

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ "МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ"

На правах рукописи

Кручинин

КРУЧЕНИН АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВОЛОКОННО-
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ЗА СЧЕТ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОВЫХ НАНОСТРУКТУР**

Специальность 05.12.13
«Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук., доцент
Журавлева Любовь Михайловна

Москва - 2014

Оглавление:

Введение	5
Глава 1 Способы повышения эффективности волоконно-оптических систем передачи информации ВОСП	9
1.1 Перспективы развития волоконно-оптических систем передачи	9
1.2 Значение нанотехнологий в увеличении скорости передачи информации	12
1.3 Физические и технологические пределы повышения скорости передачи информации	15
1.4 Выводы по 1-ой главе	17
Глава 2 Способы повышения пропускной способности волоконно-оптических систем передачи с помощью технологий TDM и WDM	18
2.1 Энергетический и временной балансы волоконно-оптических систем передачи	18
2.2 Сравнительный анализ информационной емкости волоконно-оптических систем передачи на базе технологий TDM и WDM	20
2.3 Сравнительный анализ энергетического баланса ВОСП на базе технологий TDM и WDM	23
2.4 Сравнительный анализ временных балансов ВОСП на базе технологий TDM и WDM	26
2.5 Сравнительный анализ пропускной способности ВОСП на базе технологий TDM и WDM	28
2.6 Измерения уровней оптических сигналов в системах DWDM	30
2.7 Выводы по 2-ой главе	41
Глава 3 Исследование потенциальных возможностей оптических модуляторов	42
3.1 Анализ и сравнительная характеристика различных форматов оптической модуляции	42
3.2 Исследование работы модулятора Маха-Цендера	45
3.3 Исследования модуляционной характеристики МЦМ	48
3.4 Исследование потенциальных возможностей МЦМ	50

3.5 Сравнение влияния технологий изготовления на примере оптического фильтра Маха-Цендера	52
3.6 Выводы по 3-ей главе	56
Глава 4 Математическое моделирование характеристик оптического модулятора Маха-Цендера	57
4.1 Моделирование волновых процессов в планарном волноводе	57
4.2. Решение волнового уравнения	60
4.3 Сравнение методик расчета интеграла перекрытия	63
4.4 Выводы по 4-ой главе	65
5. Расчет эффективности волоконно-оптических систем передачи на базе модулятора Маха-Цендера	66
5.1 Методы повышения быстродействия модулятора Маха-Цендера	66
5.2 Методика расчета эффективности оптического модулятора Маха-Цендера	69
5.3 Расчет вероятности ошибки	75
5.4 Описание модели сверхрешетки	77
5.5 Принципы работы оптических модуляторов на сверхрешетках	82
5.6 Преимущества оптических модуляторов на изотопических сверхрешетках	84
5.7 Описание ядерной нанотехнологии	86
5.8 Выводы по 5-ой главе	92
Заключение	93
Список сокращений	94
Список литературы	95
Приложение А. Акт об использовании результатов кандидатской работы в ООО "Наука-Связь"	107
Приложение Б. Акт об использовании результатов кандидатской работы в ООО НПП "АКСИОН-РТИ"	108
Приложение В. Акт о внедрении в учебный процесс результатов кандидатской работы в МГУПС (МИИТ) «Московский государственный университет путей сообщения»	109

Приложение Г. Программа расчета коэффициента распространения β в однослойном ОВ	111
Приложение Д. Программа для построения графика зависимости напряженности электрического поля	112
Приложение Е. Программа для определения длины волны настройки оптического фильтра	113

Введение

Актуальность работы обусловлена постоянным ростом объемов информации, передаваемых по волоконно-оптическим системам передачи (ВОСП). Поэтому основной задачей является повышение пропускной способности и скорости передачи сигналов ВОСП.

Скорость и пропускная способность ВОСП определяются возможностями оптических волноводов, быстродействием элементной базы электроники и оптоэлектроники. Совершенствование элементной базы зависит от уровня развития технологии производства и от успехов в создании новых материалов. Быстродействие элементной базы электроники определяется временем пролета электрона, следовательно, его скоростью и длиной затвора транзистора. Поэтому максимальная рабочая частота устройств обработки и передачи информации зависит от электронных характеристик материала и геометрических размеров микроэлементов.

С уменьшением геометрических размеров точность изготовления элементной базы должна увеличиваться. Однако существуют технологические пределы, связанные с разбросом параметров, энергопотреблением и тепловыделением, а также физические пределы уменьшения размеров. Для дальнейшего повышения скорости передачи и быстродействия требуется переход на низкоразмерные структуры. В настоящее время наиболее перспективными являются низкоразмерные изотопические структуры, где имеет место чередование слоев из различных изотопов одного и того же вещества.

Преимущества таких наноструктур заключаются в том, что исходные вещества (собственные изотопы химического элемента) близки по химическому составу (одинаковая электронная оболочка) и значениям постоянной кристаллической решетки. В то же время изотопы различны по физическим оптоэлектронным характеристикам (разные ширина запрещенной зоны, спины ядер, коэффициенты преломления, поглощения и т.д.). Это позволяет создавать пространственные ограничения для носителей заряда без посторонних химических

элементов, ухудшающих оптоэлектронные характеристики материала. При этом получаемые «гетеропереходы» не будут вызывать напряжения кристаллической решетки и влиять на волновые функции свободных носителей заряда.

В настоящее время наиболее «узким» местом для повышения скорости передачи информации ВОСП является оптический модулятор. Самым быстродействующим в настоящее время является модулятор Маха-Цендера (МЦМ). Исследование возможностей такого модулятора - важная и актуальная задача. Принцип работы МЦМ лежит в основе более совершенного модулятора на сверхрешетках (СВР).

Максимальная рабочая частота модулятора МЦМ на СВР составляет 100 ГГц.

Использование изотопических сверхрешеток позволит повысить максимальную рабочую частоту оптического модулятора свыше 200 ГГц.

В основе решения указанных проблем лежат:

- теоретические и прикладные исследования Убайдуллаева Р. Р., Мартинес-Дуарта Дж.М., Бутусова М.М., Верника С.М., Галкина С.Л. и др.

Задачи анализа и разработки методов оценки влияния параметров модулятора Маха-Цендера на качество оптической последовательности являются актуальными. Результаты диссертации направлены на решение этих задач и предназначены для использования при разработке новых модуляторов на базе МЦМ с использованием ИСВР.

Объектом исследований диссертационной работы является модулятор Маха-Цендера

Предмет исследований - влияние параметров модулятора Маха-Цендера, на качество оптической последовательности.

Целью настоящей диссертационной работы является оценка влияния параметров модулятора Маха-Цендера на качество оптической последовательности.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие основные задачи.

1. Получение зависимости Q-фактора от параметров сигнала и помехи;

2. Определение зависимости интеграла перекрытия сигналов в двух параллельных каналах МЦМ от его параметров;

3. Выполнение расчета, позволяющего оценить влияние разности размеров сердцевин модуляторов типа Маха-Цендера на качество передачи;

4. Получение зависимости коэффициента ошибок от разности $\Delta\rho$ размеров сердцевин модулятора, позволяющей оценить влияние технологии на качество передачи.

Методы исследований. В проводимых исследованиях используются методы теории волновых процессов, теории информации, теории передачи сигналов, математическое моделирование, мезоскопической физики.

Научная новизна.

1) получены результаты исследования влияния несимметричности оптических волноводов на качество передачи;

2) произведен расчет, позволяющий влияние качества изготовления на оптические потери МЦМ;

3) осуществлен расчет BER в зависимости от разности $\Delta\rho$ размеров сердцевин модулятора;

4) предложен модулятор на базе новых наноструктур с использованием изотопических сверхрешеток.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что исследованы потенциальные возможности модулятора МЦМ с учетом влияний технологий, предложен новый модулятор на основе изотопических сверхрешеток. За счет этого быстродействие МЦМ может повыситься более чем в 2,5 раза по сравнению со сверхрешетками из разных полупроводников и в 5 раз по сравнению с МЦМ из ниобата лития.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обусловлена корректным применением используемых математических методов, полученных научных результатов, выводов и рекомендаций обусловлена корректной постановкой задачи, принятыми допущениями и ограничениями, теории информации, математического моделирования.

Полученные результаты согласуются с результатами работ других авторов.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Зависимость Q-фактора от параметров сигнала и помехи
2. Зависимость интеграла перекрытия сигналов в двух параллельных каналах МЦМ от его параметров
3. Зависимости от изменения коэффициента преломления набега фазы и интеграла перекрытия для номинальных для МЦМ значений длины волны, показателя преломления, волнового и полуволнового напряжений.
4. Результаты оценки влияния качества изготовления на оптические потери МЦМ
5. Зависимость коэффициента ошибок от разности размеров сердцевин волноводов МЦМ

Внедрение результатов работы осуществлено в соответствующие проекты ООО «Наука-Связь», ООО НПП "АКСИОН-РТИ". Отдельные результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс РОАТ в рамках дисциплин «Теория передачи сигналов» и "Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства". Все результаты внедрения подтверждены соответствующими актами.

Глава 1 Способы повышения эффективности волоконно-оптических систем передачи

1.1 Перспективы развития волоконно-оптических систем передачи

Повышение эффективности волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСП) во многом определяется общими тенденциями развития оптических технологий. Это обусловлено постоянным увеличением объемов информации, которые необходимо передавать с помощью телекоммуникационных систем. Поэтому увеличение пропускной способности, скорости передачи информации по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) являются главными задачами для повышения эффективности ВОСП. Решение этих задач возможно при условии дальнейшего развития информационных и нанотехнологий. Современные телекоммуникационные системы предназначены для организации цифровых информационных сетей передачи данных, голоса, видеоизображений. Наиболее перспективными являются волоконно-оптические системы передачи [1, 6, 13]. Они состоят из волноводов (направляющей среды для передачи оптических сигналов от источника к приемнику излучения), передатчика (источника света и оптического модулятора), приемника, преобразующего с помощью фотодетектора оптические сигналы в электрические. Передача информации по оптическим волноводам имеет много преимуществ перед другими линиями связи, главные из которых являются широкая полоса пропускания, малое затухание светового сигнала, низкий уровень шумов, невосприимчивость к электромагнитным помехам [21, 22, 23].

Скорость и пропускная способность оптических волноводов определяются возможностями ВОСП, а именно: быстродействием элементной базы электроники и оптоэлектроники, форматом оптической модуляции, характеристиками лазеров и фотодетекторов. Следовательно, для повышения эффективности ВОСП необходимо развивать элементную базу с помощью внедрения новых наноструктурированных материалов (для лазеров, фотодетекторов, оптических

модуляторов) и новых форматов оптической модуляции (кодирования, метода модуляции оптического несущего сигнала). Первый способ повышения эффективности ВОСП зависит от развития нанотехнологий, так как связан, прежде всего, с уменьшением размеров элементной базы, второй способ – от совершенствования информационных технологий.

Под информационными технологиями в широком смысле подразумеваются современные компьютерные, сетевые, интернет технологии, а также самые разнообразные телекоммуникационные технологии обработки и передачи информации, касающиеся методов сжатия сообщений, кодирования и модуляции. Нанотехнология – «это совокупность методов и средств, обеспечивающих создание структур, состоящих из отдельных атомов, молекул и макромолекулярных блоков с типичными размерами от единиц до сотен нанометров, а также материалов и функциональных систем на их основе» [6,9,14, 34]. Для цифровых ВОСП пропускную способность S оптического волокна (ОВ) можно определить как произведение ширины полосы частот ΔF «окна прозрачности» ОВ и количества бит информации, приходящегося на один элементарный импульс. При этом максимальное число бит для двоичного кодирования равно единице [25, 27]. Скорость передачи информации ν численно равна ширине полосы частот F , необходимой для организации оптического канала связи (величине, обратной длительности элементарного импульса). Отсюда, пропускная способность S оптического волокна на базе современных ВОСП есть скорость передачи одного оптического канала ν на число каналов $N = \Delta F / F$, организованных в «окне прозрачности» волокна шириной ΔF . Поэтому увеличение скорости ν , приводит к повышению величины S . Существуют два варианта увеличения пропускной способности и скорости передачи информации. Первый - это расширение возможностей оптоэлектронных устройств для реализации частотного ресурса «окна прозрачности» ОВ. Второй - повышение числа бит информации, приходящегося на один импульс. В первом случае главную роль играют геометрические размеры и качество материала элементной базы ВОСП, а также технологии производства [35, 38, 48]. Во втором

случае – совершенство информационных технологий (сжатия сигналов, многопозиционного кодирования, форматов оптической модуляции, повышение отношения мощностей сигнала и шума в приемнике, уменьшение шумов квантования в передатчике и т.д.). Следует отметить, что увеличение скорости ν и числа каналов N ВОСП за счет нанотехнологий происходит в виде линейной функции. Повышение числа бит информации, переносимой единичным импульсом за счет информационных технологий, согласно формуле Шеннона описывается логарифмической функцией [53]. При одинаковых значениях аргументов скорость роста линейной зависимости больше, чем логарифмической функции. Следовательно, степень влияния нанотехнологий на пропускную способность оптического волокна на базе ВОСП значительно выше, чем информационных технологий. Поэтому эффективность развития нанотехнологий имеет исключительное значение для совершенствования телекоммуникационных устройств [44]. Следует отметить, что приведенное сравнение не учитывает взаимное влияние друг на друга информационных и нанотехнологий. Так, определенными стимулами в развитии нанотехнологий являются потребности в реализации научных идей, возникающих в рамках информационных технологий. В то же время, возможности нанотехнологий по совершенствованию полупроводниковых лазеров и фотодетекторов позволяют информационным технологиям предлагать новые форматы оптической модуляции. Кроме того, существуют информационные технологии, например, волнового уплотнения, которые направлены на рациональное использование ресурсов оптического волокна (ΔF), что повышает экономическую эффективность вложений в нанотехнологии.

Таким образом, в настоящее время наиболее перспективным способом повышения пропускной способности и скорости передачи информации с помощью волоконно-оптической связи является совершенствование устройств электроники и оптоэлектроники. В настоящее время главным направлением научных поисков в этой области является создание новых материалов на базе модели сверхрешеток, которая позволяет получить полупроводники с заданными

оптоэлектронными характеристиками. Это необходимо для улучшения качественных параметров лазеров, фотодетекторов, оптических модуляторов, которые непосредственно определяют информационную, спектральную и энергетическую эффективность ВОСП [77, 78, 91]. В решении этой задачи основным фактором являются результаты исследований в области потенциальных возможностей существующих оптоэлектронных устройств и путей повышения их ресурсов с помощью новых материалов, которые нельзя создать без совершенствования нанотехнологий.

1.2 Значение нанотехнологий в увеличении скорости передачи информации

Решающая роль нанотехнологий в повышении скорости передачи информации и пропускной способности ВОСП объясняется тем, что они позволяют увеличить быстродействие оптоэлектронных приборов. Это происходит за счет уменьшения размеров элементной базы и улучшения качественных характеристик технологий изготовления.

Во многих источниках указывается, что существуют два принципа формирования наноструктур: «сверху-вниз» рисунке 1.1 и «снизу-вверх» рисунке 1.2.



Рисунок 1.1 - Формирования наноструктур «сверху-вниз»

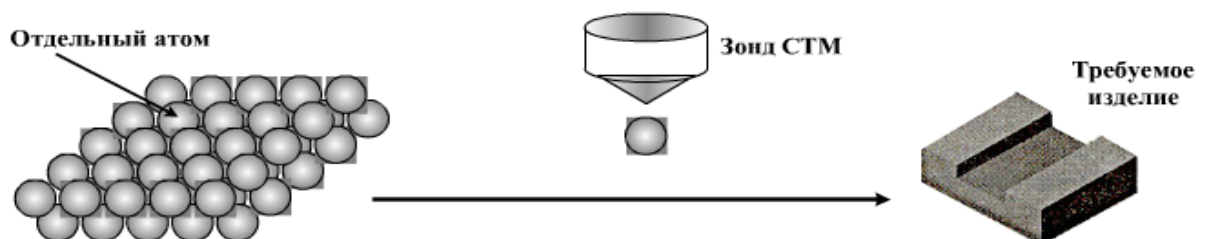


Рисунок 1.2 - Формирования наноструктур «снизу-вверх»

В первом случае предполагается создание низкоразмерных структур или наноструктур с требуемыми размерами и формой путем избирательного удаления материала, заранее нанесенного на подложку (различные литографические методы). Во втором случае формирование таких наноструктур осуществляется путем селективного осаждения атомов и молекул на заданные участки поверхности подложки (различные методы эпитаксии). Здесь необходимо отметить третий возможный способ формирования наноструктур методом нейтронного трансмутационного легирования (НТЛ), который позволяет моделировать нужную конфигурацию пространственного ограничения внутри материала из собственных изотопов исходного вещества [36, 71, 82, 90]. Различные методы эпитаксии (молекулярно-пучковой, газовой на основе металлоорганических соединений) могут обеспечить высокую точность изготовления геометрических размеров наноструктур, но затратные и малопроизводительны [68, 76]. Более перспективны с точки зрения массового производства являются литографические методы, например, на основе сверхжесткого ультрафиолетового излучения. В этих методах основным фактором, ограничивающим точность изготовления (разрешающую способность), являются дифракционные эффекты. При этом минимальный размер изготавливаемой наноструктуры определяется длиной волны используемого излучения. Так, последние достижения в области литографии позволяют достичь величины разрешающей способности порядка $10_{\text{нм}}$ [90]. Следовательно, для изготовления структур менее $10_{\text{нм}}$ потребуются другие решения. Так, используя аналогичные схемы облучения, но другие источники облучения с длиной волны менее $10_{\text{нм}}$ можно создавать наноструктуры меньших размеров. Такими источниками являются тепловые нейтроны, широко применяемые для изготовления микроэлектроники методом НТЛ. Основными достоинствами этого метода являются:

- 1) точность легирования, контролируемая временем облучения потоком нейтронов;

2) высокая однородность распределения получаемых изотопов в облучаемом веществе, достигаемая за счет равномерности нейтронного потока;

3) высокая экономическая эффективность (в США и Европе этим методом получают сотни тонн легированного кремния в год на базе исследовательских ядерных реакторов [82]).

В основе метода НТЛ лежит реакция поглощения нейтронов ядрами вещества и переход одного изотопа в более тяжелый изотоп с возможным последующим превращением в другой химический элемент (например, нестабильный изотоп кремния Si^{31} распадается на фосфор и γ излучение). Таким образом, на основе нейтронной технологии можно получать разные изотопические слои определенной конфигурации, обеспечивая пространственное ограничение за счет разницы запрещенных зон стабильных изотопов исходного химического элемента. Такой метод применяется при создании многослойных структур и *p-i-n* сверхрешеток, например, из изотопов германия (Ge^{70} , Ge^{72} , Ge^{74}). Он получил название изотопной инженерии. Преимущества этого метода объясняются тем, что в нем разделены процессы роста слоев и их легирование. При этом слои выращиваются без примесей и имеют совершенную структуру, поскольку изотопы германия являются идентичными в химическом отношении. Это позволяет избежать размытия границ «гетероперехода» и добиться уменьшения числа дефектов за счет отсутствия химических примесей.

Использование этого метода для создания наноструктур с различной конфигурацией и размерами путем искусственного изменения изотопического состава [19, 101, 105], позволяет назвать его методом изотопической наноинженерии. Главное преимущество изотопов – возможность получить сверхрешетки без механических напряжений в «гетеропереходах» и энергетическую структуру нового материала с минимальными флуктуациями разрешенных и запрещенных зон, от которых зависят основные характеристики лазеров, фотодетекторов, оптических модуляторов. Для низкоразмерных сверхрешеток особое значение имеет разрешающая способность нанотехнологии. С этой точки зрения наибольшие перспективы имеет метод НТЛ [90, 93, 102].

Применительно к кремнию возможности такой наноинженерии ограничены из-за малой разницы в ширине запрещенных зон собственных изотопов (десятые доли $m\text{эВ}$). Однако существуют материалы, например, LiH и LiD , у которых эта разница значительна (десятые доли эВ) [15, 19, 58, 87].

1.3 Физические и технологические пределы повышения скорости передачи информации

Известно, что предельная рабочая частота электронных и оптоэлектронных устройств зависит от размеров отдельных элементов [7, 10, 12]. Она определяется временем пролета электрона, следовательно, его скоростью и длиной затвора транзистора. Внедряемые уникальные технологии позволяют создавать тонкий оксидный слой затвора толщиной 1,2 нм (менее пяти атомарных слоев) и достигать рабочей частоты транзистора 1ТГц. Однако уменьшение размеров электронных приборов не может происходить до бесконечности. Поэтому дальнейшее повышение быстродействия элементной базы должно замедлиться. Это объясняется существующими пределами, обусловленными фундаментальными законами природы. Первый предел – релятивистский, который говорит о том, что скорость распространения сигнала не может быть выше скорости света. Поэтому с учетом минимальной длины затвора транзистора, равной постоянной кристаллической решетки, легко можно подсчитать минимальное время пролета электрона (сотые доли фемтосекунды) и максимальную рабочую частоту. Второй предел связан с принципом неопределенности Гейзенберга, согласно которому в транзисторе с ростом частоты легко достигается квантовый предел (произведение времени и энергии процесса ограничены постоянной Планка) [10, 11]. Существуют также и технологические ограничения, связанные с разбросом параметров, который невозможно контролировать при пропорциональном уменьшении размеров, а также энергопотреблением и тепловыделением [10].

Поэтому для дальнейшего повышения быстродействия требуются новые архитектура, принципы работы устройств, а также новые материалы и технологии производства. Так, большие надежды ученые связывают с графеном. Этот материал оказался стабильным, очень гибким, прочным и электропроводным. С его помощью можно создать суперкомпьютер, где размеры вычислительных ячеек будут уменьшены в миллионы раз. Поэтому опять на первый план выходит развитие технологии производства элементной базы, которое во многом определяется новыми идеями и объемом вкладываемых материальных средств. Несмотря на выдающиеся успехи в области нанотехнологий, существующие сейчас ограничения по разрешающей способности (порядка 10 нм) не позволяют пока перейти на качественно новый уровень работы вычислительной техники.

Одним из путей перехода на новый уровень является дальнейшее развитие устройств обработки и передачи информации с помощью молекулярной электроники [17]. В качестве элементной базы предполагается использовать отдельные молекулы органических соединений. Для кодирования различных состояний элементов можно выбирать разные конфигурации молекул. Изменение состояний может быть быстрым и не требовать значительных расходов энергии, легко управляться внешними сигналами и регистрироваться с помощью зондовых методов. Последние достижения в области сканирующей атомно-силовой микроскопии позволяют манипулировать отдельными молекулами. Это приведет к еще большей миниатюризации электронных устройств, поскольку характерные размеры элементов молекул на порядки меньше, чем размеры элементов существующих электронных схем. Однако пока еще не решена проблема соединения «вычислительных молекул» с другими системами. Разновидностью молекулярной электроники является изотоптроника [18, 33, 89], изучающая возможности применения физики изотопов во многих областях науки и техники от вычислительных и телекоммуникационных систем до медицины. Основное внимание уделяется использованию изотопических свойств химических элементов для получения новых эффектов, создания новых устройств и технологий их изготовления. При этом используются различные методы

исследования, в том числе моделирования изотопического состава вещества на уровне атомарных слоев.

Новая элементная база, построенная с помощью молекулярной электроники и изотоптроники, потребует новых физических принципов передачи и обработки информации [32, 37, 92]. Постепенно на смену классическому представлению об устройствах обработки и передачи информации придут квантовые системы и квантовая теория информации [50, 56, 61, 72, 103].

1.4 Выводы по 1-ой главе

1. Главным направлением в повышении пропускной способности является создание элементной базы с помощью новых материалов, использующих модель сверхрешетки.

2. Наиболее перспективным материалом для создания сверхрешеток являются изотопы исходного химического элемента.

3. Для получения низкоразмерных изотопических сверхрешеток необходимо совершенствовать технологии изготовления, например, используя нейтронный пучок, обладающий наименьшими дисперсионными искажениями, по сравнению с другими источниками облучения.

4. Дальнейшее повышение пропускной способности возможно только в случае перехода на квантовые принципы передачи и обработки информации.

Глава 2 Способы повышения пропускной способности волоконно-оптических систем передачи с помощью технологий TDM и WDM

2.1 Энергетический и временной балансы волоконно-оптических систем передачи

Энергетический и временной балансы волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) – важные характеристики волоконно-оптических линий связи, влияющая на протяженность ВОСП и длины регенерационных и усилительных участков. Длину усилительного участка $L_{\text{эн}}$ определяет энергетический баланс ВОЛС, длину регенерационного участка $L_{\text{вр}}$ – временной баланс. Оба эти баланса зависят от потенциальных возможностей ОВ (информационного объема V), скорости передачи информации ν , оптических технологий использования ресурсов ОВ (TDM, WDM) [28, 79, 80, 86]. Для выбора способа повышения оптического бюджета ВОСП нужно проанализировать все факторы, влияющие на энергетический и временной балансы ВОЛС. Для этого воспользуемся формулой Шеннона и определим максимальный объем информации V , который можно передать по непрерывному каналу с помощью оптического волокна в полосе частот F (Гц) за время T (с):

$$V = T \cdot F \cdot D, \text{ (бит)} \quad (2.1)$$

где $D = \log_2(P_c / P_{\text{ш}})$ – динамический диапазон оптического канала,

P_c - мощность оптического сигнала на входе приемника,

$P_{\text{ш}}$ - мощность шума на входе приемника, состоящего из шума оптического предусилителя и теплового шума фотодетектора.

Динамический диапазон D - это количество бит информации, приходящееся на одну выборку сигнала. С учетом квантования непрерывного сигнала на 256 уровней и двухпозиционного кодирования получим, например, восьмиразрядную комбинацию, в которой каждый оптический импульс будет нести следующее количество бит информации ($\rho \gg 1$) [53]:

$$D = (\log_2 \rho) / n, \quad (2.2)$$

где n - число разрядов в кодовом слове.

Поделив левую и правую часть выражения (1) для объема V на время T , получим формулу Шеннона, которая описывает пропускную способность C оптического волокна на базе ВОСП. Это – максимальное количество информации, переданное за время T . Таким образом, для повышения пропускной способности ВОСП необходимо увеличить параметры F и D .

Значения параметров T, F, D для оптических цифровых каналов соответствуют периоду тактовой синхронизации, ширине «окна прозрачности» оптической несущей, отношению мощностей полезного сигнала и шума на входе приемника. Так, период тактовой синхронизации (125мкс) рассчитывается, исходя из ширины полосы частот передаваемых сообщений. Величина F определяется амплитудно-частотной (волновой) характеристикой оптического усилителя (ОУ) в области значений оптических несущих. Для современных ОУ значение F не превышает 1ТГц [1], хотя потенциальные возможности ОВ значительно выше. Так, для диапазона E (1360...1430нм) ширина полосы частот оптического волокна составляет 15 ТГц [1]. На значение динамического диапазона D влияет выходная мощность лазера и чувствительность фотодетектора, длительность элементарного импульса и максимально допустимая пиковая мощность сигнала на входе оптического волокна. Так, для стандарта STM-16 минимально допустимая величина D составляет 20дБ [2]. Следует отметить, что с помощью нанотехнологий можно повысить граничные значения по ширине F за счет улучшения амплитудно-волновой характеристики оптических усилителей, а также расширения динамического диапазона D за счет совершенствования параметров приемопередатчиков и оптического волокна. С помощью новых методов информационного сжатия передаваемых сообщений можно уменьшить ширину полосы частот сигналов, что фактически равносильно расширению временного параметра T [63, 79, 88].

2.2 Сравнительный анализ информационной емкости волоконно-оптических систем передачи на базе технологий TDM и WDM

Подробная детализация формулы Шеннона для ОВ с учетом критерия качества позволит сравнить технологии TDM и WDM по количеству передаваемой информации, скорости передачи сигналов при условии реализации потенциальных возможностей ОВ и определить, какая из технологий наилучшим образом может увеличить:

- 1) число каналов и информационную емкость ВОЛС;
- 2) длину усилительного участка (УУ);
- 3) пропускную способность оптического волокна.

Кроме того, с помощью формулы Шеннона можно увидеть наиболее перспективные пути совершенствования ВОСП.

Для этого необходимо преобразовать выражение для информационной емкости V так, чтобы оно включало показатель качества связи ρ , длину регенерационного участка (РУ состоит из нескольких УУ), количество каналов K , которое в общем случае равно произведению числа временных (тайм-слотов) N и числа частотных (волновых) каналов K_f .

Величина N рассчитывается как отношение периода тактовой синхронизации $T_{мс}$ на длительность временного канала $\tau_k = \tau_s \cdot n$, где τ_s - длительность элементарного импульса. Число частотных каналов K_f вычисляется как отношение ширины «окна прозрачности» $F_{ов}$ на ширину одного частотного канала $\Delta f_k = b / \tau_s$, где коэффициент b определяет величину частотного разноса между оптическими каналами и зависит от используемой аппаратуры ВОСП.

Значение динамического диапазона для оптических линий связи лучше преобразовать в ∂B и представить в виде уровней по мощности.

$$\text{Так, } \log_2(P_c / P_u) = \lg 2(\lg P_c - \lg P_u) = 0,301(a_c - a_u) = 0,301 a_z, \quad (2.3)$$

где a_c, a_u, a_z - соответственно значения уровней оптического сигнала, шума фотоприемника и величины защищенности передачи.

На основании расчетов диаграммы уровней ВОСП можно записать следующие соотношения[80]:

$$a_{\text{ex}} - \alpha L = a_c, \quad (2.4)$$

где a_{ex}, a_c - соответственно входной и выходной уровни ВОСП;

α - километрический коэффициент затухания ОВ, зависящий от типа ОВ и величины оптической несущей;

L - длина усилительного участка.

