На правах рукописи

ПЛЕСОВСКИХ АНДРЕЙ МИХАЙЛОВИЧ

ФОТОРЕФРАКТИВНЫЕ ГОЛОГРАММЫ, ФОРМИРУЕМЫЕ В УСЛОВИЯХ ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА В КРИСТАЛЛАХ КЛАССА СИЛЛЕНИТОВ

Специальность 01.04.05 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2007

Работа выполнена на кафедре электронных приборов Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Научный руководитель:	Доктор физико-математических наук, профессор Шандаров Станислав Михайлович
Официальные оппоненты:	Доктор физико-математических наук, Соколов Игорь Александрович
	Кандидат физико-математических наук, Измайлов Игорь Валерьевич
Ведущая организация	Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

Защита состоится « 01» марта 2007 г., в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета 212.267.04 при Томском государственном университете по адресу 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета

Автореферат разослан « 10 » января 2007 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета, Пойзнер Б.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Большой интерес к фоторефрактивным кристаллам не угасает с момента открытия фоторефрактивного эффекта и связан с возможностью их использования для приложений нелинейной оптики: в устройствах динамической голографии, оптической памяти, усиления оптических изображений, обращения и самообращения волнового фронта, и многих других. Своими особенностями данные кристаллы обязаны электрооптическому эффекту и возможности образования поля пространственного заряда под действием неоднородного освещения, что позволяет записывать и хранить в этих кристаллах объемные фазовые голограммы (*М.П. Петров, С.И. Степанов, А.В. Хоменко* (*1992*)).

В ряде кристаллов ($Bi_{12}SiO_{20}$, $Bi_{12}TiO_{20}$, $BaTiO_3$, $KNbO_3$:Fe) формирование фоторефрактивных голограмм сопровождается значительным фотоиндуцированным поглощением света, оказывающим заметное влияние на характеристики устройств на их основе. Явление фотоиндуцированного поглощения света традиционно связывают с наличием в кристаллах, наряду с донорными, мелких ловушечных уровней, имеющих большее сечение фотоионизации (*K. Buse* (*1997*)). Для описания фотоиндуцированного поглощения и фотопроводимости в некоторых кристаллах применяются модели зонного переноса, включающие в рассмотрение несколько фотоактивных центров, способных находиться в различных зарядовых состояниях. Формирование поля пространственного заряда при записи голограмм в таких кристаллах сопровождается образованием нескольких зарядовых решеток. Динамика их взаимодействия при формировании голограмм и релаксации в режиме хранения, а также при изменении внешних условий, может оказать существенное влияние на параметры фоторефрактивного отклика. В связи с этим знание механизмов данного явления имеет важное значение для описания динамических голограмм в фоторефрактивных кристаллах и проектирования устройств на их основе.

Привлекательными материалами для создания различных фоторефрактивных устройств являются номинально чистые и легированные кристаллы титаната висмута ($Bi_{12}TiO_{20}$), обладающие быстрым откликом при воздействии на них излучением из видимой области спектра, и малым удельным оптическим вращением. Однако формирование динамических голограмм в этих кристаллах сопровождается значительным фотоиндуцированным изменением оптического поглощения, связанным со сложной структурой дефектных центров (*O.V. Kobozev, S.M. Shandarov et al.* (*1999*)). Наличие таких центров приводит к различным эффектам, не описываемым в рамках традиционных моделей фоторефракции. Предполагаемое участие одних и тех же фотоактивных центров в процессах образования объемного заряда и фотоиндуцированного изменения поглощения позволяет получить информацию о них из результатов экспериментальных исследований каждого из этих эффектов. Следует отметить, что для силленитов, к которым относится титанат висмута, установившиеся представления о типе фотоактивных дефектов и о зонной модели переноса заряда в настоящее время отсутствуют.

Использование попутного двухпучкового взаимодействия при записи голографических решеток не всегда позволяет добиться достаточно хорошей дифракционной эффективности в случае диффузионного механизма формирования поля пространственного заряда. Увеличение фоторефрактивного отклика, обычно достигаемое за счет приложения к кристаллу внешнего электрического поля с высокой напряженностью, делает данную схему мало привлекательной. В тоже время, увеличение амплитуды фоторефрактивной голограммы может быть реализовано при встречном распространении световых пучков (*Е.Ю. Агеев, С.М. Шандаров и др.(2001)*). В этом случае пространственный период объемной голограммы имеет наименьшее значение, увеличивая тем самым ее дифракционную эффективность.

Взаимодействие световых волн в кубических фоторефрактивных кристаллах на объемных голограммах сопровождается изменением поляризационного состояния светового поля, что делает необходимым использование векторных моделей для его описания. В кристаллах симметрии 23 изменение поляризации взаимодействующих волн происходит также вследствие естественной оптической активности. В результате при анализе встречного взаимодействия световых волн на отражательных голограммах в нецентросимметричных кубических фоторефрактивных кристаллах со сложной структурой дефектных центров необходимо также учитывать анизотропию электрооптического и фотоупругого вкладов в фазовую модуляцию оптических свойств среды полем пространственного заряда решетки и ее абсорбционную составляющую, эффекты поглощения света и истощения накачки. Однако изучение литературных данных показало, что такого полного анализа проведено не было.

Все вышеизложенное определило цель диссертационной работы.

