодов, излучающих в плоскости, параллельной поверхности (рисунок 13).

Первый вертикально-излучающий лазер VCSEL был представлен в 1979 году компаниями Soda, Iga, Kitahara и Yasuharu Suematsu, но устройства для продолжительной работы при комнатной температуре появились только в 1988 году. Эти первые полностью полупроводниковые VCSEL представили конструктивные особенности, которые все еще используются во всех коммерческих VCSEL и зачастую заменили излучающие лазеры в приложениях для волоконно-оптической связи ближнего действия, таких как Gigabit Ethernet и Fibre Channel, и теперь используются для полосы пропускания канала связи от 1 Гбит/с до 400 Гбит/с.

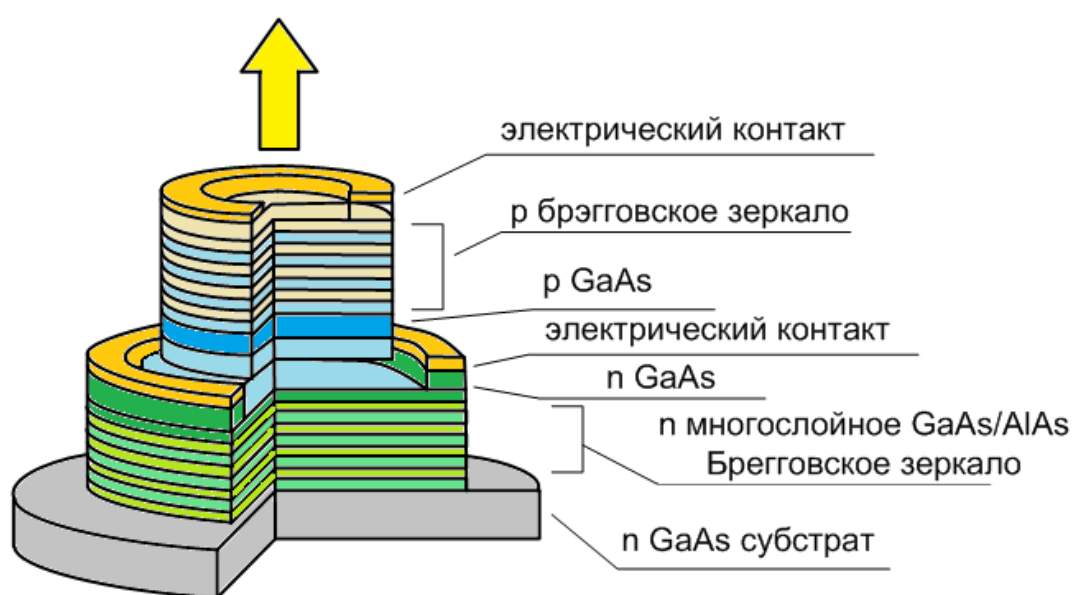


Рисунок 13. Структура VCSEL лазера

Коммерческое распространение VCSEL получили после 1996 года. С тех пор они использовались во многих практических применениях, включая лазерные мыши, лазерную печать, точные атомные часы, распознавание жеста, твердотельные лазеры, и, что наиболее важно, - в оптических линиях связи малой протяженности для передачи данных. Хотя VCSEL являются ключевой технологией для современных оптических соединительных линий в центрах обработки данных, серверных кластерах, существует еще много возможностей для применения VCSEL. Например, для очень коротких оптических линий, которые используются для замены соединений на основе меди как внутри, так и между кремниевыми интегральными схемами и интегрированными системами фотоники. По оценкам, потребность в подобных линиях в центрах обработки данных и суперкомпьютере-

рах к 2019 году достигнет рыночных доходов в размере 520 млн. долл. США. VCSEL являются высоконадежными, экономичными и энергоэффективными источниками света и, следовательно, могут заменять излучающие излучение лазерные диоды в большом количестве приложений. VCSEL обладают значительными преимуществами, такими как более высокая скорость модуляции, более низкое энергопотребление, более высокое качество луча и более низкие производственные затраты. Важным преимуществом этого типа лазера является простота его производства. Их производят массово, дешево и с минимальным процентом брака.

Для лазеров с прямой модуляцией (DML, directly modulated lasers) существуют две основные конкурирующие технологии: на основе электроабсорбционных модуляторов (Electroabsorptive Modulators, EAM) и на основе интерферометров Маха-Цендера (Mach-Zehnder (MZ) Interferometers). В течение последних двух десятилетий высокопроизводительные оптические передатчики для 10-Гбит/с телекоммуникационных систем полагались на внешние модуляторы, достигая необходимой для этих целей дальности. Однако большой размер и энергопотребление этих модуляторов оставили возможности для альтернативных подходов.

EML-лазер представляет собой сборку DFB лазера, дополненного электро-поглощающим модулятором EAM, рисунок 14.

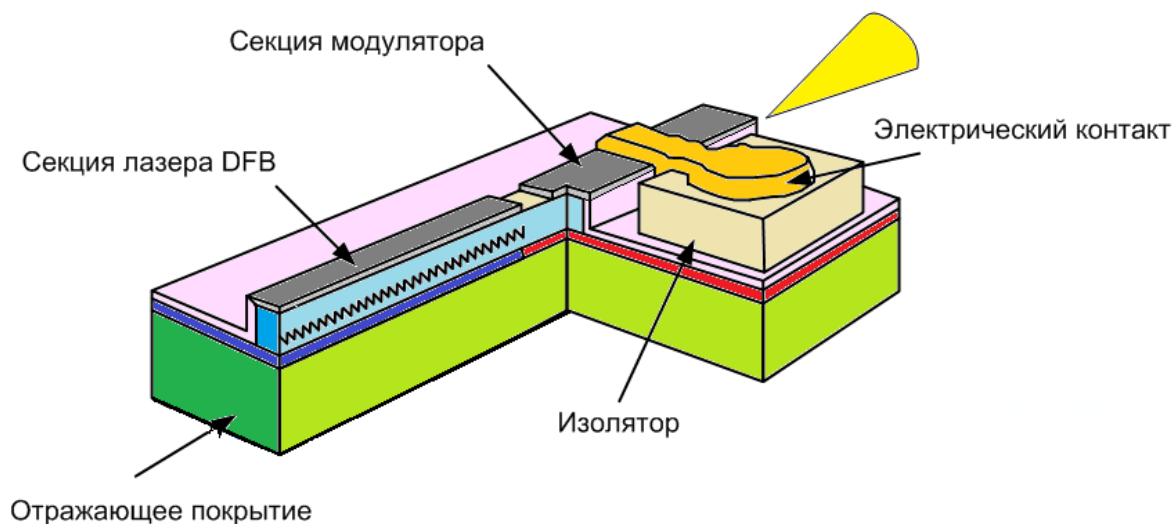


Рисунок 14. Структура источника EML

Когда лазер образован при помощи EAM и DFB-лазера на одном кристалле, его обычно называют электроабсорбционным модулированным лазером (Electroabsorptive Modulated Laser, EML). Именно эта связка позволяет генерировать световые пучки с высокой стабильностью длины волны

и достаточно высокой мощности. Многие устройства со скоростью 10G-25G, предназначенные для передачи на дальности порядка 80-100 километров основываются на EML лазерах. EAM построены из полупроводниковых материалов, таких как фосфид индия (InP). Главное преимущество EAM заключается в способности интегрироваться с DFB-лазерами на одном кристалле.

Система параметров источников излучения

Оптоэлектронный прибор описывается системой параметров, которые подразделяют на:

1) энергетические и световые – параметры, характеризующие энергию излучения оптоэлектронного прибора в шкале радиометрических или световых величин (мощность излучения, сила излучения - в шкале радиометрических величин, световой поток, сила света, яркость - в шкале световых величин).

2) спектральные – параметры, дающие информацию о распределении энергии оптического излучения оптоэлектронного прибора по длинам волн или частоте (длина волны в максимуме спектральной плотности, ширина спектра излучения)

3) пространственные – параметры, характеризующие распределение энергии излучения оптоэлектронного прибора в пространстве, содержащем излучатель (угол излучения плоский или телесный)

4) преобразовательные – параметры, характеризующие качественно и количественно процесс преобразования электрической или оптической энергии внешнего источника в энергию излучения или электрическую энергию (коэффициент полезного действия, квантовая эффективность, световая отдача, интегральная и спектральная чувствительность)

5) электрические – параметры, характеризующие полупроводниковые оптоэлектронные излучатели как элементы электрической цепи (постоянное прямое напряжение, емкость, сопротивление и т. д.)

Наиболее часто источник излучения для ВОСП описывают следующей системой параметров:

Размер излучающей области и излучение на дальнем конце, которое определяются непосредственно на микросхеме LED, причем значение размера устанавливается путем анализа изображения, тогда как измерение углового распределения мощности производится на некотором расстоянии от источника.

Коэффициент передачи и нелинейность преобразования, которые определяются по значению мощности излучения в зависимости от протекающего через диод тока.

Общая мощность излучения, которая определяется суммированием мощности в каждой точке спектральной характеристики диода.

Центральная длина волны, определяемая первым моментом распределения мощности.

Среднеквадратическое значение ширины спектра LED, которое при допущении распределения Гаусса определяется вторым моментом распределения мощности.

Полная ширина спектра при половине максимальной мощности (FWHM) – ширина спектра LED в пределах половины мощности излучения при гауссовском распределении последней.

Среднее значение длины волны, которая является усредненным значением двух длин волн, определяемых в процессе измерения ширины 3 дБ.

Пиковая длина волны, определяемая по значению пиковой мощности LED.

Плотность (1 нм) - плотность мощности спектра для полосы пропускания 1 нм при пиковой длине волны.

Кривая распределения, представляющая собой график измеренного спектра в виде распределения Гаусса и в ряде случаев отображаемую на экране анализатора спектра.

Полоса частот модуляции, определяемая в результате модулирования тока LED от перестраиваемого генератора с последующим преобразованием модулированного оптического сигнала в электрический сигнал, который измеряется, например, осциллографом с получением частотной характеристики LED.

Длительность фронта нарастания/спада импульса излучения.

Время задержки при включении/выключении

Вольтамперная и излучательная характеристика

Рабочие и предельные параметры эксплуатации (диапазон рабочих температур, максимально допустимые прямые и обратные напряжения и токи)

Графические зависимости и коэффициенты, характеризующие нестабильность параметров, зависимость их от температуры.

3. ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ МОДУЛЯТОРЫ

Модуляция тока, протекающего через светодиод или лазер, является наиболее простым способом получения оптического излучения модулированного по интенсивности. Такой вариант модуляции называют прямой модуляцией. Как упоминалось во втором разделе, существуют варианты построения передатчиков с применением внешней модуляцией, т.е. с применением оптических модуляторов.

Оптический модулятор – активный компонент ВОСП, предназначенный для модуляции оптического излучения по одному или нескольким оптическим параметрам.

В зависимости от изменяемого параметра различают модуляторы амплитудные, фазовые, поляризационные.

В аналоговых и цифровых волоконно-оптических системах связи большее распространение получили амплитудные электрооптические модуляторы, построенные по схеме интерферометра Маха–Цандера. На рисунке 15 приведено схематичное представление конструкции модулятора интенсивности интерферометрического типа на основе ниобата лития.

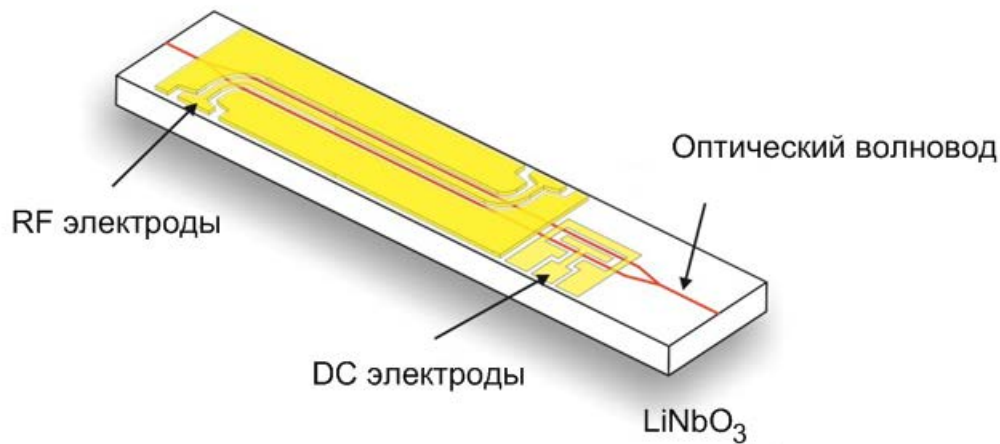


Рисунок 15. Схема модулятора интенсивности на основе ниобата лития (компания iXBlue Photonics, Франция)

Интегрально-оптическая схема модулятора, состоит из системы канальных оптических волноводов сформированных на подложке ниобата лития. Лазерное излучение входного волновода разделяется на два пути, которые затем объединяются в выходном волноводе. Два пути составляют два плеча интерферометра Маха-Цандера.

Вдоль волноводов сформированы электроды. Обычно есть две пары электродов: RF электроды модуляции (часто называемые радиочастотными электродами) и DC электроды смещения (электроды постоянного тока). Приложенное к электродам напряжение создает электрическое поле изменяющее показатель преломления электрооптического материала волноводов. Лазерное излучение, распространяющееся в плечах модулятора с разными скоростями, приобретает разность фаз, что приводит к модуляции интенсивности на выходе устройства.

Зависимость интенсивности выходного излучения от приложенных напряжений называют передаточной функцией модулятора. На рисунке 16 приведен график передаточной функции, соответствующий модулятору Маха-Цендера с симметричной топологией волноводов. В реальности же из-за технологических допусков и неоднородностей материалов существует дисбаланс в передаточной функции.

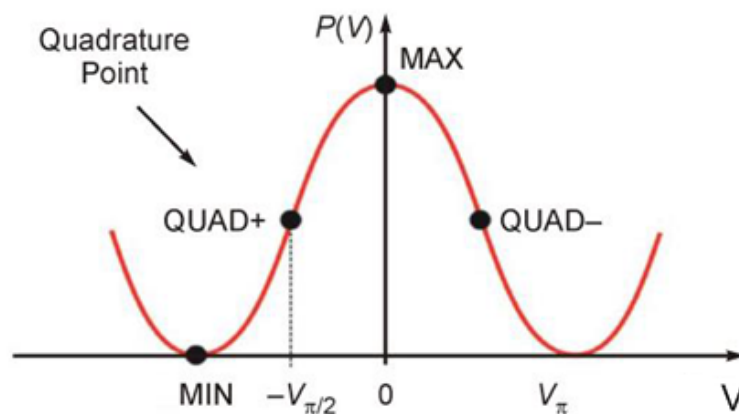


Рисунок 16. Передаточная функция модулятора Маха-Цендера

Чтобы получить желаемую модуляцию света, необходимо подать на модулятор два электрических напряжения с соответствующими параметрами: напряжение смещения (DC) и напряжение модуляции (RF сигнал).

Подаваемое на DC электроды напряжение смещения служит для задания рабочей точки модулятора. Наиболее часто рабочими точками модуляторов являются точки минимума (MIN), максимума (MAX) или квадратурные точки (Quadrature point, QUAD+, QUAD-). Выбор рабочей точки зависит от целей применения модулятора и поясняется рисунками 17-20.

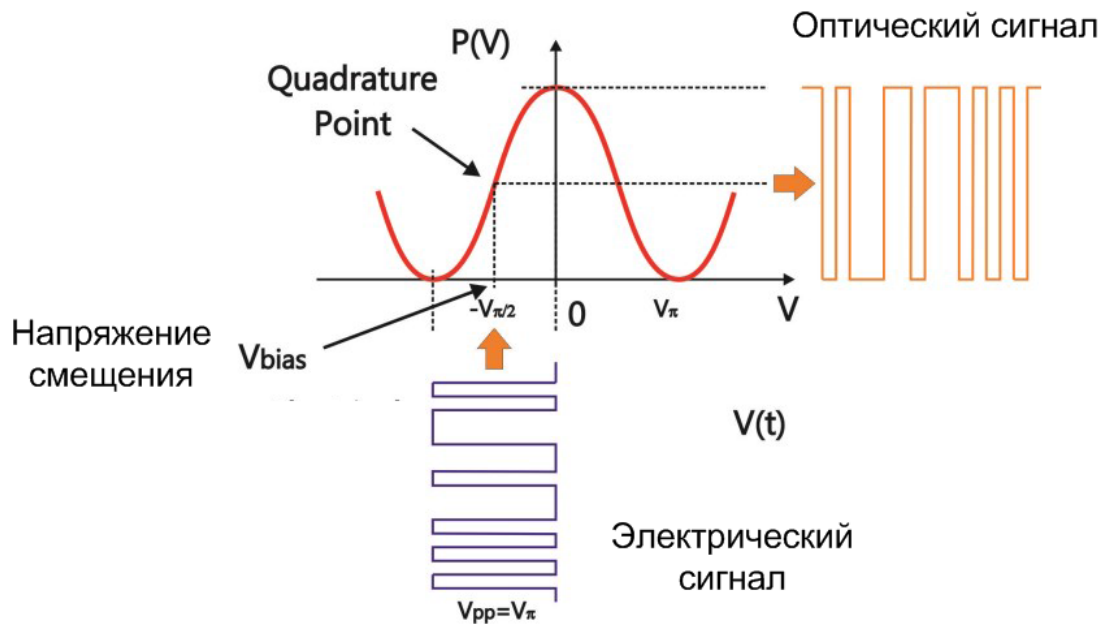


Рисунок 17. Цифровая модуляция (формат NRZ)

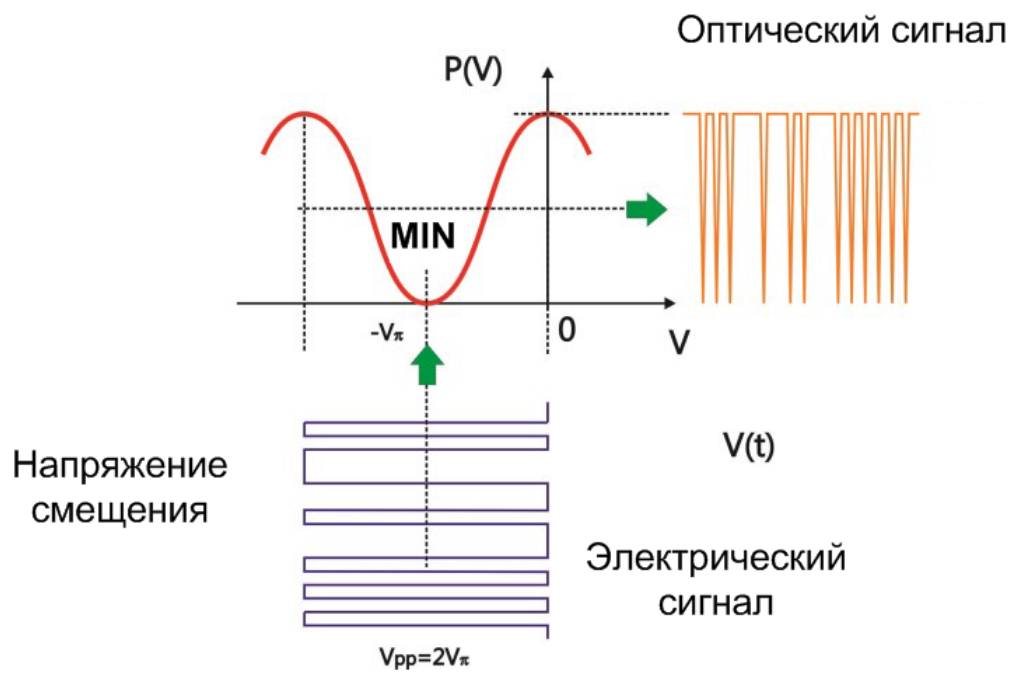


Рисунок 18. Цифровая модуляция (формат DPSK)

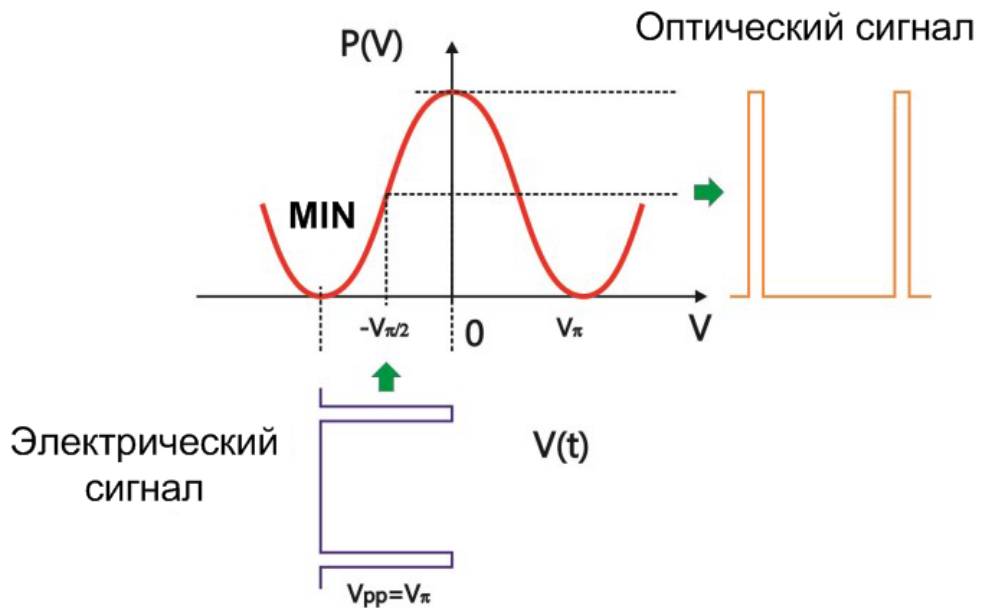


Рисунок 19. Импульсная модуляция (высокий коэф. экстинкции)

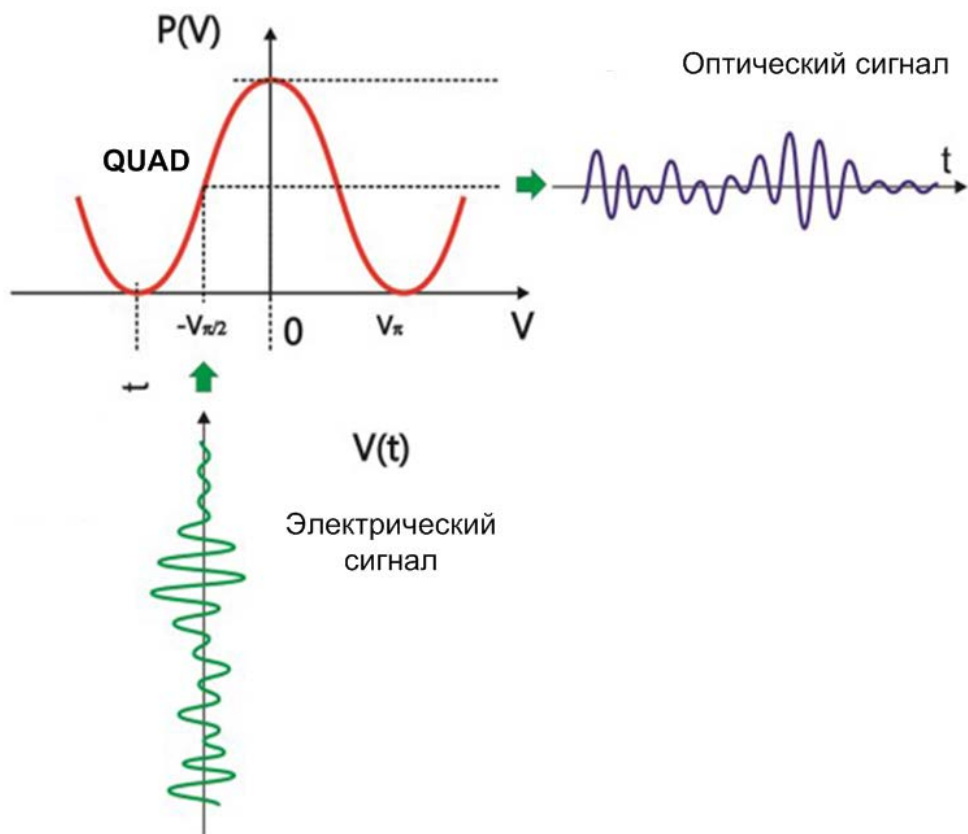


Рисунок 20. Аналоговая модуляция

Точки QUAD+ и QUAD- находятся в середине линейного участка и различаются наклоном передаточной функции модулятора. В области точки QUAD+ наклон передаточной функции положительный, т.е. увеличение напряжения на электродах приводит к возрастанию интенсивности выходного сигнала. Точка QUAD- является инвертирующей, т.е. увеличение напряжения на электродах приводит к снижению интенсивности выходного сигнала модулятора. В квадратурных точках передаточная функция имеет максимальную крутизну. В рабочих точках QUAD+ и QUAD- модулятор имеет минимальные нелинейные искажения.