Входные уровни всех частотных каналов технологии WDM не должны в сумме превышать максимально допустимый уровень A_{ex} для оптического волокна, который отделяет линейный и нелинейный режимы работы волокна. Величина входного уровня для каждого частотного канала находится из выражения [53, 79]:

$$A_{\text{ex}} = a_{\text{ex}} + 10 \lg K_f, \quad (2.5)$$

которое можно получить из соотношения $(P_{\text{os}}/P_1)=K_f$, означающего отношение суммарной пиковой мощности P_{os} на входе ОВ, разделенной между частотными каналами с мощностью P_1 . Для технологии TDM $K_f=1$, поэтому значение A_{ex} в формуле (2.5) может быть равным a_{ex} .

Таким образом, информационную емкость оптической линии в общем виде можно выразить так:

$$V^1 = V/0,301 = (\sum \Delta f_{\kappa} \sum \tau_{\kappa}) (a_{\text{ex}} + 10 \lg K_f), \quad (2.6)$$

где суммирование происходит по всем каналам K_f и N .

Дальнейшая детализации формулы Шеннона для оптического волокна требует учета особенностей распространения света по ОВ. Они заключаются не только в затухании сигнала по энергии, но и в расширении импульса по длительности из-за хроматической дисперсии. Дисперсию можно оценить с помощью коэффициента W . Величина $W = L/\tau_s [\text{МГц} \cdot \text{км}]$ называется удельной полосой пропускания и зависит от типа ОВ, расположения «окна прозрачности»

(значения оптической несущей), ширины спектра излучения лазерного диода $\Delta\lambda$ [5, 20, 66, 67].

Отсюда, выражение Шеннона для оптического волокна с одинаковыми для всех каналов значениями τ_k и Δf_k будет иметь вид:

$$V_{os}^1 = K_f \left(\frac{b}{\tau_s} \right) \cdot N \cdot \left(\frac{L}{W} \right) \cdot n \cdot (a_{ex} + 10 \lg K_f) = K_f \cdot N \cdot b \cdot n \cdot (a_{ex} + 10 \lg K_f). \quad (2.7)$$

Как видно из этой формулы, общее число каналов по технологии WDM, равное $K = K_f \cdot N$, ограничено шириной полосы F_{os} и временем T_{mc} .

Для технологии TDM ($K_f=1$) весь частотный ресурс F_{os} может расходоваться на организацию временных каналов N , а следовательно, на скорость передачи информации ν , которая для двоичного кодирования по величине не отличается от скорости передачи сигналов ν .

Для технологии WDM увеличение количества частотных каналов K_f уменьшает число временных N , и наоборот, уменьшение длительности элементарного импульса τ_s и соответствующее расширение полосы Δf_k снижает значение K_f . Это свидетельствует о том, что общее число каналов ВОЛС, определяемое на основании соотношения Хартли $K = K_f \cdot N$, одинаково для TDM и WDM.

Линейная зависимость между значениями K, K_f, N говорит о том, что не существует оптимальной длительности τ_s , позволяющей обеспечить максимальное значение пропускной способности ОБ.

Таким образом, при условии наличия соответствующей элементной базы обе технологии могут предоставить одинаковое число каналов ВОЛС. Эти каналы можно организовать с помощью волнового уплотнения ОБ (разделив общую полосу между отдельными каналами). Затем передавать оптические сигналы одновременно в нескольких частотных каналах (WDM). Другой способ - это с помощью временного уплотнения осуществлять передачу сигналов в строго отведенные временные промежутки, которые занимают всю полосу «окна прозрачности» ОБ (TDM).

Отсюда следует, что обе технологии при наличии одинакового энергетического запаса $P_{ос}$ обладают одинаковой информационной емкостью.

2.3 Сравнительный анализ энергетического баланса ВОСП на базе технологий TDM и WDM

Проанализируем возможности технологий TDM и WDM по энергетическому балансу на примере расчета длины усилительного участка ВОСП. Для технологии TDM величина A_{ex} полностью расходуется на энергию оптического сигнала. Поэтому длина усилительного участка L зависит от энергии оптического импульса (произведения квадрата амплитуды на длительность импульса), километрического затухания ОВ α и уровня сигнала $a_c = a_{in} + a_s$. Согласно энергетическому балансу ВОЛС максимально возможная дальность усилительного участка равна [70, 80]:

$$L_{yy} = \frac{A_{ex} - a_c}{\alpha}. \quad (2.8)$$

Однако в это выражение входят уровни сигналов, не учитывающие уменьшения дальности связи при увеличении скорости передачи сигналов. Два импульса одинаковой амплитуды, но разной длительности будут иметь разные энергии (рисунок 2.1). Для простоты рассуждений в качестве примера на рисунке 2.1 выбраны импульсы прямоугольной формы. В линии связи, как известно, затухает энергия сигнала, величина которой и определяет длину УУ. Чем меньше энергия сигнала, тем быстрее он затухнет в линии связи, тем короче длина УУ. При одном и том же значении входного уровня a_{ex} , но разной длительности τ_s , скорость затухания (потери энергии импульса) в оптической линии будет пропорциональна величине τ_s . Системы ВОСП с такими параметрами и одинаковой величиной защищенности обеспечат дальность связи, равную соответственно L_1 и $L_2 < L_1$. Чтобы эти расстояния были равны, необходимо повысить входной уровень второй системы. В рассматриваемом случае

анализируются потенциальные возможности технологий TDM и WDM. Поэтому в качестве входного уровня принимается максимально возможное значение для выбранного оптического волокна $A_{\text{вх}}$. Такие же графики получаются, если использовать разные оптические линии связи с различными коэффициентами километрического затухания ОВ $\alpha_1 < \alpha_2$. Поэтому выражение (2.8) справедливо и для энергетических расчетов ВОЛС, организованных с помощью разных оптических кабелей. Для учета скорости передачи в формуле (2.8) требуются дополнительные уточнения. Это можно осуществить следующим образом:

- 1) взять за основу расчетов в качестве эталонной системы, например, график 1;
- 2) найти дополнительную величину Δa ;
- 3) получить новое значение защищенности $a_{3_2} = a_{3_1} + \Delta a$ для системы с другой скоростью передачи сигналов;
- 4) согласно рассчитанной величине a_{3_2} определить дальность УУ для новой системы L_2 .

Таким образом, уменьшение энергии элементарного импульса за счет сокращения его длительности предлагается учесть в формуле (2.8) увеличением значения защищенности a_3 для сохранения качества связи. На основании рисунка 2.1 можно сделать вывод, что величина Δa зависит от отношения энергий исходных импульсов и при одинаковой их амплитуде (входном уровне $A_{\text{вх}}$) определяется отношением длительностей элементарных импульсов.

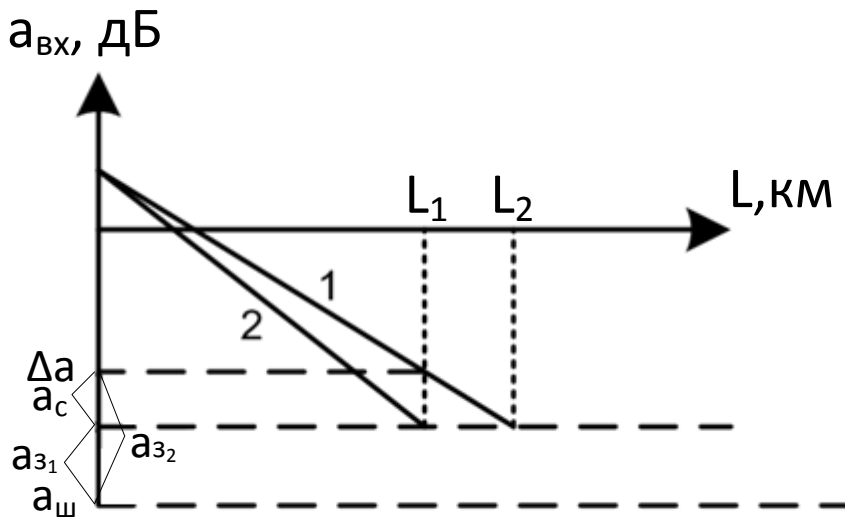


Рисунок 2.1. - Диаграмма уровней ВОЛС

Поэтому введем в числитель формулы (2.8) дополнительное слагаемое, равное $\Delta a = 10 \lg B / \tau_{\text{э}}$. Это дополнение учитывает необходимые изменения величины защищенности эталонной системы в зависимости от скорости передачи информации ВОСП, для которой рассчитывается $L_{\text{эн}}$. Тогда, величина максимальной дальности по энергетическому балансу $L_{\text{эн}}$ для технологии TDM определится как:

$$L_{\text{эн}} = [A_{\text{вх}} - (a_c + 10 \lg B / \tau_{\text{э}})], \quad (2.9)$$

где B - величина равная длительности импульса эталонной ВОСП;
 $a_c = (a_{\text{ш}} + a_{\text{з1}})$ - значение уровня входного сигнала эталонной ВОСП;

$\tau_{\text{э}}$ - длительность элементарного импульса ВОСП, причем $\tau_{\text{э}} \ll B$.

Следовательно, возможности ОВ по дальности для технологии TDM ограничены величиной $A_{\text{вх}}$, скоростью передачи информации и выбранным значением качества $a_{\text{з}}$.

Для технологии WDM длина УУ по сравнению с TDM при одинаковых канальной скорости и защищенности будет значительно меньше согласно формулам (2.9) и (2.5).

Так, длина усилительного участка по энергетическому балансу $L_{эн}$ для технологии WDM с учетом выражений (2.5) и (2.9) равна:

$$L_{эн} = [A_{эx} - 10 \lg K_f - (a_c + 10 \lg B/\tau_s)] / \alpha. \quad (2.10)$$

Из этого выражения видно, что при уменьшении τ_s поднимается уровень защищенности за счет слагаемого $10 \lg B/\tau_s$, что уменьшает дальность. Происходящее при этом сокращение числа волновых каналов K_f и повышение $a_{эx}$ каждого канала увеличивает дальность связи за счет уменьшения величины $10 \lg K_f$ в формуле (2.10). Если в итоге получится, что величина K_f сравняется с величиной B/τ_s , то значения $10 \lg K_f$ и $10 \lg B/\tau_s$ уравновесят друг друга, а дальность связи не изменится. Этот вывод справедлив при условии полного использования технологией WDM ресурсов ОВ по полосе $F_{ос}$ и входному уровню $A_{эx}$.

2.4 Сравнительный анализ временных балансов ВОСП на базе технологий TDM и WDM

Для сравнительного анализа возможностей ВОСП по дальности связи на примере технологий TDM и WDM рассмотрим расчет длины регенерационного участка технологии TDM. Длина регенерационного участка ВОСП выбирается с учетом величины хроматической дисперсии ВОЛС. Так, влияние хроматической дисперсии допускает следующее значение длины регенерационного участка технологии TDM, которая рассчитывается как отношение коэффициента W на конечную скорость ν [79, 80]:

$$L_{ер} = T_{мс} \cdot W / N \cdot n \cdot m^1, \quad (2.11)$$

где коэффициент m^1 учитывает возможное повышение скорости передачи за счет линейного кода. В этом случае дальность связи ограничивается скоростью передачи ν (количеством временных каналов N), параметром оптического волокна W , шириной полосы лазерного излучения $\Delta\lambda$. В зависимости от скорости

передачи сигналов, линейного кода и параметров ОВ (α , W) расстояние L_{ep} может быть больше или меньше расстояния $L_{эн}$.

Обычно длина усилительного участка меньше длины регенерационного участка. Если приравнять значения $L_{эн}$ и L_{ep} по формулам (2.9) и (2.11), то получим выражение, с помощью которого можно подбирать параметры ВОСП ($\alpha, W, \nu, m^1, \Delta\lambda, K$), обеспечивающие максимально возможную дальность связи волоконно-оптических линий при использовании всех доступных ресурсов (по ширине полосы $F_{ос}$ и входному уровню $A_{вх}$) оптического волокна.

Для технологии WDM уменьшение длительности τ_s влечет за собой расширение спектров сигнала и снижение числа частотных каналов K_f , а также перераспределение допустимого входного уровня $A_{вх}$ между волновыми каналами в сторону увеличения входных уровней $a_{вх}$ согласно формуле (2.5). При этом энергия оптического импульса может остаться неизменной за счет одновременного уменьшения τ_s и возможного увеличения амплитуды импульса.

Для анализа временного баланса ВОЛС необходимо проанализировать факторы, влияющие на длину регенерационного участка технологии WDM. Если учесть влияние хроматической дисперсии на уширение длительности импульса, то можно рассчитать дальность связи для технологии WDM (длину регенерационного участка) по временному балансу. Так, при делении полосы $F_{ос}$ на отдельные частотные каналы можно записать:

$$K_f = F_{ос} \cdot \tau_s / b \text{ или } K_f = F_{ос} \cdot L_{ep} / b \cdot W. \quad (2.12)$$

Отсюда, длина регенерационного участка равна:

$$L_{ep} = K_f \cdot W \cdot b / F_{ос}. \quad (2.13)$$

Приравняв выражения дальности связи по энергетическому (2.10) и временному (2.13) балансам для технологии WDM, по аналогии с TDM можно получить параметры ВОСП, обеспечивающие максимально возможную дальность связи при условии использования ресурсов ОВ по ширине полосы частот и входному уровню.

Сравнение дальности связи ВОСП, организованных с помощью технологий WDM и TDM, позволяет получить интересную закономерность. Так, при одной и той же защищенности передачи a_z и скорости передачи сигналов величина $L_{эн}$ для технологии WDM (2.10) меньше, чем для TDM (2.9) в K_L раз:

$$K_L = (A_{ex} - a_c) / (A_{ex} - a_c - 10 \lg K_f) = \lg(P_{ov} / \rho) / \lg(P_{ov} / \rho \cdot K_f) = \log_{(P_{ov} / \rho \cdot K_f)}(P_{ov} / \rho). \quad (2.14)$$

Следовательно, увеличение количества частотных каналов в системе передачи с WDM уменьшает $L_{эн}$ не пропорционально числу K_f , а согласно логарифмической зависимости (2.14), которая снижает длину УУ с повышением K_f более медленнее, чем в случае линейной зависимости.

Несмотря на то, что технология WDM имеет определенные ограничения по дальности связи по сравнению с TDM, технология волнового уплотнения является наиболее перспективной для полностью оптических сетей связи.

Интересно сравнить технологии TDM и WDM по пропускной способности.

2.5 Сравнительный анализ пропускной способности ВОЛС на базе технологий TDM и WDM

Для сравнения технологий временного и волнового уплотнения по пропускной способности рассмотрим более подробно формулу (2.1). Так, разделив формулу (2.1) для расчета информационной емкости ОБ на время тактовой синхронизации, получим в общем виде выражение для пропускной способности C оптического волокна.

$$\text{Так, } C = F_{ov} \log_2 \rho / n \text{ или } C = (K_f \cdot b / \tau_s) \cdot (\log_2 \rho) / n.$$

Существующая тенденция к сокращению частотного разнеса между оптическими несущими в технологии WDM, при которой уже ширина оптического канала близка к ширине спектра оптического сигнала ($1/\tau_s$) [2], позволяет записать:

$$C \approx K_f \cdot \nu \cdot (\log_2 \rho) / n. \quad (2.15)$$

Несмотря на то, что для TDM $K_f=1$, технология временного уплотнения не уступает по пропускной способности, так как может компенсировать отсутствие частотного уплотнения повышением скорости передачи сигналов V .

Сравнительный анализ оптических технологий TDM и WDM показал, что каждая из этих технологий способна при наличии элементной базы полностью освоить ресурсы ОВ. Однако применительно к полностью оптическим сетям более перспективной является технология волнового уплотнения ВОЛС. Эта технология позволит значительно повысить гибкость оптических сетей за счет различных вариантов логических топологий, реализованных в одном оптическом волокне с использованием разных оптических несущих и алгоритмов волновой маршрутизации [14, 79]. Этот вывод справедлив при условии полного использования ресурсов ОВ. Однако, для реализации технологии TDM пока еще не существует соответствующая по быстродействию элементная база. Высокую пропускную способность ВОСП можно достичь с более низкими канальными скоростями с помощью соответствующего количества волновых каналов. Существующая элементная база позволяет добиться максимальной канальной скорости передачи информации в 40 Гбит/с. При этом самым узким местом в увеличении скорости передачи информации является в настоящее время оптические модуляторы. Для дальнейшего увеличения пропускной способности и скорости передачи информации для обеих технологий необходимо техническое освоение частотных ресурсов ОВ.

Поэтому главным направлением исследований в области ВОСП является расширение частотных границ оптического волокна $F_{ог}$, а также повышение допустимых значений $P_{ог}$ (или уменьшение интенсивности излучения на единицу площади сечения сердцевин ОВ, например, за счет увеличения этого сечения). Этого можно добиться путем совершенствования конструкций и технологий изготовления ОВ. Примером нового типа ОВ с расширенными возможностями является фотонно-кристаллическое волокно (ФКВ) [26, 65, 74, 75] и оптические волноводы на основе изотопических низкоразмерных структур.

Кроме оптических волноводов, следует улучшать АВХ оптических усилителей и снижать шумы, вносимые ОУ. Важную роль играют технологии производства оптических устройств (чистота исходных материалов, точность изготовления геометрических размеров оптоэлектронных устройств). Следует отметить, что для реализации потенциальных возможностей оптического волокна на базе волнового и временного уплотнения необходимо, прежде всего, совершенствовать оптические форматы модуляции и повышать максимальную скорость оптических модуляторов.

2.6 Измерения уровней оптических сигналов в системах DWDM

Повышение скорости, увеличение объемов передаваемой информации и расширение области применения волоконной оптики приводят к изменениям технологий передачи. Все это не может не влиять на методы измерения в системах волоконно-оптической связи [3, 4].

Потери оптической мощности (затухание) - это уменьшение светового сигнала, распространяющегося в среде по мере увеличения пройденного расстояния, включающее в себя все потери, возникающие при передаче. Понятно, что даже небольшой выигрыш по затуханию при инсталляции кабеля приведет к значительному увеличению дальности связи, поскольку уменьшение потерь эквивалентно увеличению оптической длины кабеля, а также снижению верхней границы его полосы пропускания. Точное знание затухания в кабеле и компонентах кабельной системы является определяющим для оценки его работоспособности и определения запаса оптической среды по скорости передачи и бюджету потерь.

При инсталляции и эксплуатации оптических кабельных систем, необходимо контролировать следующие виды потерь:

- прямые потери мощности сигнала или общие потери света при распространении;

- возвратные потери, представляющие собой смесь отраженных сигналов с фоновым шумом и обратным рассеянием Рэлея [16, 51, 52, 54].

Определить характеристики сигналов и компонентов Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) на порядок сложнее, чем при тестировании технологий с передачей сигнала на фиксированной длине волны. По существу, такие оптические параметры, как вносимые потери, затухание при отражении, поляризационные эффекты, должны тестироваться для всего диапазона длин волн.

Конечной целью измерений параметров сигналов в системах DWDM является проверка работоспособности линии, по которой идет множество информационных потоков, т. е. подтверждение того, что полезная информация не только передается по всему оптическому тракту и что ее можно выделить из общего сигнала на принимающей стороне.

Поскольку реальный сигнал имеет очень сложную структуру, к тому же меняющуюся во времени, то задачу контроля упрощают, измеряя несколько ключевых характеристик: спектральных, временных и поляризационных. Основными, конечно, являются параметры спектра, связывающие длину волны излучения и его мощность, измеренную в какой-либо точке оптического тракта. Анализ полученной зависимости позволяет достаточно точно судить о прохождении реальных сигналов, при условии незначительности нелинейных явлений, неизбежных в любой оптической системе. Важнейшими параметрами отдельного канала при контроле за реальными линиями являются центральная длина волны, максимальная мощность сигнала и ширина спектра канала.

Центральная длина волны, согласно рекомендации Международного союза электросвязи (МСЭ), должна соответствовать одному из стандартных значений. Обычно применяется сетка каналов с шагом 100 ГГц.

Канальная мощность представляет интерес для расчета отношения сигнал/шум, что позволяет судить о надежности выделения полезной информации из сигнала.

Чем длиннее линия, тем шире спектр сигнала, во-первых, из-за влияния нелинейных эффектов во всем волоконно-оптическом тракте и, главным образом, в усилителях, а во-вторых, в результате поляризационно-модовой дисперсии (Polarized Mode Dispersion, PMD) сигнала в оптическом кабеле. Контроль спектральной ширины канала особенно важен для систем с близко расположенными каналами, где даже небольшое расширение сигнала в спектральной области может означать его переход в соседнюю область [55, 81].

Еще одна важная характеристика сигнала — стабильность указанных параметров во времени, в особенности стабильность центральной длины волны источника излучения в течение длительного времени, а также стохастические процессы вследствие, например, флуктуаций поляризационно-зависимых потерь на любом участке оптического тракта.

В идеальной системе DWDM демультиплексор должен выделить каждый компонент входного сигнала и направить его на отдельный выход, независимо от мощности сигнала в любом другом канале. Однако поведение реальных устройств отклоняется от описанного выше, и сигнал на выходе одного канала частично передается в другие каналы. Величина остаточного сигнала, появляющегося на различных выходах, определяется взаимным влиянием каналов (crosstalk).

Если измерения параметров тракта передачи дают неудовлетворительные результаты, то переходят к тестированию параметров отдельных компонентов: источников излучения, пассивных устройств и усилителей сигнала.

Пассивные оптические компоненты — соединительные муфты, мультиплексоры и демультиплексоры — характеризуются вносимыми потерями, связывающими длину волны тестирующего сигнала с мощностью сигналов на входе (каждом входе мультиплексора) и выходе (каждом выходе демультиплексора) устройства [54, 80].

В системах DWDM всегда большое внимание уделяется взаимоувязке характеристик оптических фильтров. Вместо полной функции зависимости вносимых потерь от длины волны используются две близкие по смыслу величины — полоса пропускания (passband) и пропускная способность (bandwidth). Ширина

сигнала на уровне 1 дБ ниже максимума называется полосой пропускания, а ширина сигнала на уровне 20 дБ ниже максимума — пропускной способностью и относится обычно к устройствам фильтрации сигналов. При этом отношение указанных величин указывает на крутизну наклонов боковых сторон в диаграмме фильтра и существенно влияет на величину перекрестной связи каналов.

Измерение и контроль оптических сигналов и компонентов обычно производятся по одной из трех методик: в первой используют лазер с перестройкой частоты и измеритель оптической мощности, в другой — широкополосный источник излучения и оптический анализатор спектра; третья методика предназначена для контроля поляризационно-зависимых потерь. В нашем случае, измерения проводились по второй методике [16, 54].

Метод предусматривает использование широкополосного источника излучения наподобие оптического светодиода (LED) или эрбиевого источника (ASE), а также анализатора оптического спектра (OSA) [16, 51, 54].

Широкополосный источник излучает во всем спектре частот проверяемого устройства. Таким образом, измерения проводятся для всех длин волн. При этом дополнительные устройства не требуются, поскольку анализатор спектра разделяет излучение по длине волны для всего диапазона и измеряет передаваемую мощность для каждой длины волны отдельно. Обычно OSA позволяют контролировать центральную длину волны, расстояние между соседними каналами, а также общие характеристики, такие, как мощность, отношение сигнал/шум и др. Однако их разрешающая способность зависит от используемой модели и обычно ограничена 0,1 нм. Для отдельных компонентов, работающих в узком диапазоне частот устройств DWDM, использование широкополосного источника и анализатора спектра может оказаться недостаточным для получения их критически важных характеристик.

Принцип работы анализатора спектра состоит в разделении светового потока на монохроматические компоненты с последующим измерением мощности каждой составляющей. Тем самым, OSA позволяет исследовать весь спектральный профиль сигнала в требуемом диапазоне длин волн. Далее профиль

отображается на графике в координатах «длина волны—мощность». Таким образом, для мультиплексированного сигнала, проходящего по волокну системы DWDM, могут быть проанализированы и отображены оптические характеристики каждого канала, а также взаимовлияние разных каналов.

Использование дифракционной решетки — наиболее известный метод, применяемый для деления света на его компоненты (цвета). Параллельные линии на поверхности дифракционной решетки разделяют световой сигнал в оптический спектр. Как только сигнал разделен, мощность заданной длины волны может быть измерена путем установки детектора в месте максимальной концентрации света нужной длины волны.

Сегодня наибольшее распространение получили анализаторы на основе перестраиваемых фильтров, главным образом, работающих по принципу Фабри-Перро.

К ключевым характеристикам относится коэффициент оптического отклонения (Optical Rejection Ratio, ORR) — важнейшая характеристика OSA. Он характеризует максимальное значение отношения сигнал/шум, которое OSA может измерить в данном диапазоне при пиковом значении сигнала.

При плотном (т. е. на расстоянии менее 50 ГГц) расположении каналов, важность ORR возрастает. Устройство OSA с недостаточным ORR не отражает большинство деталей спектрального профиля реального сигнала DWDM.

Основной интерес для пользователя OSA представляет детальное изображение реального спектрального профиля. Если ORR измерительного прибора оказывается ниже отношения сигнал/шум системы, то оператор получает график, на котором изображены скорее собственные ограничения такого прибора, чем реальное поведение оптического сигнала. Чем больше каналов и `уже интервал каждого, тем выше должен быть ORR для измерения той же мощности.

Сегодняшние рекомендации для систем DWDM основываются на уровне иерархии до STM-16/OC-48 (2,5 Гбит/с), но с переходом к более скоростным системам — STM-64/OC-192 (10 Гбит/с) — возникнет потребность в измерении больших величин отношения сигнал/шум (Optical Signal-to-Noise Ratio, OSNR).

Увеличение быстродействия, как ожидается, потребует 4- или 5-кратного повышения точности измерения OSNR. Минимальный уровень измерений OSNR колеблется в диапазоне от 21 до 35 дБ. Первокласный OSA гарантирует ORR по крайней мере 50 дБ в пике 0,4 нм.

Динамический диапазон по мощности отражает пропускную способность оптического детектора в OSA, т. е. способность измерить все различные уровни мощности, требуемые для приложений WDM. Прибор с широким динамическим диапазоном позволяет точно измерить сигналы как высокой, так и низкой мощности, в результате чего получается более ясное изображение спектра.

Диапазон длин волн определяет способность OSA анализировать сигналы в определенном участке спектра. Более высокая разрешающая способность OSA по длине волны позволяет различать сигналы с близкими значениями длины волны. Это, главным образом, определяется оптическими характеристиками фильтров OSA. Более узкие фильтры обуславливают лучшую разрешающую способность OSA. Чтобы достичь хорошей разрешающей способности, модули OSA старшего класса используют метод двойного прохода, а также высококачественные дифракционные решетки.

Высокая разрешающая способность со значениями порядка 0,05 нм гарантирует хороший ORR и увеличивает эффективность OSA при измерении отношения мощностей сигнала к шуму OSNR для систем с близко расположенными каналами.

Большинство современных высокоэффективных OSA представляют собой вставные модули, разработанные как для инсталляторов сетей, так и для исследовательских нужд.

Портативные OSA унаследовали программное обеспечение от лабораторных устройств. Вместе с тем, модуль OSA, предназначенный для тестирования в полевых условиях, обеспечивает более простой пользовательский интерфейс, а также автоматическое тестирование и упрощенные процедуры измерений. Это позволяет оператору с любым уровнем подготовки проводить основные виды измерений.

Разработанная схема эксперимента, использующая мультиплексор «компании ВТІ», представлена на рисунке 2.2.

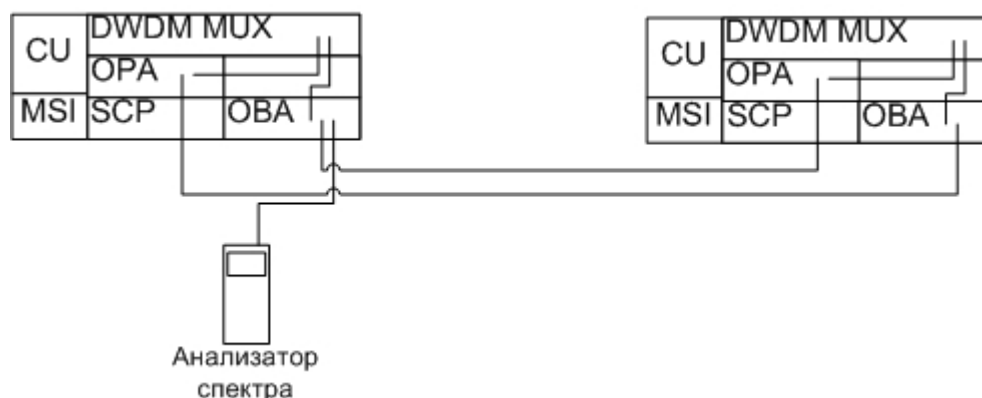


Рисунок 2.2 - Схема тестирования системы DWDM

В результате проведенного тестирования были сняты результаты зависимости мощности сигнала на выходе усилителя от числа каналов. Результаты тестирования представлены в таблице 2.1.

В ходе эксперимента на входы мультиплексора подавались сигналы от SFP+ модулей разной длины волны, подключенных в порты коммутатора. В результате проведенных измерений, с помощью анализатора спектра, были получены экспериментальные зависимости уровня мощности сигнала на выходе усилителя OBA, от числа каналов n и длины волны λ .