Цель и задачи диссертационной работы. Целью работы является исследование процессов формирования голографических решеток и развития фотоиндуцированного поглощения света в фоторефрактивных кристаллах с учетом сложной структуры дефектных центров и изменения внешних условий, а также влияния векторного характера светового поля на двухволновое взаимодействие на фоторефрактивных отражательных голограммах в нецентросимметричных кубических кристаллах.

Для достижения данной цели решались следующие основные задачи:

– разработка методики численного решения дифференциальных уравнений для фоторефрактивного кристалла с двукратно ионизируемыми донорными центрами и мелкими ловушками, и анализ динамики формирования поля пространственного заряда в изменяющихся условиях;

– создание экспериментальной установки и проведение исследований по фотоиндуцированному поглощению света в кристалле титаната висмута при двухцветном облучении;

– разработка векторной модели встречного двухволнового взаимодействия световых пучков на отражательных голографических решетках в кубических фоторефрактивных кристаллах;

– изучение влияния анизотропии электрооптического эффекта на двухпучковое взаимодействие на отражательной голографической решетке в кубических фоторефрактивных кристаллах.

Методы исследования. Теоретический анализ динамики фоторефрактивного отклика основывался на модели зонного переноса для кристаллов, содержащих донорные и ловушечные центры. При численном моделировании для решения системы нелинейных дифференциальных уравнений использовался метод Эйлера.

При экспериментальном исследовании фотоиндуцированного поглощения в кристаллах титаната висмута использовалось некогерентное узкополосное излучение полупроводниковых светодиодов, исключающее образование фоторефрактивных голограмм.

При теоретическом анализе встречного двухволнового взаимодействия в кубических фоторефрактивных кристаллах использовался методы медленно меняющихся амплитуд и связанных мод, при этом учитывалась естественная оптическая активность, дополнительный фотоупругий вклад в модуляцию оптических свойств среды фазовой компонентой голографической решетки, и ее абсорбционная составляющая.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. В кристаллах с монополярной электронной проводимостью, фотоактивными мелкими ловушками и двукратно ионизируемыми донорными центрами фоторефрактивные голограммы усиливаются в темновых условиях при приложении внешнего постоянного электрического поля и проявляются при включении считывающего светового пучка, вследствие пространственного сдвига соответствующих зарядовых решеток относительно их первоначального положения, связанного с неоднородностью тока проводимости.
2. Ловушечные центры, обусловливающие фотоиндуцированное поглощение света в легированных кальцием кристаллах титаната висмута, не являются мелкими, и соответствующие им энергетические уровни расположены в запрещенной зоне на расстояниях, превышающих 1,42 эВ от дна зоны проводимости.
3. В кристаллах титаната висмута вклад фазовой составляющей отражательной голографической решетки в межмодовые процессы взаимодействия, происходящие с изменением показателя преломления собственных волн, отсутствует в кристаллографических плоскостях типа {100} и достигает максимальных значений при ориентации вектора решетки в плоскостях типа {110}, вдоль кристаллографических направлений вида <111>.
4. Анизотропия электрооптического эффекта в кубических фоторефрактивных кристаллах приводит к тому что, вклад фазовой составляющей отражательной голографической решетки во внутримодовые процессы взаимодействия достигает максимума при ориентации вектора решетки вдоль кристаллографических направлений вида <100> и отсутствует при ориентации вектора решетки вдоль направлений вида <110> и <111>.

Достоверность результатов

Достоверность теоретической части работы обеспечивалась использованием обоснованных приближений (метод медленно меняющихся амплитуд, адиабатическое приближение и др.).

Корректность проведенных численных расчетов и выбранного шага дискретизации подтверждается сравнением с другими вычислениями, имеющими более высокий порядок точности.

Достоверность экспериментальных результатов базируется на использовании измерительных приборов с известными характеристиками, имеющих цифровой выход; на обработке большого массива экспериментальных данных, позволяющей оценить случайные погрешности измерений, которые не превышали 5%; а также на применении методов минимизации систематических погрешностей.

Достоверность первого положения подтверждается тем, что на его основе могут быть объяснены результаты экспериментов, описанных *М.П. Петровым, М.Г. Шмелиным, и др. (1985)*.

Достоверность третьего и четвертого положений подтверждается отсутствием противоречий с результатами других работ (*А.Г. Мартьянов, С. М. Шандаров и др.* (*2002*)).

Научная новизна:

1. Выведены уравнения для первых пространственных гармоник зарядовых решеток в кристаллах с двукратно ионизируемыми донорными центрами и фотоактивными мелкими ловушками, на основе которых разработана методика численного анализа динамики поля пространственного заряда фоторефрактивной голограммы при изменяющихся внешних условиях ее формирования, хранения и восстановления.
2. Предложена и экспериментально реализована методика исследования динамики фотоиндуцированного поглощения света в фоторефрактивных кристаллах при двухцветном облучении квазимонохроматическим излучением полупроводниковых светодиодов.
3. Развита самосогласованная векторная модель встречного двухволнового взаимодействия световых пучков на отражательных голографических решетках в кубических фоторефрактивных кристаллах, принимающая во внимание естественную оптическую активность, дополнительный фотоупругий вклад в модуляцию оптических свойств кристалла, абсорбционную составляющую решетки, а также эффекты фотоиндуцированного поглощения света и истощения накачки.

