

*На правах рукописи*

**САЛИХОВ Айдар Илдарович**

**РАЗРАБОТКА ПОЛНОСТЬЮ ОПТИЧЕСКОГО  
ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ПРОЗРАЧНЫХ  
НАНОСТРУКТУРНЫХ СТЕКОЛ ЛИТИЕВОЙ ГРУППЫ ДЛЯ  
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СВЯЗИ**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети  
и устройства телекоммуникаций

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

УФА – 2008

Работа выполнена на кафедре “Телекоммуникационные системы”  
Уфимского государственного авиационного технического университета

Научный руководитель: д-р техн. наук, проф.  
Султанов Альберт Ханович

Официальные оппоненты: д-р техн. наук, проф.  
Морозов Олег Геннадьевич  
канд. техн. наук  
Бурдин Антон Владимирович

Ведущая организация – Учреждение Российской академии наук  
Институт систем обработки изображений  
РАН

Защита диссертации состоится “5” сентября 2008 г.  
в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д-212.288.07 при  
Уфимском государственном авиационном техническом университете по адре-  
су: 450000, г. Уфа, ул. К.Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного  
авиационного технического университета.

Автореферат разослан “    ” июля 2008 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д-р техн. наук, проф.



С.С. Валеев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Волоконно-оптические технологии являются неотъемлемой частью современных систем телекоммуникаций. Как известно, основными достоинствами полностью оптических сетей связи являются их высокая пропускная способность и высокая защищенность при передаче данных с их помощью.

Анализ современного состояния средств коммутации в волоконно-оптических системах передачи выявил следующие основные типы оптических коммутаторов: механические оптические коммутаторы, электрооптические, термооптические, оптоэлектронные на основе SOA (Semiconductor Optical Amplifier), интегральные активно-волноводные, на фотонных кристаллах, на многослойных световодных жидкокристаллических матрицах, на интегральных схемах с набором матриц оптоэлектронных вентилях, связанных оптическим лучом. Наиболее быстродействующими среди них являются электрооптические коммутаторы, работающие на принципе изменения показателя преломления рабочей среды под воздействием внешнего электрического поля. Время их переключения составляет порядка 10–100 пс.

В настоящее время широкое распространение получили полностью оптические сети (All Optical Networks, AON-сети). Главным достоинством AON-сетей является отсутствие электронных компонентов осуществляющих коммутацию, фильтрацию и перегруппирование оптических сигналов. Следовательно, AON-сети свободны от недостатков, присущих электронным компонентам. Таким образом, разработка высокоскоростного полностью оптического переключателя, время переключения которого на порядок ниже длительности передаваемых битов, является актуальной научно-технической задачей.

Поставленная в работе задача в определённой степени является задачей организации метода горячего резервирования для сетей высоких уровней (STM-64, STM-256 и выше), длительность информационных импульсов в которых менее 100 пс. Известные оптические коммутаторы не способны обеспечивать переключение каналов без потери информационных битов при вводе в эксплуатацию последних и, кроме того, требуют электронной системы управления.

Данная работа посвящена разработке нелинейного оптического переключателя (Nonlinear optical switch, NOS) для полностью оптических телекоммуникационных систем. В качестве решения задачи управления переключением, предлагается использование эффекта изменения значения показателя преломления прозрачных наноструктурных материалов (НСМ), получаемых методами интенсивной пластической деформации.

**Цель работы.** Разработка оптического переключателя для волоконно-оптических сетей связи, в основе функционирования которого используется нелинейное изменение показателя преломления рабочей среды переключателя,

а также метода подключения предлагаемого устройства в сегменте телекоммуникационной сети для эффективного использования его технических возможностей.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие задачи:

1. Разработка высокоскоростного оптического переключателя, управляемого изменением показателя преломления прозрачного оптического материала с помощью дополнительного излучения, либо изменением параметров передаваемого сигнала, позволяющего производить переключение за время, сравнимое со временем релаксации вещества;

2. Разработка конструкции устройства сопряжения разнотипных волокон на основе оптического волокна с новым специализированным профилем показателя преломления, предназначенного для одновременной подачи в линию информационного сигнала и сигнала накачки и управления переключением в сегменте волоконно-оптической сети;

3. Разработка методики расчета эффективности работы оптического переключателя, учитывающей конструкционные особенности модели устройства и позволяющей оценить показатели помехоустойчивости сети;

4. Разработка методов подключения оптического переключателя к сегменту волоконно-оптической системы передачи, обеспечивающих резервирование полностью оптическим способом.

**Методы исследований.** В работе использованы положения теории линейной и волноводной оптики, дифференциального и интегрального исчисления. Применены методы математического моделирования, в том числе компьютерного. Проведён натурный эксперимент на созданном научно-исследовательском стенде. Для оценки эффективности предлагаемых моделей использовались результаты численного эксперимента.

**Основные научные результаты, выносимые на защиту:**

1. Метод создания оптического переключателя, позволяющий производить переключения на скоростях сравнимых с временем релаксации вещества.

2. Конструкция устройства сопряжения разнотипных волокон и специальное многослойное оптическое волокно, предназначенные для одновременной передачи информационного сигнала и сигнала накачки с минимальным влиянием друг на друга.

3. Методика оценки эффективности работы переключателя на основе определения точности перенаправления коммутируемого сигнала.

4. Методы подключения оптического переключателя к сегменту волоконно-оптической системы передачи, обеспечивающие резервирование полностью оптическим способом.

**Научная новизна результатов:**

1. Разработан оптический переключатель, функционирующий на основе обнаруженного, ранее не известного, скачкообразного изменения показателя преломления прозрачного наноструктурного материала, получаемого интенсивным кручением под высоким давлением, управляемый дополнительным световым потоком высокой интенсивности, либо изменением параметров передаваемого информационного сигнала, позволяющий снизить время переключения до времен релаксации вещества (1 – 10 пс);

2. Разработано устройство сопряжения, предназначенное для одновременной подачи в линию информационного сигнала и сигнала накачки, и позволяющее организовать их доставку до области расположения оптического переключателя в сегменте волоконно-оптической сети с минимальным взаимным влиянием, достигаемым пространственным разделением сигналов за счет создания специфического профиля показателя преломления нового оптического волокна;

3. Предложена методика расчета эффективности работы оптического переключателя, учитывающая конструкционные особенности модели устройства и позволяющая оценить показатели помехоустойчивости сети;

4. Разработаны методы подключения оптического переключателя (NOS) к сегменту волоконно-оптической системы передачи, первый позволяет обеспечить горячее резервирование, а второй – производить ручное переключение каналов по требованию оператора, полностью оптическим способом.