Таблица 1. Зависимость уровня мощности сигнала в i -м канале P_i на выходе усилителя OBA от числа каналов n и длины волны λ

Число каналов n	Уровень P_i , дБм при λ , нм							
	1554,13	1554,94	1555,75	1556,56	1557,36	1558,17	1558,98	1559,79
1	7	6,80	6,78	6,88	6,95	6,74	6,98	6,85
2	6,40	6,25	6,35	6,20	6,32	6,42	6,08	6,12
3	4,76	4,8	4,78	4,9	4,79	4,87	4,67	4,73
4	3,88	3,8	3,6	3,76	3,73	3,7	3,49	3,53
5	3,2	3,1	3,15	3,25	3,1	3,14	3,04	3,07
6	2,5	2,35	2,3	2,43	2,33	2,37	2,34	2,38
7	2,07	2,03	1,93	2,03	2	1,94	2,01	1,91

Продолжение Таблицы 1.1

8	1,93	1,73	1,7	1,66	1,62	1,6	1,52	1,56
---	------	------	-----	------	------	-----	------	------

В каждом мультиплексоре присутствуют следующие платы:

CU (cooling unit) – вентилятор;

MSI (managment system interface) – плата управления;

OPA (optical pre-amplifier) – оптический предуселитель;

OBA (optical booster amplifier) – оптический усилитель;

SCP (system control processor) – процессорная плата;

DWDM MUX – DWDM мультиплексор.

На входы мультиплексора с оборудования Juniper подключались каналы на определенной длине волны. С помощью прибора анализатор спектра, снимался уровень сигнала для нужной длины волны.. Измерения были проведены для 1-го, 2-х...8-ми каналов.

По данным таблицы построены графики зависимости уровня сигнала на выходе усилителя в зависимости от числа длин волн, представленные на рисунках 2.4 - 2.10:

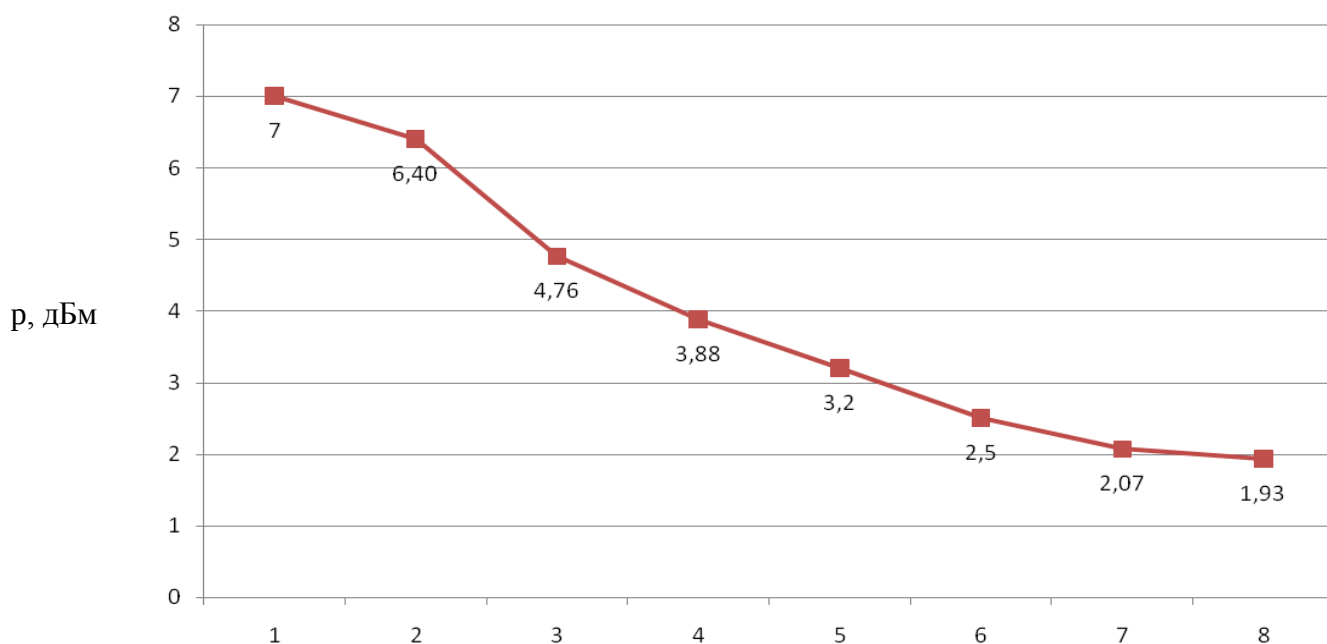


Рисунок 2.2 - Уровень сигнала на выходе усилителя на длине $\lambda=1554.13$ нм в зависимости от числа каналов

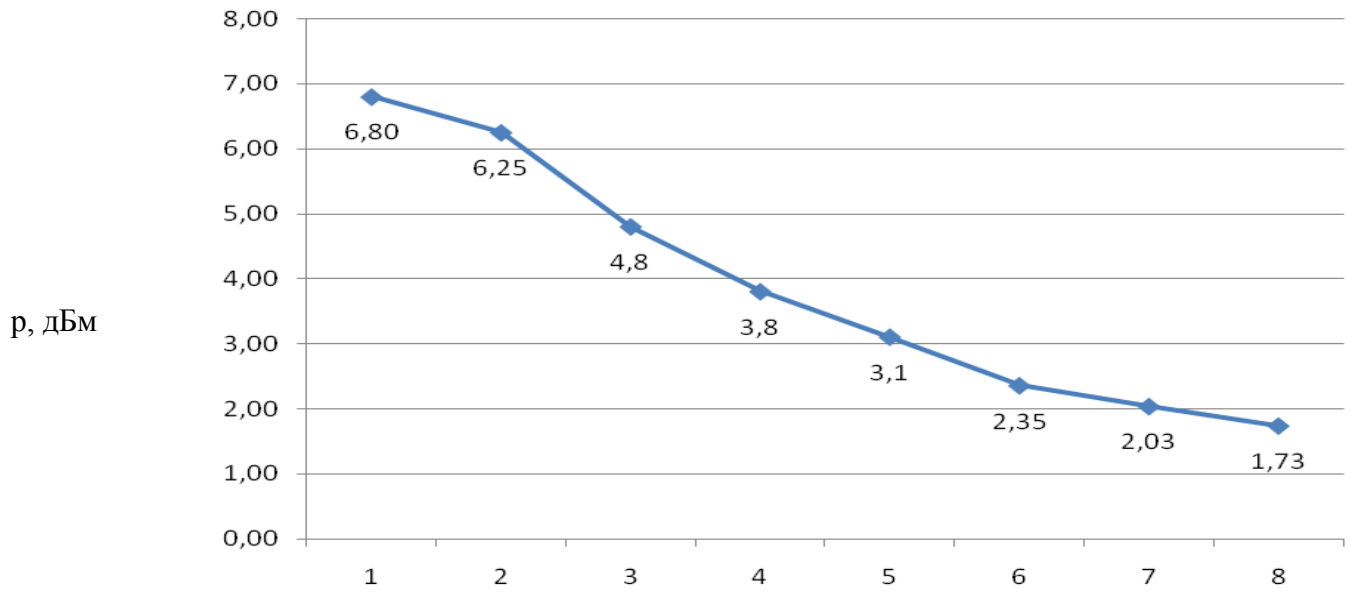


Рисунок 2.4 - Уровень сигнала на выходе усилителя на длине $\lambda=1554.94$ нм в зависимости от числа каналов

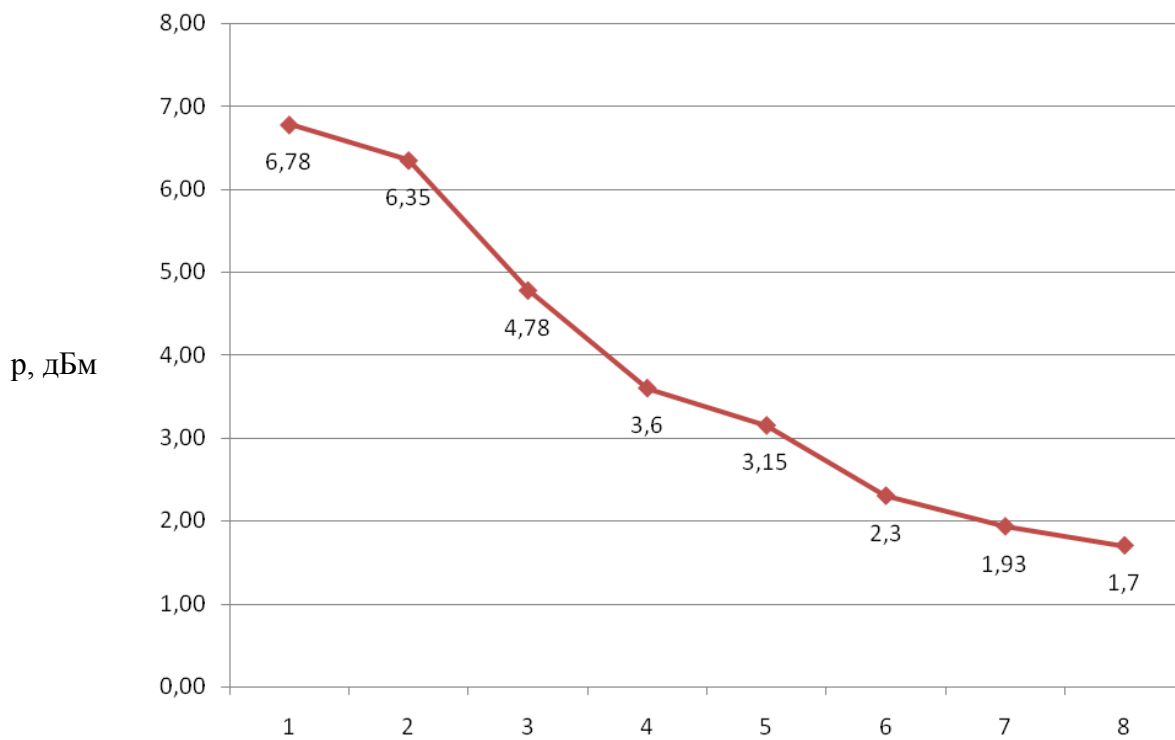


Рисунок 2.5 - Уровень сигнала на выходе усилителя на длине $\lambda=1555.75$ нм в зависимости от числа каналов

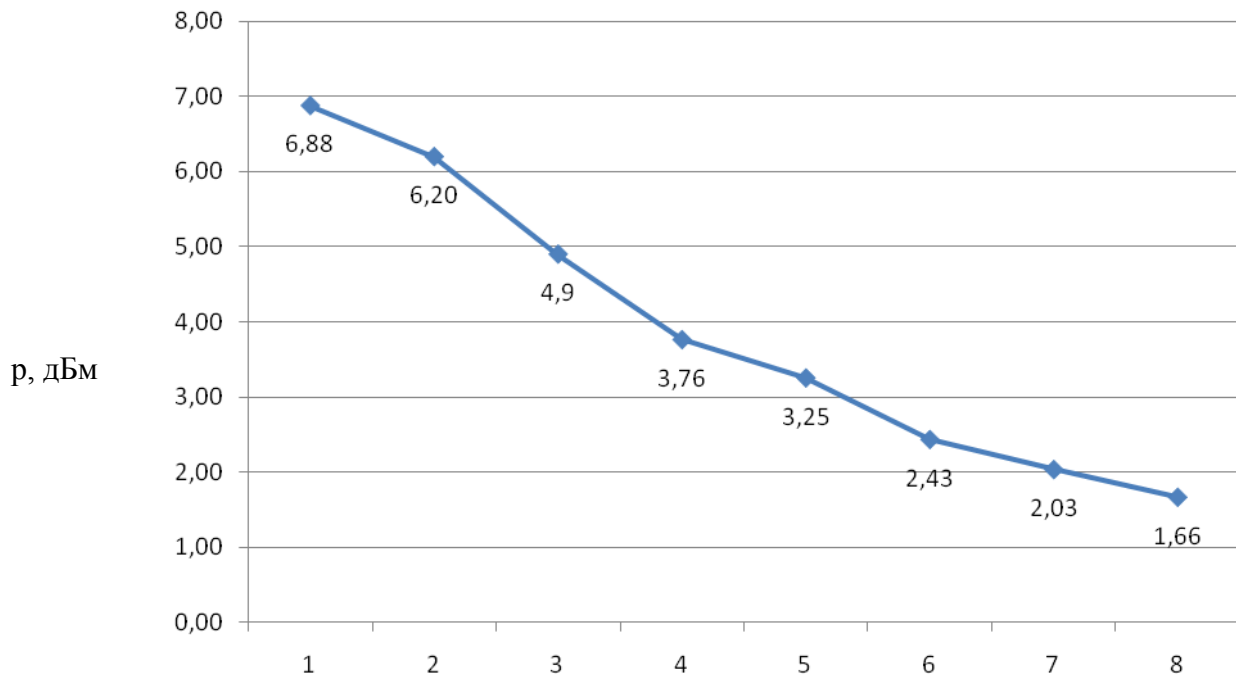


Рисунок 2.6 - Уровень сигнала на выходе усилителя на длине $\lambda=1556.56$ нм в зависимости от числа каналов

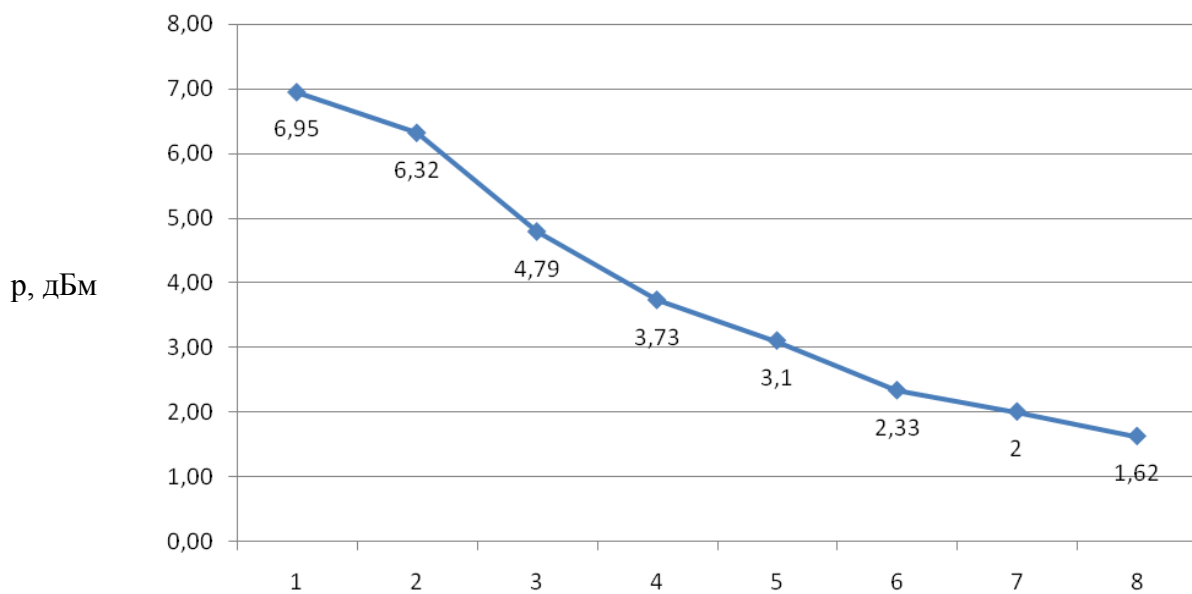


Рисунок 2.7 - Уровень сигнала на выходе усилителя на длине $\lambda=1557.36$ нм в зависимости от числа каналов

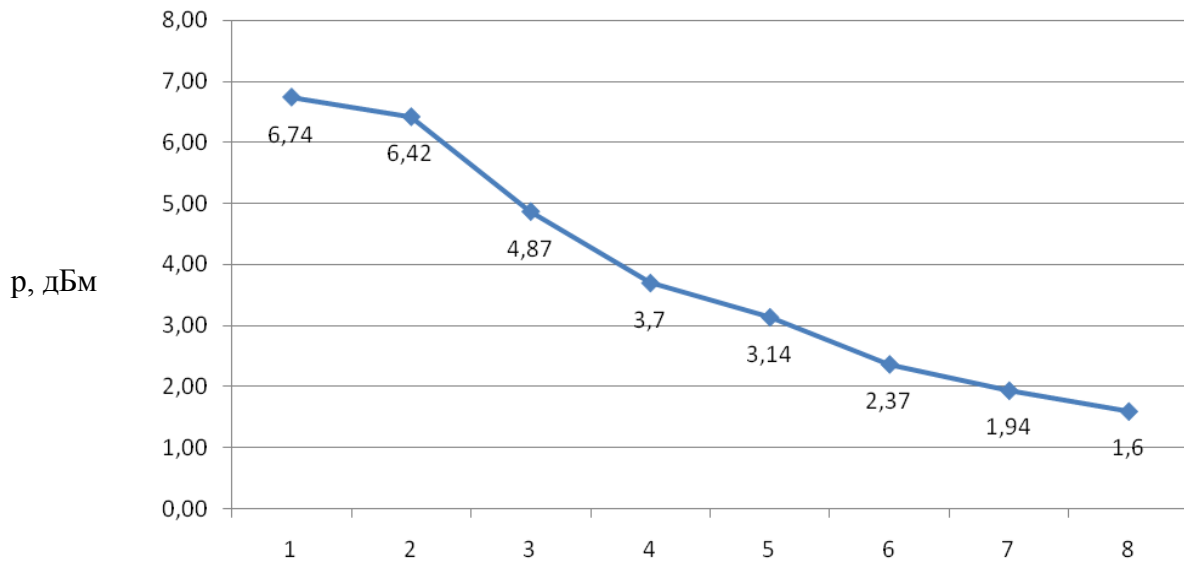


Рисунок 2.8 - Уровень сигнала на выходе усилителя на длине $\lambda=1558.17$ нм в зависимости от числа каналов

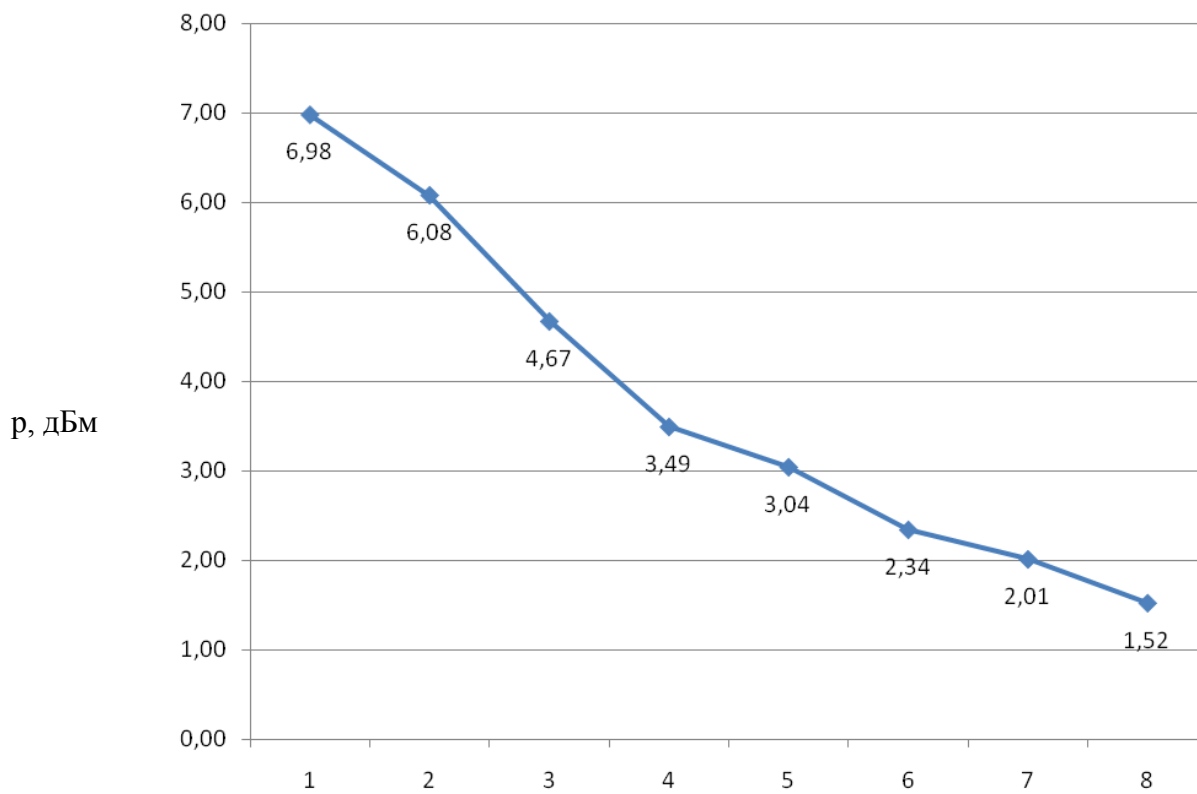


Рисунок 2.9 - Уровень сигнала на выходе усилителя на длине $\lambda=1558.98$ нм в зависимости от числа каналов

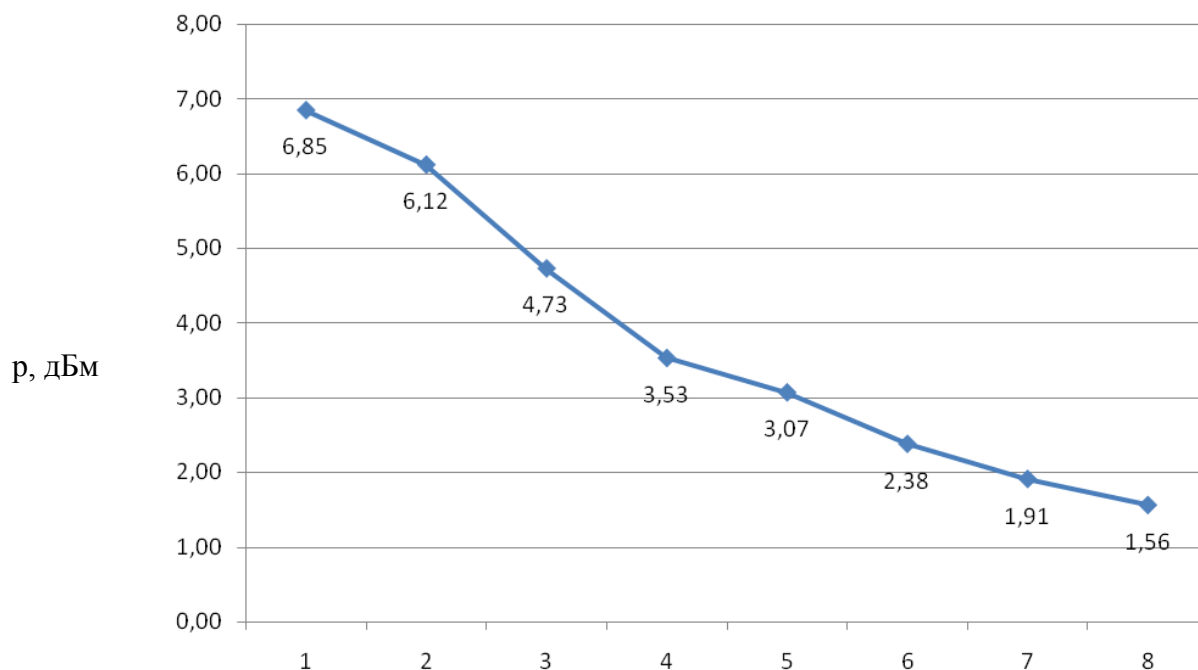


Рисунок 2.10 - Уровень сигнала на выходе усилителя на длине $\lambda=1559.79$ нм в зависимости от числа каналов

Как видно из полученных изменений уровня мощности каждого канала при добавлении очередного канала происходит нелинейно. С ростом числа каналов, уровень сигнала a_{ex} уменьшается по нелинейному закону согласно формуле 2.5.

2.7 Выводы по 2-ой главе

1. Потенциальные возможности уплотнения ОВ по пропускной способности одинаковы для технологий TDM и WDM.
2. Техническая реализация потенциальных возможностей технологий TDM и WDM зависит от наличия соответствующей элементной базы.
3. При одинаковых скоростях передачи сигналов и защищенности длина усилительного участка для технологии WDM меньше, чем для технологии TDM. Уменьшение происходит не пропорционально числу волновых каналов, а согласно логарифмической зависимости 2.14.
4. Деление оптического бюджета между волновыми каналами, которое приводит к уменьшению длины усилительного участка технологии WDM, подтверждено результатами эксперимента.

Глава 3 Исследование потенциальных возможностей оптических модуляторов

3.1 Анализ и сравнительная характеристика различных форматов оптической модуляции

Большую роль для повышения эффективности и оптического бюджета волоконно-оптических систем передачи информации наряду с увеличением энергетического и временного балансов играет повышение спектральной эффективности γ ВОСП. Следует отметить, что создание сверхбыстрых оптических систем связи – это требование времени, которое диктует создание мультимедийных систем для передачи высокоскоростных сообщений, в том числе телевизионных в формате 3D.

Такие широкополосные каналы можно получить двумя путями:

- 1) интенсивный путь развития оптических технологий за счет увеличения скорости передачи информации;
- 2) экстенсивный путь развития за счет технологий волнового уплотнения WDM.

В первом варианте развития главными вопросами являются повышение быстродействия элементной базы, совершенствование форматов оптической модуляции и кодирования, а также компенсация различных видов дисперсии. Быстродействие устройств электроники и оптоэлектроники зависит от размеров элементной базы. Чем она меньше, тем большей скорости передачи информации можно достичь [29, 31, 42]. Однако существуют технологические, физические и эксплуатационные пределы снижения размеров и увеличения скорости передачи.

Второй вариант создания широкополосных каналов предполагает общее увеличение пропускной способности ВОСП за счет технологии волнового уплотнения. В этом случае каждому разряду широкополосного сообщения может быть предоставлена своя частотная полоса. Для реализации этого пути развития ВОСП также необходимо решить следующие вопросы:

- 1) повышение канальной скорости передачи двоичных сигналов за счет увеличения быстродействия оптических модуляторов;
- 2) увеличение количества волновых каналов за счет снижения межканальных интервалов и повышение спектральной эффективности.

Обе эти проблемы связаны с совершенствованием форматов оптической модуляции и кодирования, борьбой с дисперсионными и нелинейными искажениями [8].

Каким путем будут развиваться оптические системы связи, зависит от достижений в области информационных и нанотехнологий.

На сегодняшний день одной из главных задач является совершенствование способов оптической модуляции. Она определяет спектральную эффективность оптической системы связи γ . Параметр γ характеризует эффективность использования частотного диапазона ВОСП. Повысить спектральную эффективность можно, например, увеличением канальной скорости ν . Однако, повышение ν сопровождается ростом искажений в линии связи. Поэтому наиболее актуальна в настоящее время задача поиска таких форматов оптической модуляции, которые обеспечили бы наибольшую эффективность γ при наименьших дисперсионных и нелинейных искажениях.

Способы оптической модуляции для цифровых сигналов могут быть классифицированы по методам модуляции оптической несущей и параметру электромагнитной волны, используемой для кодирования информации, а также формату линейного кодирования.

В таблице 3.1 представлены достоинства и недостатки каждого из форматов модуляции, а также указана возможность применения форматов для различных скоростей.

Таблица 3.1 - Сравнение различных форматов модуляции и область их применения

Название формата	Достоинства	Недостатки	Область применения
ASK	Простота и экономичность технической реализации	Наличие паразитной частотной и амплитудной модуляции.	В основном применяется в магистральных сетях со скоростями до 2.5 Гбит/с, а так же для клиентских подключений со скоростями до 10 Гбит/с.
NRZ	Лучшая дальность передачи и спектральная эффективность в сравнении с ASK	Малая устойчивость к нелинейности волокна	В сетях со скоростями до 10 Гбит/с.
RZ	Более высокая устойчивость к нелинейности волокна в сравнении с NRZ.	Малая спектральная эффективность из-за передачи двух боковых полос	В сетях со скоростями до 10 Гбит/с.
DPSK	Информация содержится в разности фаз между двумя последовательными	Экспериментальные исследования показали, что при скорости передачи	В сетях со скоростями до 40 Гбит/с

	импульсами, при этом мощность излучения информации не несет.	40 Гбит/с DPSK -сигналы удавалось передать на боль- шие расстояния с меньшими потерями, чем сигналы в других форматах. Однако в этом случае необходимы дорогие терминалы.	
--	--	---	--

3.2 Исследование работы модулятора Маха-Цендера

Одним из главных элементов в большинстве структурных схем передатчика светового сигнала модуляции света является оптический модулятор. По принципам действия оптические модуляторы подразделяются на электрооптические, магнитооптические, упругооптические и т.д. Наибольшее распространение в высокоскоростных системах волнового уплотнения получили электрооптические модуляторы Маха-Цендера (MZM) [2, 41]. Он представляет собой два встречно включенных Y-разветвителя, соединенных отрезками отдельно управляемых волноводов, по которым распространяется свет от лазера (рисунок 3.1).