Научная ценность:

1. Проведенный численный анализ динамики формирования поля пространственного заряда в кристаллах с фотоактивными мелкими ловушками и двукратно ионизируемыми донорными центрами позволил дать теоретическое описание наблюдаемых ранее экспериментально эффектов усиления скрытой голограммы в темновых условиях при приложении внешнего

электрического поля и ее проявления при включении считывающего светового пучка.

2. Развитая модель перезарядки дефектных центров позволяет удовлетворительно описать динамику фотоиндуцированного поглощения света в кристаллах $Bi_{12}TiO_{20}:Ca$ при двухцветном облучении и делает возможным прогнозирование влияния посторонней засветки на характеристики устройств динамической голографии на основе кристаллов титаната висмута.
3. Проведен полный анализ анизотропии вклада фазовой составляющей отражательной голографической решетки во внутримодовые и межмодовые процессы взаимодействия в кубических фоторефрактивных кристаллах, позволяющий определить ориентации вектора фоторефрактивной решетки в кристалле, при которых происходит наиболее эффективное взаимодействие световых волн.

Практическая значимость проведенных исследований заключается в следующем:

1. Разработанная методика численного анализа динамики поля пространственного заряда пригодна для проектирования и создания устройств динамической голографической памяти и оптической обработки информации на основе фоторефрактивных кристаллов класса силленитов, обладающих сложной структурой фотоактивных дефектных центров.
2. Разработанные методики численного анализа динамики фотоиндуцированного поглощения света в кристаллах со сложной структурой фотоактивных дефектных центров позволяют в рамках используемых моделей определить материальные параметры фоторефрактивных кристаллов, необходимые для проектирования устройств динамической голографии, таких как адаптивные интерферометры для измерительных систем оптических датчиков.
3. Развитая векторная модель встречного взаимодействия световых пучков на отражательных голограммах в кубических фоторефрактивных кристаллах пригодна для использования при проектировании устройств динамической голографии, таких как адаптивные интерферометры для измерительных систем оптических датчиков, устройства обращения волнового фронта лазерных пучков, и др., основанных на диффузионном механизме формирования поля пространственного заряда и не требующих приложения к кристаллу внешнего электрического поля.

Внедрение результатов работ и рекомендации по их дальнейшому использованию. Результаты диссертационной работы используются на кафедре Электронных приборов Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники при проведении плановых и инициативных научно-исследовательских работ и выполнении курсовых и дипломных работ студентами; включены в спецкурсы «Фоторефрактивная нелинейная оптика» и «Голография и когерентная оптика» для студентов, обучающихся по индивидуальным учебным планам. Созданные экспериментальные установки используются в исследованиях

динамики фотоиндуцированного поглощения света в фоторефрактивных кристаллах и эффектов фоторефрактивной нелинейной оптики. Разработанные алгоритмы и программы численного анализа используются для компьютерного моделирования векторного двухпучкового взаимодействия на отражательных решетках и динамики фотоиндуцированных явлений в кристаллах силленитов. Акты внедрения приведены в Приложении к диссертации. Результаты диссертации целесообразно использовать в Институте автоматики и процессов управления ДВО РАН при разработке оптоэлектронных устройств.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на VI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ'2000», (г. Томск, Россия, 28 февраля –3 марта, 2000г.), на Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2000» (г. Санкт-Петербург, Россия, 19–21 октября, 2000 г.), на Второй школе-семинар молодых ученых «Современные проблемы физики и технологии», (Томск, Россия, 5–7 февраля, 2001г.), на VIII Российской научной студенческой конференции «Физика твердого тела», (Томск, Россия, 16–18 мая, 2000 г.), на XXXIX международной научной студенческой конференции «Студент и научно–технический прогресс, Физика», (Новосибирск, Россия, 10–12 апреля, 2001г.), на XV международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс», (Новосибирск, Россия, 2002), на VIII российской научной студенческой конференции «Физика твердого тела», (Томск, Россия, 14–16 мая, 2002 г.), на Международном оптическом конгрессе «Фундаментальные проблемы оптики», (Санкт-Петербург, Россия, 14–17октября, 2002 г.), на III международной научной коференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2003», (Санкт-Петербург, Россия, 20–23 октября, 2003 г.).

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 17-ти публикациях: в 5-ти статьях в центральных российских журналах, в 1-й статье в периодическом издании Американского оптического общества, в 8-ми публикациях в сборниках трудов Международных конференций и в 3-х публикациях в сборниках трудов Российских научных конференций.

Личный вклад диссертанта.

В диссертации использованы только те результаты, в получении которых автору принадлежит определяющая роль. Опубликованные работы написаны либо без соавторов, либо в соавторстве с членами научной группы, а также со студентами: А.В. Медовник, Н.Н. Черняк, К.С. Плинта. В совместных работах диссертант принимал участие в моделировании, расчетах; в создании экспериментальных установок, проведении экспериментов и интерпретации результатов. Постановка задач исследований осуществлялась научным руководителем.

Структура, объем и содержание диссертации. Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения, списка литературы и Приложения. Полный

объем диссертации – 143 страниц, включая 41 рисунок и 4 таблицы. Список литературы содержит 105 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обоснование актуальности темы диссертации, формулируются цель работы и выносимые на защиту основные научные положения. Определена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, кратко излагается содержание диссертации по главам.