Применение модулятора при задании рабочей точки MIN или MAX позволяет получать импульсные сигналы, реализовывать удвоение частоты, фазовую модуляцию.

Помимо того, что реальный интерферометр Маха-Цедера не идеально сбалансирован, он также подвержен дрейфу. Колебания температуры и эффекты старения заставляют передаточную функцию медленно перемещаться в горизонтальном направлении, что приводит к смещению положения рабочей точки и искажениям, рисунок 21. Поэтому напряжение смещения должно не только устанавливать желаемую рабочую точку, но и компенсировать возможный дрейф передаточной характеристики модулятора.

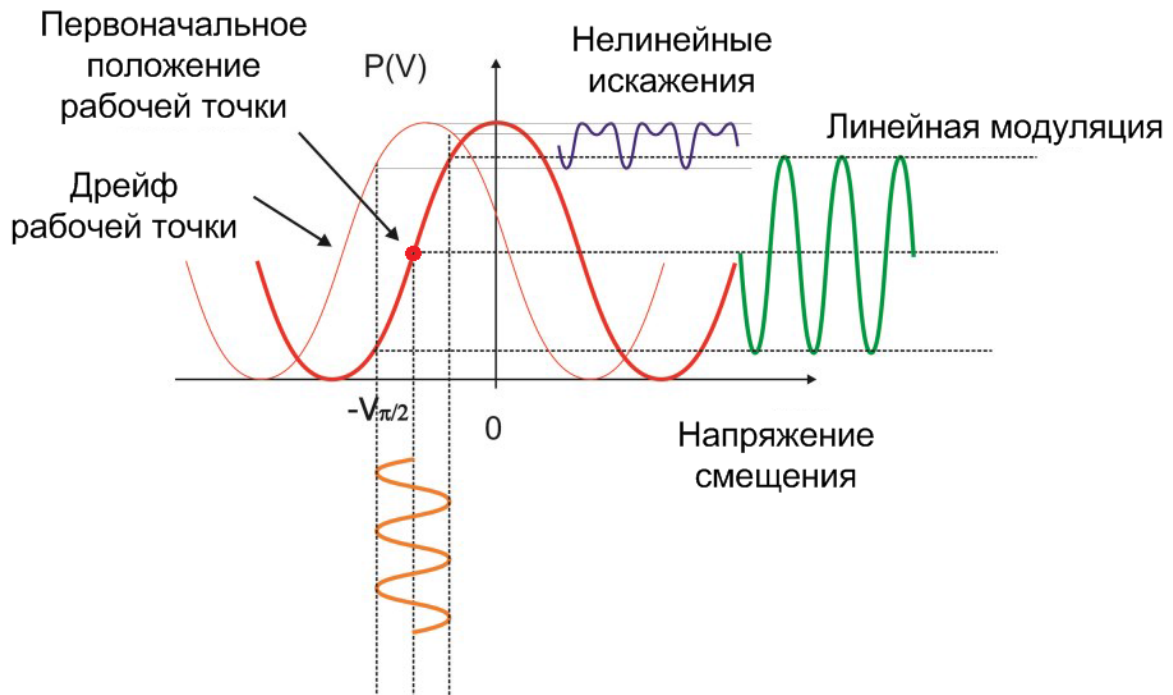


Рисунок 21. Дрейф передаточной функции модулятора

Напряжение смещения может подаваться от простого источника, отрегулированного вручную для достижения желаемой рабочей точки. Однако в случае дрейфа модулятора источник требует перенастройки. Такое решение может быть приемлемым в условиях лаборатории для модуляторов с низким дрейфом и стабильными характеристиками окружающей среды. Для длительной работы, и особенно в системах, эксплуатирующихся в условиях изменяющихся температур, необходима схема автоматического управления смещением – контроллер рабочей точки (MBC, Modulator Bias Controller).

Напряжение сигнала модуляции подается на RF электроды. Для согласования электрических параметров модулирующего сигнала с входными характеристиками модулятора применяются RF драйверы (RF driver). Задача RF драйверов обеспечить для модулятора оптимизированный по времени и напряжению электрический сигнал. RF драйверы могут выполнять функции высокочастотных широкополосных усилителей и формирователей сигналов, управляемых линий задержек, ограничителей напряжения. Функциональные возможности драйверов позволяют получать импульсные и цифровые сигналы требуемого формата (RZ, NRZ, QPSK, DPSK и т.д.), с низкими фазовыми дрожаниями и малым временем нарастания/спада, без выбросов на фронтах. RF драйверы являются ключевыми устройствами при реализации многоуровневых форматов модуляции.

На рисунке 22 приведена схема включения модулятора.

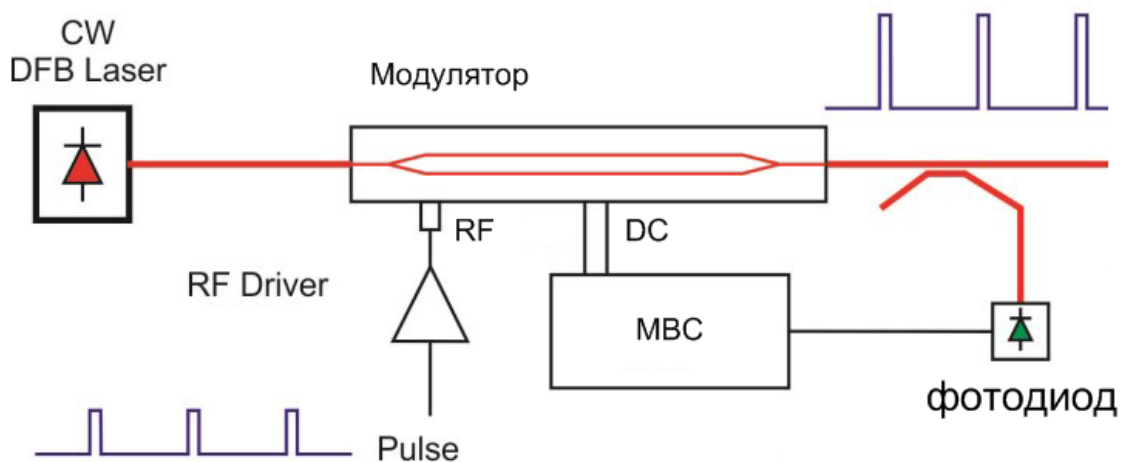


Рисунок 22. Схема включения модулятора

Постоянное по интенсивности излучение DFB лазера (CW DFB Laser) ступает на вход модулятора. Небольшая часть выходного излучения через разветвитель поступает на фотодетектор (фотодиод обратной связи). Электрический сигнал фотодетектора используется схемой контроллера

рабочей точки (МВС) для коррекции напряжения смещения. Модулирующий сигнал (Pulse) через RF драйвер подается на электроды RF.

На рисунке 23 приведена схема двойного параллельного электрооптического модулятора Маха-Цендера (модулятор MXIQ-LN-40, компания iXBlue Photonics, Франция).

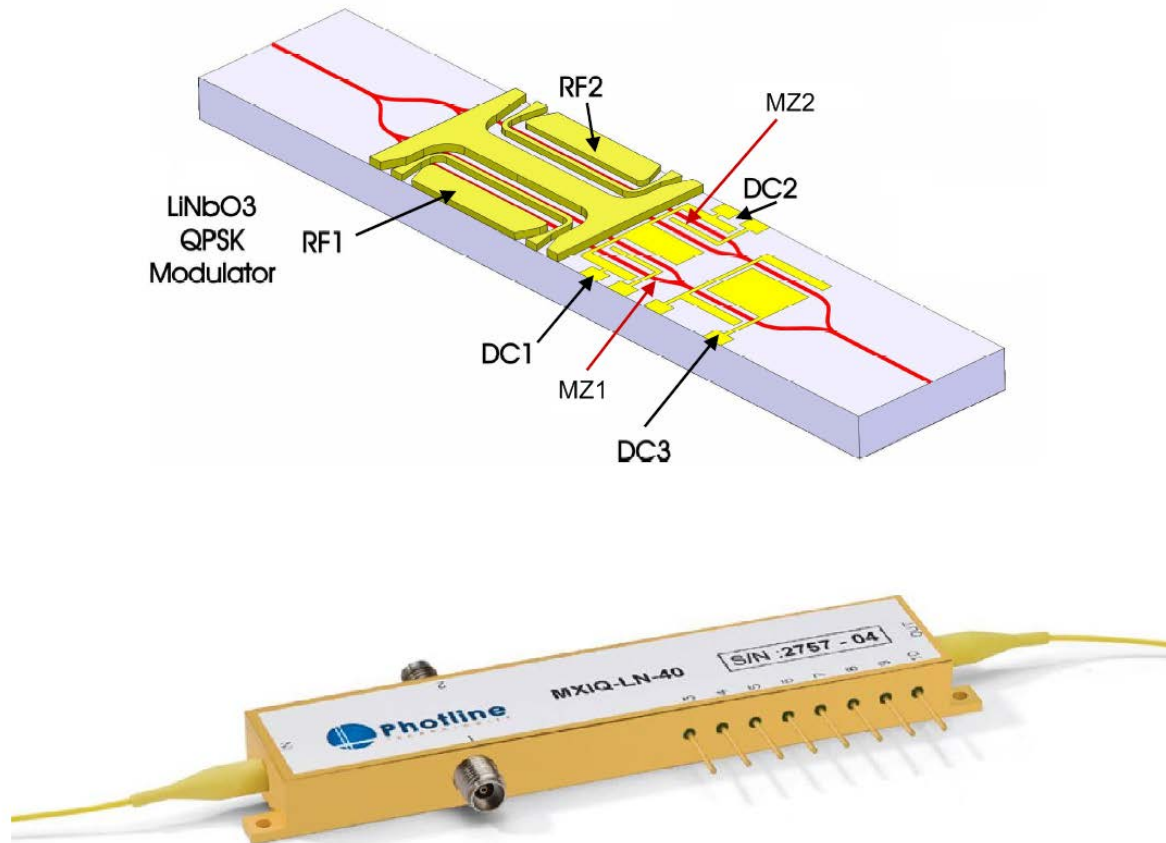


Рисунок 23. Схема и внешний вид двойного параллельного электрооптического модулятора Маха-Цендера

Приведенный модулятор состоит из двух субмодуляторов Маха-Цендера (на рисунке 23 обозначены MZ1 и MZ2) вложенных в большой модулятор Маха-Цендера. Каждому вложенному субмодулятору соответствуют два комплекта электродов: DC1 и DC2 для задания положения рабочей точки на передаточной характеристике и RF1, RF2 для высокочастотных сигналов модуляции. Электроды DC3 позволяют контролировать разность фаз между выходными сигналами субмодуляторов MZ1 и MZ2.

Модулятор позволяет формировать сигналы следующих форматов модуляции: квадратурная фазовая манипуляция (QPSK, quadrature phase shift keying), амплитудная модуляция с одной боковой полосой (SSB, single sideband modulation), мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM, orthogonal frequency-division multiplexing),

квадратурная амплитудная модуляция (QAM, quadrature amplitude modulation),

В таблицах 1-3 приведены технические характеристики рассмотренного модулятора MXIQ-LN-40.

Таблица 1

Электрические характеристики модулятора MXIQ-LN-40

Параметр	Значение
Электрооптическая полоса	20 ГГц
Пульсация S21	0,5 дБ
Электрические обратные потери	-12 дБ
V _p RF1, RF2 @50 кГц	5,7 В
V _p RF1, RF2 @10 Гбит/с PRBS	7 В
V _p DC1 и DC2 электроды	7 В
V _p DC3 электроды	17 В
Сопротивление RF входа	35 Ом
Сопротивление DC входа	1 МОм

Таблица 2

Оптические характеристики модулятора MXIQ-LN-40

Параметр	Значение
Рабочий диапазон длин волн	1530 - 1580 нм
Вносимые потери (без коннекторов)	6 дБ
Коэффициент экстинкции @DC3 Для источника с шириной линии < 200 МГц	22 дБ
Оптические обратные потери	-45 дБ
Чирп	0

Таблица 3

Предельно допустимые параметры модулятора MXIQ-LN-40

Параметр	Значение
Входная RF мощность	28 дБм
Напряжение смещения	от -20 до +20 В
Входная оптическая мощность	не более 20 дБм
Диапазон рабочих температур	от 0 до +70 °С
Температура хранения	от -40 до +85 °С

4. ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

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

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

В качестве фотоприемников в приемопередатчиках широко применяются PIN фотодиоды и лавинные фотодиоды (APD avalanche photodiode). Они имеют малые размеры, хорошо стыкуются с оптическими волокнами и с полупроводниковыми микросхемами усилителей фототока (в большинстве случаев с TIA - Transimpedance Amplifier).

PIN-фотодиоды

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

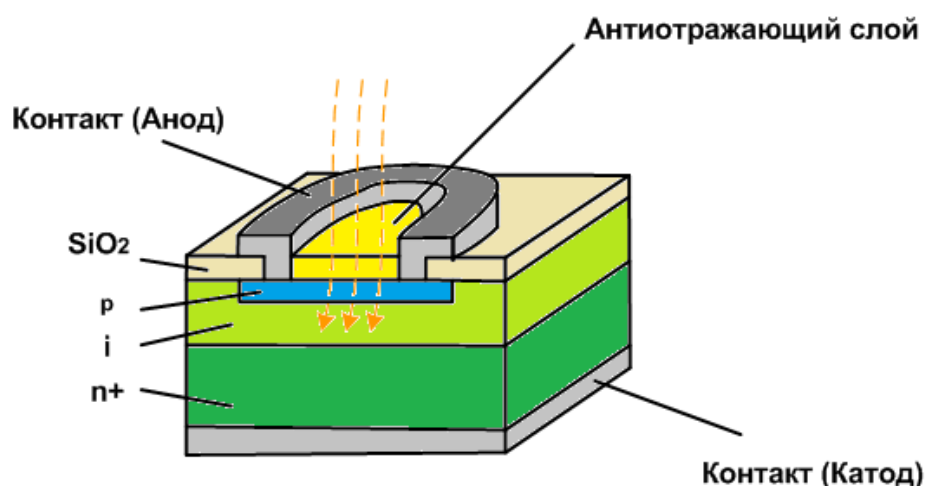


Рисунок 24. Структура PIN диода

Типичная конструкция фотодиода приведена на рисунке 24. Знак “+” в указании типа слоя означает сильное легирование. Верхняя часть диода, обращенная к свету, покрыта слоем диэлектрика (диоксид кремния). В центральной части имеется окно для падающего на полупроводник света. Это окно покрывается тонким антибликовым слоем нитрида кремния. Под слоем n-типа находится слой n^+ с более сильным легированием, обеспечивающий низкое сопротивление соединения с катодом.

PIN фотодиоды обычно работают при обратном смещении, при котором внешнее напряжение величиной несколько вольт подается плюсом к n-слою (катод), а отрицательным полюсом к p-слою (анод), рисунок 25. В отсутствие засветки диод закрыт, в i-слое свободные носители практически отсутствуют, и через диод протекает незначительный темновой ток. Фотоны падающего излучения порождают в обедненном слое пару электрон-дырка. Свободные носители в сильном электрическом поле внешнего источника двигаются к p и n областям, создавая фототок ток, пропорциональный падающему свету.

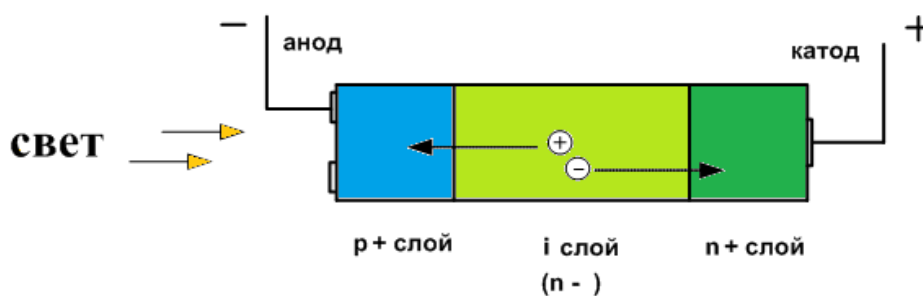


Рисунок 25. Работа PIN фотодиода

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

Лавинные фотодиоды.

Вследствие присущего APD диодам усиления они имеют более высокую чувствительность, чем PIN диоды, что делает их более привлекательными для использования в коммуникационных приемниках. Основное отличие APD диодов от PIN диодов, имеющих $p^+ - i - n^+$ структуру, заключается в наличие дополнительного p-слоя. При этом создается $p^+ - i - p - n^+$ структура.

На рисунке 26 приведена структура APD диода. PN-переход диода образуют сильно легированный n^+ -слой, расположенный непосредственно под антиотражающим слоем и находящийся под ним нормально легиро-

ванный р-слой. Основной корпус диода составляет слабо легированный р⁻-слой и сильно легированный р⁺-слой, сопряженный с анодным контактом.

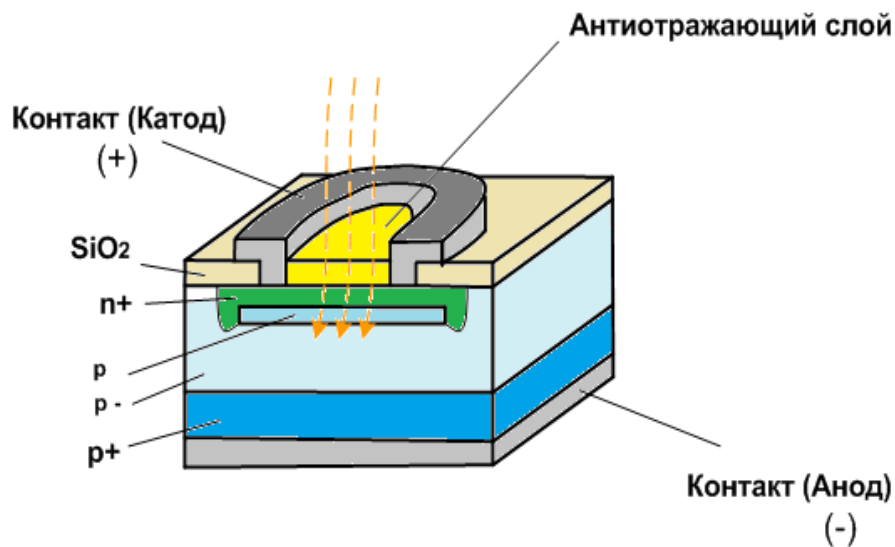


Рисунок 26. Структура APD диода

Уровень легирования в полупроводнике влияет на его сопротивление. Наиболее сильно легированные слои имеют самое низкое сопротивление. Для определенного значения тока, протекающего через диодные слои, которые фактически представляют собой серию различных значений сопротивлений, возникают разные значения падения напряжения на разных слоях. Это создает неравномерное электрическое силовое поле на диоде. Чем больше напряженность электрического поля, тем больше ускорение дается электронам в полупроводнике.

