

На правах рукописи

ПЕТРОВ Виктор Михайлович

**Оптические и электрические методы управления
дифракцией света на
фоторефрактивных голографических решетках**

Специальность 01.04.03 – радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

**Диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук**

Санкт – Петербург

2004

Работа выполнена в Физико – Техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН

Официальные оппоненты: доктор физико – математических наук,
профессор Коровин Лев Иванович,
доктор физико – математических наук,
профессор Компанец Игорь Николаевич,
доктор физико – математических наук,
профессор Кожевников Николай Михайлович

Ведущая организация: Федеральное Государственное унитарное
Предприятие «Всероссийский научный центр
«Государственный оптический институт
им. С.И. Вавилова»

Защита состоится 30 сентября 2004 в 14 часов на заседании диссертационного совета Д
212.229.01 при Государственном образовательном учреждении высшего
профессионального образования «Санкт – Петербургский Государственный
Политехнический Университет» по адресу: 195251, г. Санкт – Петербург, ул.
Политехническая д.29. корп. _____, ауд. _____.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ «СПбГПУ»

Автореферат разослан «_____» _____ 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д. 212.229.01

Доктор физико – математических наук,
профессор

Водоватов И.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. Современные технологии сбора, передачи, и обработки информации всё шире используют оптический диапазон электромагнитных колебаний. Различные оптические датчики, широкополосные системы оптической связи, оптические системы памяти требуют всё более быстрого и гибкого управления потоками света. Дифракция на периодических решетках наряду с рефракцией, поглощением и отражением позволяет управлять условиями (в частности, направлением) распространения света. Решетки показателя преломления, созданные в фоторефрактивных кристаллах обладают рядом уникальных свойств по сравнению с известными дифракционными решетками. В частности, они обеспечивают не только эффективную дифракцию света (в некоторых случаях дифракционная эффективность может достигать 100%), но и обеспечивают оптическое и электрическое управление условиями дифракции. Анализ литературы показывает, что в зависимости от используемого фоторефрактивного кристалла и экспериментальных условий можно изменять направление распространения света, управлять его амплитудой, менять ориентацию поляризации, производить спектральное селектирование светового потока как во временной, так и в пространственных областях, т.е. потенциально имеется возможность производить практически все необходимые для современных информационных систем базовые операции. Поэтому исследование оптических и электрических методов управления дифракцией света на голографических решетках представляется актуальной задачей. В то же время исследование дифракции света на фоторефрактивных решетках представляет самостоятельный научный интерес, т.к. это позволяет изучать свойства самих материалов и, следовательно, оптимизировать их для решения указанных задач.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ.

Исследование методов оптического и электрического управления дифракцией света на фоторефрактивных голографических решетках с целью создания управляемых узкополосных спектральных оптических фильтров и высокочувствительных голографических интерферометров.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА.

В диссертационной работе впервые:

1. В результате исследования голографических решеток в фоторефрактивных кристаллах определены оптимальные условия электрически управляемой дифракции для кристаллов точечных групп $3m$ и $4mm$. На примере кристаллов ниобата лития и титаната бария определены ориентационные зависимости для эффективного электрооптического коэффициента, позволяющие выявить оптимальную ориентацию кристаллов для электрически управляемой дифракции.
2. В результате исследования селективных свойств отражательных голограмм, используемых как спектральные оптические фильтры, установлены факторы, ограничивающие спектральную и электрическую селективность оптических фильтров (величина амплитуды решетки показателя преломления, неоднородность среднего показателя преломления кристалла, неоднородность электрического поля, неоднородность освещённости кристалла при записи).
3. Реализовано совместное использование электрического и спектрального мультиплексирования для формирования набора передаточных характеристик фильтров на основе объемных статических отражательных решеток в ниобате лития.
4. Изучено влияние фотовольтаического эффекта на условия Брэгга в отражающей геометрии в фоторефрактивных кристаллах. Выявлено, что влияние фотовольтаического поля приводит к сдвигу максимума дифракционной эффективности относительно управляющего поля.
5. Экспериментально доказана возможность использования объемных динамических отражательных решеток в качестве электрически управляемых высокочастотных спектральных оптических фильтров. Исследования выполнены на фоторефрактивных решетках в титанате бария в геометрии поперечного электрооптического эффекта.
6. Предложено и реализовано на примере объемных динамических отражательных решёток в титанате бария оперативное (в реальном времени) оптическое управление как формой, так и числом полос пропускания передаточной характеристики за счёт использования фазового сдвига между секциями объёмной динамической решетки.
7. Теоретически предсказано и на примере кристаллов группы силленитов

экспериментально обнаружено явление трёхволнового взаимодействия в тонких динамических пропускающих решетках. Сформулированы и экспериментально показаны условия достижения вырожденного случая, когда исключаются два из трех продифрагировавших лучей.

9. Экспериментально подтверждён предсказанный теоретически аномальный закон дисперсии волн пространственного заряда в полуизолирующих полупроводниках, заключающийся в том, что собственная частота волны пространственного заряда обратно пропорциональна абсолютной величине ее волнового вектора.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ Основная научная и практическая ценность работы заключается в фундаментальном характере исследованных явлений и установленных закономерностей. Научные выводы носят общий характер и не ограничиваются объектами исследований, используемыми в работе.

Экспериментально доказана возможность создания оптических спектральных фильтров:

- на основе статических голографических решеток в ниобате лития со следующими параметрами: полоса пропускания до 18 пм, диапазон непрерывной перестройки ± 0.450 нм, управляющее электрическое поле ± 15 кВ/см;
- на основе динамических голографических решеток в титанате бария со следующими параметрами: полоса пропускания до 50 пм, диапазон непрерывной перестройки ± 0.275 нм, управляющее электрическое поле ± 650 В/см.

Экспериментально доказана возможность электрического мультиплексирования решеток и продемонстрировано электрическое переключение семи каналов и 17-ти голограмм. На сегодняшний день указанные величины являются рекордными для фоторефрактивных сред, но еще не достигают предельно возможных значений, которые ограничиваются пробивным напряжением используемого кристалла.

Предложена схема адаптивного интерферометра со смешанной голографической конфигурацией. В этой схеме запись динамической голографической решетки производится в пропускающей геометрии на одной длине волны, а одновременное считывание – в отражающей геометрии на другой длине волны. Экспериментально

доказано, что предложенная схема интерферометра может быть использована для измерения углов с точностью не хуже, чем 10^{-8} радиан.

Предложена схема адаптивного интерферометра на основе небрэгговского порядка дифракции. Экспериментально доказано, что предложенная схема интерферометра может быть использована для детектирования сигналов с амплитудой фазовой модуляции до 2×10^{-3} радиан в полосе 1 Гц.

Впервые предложены и экспериментально реализованы схемы направленного детектирования ультразвуковых волн, возбуждённых наносекундным импульсом света, при помощи динамических голографических решеток в силленитах в геометрии двухволнового взаимодействия.

Полученные результаты могут быть использованы в оптических системах связи, в особенности, использующих принципы спектрального мультиплексирования, и для разработки перестраиваемых лазеров. На основе результатов данной диссертации могут быть разработаны переключаемые и перестраиваемые узкополосные спектральные оптические фильтры с изменяемой формой передаточной характеристики. Кроме того, возможно создание высокочувствительных детекторов оптических фазомодулированных сигналов, в частности, для измерений колебаний поверхности с амплитудой колебания вплоть до единиц ангстрем, для измерения звукового давления с использованием световолоконных датчиков, для направленного детектирования ультразвуковых волн, для бесконтактной неразрушающей дефектоскопии.

ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ.

1. Оптимальное электрическое управление дифракцией света на фоторефрактивных решетках, обусловленное изменением условий Брэгга вследствие изменения среднего показателя преломления, реализуется в отражательной геометрии и с использованием поперечного электрооптического эффекта. В зависимости от соотношения электрооптических коэффициентов используемого кристалла определяется оптимальное направление волнового вектора голографической решетки относительно кристаллографических осей и направление поляризации считывающего света.