Первая глава является обзорной и посвящена фотоиндуцированным явлениям, наблюдаемым в фоторефрактивных кристаллах, не имеющих центра симметрии. В ней дана краткая историческая справка об открытии и этапах развития исследований фоторефрактивного эффекта, перечислены основные области его применения. Рассмотрены основные физические механизмы, приводящие к формированию объемных голограмм при воздействии на кристалл картиной интерференции двух плоских световых монохроматических волн. Кратко описана одноуровневая модель зонного переноса, рассмотрены диффузионный, дрейфовый и фотовальтаический механизмы фотоиндуцированного разделения зарядов.

Представлены материальные уравнения для двухуровневой модели зонного переноса, позволяющей описать фотоиндуцированное поглощение света и предполагающей наличие в кристалле, в дополнение к глубоким донорам, фотоактивных мелких ловушек. Дано описание модели с двукратно ионизируемыми донорными центрами и мелкими ловушками, которая сделала возможным описание наблюдаемой экспериментально динамики фотоиндуцированного поглощения света в нелегированном кристалле $Bi_{12}TiO_{20}$, относящемся к классу силленитов.

Рассмотрено двухволновое взаимодействие света в фоторефрактивных кристаллах на отражательных голографических решетках, которое позволяет добиваться большой эффективности перекачки мощности между взаимодействующими пучками без приложения внешних электрических полей. Проведен обзор работ по фоторефрактивным отражательным решеткам в кристаллах силленитов; описаны основные подходы к анализу встречного двухволнового взаимодействия в кубических гиротропных кристаллах, учитывающие векторный характер светового поля.

Вторая глава посвящена теоретическому анализу динамики фоторефрактивного отклика в кристаллах силленитов с двукратно ионизируемыми донорными центрами и мелкими ловушками.

Процессы формирования поля пространственного заряда при засветке кристалла картиной интерференции двух плоских монохроматических волн рассмотрены в подразделе 2.1. С использованием приближения малых контрастов интерференционной картины $m \ll 1$ и низкой интенсивности света I_0, а также условия адиабатичности $\partial n / \partial t = 0$ для концентрации электронов в зоне

проводимости, были выведены две системы уравнений для нулевых и первых пространственных гармоник зарядовых решеток, формирующихся на однократно и двукратно ионизированных донорах, мелких ловушках и свободных электронах.

Для анализа динамики фоторефрактивного отклика была разработана методика численного анализа данных систем уравнений, которая позволяла изменять период дифракционной решетки Λ, длительность процессов записи, хранения и проявления голограмм и амплитуду прикладываемого внешнего постоянного электрического поля E_0. Ее использование позволяло “включать” и “выключать” световые пучки накачки I_P и сигнала I_S, их взаимную когерентность и внешнее электрическое поле E_0 в произвольные моменты времени.

В подразделе 2.2 проведен анализ двух режимов записи фоторефрактивной решетки для кристаллов с мелкими ловушками и глубокими донорами, допускающими двукратную ионизацию. Показано, что динамика роста поля пространственного заряда фоторефрактивной решетки при одновременно происходящем фотоиндуцированном изменении поглощения имеет немонотонный характер, с четко выраженным максимумом, положение и величина которого зависит от интенсивности света и механизма формирования поля пространственного заряда (диффузионный или дрейфовый). Получено, что приложение дополнительно постоянного внешнего поля увеличивает амплитуду поля пространственного заряда. Расчеты показали, что повышенная амплитуда поля пространственного заряда в этом случае связана с пространственным сдвигом зарядовых решеток относительно друг друга под действием приложенного внешнего поля, а не с увеличением их абсолютных амплитуд. Основной причиной сдвига решеток является неоднородность тока проводимости, обусловленная пространственной модуляцией проводящих свойств кристалла.

Показано, что возможность двукратной ионизации донорных центров приводит к особенностям в поведении релаксации поля пространственного заряда после «выключения» взаимной когерентности записывающих решетку световых пучков. Динамика релаксации при этом состоит из двух этапов. Первый характеризуется быстрым падением амплитуды решетки за время, сравнимое с временем диэлектрической релаксации τ_{di}, составляющего ~15 с для кристаллов типа силленита при интенсивности света ~150 Вт/м^2. На втором этапе, который при той же интенсивности может продолжаться десятки минут, наблюдается медленное падение поля пространственного заряда, скорость которого определяется релаксацией самих зарядовых решеток.

В подразделе 2.3 рассмотрено влияние постоянного внешнего электрического поля на эффекты хранения и проявления фоторефрактивных решеток в кристаллах с двукратно ионизируемыми донорами и мелкими ловушками. Показано, что приложение постоянного внешнего поля приводит к усилению сформированного в кристалле за счет диффузионного механизма скрытого изображения, при его хранении как в темновых условиях, так и при воздействии на кристалл взаимно некогерентных световых пучков. Включение считывающего пучка приводит к быстрому нарастанию амплитуды решетки с последующим, сравнительно медленным, ее уменьшением. На основе проведенных расчетов показано, что

физической причиной эффектов усиления и проявления скрытого изображения, наблюдаемых ранее экспериментально, является пространственный сдвиг зарядовых решеток, соответствующих однократно и двукратно ионизированным донорам и мелким ловушкам, относительно друг друга без изменения их амплитуды. Этот пространственный сдвиг обусловлен неоднородностью тока проводимости, связанной с пространственной модуляцией проводящих свойств кристалла. При этом пространственная гармоника концентрации электронов в зоне проводимости отлична от нуля в освещенном кристалле и в отсутствие интерференционной картины (при ее контрасте $m = 0$). Для рассматриваемой в диссертации модели пространственная неоднородность проводимости связана с модуляцией таких параметров кристалла, как коэффициент поглощения и время жизни носителей заряда.