**Обоснованность и достоверность результатов диссертации.** Обоснованность результатов, полученных в работе, базируется на использовании апробированных научных положений и методов исследования, согласованности экспериментальных результатов с теоретическими результатами.

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается результатами проведенных измерительных и численных экспериментов.

**Практическая значимость результатов.** Снижение времени коммутации оптического сигнала до 1 пс при горячем резервировании, ведет к уменьшению потерь информационных битов и уменьшению сбоев телекоммуникационной системы в условиях эксплуатации, работающей на высоких скоростях передачи данных (STM-64, STM-256 и выше), при обеспечении достоверности и качества передачи информации на базе разработанных подходов и методов, направленных на создание полностью оптического метода переключения.

**Апробация работы.** Основные научные и практические результаты работы обсуждались на пятой международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», Самара, 2004; третьей международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов», Н.Новгород, 2004; третьей международной научно-технической конференции «Оптические технологии в телекоммуникаци-

ях», Уфа, 2005; восьмой международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», Уфа, 2007; IX Международной научно-технической конференции «Computer Science and Information Technologies» Уфа – Красноуфольск, 2007; научно-технических встречах в Дрезденском техническом университете (Дрезден, Германия) в 2006, 2007; а также на семинарах кафедры «Телекоммуникационные системы» УГАТУ.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 9 печатных работ (в том числе 2 статьи в рецензируемых научных журналах из списка ВАК), 5 докладов в сборниках трудов конференций, список которых приведен в конце автореферата.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Содержит 141 стр. машинописного текста, 61 рисунок, список использованной литературы из 53 наименования, приложения 2 стр.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулирована основная цель работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен анализ современного состояния волоконно-оптических телекоммуникационных систем с полностью оптической коммутацией, обосновывающий постановку задачи диссертационной работы. Выполнен анализ существующих типов оптических коммутаторов. Кратко рассмотрены принципы их функционирования и приведены условия их применения. Показано, что полностью оптические сети связи являются перспективным направлением развития телекоммуникационных систем. Установлено, что наиболее применяемым на сегодняшний день способом коммутации оптического сигнала является перенаправление входящего излучения за счет изменения показателя преломления рабочей среды под действием электрооптических эффектов различной природы. Проведенный анализ оптических коммутаторов показал, что самыми быстродействующими являются электрооптические коммутаторы, функционирующие за счет изменения показателя преломления среды под воздействием создаваемого электрического поля в конденсаторе. Время переключения этих коммутаторов составляет 10-100 пс. Однако, переход на высокие скорости передачи данных требует разработки высокоскоростных оптических переключателей, время переключения которых должно быть на порядок ниже длительности передаваемых информационных битов, т.е. порядка 2,5-10 пс. Проведенный анализ показал потенциальную эффективность применения нелинейного изменения показателя преломления оптического материала под воздействием внешнего оптического излучения, и что данный эффект позволяет реализовать оптический переключатель с указанным временем коммутации.

Известно, что вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна

(ВРМБ) и Рамановское рассеяние (комбинационное) (ВКР) ограничивают мощность светового потока, управляющего переключением. По этой причине требуется поиск новых оптических материалов, обладающих иными оптическими характеристиками (в частности более высокой пороговой мощностью проявления ВРМБ и ВКР).

С целью обнаружения новых оптических характеристик материалов в работе ставится задача разработки и исследования новых наноструктурных материалов, получаемых методами интенсивного кручения под высоким давлением.

Показано, что разработка нового подхода к созданию полностью оптического высокоскоростного переключателя, математическое описание процессов распространения оптических сигналов в деформированных направляющих средах и разработка конструкции переключателя, предназначенного для коммутации передаваемого сигнала, является актуальной научно-технической задачей.

**Во второй главе** представлено решение задачи использования новых наноструктурных материалов при проектировании компонентов АОН-сетей, а также приведены результаты исследований оптических характеристик этих материалов на разработанном исследовательском стенде.

В качестве исходного материала, подвергаемого деформационному изменению, предложено использование прозрачного ситалла. Ситаллы – это стеклокристаллические материалы, получаемые направленной кристаллизацией стекол литиевых групп при их термической обработке. Состоят из двух характерных фаз: кристаллитной и аморфной областей. Количество кристаллитных областей в ситалле может составлять от 70 до 95 % (по объему).

При переводе материала в наноструктурное состояние, в нем формируются напряженные зоны с избыточной энергией. За счет этого деформируются электронные оболочки оптических электронов кристаллической структуры. Появление новых свойств электронов влечет за собой изменение макроскопических характеристик среды, в том числе и оптических, пропорционально механическим деформациям.

Обработка материала пластической деформацией методом кручения под высоким давлением производилась в “Институте проблем сверхпластичности материалов РАН” (ИПСМ РАН), г. Уфа. В ходе экспериментов установлены оптимальные режимы обработки для сохранения оптической прозрачности материалов. Для исследования оптических характеристик материалов в новом качественном состоянии реализована схема интерферометра Маха-Цандера на волоконно-оптических компонентах и выполнено исследование изменения:

- показателя преломления материала в зависимости от длины волны полезного сигнала  $n(I_{signal})$  образцов до и после обработки пластической деформацией;
- показателя преломления образцов в зависимости от уровня мощности

сигнала накачки  $n(P_{\text{пит}})$  в образцах до и после обработки пластической деформацией, при значении длины волны полезного сигнала в области 1550 нм и длинах волн накачки 980 нм и 1546 нм.

Исследования выполнены в Дрезденском техническом университете (Германия). Определение показателя преломления вещества в интерферометре Маха-Цандера основано на измерении изменения разности фаз между двумя интерференционными минимумами (максимумами) (FSR – Free Spectral Range). Все результаты измерений были получены при неизменных условиях начальных настроек схемы. На рис. 1 приведен пример изменения интерференционной картины, получаемого при помещении исследуемого образца в одно из плеч интерферометра.