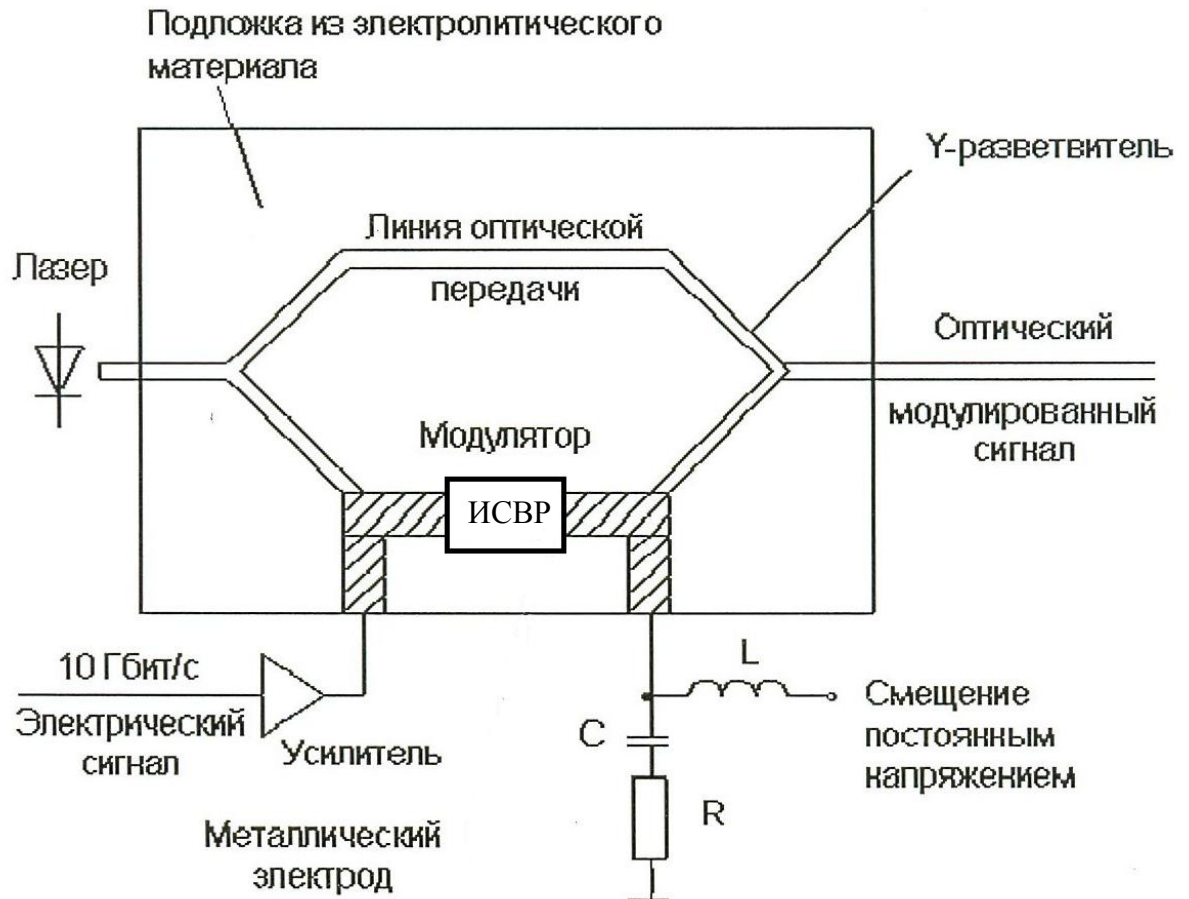


Рисунок 3.1 - Модулятор Маха-Цендера

Модуляция происходит в одном волноводном канале, расположенном на электрооптической подложке. Пропуская электрический сигнал через эту подложку, изменяют показатель преломления n волноводного канала. На другой канал никакого воздействия не оказывается. Оптические сигналы в этих волноводах распространяются с разной скоростью и имеют разные набеги фаз. Интерференция волн вызывает уменьшение мощности оптического сигнала (используется принцип модуляции интенсивности оптического излучения). Коэффициент передачи оптической мощности модулятора:

$$T = (1/2)(1 + b \cos \Delta\Phi) \quad (3.1)$$

зависит от набега фазы:

$$\Delta\Phi = \chi \Delta n L 2\pi / \lambda, \quad (3.2)$$

где b - коэффициент сбалансированности ($b=1$ для симметричных волноводов);

λ - длина волны;

χ - величина оптического фактора моды;

L - длины волноводов;

$$n = \beta(n + \Delta n)^3, \quad (3.3)$$

где Δn - изменения показателя преломления;

β – постоянный коэффициент, который зависит от электрооптических свойств материала, приложенного напряжения, расположения электродов.

Набег фазы $\Delta\Phi = \pi V / V_\pi$ между световыми сигналами в двух параллельных каналах зависит от приложенного напряжения V и величины полуволнового напряжения V_π модуляционной характеристики модулятора $T(V) = f(\Delta n, V)$. Соотношение между Δn и V носит нелинейный характер, что приводит к сложной зависимости коэффициента передачи T от модулирующего напряжения V .

Величина линейного участка модуляционной характеристики (рисунок 3.2) определяется значением полуволнового напряжения V_π и выбором рабочей точки V_p (без учета напряжения смещения величина V_p равна обычно половине V_π). Величина полуволнового напряжения определяет качество работы модулятора, его быстродействие и зависит от точности изготовления волноводных каналов по длине и коэффициентам преломления (их симметричности). Если символически приравнять набег фазы $\Delta\Phi = \pi V / V_\pi$ к периоду косинусоидальной функции $2\pi / T$, то получим, что полуволновое напряжение V_π есть половина периода, т.е. $T/2$. Следовательно, даже незначительные отклонения коэффициента преломления будут приводить к уменьшению или увеличению V_π (сжатию или растяжению косинусоиды). Отсюда, положение рабочей точки на модуляционной характеристике, зависящее от тока смещения, будет изменяться. Главное, диапазон значений модуляционного напряжения будет не соответствовать линейному участку. Это приведет к искажениям, которые можно оценить с помощью интеграла перекрытия $K = f(V_\pi, \Delta n)$, где Δn - изменения коэффициента преломления в процессе изготовления модулятора.



Рисунок 3.2 - Модуляционная характеристика МЦМ

Интеграл перекрытия:

$$K = \int_0^{V_{\pi p}} T_{\phi} \cdot T^1 dV \quad (3.4),$$

где T_{ϕ} - коэффициент передачи для фиксированных значений коэффициента преломления и длины волны соответственно n, λ и полуволнового напряжения $V_{\pi p}$, а также неизменной рабочей точки $V_p = V_{\pi p} / 2$;

T^1 - то же, но для других коэффициента преломления $(n + n^1)$ и полуволнового напряжения V_{π} .

Таким образом, можно сделать вывод, что качество изготовления оптоэлектронных устройств, определяемое возможностями промышленных технологий, оказывает влияние на скорость работы оптического модулятора и эффективность ВОСП [31,45].

3.3 Исследование модуляционной характеристики МЦМ

Оценку влияния качества изготовления волноводных каналов на модуляционную характеристику через показатель преломления можно осуществить с помощью специально введенного параметра Δn , характеризующего

флуктуации n . Для оценки качества технологий изготовления нужно исследовать зависимости $n = f(\Delta n)$ и $\Delta\Phi = f(\Delta n)$.

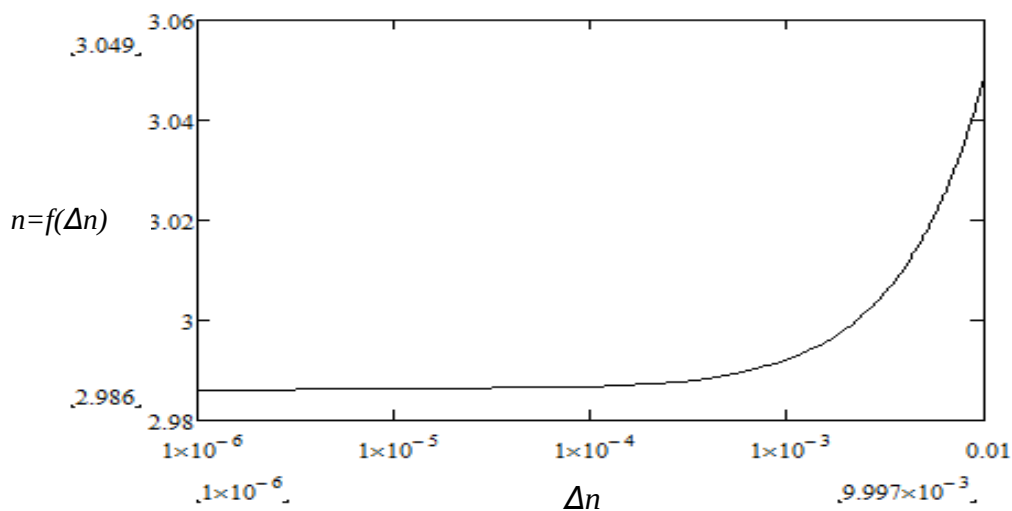


Рисунок 3.3 - Зависимость показателей преломления каналов от Δn

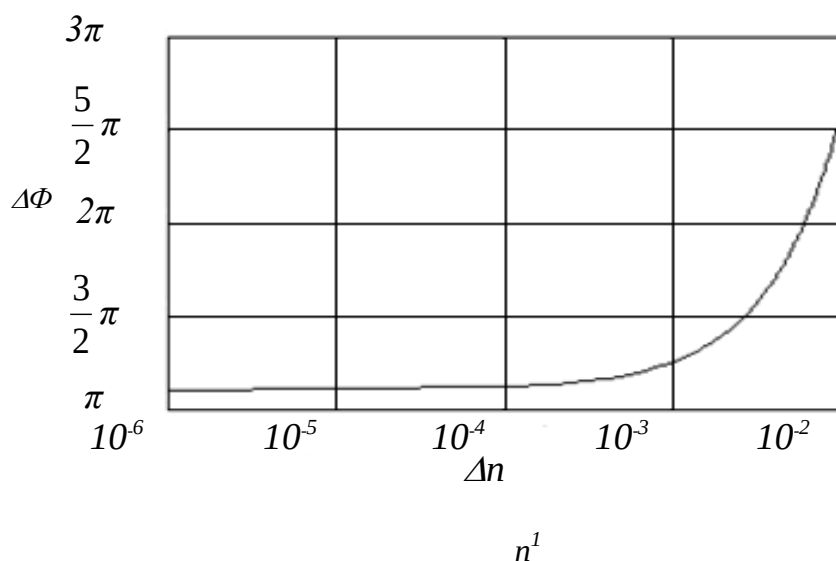


Рисунок 3.4 - Зависимость набега фазы от Δn

Представленные на рисунках 3.3 и 3.4 зависимости изменения показателей преломления n , набега фазы $\Delta\Phi$ свидетельствуют о наличии заметного влияния от Δn . Графики построены для значений $\lambda = 1310 \cdot 10^{-6}$ нм, $n = 1,44$, $V_n = 5B$, $V = 2,5B$. Значительные искажения в модуляционной характеристике наступают при $\Delta n \geq 10^{-3}$.

Величины возможных искажений из-за изменений коэффициента преломления видны из графика $K = f(V, \Delta n)$ на рисунке 3.5.

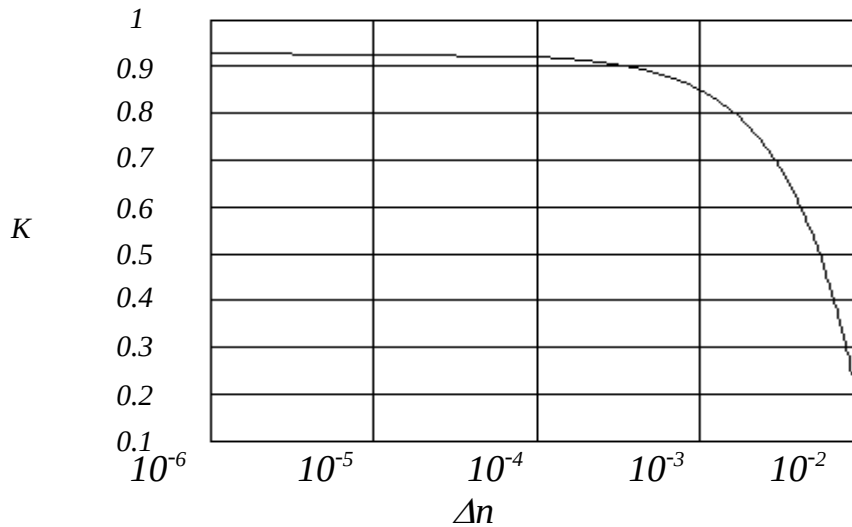


Рисунок 3.5 - Зависимость нормированного интеграла перекрытия от Δn

Наиболее ощутимые потери оптической мощности наступают при $\Delta n = 0,001$.

Таким образом, расчеты интеграла перекрытия K по формуле (3.4) дают возможность более полно оценить потери за счет изменений показателя преломления, а также сформулировать требования к качеству изготовления элементной базы модулятора с точки зрения чистоты материала. Исследования влияния Δn на модуляционную характеристику и быстродействие модулятора имеют большое значение для повышения спектральной эффективности ВОСП [31, 45, 59, 60].

3.4 Исследование потенциальных возможностей МЦМ

Потенциальные возможности модулятора МЦМ ограничиваются тремя факторами:

- 1) физические ограничения, которые определяются длиной волны несущего сигнала и реализуются при условии использования безинерционного материала;
- 2) технологическими ограничениями, которые связаны с точностью изготовления оптических волноводов по геометрическим размерам

(флуктуациями ширины сердцевины и длины ОВ) и качества материала (флуктуациями коэффициентов преломления ОВ);

3) инерционностью материала, которая характеризуется скоростью поляризации (изменения коэффициента преломления под действием приложенного напряжения).

Если первый фактор описывает потенциальные возможности модулятора МЦМ, которые практически недостижимы, то влияние второго (технологии производства) и третьего (совершенствование материала ОВ) факторов могут быть значительно уменьшены. Поэтому исследования в области создания новых материалов и технологий производства является самым актуальным направлением повышения эффективности ВОСП (скорости передачи сигналов и пропускной способности). Материалом для реализации эффекта поляризации (эффект Поккельса) под действием электрического поля являются сегнетоэлектрики [4]. Отличительной особенностью сегнетоэлектриков является гистерезис зависимости поляризованности от напряженности внешнего поля. Количественно поляризацию вещества описывают вектором поляризации, равным отношению суммы электрических моментов элементарных диполей, заключенных в малом объеме диэлектрика, к величине этого объема. Молекулы сегнетоэлектрика, обладая электрическим дипольным моментом, стремятся ориентироваться параллельно друг другу, взаимодействуя между собой. В результате образуются целые области (домены), в пределах которых электрические моменты диполей параллельны. В исходном состоянии они ориентированы хаотически и общая поляризованность кристалла равна нулю. Под действием электрического поля происходит поворот доменов вдоль поля, после чего зависимость поляризованности образца приходит в насыщение. Для того, чтобы привести все в исходное состояние необходимо приложить поле противоположного направления. Величина напряженности этого поля носит название коэрцитивной силы (чем она выше, тем труднее деполяризовать диэлектрик). Нелинейность зависимости поляризованности от напряженности электрического поля определяет его инерционность. Эта величина ограничивает

быстродействие оптического модулятора. Поэтому для увеличения скорости МЦМ необходим поиск новых материалов.

Таковыми новыми материалами следует считать низкоразмерные структуры, созданные на базе сверхрешеток. Так, оптические модуляторы на сверхрешетках из арсенида галлия позволяют увеличить скорость модуляции до 100 ГГц [42, 46, 62, 83]. Еще более перспективными являются сверхрешетки из собственных изотопов исходного химического элемента. В основе технологии для изготовления такого материала лежат принципы молекулярно-лучевой эпитаксии и метода нейтронного трансмутационного легирования [90].

Для сравнения влияния различных нанотехнологий на параметры модулятора МЦМ необходимо исследовать величину оптических потерь за счет несимметричности оптоэлектронных характеристик оптических волноводов.

3.5 Сравнение технологий изготовления на примере оптического фильтра Маха-Цендера

На основе интерферометра Маха-Цендера можно создать каскадный оптический фильтр, обладающий высокой избирательностью.

На рисунке 3.1 изображена схема оптического интерферометра М-Ц, которая построена путем соединения двух выходных портов 3дБ разветвителя. Первый разветвитель расщепляет оптический сигнал на два равных потока, где каждый поток приобретает различные фазы. Это осуществляется с помощью двух волноводов разной оптической длины, что отмечено на рисунке в виде линии задержки. Эта задержка может быть реализована или путем добавления длины волновода, или изменением коэффициента преломления. Временная задержка зависит от длины волны света. Так, если задержка (фазовый сдвиг) будет равен половине длины волны, то в результате интерференции на выходе второго разветвителя будет отсутствовать оптический сигнал. При этом коэффициент пропускания фильтра можно оценить по формуле:

$$T(\nu) = \cos^2(\pi\nu\tau_m), \quad (3.5)$$

где ν - частота света, τ_m - временная задержка.

Оптический фильтр может быть получен с помощью каскада интерферометров М-Ц, каждый из которых «блокирует» определенную длину волны света. Так, для межканального шага $\Delta\nu$ нужно обеспечить следующую величину задержки $\tau_m = (2^m \Delta\nu)^{-1}$ (m - число каскадов). Десятикаскадный оптический фильтр способен выделять близко стоящие волновые каналы [64, 73].

Временную задержку в волноводах оптического фильтра можно получить двумя способами. В первом случае добиваться противофазности оптических волн на выходе разветвителя с помощью изменения длины волноводов.

Так, длину одного волновода, к примеру, можно определить из уравнения:

$$k\lambda = nl \quad (3.6),$$

где k - число длин волн;

λ - центральная длина настройки фильтра;

n - коэффициент преломления;

l - длина волновода.

Оптическая длина второго волновода определяется из следующего выражения:

$$(k\lambda + \lambda / 2) = (l + \Delta l)n, \quad (3.7),$$

где Δl - удлинение волновода для получения противофазности волн.

Любая технология может обеспечить определенную точность изготовления геометрических размеров, т.е. l . Следовательно, флуктуации длины Δl будут вызывать соответствующие флуктуации центральной длины настройки оптического фильтра $\Delta\lambda$. Если считать, что имеют место симметричные флуктуации длин волноводов (изготовление волноводов осуществляется одновременно, и, следовательно, действуют одни и те же мешающие факторы), то случайные изменения $\Delta\lambda$, можно оценить с учетом формулы (3.8) следующим образом:

$$k(\lambda + \Delta\lambda) = (l + \Delta l)n. \quad (3.8)$$

Отсюда, величина флуктуаций длины волны настройки фильтра после несложных преобразований равна:

$$\lambda = n\Delta l \quad (3.9).$$

Значение $\lambda = n\Delta l$ определяется точностью изготовления (качественными характеристиками технологий). Самые современные нанотехнологии обеспечивают величину Δl порядка нескольких нанометров.

Во втором случае оптическую длину можно изменить с помощью коэффициента преломления, который можно увеличить или уменьшить с помощью легирования материала волновода (химическим путем или с помощью трансмутационного легирования) [18, 19, 90].

Отсюда, можно записать аналогичные равенства:

$$k\lambda = nl, (k\lambda + \lambda/2) = l(n + \Delta n), (\lambda + \Delta\lambda) = l(n + \Delta n), \quad (3.10)$$

где Δn - требуемое изменение коэффициента преломления для получения противофазности волн.

Отсюда, величина случайных отклонений центральной длины волны равна:

$$\Delta\lambda = \Delta nl. \quad (3.11)$$

Для сравнения различных технологий необходимо построить графики зависимости $\Delta\lambda = f(\Delta l, n); \Delta\lambda = f(l, \Delta n)$. В первом случае по оси абсцисс следует откладывать коэффициент преломления различных материалов, например, кремния (3,45), диоксида кремния (1,44), ниобата лития (2,29) и т.д. и строить зависимости для разных фиксированных значений Δl (10 нм; 1 нм; 0,5 нм), характеризующих качество изготовления.

Как видно из простых вычислений по формуле (3.9), для диоксида кремния, например, при $\Delta l = 1 \text{ нм}$ (такой точности еще не существует) флуктуации $\Delta\lambda$ равны численно коэффициенту преломления (1,44). Для сравнения нужно отметить, что полоса излучения современного лазера для волоконно-оптической связи имеет величину на порядок меньшую. Это свидетельствует об актуальности задачи совершенствования технологии производства элементной базы оптоэлектроники.

Зависимость случайных отклонений центральной длины волны от Δl представлены на рисунке 3.9 для разных коэффициентов преломления $n_1 = 1,41$ $n_2 = 1,44$:

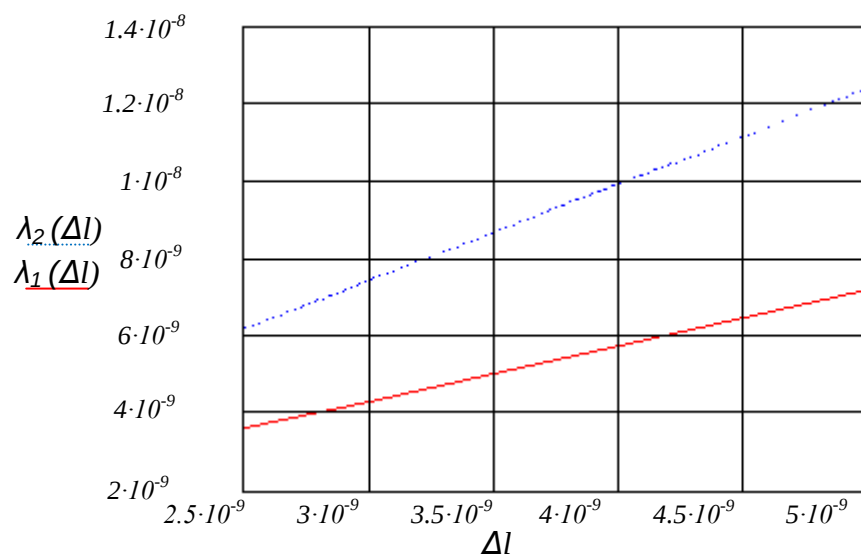


Рисунок 3.8 - Величина случайных отклонений центральной длины волны в зависимости от Δl

Как видно из рис.3.8, чем больше значение коэффициента преломления, тем сильнее влияние флуктуаций Δl на смещение центральной длины волны $\Delta \lambda$.

На рисунке 3.10 представлена линейная зависимость влияния коэффициента преломления на центральную длину волны. Так изменения коэффициента преломления n на величину 10^{-3} , влекут за собой и отклонения центральной длины волны $\Delta \lambda = 0,02$ нм.

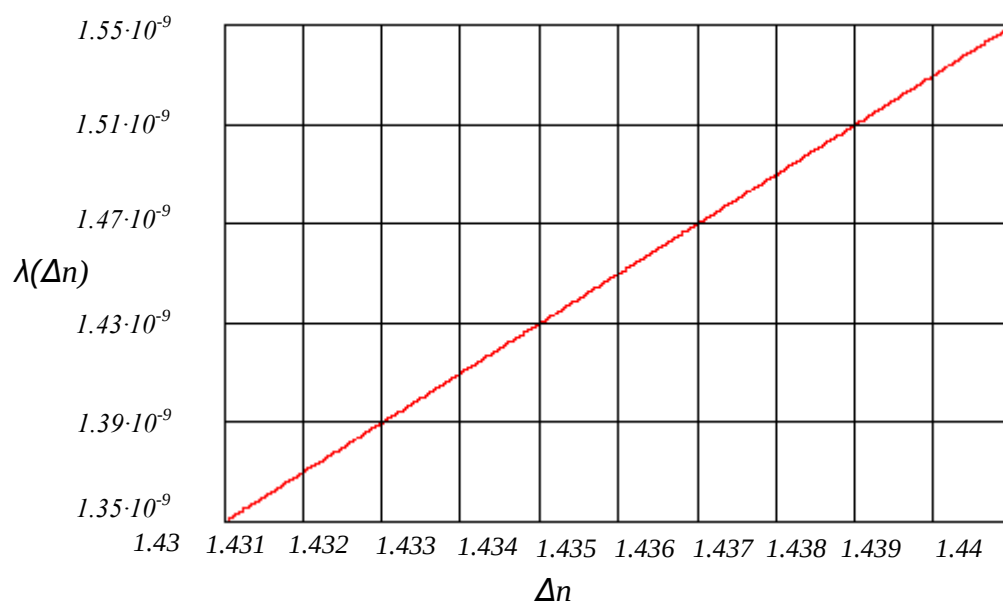


Рисунок 3.10 - Величина случайных отклонений центральной длины волны в зависимости от Δn

Современные технологии изготовления оптических фильтров могут обеспечить качество производства с величиной Δn не более 10^{-5} . Например, такого качество можно добиться с помощью ядерных технологий (нейтронного облучения), которые имеют достаточно высокую разрешающую способность для получения однородного (моноэнергетического) потока нейтронов, гарантирующего требуемую величину Δn .

Отсюда, более сильная зависимость $\Delta \lambda$ имеет место при изменении Δl (рисунок 3.9), что свидетельствует о важности обеспечения высокой точности изготовления геометрических размеров волновода.

3.6 Выводы по 3-ей главе

1. Потенциальные возможности оптического модулятора МЦМ определяются следующими факторами:

- а) физическими процессами распространения света по ОВ;
- б) качественными характеристиками технологий производства;
- в) инерционностью материала (сегнетоэлектрика).

2. Исследование модуляционной характеристики в зависимости от флуктуаций коэффициента преломления оптических волноводов, показал что критическим значением является $n = 10^{-4}$.

3. Наибольшее влияние на параметры модулятора МЦМ (оптическую длину волноводов и модуляционную характеристику) оказывает точность изготовления длины волноводов, по сравнению с изменениями коэффициента преломления.

Глава 4 Математическое моделирование характеристик оптического модулятора Маха-Цендера

4.1 Моделирование волновых процессов в планарном волноводе

Для исследования влияния на характеристики Маха-Цендера качества изготовления оптических модуляторов необходимо рассчитать оптические моды в волноводах.

Это можно осуществить с помощью математического моделирования волнового процесса распространения света в оптических волноводах.

В качестве математической модели волновых процессов распространения электромагнитных волн в оптической среде следует взять дифференциальное уравнение второго порядка с частными производными.

Анализ математических моделей сводится к решению дифференциальных уравнений и получению необходимых количественных характеристик физических процессов, протекающих во времени и пространстве.

Особую актуальность математическое моделирование приобретает при исследовании распространения светового сигнала в оптическом волноводе (ОВ) сложной конструкции. В этом случае аналитического решения дифференциального уравнения может не быть. Единственным способом определения требуемых параметров ОВ является численный метод решения, например, в виде уравнений конечных разностей с помощью компьютерного моделирования.

В качестве примера на рисунке 4.1 а, б, в представлены результаты моделирования волнового процесса в планарном оптическом волноводе, описываемого следующим дифференциальным уравнением [11]:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + h^2 y, \quad (4.1)$$

где $y = \Phi(t, x)$ – решение дифференциального уравнения;

$h^2 = n_c^2 k^2 - \beta_n^2$ – параметр оболочки;

n_c – коэффициент преломления сердцевины;

c – скорость распространения электромагнитной волны;

x – направление распространения волны; t - время;

β_n – коэффициент распространения моды (типа электромагнитной волны);

$n = 0,1,2$;

Для решения дифференциального уравнения необходимо задать начальные условия (описать состояние системы при $t=0$), граничные условия (определить состояние объекта на границе сердцевины и оболочки), ввести в программу параметры волновода (коэффициенты преломления сердцевины и оболочки n_o , радиус сердцевины ρ и волновое число $k = 2\pi / \lambda$).

С помощью программы Mathcad можно во времени проследить изменения напряженности электрического поля стоячей волны $E(x)$ [24, 30, 39]. Характер изменений мод напоминают колебания натянутой струны (рисунок 4.1).

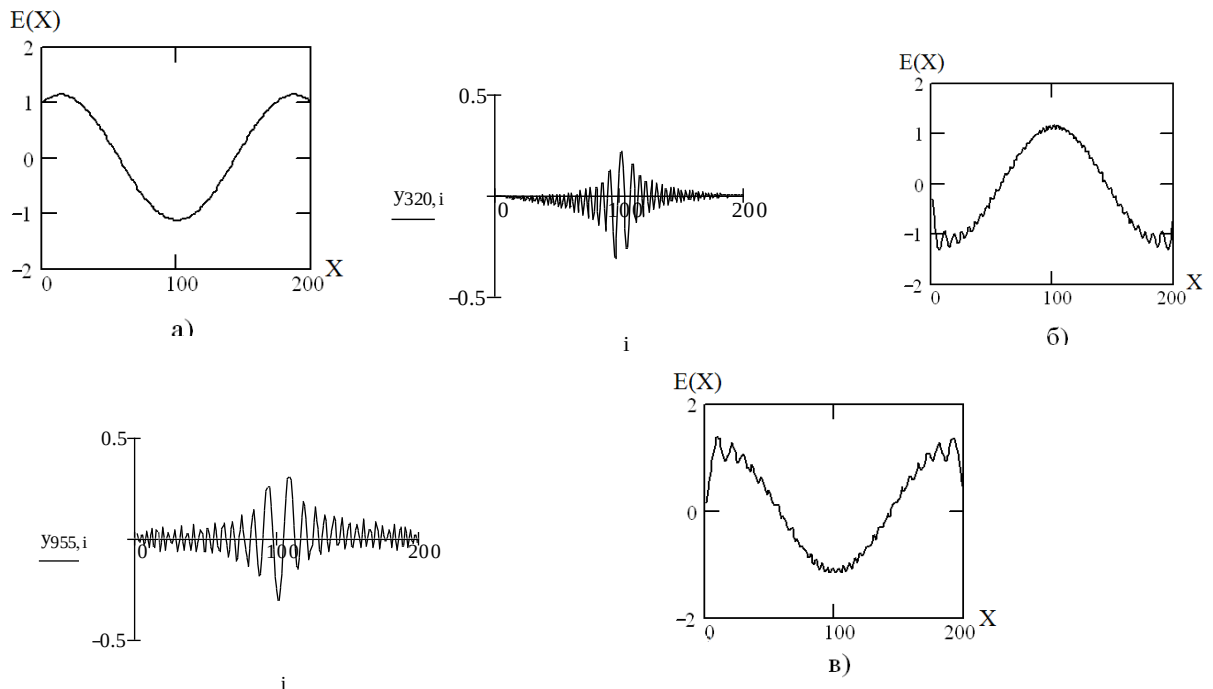


Рисунок 4.1 - Графики напряженности электрического поля $E(x)$ для разных значений времени

Так, на рисунке 4.1 представлены результаты моделирования стоячей волны в динамике. Из рисунков видно, как амплитуда напряженности электрического поля стоячей волны в течение своего периода изменяется от максимально

положительного значения до максимально отрицательного: максимального положительного значения сначала спадает до нуля, потом переходит в отрицательную полуволну, затем поднимается до нуля и опять возрастет до максимума.