В третьей главе представлены результаты исследования динамики фотоиндуцированного поглощения света и его релаксации в темновых условиях в кристаллах титаната висмута.

Подраздел 3.1 посвящен экспериментальному исследованию динамики фотоиндуцированного поглощения света в кристалле $Bi_{12}TiO_{20}$:Ca при одноцветном облучении, и ее численному моделированию. Дано описание экспериментальной установки и методики исследований, в которой использовалось узкополосное некогерентное излучение полупроводникового светодиода, близкого по длине волны ($\lambda = 660$ *нм*) к гелий-неоновому лазеру ($\lambda = 633$ *нм*). Установка позволяла наблюдать динамику фотоиндуцированного изменения поглощения кристалла с временным разрешением до 0,1 с, как при его облучении, так и в процессе темновой релаксации наведенных изменений.

Получено, что фотоиндуцированное изменение поглощения в кристалле $Bi_{12}TiO_{20}$:Ca на длине волны 660 нм является значительным и может достигать значений 0,43 см$^{-1}$. Нарастание поглощения имеет два характерных этапа: начальный участок, сопровождающийся быстрым ростом $\Delta\alpha(t)$, и следующий за ним длительный участок с медленным нарастанием $\Delta\alpha(t)$.

Исследована последовательная засветка кристалла излучением с различными и одинаковыми значениями интенсивности, сопровождающаяся этапами темновой релаксации разной длительности. Обнаружено, что с увеличением интенсивности скорость роста фотоиндуцированного поглощения на начальном участке возрастает, а на конечном участке уменьшается; при этом переход от быстрого участка к медленному становится более резким. Для одинаковых интенсивностей засветки, соответствующих максимальному из использованных значений 55 мВт/см^2, зависимости $\Delta\alpha(t)$ выходили на одинаковый стационарный уровень при каждом эксперименте.

Использование численного анализа динамики фотоиндуцированного поглощения света на основе модели, рассматривающей наличие в кристалле ловушечных центров и глубоких доноров, допускающих двукратную ионизацию, и подгонки результатов под экспериментальные данные позволило определить материальные параметры исследованного кристалла $Bi_{12}TiO_{20}$:Ca. Сравнение результатов расчета с экспериментом показало, что используемая модель позволяет

описать динамику роста и релаксации фотоиндуцированного поглощения, с воспроизведением таких качественных особенностей, как более резкий переход от медленного участка к быстрому при повторной засветке кристалла, и уменьшение скорости нарастания на медленной стадии процесса с каждой последующей засветкой.

В подразделе 3.2 рассмотрено фотоиндуцированное поглощение света в легированных кальцием кристаллах титаната висмута ($Bi_{12}TiO_{20}$:Ca) при их облучении квазимонохроматическим светом полупроводниковых светодиодов на двух длинах волн из набора λ = 870, 660 и 525 нм и предложена модель перезарядки дефектных центров, описывающая эффекты, наблюдаемые при двухцветном облучении. Для проведения экспериментов была разработана установка, позволяющая освещать кристалл двумя источниками с разными длинами волн как одновременно, так и по очереди.

С целью проверки предположения о наличие в кристаллах титаната висмута мелких ловушек, имеющих большое сечение фотоионизации, были проведены эксперименты по последовательному облучению кристалла $Bi_{12}TiO_{20}$:Ca красным и инфракрасным излучением. Заполнение мелких ловушек при освещении кристалла красным светом обуславливает рост фотоиндуцированного поглощения. Предполагалось что при последующем освещении кристалла ИК излучением с энергией кванта 1,42 эВ будет происходить опустошение заполненных мелких ловушек, что приведет к значительному просветлению кристалла. В результате было получено, что уменьшение поглощения, наведенного в кристалле красным светом, при засветке кристалла ИК излучением не являются значительными, то есть свет с энергией кванта 1,42 эВ не приводит к опустошению ловушечных уровней. Таким образом, из проведенных экспериментов следует, что ловушечные центры в легированных кальцием кристаллах титаната висмута, не являются мелкими, и соответствующие им энергетические уровни расположены в запрещенной зоне на расстояниях, превышающих 1,42 эВ от дна зоны проводимости.

В результате проведения экспериментов по динамике фотоиндуцированного поглощения при последовательном облучении кристалла $Bi_{12}TiO_{20}$:Ca некогерентным излучением светодиодов с длинами волн λ_R = 660 нм и λ_G = 525 нм было установлено: скорость фотоиндуцированных изменений собственного поглощения существенно выше для зеленого света, чем для красного излучения; освещение кристалла красным (зеленым) светом влияет как на собственное поглощение, так и на оптические потери в зеленой (красной) области спектра; длинноволновое (красное) излучение приводит к большему увеличению поглощения для коротковолновой компоненты (зеленый свет), чем для собственного поглощения; длинноволновое излучение уменьшает изменения в поглощении на собственной длине волны, наведенные коротковолновым светом.