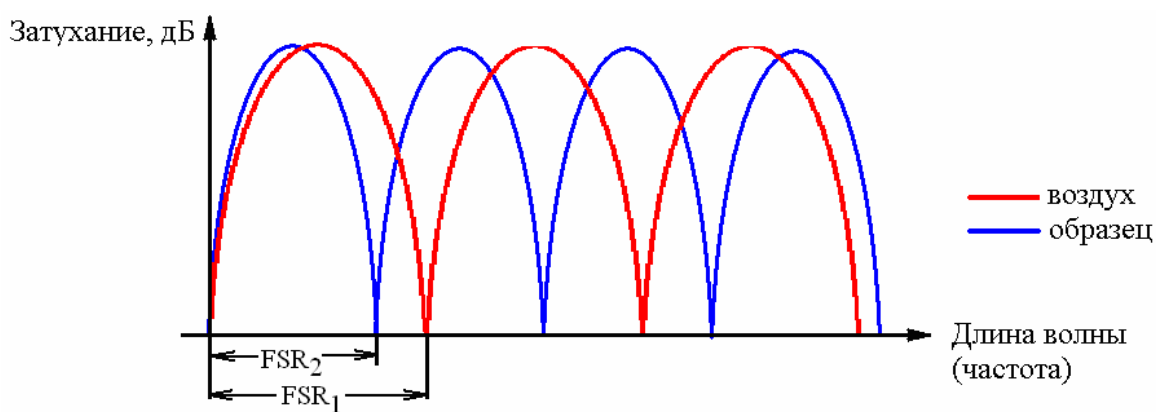


Рисунок 1 – Изменение интерференционной картины на выходе схемы

Показатель FSR определяется как:

$$FSR = \frac{c}{n \cdot L}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света,  $n \cdot L$  – оптическая разность хода лучей.

По результатам первых измерений было установлено, что установка чувствительна к любым даже самым незначительным механическим воздействиям. Для повышения точности измерений, в программном пакете Labview 8.0., была реализована программа для автоматизации эксперимента. Первоначальные настройки схемы настраивались на значение FSR в 100 ГГц.

Для вычисления показателя преломления образцов получено выражение:

$$n_{\text{сит}} = \frac{c}{d} \left( \frac{|FSR_1 - FSR_2|}{FSR_2 \cdot FSR_1} \right) + 1. \quad (2)$$

где  $n_{\text{сит}}$  – показатель преломления образца из ситалла,  $FSR_1$  – значение FSR без образца,  $FSR_2$  – значение FSR с образцом,  $d$  – толщина исследуемого образца.

Знак модуля применен с той целью, чтобы не принимать во внимание размерность FSR. Погрешность измерения толщины образца на каждые 0,02 мм приводит к ошибке вычисления показателя преломления в 0,01.

Результаты измерения зависимости показателя преломления от величины



интенсивности подаваемого сигнала накачки для нормальных образцов приведены на рис. 2.

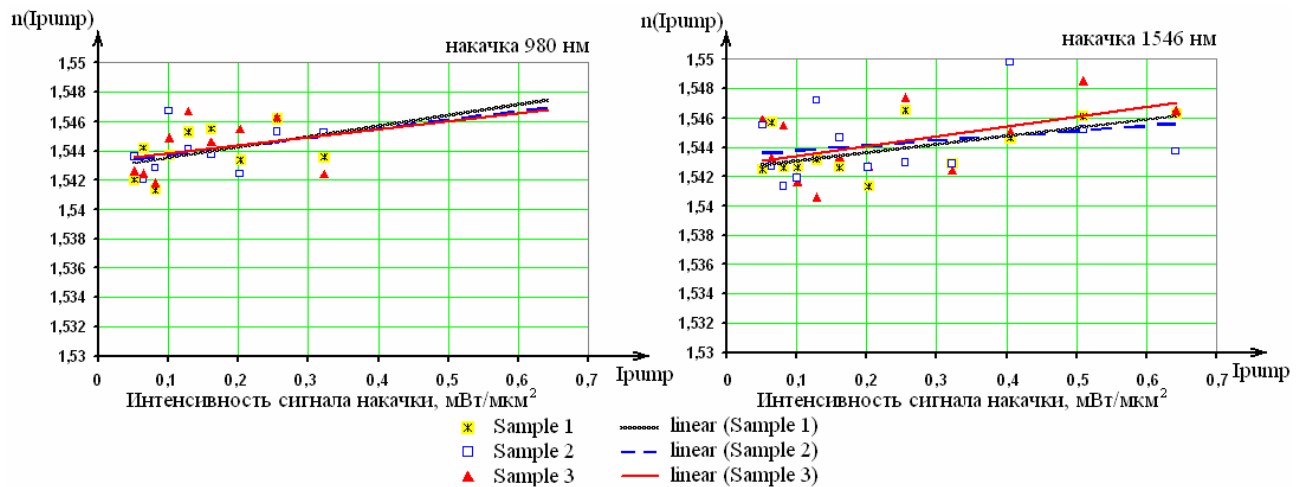


Рисунок 2 – Зависимости показателей преломления оригинальных образцов от интенсивности сигналов накачки с длинами волн 980 нм и 1546 нм соответственно

Величина изменения показателя преломления образцов не зависит от значения длины волны сигнала накачки, а является функцией интенсивности. График изменения показателя преломления наноструктурных образцов приведен лишь для случая со значением длины волны накачки 1546 нм, так как номинальная мощность этого источника была выше.

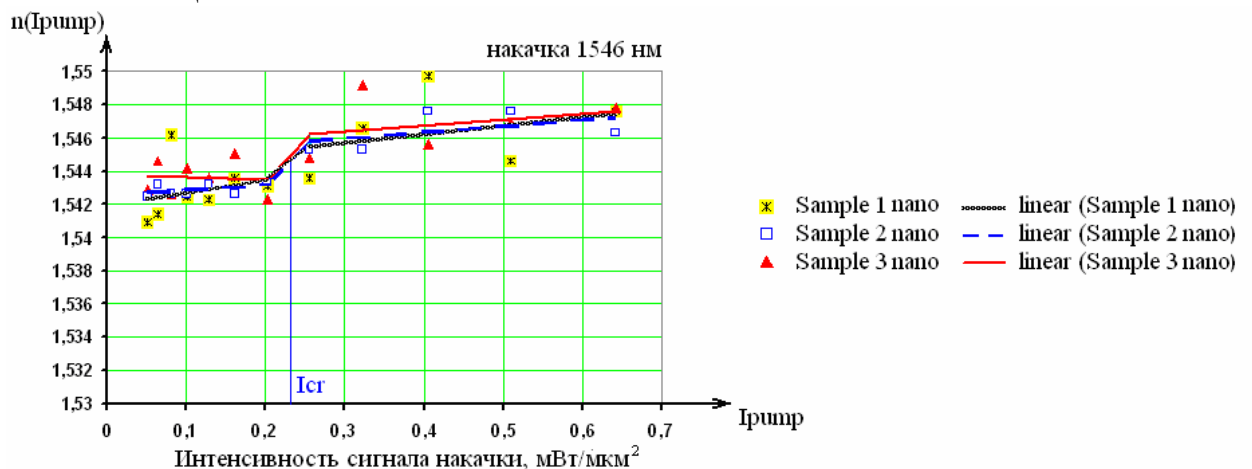


Рисунок 3 – Зависимости показателей преломления нанообразцов от интенсивности сигнала накачки с длиной волны 1546 нм

Результаты экспериментов показали изменение оптических свойств материалов обработанных кручением под высоким давлением. Зависимость показателя преломления наноструктурного материала имеет область скачкообразного изменения, в то время как начальный промежуток имеет выраженный линейно-постоянный участок. Величина критической интенсивности  $I_{cr}$  зависит от прилагаемой деформирующей силы.