На графике (в нижней части рисунка 27) сильно легированный слой р⁺ рядом с диодным анодом имеет низкое сопротивление, что способствует эффективному соединению с металлическим контактом. В области слабого легирования р⁻ сопротивление полупроводника выше. Это обеспечивает достаточную напряженность поля для ускорения электронно-дырочных пар, создаваемых фотонами. Из-за глубины этой области необходимо как можно быстрее перемещать носители заряда (электроны и дырки), чтобы фотодиод быстро реагировал на изменения уровня освещенности. Поскольку электроны притягиваются в лавинную область вокруг более сильно легированного перехода р-п⁺, более высокое сопротивление этих слоев создает более высокое напряжение и, следовательно, более высокую напряженность поля, что еще больше ускоряет электроны. Когда эти сильно ускоренные электроны воздействуют на валентные электроны в атомах полупроводникового материала, они заставляют эти ранее связанные валент-

ные электроны прыгать в зону проводимости, создавая дополнительные носители заряда. Эти новые носители заряда (электроны) теперь также обладают достаточной энергией, чтобы выбить больше электронов при ударе и так далее, создавая лавину дополнительных электронов, которая, конечно, создает дополнительный ток.

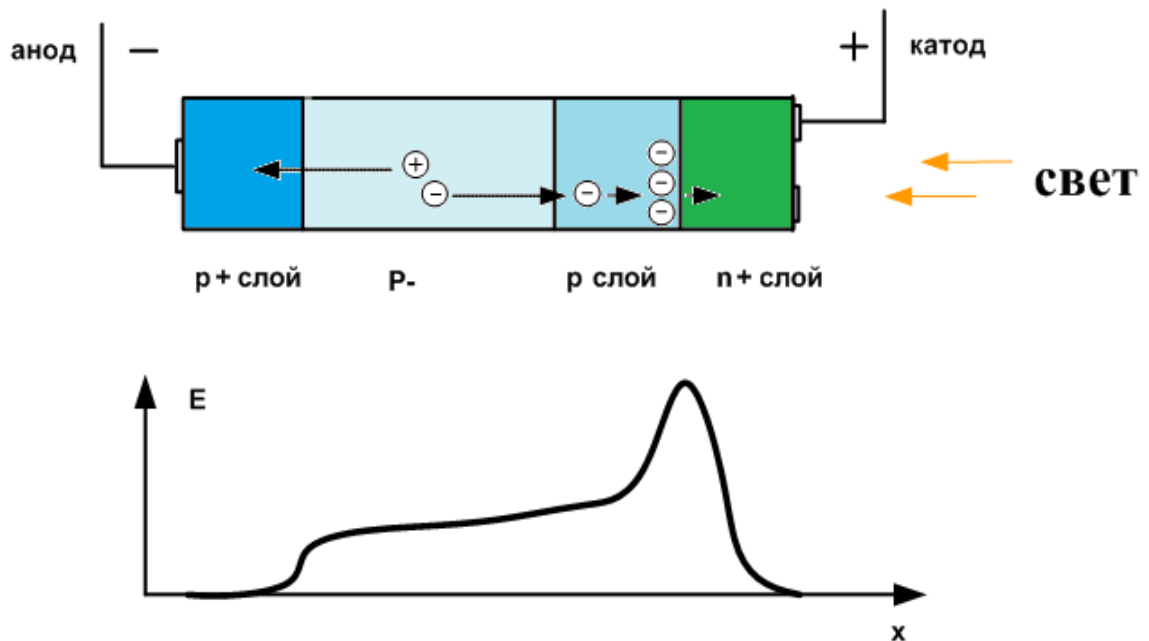


Рисунок 27. Работа APD диода

С помощью этого метода, называемого ударной ионизацией, исходный очень маленький ток, порождаемый фотонами, эффективно усиливается. Степень усиления зависит от ускоряющего напряжения, которое может составлять от десятков до нескольких сотен вольт. Дополнительными факторами, влияющими на усиление, являются толщина области лавины и количество электронов, принимающих участие в процессе ударной ионизации.

Поскольку число ударов является случайным, степень усиления в течение любого короткого периода времени изменится, и поэтому может быть приведена только в качестве среднего значения. Кроме того, из-за случайного характера воздействия фотонов и вследствие быстрых колебаний усиления выходной ток будет иметь тенденцию к зашумлению. Лавинные фотодиоды не имеют такой хорошей линейной зависимости между принимаемым светом и фототоком, как PIN фотодиоды. Несмотря на эти недостатки APD фотодиоды широко применяются в приемниках волоконно-оптических систем связи и измерительных приборах, таких как рефлектометры.

Система параметров приемников излучения

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

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

Однако не всегда возможно иметь для каждого экземпляра полный набор таких характеристик, в ряде случаев достаточно иметь набор параметров, выражающих свойства ФП при определенных режимах эксплуатации. Вместо амплитудной характеристики, например, для определения фототока достаточно знать величину спектральной чувствительности к монохроматическому излучению или интегральную чувствительность к источнику со сложным спектром. Частотная характеристика в первом приближении определяется постоянной времени, а шумовая – средним квадратическим значением шума или спектральной плотностью мощности шума на одной фиксированной частоте.

Для изготовления PIN и APD фотодиодов используются различные полупроводниковые материалы: кремний, германий, арсенид галлия и др. От выбора материала во многом зависят характеристики фотоприемного компонента, в частности диапазон регистрируемых длин волн. На рисунке 28 приведены графики спектральной чувствительности для различных материалов.

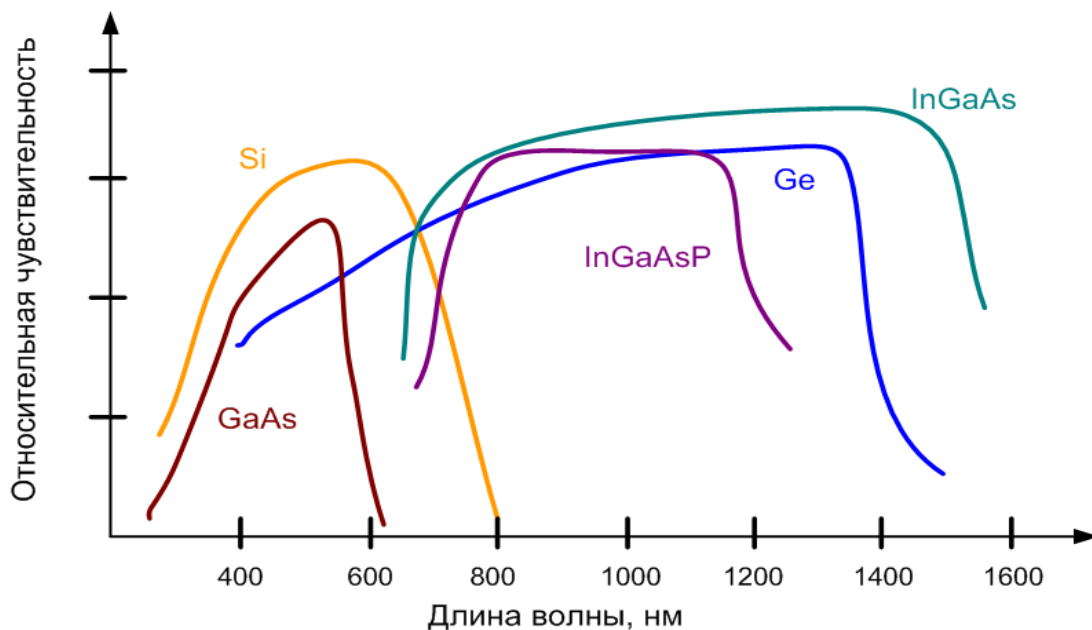


Рисунок 28. Спектральная чувствительность полупроводниковых материалов

Кремниевые (Si) фотодиоды популярны для оптических приемников данных, поскольку они могут быть изготовлены с низким значением емкости перехода, что делает их пригодными для приема цифровых данных с частотами до нескольких гигагерц. Они также генерируют относительно небольшое количество темнового шума. Однако они также имеют чувствительность немного ниже, чем другие материалы. Хотя кремний можно использовать в широком диапазоне длин волн, от ультрафиолетового (с использованием специально разработанных версий) до инфракрасных длин волн, кремниевые фотодиоды наиболее эффективны в области 650 нм, как показано на рисунке 28.

Фотодиоды на основе германия (Ge) обеспечивают светочувствительность на длинах волн более 900 нм, где кремний уже нечувствителен. Германий дешевле, чем соединения арсенид галлия-индия (InGaAs), что делает его полезным в фотодиодах с большими фоточувствительными площадками, (диаметром до 1 см). Однако германиевые фотодиоды, как правило, имеют более высокие уровни темнового тока и создают сравнительно больше шума, чем кремниевые или арсенид галлий-индиевые фотодиоды. Уровень шума также увеличивается при высоких температурах.

Фотодиоды, на основе арсенид галлия-индия (InGaAs), обеспечивают более высокую чувствительность, особенно на длинах волн в инфракрасных областях, по сравнению с кремнием или германием. Они менее шумные и более стабильны в широком диапазоне температур, чем германиевые.

5. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИЕ МОДУЛИ

Передающий оптоэлектронный модуль; ПОМ – активный компонент ВОСП, предназначенный для преобразования электрического сигнала в оптический сигнал.

Аналоговый [цифровой] ПОМ – передающий оптоэлектронный модуль, предназначенный для преобразования аналогового [цифрового] электрического сигнала в оптический сигнал.

Приемный оптоэлектронный модуль; ПРОМ – активный компонент ВОСП, предназначенный для преобразования оптического сигнала в электрический сигнал.

Приемопередающий оптоэлектронный модуль; ПРПОМ – активный компонент ВОСП, выполняющий функции приемного и передающего оптоэлектронных модулей.

Частями оптических приемопередатчиков служат оптические сборки: transmitter optical sub-assembly (TOSA) – оптическая подсистема передатчика, receiver optical sub-assembly (ROSA) – оптическая подсистема приемника или сборка для двунаправленной передачи по одному волокну (BOSA) Bidirectional Optical Sub-Assemblies.

На рисунке 29 приведен внешний вид сборок для производства трансиверов. Конструкция и типы трансиверов рассмотрены далее.



Рисунок 29. Оптические сборки BOSA, TOSA, ROSA

Организации, специализирующиеся на поставке «элементарных» оптических компонентов, обычно имеют в своем ассортименте набор элементов для производства приемопередатчиков, так называемые «chip kit solutions». Например, Avago Technologies предлагает широкий ассортимент продукции, ориентированный на разработчиков оптических приемопередатчиков:

- источники излучения (VCEL, Lasers),
- фотодетекторы (Photo Diodes (PDs),
- электронные интегральные схемы (Physical Medium Dependent Integrated Circuits)
- усилители (Trans-Impedance Amplifiers (TIAs),

- блоки синхронизации (Clock and data recovery (CDR)),
- блоки управления лазерами (Laser drivers (LDs)),
- линзы для сопряжения с волокном (Lenses),
- решения по интеграции вычислений и термостабилизации компонентов.

Приемопередающие модули (трансиверы).

Среди компонентов оптических систем связи ассортимент приемопередатчиков (трансиверов) можно считать самым обширным. Он включает обширную номенклатуру компонентов разных форм-факторов, скоростей передачи, реализуемых протоколов, форматов модуляции и кодирования, типов применяемых источников и приемников излучения. Больше разнообразие можно объяснить долгой историей развития этих компонентов, которая воплотила в их разнообразии стремление разработчиков объединить в одном устройстве противоречивые требования растущих скоростей передачи, низкого энергопотребления, миниатюризации и минимальной стоимости.

По прикладным областям применения в структуре сетей связи можно выделить две большие группы трансиверов:

- приемопередатчики для центров обработки данных (Datacom),
- приемопередатчики для организации дальней связи (Telecom).

Такое разделение можно наблюдать в каталогах большинства производителей и поставщиков, что вполне логично, т.к. в зависимости от области применения различаются требования, предъявляемых к компоненту.

Приемопередатчики «Datacom» выделяются, прежде всего, небольшими длинами, до 1 км. Есть модели, которые ориентированы на многомодовое волокно или многоволоконные кабельные сборки. Сюда же можно отнести всевозможные «активные оптические шнуры».

К категории «Telecom» можно отнести приемопередатчики для сетей доступа – Access, городских сетей – Metro и протяженных линий – Regional, Long-Haul. Объединение в последнюю категорию сетей доступа и магистральных линий отражает постепенное размытие границ между этими сетями в области применяемых технологий и соответственно приемопередатчиками. На этих сетях все чаще применяются технологии пакетной передачи данных и спектрального уплотнения, а форм-фактор передающих модулей унифицируется.

Представленные на рынке оптические приемопередатчики можно классифицировать по форм-фактору приемопередатчика, типу среды передачи (одномодовые и многомодовые волокна), рабочей длине волны (850 нм, 1310 нм, 1550 нм), типу оптического разъема (LC, SC, MTRJ и т.д.), типу источника (VCSL, FP laser, DFB laser) и приемника излучения (PIN), скорости и поддерживаемому протоколу передачи.

В приемниках трансиверов может быть реализованы схемы с прямым детектированием (DD, direct detect) или когерентное обнаружение (Coherent).

Прямое детектирование оптического сигнала с модуляцией по интенсивности в основном представляет собой подсчет фотонов, где каждый детектированный фотон преобразуется в электронно-дырочную пару (или в случай APD, в некоторое количество пар из-за лавинного выигрыша). Обычные приемники прямого детектирования, обычно ограничены шумом, генерируемым в детекторе и предусилителе. Поэтому чувствительность таких квадратичных систем обнаружения снижается относительно основного предела квантового шума. Термин «квадратичный» в отношении приемника применяется в том смысле, что фототок приемника, используемый для дальнейшей обработки, пропорционален числу фотонов, падающих на него в единицу времени, или квадрату амплитуды электрического поля. Для хорошего APD приемника, работающего в диапазоне длин волн от 1,3 до 1,6 мкм, необходимо от 700 до 1000 фотонов на бит для поддержания коэффициента ошибок (BER) 10^{-9} .

Одним из популярных стандартов (спецификация SFF-8074i) сменных оптических трансиверов стали SFP модули (англ. Small Form-factor Pluggable). Эти устройства представляют собой малогабаритные конструкции в металлическом корпусе (для механической защиты, охлаждения и электромагнитного экранирования) с выводами для подключения к слотам активного оборудования. Также в модуле имеется два оптических порта: излучателя (Tx) и фотоприемника (Rx) для работы в двухволоконном режиме. В одноволоконных SFP есть только один оптический порт, а направление передачи и приема разделяется внутри модуля с помощью встроенного WDM-мультиплексора (BOSA, Bidirectional Optical Sub-Assemblies). В таком случае трансиверы работают в паре на двух длинах волн.

Архитектура модуля приведена на рисунке 30, а на рисунке 31 приведена фотография модуля со снятым корпусом (печатная плата модуля). Основными компонентами модуля являются сборки TOSA и ROSA, микросхемы управления лазером (Tx IC, laser driver) и ограничивающий усилитель, преобразователь в линейный код (Tx IC, limiting amplifier) и др.

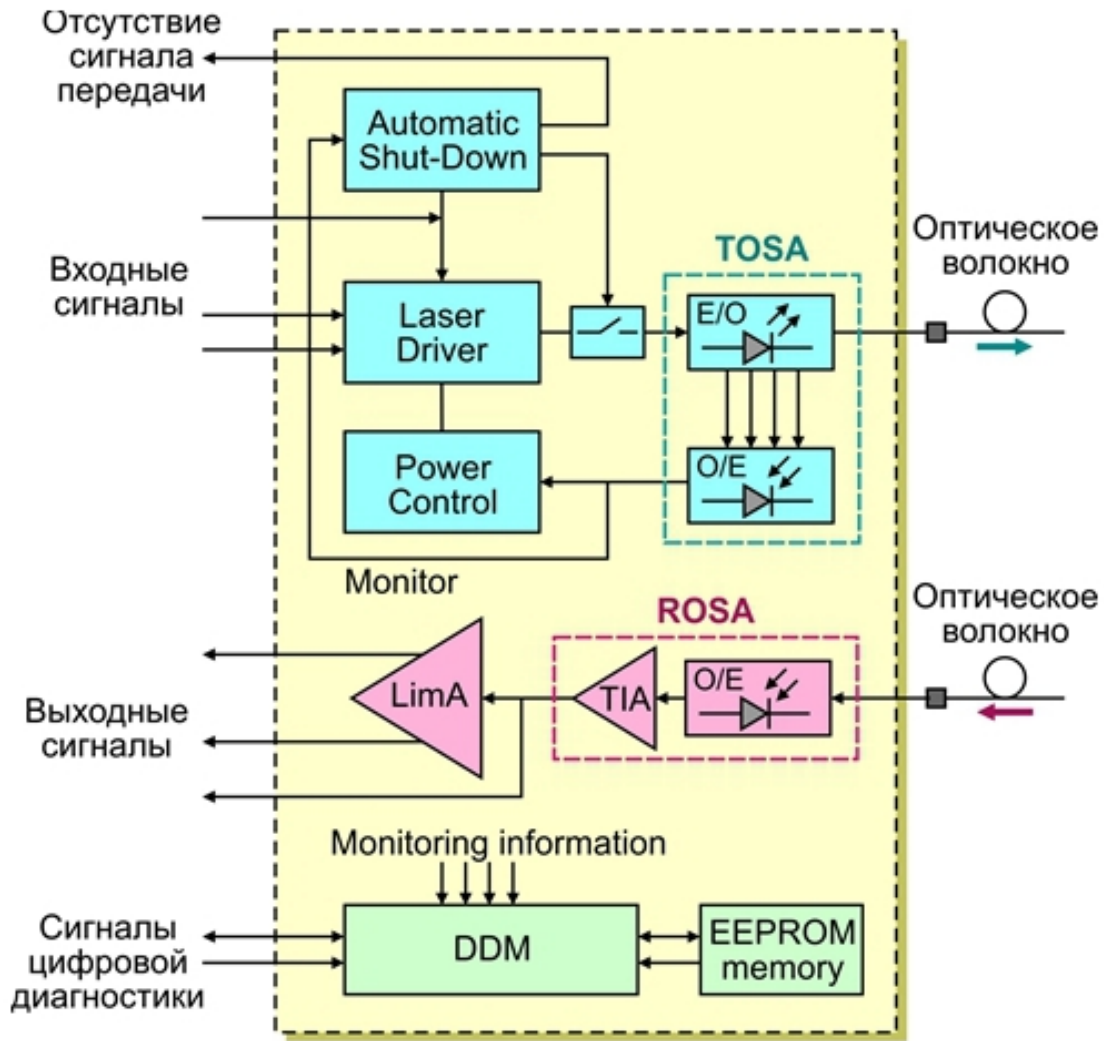


Рисунок 30. Структурная схема SFP модуля

Современные оптические SFP-модули имеют поддержку цифрового мониторинга диагностики (Digital Diagnostics Monitoring — DDM), функционирующего в соответствии с отраслевым стандартом SFF-8472. Эта функция также известна как функция цифрового оптического контроля (digital optical monitoring — DOM) или Интерфейс управления (Management Interface).

Трансиверы соответствуют промышленному стандарту SFP могут работать на стандартных длинах волн 850/1310/1550 нм, а также в сетях с системами спектрального уплотнения CWDM. На рынке представлено множество модулей SFP ориентированных на скорости 1 Гбит/с.

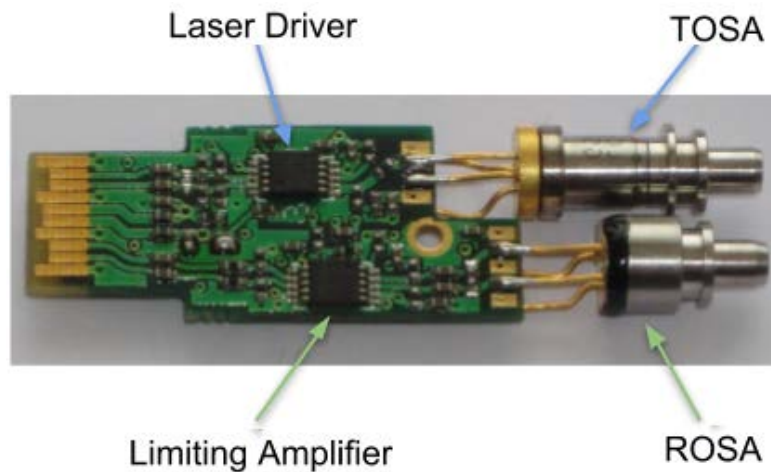


Рисунок 31. Конструкция SFP модуля

SFP+ (Enhanced Small Form-factor Pluggable) трансиверы – оптические трансиверы, предназначенных для формирования оптических сигналов в оптических линиях связи на скорости 10 Гбит/с. Модули SFP+ выпускаются для работы с многомодовыми и одномодовыми оптическими волокнами. Модули SFP+ во многом схожи с модулями SFP. Разница SFP и SFP+ в основном заключается в протоколах передачи информации между модулем и коммутатором. Посадочное место для модулей SFP+ имеет те же габариты что и SFP. Малые габариты являются одновременно достоинством и недостатком. С одной стороны достигается высокая портовая плотность, с другой стороны есть сообщения о перегревании модулей из-за недостаточного теплоотвода корпуса.

Трансиверы SFP28 в основном ориентированы на применение в оптических системах связи центров обработки данных, может работать по одномодовому и многомодовому волокну на скорости 25 Гбит/с. Внешний вид приведен на рисунке 32.



Рисунок 32. Внешний вид модуля SFP28

XFP трансиверы — это компактные оптические трансиверы, соответствующие промышленному стандарту XFP (10 Gigabit Small Form-factor Pluggable — 10-гигабитный компактный сменный форм-фактор). XFP трансиверы обеспечивают передачу данных в оптических линиях связи на скорости 10 Гбит/с., могут работать на стандартных длинах волн 850/1310/1550 (нм), а также в сетях с системами спектрального уплотнения WDM, CWDM и DWDM. XFP трансиверы поддерживают работу следующих протоколов: 10GBE / 10FC / OC-192 / STM-64. Соответствие стандарту MSA Specification Rev 4.5. Расширенная функция DDM (Digital Diagnostic Monitoring) в соответствии с SFF-8472

CFP/CFP2/CFP4 трансиверы — съемные оптические трансиверы, предназначенные для формирования оптических сигналов со скоростью передачи данных 40 или 100 Гбит/с. Модули соответствуют новому промышленному стандарту CFP (C form-factor pluggable). Внешний вид приведен на рисунке 33.