Важным моментом в компьютерном моделировании является выбор значений шагов $\Delta T; \Delta X$. Они должны быть достаточно малыми, чтобы добиться устойчивости $(\Delta T / \Delta X)^2 \leq 1$ и заданной точности решения.

Алгоритм на рисунке 4.2 может быть полезен также для моделирования волновых функций заряженных частиц в различных потенциальных ямах низкоразмерных структур.

Сравнение результатов компьютерного моделирования процессов в планарном многослойном волноводе и сверхрешеток с помощью MathCad и C++, позволило сделать вывод о достаточно хорошем качестве программного обеспечения в системе Mathcad [24, 30, 39].

$$M := 200 \quad M1 := M + 1$$

$$N := 5000$$

$$i := 0..M1$$

$$y_{0,i} := \begin{cases} f\left[\frac{(i-100) \cdot p}{100}\right] & \text{if } 100 < i \leq M1 \\ f\left[\frac{-(100-i) \cdot p}{100}\right] & \text{if } 0 \leq i \leq 100 \end{cases}, \quad y_{1,i} := \begin{cases} f\left[\frac{(i-100) \cdot p}{100}\right] & \text{if } 99 < i \leq M1 \\ f\left[\frac{-(100-i) \cdot p}{100}\right] & \text{if } 0 \leq i \leq 99 \end{cases}$$

$$c := 3 \cdot 10^8, \quad R := 0.1, \quad \rho := 0.5 \cdot 10^{-5}, \quad \rho := 0.5 \cdot 10^{-5}, \quad dX := \frac{\pi \cdot dx}{2 \cdot \rho}$$

$$F := \frac{h^2 \cdot R \cdot dX^2}{c^2}, \quad dx := \frac{2 \cdot \rho}{M}, \quad j := 1..N, \quad i := 1..M$$

$$y_{0,0} := 1$$

$$y_{0,M} := 1$$

$$y_{j+1,i} := (2 - 2 \cdot R - F) \cdot y_{j,i} - y_{j-1,i} + R \cdot (y_{j,i+1} + y_{j,i-1})$$

Рисунок 4.2 - Программа расчета напряженности электрического поля $E(x)$ в волокне

Определение степени влияния различных параметров ОВ на его энергетические характеристики возможно при решении волнового уравнения, описывающего распространение света в ОВ.

Функциональная зависимость постоянной распространения β от толщины сердцевины ρ , показателей преломления n_1 , n_2 , длины волны света λ , находится из условия непрерывности функции напряженности электромагнитного поля $E(x)$ в поперечном сечении волокна [40, 43, 59].

4.2 Решение волнового уравнения

Для определения оптической моды стоячей волны в планарном волноводе (рисунок 4.3) необходимо решить следующее дифференциальное уравнение относительно $E(x)$:

$$\frac{d^2 E(x)}{dx^2} + n^2 k^2 E(x) = 0, \quad (4.2)$$

В менее плотном слое волокна (оболочка) с n_1 функция $E(x)$ имеет экспоненциальную форму:

$$E(x) = A e^{-qx},$$

$$\text{где } q^2 = \beta^2 - k_0^2 n_1^2.$$

В более плотном слое (сердцевине), с показателем преломления n_2 функция $E(x)$ имеет синусоидальную форму

$$E(x) = B \sinh x + C \cosh x, \text{ где } h^2 = k_0^2 n_2^2 - \beta^2$$

Определим зависимость β от параметров n , λ , ρ из условия непрерывности функции $E(x)$ и ее производной на границе слоев волокна (условие "прошивки").

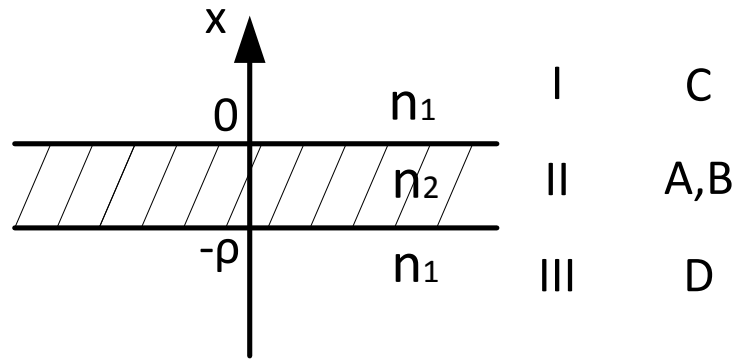


Рисунок 4.3 - Схема расположения слоев ОБ с параметрами «прошивки»

Рассмотрим 1-й стык слоев.

Для 1-го слоя $E_I(x) = Ae^{-qx}$,

$$E'_I(x) = -qAe^{-qx}.$$

Для 2-го слоя $E_{II}(x) = B \sinh x + C \cosh x$,

$$E'_{II}(x) = h(B \cosh x - C \sinh x).$$

В точке $X=0$: $E_I(0) = A$

$$E'_I(0) = -qA$$

$$E_{II}(0) = C$$

$$E'_{II}(0) = hB$$

Учитывая непрерывность функции $E(x)$ и ее производной в точке $X=0$ получим два уравнения:

$$A = C;$$

$$-qA = hB.$$

Рассмотрим 2-й стык слоев.

Для 2-го слоя $E_{II}(x) = B \sinh x + C \cosh x$,

$$E'_{II}(x) = h(B \cosh x - C \sinh x).$$

Для 3-го слоя $E_{III}(x) = Ae^{p(x+\rho)}$,

$$E'_{III}(x) = Dqe^{p(x+\rho)}.$$

Если геометрические размеры волокна симметричны относительно его центра, а также равны коэффициенты преломления $n_1=n_3$, тогда $p=q$.

В точке ($x = -\rho$):

$$E_{II}(-\rho) = -B \sinh \rho + C \cosh \rho,$$

$$E'_{II}(-\rho) = h(B \cosh \rho + C \sinh \rho),$$

$$E_{III}(-\rho) = D,$$

$$E'_{III}(x) = Dq.$$

Учитывая непрерывность функции $E(x)$ и ее производной в точке $X=-\rho$ получим два уравнения:

$$D = -B \sinh \rho + C \cosh \rho,$$

$$Dq = h(B \cosh \rho + C \sinh \rho).$$

Составим систему из 4-х уравнений (для каждого стыка слоев уравнение непрерывности функции $E(x)$ и ее производной).

$$A = C;$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -qA = hB \\ D = -B \sinh \rho + C \cosh \rho, \\ Dq = h(B \cosh \rho + C \sinh \rho) \end{array} \right.$$

Решая данную систему уравнений относительно параметров h, q, ρ , получаем дисперсионное уравнение:

$$\tanh \rho = \frac{2qh}{h^2 - q^2}, \quad (4.3)$$

где коэффициенты h и q являются функциями от β .

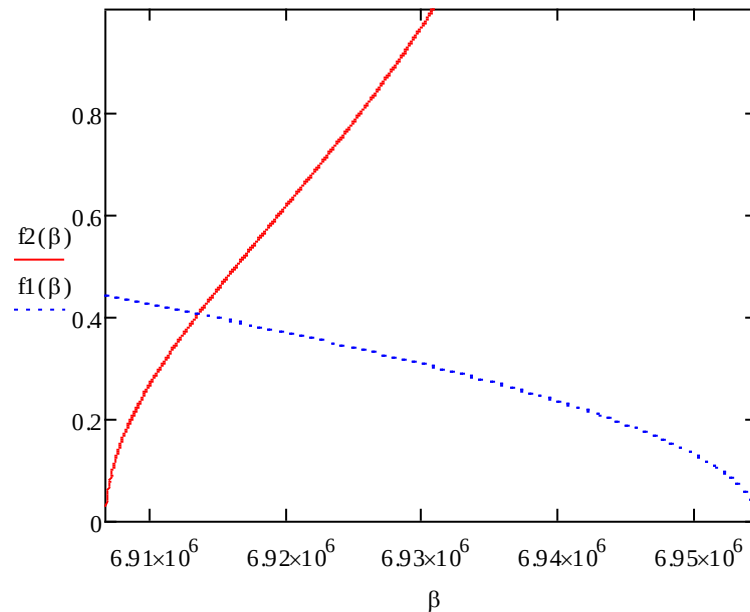


Рисунок 4.4 - Графическая иллюстрация к определению β_1

Решение дисперсионного уравнения находится с помощью математического моделирования в программе Matncad.

Принимая в качестве начальных условий произвольное значение одного из коэффициентов A,B,C,D, определяем форму функции E(x) во всех трех слоях волокна.

4.3 Методика расчета оптических мод планарного волновода и интеграла перекрытия

Решение дисперсионного уравнения позволило построить оптические моды планарного волновода. На рисунке 4.5 представлена программа расчета оптических мод в системе MathCad, ширина которых определяется размерами ρ сердцевин волноводов. В случае несимметричности волноводов за счет флуктуаций сердцевин $\Delta\rho$ не будет полной компенсации света в МЦМ для случая передачи "0". Это повлечет за собой появление оптического шума и ошибки на приемной стороне.

Для оценки влияния $\Delta\rho$ на вероятность ошибки Рош необходимо рассчитать интеграл перекрытия (3.2) и (5.2). Интеграл перекрытия имеет большое значение для расчета оптических потерь в устройствах, реализованных с помощью ОВ. С

помощью программы Mathcad можно осуществить расчет по формуле (5.2) и с использованием выражений для стоячих волн. На рисунке 4.5 представлена программа расчета интеграла перекрытия с помощью математического моделирования [24, 30, 39, 40].

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 &:= 1.31 \cdot 10^{-6} \\
 n_1 &:= 1.44 \quad n_3 := n_1 \quad n_2 := 1.45 \quad k_0 := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_1} \\
 r(t) &:= \left| \begin{array}{l} \beta \leftarrow k_0 \cdot n_3 + 0.00001 \\ a_1 \leftarrow 0 \\ a_2 \leftarrow 0 \\ N \leftarrow 1 \\ w \leftarrow 0 \\ \text{while } \beta < k_0 \cdot n_2 \\ \quad \text{if } \left| \frac{\tan\left(\sqrt{k_0^2 \cdot n_2^2 - \beta^2} t\right) - \frac{\sqrt{\beta^2 - k_0^2 \cdot n_3^2}}{\sqrt{k_0^2 \cdot n_2^2 - \beta^2}}}{\sqrt{k_0^2 \cdot n_2^2 - \beta^2}} \right| < 0.1 \cdot \left| \tan\left(\sqrt{k_0^2 \cdot n_2^2 - \beta^2} t\right) \right| \text{ if } (\beta > w + 1000) \\ \quad \quad \text{if } \tan\left(\sqrt{k_0^2 \cdot n_2^2 - \beta^2} t\right) > 0 \\ \quad \quad \quad a_N \leftarrow \beta \\ \quad \quad \quad N \leftarrow N + 1 \\ \quad \quad \quad w \leftarrow \beta \\ \quad \quad o \leftarrow 4 \\ \quad \beta \leftarrow \beta + 10 \\ \text{a} \end{array} \right. \\
 S(\rho) &:= 2 \cdot \int_0^{\rho_1} \cos\left[\sqrt{k_0^2 \cdot n_2^2 - (r(\rho_1)_1)^2} \cdot x\right] \cdot \cos\left[\sqrt{k_0^2 \cdot n_2^2 - (r(\rho)_1)^2} \cdot x\right] dx + \int_{\rho_1}^{\rho} \cos\left[\sqrt{k_0^2 \cdot n_2^2 - (r(\rho_1)_1)^2} \cdot \rho_1\right] \cdot e^{-\sqrt{(r(\rho_1)_1)^2 - k_0^2 \cdot n_3^2} \cdot (x - \rho_1)} \cdot \cos\left[\sqrt{k_0^2 \cdot n_2^2 - (r(\rho)_1)^2} \cdot x\right] dx + \\
 &\quad + \int_{\rho}^{1 \cdot 10^{-5}} \cos\left[\sqrt{k_0^2 \cdot n_2^2 - (r(\rho_1)_1)^2} \cdot \rho_1\right] \cdot e^{-\sqrt{(r(\rho_1)_1)^2 - k_0^2 \cdot n_3^2} \cdot (x - \rho_1)} \cdot \cos\left[\sqrt{k_0^2 \cdot n_2^2 - (r(\rho)_1)^2} \cdot \rho\right] \cdot e^{-\sqrt{(r(\rho)_1)^2 - k_0^2 \cdot n_3^2} \cdot (x - \rho)} dx
 \end{aligned}$$

Рисунок 4.5 - Программа расчета интеграла перекрытия К с помощью математического моделирования оптических мод

На рисунке 4.6 представлен график $K = f(\Delta\rho)$.

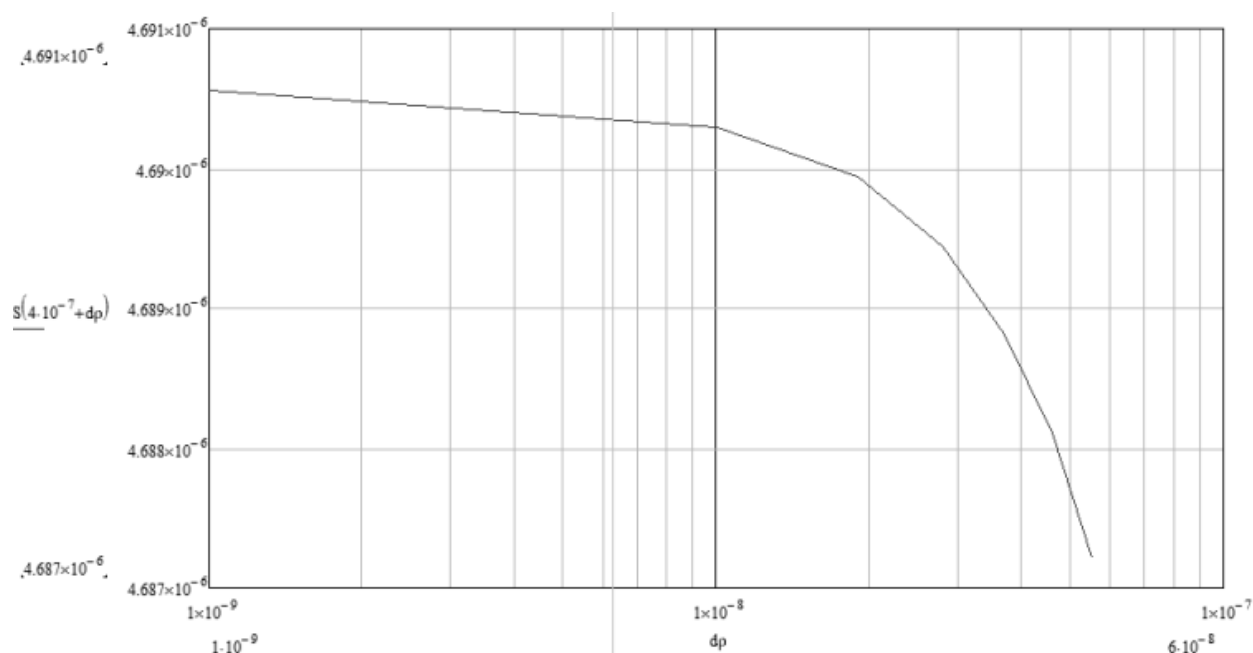


Рисунок 4.6 - График зависимости коэффициента пропускания от флуктуаций геометрических размеров $\Delta\rho$

Как видно из рисунка 4.6, резкое увеличение оптических потерь происходит при значении флуктуации диаметра $\Delta\rho > 10^{-8}$ м.

4.4 Выводы по 4-ой главе

1. Разработана методика расчета интеграла перекрытия для модулятора МЦМ на основе математического моделирования стоячей волны в планарном волноводе.
2. Рассчитаны оптические потери за счет флуктуаций размеров сердцевин волноводов с помощью интеграла перекрытия.
3. Резкое увеличение оптических потерь начинается при величине флуктуаций размеров сердцевин $\Delta\rho > 10^{-8}$ м. Для оценки влияния этих потерь необходимо создание методики, связывающей коэффициент ошибки с $\Delta\rho$.
4. Наряду с совершенствованием технологий изготовления необходимо создание новых материалов, обладающих более низкой инерционностью по сравнению с ниобатом лития.

Глава 5 Расчет эффективности модулятора Маха-Цендера

5.1 Методы повышения быстродействия модулятора Маха-Цендера

Наибольшее распространение в высокоскоростных системах волнового уплотнения получил модулятор Маха-Цендера (МЦМ). В этом модуляторе с помощью линейной кодовой последовательности осуществляется модуляция по интенсивности инфракрасного излучения лазера [5, 67, 83].

Максимальная скорость передачи информации с помощью модулятора MZM достигает 40 Гбит/с. Эта цифра определяется двумя основными факторами: электрооптическими свойствами материала, качеством изготовления модулятора. Под электрооптическими свойствами сегнетоэлектрика подразумевается крутизна зависимости поляризованности сегнетоэлектрика от приложенного напряжения, называемой петлей гистерезиса и характеризуемой величиной коэрцитивной силы. Эта сила определяет скорость деполяризации сегнетоэлектрика (чем она больше, тем больше энергии надо прикладывать для деполяризации) [20, 49, 57]. Таким образом, быстродействие модулятора MZM ограничивается инерционностью процессов поляризации материала, предельные возможности которого по скорости передачи сигналов выше, чем 40 ГГц [2]. Кроме материала на быстродействие MZM влияет симметричность волноводов, которая определяет качество интерференции в оптических разветвителях. Под качеством следует понимать способность модулятора обеспечить величину разности фаз $\Delta\Phi$ в волноводах: при передаче логической «единицы» $\Delta\Phi=0$, при передаче логического «нуля» $\Delta\Phi=\pi$. Симметричность волноводов зависит от качества изготовления MZM: чистоты материала (флуктуаций показателей преломления) и точности геометрических размеров волноводов (флуктуаций диаметров и длины отрезков оптического волокна) [64, 94, 95, 96, 97, 98, 99]. Известно, что каждая технология производства элементной базы оптоэлектроники имеет свои ограничения, например, по точности изготовления геометрических размеров, характеризуемой разрешающей способностью. Поэтому исследования влияния на

характеристики MZM качества изготовления оптических модуляторов представляют определенный научный интерес. Эти исследования помогут ответить на вопрос, можно ли повысить ресурс скорости модуляции MZM за счет применения более совершенной технологии изготовления.

Для этого следует оценить степень влияния несимметричности диаметров волноводов, на втором – неравенство оптических путей волноводов за счет разных длин волокон или разницы в показателях преломления.

Для исследования несимметричности волноводов за счет ширины сердцевин необходимо рассчитать оптические моды волноводов. Затем сравнить эти моды с помощью коэффициента перекрытия [25, 46], который позволит увидеть величину оптических потерь, например, за счет неполной компенсации мод при передаче «логического нуля». Эти потери характеризуют «оптический шум», который снижает вероятность правильного обнаружения на приеме «логической единицы». В результате расчетов можно построить зависимости вероятности ошибки от величины флуктуаций размеров ширины волноводов и оценить возможности технологий изготовления MZM.

Для решения второй задачи достаточно вспомнить, что оптический путь света есть произведение длины волновода на показатель преломления. Следовательно, зная величину разрешающей способности нанотехнологии, можно сразу найти возможные значения отклонений волноводов по длине оптического пути света. Известно, что разрешающая способность нанотехнологий (минимальная ширина линий, при которой их можно различить) определяется длиной волны излучения, применяемого при изготовлении. Основным фактором, ограничивающим точность изготовления, являются дифракционные искажения, которые имеют порядок длины волны излучения. Так, например, метод нанолитографии имеет точность порядка 20нм, метод молекулярно-лучевой эпитаксии еще меньше (нескольких атомарных слоев, толщина каждого из которых равна примерно 0,5нм), метод нейтронного облучения может дать наибольшую точность изготовления, так как длина волны тепловых нейтронов имеет порядок 1нм [36, 44]. Таким образом, средние значения флуктуаций

оптических длин волокна определяют сдвиги фаз в виде временной задержки τ^1 между сигналами в волноводах и образование межканальных помех, которые требуют увеличения межканального временного интервала $\Delta\tau$, что учитывается при расчете продолжительности временного канала. Поэтому уменьшение длительности элементарного импульса τ (увеличение скорости передачи информации больше, чем 40 Гбит/с) при неизменной точности изготовления, определяющей величину τ^1 , приведет к усилению искажений оптических сигналов («логических нулей и единиц»). В предельном случае при $\tau = \tau^1$ процесс модуляции окажется невозможным. Отсюда, для полного использования ресурса кристалла ниобата лития по скорости модуляции необходимо пропорциональное уменьшение τ^1 , т.е. повышение точности изготовления волноводов. Чем выше разрешающая способность технологии, тем меньше разность фаз (оптических длин) и величина τ^1 в волноводах, тем меньше может быть интервал $\Delta\tau$ для обеспечения заданного качества связи. Таким образом, без изменения скорости передачи полученную «экономия» в величине временного межканального промежутка можно использовать или для увеличения числа временных каналов за период тактового отсчета, или для повышения качества приема (уменьшения вероятности ошибки).

На флуктуации оптических длин волноводов оказывает влияние не только точность изготовления по длине, но и по показателям преломления.

Величину τ^1 можно представить как разность оптических длин в волноводах за счет неточности изготовления следующим образом:

$$\tau^1 = \partial l(n) / v \text{ или } \tau^1 = l(\partial n) / v \quad (5.1),$$

где $n, \partial n, \partial l, v$ - соответственно показатель преломления, разрешающая способность технологии по показателю преломления и длине волокна, скорость распространения света в волноводах. Следует отметить, что скорость v определяется оптическими свойствами материала. Поэтому увеличение показателя преломления на величину ∂n влечет за собой уменьшение скорости на

величину ∂v , которую можно рассчитать с помощью скорости света в вакууме c следующим образом:

$\partial v = c/n - c/(n + \partial n) = c(\partial n)/n(n + \partial n)$ или $\partial v \approx c(\partial n)/n^2$ при условии, что n много больше ∂n . Отсюда, длина оптического пути увеличивается в ∂n раз, а скорость уменьшается в $(1 + \partial n/n)$ раз. Исходя из этого выражения, можно принять, что изменения скорости при повышении показателя преломления на величину ∂n незначительны. Используя выражения (5.1) можно сравнить различные технологии по качеству изготовления оптического модулятора. Так, если принять, что промышленные методы нанолитографии не превысили пока величину линейной разрешающей способности $\partial l \geq 13,5 \text{ нм}$ [68], то ядерные технологии (облучение тепловыми нейтронами [30, 90]) могут обеспечить для кремния величину $\partial n \leq 10^{-4}$. Отсюда, несинхронность оптических импульсов в волноводах можно уменьшить в $(\partial l \cdot n / l \cdot \partial n) = 2,3 \cdot 10^2$ раз ($\partial l = 10^{-8} \text{ нм}$, $n = 2,29$; $l = 1550 \text{ нм} \cdot 1,5 / n$, $(l \cdot n)_{\min} \geq 1,5\lambda$) при условии создания соответствующих технологических методов производства.

Таким образом, технологии производства могут повысить качество передачи информации за счет точности изготовления параметров волноводов.

5.2 Методика расчета эффективности оптического модулятора МЦМ.

Наиболее сложную задачу представляет оценка влияния флуктуаций размеров волноводов на качество работы модулятора MZM. Возникающая несимметричность оптических мод приводит к неполной компенсации в процессе интерференции света в волноводах при передаче «нуля» и искажениям амплитуды огибающей оптического импульса при передаче «единицы». Полученные распределения напряженности электрической поля электромагнитной волны будут отличаться для каждого волновода MZM тем сильнее, чем больше разница диаметров сердцевин и показателей преломления. Эту разницу оптических мод можно рассчитать с помощью коэффициента перекрытия:

$$K = \int_{-\infty}^{\infty} E_1(x)E_2(x)dx, \quad (5.2)$$

где $E_1(x), E_2(x)$ - распределения напряженности электрического поля в сердцевине и оболочке соединяемых волноводов; x - расстояние от центра волноводов.

Вид функции $E(x)$ зависит от внутренней структуры волновода. Для случая планарного волокна напряженность электрического поля $E(x)$ представляет из себя непрерывную кривую, состоящую из двух участков: косинусоидальной зависимости в сердцевине и экспоненциальной в оболочке (рисунок 5.1).

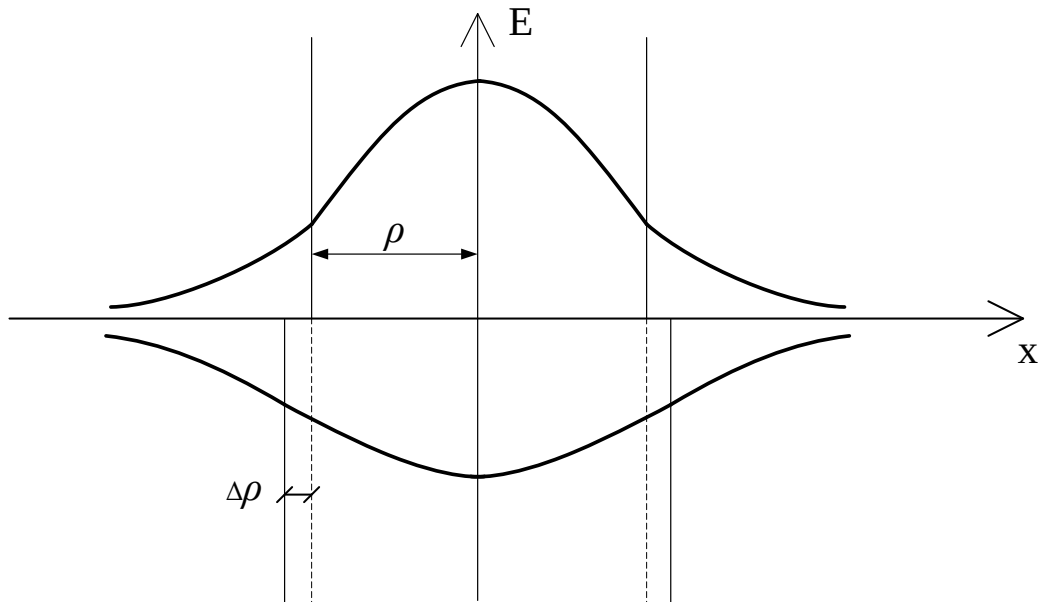


Рисунок 5.1 - Несимметричность оптических мод

Подставив в формулу (5.2) выражения функции $E(x)$ для обоих волноводов, можно рассчитать значения коэффициента перекрытия. Результаты расчетов коэффициента перекрытия от величины флуктуаций радиуса волноводов $\Delta\rho$ изображены на рисунке 5.2.

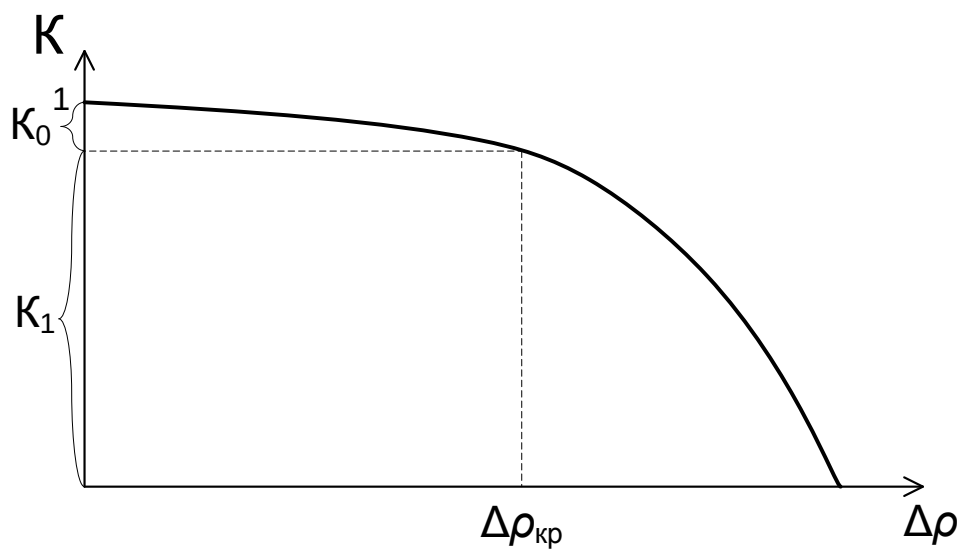


Рисунок 5.2 - Зависимость коэффициента перекрытия от величины флуктуаций радиуса волноводов $\Delta\rho$

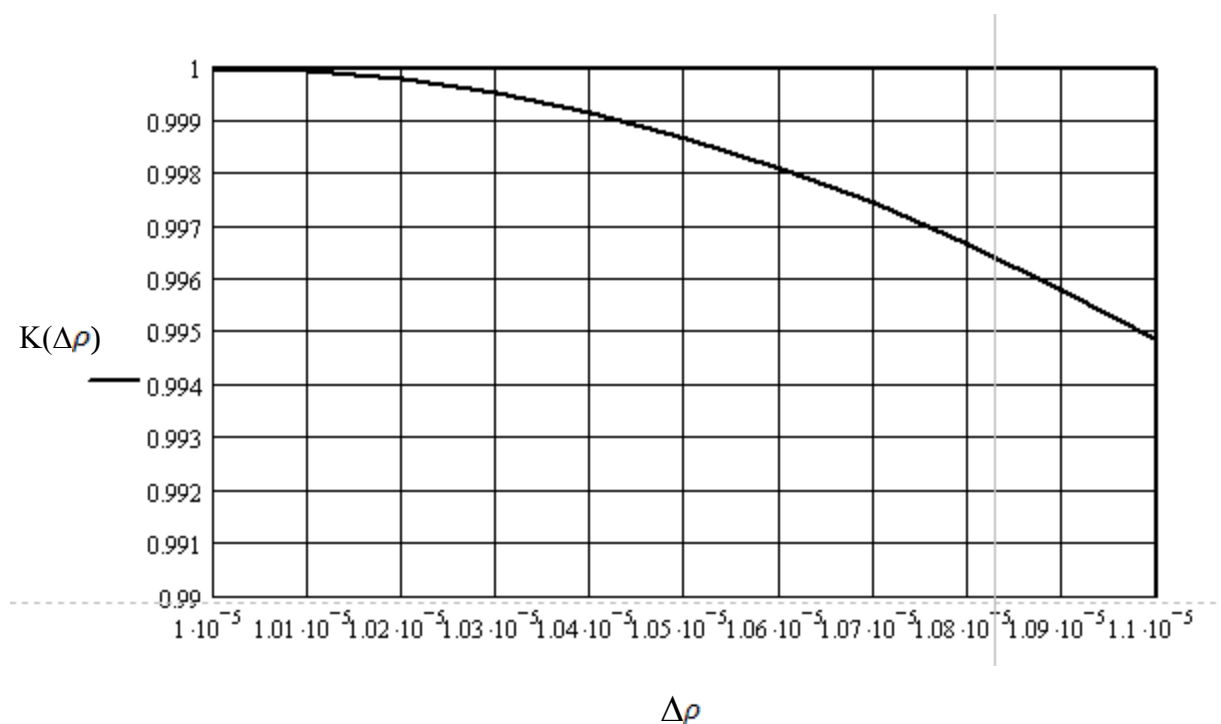


Рисунок 5.3 - Нормированный интеграл перекрытия

Равенство коэффициента перекрытия единице означает полную компенсацию в процессе интерференции при передаче «нуля» и отсутствие искажений при передаче «единицы». Уменьшение значения коэффициента перекрытия означают

снижение амплитуды огибающей оптического импульса при «единице» и появление оптического сигнала при «нуле» (рисунок 5.4).