2. К оптическому управлению дифракции света в фоторефрактивных кристаллах приводит реверсивность голографических решеток, что позволяет производить перезапись решетки при изменении параметров записывающих лучей (угла падения, длины волны, пространственных и временных фазовых соотношений между лучами).
3. Оптимальной для оптически управляемых фильтров является смешанная голографическая конфигурация: запись динамической решетки производится путем непрерывного освещения кристалла светом на одной длине волны в пропускающей геометрии, а считывание – на другой длине волны, соответствующей условию Брэгга в отражающей геометрии.
4. Внесение заданных пространственных неоднородностей фазы в объемную динамическую отражательную решетку позволяет в реальном времени управлять формой передаточной характеристики спектрального оптического фильтра. Таким образом реализовано преобразование передаточной характеристики из состояния “пропускание” в “отражение”, преобразование передаточной характеристики, содержащей 1, 2, 3, и 4 полосы пропускания, а также синтез П-образной передаточной характеристики.
5. Реверсивные свойства динамических голограмм обеспечивают резонансное возбуждение волн пространственного заряда, что приводит к увеличению дифракционной эффективности фоторефрактивных решеток, повышению чувствительности интерферометров, основанных на динамических решетках и дает возможность исследования волн пространственного заряда оптическими методами.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 10 Международной конференции по лазерам и электрооптике в Европе CLEO/Europe-EQUEC'96 (Гамбург, Германия, 8-13 сент. 1996 г.), 11 Международной конференции по лазерам и электрооптике CLEO/QELS'97 (Балтимор, США, 20-22 мая 1997 г.), 6 Международной конференция по фоторефрактивному эффекту, материалам, и устройствам PR'97 (Чиба, Япония, 11-13 июля 1997 г.), Московской Международной

конференции по оптическим информационным технологиям OIST'97 (Москва, Россия, 27-30 авг. 1997 г)

XVI Международной конференции по когерентной и нелинейной оптике ICONO'98 (Москва, Россия, 29 июня-3 июля 1998 г), 12 Международной конференции по лазерам и электрооптике в Европе CLEO/Europe-EQUEC'98 (Глазго, Шотландия, 14-18 сент. 1998 г), Московской Международной конференции по оптической обработке информации OIP'99 (Москва, Россия, 29 мая-1 июня 1999 г), Ежегодной конференции Германского Физического Общества DFG'2000 (Бонн, Германия, 3-7 апреля 2000 г), Ежегодной Европейской конференции по исследованию материалов E-MRS'2000 (Страсбург, Франция, 30 мая-2 июня, 2000 г.), Ежегодной конференции Германского Оптического Общества DGAO'2000 (Йена, Германия, 13-17 июня 2000 г.), 14 Международной конференции по лазерам и электрооптике в Европе CLEO/Europe-EQUEC'2000 (Ницца, Франция, 10-15 сент. 2000 г.), Ежегодной конференции Германского Оптического Общества DGAO'2001 (Гёттинген, Германия, 5-9 июня 2001 г.), 8 Международной конференция по фоторефрактивному эффекту, материалам, и устройствам PR'01 (Озеро Лоун Лодж, Висконсин, США, 8-12 июля 2001 г.), 27 Европейской конференция по оптической связи ECOC'01 (Амстердам, Голландия, 30 сент.- 4 окт. 2001 г.), Ежегодной конференция Германского Физического Общества DPG'02 (Оснабрюк, Германия, 4-8 марта 2002 г.), Ежегодной конференции Германского Оптического Общества DGAO'02 (Иннсбрук, Австрия, 22-25 мая 2002 г.), Московской Международной конференции по квантовой электронике и лазерной оптике IQUEC/LAT'02 (Москва, Россия, 22-27 июня 2002 г.), Ежегодной Европейской конференции по исследованию материалов E-MRS'2003 (Страсбург, Франция, 10-13 июня, 2003 г.), Ежегодной конференции Германского Оптического Общества DGAO'03 (Мюнстер, Германия, 10-14 июня 2003 г.), 9 Международной конференция по фоторефрактивному эффекту, материалам, и устройствам PR'03 (Ницца, Франция, 8-12 июля 2003 г.).

Диссертационная работа полностью была представлена и обсуждена на заседании Ученого совета Отделения физики диэлектриков и полупроводников ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, на семинаре кафедры квантовой электроники ГОУ «СПбГПУ», на семинаре в Научном центре волновых исследований Института Общей Физики им. А.М. Прохорова, на семинаре лаборатории Д – 21 ФГУП ВНИЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова».

СТРУКТУРА И ОБЪЁМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и двух приложений. Содержит 95 рисунков, список литературы из 298 наименований. Полный объём диссертации 243 страницы.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА. Автором предложены идеи: управления передаточной характеристикой оптического спектрального фильтра при помощи фазо – сдвинутых секций динамической голографической решетки; использование комбинации спектрального и электрического мультиплексирования для создания электрически переключаемых спектральных фильтров, использование небрэгговского порядка дифракции для повышения чувствительности интерферометра, схема интерферометра со смешанной геометрией. Лично автором было впервые экспериментально обнаружено резонансное возбуждение волн пространственного заряда в фоторефрактивных кристаллах. Все экспериментальные результаты, приведенные в диссертации получены либо автором диссертации (передаточные характеристики оптических спектральных фильтров, все зависимости для волн пространственного заряда, все зависимости направленного детектирования ультразвуковых волн, все зависимости сдвига максимума дифракционной эффективности по электрическому полю), либо при его участии и под его руководством российскими и немецкими студентами и аспирантами. Теоретический расчет оптимальных ориентаций кристаллов выполнен совместно с научным сотрудником ФТИ им. А.Ф. Иоффе А.В. Шамраем. Аналитический расчет передаточной характеристики голограммы, состоящей из двух фазо – сдвинутых секций выполнен профессором ФТИ им. А.Ф. Иоффе В.В. Брыксиным, а компьютерные вычисления с применением преобразования Фурье передаточных характеристик более сложных случаев выполнены с непосредственным участием автора диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ содержит обоснование актуальности проведённых в диссертационной работе исследований. В нём сформулированы цель работы, определена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, изложены защищаемые положения.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ, после краткого исторического обзора, посвященному истории исследования явления дифракции и принципа голографической записи волновых фронтов (раздел 1.1), представлен анализ современной литературы по следующим вопросам.

В разделе 1.2 и 1.3 приведены основные свойства тонких и объёмных (толстых) фазовых голограмм [1].

В разделе 1.3 приводятся основные положения теории связанных волн, позволяющие описывать дифракцию света на объёмной голограмме. Рассматриваются основные свойства объёмных голограмм в пропускающей и отражающей геометриях [2].

Раздел 1.4 посвящен общей характеристике фоторефрактивного эффекта. В зависимости от типа используемого фоторефрактивного кристалла, условия записи фоторефрактивных решёток и наблюдения дифракции на этих решётках существенно отличаются. Поэтому в трёх последующих разделах приводится детальное рассмотрение фоторефрактивного эффекта и голографических решёток, записанных с использованием этого эффекта, на примере выбранных нами, как наиболее подходящих для дальнейших исследований, представителей фоторефрактивных кристаллов [3].

Раздел 1.5 посвящен голографическим свойствам ниобата лития LiNbO_3 . Допированные ионами железа кристаллы обладают приемлемой фоточувствительностью для записи голограмм светом в видимом диапазоне ($\approx 0.1 \dots 1 \text{ Дж/см}^2$) с использованием дрейфового механизма записи. Время хранения специально не фиксированных голограмм составляет несколько дней, специально фиксированных – десятки лет. Поэтому голографическая решетка в данном случае может быть определена как статическая. Кристаллы обладают линейным электрооптическим эффектом с высокими электрооптическими

коэффициентами ($r_{33}=32.2$ пм/В), что позволяет достаточно эффективно изменять средний показатель преломления n за счёт приложения к кристаллу электрического поля, т.е. обеспечивает зависимость $n=n(E_{ext})$. Изменение среднего показателя преломления наиболее эффективно изменяет условия Брэгга для случая отражающей объёмной голограммы в виде решетки показателя преломления $n(z) = n + n_1 \cos(2\pi/\Lambda)z$, где Λ - период, n_1 амплитуда голографической решетки. Для этого случая условие Брэгга имеет вид:

$$\lambda_r = 2\Lambda n(E_{ext}) \quad (1)$$

где λ_r – отражённая длина волны (длина волны Брэгга). Поскольку условия Брэгга зависят от приложенного поля, то в этом случае можно говорить об электрическом управлении условиями дифракции [4].