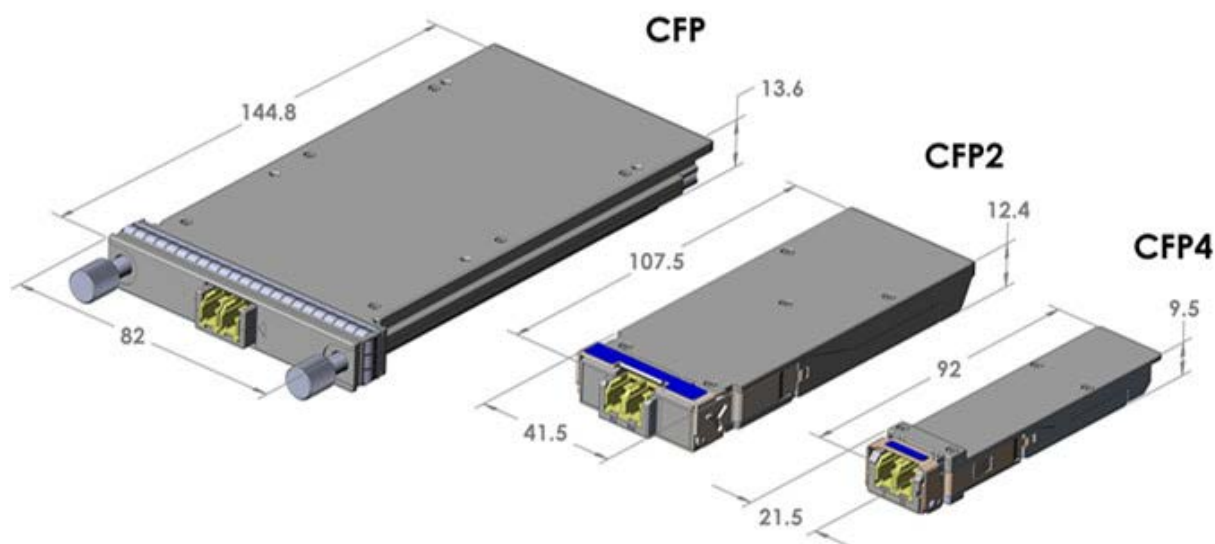


Рисунок 33. Оптические модули CFP/CFP2/CFP4

CFP трансиверы используются для дуплексной передачи данных по двум одномодовым или многомодовым оптическим волокнам. Модуль поддерживает передачу данных по четырем или десяти каналам в обоих направлениях со скоростью 10 или 25 Гбит/с каждый, обеспечивая при этом совокупную пропускную способность более 40 или 100 Гбит/с.

Например, рассмотрим SO-CFP2-LR4 (CFP2, 103/112 Gbps, 1310nm, SM, DDM, 6.3 dB, 10km). Модуль SO-CFP2-LR4 представляет собой приемопередатчик 100G, предназначенный для приложений по одномодовому (SM) волокну с расстояниями передачи до 10 км. Модуль поддерживает

работу как 100GBASE-LR4, так и OTU4. Он использует 4 оптических сигнала WDM (диапазон 1310 нм) и мультиплексирует их в один канал для оптической передачи 100 Гбит/с. Напротив, на стороне приемника модуль оптически демультиплексирует вход LR4 100 Гбит/с в 4 сигнала каналов WDM и преобразует их в электрические данные, рисунок 34. Центральные длины волн WDM-каналов составляют 1295,56 нм, 1300,05 нм, 1304,58 нм и 1309,14 нм в соответствии с рекомендацией IEEE LR4. Модуль содержит дуплексный LC-разъем для оптического интерфейса и 148-контактный разъем для электрического интерфейса. Продукт разработан с форм-фактором, оптическим/электрическим подключением и цифровым диагностическим интерфейсом в соответствии со спецификацией аппаратного обеспечения CFP2 MSA.

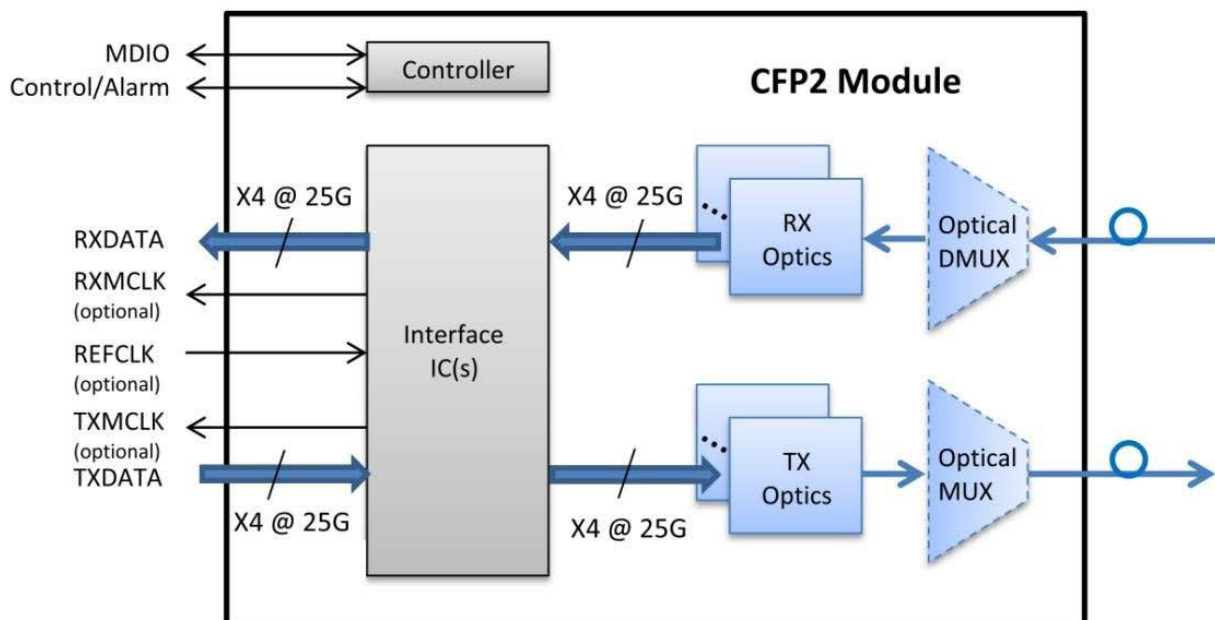


Рисунок 34 – Функциональная схема модуля CFP2

Модуль преобразует электрические входные данные 4x28 Гбит/с в 4-х каналные оптические сигналы WDM. Световые сигналы WDM объединяются с помощью оптического MUX в поток данных 103 Гбит/с или 112 Гбит/с. Интерфейс соединителя по отношению к SM-волокну представляет собой LC. Приемная часть принимает оптические сигналы WDM 103 или 112 Гбит/с и демультиплексирует их на 4 отдельных канала. Каждая длина волны принимается фотодиодом (PIN) и преобразуется в электрический сигнал 25 Гбит/с или 28 Гбит/с.

Соглашения между производителями (MSA)

Стандарты Multi-Source Agreement MSAs определяют параметры системных компонентов и их нормативные значения, такие как электрические и оптические интерфейсы, механические величины и электромагнитные величины. В таблице 4 приведены описания трансиверов, получивших наибольшее распространение.

Таблица 4

Форм-факторы трансиверов

Соглашение MSA	Год редакции	Описание	Приложение
SFP+	2013	Усовершенствованный компактный подключаемый форм-фактор	Разработан для 10 Гбит/с. Поддерживает стандарт Fibre Channel 8 Гбит/с., Ethernet 10 Гбит/с. и стандарт OTU2 для оптических транспортных сетей.
QSFP /QSFP+	2013	Малый четырехъядерный подключаемый форм-фактор 10G и 28G	Поддерживает стандарты Ethernet, Fibre Channel, InfiniBand и SONET/SDH до 40Гбит/сек и 40 Гбит/с.
CXP	редактируется	Подключаемый C форм-фактор	CXP и CXP2. Поддерживает Infiniband и Ethernet до 100G.
CFP	2013	Подключаемый C форм-фактор (100G)	Форм-факторы оптического трансивера, поддерживающие 40Гбит/сек и 40 Гбит/с. CFP, CFP2 и CFP4
SFP	2001	Компактный подключаемый форм-фактор	Разработан для Gigabit Ethernet, SDH/SONET (2,5 Gb/s) и Fibre Channel (4Gb/s).
X2	2005	Волоконно-оптический трансивер для Ethernet 10 Гб	Заменен на SFP+
XFP	2005	Волоконно-оптический трансивер для Ethernet 10 Гб	Разработан для 10 Гбит/с. Поддерживает Fibre Channel 8 Гбит/с., Ethernet 10 Гбит/с. и оптические транспортные сети.

Продукты, которые регламентируются соглашениями с несколькими источниками (MSA), включают: оптические приемопередатчики, такие как SFP, SFP+, XENPAK, QSFP, XFP, CFP и т. д.; волоконно-оптические кабели; и другие сетевые устройства. MSA определяют рабочие характеристики этих сетевых устройств, чтобы поставщики системы могли реализовывать порты на своих устройствах (например, Ethernet-коммутаторы и маршрутизаторы), которые позволяют совместимым с MSA устройствам, производимым фирмой-брендом, а также сторонними поставщиками, функционировать должным образом. Эти форм-факторы (модули), обычно монтируются в активной электронике, как например: переключатели, серверы и мультиплексоры. Поставщики оборудования руководствуются стандартами MSAs при проектировании своих систем, обеспечивают совместимость и взаимозаменяемость модулей интерфейса. Стандарты MSA имеют важное значение в отрасли, так как плотность, скорость передачи и энергопотребление могут оказывать большое влияние на его успех продукта на рынке.

Примерами сотрудничества может служить «SFP-DD MSA Group», которая решает технические проблемы достижения интерфейса с двойной плотностью и обеспечивает механическую совместимость компонентов модуля, производимых разными производителями. SFP-DD MSA определяет новый подключаемый форм-фактор, который поддерживает 2 высокоскоростных электрических интерфейса, соединяющихся с хостом. Соглашение будет включать в себя технические характеристики: механический корпус 1×1 с разъемом, тепловыделение, выводов, спецификация управления. Сотрудничество с MSA направлено на ускорение внедрения подключаемого интерфейса SFP-DD в сетевом оборудовании.

Среди основателей SFP-DD MSA лидирующие компании: Alibaba, Broadcom, Cisco, Dell EMC, Finisar, Hewlett Packard Enterprise, Huawei, Intel, Juniper Networks, Lumentum, Mellanox Technologies, Molex и TE Connectivity. В число участников входят Accelink, Amphenol, AOI, Foxconn Interconnect Technology, Fourte, Genesis, Hisense, Infinera, Innolight, Maxim, Multilane, Nokia, Oclaro, Senko, Source Photonics, US Conec и ZTE.

В сентябре 2018 SFP-DD Multi Source Agreement (MSA) объявляет о выпуске спецификации v2.0 для подключаемого интерфейса SFP-DD посвященной развитию форм-факторов SFP следующего поколения, используемых в кабелях DAC и AOC.

Обновленная спецификация версии 2.0 отражает усовершенствования механических компонентов, расширенных модулей и расширенного поляризованного ключа высокоскоростного электрического интерфейса SFP-DD высокой плотности, ориентированного на поддержку оптических модулей до 3,5 Вт в корпоративной среде.

Форм-фактор SFP-DD решает технические проблемы достижения интерфейса с двойной плотностью и обеспечивает механическую совмести-

мость компонентов модуля, производимых разными производителями. Инновационный электрический интерфейс предназначен для поддержки двух полос частот, которые поддерживают до 25 Гбит/с NRZ или 56 Гбит/с PAM4 на полосу модуляции, обеспечивая совокупную пропускную способность 50 Гбит/с NRZ или 112 Гбит/с PAM4.

Организация «MicroQSFP MSA» занимается разработкой спецификации для нового компактного модуля форм-фактора microQSFP. Введение спецификации способствует внедрению в промышленность совместимых продуктов, которые смогут использоваться для различных приложений, включая медные кабели и волоконно-оптические трансиверы, аналогично форм-факторам SFP или QSFP. Спецификация достаточно детализирована, так что компоненты форм-фактора (соединительный разъем для периферийных устройств, каркас и вилка с фиксирующим механизмом, где вилка может быть кабельной разводкой или трансивером) являются механически и электрически взаимозаменяемыми, если они соответствуют требованиям Спецификация.

Предполагается, что спецификация microQSFP будет применена для кабелей с прямым подключением (DAC, direct attach cables), активных оптических кабелей (AOC, active optical cables) и оптических модулей с разъемами для обеспечения более высокой плотности портов. Компактный дизайн модуля microQSFP будет хорошо подходить для широкого спектра применений в центре обработки данных, в котором размещаются медь, VCSEL (вертикальный резонатор для поверхностного излучения), технология SM (одномодовый) или кремниевая фотоника (SiP).

Еще одним примером деятельности MSA может служить «CFP MSA», объединяющая известные компании: Finisar, FIT, Fujitsu, Lumentum, Neo-Photonics, Oclaro и Sumitomo Electric.

Целью CFP MSA является определение форм-фактора оптического приемопередатчика с возможностью «горячего» подключения, позволяющего использовать приложения со скоростью 40 Гбит/с и 100 Гбит/с, включая высокоскоростной Ethernet следующего поколения (40 Гбит и 100 Гбит). Подключаемые приемопередатчики CFP будут поддерживать требования к сверхвысокой пропускной способности сетей передачи данных и телекоммуникаций, которые составляют основу Интернета.

Соглашение CFP (MSA) определяет форм-факторы оптического приемопередатчика с возможностью «горячей» замены, позволяющие использовать приложения со скоростью 40 Гбит/с, 100 Гбит/с и 400 Гбит/с, включая высокоскоростные Ethernet следующего поколения (40GE, 100GE и 400GE). Подключаемые приемопередатчики CFP, CFP2, CFP4 и CFP8 будут поддерживать требования к сверхвысокой пропускной способности сетей передачи данных, которые составляют основу Интернета. Самый последний форм-фактор трансивера CFP8 обеспечивает очень универсальную платформу, которая может поддерживать широкий диапазон PMD на

400G и, в сущности, предлагает путь к продуктам в будущем, которые способны поддерживать 800 Гбит/с.

Развитие оптических приемопередатчиков идет в направлении применения методов когерентного приема, использования достижений цифровой обработки сигналов, уменьшения габаритов и снижения энергопотребления, рисунок 35.

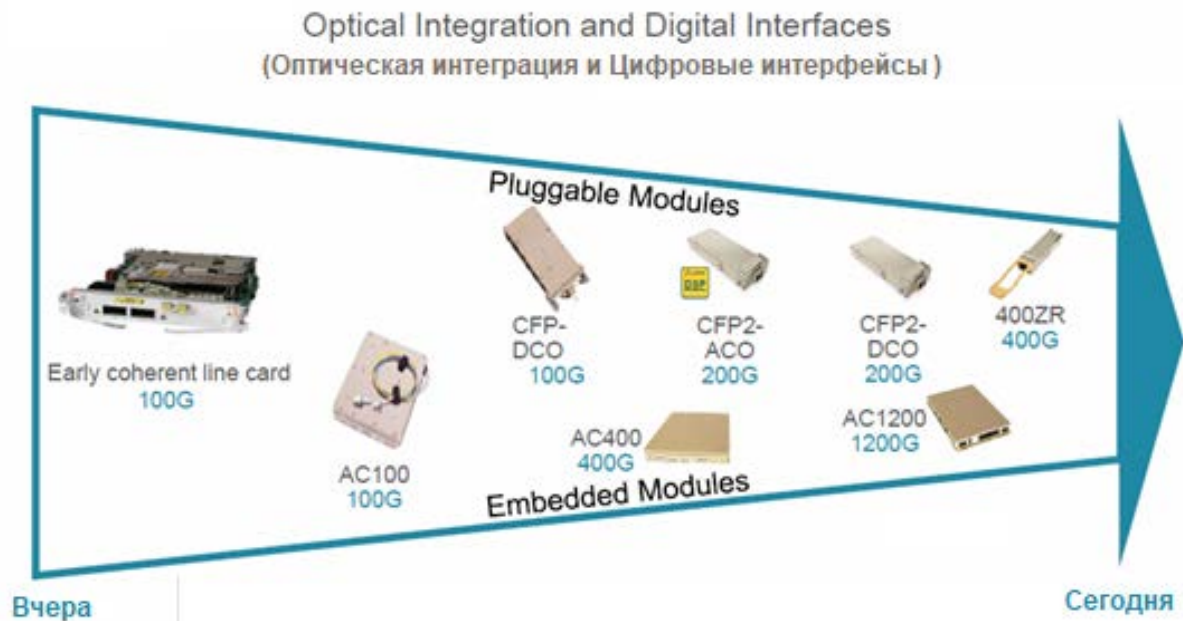


Рисунок 35. Развитие оптических приемопередающих модулей

6. ОПТИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ

Оптический усилитель ВОСП – активный компонент ВОСП, предназначенный для усиления оптического сигнала без преобразования его в электрический сигнал.

Оптические усилители применяются для компенсации затухания сигнала в оптическом тракте. Основой усилителя является активная среда и внешний источник энергии. Существует несколько физических механизмов, посредством которых происходит оптическое усиление. Классификацию усилителей чаще всего проводят в зависимости от используемых физических явлений, материала активной среды или конструкции, рисунок 36.

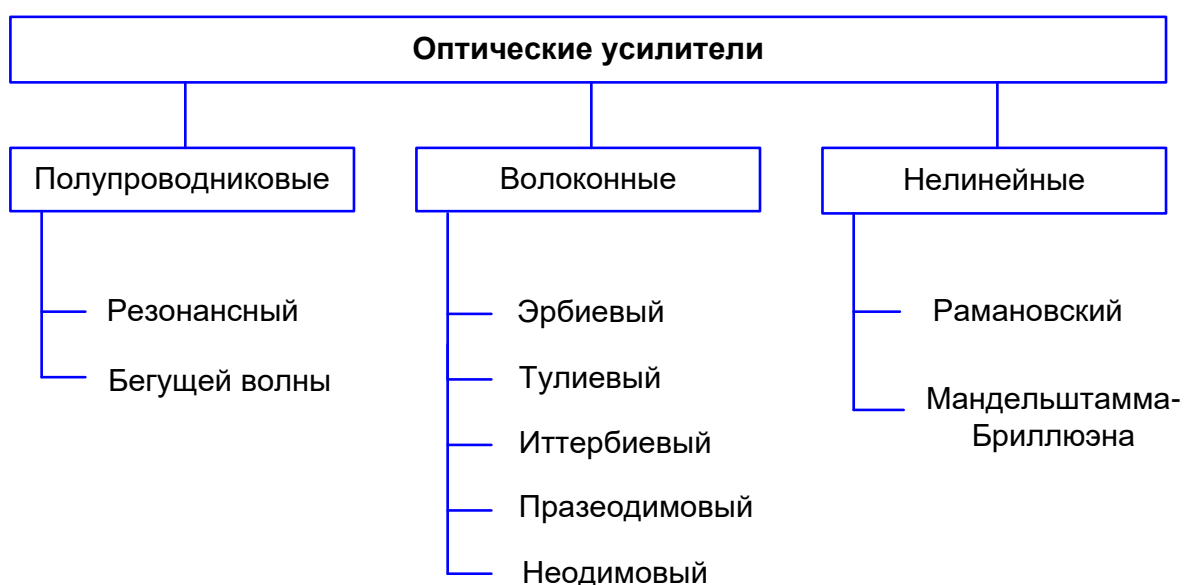


Рисунок 36. Классификация оптических усилителей

В зависимости от участка тракта волоконно-оптической системы передачи, на котором устанавливается усилитель, можно выделить:

а) постусилитель или усилитель мощности (booster, бустер) устанавливаемый после лазера для увеличения мощности передатчика,

б) линейный усилитель (in-line amplifier), устанавливаемый в промежуточных точках для компенсации потерь в волокне на линиях средней и большой протяженности,

с) предусилитель (preamplifier), устанавливаемый непосредственно перед фотодетектором для улучшения чувствительности приемника.

Оптический усилитель мощности – это устройство оптический усилитель с высоким значением мощности насыщения, предназначенное для

использования непосредственно на выходе оптического передатчика для увеличения уровня мощности сигнала. Функция усилителя мощности заключается в увеличении выходного сигнала перед передачей, что позволяет строить линии связи с увеличенным расстоянием передачи. Такие линии состоят только из оптического волокна между передатчиком и приемником. Поскольку при этом не задействуются активные компоненты в линии передачи, надежность и производительность улучшаются. В каналах дальней связи использование бустерного усилителя может увеличить бюджет мощности и уменьшить количество необходимых линейных усилителей или регенераторов. Бустерные усилители также полезны в распределительных сетях, где имеются большие потери на разветвителях или большое количество отводов, например в гибридных волоконно-коаксиальных системах кабельного телевидения. Усилители мощности также необходимы, когда необходимо одновременно усилить несколько сигналов на разных длинах волн, как в случае систем со спектральным мультиплексированием (WDM).

Линейные усилители могут использоваться для компенсации потерь в волокне, тем самым устраняя необходимость в оптической регенерации.

Функция оптического предусилителя заключается в повышении уровня мощности оптического сигнала данных перед обнаружением и демодуляцией. Увеличение уровня мощности может увеличить чувствительность приемника. Это позволяет создавать более длинные участки без промежуточных усилителей.

К усилителям предъявляется ряд требований:

- высокий коэффициент усиления в заданном диапазоне длин волн,
- равномерность полосы усиления,
- заданная выходная мощность,
- малые собственные шумы,
- нечувствительность к поляризации,
- хорошее согласование с волоконно-оптическими линиями,
- минимальные искажения оптических сигналов,
- большой динамический диапазон входных сигналов,
- стабильность характеристик во времени,
- длительный срок службы,
- минимальная стоимость и т.д.