Обнаруженный эффект представляет научный интерес для использования его при построении полностью оптических компонентов управления.

**Третья глава** посвящена математическому описанию процесса распространения оптического излучения в направляющей структуре, подверженной деформационному изменению, и разработке аналитической модели наноструктурного вещества.

Математическое моделирование процесса распространения оптического сигнала в среде производилось с учетом того, что в среде происходит изменение ориентационной поляризации, возникающей вследствие деформации материала. Уравнения Максвелла можно записать в следующей форме:

$$\begin{cases} \text{rot } H = e_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P^n}{\partial t} + \frac{\partial P^{\text{деф}}}{\partial t}, \\ \text{rot } E = -\text{mm}_0 \frac{\partial H}{\partial t}. \end{cases} \quad (3)$$

где  $P^{\text{деф}}$  – часть вектора поляризации  $P$ , возникающая при деформировании образца.

Для монохроматического поля получены выражения, связывающие продольные и поперечные составляющие векторов электрического и магнитного полей:

$$\dot{E}_r = -\frac{i}{g_{\perp}^2} \left( \frac{1}{r} \cdot \text{mm}_0 \frac{\partial \dot{H}_z}{\partial j} + b \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial r} - iw^2 m_0 e_0 \left( \dot{P}_r^n + \dot{P}_r^{\text{деф}} \right) \right); \quad (4)$$

$$\dot{E}_j = -\frac{i}{g_{\perp}^2} \left( b \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial j} - \text{mm}_0 \frac{\partial \dot{H}_z}{\partial r} - iw^2 m_0 e_0 \left( \dot{P}_j^n + \dot{P}_j^{\text{деф}} \right) \right); \quad (5)$$

$$\dot{H}_r = -\frac{i}{g_{\perp}^2} \left( -we_0 \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial j} + b \frac{\partial \dot{H}_z}{\partial r} + ibwe_0 \left( \dot{P}_j^n + \dot{P}_j^{\text{деф}} \right) \right); \quad (6)$$

$$\dot{H}_j = -\frac{i}{g_{\perp}^2} \left( we_0 \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial r} + b \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{H}_z}{\partial j} - ibwe_0 \left( \dot{P}_r^n + \dot{P}_r^{\text{деф}} \right) \right). \quad (7)$$

где  $g_{\perp}^2 = w^2 m_0 e_0 - b^2$  – поперечное волновое число и  $b$  – коэффициент фазы, а  $E_z$  и  $H_z$  являются решениями уравнений вида:

$$\nabla_{\perp}^2 \dot{E}_z + g_{\perp}^2 \dot{E}_z = 0, \quad \nabla_{\perp}^2 \dot{H}_z + g_{\perp}^2 \dot{H}_z = 0.$$

Для описания движения оптического электрона в наноструктурном материале предложена следующая модель:

$$m \cdot \ddot{x} + 2g \cdot m \cdot \dot{x} + k \cdot x = e \cdot E(t), \quad (9)$$

где  $e$  и  $m$  – соответственно заряд и масса электрона,  $E$  – модуль напряжённости электрического поля внешней световой волны,  $2g$  и  $k$  – коэффициенты, характеризующие сопротивление движению и жёсткость удерживающей силы (упругой силы) в атоме (молекуле),  $x$  – координата электрона.

При наличии напряженных зон и дислокаций в наноструктурном мате-

риале, движение электрона происходит под действием постоянной смещающей силы  $F_{\text{деф}} = \frac{\partial U_{\text{деф}}}{\partial x}$ , где  $U_{\text{деф}}$  – потенциальная энергия деформированного состояния.

С учетом нелинейности деформации до членов 4-го порядка сила упругости описывается выражением:

$$F_{\text{упр}} = -kx - qx^3 \quad (11)$$

здесь  $q$  – коэффициент пропорциональности.

Для НСМ записываем:

$$e \cdot E + F_{\text{деф}} = kx + qx^3. \quad (12)$$

Конечная модель представляется в виде:

$$\frac{d^2 P(t)}{dt^2} + 2g \cdot \frac{dP(t)}{dt} + w_0^2 \cdot P(t) + \frac{q}{e^2 N^2 m} \cdot P^3(t) = \frac{e^2 N}{m} \cdot E(t) + \Delta U, \quad (13)$$

где  $\Delta U = \frac{eN}{m} \cdot \frac{\partial U_{\text{деф}}}{\partial x}$ ,  $w_0^2 = k/m$ .

Решение (13) имеет вид:

$$P = e_0 \cdot c^{(0)} \cdot E_0 \cdot \cos wt + e_0 \cdot c^{(1)} \cdot E_0 \cdot \cos wt + e_0 \cdot c^{(3)} \cdot E_0 \cdot \cos 3wt, \quad (14)$$

где нелинейные макроскопические диэлектрические восприимчивости вещества  $c^i$  имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} c^{(0)} &= \frac{\Delta U}{mNe^2} \cdot \frac{1}{w_0^2 \cdot (w_0^2 - w^2 + j \cdot 2g \cdot w)}, \\ c^{(1)} &= c^{(1)}(w, E_0) = \sqrt{\frac{3}{4(w_0^2 - w^2 + j \cdot 2g \cdot w)} \cdot \left( \frac{qE_0^2}{me^2 N^2} - \frac{\Delta U}{w_0^2} \cdot N \right)}, \\ c^{(3)} &= c^{(3)}(3w, E_0) = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \frac{q}{me^2 N^2 (w_0^2 - 9w^2 + j \cdot 2g \cdot w)} \cdot \left( E_0^2 - \frac{\Delta U^2 \cdot eN}{w_0^2} \right)}. \end{aligned} \quad (15)$$

Для показателя преломления  $n$  и коэффициента поглощения  $a$  получаем:

$$n(w, |E|^2) = n_0(w) + n_2(w) \cdot |E|^2, \quad a(w, |E|^2) = a_0(w) + a_2(w) \cdot |E|^2,$$

$$\text{где } n_0(w) = 1 + \frac{1}{2} \text{Re} [c^{(0)}(w)], \quad a_0(w) = \frac{w}{n_0(w) \cdot c} \text{Im} [c^{(0)}(w)],$$

$$n_2(w) = \frac{3}{8n_0(w)} \text{Re} [c^{(1)}(w)], \quad a_2(w) = \frac{3w}{4n_0(w) \cdot c} \text{Im} [c^{(1)}(w)].$$

Анализ данной модели на основе численного эксперимента показал эффект скачкообразного изменения показателя преломления, что согласуется с результатами выполненных измерений.