Раздел 1.6 посвящен голографическим свойствам титаната бария $BaTiO_3$. Допированные кобальтом кристаллы обладают высокой фоточувствительностью для записи голограмм светом из зелёной области спектра. Высокая чувствительность к записываемому свету и относительно короткие времена максвелловской релаксации позволяет перезаписывать голограммы с характерным временем 0.1-1с. Поэтому голографическая решетка в данном случае может быть определена как динамическая. В этом случае возможно оптическое управление условиями дифракции. Под оптическим управлением здесь и далее будем понимать перезапись голограммы при новых условиях записи (например, угол между записываемыми лучами, новое пространственное фазовое распределение в одном из записываемых лучей, и т.д.). Один из электрооптических коэффициентов чрезвычайно высок ($r_{51}=820$ пм/В), что потенциально позволяет осуществить и эффективное электрическое управление условиями дифракции за счёт приложения к кристаллу электрического поля.

Раздел 1.7 посвящен голографическим свойствам кристаллов группы силленитов $Bi_{12}MeO_{20}$, где Me - Si, Ge, Ti. Данные кристаллы обладают коротким временем максвелловской релаксации ($10^{-2} \dots 10^{-4}$), что позволяет использовать их для оптического управления условиями дифракции, например, в случае, когда один из записываемых лучей имеет фазовую модуляцию.

Раздел 1.8 посвящен одному из важнейших практических применений голографических решеток - оптическим спектральным фильтрам. Оптические фильтры на основе объёмных фоторефрактивных решеток обладают одним существенным преимуществом по сравнению с другими известными типами. Изменение селектуемой длины волны такого фильтра может быть осуществлено за счёт изменения среднего показателя преломления кристалла, т.е. электрическим методом. Приведённый анализ показывает, что потенциально время перестройки полосы пропускания в этом случае может быть гораздо короче, чем у других известных методов.

В разделе 1.9 на основании приведённого обзора литературы сформулирована постановка задач исследований:

1. Сформулировать основные принципы, которые могут обеспечить эффективное электрическое и оптическое управление дифракцией света на различных типах голографических решеток. Принципы должны определять, какие физические явления являются наиболее перспективными для задачи управления дифракцией света, какой тип дифракции (дифракция Брэгга или Рамана – Ната), а также какой тип решетки (динамическая или статическая) являются оптимальными для решения конкретной задачи.
2. Определить наиболее перспективные фоторефрактивные кристаллы, которые могут быть использованы для оптического и электрического управления условиями дифракции как на толстых, так и на тонких статических и динамических голографических решетках.
3. Провести расчёты с целью выяснения оптимальной геометрии, включающей ориентацию кристалла, поляризацию записывающего и считывающего света, а также геометрию записи для задач управления (электрического и оптического) условиями дифракции как на статических, так и на динамических голографических решетках.
4. Разработать экспериментальную методику, позволяющую провести детальное сопоставление экспериментальных данных с теоретическими расчётами.
5. Провести эксперименты с целью проверки теоретических результатов, определения потенциально достижимых параметров, и выявления факторов, ограничивающих возможное достижение потенциальных параметров.

6. Сформулировать научные выводы и рекомендации к практическому использованию результатов работы.

ВТОРАЯ ГЛАВА посвящена электрическому управлению дифракцией света на объёмных статических голограммах в ниобате лития.

В разделе 2.1 даётся критерий электрической селективности объёмных голограмм как такое изменение внешнего электрического поля, при котором дифракционная эффективность изменяется от своего максимального значения до первого нуля. Показано, что в случае малой дифракционной эффективности и при пренебрежении пьезоэффектом, электрическая селективность отражательной голограммы может быть выражена через изменение среднего показателя преломления Δn , вызванного приложением электрического поля:

$$\Delta n/n = \Lambda/T \quad (2)$$

где T – толщина голограммы. Здесь величина Δn означает то изменение среднего показателя преломления, при котором дифракционная эффективность обращается в ноль. Вводится понятие электрического мультиплексирования которое означает, что в одном и том же кристалле записывается несколько голограмм при различных значениях приложенного электрического поля. Восстановление каждой из записанных голограмм происходит в том случае, когда к кристаллу прикладывается то напряжение, при котором была записана данная голограмма. Восстановление голограмм без существенных перекрёстных помех будет обеспечиваться в том случае, когда разница между значениями полей, при которых записываются соседние голограммы превышает значение поля, соответствующее указанному выше критерию электрической селективности. Проведена оценка максимально возможного количества электрически переключаемых голограмм (электрического мультиплексирования) которое определяется соотношением между пробивным напряжением кристалла и т.н. полуволновым напряжением, которое определяется электрооптическими свойствами образца.

В разделе 2.2 проводится расчёт оптимальной ориентации кристалла для электрического управления условиями дифракции. Приведены ориентационные зависимости эффективных электрооптических

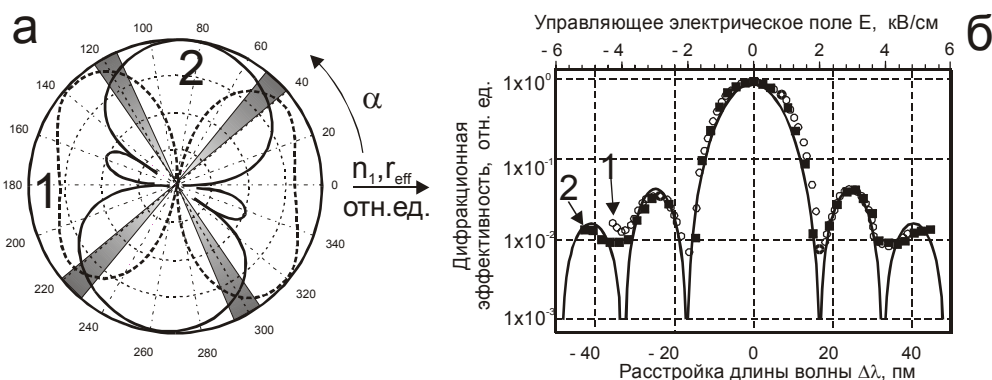


Рис.1. LiNbO₃. а: Ориентационные зависимости эффективного электрооптического коэффициента (пунктир,1) и амплитуды решетки (сплошная линия,2) для необыкновенной поляризации, выделенные сектора – оптимальная ориентация кристалла для электрического управления.
 б: спектральная (○) и электрическая селективности (■) фильтра, сплошная линия - расчёт.

коэффициентов γ_{eff} для двух собственных поляризаций. Максимальное значение $\gamma_{\text{eff}} = 40$ пм/В достигается для необыкновенной поляризации, когда угол (α) между направлением приложения поля и осью С составляет примерно $\pm (40^\circ - 50^\circ)$ (Рис.1). Проведен расчёт ориентационных зависимостей амплитуды голографической решетки n_1 для двух собственных поляризаций. При расчёте фиксировались условия записи (интенсивность и длина волны записывающего света, контраст интерференционной картины, концентрация примесных центров). Полученная зависимость демонстрирует изменение n_1 от угла α . Из приведённых зависимостей для γ_{eff} и n_1 видно, что в случае ориентации, оптимальной для электрического управления $\alpha \pm (40^\circ - 50^\circ)$, величина n_1 имеет достаточно большое значение, и таким образом, теоретически возможно получение голограмм с дифракционной эффективностью, приближающейся к 100% и при этом иметь высокую чувствительность к управлению электрическим полем.