Требования к значениям характеристикам оптических усилителей немного разнятся в зависимости от выполняемой ими функции. Например, к предусилителям предъявляют особые требования к коэффициенту усиления, коэффициенту шумов, поляризационной чувствительности, а усилители мощности (бустеры) характеризуются большими выходными мощностями и немного меньшими коэффициентами усиления. Конструктивно усилители могут быть выполнены в форме отдельных самостоятельных устройств, малогабаритных модулей, линейных карт оборудования для

систем передачи. Полупроводниковые оптические усилители могут входить в состав приемопередающих модулей или интегральных оптических компонентов.

Полупроводниковые оптические усилители.

Полупроводниковый оптический усилитель – оптический усилитель ВОСП, использующий для усиления оптического излучения полупроводниковую активную среду.

Работа полупроводниковых оптических усилителей (SOA, semiconductor optical amplifier) основана на использовании возбуждаемой эмиссии, возникающей благодаря взаимодействию фотонов входного возбуждающего излучения с электронами на возбужденном уровне в зоне проводимости.

Создание инверсии населенности полупроводникового оптоэлектронного материала осуществляется инжекцией электрического тока от внешнего источника. Работа и конструкция SOA во многом сходна с полупроводниковыми лазерами, однако усилители работают в режиме ниже порога генерации излучения. При этом энергия основной массы электронов еще недостаточна для преодоления потенциального барьера между зоной проводимости (возбужденный, верхний уровень) и валентной зоной (релаксационный, нижний уровень). Для этого требуется дополнительная энергия возбуждения. Входной сигнал (источник первичных фотонов) и служит таким источником возбуждения, энергия которого должна быть достаточна, чтобы сбросить электроны с верхнего уровня на нижний, где электрон и дырка рекомбинируют, вызывая появление вторичных фотонов. Если один первичный фотон вызывает эмиссию N вторичных фотонов, возникает N -кратное оптическое усиление.

Конструкция полупроводникового усилителя представляет собой две металлические подложки, между которыми располагаются слои вещества с р- и n-типом проводимости, через которые проходит электрический ток накачки, а так же слой активного вещества, рисунок 37.

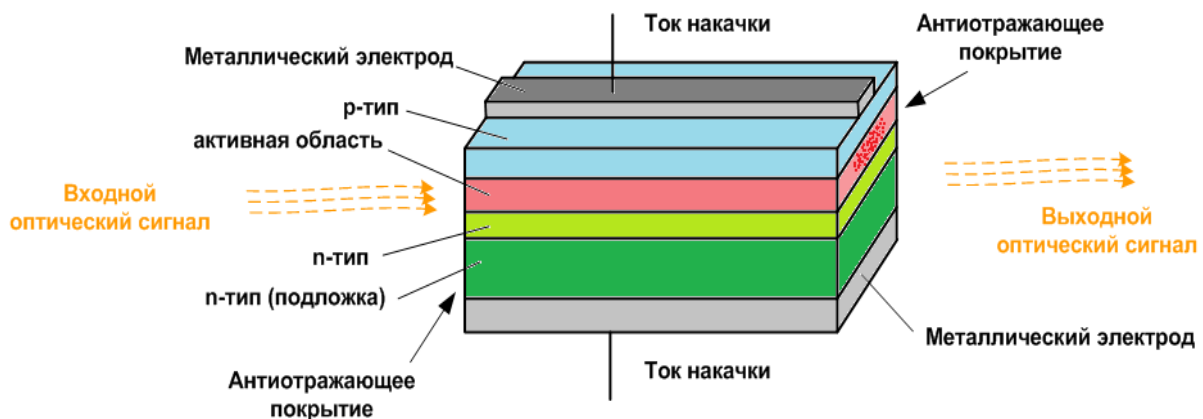


Рисунок 37. Конструкция полупроводникового резонансного усилителя

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 ограничения, создаваемого гетеропереходами, носители распространялись бы по всему устройству. Поскольку активная область относительно невелика, это означает, что только небольшой процент инжектированных носителей 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 двойной гетероструктуре (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.

В резонансном усилителе оптическая волна усиливается многократно, проходя через активную среду, отражаясь от пары полупрозрачных зеркал, расположенных на входе и выходе усилителя. Вследствие наличия резонансной оптической системы частотная характеристика усиления неравномерна, имеет вид гребенчатого фильтра с узкими пиками, расположенными с постоянным шагом (подобно спектру лазера Фабри-Перо). Несмотря на значительный коэффициент усиления (до 25 дБ), неравномерность и узкая полоса усиления ограничивала применение таких усилителей для систем передачи.

В полупроводниковых усилителях бегущей волны для подавления нежелательных отражений применяют антиотражающие покрытия на торцах структуры, а волновод активной области выполняется наклонным, рисунок 38.

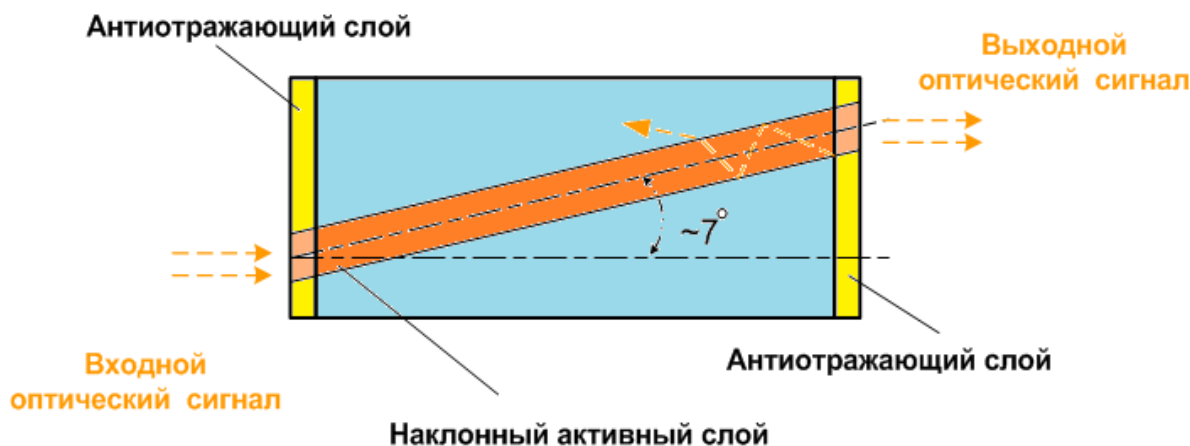


Рисунок 38. Конструкция полупроводникового усилителя бегущей волны

На рисунке 39 приведена микрофотография полупроводникового усилителя с размерами 2000 x 500 x 150 мкм, полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа.

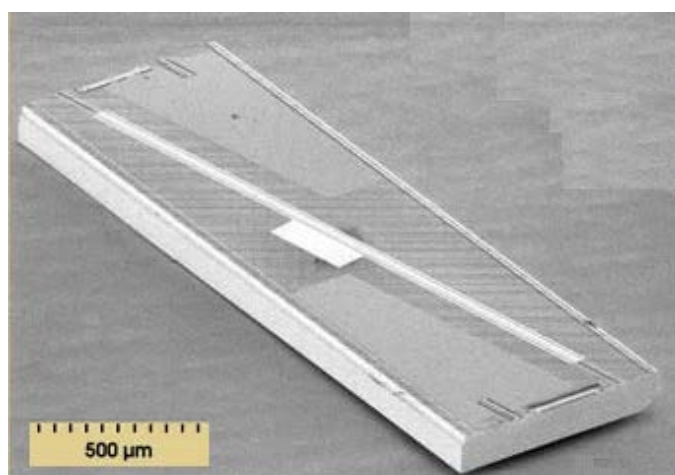


Рисунок 39. Микрофотография полупроводникового усилителя

Спектр усиления и эксплуатационные характеристики усилителя во многом определяются типом материала, используемый в активной области. Для применений в оптической связи SOA 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.

Одним из существенных плюсов полупроводниковых усилителей является то, что варьируя активное вещество можно создавать усилители, работающие на любой длине волны и подходящий не только для ВОЛС, но и для множества иных оптических систем.

Полупроводниковые оптические усилители до недавнего времени не получили столь широкого распространения, как усилители на примесном волокне (волоконные усилители). Дело в том, что они обладают рядом существенных недостатков: неравномерный и достаточно узкий спектр усиления, зависимость коэффициента усиления от направления поляризации, малая площадь поперечного сечения активной области (что снижает эффективность сопряжения SOA с одномодовыми волокнами). Среди прочих недостатков полупроводникового усилителя в сравнении с усилителем на примесном волокне, можно отметить то, что для них характерен более высокий уровень шумов усиления.

Однако полупроводниковые оптические усилители компактны, относительно дешевы и являются универсальными устройствами. Среди прочего, полупроводниковые усилители сильнее подвержены нелинейным искажениям, таким как кроссмодуляция усиления, фазовая кроссмодуляция, фазовая самомодуляция и четырехволновое смешение (ЧВС). Эти, казалось бы, нежелательные явления открывают возможности для использования SOA в устройствах обработки оптических сигналов. Благодаря этим свойствам, на основе полупроводниковых усилителей создаются устройства, служащие для регенерации сигнала и преобразования длины волны. Они имеют преимущество перед другими оптическими усилителями в том, могут быть использованы при создании интегральных оптических схем.

Волоконные оптические усилители

Волоконно-оптический усилитель – оптический усилитель ВОСП, использующий для усиления оптического сигнала оптическое волокно.

Активной средой волоконно-оптического усилителя является оптическое волокно, сердцевина которого легируется примесями редкоземельных элементов, например, эрбием (Er), неодимом (Nd), празеодимом (Pr), тулием (Tm). Накачка этих сред осуществляется непрерывно или импульсно.

Физический механизм усиления можно пояснить на примере трехуровневой модели энергий ионов эрбия в кварцевом стекле, рисунок 40. Переход ионов эрбия между уровнями сопровождается поглощением или выделением энергии. В отсутствие накачки практически все ионы эрбия находятся на 1 – основном энергетическом уровне. Под действием энергии внешнего источника накачки ионы переходят из основного состояния в 3 - возбужденное (верхнее). В эрбиевых усилителях наибольшая эффективность использования накачки достигается на длинах волн 980 и 1480 нм. Верхний уровень нестабильный. За счет процессов релаксации происходит быстрый переход ионов на метастабильный уровень 2. Время пребывания на этом уровне достаточно велико. Попадание в среду фотона с энергией, совпадающей с энергией перехода с метастабильного уровня 2 на основной уровень 1 провоцирует переход иона на 1 уровень сопровождающейся генерацией еще одного фотона. Таким образом, взаимодействие света (уси-

ливаемого сигнала) с ионами эрбия приводит к его усилению. При отсутствии усиливаемого сигнала ионы эрбия самопроизвольно переходят в основное состояние, излучая фотоны, которые усиливаются активной средой, образуя спонтанное усиленное излучение.

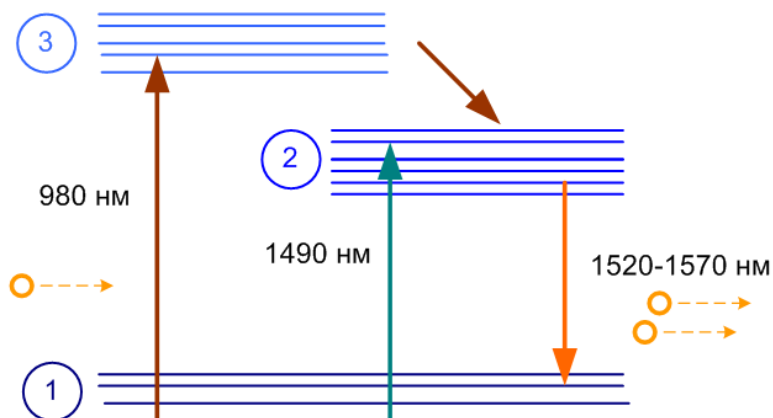


Рисунок 40. Схема уровней энергии ионов легирующих примесей.

На рисунке 41 приведены спектры поглощения и усиления. Синий график – получен в отсутствие входного сигнала. В области 980 нм виден остаточный сигнал накачки, а в области 1550 нм сигнал усиленного спонтанного излучения (ASE). Красный график на рисунке 41 зарегистрирован при узкополосном входном сигнале.

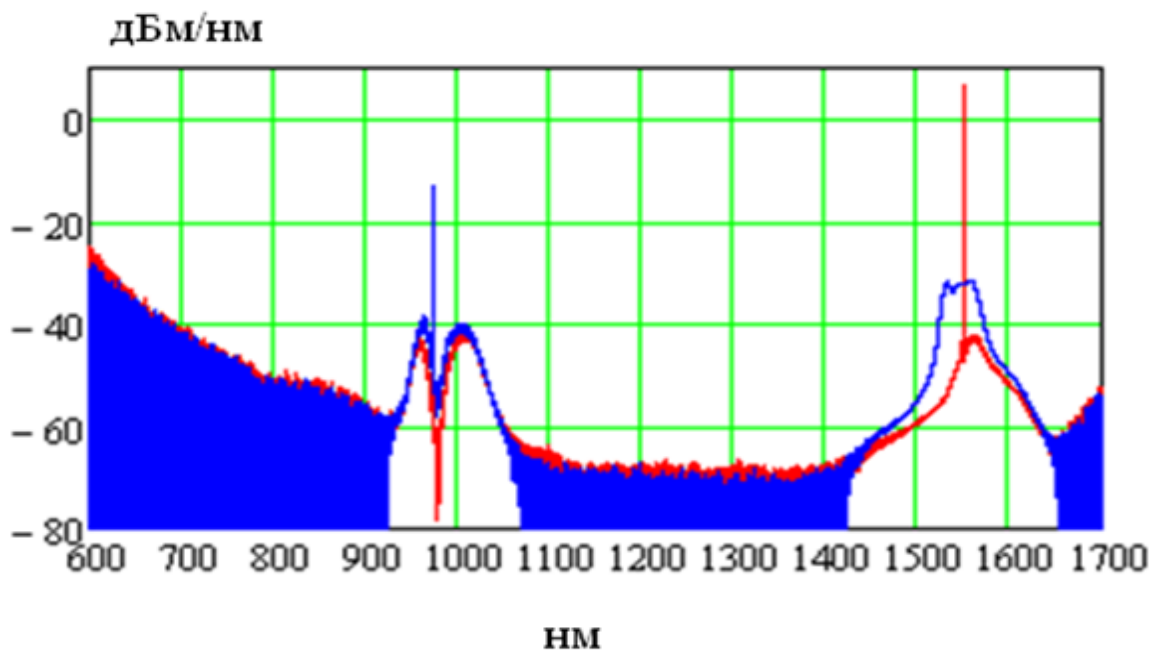


Рисунок 41. Спектры сигналов в усилителе EDFA

На рисунке 42 приведена упрощенная схема усилителя EDFA. Необходимая для перевода ионов эрбия в возбужденное состояние оптическая накачка выполняется лазерным диодом. Спектральный фильтр (GFF filter) предназначен для выравнивания спектра усиления. Фотоприемники измеряют оптическую мощность на входе и выходе усилителя.

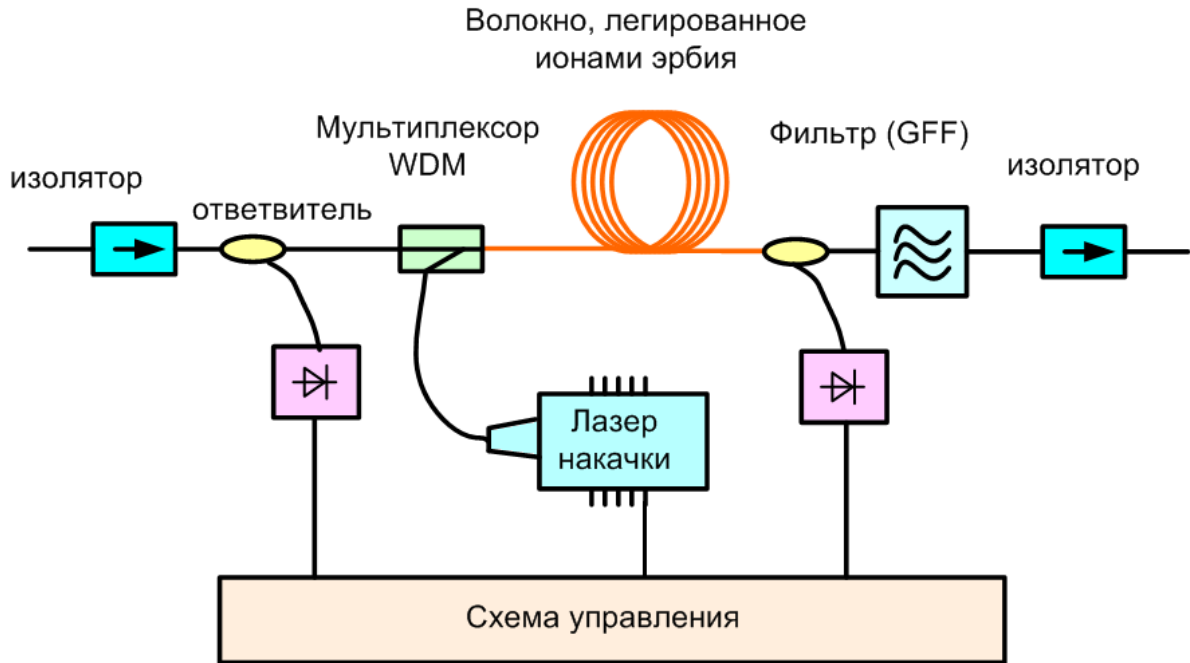


Рисунок 42. Схема усилителя EDFA

Большинство усилителей могут работать в режимах:

- стабилизации выходной мощности,
- стабилизации коэффициента усиления,
- стабилизации тока накачки.

Многие модели усилителей поддерживают режим APS (Automatic Power Suppression) – автоматическое выключение тока накачки при пропадании входного сигнала для обеспечения безопасности обслуживающего персонала. Ток диодов накачки, температура, входная и выходная мощности, коэффициент усиления контролируются внутренней электроникой (схема управления). Оптические усилители EDFA разделяют на усилители мощности или промежуточный усилитель (BA), предусилители (PA) и линейные усилители (LA).

Оптические усилители на волокне, легированном эрбием занимают достойное место среди других типов оптических усилителей с редкоземельными элементами (Rare earth-Doped Fiber Amplifiers).

В качестве примера промышленно выпускаемого усилителя EDFA рассмотрим блоки оптических усилителей системы передачи со спектраль-

ным уплотнением «Волга». Линейка оптических усилителей включает в себя эрбиевые усилители (серия EA) с различными уровнями выходной мощности. Внешний вид усилителя приведен на рисунке 43.



Рисунок 43 – Усилитель EDFA серии EA

Блоки усилителей имеют от одного до трех каскадов усиления. Предусмотрена возможность межкаскадного доступа для подключения компенсаторов дисперсии. Использование фильтров GFF обеспечивает равномерный спектр усиления в С-диапазоне. Использование встроенного управляемого аттенюатора позволяет регулировать коэффициент усиления. Функциональная схема усилителя приведена на рисунке 44, технические характеристики сведены в таблице 5.

Таблица 5

Характеристики усилителей серии EA

Параметр	Значение
Максимальная выходная оптическая мощность (при входной мощности 0 дБм)	от +10 дБм до +26 дБм (в зависимости от модификации)
Входная оптическая мощность	от -42 дБм до + 8 дБм
Рабочий диапазон длин волн	1527 нм до 1565 нм
Входная оптическая мощность	- 5 дБм до +10 дБм
Неравномерность спектра	не более 1.0 дБ
Шум-фактор	6.1 дБ (типичное значение)
Диапазон рабочих температур	от 5°C до + 40°C
Поляризационная модовая дисперсия (PMD)	не более 0.1 пс
Поляризационная чувствительность (PGD)	не более 0.3
Оптический интерфейс (разъем)	LC/APC
Потребляемая мощность	от 10 Вт до 35 Вт (в зависимости от модификации)
Габариты	32 x 297 x 350 мм

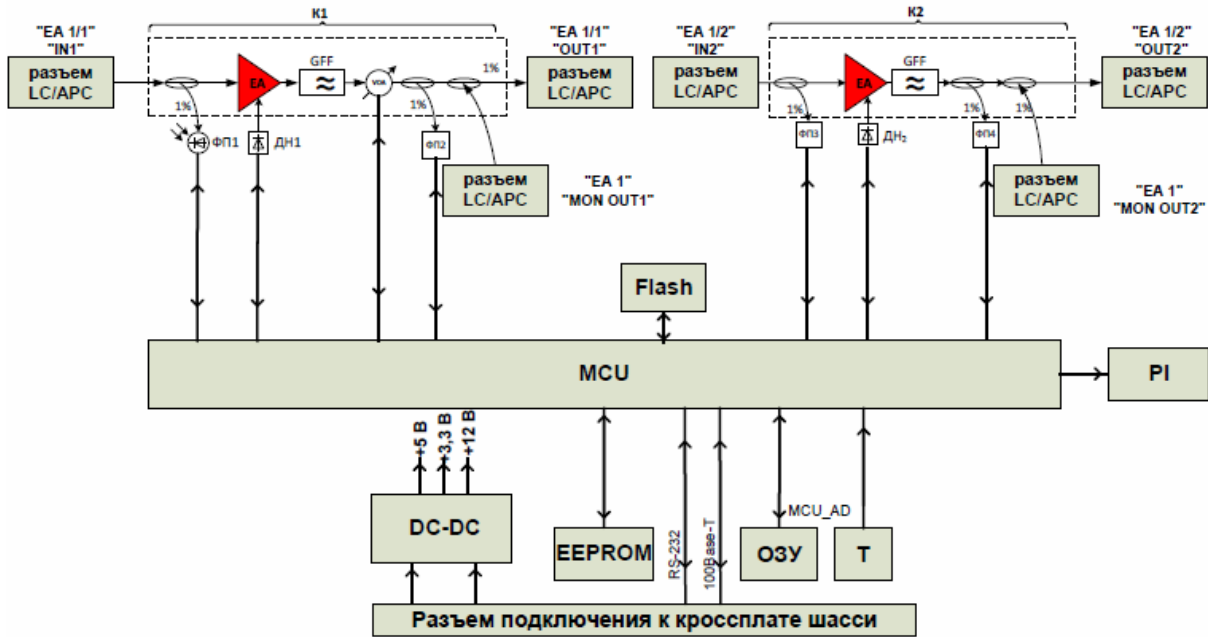


Рисунок 44 – Схема двухкаскадного усилителя с промежуточным доступом

Приведенная на рисунке 44 структурно-функциональная схема двухкаскадного усилителя включает следующие функционально законченные технические компоненты:

- эрбиевые модули усиления EA1 и EA2;
- спектральный фильтр GFF;
- фотоприемники ФП1 и ФП2;
- перестраиваемый оптический аттенюатор VOA;
- диоды накачки ДН1 и ДН2;
- линейные «EA 1/1 IN1», «EA1/2 OUT2» и промежуточные «EA 1/1 OUT1», «EA1/2 IN2» интерфейсы;
- интерфейсы мониторинга сигнала «EA MON OUT1», «EA MON OUT2»;
- панель индикации состояния устройства PI;
- преобразователь напряжения с режимом резервирования DC-DC;
- датчик внутренней температуры устройства T;
- электрический интерфейс-коннектор для подключения в шасси;

Оптический сигнал со стороны линии через оптический разъем «EA 1 IN1» поступает на вход оптического усилителя. Часть входной мощности подается на фотоприемник ФП1, служащий для контроля входного сигнала. При потере входного излучения или избыточном излучении схема измерения пороговой оптической мощности включает красный светодиод «EA 1 IN1». В этом случае блок автоматически переходит в режим APS (Automatic Power Suppression), при котором выключается выходная мощ-

ность усилителя. После усиления в эрбиевом модуле усиления EA1 оптический сигнал поступает на спектральный фильтр GFF, где компенсируется спектральная неравномерность усиления.