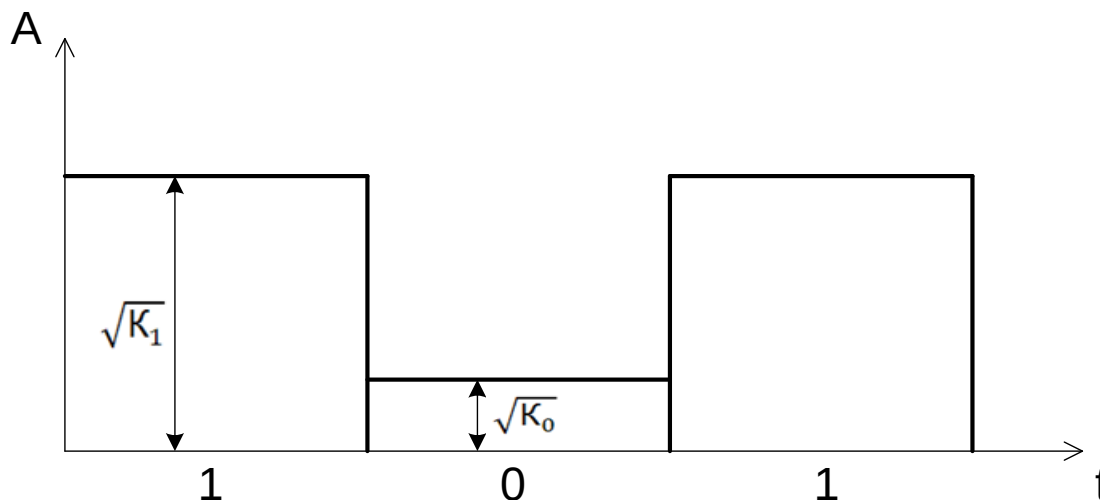


Рисунок 5.4 - Средние значения амплитуды оптической огибающей

Уменьшение разницы между амплитудами при передаче «единицы и нуля» в условиях помех фотоприемника может привести к увеличению вероятности ошибки. Как видно из рисунка 5.2, оптические потери резко увеличиваются после определенного значения $\Delta\rho_{кр}$ точности изготовления волноводов. Это критическое значение характеризует граничную величину разрешающей способности технологии изготовления. На рисунке 5.2 и рисунке 5.4 показано, какие средние значения мощности и амплитуды оптической огибающей будут соответствовать «единице» (K_1) и «нулю» (K_0) для случая, когда разрешающая способность технологии равна критическому значению. Если принять в качестве закона распределения плотностей вероятностей (ПРВ) амплитуд помехи фотоприемника нормальный закон, то задача обнаружения «единицы» на фоне межканальных помех может быть решена следующим образом (рисунок 5.5):

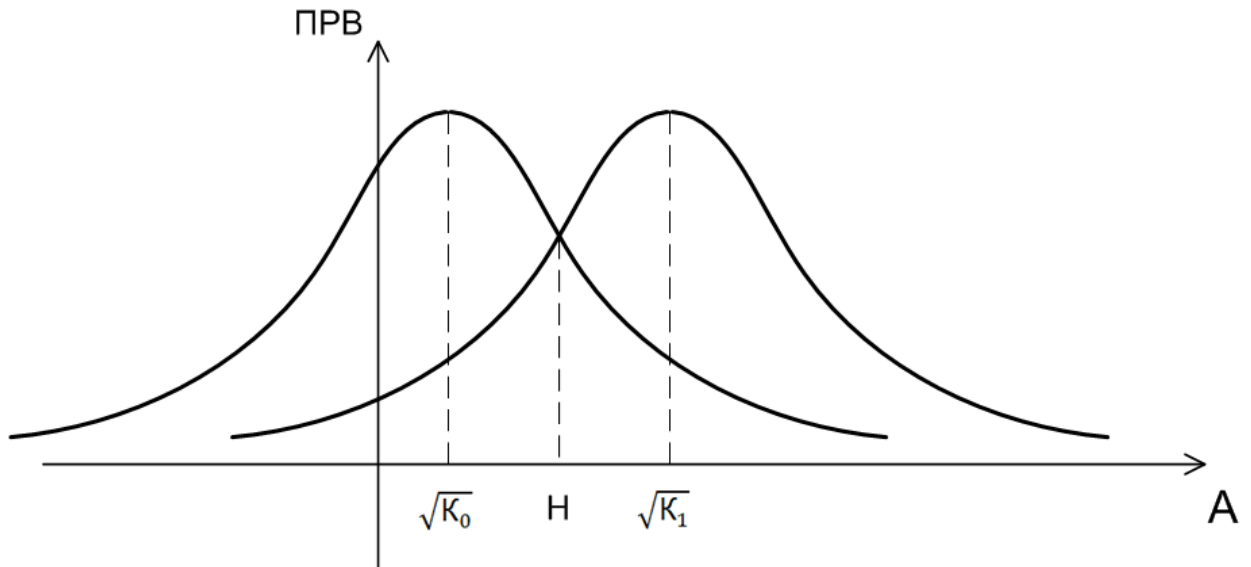


Рисунок 5.5 - К расчету вероятности ошибки

- 1) определяем выражения для вероятностей пропуска «единицы» и ложного срабатывания при передаче «нуля» через табличные интегралы вероятностей;
- 2) приравниваем эти выражения, считая, что обе эти вероятности одинаково опасны для работы приемника;
- 3) находим из уравнения порог срабатывания N решающего устройства для конкретных значений α^2 отношения мощностей огибающей сигнала при «единице» и темнового тока фотоприемника;
- 4) рассчитываем вероятность ошибки как сумму вероятностей пропуска и ложного срабатывания;
- 5) строим зависимость вероятности ошибки от величины разрешающей способности технологии изготовления.

Последние два пункта алгоритма можно реализовать с помощью анализа «глаз-диаграммы», которая представляет из себя наложение большого количества реализаций цифрового двоичного сигнала в пределах одного тактового интервала [53, 100]. При этом BER вычисляется с помощью Q -фактора, равного

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (5.3)$$

$$Q = \frac{(K - (1 - K)I)}{\sigma_1 + \sigma_2} \quad (5.4)$$

С использованием формулы (5.4) определена зависимость Q от размера волноводов ρ (Рисунок 5.6)

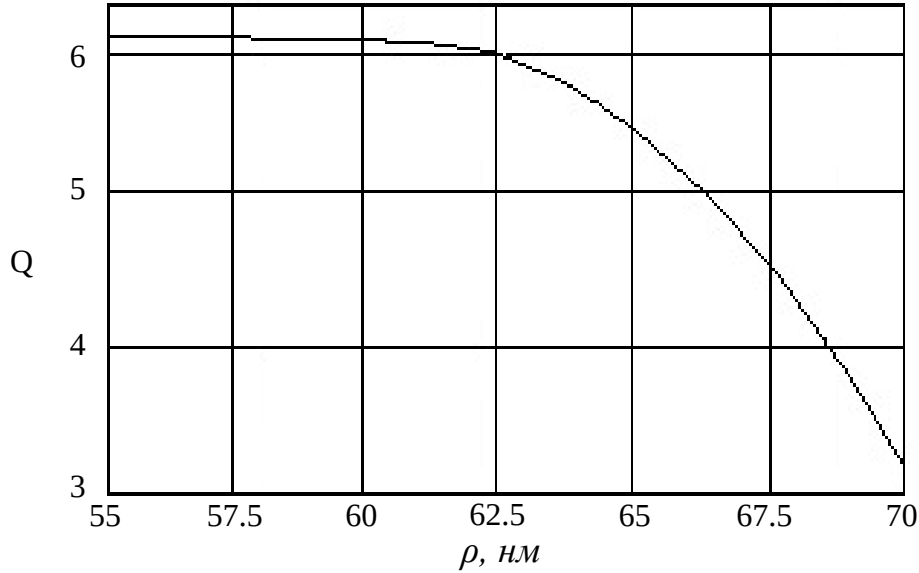


Рисунок 5.6 - Зависимость Q -фактора от ρ при $\Delta\rho = 10^{-8}$

Для стандартного (для модулятора МЦМ) значения $\rho = 62.5$ нм и $\Delta\rho = 10^{-8}$ имеет достаточно высокое значение $Q = 6$.

Полученная аналитическим путем и экспериментально подтвержденная зависимость вероятности ошибки от Q - фактора имеет следующий вид:

$$BER(Q) = e^{-\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^2} \times \frac{a_0 + a_1 \frac{Q}{\sqrt{2}} + a_2 \left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^2}{\left[b_0 + b_1 \frac{Q}{\sqrt{2}} + b_2 \left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^2 + b_3 \left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^3 \right] \sqrt{\pi}} \quad (5.5).$$

$$BER(Q) = \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right) \quad (5.6)$$

В диссертации для стандартного для модулятора МЦМ значения размера волноводов 62,5 нм с использованием (5.5) и (5.6) определена зависимость BER от Q -фактора (рисунок 5.7) [41, 46, 48]..

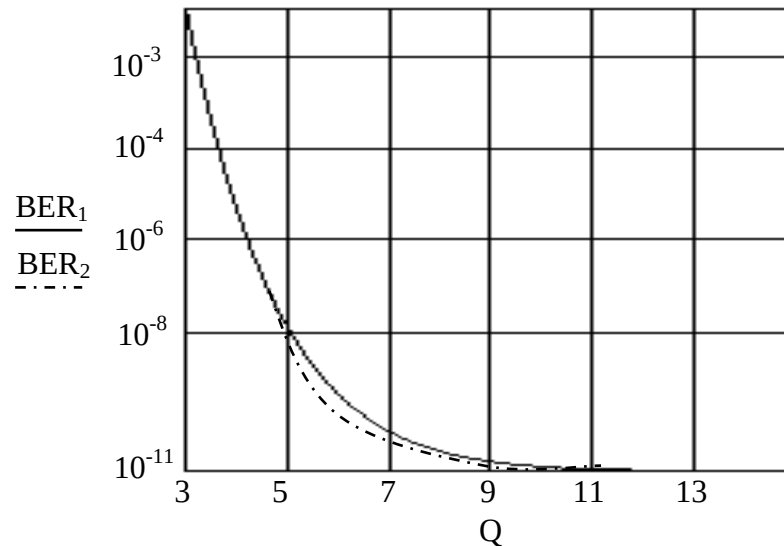


Рисунок 5.7 - Зависимость BER от Q-фактора

Сравнение графиков построенных по формулам (5.4) и (5.5), показало незначительную разницу между ними, что позволило сделать вывод о возможности использования формулы (5.4), рекомендованной МСЭ-Т О.201.

5.3 Расчет коэффициента ошибки

Поскольку при допустимых уровнях оптического сигнала ток фотодетектора пропорционален оптической мощности, то среднее значение $\mu_{0,1}$ напряжения электрического тока, соответствующее значениям «логического нуля или единицы», и среднеквадратическое отклонение теплового шума $\sigma_{0,1}$ можно представить в нашем случае следующим образом: $\mu_{0,1} = K_{0,1} \cdot R$, где R - чувствительность фотодетектора (для длины волны 1550^{нм} и германиевых фотодетекторов $R = 0,85 \text{ A/Bm}$) [11], $\sigma_{0,1} = \sqrt{I^2} = \sqrt{4\kappa TB/r} = 1,1367 \cdot 10^{-6} \text{ A}$, I - тепловой ток, имеющий наибольшую величину среди других составляющих шума фотодетектора, где $\kappa = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/ K}$ - постоянная Больцмана, $T = 298 \text{ K}$ - абсолютная температура по шкале Кельвина, $B = 40 \text{ ГГц}$ - ширина полосы цифрового сигнала, $r = 510 \text{ Ом}$ – нагрузка в цепи фотодетектора [11]. В качестве примера можно сравнить результаты расчетов по формуле для двух значений

$\Delta\rho_1 = 0,25\text{мкм}$; $\Delta\rho_2 = 0,05\text{мкм}$. Соответствующие им значения коэффициентов пропускания для «логической единицы» равны: $K_1^1 = 0,9992$; $K_1^{11} = 0,99997$ [6]. Следует отметить, что коэффициенты пропускания являются нормированными величинами. Поэтому для получения оптической мощности на входе фотодетектора эти коэффициенты нужно умножить на величину входной мощности по уровню $p \geq p_{\text{пор}}$ ($p_{\text{пор}}$ - порог чувствительности). Так, для величины $p = -16,6\text{дБ}$ оптическая мощность равна 22мкВт . Таким образом, воспользовавшись формулой и значениями, приведенными выше, можно вычислить коэффициент ошибки для двух величин $\Delta\rho$, а именно,

$BER = 0,1125 \cdot 10^{-15}$; $BER_{\text{out2}} = 0,1027 \cdot 10^{-15}$. Полученные цифры мало отличаются друг от друга, что можно объяснить оценочным характером расчетов, цель которых показать возможность учета точности изготовления волоконно-оптических устройств на качество связи. Конечные результаты зависят не только от технологий производства, но и от характеристик материала модуляторов и фотодетекторов, а также скорости передачи сигналов. Рассмотренные выше примеры свидетельствуют о том, что с помощью разработанной методики можно проводить исследования влияния качественных характеристик технологий изготовления элементной базы оптоэлектроники на вероятность ошибки при приеме отдельных символов. На рисунке 5.8 представлен график зависимости BER от $\Delta\rho$

Такой алгоритм расчета позволит не только сравнить различные технологии производства, но и оценить возможности повышения эффективности MZM за счет улучшения качества изготовления оптических модуляторов.

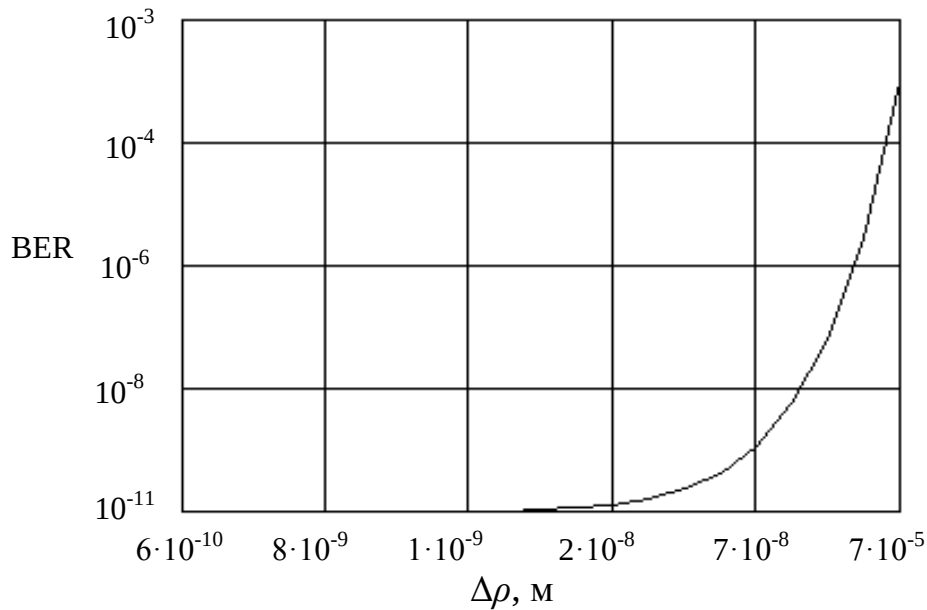


Рисунок 5.8 - Зависимость BER от $\Delta\rho$

Полученное таким образом критическое значение $\Delta\rho$ равное 10 нм, свидетельствует о том, что такую точность изготовления могут обеспечить современные технологии. Повышение точности выше $2 \cdot 10^{-8}$ м почти не влияет на BER, а следовательно и скорость модуляции. Отсюда, дальнейшее повышение быстродействия модулятора МЦМ возможно за счет снижения инерционности материала [25, 46].

5.4 Описание модели сверхрешетки

Для повышения скорости передачи информации с помощью волоконно-оптической связи, как было отмечено выше, необходимо увеличивать быстродействие оптоэлектронных устройств. Главным образом, эта задача касается оптических модуляторов. Самыми быстродейственными на сегодняшний день являются модуляторы Маха-Цендера (МЦМ) с максимальной частотой 40 ГГц. Для дальнейшего повышения частоты модуляции нужно понижать инерционность материала. Этого можно добиться при условии использования новых материалов на базе низкоразмерных структур. Наиболее перспективными в настоящее время являются наноструктуры, построенные с помощью модели сверхрешеток (рисунок 5.9).

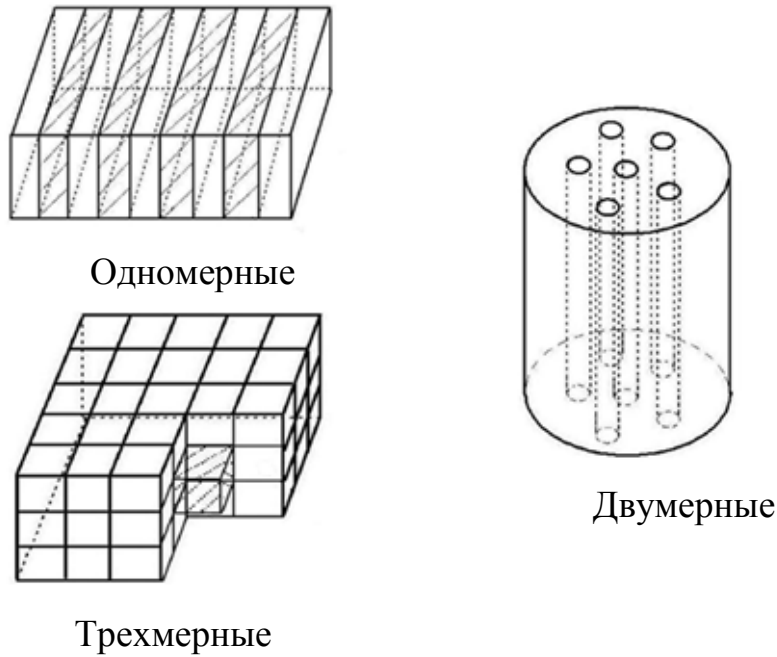


Рисунок 5.9 - Виды низкоразмерных структур

Они представляют из себя множественные квантовые ямы, в которых возможны процессы туннелирования носителей заряда (электронов и дырок).

Сверхрешетка – это твердотельная периодическая структура, в которой на носители заряда наряду с потенциалом кристаллической решетки действует дополнительный встроенный потенциал, созданный путем чередования слоев из разных полупроводниковых материалов определенной ширины (рисунок 5.9).

Модель сверхрешетки, благодаря нанометровой ширине слоев и определенной периодичности их, позволяет проектировать новые полупроводниковые материалы с заранее заданными оптоэлектронными характеристиками. Из этого материала можно получать низкоразмерные структуры (квантовые ямы, проволоки, точки) разной формы (плоские, цилиндрические, шарообразные, конусообразные, кольцообразные, эллипсообразные и т.д). Кроме того, при возрастании числа монослоев можно получить сверхрешетки, которые будут обладать «квазипрямыми» оптическими переходами в запрещенной зоне даже в случае использования непрямозонных полупроводников [49, 65, 74, 84, 85].

Необходимо отметить следующие возможности низкоразмерных полупроводниковых сверхрешеток:

- 1) получение на их основе нового материала с заданными параметрами (энергетической структурой);
- 2) использование этого материала для создания полупроводниковых лазеров на массивах квантовых точках инжекционного типа (самые эффективные на сегодняшний день за счет высоких коэффициента усиления, стабильности, узкой полосы излучаемого спектра излучения, а также симметричности спектра, условий работы, не требующих сверхнизкого охлаждения);
- 3) использование новых материалов для получения фотодетекторов на переходах между уровнями размерного квантования сверхрешеток в инфракрасном (длинном и сверхдлинном) диапазоне длин волн 3-35мкм, что невозможно осуществить с помощью обычных полупроводников из-за сравнительно широкой запрещенной зоны.

Общий недостаток сверхрешеток на полупроводниках – это технологические трудности при создании массивов квантовых точек для лазеров (однородных по размерам, формам и бездефектных [69] даже с использованием метода самоорганизации на основе осаждения паров и молекулярно-лучевой эпитаксии).

Нахождение волновой функции и разрешенных значений энергии квантования частицы E в многослойной структуре с периодическим изменением электрического потенциала осуществлялась на основании третьей модели с помощью стационарного уравнения Шредингера, которое по виду похоже на выражение (4.1). Это формальная модель волнового процесса в виде дифференциального уравнения второго порядка:

$$-\frac{\hbar^2 d^2 \psi(x)}{2m dx^2} + V_j \psi(x) = E \psi(x), \quad (5.7)$$

где $\psi(x)$ - волновая функция частицы;

$\hbar$ - постоянная Планка;

m - масса частицы;

V_j - высота потенциального барьера в j -той квантовой яме;

E - энергия частицы.

Характеристикой j - того слоя, $1 \leq j \leq n$, является величина:

$$q_j = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}(V_j - E)}. \quad (5.8)$$

Решения в разных слоях отыскивались как линейные комбинации либо экспонент, либо синусоид и косинусоид. При этом решения в соседних слоях «сшивались», исходя из условия непрерывности волновой функции и ее производной. Причем крайние слои считаются бесконечно протяженными с волновой функцией, экспоненциально убывающей.

Отличие выражения состоит в знаке коэффициента перед второй производной искомой функции и не сказывается на способе решения.

Алгоритм решения уравнения состоит из нескольких этапов: а) составление системы уравнений с учетом начальных условий; б) преобразование системы к одному дисперсионному уравнению; в) решение дисперсионного (трансцендентного) уравнения численным методом с помощью компьютерных программ, например, Mathcad; г) построение графиков зависимости $E_y(x)$ или волновой функции после подстановки в формулы искомого параметра многослойной структуры (β_1 - для оптической задачи, E - для квантовой структуры). Существуют несколько способов отыскания дисперсионного уравнения, например, метод характеристических матриц, а также метод составления уравнений для многослойной структуры с ограниченным числом слоев [10, 50, 71, 84, 85, 104] и непосредственное решение системы линейных уравнений из условия равенства нулю определителя системы. Несмотря на то, что последний способ на первый взгляд является громоздким, но он более нагляден и при определенных условиях его можно успешно использовать для нахождения трансцендентного уравнения. Таким образом, дисперсионное уравнение получается из условия наличия нетривиальных решений при «сшивке» многослойной структуры (рисунке 5.10) на границах слоев.

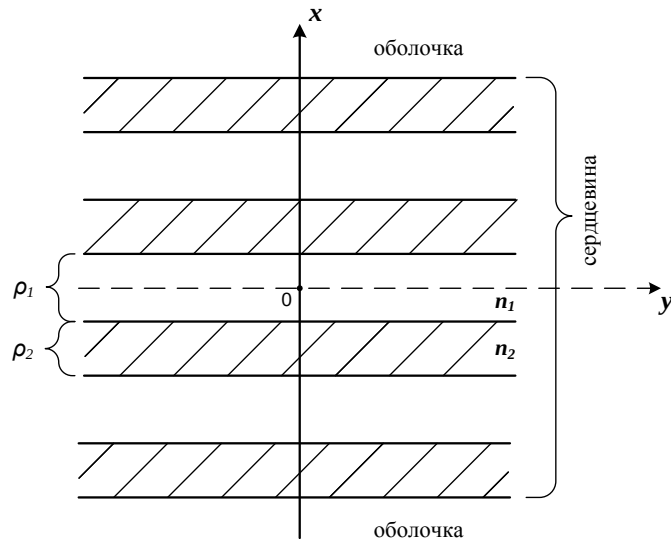


Рисунок 5.10 - Многослойный планарный волновод

Нужные уравнения «прошивки волновода» получаются из условия непрерывности величин $E_y(x)$ и $\frac{dE_y(x)}{dx}$ (граничные условия) на стыках слоев.

Так, для общего числа слоев N , включая бесконечно большие крайние слои (для оптического волокна – это оболочка волновода), количество уравнений в линейной системе равно $2 \cdot (N - 1)$. Конечный результат рассчитывается с учетом задания начальных условий, например, $E_y(0) = 1$ (или равенство единице $E_y(x)$ на границе сердцевины и оболочки волновода). Причем для волновода $E_y(x)$ есть напряженность электрической составляющей электромагнитного поля (стоячая волна). Координата x характеризует толщину слоев волновода или период многослойной квантовой структуры d . Период d равен сумме ширины квантовой ямы (аналог более плотного слоя волновода) a и ширины потенциального барьера (аналог менее плотного разделительного слоя волновода) b для волновой функции частицы $\psi(x)$, также равной единице при $x = 0$.

5.5 Принципы работы оптических модуляторов на сверхрешетках

Оптические модуляторы на сверхрешетках используются для непосредственной модуляции светового излучения. В этом случае электрооптические эффекты проявляются значительно сильнее, чем в обычных объемных полупроводниковых материалах.

В основе работы оптических модуляторов на сверхрешетках лежат два физических явления: поглощение и отражение света. Они связаны с тем, что при наложении внешнего электрического поля наблюдаются значительные оптические изменения спектра поглощения. Отсюда, все модуляторы на множественных квантовых ямах делятся на модуляторы с электропоглощением и модуляторы с изменением коэффициента преломления. Оба этих модулятора работают с использованием квантово-размерного эффекта Штарка [63]. Этот эффект обусловлен усилением взаимодействия между квантовыми ямами в условиях внешнего электрического поля. Это связано с тем, что электростатическая энергия электронов, находящихся в однородном электрическом поле, линейно растет с расстоянием, что приводит сдвигу энергетических уровней в соседних ямах на величину $\Delta E = eFd$ (где e - заряд электрона, F - напряженность приложенного электрического поля, d - расстояние между квантовыми ямами). Резонанс между двумя состояниями наступает при величине приложенного напряжения, примерно обратно пропорционального разнице энергетических уровней в ямах.

При слабой связи между ямами электронные состояния локализуются внутри ямы. В случае внешнего электрического поля создается сдвиг по энергиям, знак которого определяется направлением поля. С ростом напряженности приложенного напряжения, кроме переходов носителей заряда (из валентной зоны в зону проводимости) внутри ямы увеличивается число переходов между ямами, внутренние переходы перестают проявляться. Таким образом, создается возможность управлять числом переходов в сверхрешетках относительно небольшим по величине электрическим напряжением.

Оптические модуляторы с эффектом электропоглощения

Внешнее электрическое поле может существенно изменить оптические характеристики материала, т.е. повлиять на коэффициент преломления (эффект электропреломления) и коэффициент поглощения (эффект электропоглощения). Если энергия фотонов не превышает ширины запрещенной зоны, то основным фактором является электропреломление, если наоборот, то электропоглощением. Известно, что внешнее электрическое поле изменяет ширину запрещенной зоны, уменьшая энергию края поглощения. Таким образом, для фотонов с энергией чуть ниже края поглощения полупроводник является «прозрачным» в отсутствии внешнего поля (на выходе оптического модулятора появляется импульс, соответствующий логической единице). При наложении напряжения структура сверхрешетки становится непрозрачной, поглощает фотоны, которые повышают энергию электронов. В этом случае на выходе модулятора нет оптического импульса, что соответствует логическому нулю.

Оптический модулятор с эффектом электропреломлением

В этих модуляторах используют фотоны с энергией ниже края экситонного поглощения. В этом случае напряжение влияет на коэффициент преломления среды и меняет фазу падающего света. В симметричных квантовых ямах зависимость коэффициента преломления от напряжения электрического поля является квадратичным (напоминает эффект Керра) в объемных полупроводниках (сегнетоэлектриков). Известно, что особенностью сегнетоэлектриков является гистерезис зависимости диэлектрической проницаемости (коэффициента преломления) от приложенного напряжения [10]. От скорости возвращения материала в исходное состояние, которая характеризуется крутизной петли гистерезиса (величиной коэрцитивной силы) зависит быстродействие оптического модулятора. Использование модели сверхрешетки позволяет добиться более

заметного изменения коэффициента преломления по сравнению с обычными полупроводниками (примерно в два порядка) и повысить быстродействие модулятора МЦМ.