Раздел 2.3 посвящен экспериментальным исследованиям электрического управления дифракцией на объёмных голограммах. Для экспериментов использовались образцы LiNbO₃ с разной степенью допирования Fe (от 0.01 до 0.5 весовых процента). Ориентация всех образцов была близкой к оптимальной для электрического управления

($\alpha \pm 40^0 - 50^0$). Толщина образцов $T=7 - 10$ мм. В качестве электродов, использовалась проводящая паста, которая наносилась на противоположенные стороны образца. Расстояние между электродами составляло 2 - 3 мм. Экспериментальная установка представляла из себя схему записи голограмм во встречных пучках. Исследовалась зависимость дифракционной эффективности голограммы от величины внешнего поля. Обнаружено, что экспериментальная зависимость в целом хорошо согласуется с теоретически рассчитанной зависимостью дифракционной эффективности от величины внешнего поля. Однако, при некоторых экспериментальных условиях положение экспериментально измеренного положения максимума зависимости дифракционной эффективности от внешнего поля отличалось от теоретически ожидаемого. Подробное описание данного явления дано в разделе 2.6. С целью проверки теоретических оценок максимально-возможного числа электрически-мультиплексированных голограмм была проведена запись и восстановление 17-ти голограмм путем переключения соответствующего приложенного поля.

Раздел 2.4 посвящен детальным экспериментальным исследованиям спектральной и электрической селективности, а также спектрального и электрического мультиплексирования отражательных голограмм. Приложение внешнего электрического поля изменяет показатель преломления кристалла, что влечёт за собой изменение длины волны света в кристалле. Экспериментально продемонстрировано, что для отражательных решеток, записанных в электрооптическом кристалле методы спектрального и электрического мультиплексирования голограмм эквивалентны в том смысле, что изменение длины волны самого источника излучения, или изменение длины волны в кристалле за счёт приложения электрического поля обеспечивает выполнение условия Брэгга (1) для соответствующей голограммы.

Для записи и считывания голограмм использовался перестраиваемый лазер ($\lambda = 782 - 786$ нм, $P_{\text{вых}} \approx 54$ мВт). Образец LiNbO_3 был допирован Fe с концентрацией не ниже 0.5 весовых процентов, что обеспечило необходимую фоточувствительность для записи голограмм в указанном диапазоне длин волн. Измерялись зависимости дифракционной эффективности от длины волны и от приложенного напряжения. Экспериментально продемонстрировано, что для толщины голограммы $T=9.25$ мм спектральная селективность голограммы $\Delta\lambda \approx 18$ пм, а электрическая $\Delta E \approx 2.05$ кВ/см.

В разделе 2.5 продемонстрирована возможность использования комбинации спектрального и электрического мультиплексирования для создания высокочастотных электрически управляемых фильтров. Экспериментально продемонстрирован электрически переключаемый фильтр, содержащий 7 спектральных каналов. Спектральная селективность каждого канала составила ≈ 18 нм, полный диапазон перестройки ± 108 нм, управляющие поля ± 12.3 кВ/см.

В разделе 2.6 исследуется влияние фотогальванического поля [5] на условия дифракции Брэгга. Экспериментально и теоретически показано, что во время записи голограммы в образце LiNbO_3 протекает фотогальванический ток, который приводит к возникновению однородного фотогальванического поля, что в свою очередь приводит к изменению показателя преломления кристалла. После окончания освещения кристалла, однородное фотогальваническое поле релаксирует. Изменение среднего показателя преломления кристалла во время записи приводит к тому, что при считывании голограммы необходимо прикладывать дополнительное поле, чтобы достичь максимальной дифракционной эффективности, так как необходимо обеспечить то же самое значение среднего показателя преломления при считывании, которое было во время записи с учётом фотовольтаического поля.

В разделе 2.7 формулируются результаты и выводы второй главы.

ТРЕТЬЯ ГЛАВА посвящена оптическому и электрическому управлению условиями дифракции света на объёмных динамических голографических решетках в титанате бария.

В разделе 3.1 проводится теоретический расчёт оптимальной ориентации кристалла для электрического управления условиями дифракции. Приведены рассчитанные ориентационные зависимости эффективных электрооптических коэффициентов γ_{eff} и n_1 для двух собственных поляризации. Из ориентационных зависимостей видно, что для BaTiO_3 оптимальным является угол $\alpha \approx \pm(55^\circ \dots 60^\circ)$ между оптической осью и направлением электрического поля и необыкновенная поляризация считывающего света. Важно отметить, что данный угол обеспечивает как наилучшее электрическое управление (коэффициент γ_{eff}), так и наибольшую амплитуду решетки n_1 .

В разделе 3.2 приводятся результаты экспериментальных исследований оптического и электрического управления дифракцией. Особое внимание

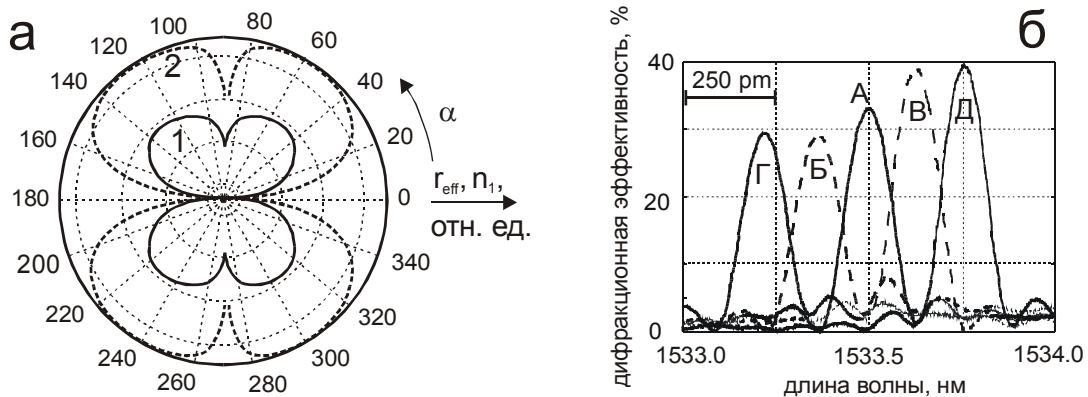


Рис.2. BaTiO₃. (а) Ориентационные зависимости эффективных электрооптических коэффициентов (1) и амплитуды решетки (2) для необыкновенной поляризации. (б) Демонстрация электрического управления передаточной характеристикой фильтра: А($E_0=0$), Б($E_0=-370$ В/см), В($E_0=389$ В/см), Г($E_0=-614$ В/см), Д($E_0=653$ В/см).

уделяется геометрии записи – считывания динамических голограмм (Рис.3). Непрерывная запись голограммы производится в пропускающей геометрии ($\lambda=532$ нм), а считывание – в отражающей. Для считывания использовался лазер с перестраиваемой длиной волны ($\lambda=1456-1583$ нм). За счёт выбора необходимого угла между записывающими лучами ($\theta=49 - 51^\circ$) можно записать голограмму с таким периодом решетки, который будет удовлетворять условиям дифракции Брэгга в отражающей геометрии для используемого диапазона длин волн для считывания. Это позволило исследовать зависимость дифракционной эффективности объёмных динамических голограмм от длины волны считывания. Исследовались кристаллы BaTiO₃:Со с различной степенью допирования. Толщина кристаллов $T= 6$ и 10 мм, что позволяло записывать голограммы толщиной примерно 5 и 9 мм. Экспериментально продемонстрирована спектральная селективность таких голограмм

$$\lambda_r = 2\Lambda n$$

$$\Lambda = \frac{\lambda_w}{2\sin\theta}$$

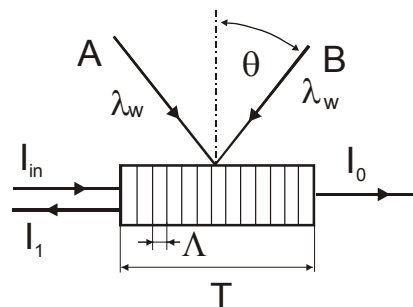


Рис.3. Геометрия записи-считывания динамических решеток в BaTiO₃. А,В – записывающие лучи, длина волны λ_w, θ - угол записи, I_{in} – считывающий луч, I₁ – продифрагировавший луч, I₀ – нулевой порядок дифракции. Слева показаны условия для наблюдения дифракции в отражающей геометрии.