Затем для управления коэффициентом сигнал проходит через программно-управляемый волоконно-оптический аттенюатор (VOA). После VOA сигнал разделяется на части:

- часть сигнала отводится на схему измерения оптической мощности на выходе усилителя, в случае выхода мощности за пороговые значения индицируется красный светодиод «EA 1 OUT1» на лицевой панели;

- часть оптического излучения выводится на разъем «EA 1 MON OUT1» для контроля спектральных характеристик сигнала внешним анализатором;

- основная часть сигнала подается на оптический выход «EA 1 OUT1».

В двухкаскадном усилителе промежуточный (межкаскадный) доступ служит для подключения компенсаторов дисперсии или устройств ввода/вывода оптических каналов. Независимость настройки усиления и работы каскадов позволяет использовать усилитель для усиления двух разных групп оптических каналов для первого и второго каскада. Принцип прохождения и усиления сигнала во втором каскаде не отличается от того же принципа в первом каскаде, за исключением невозможности изменения коэффициента усиления во втором каскаде.

7. УСТРОЙСТВА ДЛЯ СИСТЕМ СПЕКТРАЛЬНОГО УПЛОТНЕНИЯ

Важной составляющей волоконно-оптических сетей связи, помимо рассмотренных ранее трансиверов и усилителей, являются устройства спектрального мультиплексирования и маршрутизации на уровне оптических каналов. В данном разделе будут рассмотрены упоминавшиеся в первой части пособия устройства объединения/разделения длин волн, без которых невозможна в полной мере реализация всех достоинств технологии спектрального уплотнения.

Оптические мультиплексоры/демультиплексоры.

Оптический мультиплексор (демультиплексор) представляет собой в основном пассивный компонент, однако может входить в состав более сложных сетевых устройств: блоков VMUX и ROADM.

Мультиплексор/демультиплексор оптических сигналов – компонент WDM, избирательный по длине волны разветвитель (используемый в системах передачи WDM), в котором оптические сигналы могут передаваться между двумя заранее определенными портами, в зависимости от длины волны сигнала. Устройствами WDM, как правило, называют и мультиплексоры, и демультиплексоры оптических сигналов, поскольку зачастую одно и то же устройство может использоваться и для мультиплексирования, и для демультиплексирования каналов.

Мультиплексоры AWG

В мультиплексорах DWDM применяются интегрально выполненные дифракционные фазовые решетки, или дифракционные структуры (Arrayed Waveguide Grating, AWG). Принцип работы мультиплексора/ демультиплексора поясняет рисунок 45.

Приходящий мультиплексный сигнал попадает на входной порт. Затем этот сигнал проходит через волновод-пластину и распределяется по множеству волноводов, представляющих дифракционную структуру AWG. По-прежнему сигнал в каждом из волноводов остается мультиплексным, а каждый канал ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$) остается представленным во всех волноводах. Входной сигнал, который содержит излучение разных длин волн, попадает во входной разветвитель. Там он расщепляется на N оптических лучей, каждый из которых попадает в отдельный волноводный канал. Все N волноводных каналов, образующих волноводную матрицу, имеют разную длину и вносят в сигнал разные фазовые сдвиги, зависящие от длины волны.

После этого световые пучки из отдельных волноводных каналов вновь объединяются в выходном разветвителе и интерферируют таким образом, что излучение разных длин волн попадает в разные выходные волноводы.

На рисунке 45 показана фокусировка разных длин волн в точках сопряжения с выходными волноводами (а) и характерный спектр сигналов, получаемый на с применением демультиплексоров AWG (b). Решетки на основе массива волноводов AWG используются для того, чтобы перераспределить сигналы различных длин волн (каналы) между двумя наборами волокон или выделить (демультиплексировать) отдельные каналы составного сигнала в отдельные волокна.

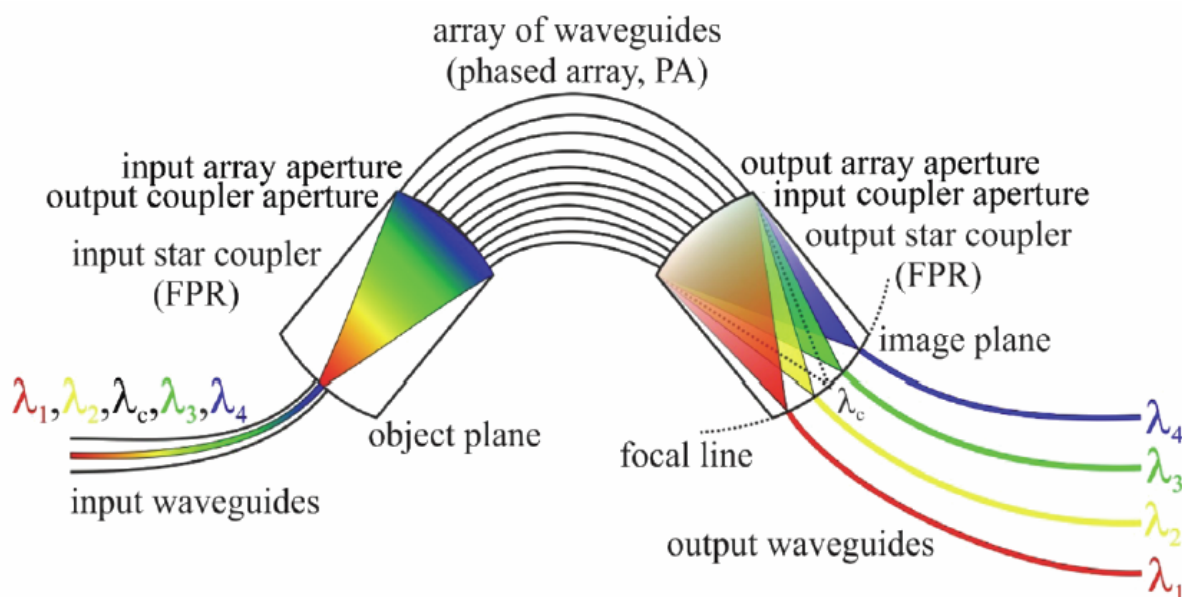


Рисунок 45. Конструкция и принцип работы (де-)мультиплексора AWG

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.

Решетки AWG еще также называют фазовыми матрицами или фазами. AWG может использоваться как мультиплексор (N:1), осуществляющий объединение n входных сигналов с группы входных портов в один выходной или демультиплексор (1:N), осуществляющий разбиение входного потока на отдельные несущие, и подачу их на группу выходных портов n.

Волноводы реализуются в виде планарных оптоволоконных световодов (диоксид кремния, легированный Ge или Ta), сформированных на этой же подложке. Промышленностью выпускаются широкий ассортимент мультиплексоров. Оптические мультиплексоры организуют физическую среду передачи данных, поэтому они не зависят от типа передаваемых данных и протоколов.

Многоканальные AWG (16—64 канала) выпускаются в виде готовых модулей, отличающихся малыми габаритами и средним уровнем вносимых

потерь. Данный вид технологии с успехом применяется в DWDM, этому поспособствовало ее свойство менять размер, сохраняя способность работы с множеством каналов.

Температурная зависимость центральной длины волны AWG из кварцевого стекла составляет $0,011 \text{ нм}/^\circ\text{С}$. Это значение слишком большое, чтобы им можно было пренебречь в приложениях DWDM. Поэтому такие мультиплексоры выпускаются либо с электронной схемой термостабилизации (Thermal AWG), либо с применением специальных способов автокомпенсации, не требующих энергии (Athermal AWG), однако это делает такие мультиплексоры более дорогими и нежными в эксплуатации.

Thermal AWG содержат нагревателей элемент Пельтье, который поддерживает постоянную температуру подложки для стабилизации длины волны (70°С или выше), что приводит к проблемам термической деградации используемых клеящих веществ в конструкции модуля и, конечно же, требует внешнего источника питания.

С ростом разнообразия систем DWDM предложено несколько способов для атермизации (устранения температурной независимости) не требующей внешнего питания. Преимущества атермизации очевидны – устраняется необходимость контролировать температура модуля AWG. Это сделало бы возможным установку модулей в различных местах, не имеющих электропитания.

На рисунке 46 показана упрощенная структурная схема обычного атермического AWG. Подложка AWG разрезается на одном из планарных волноводах (входной – input slab waveguide или выходной output slab waveguide), и каждый чип AWG соединен с компенсирующей пластиной из меди (compensating plate). По мере изменения температуры медная пластина расширяется и сжимается, вызывая смещение положения выходных волноводов.

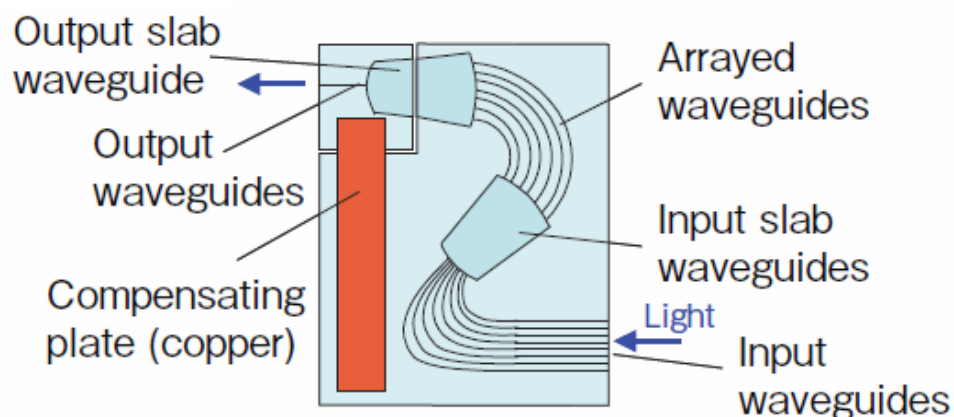


Рисунок 46. Структурная схема Athermal AWG

Рисунок 47 иллюстрирует механизм температурной компенсации. В AWG с контролируемой температурой, если температура не контролируется, точка фокусировки будет смещаться по мере изменения температуры, что приведет к изменению центральной длины волны, верхняя часть рисунка AWG (No control).

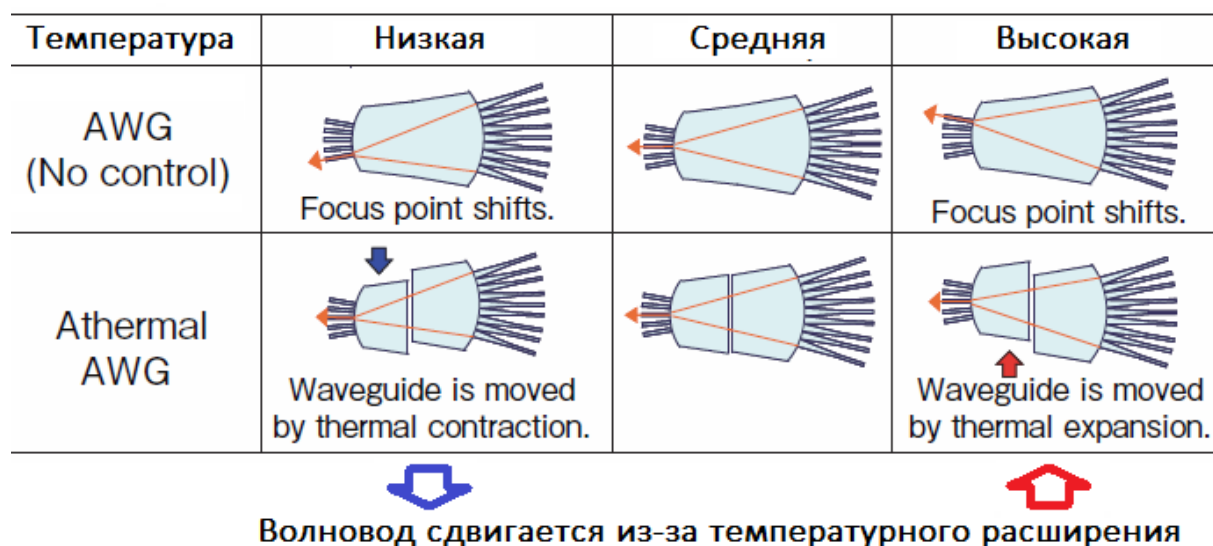


Рисунок 47. Механизм температурной компенсации Athermal AWG

С другой стороны, в атермическом AWG (Athermal AWG) точка фокусировки также будет меняться по мере изменения температуры, но расширение или сжатие медной пластины перемещает выходные волноводы в новую точку фокусировки, так что центральная длина волны компенсируется. Расстояние сдвига регулируется длиной медной пластины.

Перестраиваемый оптический аттенюатор и технология MEMS

Не менее важным элементом, чем мультиплексор длин волн, в конструкции блока VMUX является перестраиваемый оптический аттенюатор VOA (Variable optical attenuator). На рисунке 48 приведена схема перестраиваемого аттенюатора MEMS Variable Optical Attenuators (VOA) и его характеристика затухания.

Обозначение MEMS (от англ. Micro Electro Mechanical Systems) микрорезькоэлектромеханические системы означает, что в конструкцию входит механический компонент – в данном случае миниатюрное зеркальце.

Переменные оптические аттенюаторы MEMS (MEMS VOA) позволяют автоматизировать и точно регулировать уровень затухания в оптической системе. Эти оптические аттенюаторы используют ультрастабильное и надежное одноосное зеркало MEMS, чтобы отражать свет, который собирается и коллимируется от входного волокна, чтобы направлять его на

выходное волокно. Точный уровень затухания достигается за счет частичного смещения света, связанного с выходным волокном.

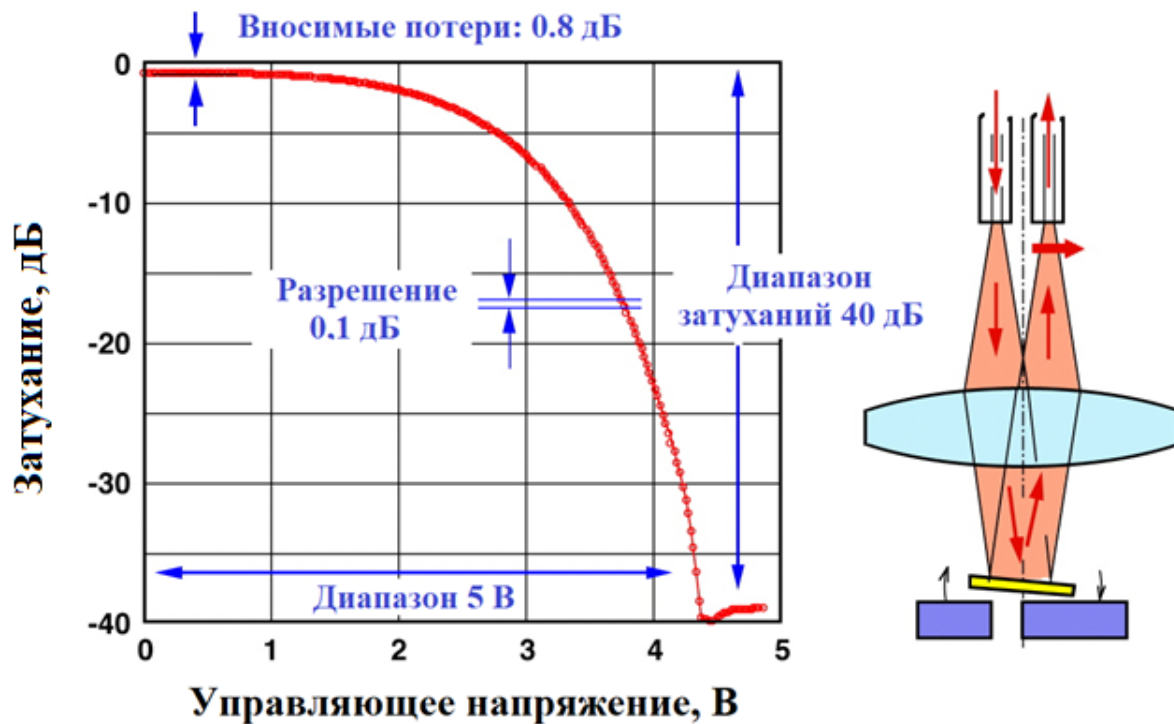


Рисунок 48. Перестраиваемый оптический аттенюатор

Технология зеркал MEMS основана на конструкции из кристаллического кремния, которая не деформируется, не устает или не изнашивается с течением времени. Зеркало (восьмиугольная область в середине чипа) наклоняется путем приложения напряжения к электростатическим гребневидам, которые простираются на обе стороны зеркала.

Движущиеся части конструкции, включая зеркало и половину гребенчатых пальцев в приводах, соединены с неподвижными частями конструкции через кремниевые торсионные балки. Таким образом, движущиеся части структуры подвешены в пространстве и никогда не вступают в физический контакт с неподвижными частями структуры. Зеркало совершает плавное движение, наклоняясь и принимая точно контролируемый угол, в зависимости от приложенного напряжения.

Перестраиваемые оптические аттенюаторы могут быть выполнены одиночными дискретными элементами для применения в сетевом оборудовании или модульными конструкциями с массивом аттенюаторов, рисунок. На рынке так же представлены модули, которые могут содержать несколько аттенюаторов с управлением через интерфейс RS-232 или I2C. При желании, к выходу VOA могут добавляться отводы, чтобы можно было контролировать мощность. Тогда такой модуль называется динамиче-

ским силовым эквалайзером (DPE), так как этот модуль может работать со схемой управления и цепями обратной связи. В результате считывание мощности от фотодиодов позволит динамически регулировать VOAs, чтобы обеспечить постоянную мощность в каждом канале.

Добавление фильтра WDM и фотодетекторов к каждому MEMS VOA позволит мультиплексировать или демультиплексировать несколько каналов с одновременным встроенным выравниванием мощности, т.е. получится блок VMUX.

Блок VMUX

Блоки VMUX (Variable Multiplexer) выполняют объединение и разделение оптических каналов DWDM. В отличие от ранее рассмотренных устройств AWG блоки VMUX балансируют и контролируют каналы DWDM в начале или конце волоконной связи. Такой блок может содержать электронную схему управления и выполнять регулировку уровней в каналах или включать и выключать каналы без непосредственного участия обслуживающего персонала. Блоки VMUX могут входить в состав ROADM.

Приведем описание и технические характеристики блоков VMUX отечественного производства, компании «Т8», рисунок 49.



Рисунок 49. Управляемый мультиплексор-демультиплексор OM-40-AV-PM

Блоки VMUX предназначены для объединения отдельных DWDM каналов в один спектрально-уплотненный линейный оптический сигнал (в исполнении мультиплексора) либо выделение из него отдельных каналов (в исполнении демультиплексора).

Уровень сигнала в каждом оптическом канале регулируется встроенным оптическим аттенюатором, путем программной установки требуемого значения из интерфейса системы управления. Блок VMUX OM-40-AV-PM (Рисунок 50) позволяет дополнительно контролировать уровень мощности каждого оптического канала встроенными измерителями через интерфейс системы управления.