**В четвёртой главе** разработаны модели оптического переключателя, функционирующего на основе нелинейного изменения показателя преломления наноструктурного вещества. Скорость переключения разработанного переключателя ограничивается временем релаксации вещества.

Аппроксимированные зависимости изменения показателя преломления образцов представлены следующим образом:

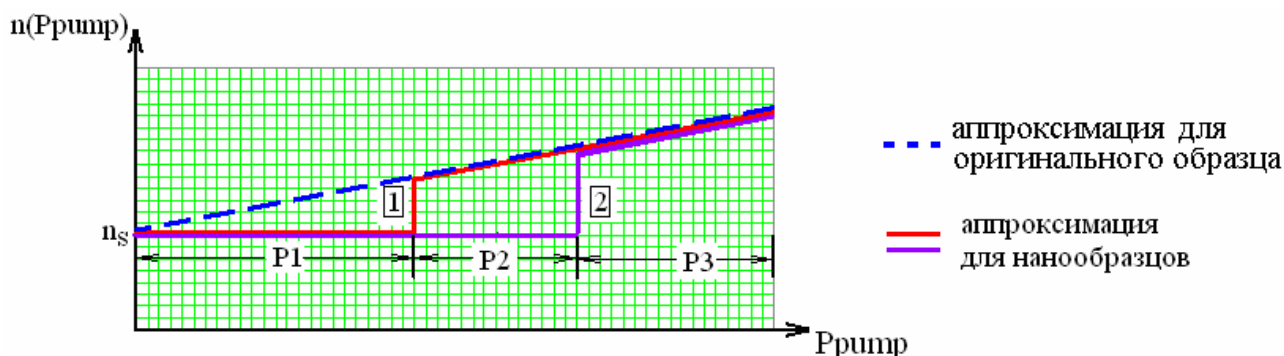


Рисунок 4 – Аппроксимация графиков изменения показателя преломления различных образцов

На рис. 4. имеем  $P_{cr1} < P_{cr2}$ , где  $P_{cri}$  – значения мощностей сигналов накачки, при которых происходит скачок.

В данной главе, предложено два возможных варианта реализации полностью оптического переключателя:

### 1. Модель переключателя без дополнительного сигнала накачки

Для реализации данной модели необходимо использовать два наноструктурных образца, получаемых при различных условия деформации, т.е. с различными степенями потенциальной энергии. Характеристики образцов приведены на рис. 4.

В случае если мощность передаваемого сигнала находится в области  $P_1$ , значения показателей преломления обоих нанообразцов одинаковы, и преломления на границе раздела не происходит (ход луча представлен на рис.5, а).

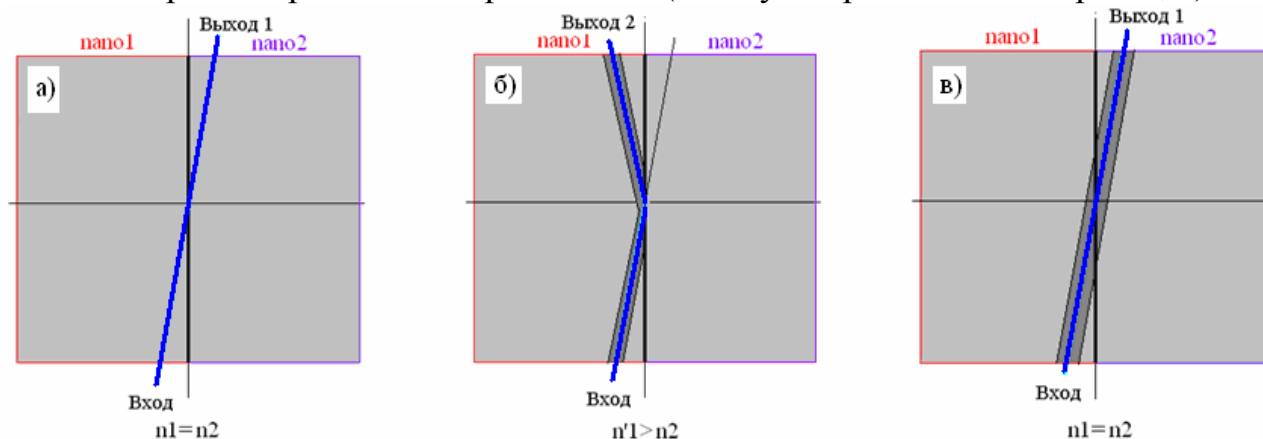


Рисунок 5 – Ход лучей для различных значений мощности информационного сигнала

В случае если мощность передаваемого сигнала находится в области  $P_2$ , значения показателей преломления образцов различны, и, следовательно, происходит отражение на границе раздела двух сред (ход луча представлен на рис.5, б). Если же мощность передаваемого сигнала находится в области  $P_3$ ,

значения показателей преломления обоих образцов изменяются, но принимают одинаковое значение, следовательно, распространение луча происходит по тому же пути, что и в первом случае (ход луча представлен на рис.5, в).

## 2. Модель переключателя с дополнительным сигналом накачки

Схематическое представление работы оптического переключателя представлено на рис. 6 и рис. 7.