составила Δλ≈112 пм и Δλ≈52 пм. Дифракционная эффективность превысила 80%. Изменение угла между записывающими лучами приводит к изменению периода решетки, что в свою очередь приводит к изменению длины волны Брэгга λ_B для считывающего света в отражающей геометрии. Используя такой метод оптического управления условиями дифракцией экспериментально продемонстрирована перестройка λ_B в диапазоне 1482.5...1560.0 нм. Время перестройки в этом случае определялось временем перезаписи новой голограммы и составило 0.5...0.7 с. Экспериментально продемонстрировано электрическое управление длиной волны Брэгга λ_B в диапазоне примерно ±0.255 нм за время примерно 80...90 нс. Управляющие поля составили примерно ±640 В/см, что хорошо согласуется с расчётными данными. Увеличение электрических полей выше 1 кВ/см приводило к дефокусировке образца, что и ограничивало диапазон перестройки. Время перестройки было ограничено ёмкостью структуры электрод-кристалл-электрод.

В разделе 3.3 рассматривается возможность использования объёмных динамических голограмм в качестве высокочастотных спектральных фильтров. Вводится соотношение, позволяющее определять передаточную характеристику из зависимости дифракционной эффективности голограммы от длины волны считывания.

Раздел 3.4 посвящен оптическим фильтрам с управляемой формой передаточной

характеристики. Рассматривается случай, когда голографическая решетка состоит из двух секций с отличающимися начальными фазами решетки вдоль направления распространения считывающего света. Приводится аналитическое решение для случая с произвольным соотношением длин секций L_1 и L_2 и для произвольной разности фаз между секциями 2φ . Рассмотрен частный случай, когда $L_1=L_2$, а $2\varphi=180^\circ$. В этом случае передаточная характеристика преобразуется из состояния «отражение» в состояние «пропускание». Предлагается оригинальная методика, позволяющая в реальном времени управлять формой передаточной характеристики. Для это используются объёмные динамические голографические решетки. Геометрия записи-считывания была такая же как в разделе 3.2. Для создания фазового сдвига в одной из секций решетки используется управляемый жидкокристаллический фазовый модулятор, установленный в один из записывающих лучей, и перекрывающий только половину луча. Приводятся результаты экспериментальных измерений и теоретических расчётов передаточных характеристик в зависимости от разности фаз между секциями. Результаты теории и эксперимента находятся в хорошем согласии.

В разделе 3.5 метод управления передаточной характеристикой за счёт фазо-сдвинутых секций развивается на случай нескольких секций. Дается экспериментальное и теоретическое обоснование использования для расчёта формы передаточной характеристики в случае малой дифракционной эффективности преобразования Фурье от функции распределения показателя преломления решетки. Приводятся результаты численного расчёта и экспериментальных измерений передаточной характеристики для случая голограммы, состоящей из 3-х и 5-ти секций с различными фазами (Рис.4). На примере этих решеток найдены фазовые соотношения, которые позволяют не только менять форму передаточной характеристики, но даже создавать передаточные характеристики с 2-мя полосами пропускания (для решетки из 3-секций) и с 2-мя, 3-мя и 4-мя полосами (для решетки из 5-ти секций). Продемонстрирована возможность создания передаточной характеристики с П-образным профилем.

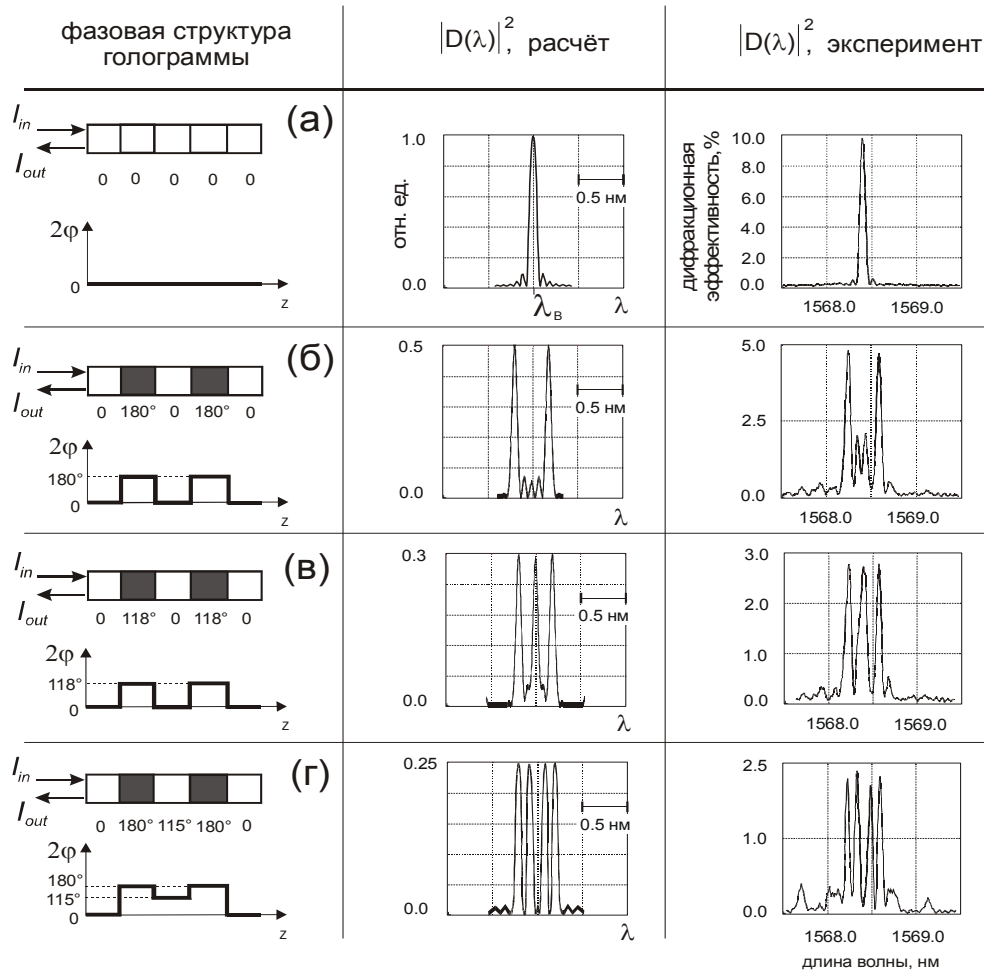


Рис.4. Демонстрация оптического управления передаточными характеристиками фильтра за счёт фазо-сдвинутых секций.

В разделе 3.6 исследуется схема для записи динамических голограмм в пропускающей геометрии, и считывании в отражающей геометрии на другой длине волны в качестве интерферометра для определения малых изменений углов между записывающими лучами (Рис.3). Принцип работы такого интерферометра заключается в измерении угла между записывающими лучами по сдвигу центральной длины волны передаточной характеристики. Экспериментально показано, что угловая чувствительность такого интерферометра $\approx 10^{-8}$ радиан ($\approx 5.7 \times 10^{-7}$ углового градуса). Приводится оценка возможных погрешностей измерений.

В разделе 3.7 формулируются основные результаты и выводы третьей главы и делается вывод о перспективности использования полученных результатов для создания высокодобротных спектральных оптических фильтров для систем оптической связи.

ЧЕТВЁРТАЯ ГЛАВА посвящена исследованиям оптического управления дифракцией света в силленитах.

В разделе 4.1 приводится анализ дифракции света на тонких динамических голограммах в кубических кристаллах. Показано, что в случае освещения кристалла двумя когерентными лучами, при выполнении условия дифракции на тонкой голограмме, и при контрасте интерференционной картины, близком к единице, в дальней зоне дифракции существует не только известное двухволновое взаимодействие, но и так называемое трёхволновое взаимодействие, которое является результатом интерференции первого порядка дифракции на линейной компоненте одного луча, второго порядка дифракции на линейной компоненте другого луча, и первого порядка дифракции одного из лучей на первой нелинейной компоненте решетки показателя преломления (Рис.5). Анализируются геометрии изотропной и анизотропной дифракций. Теоретически показано, что для анизотропной дифракции, при соответствующем выборе периода голографической решетки, можно исключить две из трёх указанных компонент дифракции. Вторым порядком дифракции на линейной компоненте имеет поляризацию, повернутую на 90^0 относительно исходной, поэтому он может быть исключён за счёт установки соответствующим образом ориентированным анализатором. Первый порядок дифракции на нелинейной компоненте может быть исключён за счёт выбора такого периода голограммы, когда для дифракции на нелинейной компоненте не выполняются условия тонкой голограммы. Результаты экспериментальных исследований, выполненные с использованием тонкого образца кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ полностью подтвердили теоретические результаты.