5.6 Преимущества оптических модуляторов на изотопических сверхрешетках

В изотопических сверхрешетках пространственное ограничение для носителей заряда внутри кристаллов при формировании квантовых ям создается благодаря сочетанию слоев из разных изотопов одного и того же вещества, в отличие от просто сверхрешеток, в которых чередуются разные полупроводниковые материалы (желательно с минимальной разницей постоянных кристаллической решетки). Разница в кристаллических решетках влияет на распределение энергетических зон [69], что затрудняет проектирование нового материала с заданными параметрами и создания лазеров с узкой и симметричной шириной спектра излучения.

Кроме того, добавление легирующих добавок в полупроводники увеличивает количество дефектов, которые снижают чувствительность фотодетекторов и влияют на эффективность лазеров.

Как известно, изотопы имеют практически идентичную кристаллическую решетку. Следовательно, позволяют получить лазеры с минимальными флуктуациями ширины спектра излучения. Выигрыш от использования изотопических сверхрешеток можно оценить с помощью расчета зависимости энергии квантования от ширины ямы (барьера). Для этого нужно учесть последствия растяжения или сжатия кристаллической решетки при сопряжении слоев с разными постоянными кристаллической решетки. Любое механическое напряжение – это изменение ширины слоя, например, на величину постоянной (0,1-0,5) нм, которые учитываются при составлении дисперсионного уравнения для оценки энергетических уровней. Технологические погрешности при

изготовлении также могут влиять на энергетическую структуру нового материала, следовательно, их можно оценить по такой же методике.

Изотопические слои создаются из чистых изотопов с помощью различных технологий (молекулярно-лучевой эпитаксии, ядерного легирования), которые могут обеспечить на сегодняшний день самую высокую точность изготовления.

Отсюда, преимуществами нового материала можно считать использование: 1) структуры сверхрешеток, позволяющих проектировать нужные оптические характеристики; 2) собственных изотопов вещества; 3) изотопических технологий (например, метода нейтронного трансмутационного легирования), обеспечивающих высокое качество изготовления.

На рисунке 5.11 представлены энергетические уровни сверхрешетки из изотопов кремния для параметров: $V = 0,3$ мэВ; $m = 0,5m_0$, при $x = 0 \dots 100$ нм; $E = 0 \dots 1$ мэВ

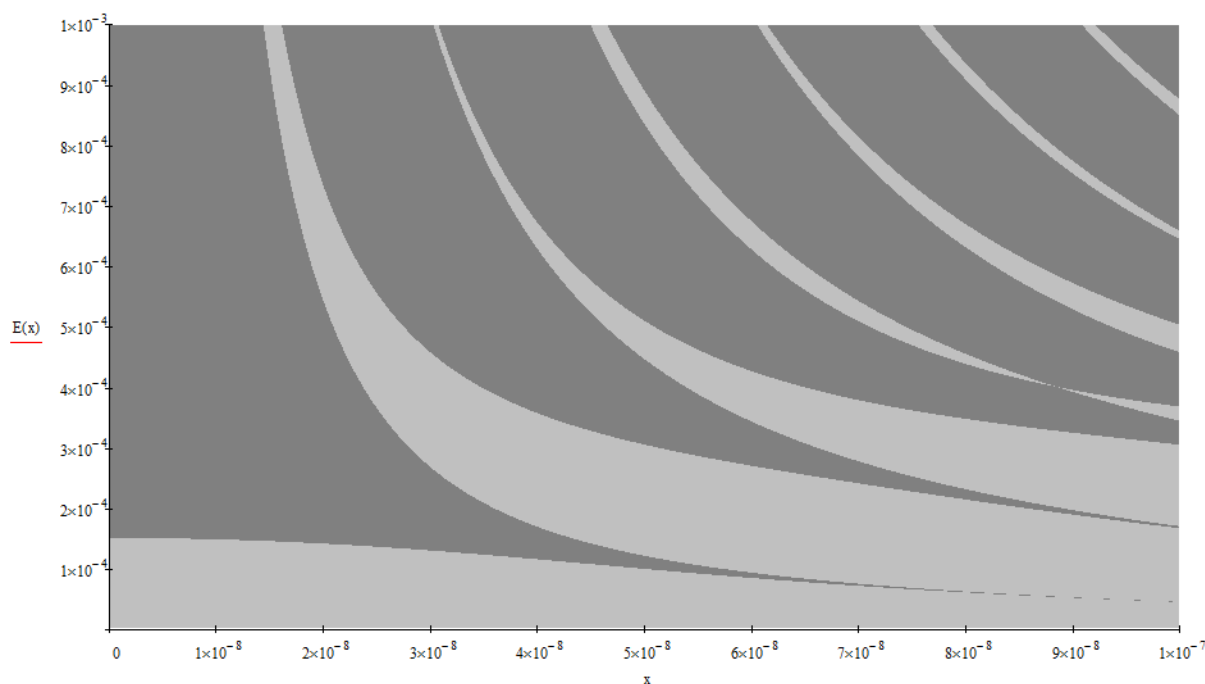


Рисунок 5.11 - Энергетические уровни сверхрешетки из изотопов кремния

Известно, что очистка естественного кремния позволила создать микросхемы из чистого изотопа Si^{28} . При этом скорость работы микропроцессора увеличилась в два раза (до $3 ГГц$) . Поэтому можно сделать вывод, что изотопические

сверхрешетки улучшат оптоэлектронные характеристики модуляторов и позволят увеличить частоту модуляции выше 100 ГГц [26, 28, 39].

Для использования ИСВР требуется обеспечить необходимую точность изготовления размеров и чистоту материала в модуляторе Маха-Цендера.

5.7 Описание ядерной нанотехнологии

В качестве технологии изготовления изотопических сверхрешеток наиболее перспективны методы молекулярно-лучевой эпитаксии МЛЭ и нейтронного трансмутационного легирования НТЛ.

Метод молекулярно-лучевой эпитаксии основан на осаждении пленок полупроводниковых материалов посредством испарения вещества в сверхвысоком вакууме. При этом осаждаемые вещества, например, чистые изотопы кремния, вводятся в рабочую камеру в виде молекулярных или атомных потоков. Эти потоки формируются путем испарения материала внутри замкнутой ячейки с очень малым выходным отверстием (эффузионной ячейки). Создаваемые внутри нее потоки молекул или атомов, выходя из отверстия в сверхвысокий вакуум, движутся без соударений и создают коллимированные пучки [90]. Основными частями установки МЛЭ являются эффузионные ячейки, подогреваемый подложко-держатель и система мониторинга процесса, в которой используется методы электронной спектроскопии.

В основе другого способа изготовления изотопических сверхрешеток лежит метод облучения тепловыми нейтронами. Он основан на отлаженных в течение нескольких десятков лет промышленных технологиях нейтронного облучения НТЛ [71, 90, 92].

С помощью этого метода можно обеспечить производство качественных наноструктур. Возможность использования нейтронов для изготовления квантовых структур объясняется их свойствами и особенностями ядерных реакций. Это высокая проникающая способность нейтронов как незаряженных частиц. При взаимодействии нейтронов с ядрами химических элементов

облучаемого вещества образуются возбужденные составные ядра, которые распадаются в результате ядерных реакций [11, 17, 57, 71]. В основе ядерной технологии лежит реакция поглощения тепловых нейтронов.

Так, тепловые нейтроны n вступают в реакцию поглощения с ядрами мишени X по следующей схеме [87]:



где Z – атомный номер вещества,

A – массовое число,

γ – излучение, которое уносит основную часть освободившейся энергии.

Для тепловых нейтронов с энергией $E_n \leq 0,025$ эВ наиболее вероятной является реакция поглощения (радиационного захвата), которая характеризуется параметром σ_n , называемым сечением поглощения. При столкновении нейтрон захватывается ядром и более легкий изотоп, например, кремния превращается в более тяжелый. Величина σ_n зависит от энергии нейтронов E_n и определяется по экспериментальной кривой $\sigma_n = f(E_n)$. Величина сечения поглощения определяет глубину проникновения нейтронов ℓ_n , захваченных ядрами кремния. Следовательно, чем однороднее нейтроны по энергии, тем точнее получают размеры структурных элементов, например, фотонно-кристаллического волокна. Однородность нейтронов определяется параметром их источника (разбросом нейтронов по величине энергии) ΔE_n . Значение l_n зависит от распределения концентрации новых изотопов по длине облучаемого участка заготовки $N(x)$. Функция $N(x)$ подчиняется экспоненциальному закону:

$$N(x) = \Phi_o \cdot N_o \cdot K_i \sigma_n \exp(-N_o \cdot K_i \sigma_n \cdot x), \quad (5.10)$$

где $\Phi_o = \varphi t$ – интегральный поток нейтронов (нейтр./см²);

φ – интенсивность потока нейтронов (нейтр/см²·с);

t – время облучения в с;

N_o – число атомов кремния в 1 см³ ($N_o = 5,04 \cdot 10^{22}$ ат/см³);

K_i – процентное содержание i -того изотопа;

σ_n - сечение поглощения ($1\text{барн}=10^{-24}\text{см}^2$);

x - глубина поглощения нейтронов (см).

Для достижения требуемого результата по глубине облучения заготовки необходимо подбирать приведенные выше параметры источника нейтронов.

Основные параметры нейтронного облучения

Для равномерного распределения новых изотопов в результате облучения размеры заготовки ℓ должны быть меньше средней длины поглощения ℓ_n , рассчитываемой по следующей формуле [71, 87]:

$$\ell_n = 1 / N_o \cdot K_i \cdot \sigma_n. \quad (5.11)$$

Следовательно, для характеристики ядерной реакции при облучении тепловыми нейтронами необходимо знать сечение поглощения. Количество атомов j -того изотопа (более тяжелого) N_{0j} в объеме 1см^3 , получаемого из i -того изотопа (более легкого), можно подсчитать следующим образом:

$$N_{0j} = N_o \cdot K_i \cdot 10^{-m}, \quad (5.12)$$

где m – параметр, определяющий степень повышения концентрации j -того изотопа в заготовке ОВ после облучения нейтронами.

Таким образом, основными расчетными параметрами нейтронного облучения для изготовления различных структур с помощью тепловых нейтронов являются интегральный поток Φ_o , разрешающая способность по энергии нейтронов ΔE_n . На основании приведенных формул можно рассчитать параметры нейтронного потока и соответствующее им повышение концентрации тяжелых изотопов на примере диоксида кремния.

Так, количество более тяжелого изотопа кремния $N_i^1 = N_{0j}$, образовавшегося после облучения i -того изотопа, можно получить следующим образом [15, 87]:

$$N_i^1 = N_i \sigma_i \varphi t, \quad (5.13)$$

где N_i^1 - выход более тяжелого изотопа после облучения i -того изотопа,

N_i - количество атомов i -того изотопа до облучения,

σ_i - сечение реакции поглощения i -того изотопа,

t - время облучения.

Применительно к изотопам кремния выход ^{29}Si из изотопа ^{28}Si в результате ядерной реакции, например, может составлять:

$$N_i^1 = 10^{-3} N_i, \quad (5.14)$$

где $N_i = 0,9218$ - концентрация изотопа ^{28}Si в естественном состоянии кремния.

После подстановки в формулу получим величину интегрального облучения ϕt , а именно:

$$\phi t = 10^{-3} / \sigma_i, \quad (5.15)$$

$$\text{где } \sigma_i = 0,08 / \sqrt{E}. \quad (5.16)$$

В случае облучения кремния тепловыми нейтронами с энергией $E = 0,025 \text{ эВ}$ сечение поглощения и интегральный поток будут равны соответственно $\sigma_i = 0,506 \text{ барн}$ (10^{-24} см^2), $\phi t = 20 \times 10^{20} \text{ нейтр./см}^2$.

При среднем значении интенсивности потока нейтронов $\phi = 10^{17} \text{ нейтр./см}^2 \text{ с}$, время облучения составит 5,56 час.

В качестве технологии изготовления ИСВР можно использовать ядерные технологии, например облучение нейтронами. Схема облучения изображена на рисунке 5.12. Для реализации этой схемы необходимо обеспечить определенные параметры облучения. Это такие характеристики, как интегральный нейтронный поток, глубина облучения, степень разрешения (однородности) нейтронов по энергии ΔE и т.д. Наибольшее значение для достижения высокой точности изготовления

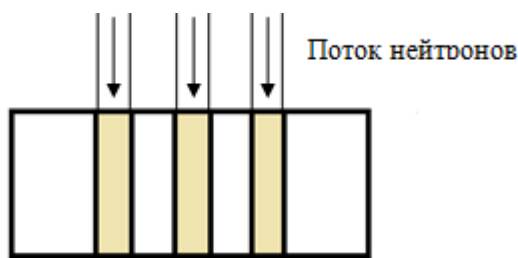


Рисунок 5.12 - Схема облучения

геометрических размеров (например, длине изделия L) и отсутствия дефектов из-за разброса энергий нейтронов имеет величина ΔE_n (рисунок 5.13). Ее влияние, например, на точность размеров ΔL можно оценить по длине поглощения нейтронов L . Величину L можно рассчитать следующим образом:

$$L = \frac{1}{K \cdot \sigma_i}, \quad (5.15)$$

где σ_i - сечение реакции поглощения i -того изотопа.

$$K = N_0 K_i, \quad (5.16)$$

где K_i - процентное содержание i -того изотопа;

N_0 - число атомов кремния в 1 см^3 ($N_0 = 5,04 \cdot 10^{22} \text{ ат}/\text{см}^3$); (для изотопически чистого кремния, состоящего только из Si^{28} , $K_i = 1$ и $K = N_0$).

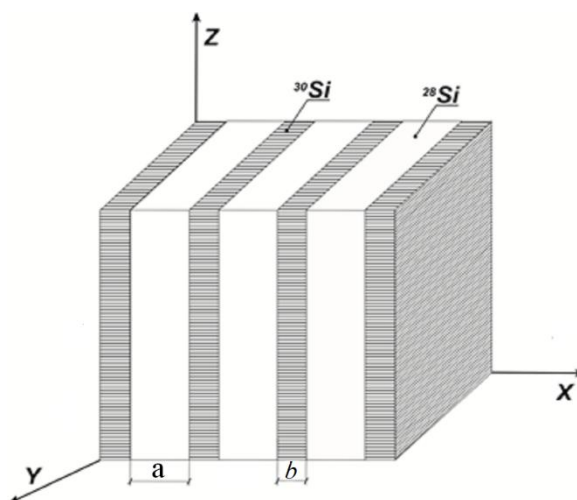


Рисунок 5.13 - Модель сверхрешетки на изотопах кремния (a - квантовая яма, b - барьер)

Из рисунке 5.14 видно, что для разрешающей способности по энергии нейтронов $\Delta E_n < 10^{-9}$ эВ точность изготовления по глубине поглощения нейтронов имеет порядок нескольких нанометров. Отсюда следует, что этот метод изготовления можно отнести к нанотехнологиям.

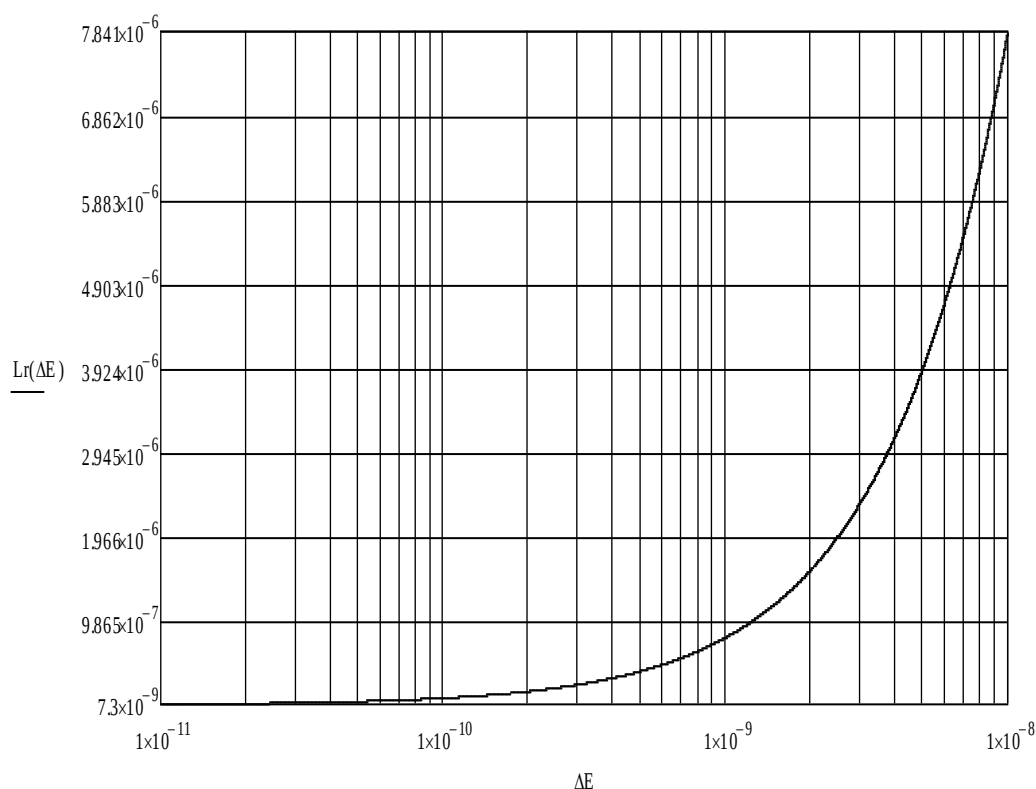


Рисунок 5.14 - Влияние величины ΔE на значение L

Для изготовления с помощью ядерных технологий изотопических низкоразмерных структур необходимо обеспечить определенные параметры облучения. Это такие характеристики, как сфокусированный нейтронного поток, дифракционные искажения, степень разрешения (однородности) нейтронов по энергии ΔE_n и т.д.

Наибольший практический интерес для облучения полупроводниковых материалов (*Si*, *Ge*, *GaAs* и т.д.) представляют собой тепловые нейтроны с энергией E в диапазоне от 0,025 до 1 эВ [11, 71, 87].

Для создания изотопических сверхрешеток особое значение имеют гетеропереходы (соединение двух полупроводников с разной шириной запрещенной зоны), которая для полупроводниковых материалов имеет величину порядка 10^{-1} эВ. Эта разница особенно важна для создания пространственных ограничений с помощью изотопов исходного вещества, которая имеет для кремния порядок 10^{-1} мэВ. Отсюда, для формирования квантовых структур можно использовать «гомопереходы», полученные из сочетания легких и тяжелых

изотопов, например, кристаллического кремния путем нейтронного облучения. Необходимо вставить рисунок различных схем облучения однородной (изотопически чистой) заготовки кремния потоком нейтронов.

Более «плотные» структурные элементы, например, слои сверхрешетки создаются путем облучения нейтронами соответствующих областей для повышения концентрации, например, изотопа кремния Si^{29} или Si^{30} (что зависит от времени облучения) по сравнению с исходным содержанием в других частях заготовки. Этот метод, как уже отмечалось выше, позволит создавать новые материалы с высокой точностью, без дефектов и «шероховатостей» в «гетеропереходах». Высокая разрешающая способность нейтронного потока позволит получить многослойные наноструктуры с шириной каждого слоя, соизмеримой с постоянной кристаллической решетки.

5.8 Выводы по 5-ой главе

1. Исследовано влияние точности размеров изготовления на быстродействие модулятора Маха-Цендера.
2. Разработана методика расчета эффективности модулятора МЦМ от несимметричности оптических волноводов (технологий изготовления).
3. Получена зависимость Q-фактора от параметров оптического модулятора
4. Получена зависимость BER от величины флуктуаций ОВ, позволяющая оценить влияние технологий на качество передачи сигналов.
5. Критическим значением является $\Delta\rho = 10^{-8}$ м, что соответствует $P_{\text{онш}} = 10^{-11}$.
6. Предложен новый оптический модулятор на базе МЦМ на ИСВР, позволяющий повысить чистоту материала и быстродействие МЦМ может повыситься более чем в 2 раза по сравнению со сверхрешетками из разных полупроводников и в 5 раз по сравнению с МЦМ из ниобата лития.

Заключение

1. Получена зависимость Q-фактора от параметров сигнала и помехи на выходе оптического модулятора Маха-Цендера (МЦМ). Определена зависимость значений напряжения сигнала, соответствующих значениям элементарных символов в оптической последовательности на выходе МЦМ от интеграла перекрытия сигналов в его каналах.

2. Получена зависимость интеграла перекрытия сигналов в двух параллельных каналах МЦМ от его параметров

3. Определены зависимости от изменения коэффициента преломления набега фазы и интеграла перекрытия для номинальных для МЦМ значений длины волны, показателя преломления, волнового и полуволнового напряжений. Изменения коэффициента преломления приводят, начиная с порогового его значения 10^{-3} к инверсии символов цифрового оптического сигнала.

4. Исследовано влияния несимметричности (разности $\Delta\rho$ размеров сердцевин) волноводов на напряженность электрического поля и оптические потери в МЦМ.

5. Определена зависимость Q-фактора от диаметров волноводов. Для стандартных для МЦМ значений диаметров волноводов 62.5 нм, величина Q-фактора составила $Q=6$.

6. Для стандартных значений диаметров определена зависимость коэффициента ошибок от Q-фактора, на основании которой сделан вывод, что в случае МЦМ пороговое значение $BER=10^{-5}$ (при закрытии оптического канала) определяется значением Q-фактора $Q=4$.

7. Оценено влияние $\Delta\rho$ на качество передачи. Определена зависимость BER от $\Delta\rho$. При значениях $\Delta\rho > 2 \cdot 10^{-8}$ м происходит увеличение коэффициента ошибок цифрового оптического канала. Данное значение может служить рекомендацией для качества изготовления модуляторов на базе МЦМ

Список сокращений

- ВОСП - волоконно-оптические системы передачи
- ВОЛС - волоконно-оптические линии связи
- TDM - мультиплексирование с разделением по времени (Time-division multiplexing)
- WDM - спектральное уплотнение каналов (Wavelength Division Multiplexing)
- DWDM - плотное спектральное уплотнение каналов (Dense Wavelength Division Multiplexing)
- МЦМ - модулятор Маха-Цендера
- ОВ - оптическое волокно
- НТЛ - нейтронное трансмутационное легирование
- ОУ - оптический усилитель
- УУ - усилительный участок
- РУ - регенерационный участок
- ФКВ - фотонно-кристаллическое волокно
- ABX - амплитудно-выходные характеристики
- МСЭ - Международный Союз Электросвязи
- PMD - поляризационная модовая дисперсия (polarized mode dispersion)
- LED - светодиод (Light-emitting diode)
- ASE - усиленное спонтанное излучение (amplified spontaneous emission)
- OSA - анализатор оптического спектра (optical spectrum analyzer)
- ORR - коэффициент оптического отклонения (optical rejection ratio)
- OSNR - отношение сигнал/шум (optical signal-to-noise ratio)
- CU - вентиляторный блок (cooling unit)
- MSI - блок управления (management system interface)
- OPA - оптический предусилитель (optical pre-amplifier)
- OBA - оптический усилитель (optical booster amplifier)
- SCP - системный процессор (system control processor)
- MZM - модулятор Маха-Цендера (Mach-Zendera modulator)

ПРВ - плотность распределения вероятностей

BER - коэффициент ошибок (Bit error rate)

ИСВР - изотопическая сверхрешетка

МЛЭ - молекулярно-лучевая эпитаксия

Список литературы

1. Агравал, Г. Нелинейная волоконная оптика[Текст] / Пер. с англ. Под ред. П.В.Мамышева; - М.:Мир, 1996. -324 с.
2. Алексеев, Е.Б., Попов, А.Г., Попов, В.И. Волоконно-оптический коммутатор на интерферометрах Маха-Цендера [Текст] / Е.Б. Алексеев, А.Г. Попов, В.И. Попов // Телекоммуникации и транспорт. - 2011. - №8. - С.9-14.
3. Андреев, В.А., Бурдин, В.А., Попов, В.Б. Строительство и техническая эксплуатация волоконно-оптических линий связи: Учебник для вузов [Текст] / В.А. Андреев, В.А. Бурдин, В.Б.Попов; - М.: Радио и связь, 1995. - 200с.
4. Андреев, В.А., Бурдин, В.А., Попов, В.Б., Польшников, А.И. Строительство и техническая эксплуатация волоконно-оптических линий связи: Учебник для вузов [Текст] / В.А. Андреев, В.А. Бурдин, В.Б.Попов А.И. Польшников; - М.: Радио и связь, 1996. - 200с.
5. Айхлер, Ю., Айхлер Г. И. Лазеры. Исполнение, управление, применение [Текст] / Ю. Айхлер, Г. И. Айхлер; - М.: Техносфера,2008.-438с.
6. Бейли, Д., Райт, Э. Волоконная оптика. Теория и практика [Текст / Д. Бейли, Э. Райт; - М.: Кудиц-Образ, 2006. — 320 с.
7. Борисенко, В.Е., Воробьева, А.И., Уткина, Е.А. Нанoeлектроника [Текст] / В.Е. Борисенко, А.И. Воробьева, Е.А. Уткина; - М.: «Бином», 2009. - 223 с.
8. Величко, М.А., Наний, О.Е., Сусьян, А.А. Новые форматы модуляции в оптических системах связи [Текст] / М.А. Величко, О.Е. Наний, А.А. Сусьян; LIGHTWAVE Russian Edition, №4. - 2005. - С.21-30.

9. Вербовецкий, А.А. Основы проектирования цифровых оптоэлектронных систем связи [Текст] / А.А. Вербовецкий; - М.: Радио и связь, 2000. - 159 с.
10. Верещагин И.К., Кокин С.М., Никитенко В.А., Селезнев В.А., Серов Е.А. Физика твердого тела [Текст] / И.К. Верещагин, С.М. Кокин, В.А. Никитенко, В.А. Селезнев, Е.А. Серов; – М.: Высшая школа, 2001. - 236с.
11. Власов, Н.А. Нейтроны [Текст] / Н.А. Власов – М.: Наука, 1975. - 426 с.
12. Гаврилов, С.А., Белов, А.Н. Электрохимические процессы в технологии микро- и нанoeлектроники [Текст] / С.А. Гаврилов, А.Н. Белов; - М.: Высшее Образование, 2009. - 272 с.
13. Гаскевич, Е., Убайдулаев, Р. "PON-широкополосная мультисервисная сеть доступа" [Текст] / Е. Гаскевич, Р. Убайдулаев // ТелеМультиМедиа. - 2002.- №2(12), - С.29-32.
14. Гауэр, Дж. Оптические системы связи [Текст] / Пер. с англ. под ред. А.И. Ларкина; - М.: Радио и связь, 1989. — 504 с.
15. Герасименко, Н.Н., Пархоменко, Ю.Н. Кремний - материал нанoeлектроники [Текст] / Н.Н. Герасименко, Ю.Н. Пархоменко - М.: Техносфера, 2007. - 352 с.
16. Гончаров, В.Л., Липская, М.А. Техническая эксплуатация ВОЛС [Текст] / В.Л. Гончаров, М.А. Липская; - Алматы: КазАТК, 2012. - 158 с.
17. Гочжун Цао, Ин Ван. Наноструктуры и наноматериалы. Синтез, свойства и применение [Текст] / Пер. с англ./ Под ред. В.Б. Зайцев. - М.: Научный мир, 2012. -515 с.
18. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А.И. Гусев; - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. - 416 с.
19. Данилина, Т.И., Кагадей, В.А., Анищенко, Е.В. Технология кремниевой нанoeлектроники. Учебное пособие [Текст] / Т.И. Данилина, В.А. Кагадей, Е.В. Анищенко; - Т.: В-Спектр, 2011. - 263 с.

20. Дмитриев, А.Л. Полупроводниковые источники света для систем передачи и обработки информации [Текст] / А.Л. Дмитриев. - Учебное пособие. - СПб: СПбГУИТМО, 2006. - 48 с.
21. Дмитриева, С.А., Слепов, Н.Н. Волоконно-оптическая техника: История, достижения, перспективы. [Текст] / Под. ред. С.А. Дмитриева, Н.Н. Слепова; - М.: АО "ВОТ", Изд-во Connect, 2000. - 376 с.
22. Дмитриев, С.А., Слепов, Н.Н. Волоконно-оптическая техника: Современное состояние и перспективы [Текст] /С.А. Дмитриев, Н.Н. Слепов; - М.: ООО "Волоконно-оптическая техника", 2005. - 576 с.
23. Дональд, Дж.. Волоконная оптика [Текст] / Дж. Дональд; – М.: Лори, 1998.- 288с.
24. Дьяконов, В.П. Mathcad в математике: Справ [Текст] / В.П. Дьяконов; - М.: Горячая линия – Телеком, 2007. - 958с.
25. Журавлева, Л.М., Бухалкин, М.Ю., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Современные технологии в волоконно-оптических системах связи [Текст] / Л.М. Журавлева, М.Ю. Бухалкин, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Проектирование и технология электронных средств. - 2008. - №4.- С. 5-12.
26. Журавлева, Л.М., Бухалкин, М.Ю., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Применение фотонных кристаллов в современных системах передачи информации [Текст] / Л.М. Журавлева, М.Ю. Бухалкин, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды десятой научно-практической конференции “Безопасность движения поездов” – М.: МИИТ, 2008-С.VIII-3.
27. Журавлева, Л.М., Бухалкин, М.Ю., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Передача информации по волоконно-оптическим линиям связи [Текст] / Л.М. Журавлева, М.Ю. Бухалкин, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // “Обработка сигналов в системах наземной радиосвязи и оповещения” Материалы шестнадцатой межрегиональной научно-технической конференции, 2008 - С.127-131.
28. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Перспективы использования фотонно-кристаллического волокна в широкополосных сетях

доступа на базе технологии PON [Текст] / Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды научно-практической конференции “Наука МИИТа – Транспорт 2008” – М.: МИИТ, часть 2, 2008-С.VII-110.

29. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Повышение качества оптических устройств передачи информации с помощью нанотехнологий [Текст] / Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды десятой научно-практической конференции “Безопасность движения поездов” - М. МИИТ, 2009- С.VIII-1, VIII-2

30. Журавлева, Л.М., Новожилов, А.В., Кручинин, А.С. Математическое моделирование волновых процессов с помощью Mathcad [Текст] / Л.М. Журавлева, А.В. Новожилов, А.С. Кручинин // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 8-й международной научно-технической конференции. - Владимир.:ВГУ,2009.-С.98-99.

31. Журавлева, Л.М., Журавлев, О.Е., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Нанотехнология оптических устройств передачи информации [Текст] / Л.М. Журавлева, О.Е. Журавлев, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды 64-ой Научно-технической конференции – С-Петербург. 2009-С.142-144.

32. Журавлева, Л.М., Журавлев, О.Е., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Нанотехнология оптических устройств обработки информации [Текст] / Л.М. Журавлева, О.Е. Журавлев, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды 64-ой Научно-технической конференции – С-Петербург. 2009-С.144-146.

33. Журавлева, Л.М., Плеханов, В.Г. Ядерная нанотехнология низкоразмерных изотопически-смешанных структур [Текст] / Л.М. Журавлева, В.Г. Плеханов //Наноиндустрия. - 2009.- №4. - С.28-30.

34. Журавлева, Л.М., Змеева, А.А., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Совершенствование элементной базы оптоэлектронных устройств [Текст] / Л.М. Журавлева, А.А. Змеева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Международная научно-практическая конференция "Транспорт России: проблемы и перспективы развития БАМа": труды. - М. : МИИТ, 2010. - С.78-80.

35. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Повышение пропускной способности оптического волокна с помощью низкоразмерных изотопических структур [Текст] / Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды одиннадцатой научно-практической конференции “Безопасность движения поездов” –М.: МИИТ, 2010 - С.VIII-9.

36. Журавлева, Л.М., Плеханов, В.Г. Изотопическая нанотехнология низкоразмерных структур [Текст] / Л.М.Журавлева, В.Г. Плеханов // Нано и Микросистемная техника. - 2010. №9. С. 8-13.

37. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Нанотехнология оптических устройств обработки информации [Текст] / Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды 65-ой Научно-технической конференции посвящённая Дню Радио – С-Петербург. 2010-С.221-222

38. Журавлева, Л.М., Змеева, А.А., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Повышение эффективности волоконно-оптической связи с помощью изотопической нанотехнологии [Текст] / Л.М. Журавлева, А.А. Змеева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды одиннадцатой научно-практической конференции “Безопасность движения поездов” –М.: МИИТ, 2010. - С.VIII-10.

39. Журавлева, Л.М., Новожилов, А.В. Математическое моделирование волновых процессов в многослойном планарном волноводе [Текст] / Л.М. Журавлева, А.В. Новожилов // Труды 66-ой Научно-технической конференции посвящённая Дню Радио – С-Петербург. 2011 - С.145-147.

40. Журавлева, Л.М., Змеева, А.А., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Определение энергетических характеристик многослойного оптического волокна с помощью математического моделирования [Текст] / Л.М. Журавлева, А.А. Змеева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды двенадцатой научно-практической конференции “Безопасность движения поездов” –М.: МИИТ, 2011. - С.XIV-74.

41. Журавлева, Л.М., Змеева, А.А., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Повышение быстродействия модулятора с помощью изотопической нанотехнологии [Текст] / Л.М. Журавлева, А.А. Змеева, А.С. Кручинин, А.В.

Новожилов // Труды двенадцатой научно-практической конференции “Безопасность движения поездов” –М.: МИИТ, 2011 - С.XIV-72.

42. Журавлева, Л.М., Змеева, А.А., Новожилов, А.В. Нанотехнологии и волоконно-оптическая связь [Текст] / Л.М. Журавлева, А.А. Змеева, А.В. Новожилов // Мир транспорта. №4 – М.: МИИТ, 2011 С.30-37

43. Журавлева, Л.М., Новожилов, А.В. Математическое моделирование волновых процессов в многослойном планарном волноводе [Текст] / Л.М. Журавлева, А.В. Новожилов // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 9-й международной научно-технической конференции – Владимир: Изд-во Владим.гос.ун-та, 2011. - С. С.179-181т 2

44. Журавлева, Л.М., Плеханов, В.Г. Перспективы применения наноинженерии в телекоммуникационных системах [Текст] / Л.М. Журавлева, В.Г. Плеханов //Успехи наноинженерии: электроника, материалы, структуры. Под ред. Дж. Дэвиса, М. Томпсона.-М.: Техносфера, 2011.- С.473-491.

45. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С. Влияние нанотехнологий на эффективность оптического модулятора в системах DWDM [Текст] / Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 9-й международной научно-технической конференции. - Владимир.:ВлГУ, 2011.- С.238-240. т1.

46. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С., Змеева, А.А. Повышение эффективности волоконно-оптических систем передачи [Текст] / Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.А. Змеева // Мир транспорта. - 2012. - №2. -С.11-19.

9. Журавлева Л.М., Змеева А.А., Кручинин А.С., Новожилов А.В. Повышение эффективности волоконно-оптических линий связи за счет применения изотопических сверхрешеток [Текст] / Л.М. Журавлева, А.А. Змеева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды тринадцатой научно-практической конференции “Безопасность движения поездов” –М.: МИИТ, 2012. - С.VIII-10.

47. Журавлева, Л.М., Змеева, А.А., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Повышение пропускной способности волоконно-оптических систем передачи информации с помощью изотопических сверхрешеток [Текст] / Л.М. Журавлева,

А.А. Змеева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Электро-магнитные волны и электронные системы, №11 2012. - С.60-66.

48. Журавлева, Л.М., Новожилов, А.В., Кручинин, А.С., Логинов, Д.А. Проектирование изотопических сверхрешеток [Текст] / Л.М. Журавлева, А.В. Новожилов, А.С. Кручинин, Д.А. Логинов// Телекоммуникации, 2013. №7. - С.12-18.

49. Журавлева, Л.М., Новожилов, А.В., Кручинин, А.С. Повышение эффективности волоконно-оптических систем связи с помощью новых наноструктур и нанотехнологий [Текст] / Л.М. Журавлева, А.В. Новожилов, А.С. Кручинин // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 10-й международной научно-технической конференции. - Владимир.:ВлГУ, т. 1. - 2013. - С.136-139.

50. Засецкий, А.В., Иванов, А.Б., Постников, С.Д., Соколов, И.В. Контроль качества в телекоммуникациях и связи. Обслуживание, качество услуг, бизнес-управление. Часть I [Текст] / А.В. Засецкий, А.Б. Иванов, С.Д. Постников, И.В. Соколов; - М.: Syrus Systems. 2001. - 336 с.

51. Засецкий, А.В., Иванов, А.Б., Постников, С.Д., Соколов, И.В. Контроль качества в телекоммуникациях и связи. Обслуживание, качество услуг, бизнес-управление. Часть II [Текст] / А.В. Засецкий, А.Б. Иванов, С.Д. Постников, И.В. Соколов; - М.: Syrus Systems. 2000. - 376 с.

52. Зюко, А.Г., Кловский, Д.Д., Назаров, М.В., Финк, Л.М. Теория передачи сигналов [Текст] / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, М.В. Назаров, Л.М. Финк; - М.: Связь, 1980.- 287с.

53. Иванов, А.Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. [Текст] / А.Б. Иванов; - М.: Syrus Systems, 1999. - 672 с.

54. Иоргачев, Д.В., Бондаренко, О.В. Волоконно-оптические кабели и линии связи [Текст] / Д.В. Иоргачев, О.В. Бондаренко; - М.: Эко-Трендз, 2002. - 283 с.

55. Килин, С.Я. Квантовая информация [Текст] / С.Я. Килин // Успехи физических наук.-1999.-Т.169.- №5.-С. 507-527.

56. Кобаяси, Н. Введение в нанотехнологию [Текст] / Н.Кобаяси; - М.: Бином. Лаборатория знаний, 2008. - 136 с.
57. Кормилицын, О.П., Шукейло, Ю.А. Механика материалов и структур нано- и микроэлектроники [Текст] / О.П. Кормилицын, Ю.А. Шукейло; - М.: Академия, 2008. - 224 с.
58. Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Компьютерное моделирование волновых процессов в планарном волноводе [Текст] / А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды научно-практической конференции Неделя науки-2009 “Наука МИИТа -Транспорту” в двух частях, 2009-С. II-63-64.
59. Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Нанотехнология оптических волноводов [Текст] / А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды научно-практической конференции Неделя науки-2009 “Наука МИИТа -Транспорту” в двух частях, 2009-С. II-97.
60. Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Нанотехнология оптических устройств передачи и обработки информации [Текст] / А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи НТТМ – 2010.
61. Кручинин, А.С., Новожилов А.В. Нанотехнология оптических устройств передачи и обработки информации [Текст] / А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Представление на премию Президента Российской Федерации в области науки и инноваций для молодых ученых за 2010 год
62. Кручинин, А.С. Оптимизация форматов оптической модуляции для систем DWDM[Текст] /А.С. Кручинин // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 9-й международной научно-технической конференции. - Владимир.:ВлГУ, 2011.-С.179-181т 2.
63. Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Методика повышения быстродействия оптического модулятора Маха-Цендера [Текст] / А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды научно-практической конференции Неделя науки-2012.- С.III-70.

64. Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Новая технология изготовления фотонно-кристаллического волокна [Текст] / А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Конкурс «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК»)
65. Ландсберг, Г.С. Оптика [Текст] / Г.С. Ландсберг; - М.: «Физматлит», 2006. - 848с.
66. Лебедев, А.И. Физика полупроводниковых приборов [Текст] / А.И. Лебедев; – М.: Физматлит, 2008.-487с.
67. Мальцев, П.П. Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника [Текст] / П.П. Мальцев; - М.: Техносфера, 2006. - 152 с.
68. Мартинес-Дуарт, Дж.М., Мартин-Палма, Р.Дж., Агулло-Руеда, Ф. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники [Текст] / Дж.М. Мартинес-Дуарт, Р.Дж. Мартин-Палма, Ф. Агулло-Руеда; - М.: «Техносфера», 2007. - 367 с.
69. Мурадян, А.Г., Иноземцев В.П. Оптические кабели многоканальных линий связи [Текст] / А.Г. Мурадян; -М.: Радио и связь, -1987. - 200 с.
70. Мухин, К.Н. Экспериментальная ядерная физика [Текст] / К.Н. Мухин; – М., Краснодар, Лань, 2008.-Т.2.- 318с.
71. Нильсон, М., Чанг, И. Квантовые вычисления и квантовая информация [Текст] / М. Нильсон, И. Чанг; - М.: Мир, 2006.-822с.
72. Новожилов, А.В. Магистральная сеть оперативно – технологической связи [Текст] / А.В. Новожилов // Труды научно-практической конференции Неделя науки-2010 “Наука МИИТа -Транспорту” в двух частях, 2010. - С. III-97.
73. Новожилов, А.В., Логинов, Д.А. Методика исследования фотонно-кристаллического волокна [Текст] / А.В. Новожилов, Д.А. Логинов // Труды научно-практической конференции Неделя науки-2012 “Наука МИИТа -Транспорту” в двух частях, 2012.- С.III-71.
74. Потапов, В.Т. Фотонные кристаллы и оптические волокна на их основе[Текст] / В.Т. Потапов // Фотон-экспресс. - 2003.- №1. -С. 7-10.
75. Пул, Ч –мл., Оуэнс, Ф. Нанотехнологии [Текст] / Ч. Пул - мл., Ф. Оуэнс; – М.: Техносфера, 2006.- 334с

76. Скляров О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи [Текст] / О.К. Скляров; – М.: Солон-Пресс, 2004.- 261с.
77. Скляров, О.К. Современные волоконно-оптические системы передачи [Текст] / О.К. Скляров; - М.:Салон-Р, 2001. - 237с.
78. Слепов, Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи [Текст] / Н.Н. Слепов; – М.: Радио и связь, 2000. - 468с.
79. Слепов, Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи (АТМ, РДН, SDH, SONET и WDM) [Текст] / Н.Н.Слепов; - М.: "Радио и связь", 2-е исправленное изд., 2003. - 468 с.
80. Слепов, Н.Н. Оптические волновые конверторы и модуляторы [Текст] / Н.Н.Слепов; - М.: Электроника: НТБ., 2000. - №6 - С.6-10.
81. Смирнов, И.Г. Структурированные кабельные системы [Текст] / И.Г. Смирнов; - М.: Эко-Трендз, 1998. - 179 с.
82. Смирнов, Л.С., Соловьев, С.П., Стась, В.Ф., Харченко, В.А. Легирование полупроводников методом ядерных реакций [Текст] / Л.С. Смирнов, С.П. Соловьев, В.Ф. Стась, В.А. Харченко; - Новосибирск.:Наука, 1981. - 182 с.
83. Снайдер, А., Лав, Дж. Теория оптических волноводов [Текст] / А. Снайдер, Дж. Лав; - М.: «Радио и связь», 1987. - 655 с.
84. Строшио, М., Дутта, М. Фононы в наноструктурах [Текст] / М. Строшио, М. Дутта; - М.:ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 320 с.
85. Строшио, М., Дута, М. Фононы в наноструктурах [Текст] / М. Строшио, М. Дута; - М.: Физматлит 2-е издание, 2008.- 319 с.
86. Убайдулаев, Р.Р. Волоконно-оптические сети [Текст] / Р.Р. Убайдулаев; - М.: Эко-Трендз, 2-е стереотипное изд. 2002. - 269 с.
87. Фостер, Л. Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности [Текст] / Л.Фостер; - М.: Техносфера, 2008 г. - 352 с.
88. Фриман, Р. Волоконно-оптические системы связи [Текст] / Р.Фриман; - М.: Техносфера, 2006. - 495 с.
89. Чаплыгин, Ю.А. Нанотехнологии в электронике [Текст] / Под ред. Ю.А. Чаплыгина; - М.: Техносфера, 2005. - 446с.

90. Шлимак, И.С. Нейтронное трансмутационное легирование полупроводников: наука и приложение [Текст] / И.С.Шлимак // Физика твердого тела, 1999. Т. 41, вып.5.- С.794-798.
91. Шмалько, А.В. Цифровые сети связи: основы планирования и построения [Текст] / А.В. Шмалько; - М.: Эко-Трендз, 2001. - 283 с.
92. Щука, А.А. Нанoeлектроника [Текст] / А.А. Щука; –М.: Физматкнига, 2007. - 463с.
93. Cardona, M., Thewalt, M.L.W. Isotope effect on optical spectra of semiconductor [Текст] / M. Cardona, M.L.W. Thewalt // Rev. Mod. Phys. 77, October 2005. - P. 1173-1224.
94. ITU-T Recommendation G.651. Characteristics of a 50/125 μm multimode graded index optical fibre cable, 1998.
95. ITU-T Recommendation G.652. Characteristics of a single-mode optical fibre and cable, 2009.
96. ITU-T Recommendation G.653. Characteristics of a dispersion-shifted, single-mode optical fibre and cable, 2010
97. ITU-T Recommendation G.655. Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable, 2009.
98. ITU-T Recommendation G.983.1. Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON), 2005
99. ITU-T Recommendation G.983.3. A broadband optical access system with increased service capability by wavelength allocation , 2001
100. ITU-T Recommendation O.201. Q-factor test equipment to estimate the transmission performance of optical channels, 2003.
101. Kojima, T., Nebashi, R., Itoha, K. M., Shiraki, Y. Growth and characterization of $^{28}\text{Si}/^{30}\text{Si}$ isotope superlattices. [Текст] / T. Kojima, R. Nebashi, K. M. Itoha, Y. Shiraki //Applied physics letters volume 83, number 12 22 september 2003applied physics letters. Volume 83, number 12, 2003. - P.2318-2320.
102. Karaiskaj, D., Thewalt, M.L.W., Ruf, T., Cardona, M. Photoluminescence of Isotopically Purified Silicon: How Sharp are Bound Exciton Transitions? [Текст] / D.

Karaiskaj, M.L.W. Thewalt, T Ruf, M. Cardona //Phys.Rev.Lett. Vol.86. Num.26, 2001-P. 6010-6013.

103. Ladd, T. D., Goldman, J. R., Yamaguchi, F., Yamamoto, Y All-Silicon Quantum Computer [Текст] / T. D. Ladd, J. R. Goldman, F. Yamaguchi, and Y. Yamamoto // Physical review letters 1 july. volume 89, number 1, 2002. - P. 17901-1 – 17901-4.

104. Shimizu, Y., Kohei. M. Growth and characterization of short-period silicon isotope superlattices [Электронный ресурс] / Y. Shimizu., M. Kohei. //Available online 9 November 2005: Available online at www.sciencedirect.com.

105. Tsoi, S., Alawadhi, H., Lee, X. Physical Review [Текст] / S. Tsoi, H. Alawadhi, X. Lee; - Vol. B70, 2004. - P.193 - 201.

Акт об использовании результатов кандидатской работы в ООО "Наука-Связь"

УТВЕРЖДАЮ:
Технический директор ООО «Наука-Связь»
Петров А.А.
» _____ 2014 г.



АКТ

Об использовании результатов кандидатской диссертационной работы
Кручинина А.С. на тему «Повышение пропускной способности
волоконно-оптических систем передачи информации за счет использования
новых наноструктур»

Настоящим актом комиссия в составе: Бабенко С.В., Мещанинова И.В. и Щелкунова М.А. подтверждает, что результаты кандидатской диссертационной работы Кручинина А.С. на тему «Повышение пропускной способности волоконно-оптических систем передачи информации за счет использования новых наноструктур» были использованы ООО "Наука-Связь" при проектировании и строительстве сетей связи компании.

В частности:

1. Использованы результаты анализа основных факторов, влияющих на пропускную способность и скорость передачи информации;
2. Использована предложенная методика оценки влияния качества изготовления на оптические потери;
3. Использованы результаты экспериментальных данных зависимостей уровней мощности от числа каналов.

Члены комиссии:

Начальник управления эксплуатации

Начальник управления развития

Начальник отдела транспортной сети



Бабенко С.В.



Мещанинов И.В.



Щелкунов М.А.

Приложение Б.

**Акт об использовании результатов кандидатской работы в ООО НПП
"АКСИОН-РТИ"**



**ООО НПП «АКСИОН-РТИ»
Радио, Телевидение, Информатика**

Научно-производственное предприятие

Россия, 109004, Москва, Пестовский пер., д. 16, стр. 2, тел.:/факс (495) 225-13-00, mail@axion-rti.ru

11.06.2014 г. № 50

Акт

об использовании результатов диссертации Кручинина А.С. на тему
«Повышение пропускной способности волоконно-оптических систем передачи
за счёт использования новых наноструктур».

Настоящим актом комиссия в составе:

1. Директор к.т.н. с.н.с. Сычёв Б.В.
2. Главный инженер Яблокова Л.А.
3. Главный специалист Саввотин А.Д.

подтверждает, что результаты исследований диссертации «Повышение пропускной способности волоконно-оптических систем передачи за счёт использования новых наноструктур» будут использованы при проектировании сети поездной радиосвязи.

Председатель комиссии: Б.В. Сычев

Члены комиссии:



Л.А. Яблокова

А.Д. Саввотин

Приложение В.

**Акт о внедрении в учебный процесс результатов кандидатской работы в
МГУПС (МИИТ) «Московский государственный университет путей
сообщения»**

УТВЕРЖДАЮ:

Первый проректор-
проректор по учебной работе
Московского государственного
университета путей сообщения

д.т.н., профессор

В.В. Виноградов

2014 г.



АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертационной работы Кручинина А.С. на тему «Повышение пропускной способности волоконно-оптических систем передачи информации за счет использования новых наноструктур» в учебном процессе на кафедре «Железнодорожная автоматика, телемеханика и связь»

Настоящим актом комиссия в составе: декана факультета «Транспортные средства» РОАТ МИИТ к.т.н. Тарадина Н.А., заведующего кафедрой, д.т.н., профессора Горелика А.В. и доцента кафедры, к.т.н., доцента Орлова А.В. подтверждает, что результаты кандидатской диссертационной работы Кручинина А.С. на тему «Повышение пропускной способности волоконно-оптических систем передачи информации за счет использования новых наноструктур» были использованы в учебном процессе на кафедре «Железнодорожная автоматика, телемеханика и связь».

Разработанные методика расчета влияния параметров оптического модулятора на качество оптического сигнала и метод повышения канальной скорости передачи информации за счет совершенствования технологий использованы в материалах лекций и практикума по дисциплине "Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства" для направления

подготовки бакалавриата «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», а также в дипломном проектировании.

Члены комиссии:

Декан факультета «Транспортные средства»,
к.т.н.



Тарадин Н.А.

Заведующий кафедрой
«Железнодорожная автоматика,
телемеханика и связь»,
д.т.н., профессор



Горелик А.В.

доцент кафедры «Железнодорожная автоматика,
телемеханика и связь», к.т.н., доцент



Орлов А.В.

Программа расчета коэффициента распространения β в однослойном ОВ

$$n1 := 1.44 \quad q(\beta, \lambda1) := \sqrt{\beta^2 - \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda1}\right)^2 \cdot n1^2} \quad h(\beta, \lambda1, dn) := \sqrt{\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda1}\right)^2 \cdot (n1 \cdot dn)^2 - \beta^2}$$

$$\pi(p1, p2, N, \lambda1, dn, db) :=$$

```

 $\beta \leftarrow \frac{2 \cdot \pi}{\lambda1} \cdot n1 + 0.00001$ 
 $y1 \leftarrow 2$ 
 $x1 \leftarrow 0$ 
while  $\beta < \frac{2 \cdot \pi}{\lambda1} \cdot dn \cdot n1$ 
   $y \leftarrow 1$ 
   $x2 \leftarrow 0$ 
   $y2 \leftarrow 0$ 
   $i \leftarrow 1$ 
   $a_{1,1} \leftarrow 1$ 
   $a_{2,1} \leftarrow \frac{-q(\beta, \lambda1)}{h(\beta, \lambda1, dn)}$ 
  while  $i < N$ 
     $f1 \leftarrow a_{1,i} \cdot \left( \cos(h(\beta, \lambda1, dn) \cdot p2) + \frac{h(\beta, \lambda1, dn)}{q(\beta, \lambda1)} \cdot \sin(h(\beta, \lambda1, dn) \cdot p2) \right)$ 
     $f2 \leftarrow a_{2,i} \cdot \left( \frac{h(\beta, \lambda1, dn)}{q(\beta, \lambda1)} \cdot \cos(h(\beta, \lambda1, dn) \cdot p2) - \sin(h(\beta, \lambda1, dn) \cdot p2) \right)$ 
     $f3 \leftarrow a_{1,i} \cdot \left( \cos(h(\beta, \lambda1, dn) \cdot p2) - \frac{h(\beta, \lambda1, dn)}{q(\beta, \lambda1)} \cdot \sin(h(\beta, \lambda1, dn) \cdot p2) \right)$ 
     $f4 \leftarrow a_{2,i} \cdot \left( -\frac{h(\beta, \lambda1, dn)}{q(\beta, \lambda1)} \cdot \cos(h(\beta, \lambda1, dn) \cdot p2) - \sin(h(\beta, \lambda1, dn) \cdot p2) \right)$ 
     $f5 \leftarrow a_{1,i} \cdot \left( \frac{q(\beta, \lambda1)}{h(\beta, \lambda1, dn)} \cdot \cos(h(\beta, \lambda1, dn) \cdot p2) + \sin(h(\beta, \lambda1, dn) \cdot p2) \right)$ 
     $f6 \leftarrow a_{2,i} \cdot \left( \cos(h(\beta, \lambda1, dn) \cdot p2) - \frac{q(\beta, \lambda1)}{h(\beta, \lambda1, dn)} \cdot \sin(h(\beta, \lambda1, dn) \cdot p2) \right)$ 
     $f7 \leftarrow a_{1,i} \cdot \left( \frac{q(\beta, \lambda1)}{h(\beta, \lambda1, dn)} \cdot \cos(h(\beta, \lambda1, dn) \cdot p2) - \sin(h(\beta, \lambda1, dn) \cdot p2) \right)$ 
     $f8 \leftarrow a_{2,i} \cdot \left( -\cos(h(\beta, \lambda1, dn) \cdot p2) - \frac{q(\beta, \lambda1)}{h(\beta, \lambda1, dn)} \cdot \sin(h(\beta, \lambda1, dn) \cdot p2) \right)$ 
     $a_{1,i+1} \leftarrow \frac{e^{-q(\beta, \lambda1) \cdot p1}}{2} (f1 + f2) + \frac{1}{2e^{-q(\beta, \lambda1) \cdot p1}} (f3 + f4)$ 
     $a_{2,i+1} \leftarrow \frac{e^{-q(\beta, \lambda1) \cdot p1}}{2} (f5 + f6) - \frac{1}{2e^{-q(\beta, \lambda1) \cdot p1}} (f7 + f8)$ 
     $i \leftarrow i + 1$ 
   $f \leftarrow \frac{a_{1,N} - \frac{h(\beta, \lambda1, dn)}{q(\beta, \lambda1)} \cdot a_{2,N}}{\frac{h(\beta, \lambda1, dn)}{q(\beta, \lambda1)} \cdot a_{1,N} + a_{2,N}}$ 
   $x2 \leftarrow 1$  if  $\tan(h(\beta, \lambda1, dn) \cdot p2) - f \geq 0$ 
   $y2 \leftarrow 1$  if  $\frac{\tan(h(\beta, \lambda1, dn) \cdot p2)}{f} > 0$ 

```

```

if y = 1
  a0,0 ← β
  β ← 1 +  $\frac{2 \cdot \pi}{\lambda 1} \cdot dn \cdot n1$ 
x1 ← x2
y1 ← y2
β ← β + db
a

```

Приложение Д.

Программа для построения графика зависимости напряженности электрического поля

```

n1 := 1.44   k1 := 0.45   q(β, λ1) :=  $\sqrt{\beta^2 - \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda 1}\right)^2 \cdot n1^2}$    h(β, λ1, dn) :=  $\sqrt{\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda 1}\right)^2 \cdot (n1 \cdot dn)^2 - \beta^2}$ 

dn := 2   N := 5   db := 100   ρ1 :=  $\frac{1.31}{4 \cdot n1 \cdot k1} \cdot 10^{-6}$    ρ2 :=  $\frac{1.31}{4 \cdot n1 \cdot dn \cdot k1} \cdot 10^{-6}$ 

λ1 := 1.31 · 10-6   r := r(ρ1, ρ2, N, λ1, dn, db)

β := r0,0   h := h(β, λ1, dn)   q := q(β, λ1)

K(h, q, r, N, ρ1, ρ2) :=
  i ← 1
  while i < N
    a1,1 ←  $\frac{r_{1,i} \left( \cos(h \cdot \rho 2) + \frac{h}{q} \cdot \sin(h \cdot \rho 2) \right) + r_{2,i} \left( \frac{h}{q} \cdot \cos(h \cdot \rho 2) - \sin(h \cdot \rho 2) \right)}{2}$ 
    a1,2 ←  $\frac{r_{1,i} \left( \cos(h \cdot \rho 2) - \frac{h}{q} \cdot \sin(h \cdot \rho 2) \right) + r_{2,i} \left[ -\left( \frac{h}{q} \cdot \cos(h \cdot \rho 2) \right) - \sin(h \cdot \rho 2) \right]}{2 \cdot e^{-q \cdot \rho 1}}$ 
    i ← i + 1
  a

```

$K := K(h, q, r, N, \rho 1, \rho 2)$

$f(x, N, r, K, q, h, \rho 1, \rho 2) :=$

```

a ← e-q · x if x > 0
a ← (r1,N · cos(h · ρ2) - r2,N · sin(h · ρ2)) · eq · [x + [N · ρ2 + ρ1 · (N-1)]] if x < -[N · ρ2 + ρ1 · (N-1)]
i ← 2
a ← r1,1 · cos(h · x) + r2,1 · sin(h · x) if -ρ2 ≤ x ≤ 0
while i ≤ N
  a ← Ki-1,1 · eq · [x + (i-1) · ρ2 + (i-2) · ρ1] + Ki-1,2 · e-q · [x + (ρ1 + ρ2) · (i-1)] if -[(ρ1 + ρ2) · (i-1)] ≤ x ≤ -[(i-1) · ρ2 + (i-2) · ρ1]
  a ← r1,i · cos[h · x + [(ρ1 + ρ2) · (i-1)]] + r2,i · sin[h · x + [(ρ1 + ρ2) · (i-1)]] if -[i · ρ2 + (i-1) · ρ1] ≤ x ≤ -[(ρ1 + ρ2) · (i-1)]
  i ← i + 1
a

```

Программа для определения длины волны настройки оптического фильтра

```

fs := |  $\lambda_2 \leftarrow 1.310 \cdot 10^{-6}$ 
      |  $N1 \leftarrow 0$ 
      |  $dp \leftarrow 0$ 
      | while  $N1 \leq 100$ 
      |   |  $y \leftarrow 0$ 
      |   | while  $y = 0$ 
      |   |   | if  $\tau(p1 + dp, p2 - dp, N, \lambda_2, dn, 0.1) > 0.05$ 
      |   |   |   |  $y \leftarrow 1$ 
      |   |   |   |  $a_{0,N1} \leftarrow \lambda_2$ 
      |   |   |   |  $a_{1,N1} \leftarrow dp$ 
      |   |   |  $\lambda_2 \leftarrow \lambda_2 - 0.1 \cdot 10^{-10}$ 
      |   |  $\lambda_2 \leftarrow a_{0,N1}$ 
      |   |  $N1 \leftarrow N1 + 1$ 
      |   |  $dp \leftarrow N1 \cdot 0.1 \cdot 10^{-9}$ 
      | a

```