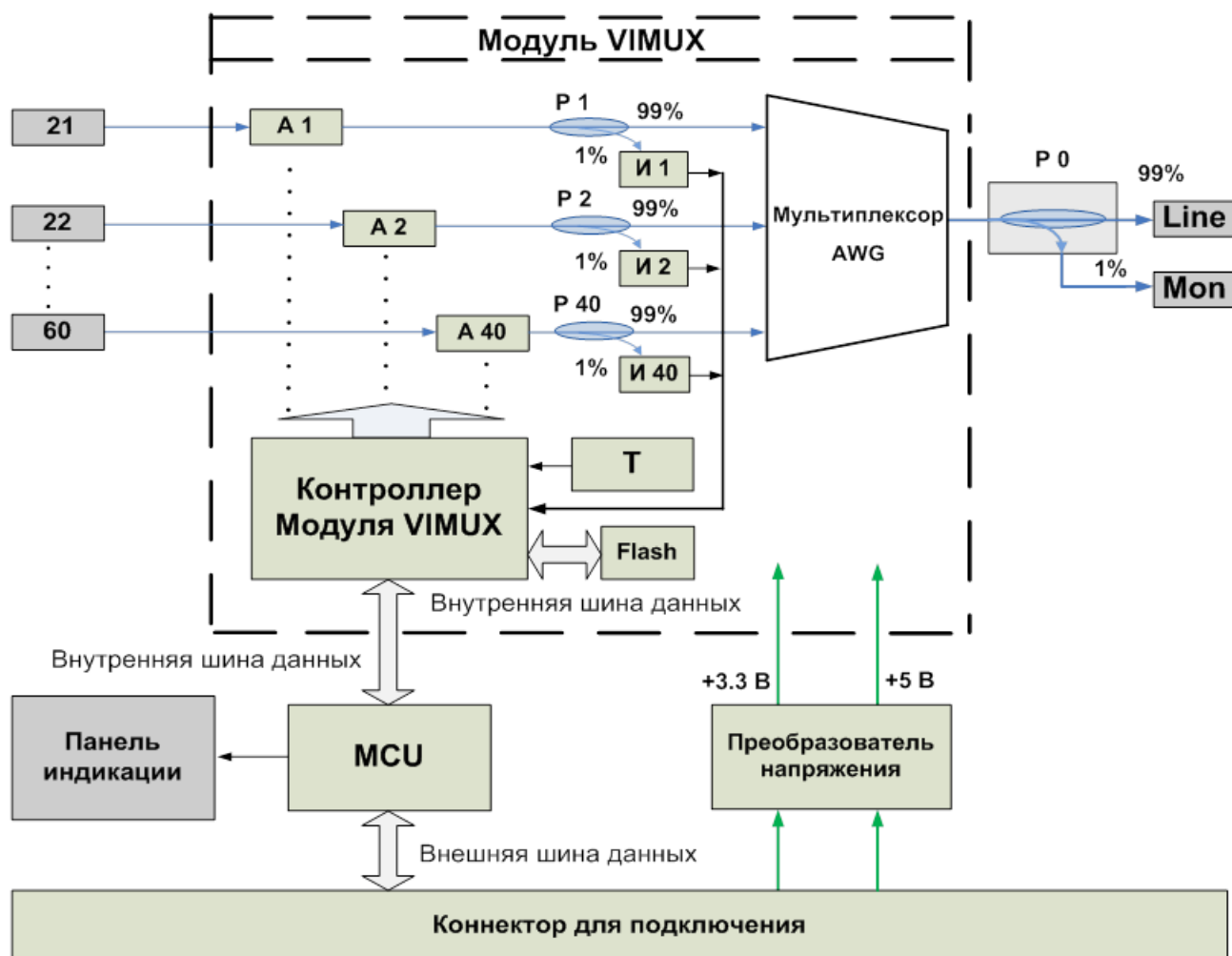


Рисунок 50. Структурно-функциональная схема OM-40-AV-PM

Приведенная на рисунке 50 структурно-функциональная схема включает следующие функционально законченные технические компоненты:

- AWG – мультиплексора на решетке Брэга;
- контроллера модуля VIMUX;
- аттенуаторов оптического сигнала A1...40;
- разветвителей P0...40;
- измерителей мощности И1...40;
- входных оптических разъемов 1...40;
- выходных разъемов Line и Mon;
- датчика температуры Т модуля Vmux;
- внутренней энергонезависимой Flash памяти;
- микроконтроллера MCU;
- внутренней и внешней шин данных;
- панели индикации;
- преобразователя напряжения;
- электрического интерфейса - разъема для подключения в шасси.

Оптический сигнал определенного DWDM канала поступает на один из входных разъемов 21...60, далее на переменный оптический аттенюатор А1...А40. Значение ослабления сигнала по мощности для каждого из каналов устанавливается программно в интерфейсе системы управления. Через разветвитель Р1...Р40 большая часть оптического сигнала поступает на волновод структуры AWG, где происходит объединение отдельных DWDM каналов в единый спектрально-уплотненный линейный оптический сигнал.

1% мощности от полезного сигнала каждого из имеющихся DWDM каналов, поступает на соответствующий измеритель И1...И40. Данные об уровнях сигналов с каждого измерителя поступают в Контроллер модуля Vmux для их дальнейшей обработки. Преобразованные в цифровой вид, данные по внутренней шине поступают в Микроконтроллер MCU, где они обрабатываются и используются системой управления для отображения информации об уровнях каждого из каналов.

Большая часть мощности объединенного в общий спектр оптического сигнала через разветвитель Р0 поступает в линейный выходной оптический разъем Line. Меньшая часть полезного сигнала уходит в разъем Mon, который служит для мониторинга группового оптического сигнала.

Технические характеристики сведены в таблицу 6

Таблица 6

Оптические характеристики управляемого мультиплексора

Характеристика	Значение
Интервал между каналами	100 ГГц
Оптическая изоляция от несмежного оптического канала	>30 дБ
Оптическая изоляция от смежного оптического канала	>25 дБ
Диапазон регулировки аттенюатора	0...15 дБ
Шаг перестройки аттенюатора	0,1 дБ
Время перестройки аттенюаторов	10 мкс
Точность в диапазоне регулирования 0 - 10 дБ	±0,8 дБ
Точность в диапазоне регулирования 10 – 15 дБ	±1,2 дБ
Время перестройки аттенюатора, не более	<10 мс
Допустимый диапазон температуры окружающего воздуха	0...50 °С

Оптические переключатели (Блоки WSS)

Оптические переключатели осуществляют механическую, то есть без оптоэлектронного преобразования, коммутацию одного или нескольких оптических сигналов, переходящих из одних волокон в другие. Переключатели становятся важным элементом оптических сетей. На рынке представлены оптические переключатели, реализованные на разных принципах и по различным схемам. От технологии, на которой основан коммутационный элемент, зависит его возможности, характеристики и стоимость.

На основе технология зеркал MEMS, рассмотренной в разделе MEMS VOA, могут быть построены 2D коммутаторы. Конструкция таких устройств поясняется рисунком 51 и представляет массив подвижных микрзеркал и оптических волокон. Управляемым поворотом зеркала осуществляется перенаправление светового пучка из входного волновода в выходной.

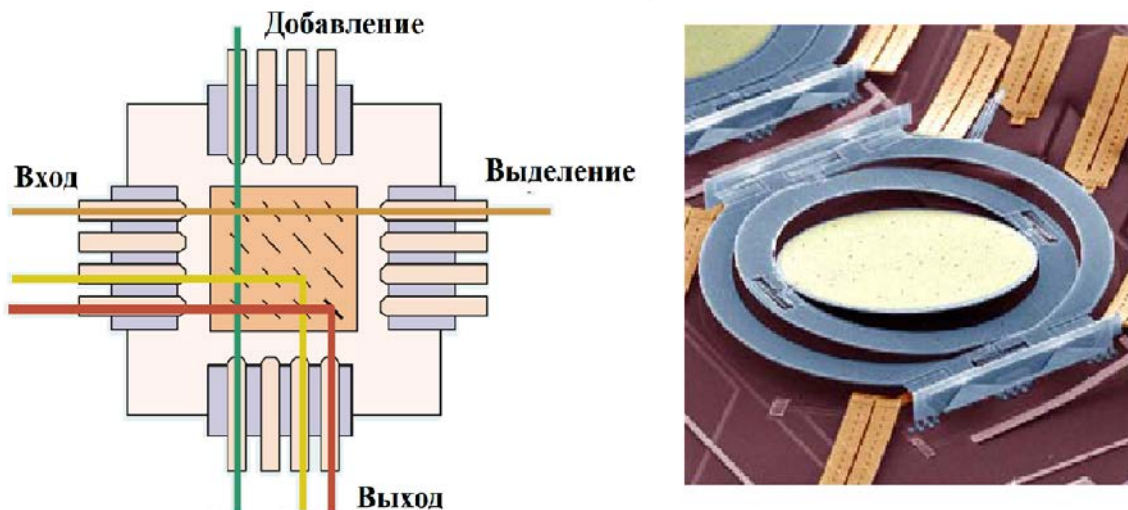


Рисунок 51 – Коммутатор 2D и микрзеркало MEMS

Как правило, зеркала изготавливаются литографически в кремнии с использованием технологий склеивания, покрытия и травления, разработанных в полупроводниковой промышленности.

Оптический коммутатор MEMS 3D Matrix (рисунок 52) представляет собой оптическую коммутационную структуру, которая позволяет одновременное соединение нескольких входных сигналов с выходными волокнами в неблокирующей, полностью оптической конфигурации кросс-коммутации.

3D матрица поворотных зеркал

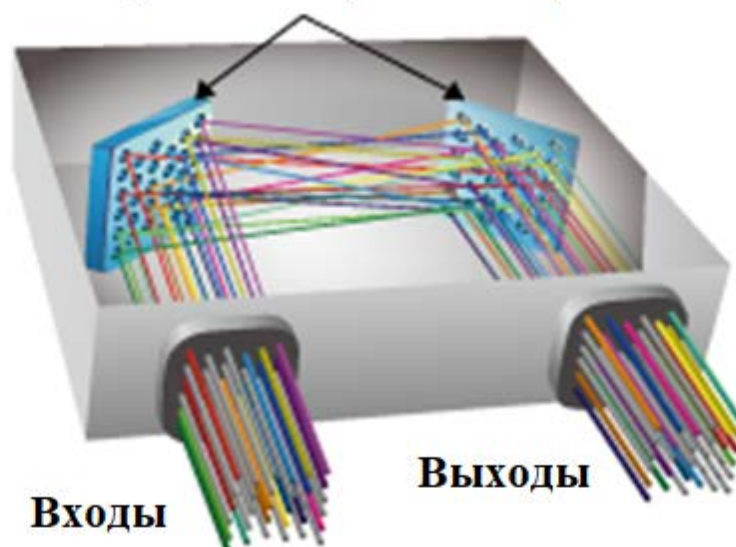


Рисунок 52. Оптический коммутатор MEMS 3D Matrix

Этот инновационный матричный оптический коммутатор доступен в размере $M \times N$ до 96×96 и может быть построен как 8×8 , 16×16 , 24×24 , 32×32 , 48×48 , 96×96 и т.д. Основанный на технологии зеркального отражения MEMS, MEMS 3D Matrix Optical Switch обеспечивает высокий уровень долговечности и надежности.

На рисунке 53 приведена схема селективного переключателя длин волн (WSS). Этот селективный переключатель длины волны может подключать любую из четырех длин волн на входном волокне к любому из пяти выходных волокон (хотя для простоты показано, что все они подключены к одному выходному волокну).

Длины волн DWDM вводят в переключатель слева по одномодовому волокну, который крепится к матрице концентратора волокон (WDM Fiber IN). Этот оптический компонент служит интерфейсом между волокном и свободным пространством, причем свет поступает через волокна и выходит в виде пучков, проецируемых во внутреннюю область устройства. Внутренняя часть герметично изолированного переключателя длины волны может быть вакуумом или может быть заполнена воздухом или инертным газом.

Выходя из матрицы концентратора, каждый луч проходит через несколько оптических компонентов с целью увеличения, коллимации, преломления, чтобы лучи попадали на дисперсионный элемент под нужным углом и увеличением. Дисперсионный элемент – пропускающая дифракционная решетка, демультиплексирует каждый пучок на составляющие его длины волн. Лучевые пучки с выделенной длиной волны оставляют решетку и попадают в оптическую систему, которая регулирует и управляет про-

ещируемыми лучами, посылая их каждому выделенному микрозеркалу MEMS.

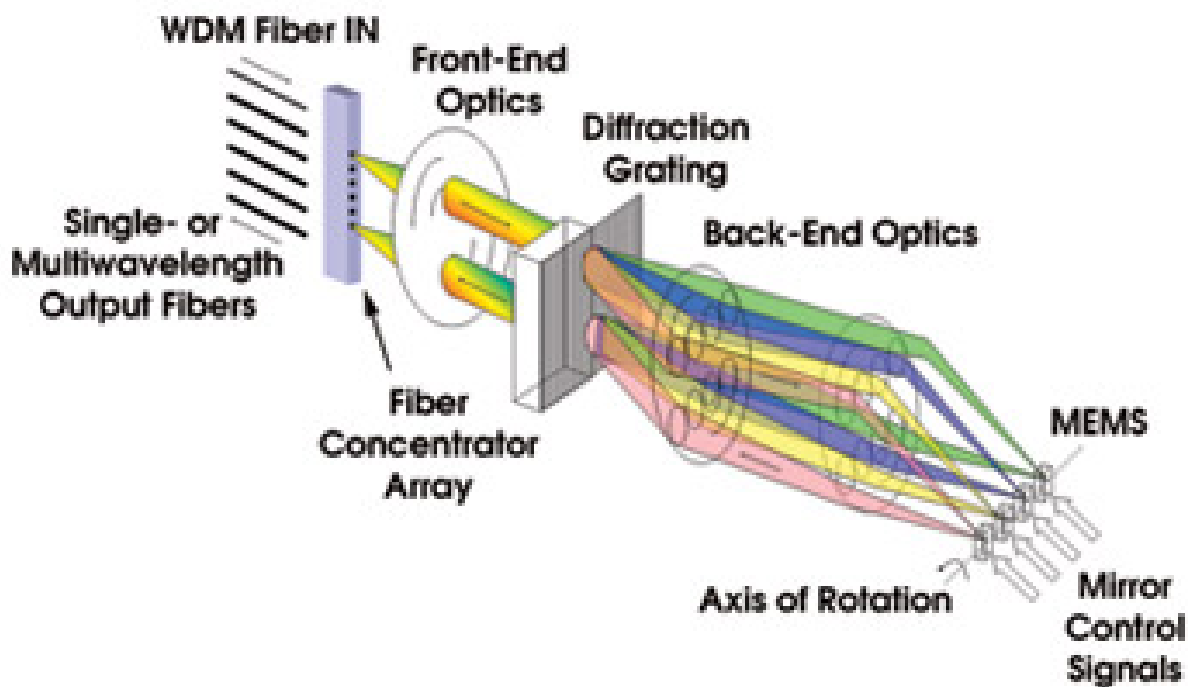


Рисунок 53. Селективный переключатель WSS

Механизм переключения селективного переключателя длины волны содержит массив микромодулей MEMS. Каждое зеркало может быть наклонено независимо от других, на оси вращения, показанной на рисунке 53. По мере того, как оно наклоняется, его луч отражается, что вынуждает его снова нападать на решетку. Решетка мультиплексирует все входящие лучи и отправляет их через интерфейсную оптику на выход.

Микрозеркало также может ослаблять свою длину волны, слегка отклоняясь, преднамеренно вызывая небольшую развязку светового пучка с матрицей концентратора. Это может быть полезно для балансировки мощности в разных каналах с длинной длиной волны, так что сильный канал не оказывает вредного влияния на другие каналы, например, насыщая усиление в усилителе. В современных изделиях селективных по длине волны обычно достигается точность установки затухания лучше 0,1 дБ, что подходит для выравнивания мощности во всех сетевых приложениях.

Все оптические компоненты на пути света должны быть оптимизированы во время изготовления для снижения вносимых потерь, правильных геометрических допусков, чистоты от поверхностных дефектов, плоскостности, коэффициента пропускания/отражательной способности и низкой поляризационной зависимости. В качестве активного элемента микрозеркало характеризуется плоскостностью, отражательной способностью, чувствительностью, напряжением привода, доступным углом наклона и пово-

рота, линейностью и однородность движений, дрейфом со временем и общей надежностью. Компоненты должны быть рассчитаны на типичные сроки использования в течение 10-12 лет и должны поддерживать свои характеристики во всех телекоммуникационных средах: от -5 до 60 °C, высокая вибрация и механический шок. Весь пакет должен входить в относительно небольшой объем, обычно несколько десятков кубических дюймов.

Доступность переключателей с выборкой по длине волны (WSS), поддерживающих скорости передачи данных 100 Гбит/с позволяет операторам значительно увеличить гибкость и пропускную способность DWDM сетей с минимальными финансовыми затратами.

Однако коммутаторы WSS на основе MEM-устройств ограничены в том, как они реализуют фиксированную ширину канала. Это означает, что WSS на основе MEMS, развернутой со 100-ГГц-каналами, не могут быть позже перенастроены для каналов 50 ГГц для поддержки более высокой плотности каналов по мере роста сети. Аналогичным образом, устройства на основе MEMS, развернутые на сетке частот 50 ГГц, впоследствии не могут быть переконфигурированы для каналов с частотой 100 ГГц для масштабирования до более высоких уровней эффективности, которые предлагают 400 Гбит/с. Фиксированное расстояние между каналами негибко и блокирует пропускную способность сети, приводит к более частым и более высоким инвестициям в инфраструктуру.

Благодаря технологии Liquid Crystal on Silicon (LCoS) WSS поддерживают технологию Flexgrid, которая обеспечивает динамическое управление шириной канала. Кроме того, после развертывания, планы каналов настраиваются «на лету», что означает, что пропускная способность канала может быть скорректирована для наиболее эффективного переноса будущего спроса по мере его возникновения.

Работа модулей на основе LCoS поясняется рисунком 54.

Для переключения используется жидкий кристалл на кремнии (LCOS). Сигналы WDM от входного порта демультиплексируются с помощью решетки, и каналы (длины волн) фокусируются в различных положениях на LCOS. LCOS модулирует волновой фронт входного луча на каждом канале длины волны независимо, используя пиксели, расположенные в двух измерениях. После модуляции волнового фронта лучи мультиплексируются решеткой, а затем направляются к одному из выходных портов. Пространственная фазовая диаграмма для модуляции управляет углами дифракции входных пучков. Таким образом, точка фокусировки на линии с выходными портами может управляться такими шаблонами, что приводит к переключению портов. В этих оптических системах несколько сигналов с одинаковой длиной волны, вводимой из других портов, фокусируются в одном и том же положении с разными углами падения и модулируются одной и той же фазовой диаграммой на LCOS. Следовательно, WSS не может управлять несколькими входящими сигналами с одинаковой длиной

волны независимо. Недавно были изучены оптические переключатели с несколькими входами и несколькими выходами (MxN) в качестве способа достижения гибкого переключения.

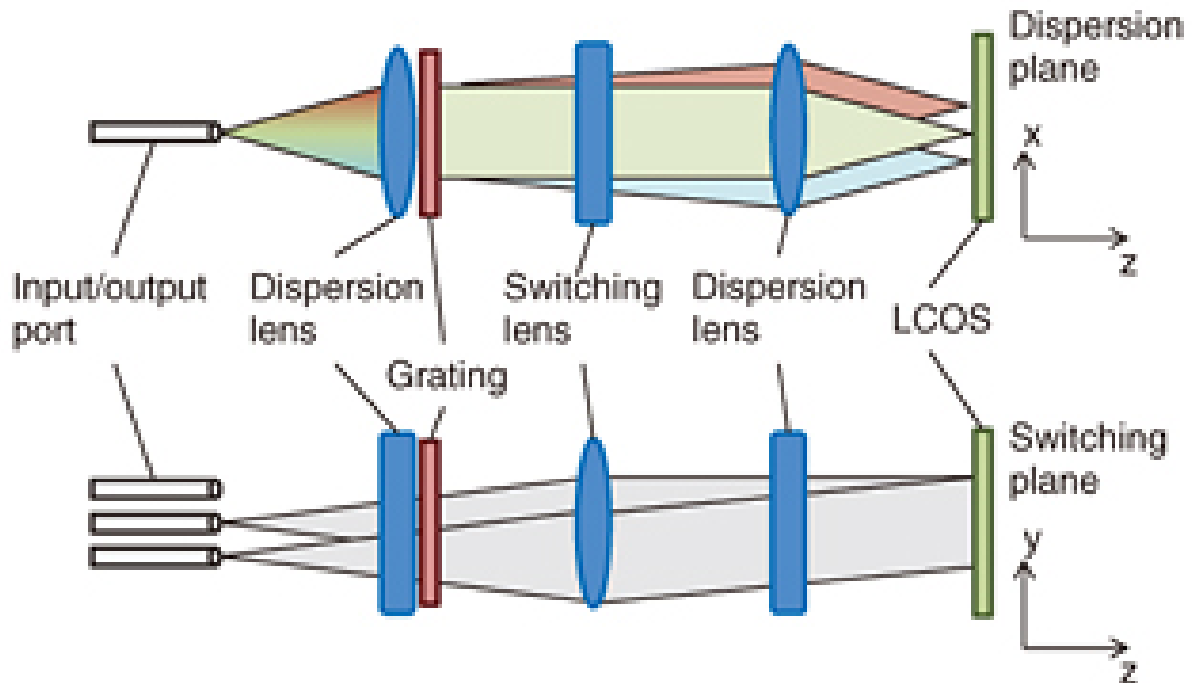


Рисунок 54 – Схема WSS, построенная на технологии LCOS

Селективные переключатели длины волны (WSS), основаны на инновационной технологии Liquid Crystal on Silicon (LCoS – жидкий кристалл на кремнии), обеспечивают самые гибкие в отрасли модули WSS с такими характеристиками как: выбираемое расстояние между каналами с шагом 12,5 ГГц, динамическое управление шириной каждого канала и управление затуханием на порт/канал.

Реконфигурируемые оптические мультиплексоры (ROADM)

Реконфигурируемые оптические мультиплексоры ввода/вывода (ROADM) теперь широко внедряются в приложениях базовой сети (метро и на дальние расстояния), где селективные по длине волны переключатели (WSS) стали устанавливаться в качестве предпочтительной структуры переключения длины волны из-за их универсальности и производительности.

Реконфигурируемые оптические мультиплексоры ввода-вывода (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexors, ROADM) представляют собой новое поколение фотонных кросс-коннекторов, позволяющих удаленно динамически изменять маршрутизацию различных волн, передаваемых мультиплексором. До появления ROADM добавление новой волны (опера-

ция Add) и выведение её из общего сигнала (операция Drop) обычно требовали физической установки нового модуля на шасси мультиплексора и его локального конфигурирования, что, естественно, требовало посещения инженером точки присутствия оператора, в которой был установлен мультиплексор. Ранние сети DWDM были достаточно статическими в отношении реконфигурации вводимых и выводимых потоков данных, поэтому операторы мирились с необходимостью выполнять эту операцию путём физической перекоммутации. Развитие сетей DWDM привело к усложнению их топологии и повышению динамизма, когда появление новых клиентов сети стало достаточно частым явлением, а значит, операции добавления или выведения волн из магистрали стали выполняться регулярно и требовать более эффективной поддержки.