В разделе 4.2 приводятся результаты исследования адаптивного интерферометра на небрэгговском порядке дифракции. Полученные в предыдущем разделе результаты позволили предложить оригинальную схему интерферометра, использующего только один, небрэгговский порядок дифракции. В этом случае, в отличие от широко известной схемы интерферометра, использующего двухволновое взаимодействие, в направлении распространения небрэгговского порядка отсутствует нулевой порядок дифракции, что

заметно улучшает выходное отношение сигнал-шум. Экспериментально продемонстрировано детектирование фазомодулированных лучей с амплитудой фазовой модуляции 2×10^{-3} радиан в полосе частот 1 Гц.

В разделе 4.3 приводятся результаты исследования интерферометра для направленного детектирования ультразвуковых волн, возбуждённых наносекундным импульсом света. Известные бесконтактные методы детектирования таких волн, и в особенности – направленного детектирования (т.е. определения не только амплитуды волны, но и направление её прихода) вступают в определённые проблемы, т.к. полоса регистрируемого сигнала достигает 30 МГц. Кроме того, регистрация кратковременного, аperiodического сигнала обычно проводится при наличии различных помех. В литературе известны методы детектирования таких волн при помощи адаптивного интерферометра в геометрии двухволнового взаимодействия. Предложенная оригинальная схема позволяет производить направленное детектирование. Формирование характеристики направленности в такой схеме производится за счёт записи голограммы достаточно большой площади исследуемого объекта, и последующей пространственной фильтрацией восстановленного изображения.

В разделе 4.4 формулируются основные результаты и выводы четвёртой главы.

Приложение П1 посвящено оптическому возбуждению волн пространственного заряда в силленитах, и исследованию их дисперсионного соотношения [6]. Предлагаемая методика основана на освещении кристалла осциллирующей интерференционной картиной и детектирования небрэгговского порядка дифракции в условиях тонкой голограммы. Для определения собственной частоты волн пространственного заряда исследуется зависимость дифракционной эффективности небрэгговского порядка дифракции от частоты фазовой модуляции одного из записывающих лучей. Известное теоретическое выражение для закона дисперсии имеет вид:

$$\Omega_w = 1/\tau_M L_0 K_w = \Lambda_w / \tau_M L_0 2\pi \quad (3)$$

где Ω_w – собственная частота, K_w – волновое число, и Λ_w – период волны пространственного заряда, τ_M – максвелловское время релаксации, L_0 дрейфовая длина

носителей. На рис.6 показаны экспериментально измеренная частота резонанса волн пространственного заряда $\Omega_r/2\pi$ и теоретические зависимости $\Omega_w/2\pi$ от пространственной частоты $\nu=1/\Lambda$. Эти данные впервые позволили экспериментально подтвердить справедливость закона дисперсии волн пространственного заряда, предложенного ранее теоретически.

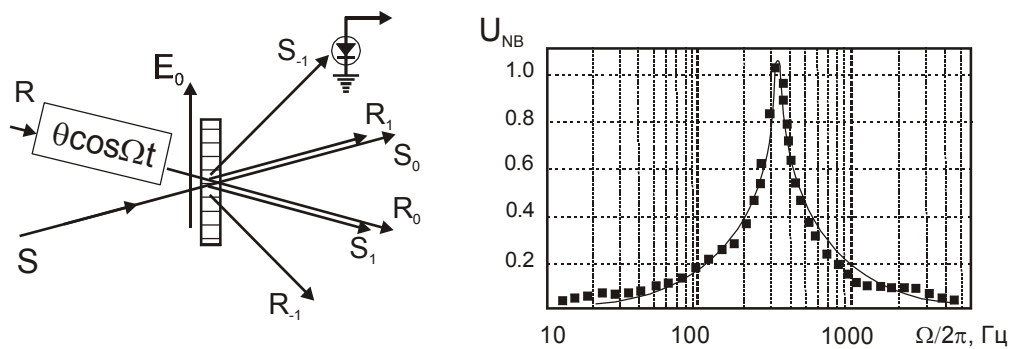


Рис.5. Слева: возникновение небрэгговских порядков S_{-1} и R_{-1} в случае анизотропной дифракции на тонкой голограмме. Эта схема используется как адаптивный голографический интерферометр, а также для исследования волн пространственного заряда, измерения проводятся в луче S_{-1} . Справа: зависимость дифракционной эффективности небрэгговского порядка дифракции от частоты фазовой модуляции $\Omega/2\pi$ для $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ $E_0=9.1\text{кВ/см}$, $I_0=340\text{ мВт/см}^2$.

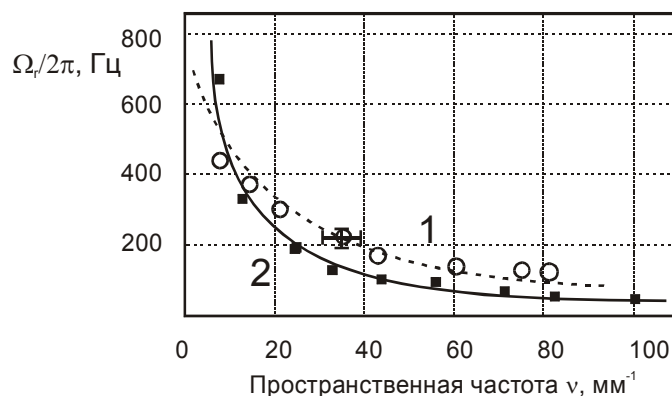


Рис.6. Зависимость резонансной частоты волны пространственного заряда от пространственной частоты решетки. 1- $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$, 2 – $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$.

В приложении П2 предлагается оригинальная методика определения одной из важнейших характеристик фоторефрактивных кристаллов – концентрации ловушечных уровней N_A , которая определяет максимально-возможную амплитуду поля пространственного заряда E_q . Как следует из анализа, проведённого в четвёртой главе, реальная часть компоненты поля пространственного E_{sc}^{real} заряда определяет амплитуду сигнала на первой гармонике (U_Ω) частоты фазовой модуляции Ω , а мнимая компонента E_{cs}^{im} - амплитуду сигнала ($U_{2\Omega}$) на второй гармонике 2Ω . Можно показать, что в условиях пренебрежения диффузионным полем $U_{2\Omega}/U_\Omega = (\theta/4) \times (E_0/E_q)$, где θ - амплитуда фазовой модуляции. Предлагаемая методика основана на одновременном измерении сигналов на первой и второй гармониках частоты фазовой модуляции, что обеспечивает её высокую чувствительность. Приводятся результаты измерений N_A для $Bi_{12}SiO_{20}$: $(3.4 \pm 0.5) \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$, для $Bi_{12}GeO_{20}$: $(1.1 \pm 0.3) \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$, для $Bi_{12}TiO_{20}$: $(6.0 \pm 2.0) \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Обсуждаются возможные паразитные факторы, влияющие на сигнал на 2Ω . Показано, что наибольший паразитный вклад может быть связан с наличием эллиптической поляризации. Предлагаются способы устранения этого вклада.

В Заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Теоретически и экспериментально показано, что электрически управляемая дифракция света на фоторефрактивных решетках обусловлена изменением среднего показателя преломления кристалла за счёт линейного электрооптического эффекта. Изменение показателя преломления приводит к изменению условий Брэгга. Наиболее эффективной является отражающая геометрия считывания голограмм, при этом решётка может быть как статическая, так и динамическая.

Проведённый теоретический анализ электрооптического эффекта в одноосных фоторефрактивных кристаллах позволил оптимизировать ориентацию кристалла и условия эксперимента с целью обеспечения максимальной электрической селективности при заданной дифракционной эффективности.