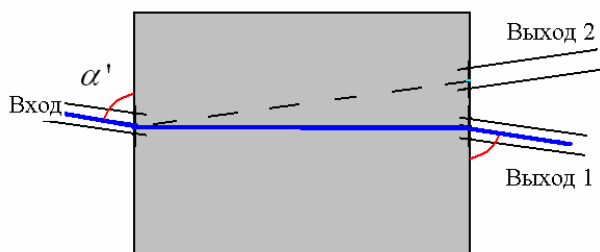


Рисунок 6 – Ход информационного сигнала при прямой передаче (положение №1)

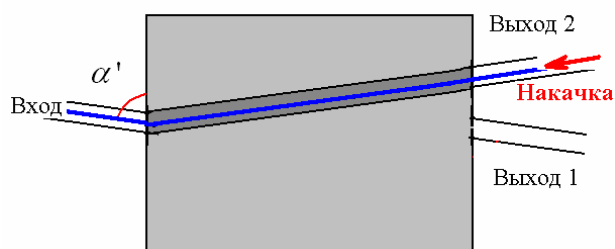
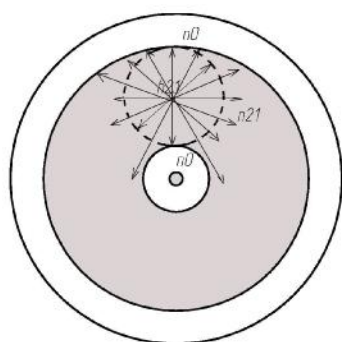


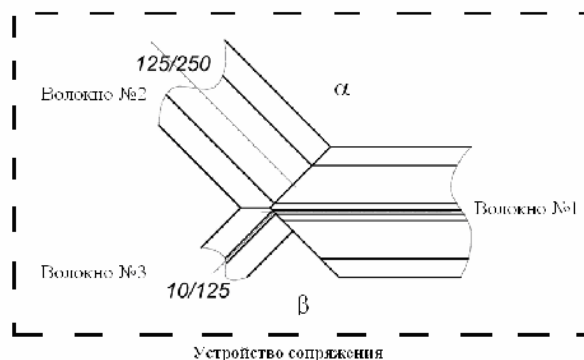
Рисунок 7 – Ход информационного сигнала при подключенной накачке (положение №2)

В рассматриваемом случае используется только один наноструктурный образец. Это упрощает технологический процесс производства предлагаемого устройства. Ход информационного сигнала при отключенной накачке представлен на рис. 6. При подключении сигнала накачки к выходу 2 во встречном направлении, сигнал канализируется в области с большим показателем преломления за счет самообразования “туннеля”. Ход луча в этом случае представлен на рис.7.

Для включения переключателя в телекоммуникационную сеть предложен новый метод стыковки. Для одновременной доставки полезного сигнала и сигнала накачки непосредственно до NOS разработана конструкция волокна и модель устройства сопряжения (рис.8,а, и рис.8,б соответственно).



а)



б)

Рисунок 8 – Конструкции: а) нового многослойного волокна; б) модели устройства сопряжения

Определены параметры скола для реализации данного устройства сопряжения.

Таким образом, предложены варианты реализации полностью оптического переключателя и предложено устройство сопряжения разнотипных волокон

при стыковке в телекоммуникационной сети.

**Пятая глава** посвящена разработке методики теоретической оценки эффективности работы нелинейного оптического переключателя. Эффективность работы оценивается как относительная потеря мощности:

$$N(\Delta a) = \frac{P}{P_0}, \quad (16)$$

где  $P$  – мощность излучения на выходе переключателя,  $P_0$  – первоначальная мощность сигнала,  $\Delta a$  – отклонение луча от центра выходного волокна.

Распределение интенсивности излучения в оптическом волокне описывается гауссовским законом:

$$I(a) = I_0 \cdot \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(a-m_a)^2}{2s^2}}, \quad (17)$$

где  $I_0$  – интенсивность в центре пучка,  $s$  – среднеквадратическое отклонение (СКО) интенсивности от величины в центре пучка,  $m_a$  – координата центра пучка,  $a$  – координата.

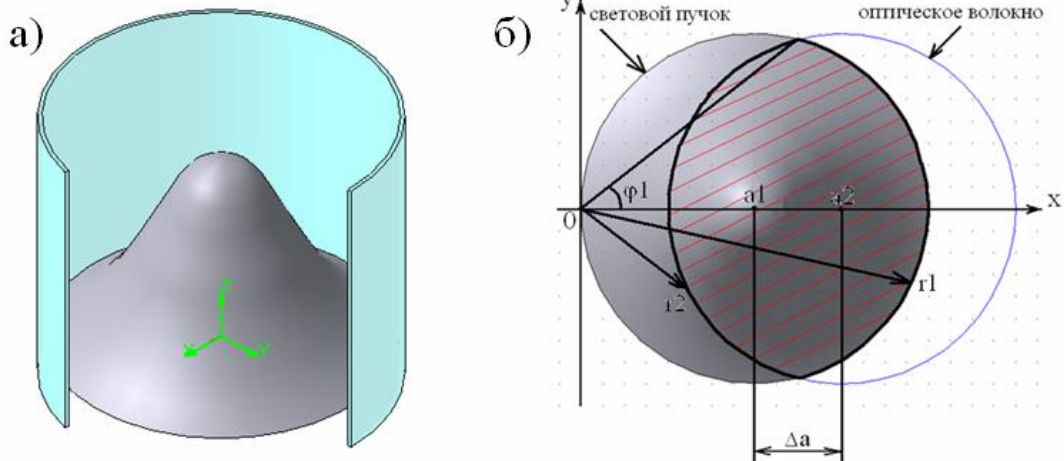


Рисунок 9 – а) распределение интенсивности в волокне; б) модель отклонения светового пучка от центра выходного волокна  $\Delta a$  - смещение центров светового пучка и выходного оптического волокна

Мощность проходящего светового пучка определяется как:

$$P = \iint I(x, y) dx dy = \frac{I_0}{s\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-j_1}^{j_1} dj \int_{a_2 \cdot \cos j - \sqrt{R^2 - a_2^2 + a_2^2 \cdot \cos^2 j}}^{a_2 \cdot \cos j + \sqrt{R^2 - a_2^2 + a_2^2 \cdot \cos^2 j}} e^{-\frac{r^2 - 2r \cdot a_1 \cdot \cos(j) + a_1^2}{2s^2}} r dr. \quad (18)$$

где  $j_1 = \arctg \left( \frac{\sqrt{R^2 - \left(\frac{\Delta a}{2}\right)^2}}{\left(a_1 + \frac{\Delta a}{2}\right)} \right)$ ,  $\Delta a = a_2 - a_1$ ;  $j$  – угол, по которому производится интегрирование.

Зависимость (16) от величины смещения  $\Delta a$  приведена на рис. 10.