На основе анализа характерных особенностей в динамике коэффициентов поглощения кристалла на двух длинах волн предложена модель перезарядки дефектных центров, позволяющая удовлетворительно описать динамику фотоиндуцированного поглощения света в кристаллах $Bi_{12}TiO_{20}$:Ca при двухцветном облучении. Эта модель предполагает наличие в кристалле

фотоактивных донорных центров одного типа и ловушечных центров другого типа; такие центры образуют две связанные системы, каждая из которых характеризуется своим энергетическим спектром и допускает внутрицентровые переходы электронов между энергетическими уровнями.

В четвертой главе изложены результаты анализа векторного двухволнового взаимодействия на отражательных голографических решетках в кубических гиротропных кристаллах.

В подразделе 4.1 получена система уравнений связанных волн, описывающая векторное двухволновое взаимодействия волн сигнала и накачки на отражательных решетках, принимающая во внимание естественную оптическую активность, дополнительный фотоупругий вклад в модуляцию оптических свойств кристалла, абсорбционную составляющую решетки, а также эффекты фотоиндуцированного поглощения света и истощения накачки.

В подразделе 4.2 проведен анализ анизотропии входящих в уравнения связанных волн коэффициентов, определяющих вклады фазовой составляющей отражательной голографической решетки во внутримодовые (происходящие без изменения показателя преломления собственных циркулярно-поляризованных волн) и межмодовые (с изменением показателя преломления собственных волн) процессы взаимодействия для кубических нецентросимметричных кристаллов титаната, силиката и германата висмута (класс симметрии 23), а также для имеющего симметрию $\bar{4}3m$ арсенида галлия.

Получено, что вклад фазовой составляющей в межмодовые процессы взаимодействия отсутствует в кристаллографических плоскостях типа {100} и достигает максимальных значений при ориентации вектора решетки в плоскостях типа {110}, вдоль кристаллографических направлений вида <111>, а вклад фазовой составляющей во внутримодовые процессы взаимодействия достигает максимума при ориентации вектора решетки вдоль кристаллографических направлений вида <100>, и отсутствует при ориентации вектора решетки вдоль направлений вида <110> и <111>.

В подразделе 4.3 показано что, для волн с линейной поляризацией уравнения связанных волн сводятся к двум уравнениям для комплексных амплитуд этих волн. Переход от комплексных амплитуд к интенсивностям и фазам волн сигнала и накачки позволил получить систему уравнений, полностью описывающую встречное взаимодействие при произвольной ориентации кристалла с учетом электрооптического и фотоупругого эффектов и дифракции на абсорбционной решетке. Для случая пренебрежимо малого вклада абсорбционной составляющей во взаимодействие на отражательной решетке введен эффективный коэффициент усиления для встречного взаимодействия Γ_{eff}, который характеризует эффективность энергообмена на фазовой отражательной решетке, не зависит от коэффициента поглощения света в кристалле, и может быть определен из экспериментальных данных.

В подразделах 4.4 и 4.5 представлены результаты численного анализа и экспериментального исследования поляризационных зависимостей эффективного

коэффициента усиления Γ_{eff} и ориентации векторов поляризации волн сигнала и накачки для встречного взаимодействия в кристалле $Bi_{12}TiO_{20}:Fe,Cu$ среза (100).

Проведенный численный анализ поляризационных зависимостей Γ_{eff} при пренебрежимо малой абсорбционной решетке показал, что максимально достигаемое значение эффективного коэффициента усиления уменьшается с ростом толщины кристалла. Полученные хорошо согласующиеся с результатами теоретического анализа экспериментальные поляризационные зависимости для эффективного коэффициента усиления и векторов поляризации взаимодействующих световых пучков позволяют сделать вывод о фазовом характере отражательной фоторефрактивной решетки, формирующейся при встречном взаимодействии света в исследованном кристалле $Bi_{12}TiO_{20}:Fe,Cu$ среза (100).

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

1. Получены уравнения для первых пространственных гармоник зарядовых решеток в кристаллах с двукратно ионизируемыми донорными центрами и фотоактивными мелкими ловушками. На их основе разработана методика численного анализа динамики поля пространственного заряда фоторефрактивной голограммы при изменяющихся внешних условиях ее формирования, хранения и восстановления. Методика позволяет моделировать изменение периода голографической решетки; продолжительность процессов записи, хранения и проявления голограмм; амплитуды прикладываемого внешнего постоянного электрического поля; “включать” и “выключать” в произвольные моменты времени световые пучки накачки и сигнала, их взаимную когерентность и внешнее электрическое поле.
2. На основе проведенного численного анализа показано, что динамика поля пространственного заряда в кристаллах с двукратно ионизируемыми донорными центрами и мелкими ловушками определяется не только изменениями амплитуд зарядовых решеток, но и их сдвигом в пространстве относительно друг друга при приложении внешнего поля, который связан с неоднородностью тока проводимости. Показана возможность наблюдения в таких кристаллах эффектов усиления скрытой голограммы в темновых условиях при приложении внешнего электрического поля и ее проявления при включении считывающего светового пучка.
3. Проведен анализ двух режимов записи фоторефрактивной решетки для кристаллов с мелкими ловушками и глубокими донорами, допускающими двукратную ионизацию. Показано, что возможность двукратной ионизации донорных центров приводит к особенностям в поведении релаксации поля пространственного заряда после «выключения» взаимной когерентности записывающих решетку световых пучков. Динамика релаксации при этом состоит из двух этапов. Первый характеризуется быстрым падением амплитуды решетки за время, сравнимое с временем диэлектрической релаксации. На втором этапе наблюдается медленное падение поля пространственного заряда, скорость которого определяется релаксацией самих зарядовых решеток.