В рамках проведённых расчётов:

- теоретически определена оптимальная конфигурация эксперимента для электрического управления дифракцией света на голографических решетках в кристаллах $LiNbO_3$ (точечная группа $3m$) и в кристаллах $BaTiO_3$ (точечная группа $4mm$). Оптимальная геометрия предполагает: отражательную геометрию

считывания голографических решеток, использование поперечного электрооптического эффекта и ориентацию обоих типов кристаллов, при которой оптическая ось C направлена под углом $\pm (40^0 - 50^0)$ относительно направления прикладываемого электрического поля, и использование необыкновенной поляризация считывающего света;

- рассмотрена зависимость параметра расстройки Брэгга ξ от ориентации кристаллографических осей, волнового вектора голограммы и внешнего электрического поля.

2. Обнаружен эффект сдвига максимума зависимости дифракционной эффективности от приложенного поля во время записи и считывания голограмм в отражающей геометрии. Разность значений электрических полей, обеспечивающих условия Брэгга во время записи и считывания голограммы могут превышать 6 кВ/см. Выявлены факторы, влияющие на величину сдвига. Определены экспериментальные условия, позволяющие минимизировать сдвиг. Предложена теоретическая модель, качественно объясняющая обнаруженный эффект. Показано, что причиной обнаруженного явления является фотогальванический эффект в ниобате лития.

3. Экспериментально показана возможность использования элементарных объёмных голографических решеток в качестве высокодобротных оптических спектральных фильтров.

На статических решетках в ниобате лития продемонстрирована спектральная селективность 18 ± 2 пм, на длине волны 784 нм, что соответствует добротности фильтра примерно 4.4×10^4 .

На динамических решетках в титанате бария продемонстрирована спектральная селективность примерно 50 пм в диапазоне длин волн 1460 – 1570 нм, что соответствует добротности фильтра примерно 1.6×10^4 .

4. Теоретически обосновано и экспериментально продемонстрировано быстрое электрическое управление положением передаточной характеристики оптических фильтров за счёт изменения среднего показателя преломления кристалла.

На статических решетках в ниобате лития диапазон перестройки положения полосы пропускания фильтра составил примерно ± 350 пм,

На динамических решетках в титанате бария диапазон перестройки положения полосы пропускания фильтра составил примерно ± 255 нм

Время перестройки полосы пропускания составляло примерно 80 нс и было ограничено электрической ёмкостью структуры электрод – кристалл - электрод. На сегодняшний день экспериментально продемонстрированная скорость перестройки (255 нм за 80 нс) является рекордной.

5. Теоретически и экспериментально выявлены зависимости дифракционной эффективности от периода голографической решетки, пространственной фазовой неоднородности профиля голографической решетки, а также временной (как периодической, так и импульсного типа) фазовой модуляции в одном из записывающих лучей.

6. Теоретически обоснованы и экспериментально реализовано оптическое управление положением передаточной характеристики оптического спектрального фильтра на основе динамических объёмных решеток в титанате бария за счёт изменения периода голографической решетки. Диапазон перестройки полосы пропускания в этом случае составил примерно 80 нм. В этом случае время изменения положения передаточной характеристики определяется временем перезаписи новой голографической решетки и составил время порядка 1 секунды.

7. Впервые методом оптически управляемой дифракции реализовано оптическое управление формой, количеством, и положениями передаточных характеристик в реальном времени за счёт введения в динамическую голографическую решетку набора фазовых сдвигов (при сохранении периода решетки).

В том числе, на примере объёмных динамических решеток в титанате бария продемонстрировано:

- преобразование передаточной характеристики из состояние “отражение” в состояние “пропускание”
- преобразование передаточной характеристики, содержащей одну полосу пропускания в передаточную характеристику, содержащую 2, 3, и 4 полосы пропускания

- изменение положения максимумов передаточных характеристики на 0.2 нм относительно начального положения.
- создание П – образной передаточной характеристики.
-

8. Впервые предложена оригинальная методика эксперимента и схема записи - считывания динамических голограмм, совмещающая в себе одновременно два процесса: запись объёмных голограмм в пропускающей геометрии на одной длине волны, и их одновременным считыванием в отражающей геометрии на другой длине волны – схема со смешанной голографической конфигурацией.

Предложенная схема позволяет:

- отдельно исследовать влияние изменения периода голографических решеток в фоторефрактивных кристаллах за счёт изменения угла записи, и влияние изменения показателя преломления за счёт приложения электрического поля или, например, за счёт изменения температуры,
- исследовать управление формой передаточной характеристики в реальном времени за счёт введения в динамическую голографическую решетку набора фазовых сдвигов
- измерять изменения углов записывающего света с точностью до 10^{-8} радиан, что позволило предложить использовать данную схему в качестве оригинального интерферометра – угломера.

9. Проведенный теоретический анализ дифракции света на тонких динамических элементарных голографических решетках в силленитах позволил объяснить поведение высших (небрэгговских) порядков дифракции для случаев изотропной и анизотропной дифракций в зависимости как от пространственной частоты решетки, так и в зависимости от частоты фазовой модуляции. В рамках проведённого анализа:

- на примере дифракции в направлении первого небрэгговского порядка показано, что существуют по крайней мере три дифрагированных луча, распространяющихся в этом направлении;
- показано, каким образом возможно произвольное исключение “нелинейной” компоненты, или высшего порядка “линейной” компоненты дифракции за счет изменения пространственной частоты или за счёт подавления луча, ортогонально

поляризованного к первому порядку дифракции (в геометрии анизотропной дифракции)

- показано, что измерение интенсивности небрэгговского порядка дифракции от частоты фазовой модуляции одного из записывающих лучей позволяет регистрировать возбуждённые волны пространственного заряда.

10. В результате теоретического анализа небрэгговского порядка дифракции в тонких решетках в силленитах позволили предложить и экспериментально реализовать новую геометрию интерферометра, использующего единственный небрэгговский порядок дифракции. Теоретически и экспериментально показано, что детектирование фазомодулированного сигнала при помощи единственного небрэгговского порядка дифракции позволяет исключить влияние постоянной составляющей в интенсивности записывающего луча, тем самым снизить аддитивные шумы, обусловленные флуктуациями лазера. Экспериментально продемонстрировано улучшение чувствительности по сравнению с геометрией двухволнового взаимодействия в 17 раз. Показана возможность определения амплитуды фазовой модуляции до 2×10^{-3} радиан в полосе 1 Гц (что соответствует колебаниям отражающей поверхности с амплитудой 0.1 нм).

11. Впервые на примере тонких динамических голографических решеток в силленитах экспериментально исследован и подтверждён ранее предсказанный в теоретических работах аномальный закон дисперсии волн пространственного заряда.

12. Впервые на примере динамических голографических решеток в силленитах продемонстрирована возможность использования адаптивного голографического интерферометра в геометрии двухволнового взаимодействия для измерения концентрации ловушечных центров в фоторефрактивных кристаллах в условиях малой дифракционной эффективности.

Список цитируемой литературы:

1. Collier R.J., Burckhardt C.B., Lin L.H., Optical holography, Academic Press, New York, 1971, 605 p
2. Kogelnik H., Coupled wave theory for thick hologram gratings, Bell. Syst. Tech. J 48 (1969) 2909 p
3. Петров М. П., Степанов С. И., Хоменко А. В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука, 1992. 318 с.
4. Alvarez-Bravo J. V., Muller R., Arizmendi L., Europhys. Lett., Vol. 31 (1995) 443-448
5. Стурман Б. И., Фридкин В. М. Фотогальванический эффект в средах без центра симметрии и родственные явления. М.: Наука, 1992. 208 с.
6. Казаринов Р.Ф., Сурис Р.А., Фукс Б.И., Физика полупроводников №6 (1972) 500

Основные результаты исследований опубликованы в работах:

1. Petrov M.P., Petrov V.M., Raptis Y.S., Xu L.P., Anastassakis E. Two-wave and induced three-wave mixing in thin holograms // J.Appl.Phys. – 1996. Vol.79, N 6 – P.2846-2852.
2. Petrov M.P., Petrov V.M., Zouboulis I.S. and Xu L.P. Two-wave and induced three-wave mixing on a thin $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ hologram // Optics Communications – 1997 – Vol.134 – P. 569-579.
3. Petrov M.P., Petrov V.M., Bryksin V.V., Zouboulis I.S., Gerwens A., Kratzig E. Grating Oscillations in Photorefractive Crystals // Optics Letters – 1997 – Vol.22, N 14. – P.1083-1085.
4. Петров М.П., Шамрай А.В., Петров В.М. Зобулис И.С. Поляризационные эффекты связанные с двухволновым взаимодействием в кристаллах титаната и силиката висмута // ФТТ. – 1997 – т.39, вып.11 – С.1990-1994.
5. Petrov V.M., Denz C., Petter J., Tshudi T., Enhancing of the Sensitivity of an Adaptive Holographic Interferometer Using the Non-Bragg Diffraction // Optics Letters. – 1997. – Vol.22. – P. 1902-1904.
6. Petrov V.M., Petrov M.P., Zouboulis I.S., Gerwens A., Kratzig E. Non-Bragg diffraction and grating oscillations in photorefractive holograms // OSA Topical Meeting on Photorefractive Materials, Effects and Devices PR'97 (Japan, June 11-13) – 1997. – P.101-102.
7. Petrov M.P., Petrov V.M., Bryksin V.V., Gerwens A., Wevering S., Kratzig E. Grating Oscillations and Nonlinear Effects in Photorefractive Crystals // J.Opt.Soc.Am. B – 1998. - Vol 15, N7 - P.1-9.
8. Петров М.П., Петров В.М., Караваев П.М. Новый метод измерения концентрации акцепторных центров в фоторефрактивных кристаллах // Письма в ЖТФ. – 1998. – т.24, вып.9 – С.56-60.
9. Petrov M.P., Shamray A.V., Petrov V.M. Spectral and Electric field multiplexing of Volume Holograms and the potential of these techniques for Holographic Memory // Optical Memory & Neural Networks. – 1998. – Vol.7, N1 – P.19-35.
10. Shamray A.V., Petrov V.M., Petrov M.P. Electric field multiplexing in volume LiNbO_3 holograms // Proc. SPIE. – 1998. – Vol.337 – P. 75-83.
11. Петров М.П., Шамрай А.В., Петров В.М. Электрически управляемая дифракция света на отражательных голограммах в кристалле LiNbO_3 // ФТТ. – 1998. – т.40, вып.6 –

C.1038-1041.

12. Petrov M.P., Shamray A.V., Petrov V.M., J. Sanchez Mondragon. Electric field selectivity of reflection volume holograms in LiNbO₃ // Opt. Comm. – 1998. – Vol. 153 – P.305-308.

13. Петров М.П., Паугурт А.П., Брыксин В.В., Петров В.М. Оптическое возбуждение поверхностных волн и фотопьезоэлектрический резонанс в фоторефрактивных кристаллах // Письма в ЖТФ. – 1998. – т.24, вып.11 – С.873-874.

14. Petrov V.M., Wevering S., Petrov M.P., Kratzig E. Estimation of Trap Concentration in Photorefractive Crystals by a Technique of Adaptive Holographic Interferometry // Apl. Phys. B – 1999. – Vol. 68 – P.73-76.

15. Petrov M.P., Bryksin V.V., Petrov V.M., Wevering S., Kratzig E. Dispersion law of photorefractive waves in sillenites // Phys.Rev.A – 1999.–Vol.60,N3– P.2413-2419.

16. Шамрай А.В., Петров М.П., Петров В.М. Перекрестные помехи, вызванные некогерентностью считывающего света при спектральном мультиплексировании отражательных голограмм // ЖТФ. – 1999. – т.44. вып.9 – С.1098-1102.

17. Petrov M.P., Bryksin V.V., Petrov V.M., Wevering S., Kratzig E. Dispersion law of photorefractive waves // OSA Topical Meeting on Photorefractive Materials, Effects and Devices PR'99 – 1999. – Vol.27 – P.214-218.

18. Shamray A.V., Petrov M.P., Petrov V.M., Optimal configuration for electric field multiplexing of volume holograms in photorefractive ferroelectrics // OSA Topical Meeting on Photorefractive Materials, Effects and Devices PR'99 – 1999. – Vol.27 – P.515-521.

19. Stepanov S.I., Petrov V.M., Rodriguez P. Directional detection of laser ultrasonic via single-crystal TWM configuration // OSA Topical Meeting on Photorefractive Materials, Effects and Devices PR'99 – 1999. – Vol.27 – P.198-202.

20. Petrov V.M., Denz C., Shamray A.V., Petrov M.P., Tschudi T. Electric field selectivity and multiplexing of volume holograms in LiNbO₃ // Appl. Phys.B – 2000 – Vol.71 – P.43-46.

21. Stepanov S., Petrov V.M., Rodriguez P., Lopez R. Directional detection of laser-generated ultrasound with an adaptive two-wave mixing photorefractive configuration // Opt.Comm. – 2001 – Vol.187 – P.249-255.

22. Petrov V.M., Denz C., Chamrai A.V., Petrov M.P. Tschudi T. The effect of a photovoltaic field on the Bragg condition for volume holograms in LiNbO₃ // Appl. Phys.B – 2001. – Vol.72 – P.701-705.

23. Petrov V.M., Denz C., Tschudi T., Chamrai A.V., Petrov M.P., Effect of a photovoltaic

field on the Bragg condition in LiNbO₃ // OSA Topical Meeting on Photorefractive Materials, Effects and Devices PR'01 – 2001. – Vol.62 – P.464-469.

24. Petrov V.M., Denz C., Chamrai A.V., Petrov M.P., Tschudi T. Electrically controlled volume LiNbO₃ holograms for wavelength demultiplexing systems // Optical Materials. – 2001. – Vol.18 – P.191-194.

25. Petrov M.P., Petrov V.M., Chamrai A.V., Denz C., Tschudi T. Electrically controlled holographic optical filter // Proc. of 27-th European Conference on Optical Communication “ECOC'01-Amsterdam” – 2001. – Vol.4 – P.628-629.

26. Petrov V.M., Karaboue C., Petter J., Tschudi T., Bryksin V.V., Petrov M.P. A dynamic narrow-band tunable optical filter // Appl. Phys. B – 2003. Vol.76 – P.41-44.

27. Petrov V.M., Chamrai A.V., Petter J., Tschudi T., Petrov M.P. Tunable optical filters based on photorefractive gratings // Proc. SPIE – 2003. – Vol.5135 – P.123-129.

28. Petrov V.M., Lichtenberg S., Petter J., Tschudi T., Chamrai A.V., Petrov M.P. A dynamic wavelength Bragg-filter with an on-line controllable transfer function // OSA Topical Meeting on Photorefractive Materials, Effects and Devices PR'03 – 2003. – Vol.87 – P.564-570.

29. Petrov V.M., Lichtenberg S., Petter J., Tschudi T., Chamrai A.V. Electrically tunable and switchable photorefractive optical filters // OSA Topical Meeting on Photorefractive Materials, Effects and Devices PR'03 – 2003. – Vol.87 – P.582-587.

30. Petrov V.M., Lichtenberg S., Petter J., Tschudi T., Chamrai A.V. Adaptive interferometer with a femtometer-band resolution based on volume photorefractive holograms // OSA Topical Meeting on Photorefractive Materials, Effects and Devices PR'03 – 2003. – Vol.87 – P.588-594.

31. Petrov V.M., Lichtenberg S., Petter J., Tschudi T., Chamrai A.V., Bryksin V.V., Petrov M.P. Optical on-line controllable filters based on photorefractive crystals // J. Opt. A.: Pure Appl. Opt. – 2003. – Vol.5 – P.471-476.

32. Petrov V.M., Lichtenberg S., Petter J., Tschudi T. Control of optical transfer function by phase – shift keying of a holographic Bragg grating // Optics Communications – 2004. – Vol. 229 – P.131 – 139.

33. Petrov V.M., Lichtenberg S., Chamray A.V., Petter J., Tschudi T. Controllable Fabry – Perot interferometer based on dynamic volume holograms // Thin Solid Films – 2004 – Vol.450, N1 – P.178-182.