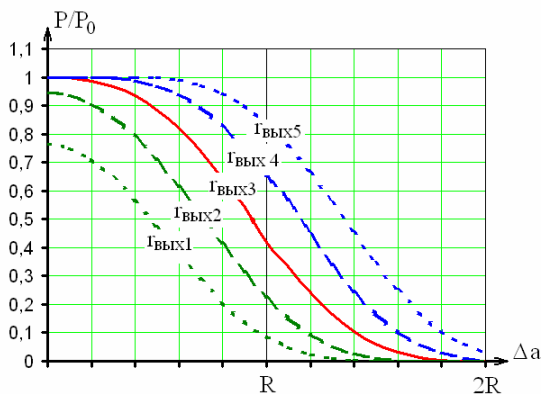


Рисунок 10 – Зависимости соотношения  $P/P_0$  от величины смещения  $\Delta a$  для различных значений размера выходного канала:  $r_{\text{вых1}} < r_{\text{вых2}} < r_{\text{вых3}} < r_{\text{вых4}} < r_{\text{вых5}}$ ,  $r_{\text{вх}} = r_{\text{вых3}}$

Далее проведен синтез волоконно-оптической сети на базе NOS. В качестве примера эксплуатации предложенного устройства рассматривается вариант переключения на резервное направление. Резервирование реализуется либо в автоматическом режиме (в случае аварии на участке основного направления), либо в ручном режиме (по требованию оператора). Схемы переключений для этих режимов представлены на рис.11 и рис.12, соответственно.

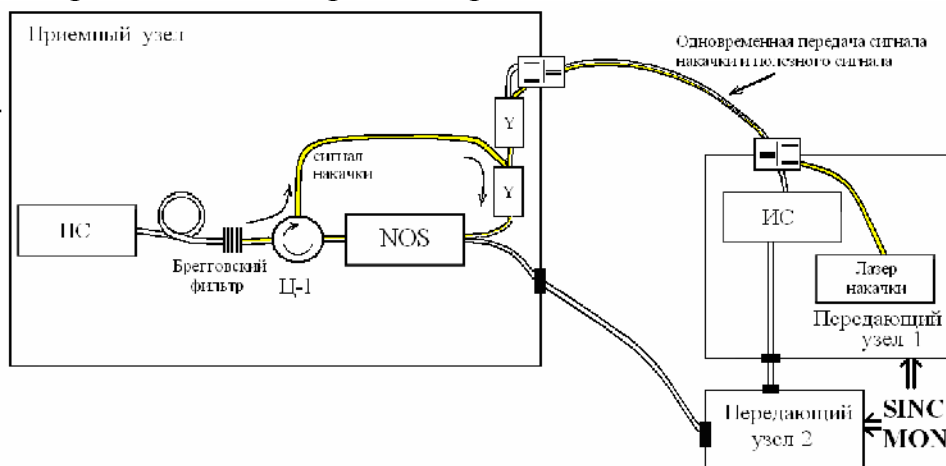


Рисунок 11 – Схема переключения каналов в автоматическом режиме

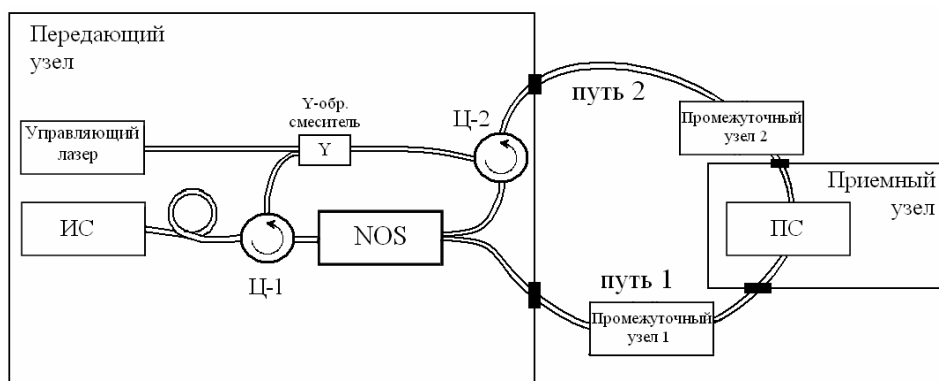


Рисунок 12 – Схема переключения каналов в ручном режиме

где ИС – источник сообщения, ПС – приемник сообщения, Ц – циркулятор, Y – разветвитель.

Данные методы подключения NOS позволяют использовать технические преимущества разработанного устройства.

Также в данной главе проведена оценка влияния нелинейного преломления на передаваемый оптический сигнал и определен порог самофокусировки на стандартных оптических линиях связи. Расчеты показали, что нелинейное преломление не приводит к самофокусировке в направляющей структуре при входной мощности на уровнях рабочей точки в 0,07 Вт для NOS. Влияние модуляционной неустойчивости не ведет к превышению регламентной величины амплитуды джиттера при оптической мощности сигналов в пределах 0,07 Вт. Вероятность битовой ошибки не превышает значения  $10^{-11}$  при входной оптической мощности равной 0,07 Вт. Вследствие этого модуляционная неустойчивость является незначительной.

Нелинейные параметрические процессы, проявляющиеся в виде гармонических составляющих не приводят к искажению полезного сигнала. Последнее связано с тем, что пороговые мощности, необходимые для генерации паразитных гармоник даже при достижении полного синхронизма, оказываются порядка 37...54 Вт, т.е. существенно превышают рассматриваемое значение мощности 0,07 Вт. Таким образом, действием других нелинейных эффектов (кроме нелинейного преломления) для входного сигнала 0,07 Вт можно пренебречь.

**В заключении** изложены основные научные результаты, полученные в диссертационной работе в ходе исследования.

**В приложении** представлены документы, подтверждающие применение результатов работы при модернизации и последующей эксплуатации сетей ООО «Телекоммуникационные системы» и ОАО «Башинформсвязь», г. Уфа.

### **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

1. Разработан метод построения высокоскоростной оптического переключателя, управляемый изменением показателя преломления прозрачного оптического материала с помощью дополнительного излучения, либо изменением параметров передаваемого сигнала, позволяющий производить переключение за время, сравнимое со временем релаксации вещества.

2. Разработана конструкция устройства сопряжения разнотипных волокон на основе оптического волокна с новым специализированным профилем показателя преломления, предназначенного для одновременной подачи в линию информационного сигнала и сигнала накачки и управления переключением в сегменте волоконно-оптической сети. Предложенный способ одновременной передачи сигналов позволяет достовернее определять физическое повреждение линии, а так же увеличивает параметры безопасности линии.