4. Использование численного анализа динамики фотоиндуцированного поглощения света на основе модели, рассматривающей наличие в кристалле ловушечных центров и глубоких доноров, допускающих двукратную ионизацию, и подгонки результатов под экспериментальные данные позволило определить материальные параметры исследованного кристалла $Bi_{12}TiO_{20}$:Ca. Сравнение результатов расчета с экспериментом показало, что используемая модель позволяет описать динамику роста и релаксации фотоиндуцированного поглощения, с воспроизведением таких качественных особенностей, как более резкий переход от медленного участка к быстрому при повторной засветке кристалла, и уменьшение скорости нарастания на медленной стадии процесса с каждой последующей засветкой.
5. Установлено, что ловушечные центры, обуславливающие рост фотоиндуцированного поглощения в легированных кальцием кристаллах титаната висмута, не являются мелкими, и соответствующие им энергетические уровни расположены в запрещенной зоне на расстояниях, превышающих 1,42 эВ от дна зоны проводимости.
6. Предложена и экспериментально реализована методика исследования динамики фотоиндуцированного поглощения света в фоторефрактивных кристаллах при двухцветном облучении квазимонохроматическим излучением полупроводниковых светодиодов. Ее применение к кристаллам титаната висмута позволило установить важные закономерности: ИК излучение с длиной волны 870 нм слабо влияет на наведенное красным светом (660 нм) дополнительное поглощение; освещение кристалла красным (зеленым) светом влияет как на собственное поглощение, так и на оптические потери в зеленой (красной) области спектра; длинноволновое (красное) излучение приводит к большему увеличению оптических потерь для коротковолновой компоненты (зеленый свет), чем для собственного поглощения; длинноволновое излучение уменьшает изменения в поглощении на собственной длине волны, наведенные коротковолновым светом.
7. На основе анализа характерных особенностей в динамике коэффициентов поглощения кристалла на двух длинах волн развита модель перезарядки дефектных центров, позволяющая удовлетворительно описать динамику фотоиндуцированного поглощения света в кристаллах $Bi_{12}TiO_{20}:Ca$ при двухцветном облучении. Модель предполагает существование в кристалле двух дефектных систем, соответствующих фотоактивным донорным центрам одного типа и ловушечным центрам другого типа. Каждая из дефектных систем характеризуется своим энергетическим спектром и допускает внутрицентровые переходы электронов между энергетическими уровнями.
8. Развита векторная модель встречного двухволнового взаимодействия световых пучков на отражательных голографических решетках в кубических фоторефрактивных кристаллах, принимающая во внимание естественную оптическую активность, дополнительный фотоупругий вклад в модуляцию оптических свойств кристалла, абсорбционную составляющую решетки, а также эффекты фотоиндуцированного поглощения света и истощения накачки.

9. Установлено, что в кристаллах титаната висмута вклад фазовой составляющей отражательной голографической решетки в межмодовые процессы взаимодействия, происходящие с изменением показателя преломления собственных волн, отсутствует в кристаллографических плоскостях типа {100} и достигает максимальных значений при ориентации вектора решетки в плоскостях типа {110}, вдоль кристаллографических направлений вида <111>.
10. Показано, что анизотропия электрооптического эффекта в кубических фоторефрактивных кристаллах приводит к тому что, вклад фазовой составляющей отражательной голографической решетки во внутримодовые процессы взаимодействия достигает максимума при ориентации ее вектора вдоль кристаллографических направлений вида <100> .
11. Для случая пренебрежимо малого вклада абсорбционной составляющей во взаимодействие на отражательной решетке введен эффективный коэффициент усиления для встречного взаимодействия, который характеризует эффективность энергообмена на фазовой отражательной решетке, не зависит от коэффициента поглощения света в кристалле, и может быть определен из экспериментальных данных. Установлено, что максимально достижимое значение эффективного коэффициента усиления уменьшается с ростом толщины гиротропного кристалла.
12. Выполнены экспериментальные исследования поляризационных зависимостей эффективного коэффициента усиления и эффектов преобразования векторов поляризации взаимодействующих на отражательной голографической решетке световых пучков в кристалле $Bi_{12}TiO_{20}:Fe,Cu$ среза (100). Проведенный на основе развитой векторной модели анализ полученных экспериментальных данных позволил сделать вывод о фазовом характере отражательной фоторефрактивной решетки, формирующейся при встречном взаимодействии света в данном образце.

<u>В приложении</u> приведены документы о внедрении результатов работы.

Основные результаты диссертации изложены в работах:

1. Плесовских А.М., Шандаров С.М., Агеев Е.Ю. Динамика фоторефрактивного отклика в кристаллах силленитов с двукратно ионизируемыми донорными центрами и мелкими ловушками // ФТТ. 2001. Т– 43, вып. 2. С. 242–245.