По-прежнему требуется дорогостоящее ручное вмешательство. Сетевые операторы хотят больше от своих сетей ROADM. К счастью, новое поколение технологий собирается вместе, чтобы обеспечить полную переконфигурируемость и автоматизацию оптического слоя, что целесообразно как технически, так и экономически. Эти инновации следующего поколения включают:

- Независимые от цвета (длины волны) или «colorless» функции,
- Независимая от направления или «directionless» функциональность,
- Бесконечная свободная или «contentionless» функциональность,
- Гибкая сетка ITU (Flexible ITU grid, Flexgrid) или «"gridless» функциональность,
- Оптическая панель управления для работы с элементами и слоями OSI,

В литературе и технической документации можно встретить объединенное обозначение в аббревиатуре CDC (Colorless, Directionless, Contentionless).

Функциональность «Colorless» обеспечивает отсутствие привязки длины волны оптического сигнала к длине волны агрегирующего транспондера и ее программную установку.

«Directionless» поддерживает составление оптического маршрута от транспондера на любое из направлений ROADM без привязки к входному и выходному портам.

«Contentionless» разрешает наличие на входных портах сигналов на одинаковых длинах волн, пришедших с разных агрегирующих транспондеров. Такая ситуация обрабатывается на оптическом уровне, разводя одинаковые длины волн в разные выходные порты без смещения.

ROADM - это полностью оптическая подсистема, которая позволяет удаленно настраивать длины волн на любом узле. Он доступен для программного обеспечения, так что оператор сети может выбрать, будет ли добавляться, удаляться или пропускаться длина волны через узел. Используемые технологии включают в себя блокировку длины волны, планарную

световодную схему (planar lightwave circuit, PLC) и селекцию по длине волны (WSS), хотя WSS стала доминирующей технологией. Система ROADM представляет собой метро/региональную систему WDM или дальнего DWDM, которая включает подсистему ROADM. ROADM часто говорят о степенях переключения: от минимум двух до восьми степеней, а иногда и более восьми степеней.

Степень – это еще один термин для направления переключения и, как правило, она связана с парой передающих волокон. Двухступенчатые ROADM переключаются в двух направлениях, обычно называемых Востоком и Западом. Четырехступенчатые ROADM переключаются в четырех направлениях, обычно называемых Север, Юг, Восток и Запад (см. рисунок 55). В сети ROADM, основанной на WSS, для каждой степени требуется дополнительный элемент переключения WSS. Таким образом, по мере того, как направления, переключаемые на узле, увеличиваются, стоимость узла увеличивается линейно.

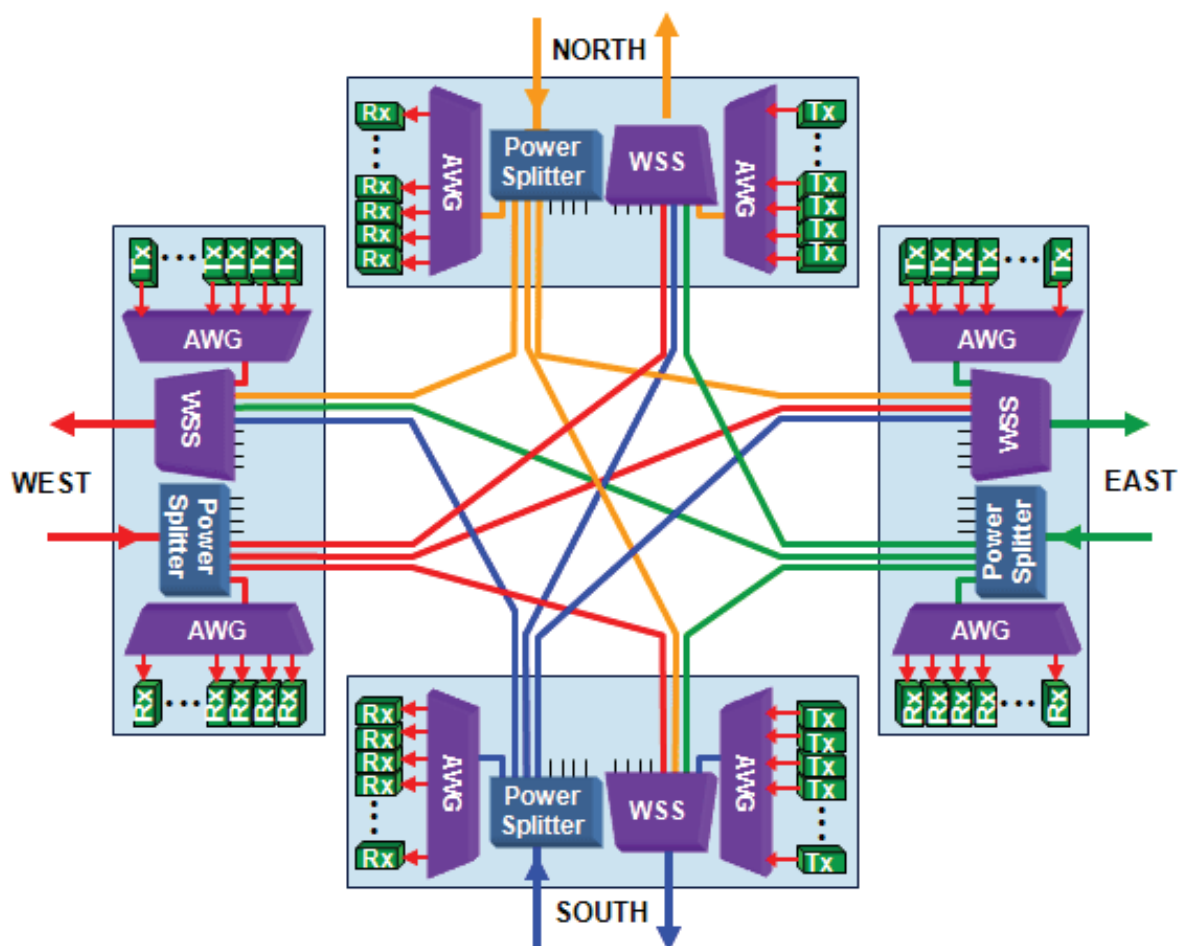


Рисунок 55. Архитектура узла ROADM с 4 степенями

ROADM текущего поколения ограничены фиксированными приемопередатчиками и назначением длины волны. При существующих развертываниях ROADM при выборе длины волны трансивер должен быть подключен вручную к правильному порту мультиплексора/демультиплексора на стороне добавления/выделения. Опять же, в то время как экспресс-узлы выигрывают от наличия ROADM, стороны добавления/выделения должны быть физически подключены и переустанавливаться всякий раз, когда происходит изменение. Новые «бесцветные» архитектуры узлов ROADM предоставляют средства для построения ROADM, которые автоматизируют назначение функциональных возможностей добавления/выделения длины волны. Существует несколько вариантов построения бесцветных ROADM, но обычно они включают в себя использование дополнительных WSS или трехмерных микроэлектромеханических систем (MEMS) вместо разных мультиплексоров и демультиплексоров в подсистеме ROADM. Независимо от подхода к архитектуре, конечным результатом является то, что любая длина волны (цвет) может быть назначена любому порту на стороне добавления/выделения полностью с помощью программного обеспечения и без технического специалиста на узле.

Отечественная компания «Т8» выпускает перестраиваемые мультиплексоры ROADM-х/1 (х=2,4,9). Мультиплексоры ROADM-х/1 (х=2,4,9) предназначены для выборочного объединения каналов из соответственно двух, четырех и девяти входных линейных DWDM-сигналов в один выходной DWDM-сигнал.



Рисунок 56. Внешний вид мультиплексоры ROADM-4/1

Блоки ROADM предназначены для гибкого перенаправления оптических каналов на крупных сетевых узлах терминирувания и кросс-коммутации. На всех блоках ROADM реализован механизм WSS-резервирования, который позволяет по сигналу системы управления, перестроить путь оптического канала по другому маршруту. Схема блоков ROADM приведена на рисунке 57.

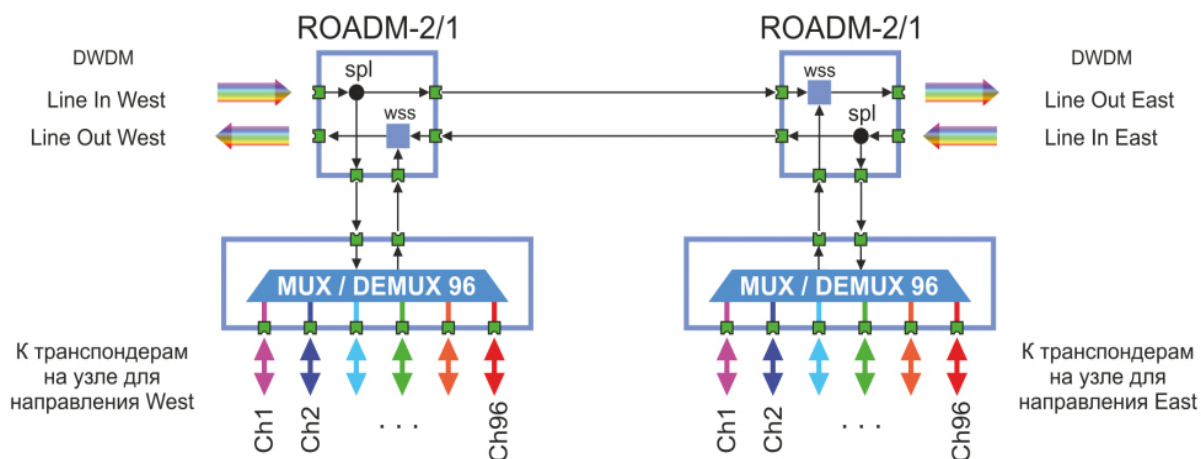


Рисунок 57. Блоки ROADM-x/1

Оптический эквалайзер (CA) имеет один DWDM-вход и один DWDM-выход. Все мультиплексоры осуществляют поканальную регулировку мощности сигнала встроенными оптическими аттенюаторами через сетевую систему управления.

Ключевая концепция архитектуры NG ROADM - это концепция гибкой сетки каналов длин волн. Гранулированная версия сетки Международного союза электросвязи (МСЭ), разбивает спектр до 25 ГГц. Узлы ROADM, поддерживающие гибкую сетку, могут работать с любой скоростью, основанной на приращениях с шагом 25 ГГц, таких как интервал 75 ГГц или интервал 125 ГГц и т. д.

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Разумовский, А. С. Фотоника / А. С. Разумовский, О. Е. Наний.* – Текст : электронный // Словарь нанотехнологических и связанных с нанотехнологиями терминов [Электронный ресурс]. – URL: https://thesaurus.rusnano.com/wiki/article1899?sphrase_id=17017 (дата обращения: 14.06.2020).
2. Фотоника [Электронный ресурс] : Материал из Википедии — свободной энциклопедии : Версия 106204396, сохранённая в 15:33 UTC 8 апреля 2020 / Авторы Википедии // Википедия, свободная энциклопедия. — Электрон. дан. — Сан-Франциско: Фонд Викимедиа, 2020. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=106204396> (дата обращения: 14.06.2020).
3. *Иванов, А. Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения.* / А. Б. Иванов. – Москва : Сайрус-систем, 1999.
4. *Убайдуллаев, Р. Р. Волоконно-оптические сети / Р. Р. Убайдуллаев* – М.: Эко-трендз, 1998
5. *Геда, Н. Ф. Измерения в оптоэлектронике / Н.Ф. Геда* – М. : Энергоатомиздат, 1982
6. *Гребнев, А. К.Оптоэлектронные элементы и устройства / А. К. Гребнев, А. К. Гридин , В. П. Дмитриев* – М.: Радио и связь, 1998.
7. *Тугов, Н. М. Полупроводниковые приборы: учебник для ВУЗов / Н. М. Тугов, Б.А. Глебов, Н. А. Чарыков* – М.: Энергоатомиздат, 1990.
8. *Суэмацу, Я. Основы оптоэлектроники / Я. Суэмацу* – М. Мир, 1988.
9. Волоконно-оптическая связь: Приборы, схемы и системы: пер. с англ. / под ред. М. Дж. Хауэса, Д. В. Моргана. – М.: Радио и связь, 1982.
10. Le Nguyen Binh *Advanced Digital Optical Communications Second edition* : CRC Press-Taylor & Francis Group, 2015 – p. 926
11. *Giguere, В. Анатомия сети ROADM / Bruno Giguere* // Фотон экспресс. – 2009. – №7.
12. Superchannels, flex-grid, multilayer switching key developments for next-gen transport networks. — Текст : электронный // Lightwave : [Сайт]. – URL: <https://www.lightwaveonline.com/network-design/dwdm-roadm/article/16649484/superchannels-flexgrid-multilayer-switching-key-developments-for-nextgen-transport-networks> (дата обращения: 24.06.2020).
13. Fixed Grid and Flexible Grid. — Текст : электронный // Huawei : [Сайт]. — URL: https://info.support.huawei.com/onlinetoolweb/resources/en/23_grid.html (дата обращения: 24.06.2020).
14. ГОСТ Р 54417-2011. Компоненты волоконно-оптических систем передачи. Термины и определения. – Введ. 2012-07-01. – М.: Стандартиформ, 2012 год.
15. Robert Blum *Optical transceiver trends for data center applications – How much photonic integration do we need / MIT Microphotonics Center Spring Meeting, 2015* – p.24
16. John M. Senior *Optical fiber communications. Principles and practice. Third edition.* : Pearson Education Limited, 2009 – p. 1127
17. Introduction to iXBlue Mach-Zehnder Modulators Bias Controllers. — Текст : электронный / Xblue S.A.S. Photonic Solutions Business Unit : [Электронный ресурс]. — URL: https://photonics.ixblue.com/sites/default/files/2018-07/Introduction_To_Photline_MBC_2016.pdf (дата обращения: 24.06.2020).
18. MXIQ-LN-40 Low Loss Dual Parallel Mach Zehnder Modulator // iXBlue Photonics [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.symphony.com/wp-content/uploads/MXIQ-LN-40.pdf> (дата обращения: 14.06.2020).
19. Christian Urricariet *SWDM: The Lowest Total Cost Solution for 40G/100G in the Enterprise Data Center. White paper / Finstar, October 2017.*

20. Datasheet SO-CFP2-LR4 (CFP2, 103/112 Gbps, 1310nm, SM, DDM, 6.3 dB, 10km) Лист данных [электронный документ] / Smartoptics.
21. SFP-DD MSA [Сайт]. – URL: <http://sfp-dd.com/> (дата обращения: 14.06.2020).
22. MicroQSFP MSA Group [Сайт]. – URL: <http://www.microqsfp.com/> (дата обращения: 14.06.2020).
23. The home of the CFP Multi-Source Agreement [Сайт]. – URL: <http://www.cfp-msa.org/index.html> (дата обращения: 14.06.2020).
24. Дураев, В. Полупроводниковый оптический усилитель / В. Дураев, А. Казаков, С. Медведев // Фотоника. – 2010. – №1 – С. 16–18.
25. Дураев, В. П. Полупроводниковые оптические усилители в диапазоне длин волн 840-1550 нм / В. П. Дураев, С. В. Медведев // Научное приборостроение. – 2012. – Т. 22. – № 3. – С. 53-57
26. Афанасьев, В.М. Электрооптические амплитудные модуляторы маха–цендера на основе ниобата лития, их модификации и форматы модуляции / В.М. Афанасьев, Р.С. Пономарев // Прикладная фотоника. – 2018. – 04 – С. 336–360.
27. Курков, А.С. Эрбиевые волоконно-оптические усилители / А.С. Курков, О.Е. Наний // Lightwave Russian edition. – 2003. – №1
28. Connelly, Michael J Semiconductor Optical Amplifiers / Michael J Connelly : Kluwer Academic Publishers, 2004
29. Ghafouri-Shiraz, H. The principles of semiconductor laser diodes and amplifiers. Analysis and Transmission Line Laser Modeling / H. Ghafouri-Shiraz. – London : Imperial College Press, 2004
30. Hasegawa, J. Development of Wide Operating Temperature Range (-30~70°C) Athermal AWG Module with High Reliability / Junichi Hasegawa, Kazutaka Nara // Furukawa Review. – 2006. – No. 30 – p. 1–6.
31. What is AWG Arrayed Waveguide Gratings [Сайт]. – URL: <http://www.tarluz.com/ru/what-is/what-is-awg-arrayed-waveguide-gratings/> (дата обращения: 14.06.2020).
32. MEMS Variable Optical Attenuators / Dicon Fiberoptics Inc. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.diconfiberoptics.com/products/mems_variable_optical_attenuators.php (дата обращения: 14.06.2020).
33. Research/MEMS Variable Optical Attenuator with Parallel-Plate Tilt Mirror / Hiroshi Toshiyoshi [Электронный ресурс]. – URL: <http://toshi.iis.u-tokyo.ac.jp/toshilab/?Research/MEMS%20Variable%20Optical%20Attenuator%20with%20Parallel-Plate%20Tilt%20Mirror> (дата обращения: 14.06.2020).
34. Assymmetrically Driven Electrostatic Parallel Plate for Tilt Mirror / Toshi Lab. [Электронный ресурс]. – URL: <http://toshi.iis.u-tokyo.ac.jp/toshilab/?Research> (дата обращения: 14.06.2020).
35. Nagy, Michael Wavelength Selective Switches for Fiber Optic Telecommunications / Michael Nagy, Tibuleac Sorin // Photonics Media. – 2006. – Nov.
36. Yamaguchi, Keita Optical Switches Using Beam Steering by Computer Generated Hologram / Keita Yamaguchi, Kenya Suzuki, Joji Yamaguchi // NTT Technical Review. – 2016. – Vol. 14. – No. 5 (May).
37. Flexible-grid Wavelength Selective Switch WSS-100 / Santec [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.santec.com/en/products/components/submodule/wss-100> (дата обращения: 14.06.2020).
38. Eldada, Louay. Optical add/drop multiplexing architecture for metro area networks / Louay Eldada // SPIE Newsroom. – 2008.

39. Multi-source agreements (MSA) / CommScope [Сайт]. – URL: <https://www.commscope.com/Resources/Standards/Enterprise/Multi-source-agreements/> (дата обращения: 14.06.2020).
40. ITU-T Recommendations / International Telecommunication Union [Сайт]. – URL: <https://www.itu.int/ru/ITU-T/publications/Pages/recs.aspx> (дата обращения: 14.06.2020).
41. Finisar Corporation [Сайт]. – URL: <https://www.finisar.com> (дата обращения: 14.06.2020).
42. Optical Communications Products / Lumentum [Сайт]. – URL: <https://www.lumentum.com/en/optical-communications/all-products> (дата обращения: 14.06.2020).
43. Poustie, A. Semiconductor Optical Amplifiers Light Up All-Optical Signal Processing / Alistair Poustie // Photonics Spectra. – 2007 (August). [Электронный ресурс] https://www.photonics.com/Articles/Semiconductor_Optical_Amplifiers_Light_Up/p5/vo21/i144/a30460 (дата обращения: 14.06.2020).
44. Волоконные усилители EA и RA / Компания «Т8» [Сайт]. – URL: http://t8.ru/?page_id=3703 (дата обращения: 14.06.2020).
45. Оборудование волоконно-оптической системы передачи со спектральным уплотнением «ВОЛГА». Блоки оптических усилителей. Руководство по эксплуатации. / Компания «Т8». – С.39
46. Hasegawa, Junichi. Development of Wide Operating Temperature Range (-30~70°C) Athermal AWG Module with High Reliability / Junichi Hasegawa, Kazutaka Nara // Furukawa Review. – 2006. – No. 30 – p. 1–6.
47. MEMS Matrix Optical Switches / DiCon Fiberoptics, Inc. [Сайт]. – URL : https://www.diconfiberoptics.com/products/mems_matrix_optical_switches.php (дата обращения: 14.06.2020).
48. Cheng, Q. Photonic switching in high performance datacenters / Qixiang Cheng, Sébastien Rumley, Meisam Bahadori, Keren Bergman // OPTICS EXPRESS – 2018. –Vol.26. No.12.
49. Optical MEMS / AG Microsystems, Inc. [Сайт]. – URL: <http://agmicrosystems.com/technology/optical-mems/> (дата обращения: 14.06.2020).
50. Мультиплексоры / Компания «Т8», [Сайт]. – URL: http://t8.ru/?page_id=6372 (дата обращения: 14.06.2020).
51. Оборудование волоконно-оптической системы передачи со спектральным уплотнением «ВОЛГА». Пассивные оптические устройства. Руководство по эксплуатации. / Компания «Т8». – С.103.
52. Perrin, S. The need for next-gen ROADM networks. White paper / Sterling Perrin // Heavy reading. – 2010 (September). – p.15.
53. ROADMs & Wavelength Management Single Wavelength Selective Switch (WSS) 10WSAA09FLL (Standard Profile) and FWS0109BHCFDL (Low Profile) / Finisar [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.finisar.com/roadms-wavelength-management/10wsaaxxfl> (дата обращения: 14.06.2020).
54. Optical Solutions for Networks. WSS Modules. / II-VI Photonics [Сайт]. –URL: http://www.ii-vi-photonics.com/products/wss_modules.html (дата обращения: 14.06.2020).
55. PL-1000RO - Next Generation WSS ROADM / PacketLight Networks [Сайт]. – URL: <https://www.packetlight.com/products/infrastructure-products/pl-1000ro-roadm> (дата обращения: 14.06.2020).
56. Перестраиваемые мультиплексоры ROADM / Компания «Т8» [Сайт]. – URL: http://t8.ru/?page_id=3706 (дата обращения: 14.06.2020).