3. Разработана методика расчета эффективности работы оптического переключателя, учитывающая конструкционные особенности модели устройства и позволяющая оценить показатели помехоустойчивости сети. Показано, что основным изменяемым параметром передаваемого сигнала будет уменьшение



интенсивности последнего вследствие рассеяния по причине отклонения от правильного направления распространения в рабочей среде переключателя.

4. Разработаны методы подключения оптического переключателя к сегменту волоконно-оптической системы передачи, обеспечивающие резервирование полностью оптическим способом. Показано, что схема сети с автоматическим режимом переключения обеспечивает необходимые условия (высокие скорости переключения) для минимизации потерь информационных битов передаваемых сообщений. Проведена оценка возможного влияния нелинейных эффектов на передаваемый сигнал.

**По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

***В рецензируемых журналах из списка ВАК***

1. Стыковка разнотипных волокон при дистанционном способе доставки сигнала накачки EDFA усилителя / Султанов А.Х., Виноградова И.Л., Салихов А.И. // Инфокоммуникационные технологии. Самара, 2006. – Том 4, №2, С.38–42. *(Соискателем предложен новый способ стыковки разнотипных оптических волокон при строительстве ВОЛС)*
2. Распространение электромагнитной волны в прозрачной среде подверженной деформационным изменениям / Султанов А.Х., Виноградова И.Л., Салихов А.И. // Вестник УГАТУ. 2006. Т.7, №1, С.170–175. *(Соискателем проведено математическое моделирование процесса распространения электромагнитной волны в деформированной структуре)*

***В других изданиях***

3. Применение наноструктурных материалов для создания компонент оптических сетей / Салихов А.И., Усманов Р.Г. // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: Сб. докладов V Международной научно-технической конференции. – Самара, 2004, С.297–298. *(Соискателем предложена область применения новых материалов находящихся в наноструктурном состоянии)*
4. Применение наноструктурных материалов для создания компонент оптических сетей / Усманов Р.Г., Салихов А.И. // Оптические технологии для телекоммуникаций: SPIE – 2004, Vol. 5854, С.130–140. (статья на англ. языке) *(Соискателем предложена область применения новых материалов находящихся в наноструктурном состоянии)*
5. Применение наноструктурных материалов в электрооптических измерителях больших мощностей на базе использования оптических эффектов / Кусимов С.Т., Тлявлин А.З., Салихов А.И. // Оптические технологии для телекоммуникаций: SPIE – 2004, Vol. 5854, С.141–150. (статья на англ. языке) *(Соискателем предложена методика измерения больших мощностей на базе оптических эффектов с применением новых материалов)*
6. Учет деформационной поляризации при описании поведения электромагнитной волны в наноструктурном образце из ситалла / Кусимов С.Т., Султанов

А.Х., Виноградова И.Л., Салихов А.И. // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: Оптические технологии в телекоммуникациях: Сб. докладов третьей Международной научно-технической конференции. – Уфа, 2005, С.272–274. *(Соискателем предложена математическая модель описания процесса распространения сигналов в направляющей структуре)*

7. Изменение вида математической модели Максвелла при описании распространения электромагнитной волны в прозрачной среде с учетом деформационных изменений / Кусимов С.Т., Султанов А.Х., Виноградова И.Л., Салихов А.И. // Проблемы машиноведения и критических технологий в машиностроительном комплексе Республики Башкортостан: Сборник научных трудов. Уфа - 2005, Издательство “Гилем”, с.158–172. *(Соискателем предложено решение уравнений Максвелла с учетом деформационной поляризации)*

8. Способ подачи излучения накачки при удаленной накачке усилителя EDFA / Султанов А.Х., Виноградова И.Л., Салихов А.И. // Оптические технологии для телекоммуникаций: SPIE – 2005 Vol. 6277, С. 82-91. (статья на англ. языке). *(Соискателем предложен новый метод подачи сигнала накачки при использовании EDFA усилителей в телекоммуникационных сетях)*

9. Оптические характеристики прозрачного ситалла в наноструктурном состоянии / Султанов А.Х., Виноградова И.Л., Салихов А.И. // Оптические технологии для телекоммуникаций: SPIE – 2006 Vol. 6605, С.176-188. (статья на англ. языке). *(Соискателем описано изменение оптических характеристик материалов находящихся в наноструктурном состоянии)*

10. Экспериментальный анализ образцов из прозрачного ситалла находящихся в наноструктурном состоянии / Султанов А.Х., Виноградова И.Л., Салихов А.И., Шаффер К., Хаас М., Шустер Т. // Сб. докладов 9-й Международной научно-технической конференции: Компьютерная наука и Информационные технологии 2007, Уфа-Красноусольск, Vol. 3, С.196-200. (статья на англ. языке). *(Соискателем описана методика измерения оптических характеристик материалов на разработанном экспериментальном стенде)*

11. Экспериментальное исследование образцов из прозрачного ситалла находящегося в наноструктурном состоянии / Султанов А.Х., Виноградова И.Л., Салихов А.И. // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: Сб. докладов восьмой Международной научно-технической конференции. – Уфа, 2007, С.276–278. *(Соискателем описан принцип измерения показателя преломления материалов на разработанном экспериментальном стенде)*

12. Описание нелинейных оптических эффектов в неравновесном наноструктурном материале / Султанов А.Х., Виноградова И.Л., Салихов А.И. // Проблемы машиноведения, технологии и автоматизации технологических процессов в машиностроении Республики Башкортостан: Сборник научных трудов. Уфа - 2007, Издательство “Гилем”, С.61–68. *(Соискателем проведено аналитическое моделирование состояния деформированного материала)*

**САЛИХОВ Айдар Илдарович**

**РАЗРАБОТКА ПОЛНОСТЬЮ ОПТИЧЕСКОГО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ НА  
ОСНОВЕ ПРОЗРАЧНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ СТЕКОЛ ЛИТИЕВОЙ  
ГРУППЫ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СВЯЗИ**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат диссертации

Подписано в печать 07.07.2008. Формат 60×84 1/16.

Бумага обёрточная. Печать плоская. Гарнитура Таймс. Усл.печ.л. 1,0.

Усл. кр.-отт. 1,0. Уч.-изд.л. 0,9.

Тираж 100 экз. Заказ №

Уфимский государственный авиационный технический университет

Редакционно-издательский комплекс УГАТУ

450000, Уфа-Центр, К.Маркса, 12