2. Плесовских А.М., Шандаров С.М. Влияние постоянного внешнего поля на динамику фоторефрактивного отклика в кристаллах с двукратно ионизируемыми донорными центрами и мелкими ловушками // ФТТ. 2002. Т– 44, вып. 1. С. 57–61.

3. Plesovskikh A.M., Shandarov S.M., Ageyev E.Yu. Photorefractive response in a crystal with three-valence-states impurity-centers and shallow traps. – OSA Trends in Optics and Photonics Vol. 62. Photorefractive Effects, Materials and Devices, David D. Nolte, Greg Salamo, Azad Siahmakoun, Sergei Stepanov, eds. (Optical Society of America, Washington, DC 2001), P. 266–274.

4. Плесовских А.М. Динамика фоторефрактивного отклика в кристаллах с мелкими ловушками и двукратно ионизируемыми донорными центрами //

Современные техника и технологии СТТ'2000, 28 февраля –3 марта 2000. Томск, Россия. С. 346–348.

5. Плесовских А.М., Шандаров С.М., Агеев Е.Ю. Динамика фоторефрактивного отклика в кристаллах силленитов с двукратно ионизируемыми донорными центрами и мелкими ловушками // Фундаментальные проблемы оптики, 17–19 октября, 2000. Санкт-Петербург, Россия. С. 87–89.

6. Плесовских А.М., Шандаров С.М. Влияние внешнего поля на динамику фоторефрактивного отклика в кристаллах силленитов // 2 школа-семинар молодых ученых «Современные проблемы физики и технологии», 5–7 февраля, 2001. Томск, Россия. С. 121–124.

7. Плесовских А.М. Динамика фоторефрактивного отклика в кристалле титаната висмута, помещенного во внешнее электрическое поле // Физика твердого тела, 16–18 мая, 2000. Томск, Россия. С. 120–121.

8. Плесовских А.М. Формирование, хранение и проявление фоторефрактивных решеток в кристалле титаната висмута // Материалы XXXIX международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс», Физика, 10–12 апреля, 2001. Новосибирск, Россия. С. 163.

9. Шандаров С.М., Мандель А.Е., Казарин А.В., Плесовских А.М., Каргин Ю.Ф., Волков В.В., Егорышева А.В. Динамика фотоиндуцированного поглощения света в кристалле Bi12TiO20 : Ca // Известия Вузов «Физика». 2002. №8. С. 29–34.

10. Казарин А.В., Плесовских А.М., Мандель А.Е., Шандаров С.М., Цуркан М.И., Каргин Ю.Ф., Волков В.В., Егорышева А.В. Фотоиндуцированное поглощение света в кристалле Bi12TiO20 : Ca // 3 школа-семинар молодых ученых «Современные проблемы физики и технологии», 30 января –1 февраля, 2002. Томск, Россия. С. 67–70.

11. Цуркан М.И., Медовник А.В., Черняк Н.Н., Плесовских А.М.. Динамика фотоиндуцированного поглощения некогерентного излучения в кристаллах Bi12TiO20 : Ca // Материалы 15 международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс», 2002. Новосибирск, Россия. С. 23–24.

12. Мандель А.Е., Плесовских А.М., Шандаров С.М., Цуркан М.И., Плинта К.С., Каргин Ю.Ф., Волкова В.В., Егорышева А.В., Шепелевич В.В., Новника В.Н. Фотоиндуцированное поглощение в кристаллах титаната висмута для узкополосного светового излучения // Известия Вузов «Физика». 2003. №12. С. 48–54.

13. Суховерхов Ю.М., Плесовских А.М. Динамика фотоиндуцированного поглощения в кристаллах титаната висмута при последовательной засветке красным и инфракрасным излучением // Материалы 15 международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс», 2002. Новосибирск, Россия. С.25–26.

14. Суховерхов Ю.М., Плесовских А.М. Динамика фотоиндуцированного поглощения света в кристаллах титаната висмута на разных длинах волн // Материалы 8 российской научной студенческой конференции «Физика твердого тела», 14–16 мая, 2002. Томск, Россия. С. 93–94.

15. Плинта К.С., Плесовских А.М., Навнико В.Н., Мандель А.Е., Шандаров С.М., Каргин Ю.Ф., Волков В.В., Егорышева А.В., Шепелевич В.В. Фотоиндуцированное поглощение света в кристаллах титаната висмута // Оптика-2003. Труды: третьей международной научной коференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2003», 20–23 октября, 2003. Санкт-Петербург, Россия. С. 34–35.

16. Шандаров С.М., Мандель А.Е., Цуркан М.И., Плесовских А.М., Каргин Ю.Ф., Егорышева А.В., Волков В.В. Фотоиндуцированное поглощение света в кристаллах титаната висмута, наведенное узкополосным излучением // Сборник трудов: Конференция «Фундаментальные проблемы оптики», 14–17октября, 2002. Санкт-Петербург, Россия. С. 120–122.

17. Плесовских А.М., Шандаров С.М., Мартьянов А.Г., Мандель А.Е., Буримов Н.И., Шаганова Е.А., Каргин Ю.Ф., Волков В.В., Егорышева А.В. Векторное двухволновое взаимодействие на отражательных голографических решетках в кубических гиротропных фоторефрактивных кристаллах // Квантовая электроника. 2005. 35. С. 163–168.