

УТВЕРЖДАЮ

проректор Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова профессор А.А. ФЕДЯНИН

 «12» сентября 2016 года

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу **Буримова Николая Ивановича** «Динамические голограммы, упругие поля и акустические волны в фоторефрактивных пьезокристаллах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика

Диссертационное исследование Н.И. Буримова посвящено теоретическому и экспериментальному изучению электрооптического, пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов, которые проявляются в фоторефрактивных кристаллах. Эти кристаллические материалы широко используются при формировании динамических голограмм, с помощью которых осуществляется управление светом, обработка оптических сигналов, а также запись, хранение и считывание оптической информации. Работа Н.И. Буримова удовлетворяет **критерию новизны**, так как на сегодняшний день фоторефрактивные кристаллы представляют значительный интерес для различных приложений в лазерной физике, акустоэлектронике, акустооптике, динамической голографии, нелинейной и интегральной оптике. Упругие и электрические поля в фоторефрактивных пьезоэлектрических кристаллах и индуцируемые этими полями возмущения оптических свойств среды позволяют управлять светом, генерировать акустические волны в фоторефрактивных кристаллах и записывать в них голограммы. Тем самым использование электрооптических, фотоупругих и пьезоэлектрических эффектов в фоторефрактивных средах способствует созданию новых приборов записи оптической информации, устройств обработки оптических и электрических сигналов, а также разработке систем адаптивной голографической интерферометрии. Необходимость исследования физических явлений в фоторефрактивных пьезокристаллах потребовала совершенствования существующих методов анализа физических процессов в этих материалах. Поэтому развитие диссертантом общего подхода к анализу акустических волн и динамических голограмм в фоторефрактивных пьезокристаллах, а также детальное исследование наблюдаемых в данных кристаллах эффектов, обусловленных связью электромагнитных, электрических и упругих полей, несомненно, является актуальным. Известные применения указанных эффектов для решения задач акустоэлектроники, фоторефрактивной нелинейной оптики, динамической

голографии и адаптивной голографической интерферометрии определяют не только **новизну** но и **практическую важность** проведенного исследования.

В частности, **новизна** полученных в диссертационной работе Н.И. Буримова результатов заключается в том, что диссертант развил общий подход к совместному анализу акустических волн и динамических голограмм в фоторефрактивных пьезокристаллах. На основе разработанного подхода им сделаны оценки анизотропии акустических скоростей и коэффициентов электромеханической связи объемных акустических волн в наиболее эффективных на сегодняшний день фоторефрактивных пьезокристаллах $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$, KNbO_3 и BaTiO_3 . Диссертант реализовал возбуждение продольных акустических волн с поверхности кристалла $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ на частоте 180 МГц за счет нормальных компонент электрического поля в зазоре щелевого пьезопреобразователя. В диссертации представлены аналитические выражения для расчета фотоупругого эффекта и его дополнительного вклада в анизотропию эффективной диэлектрической проницаемости ϵ' и в возмущения компонент тензора диэлектрической проницаемости $\Delta\epsilon_{ij}$. Как оказалось, сильные упругие деформации сопровождают электрические поля динамических голографических решеток в кристаллах титаната бария (класс симметрии $4mm$) и сульфида кадмия (класс $6mm$). Диссертантом разработана методика расчета траектории светового пучка со спекловой структурой, распространяющегося в произвольном срезе кристалла титаната бария и испытывающего самовоздействие. При расчетах был учтен дополнительный вклад фотоупругого и пьезоэлектрического эффектов в фоторефрактивный отклик среды.

Диссертант в приближении заданного поля провел теоретический анализ широкополосного возбуждения рэлеевской поверхностной акустической волны торцевыми пьезопреобразователями, создающими соответствующее электрическое поле на нормальной к направлению распространения волны поверхности пьезокристаллического кристалла. Разработана методика расчета частотных зависимостей сопротивления излучения и эффективности преобразования электромагнитной энергии в акустическую энергию для торцевых пьезопреобразователей. Правильность теоретического подхода подтверждена экспериментами, выполненными в YZ-срезе кристалла LiNbO_3 . Экспериментально доказана перспективность использования торцевых и квазипланарных преобразователей в акустооптических и акустоэлектронных устройствах обработки широкополосных радиосигналов.

В диссертации Н.И. Буримова развита теория, описывающая формирование упругих и электрических полей динамических голограмм. Оказалось, что данные поля формируются светом в приграничных областях полугораниченных фоторефрактивных пьезокристаллов при диффузионном, дрейфовом и фотогальваническом механизмах разделения заряда. Разработанная теория основана на применении уравнений эластостатики и электростатики, а также уравнений состояния пьезокристалла с учетом граничных условий для

электрических и упругих полей. При анализе использовано приближение линейной связи концентрации фотовозбужденных электронов с интенсивностью света. Проведено теоретическое рассмотрение двумерной структуры электрических и упругих полей, а также осуществлен анализ возмущений тензора диэлектрической проницаемости, индуцируемых фоторефрактивными голограммами в приграничной области полугораниченных кристаллов титаната бария, ниобата калия, силиката и титаната висмута, танталата и ниобата лития.

Важным **научным результатом** диссертации является проведенный анализ встречного взаимодействия световых волн в фоторефрактивных пьезокристаллах со сложной структурой дефектных центров. Развитая теория использует скалярные и векторные модели и учитывает анизотропию электрооптического и фотоупругого вкладов в фазовую модуляцию света полем пространственного заряда. Диссертантом получено аналитическое выражение, описывающее векторное световое поле сигнальной волны, справедливое для произвольной ориентации кубических фоторефрактивных кристаллов и учитывающее дополнительный фотоупругий вклад в ее фазовую компоненту. На отражательных голографических решетках в кристаллах титаната висмута различных срезов Н.И. Буримовым выполнены экспериментальные исследования поляризационной структуры сигнальной волны, взаимодействующей с волной накачки круговой поляризации.

В диссертации Н.И. Буримова проведен анализ закономерностей формирования отражательных динамических голограмм в случае сложной структуры дефектных центров и в условиях внешней некогерентной подсветки. При этом разработана методика экспериментального исследования динамики фотоиндуцированных изменений поглощения света и коэффициента двухпучкового усиления на отражательной голограмме в кристалле титаната висмута. Измерения проведены как в процессе формирования самой голограммы, так и при её изменении в условиях внешней варьируемой некогерентной подсветки. Показано, что наблюдаемые в нелегированном кристалле титаната висмута изменения эффективного коэффициента двухпучкового усиления обусловлены влиянием некогерентной подсветки на длине волны 515 нм. Оказалось, что подсветка определяет формирование отражательной динамической голограммы лазерным излучением с длиной волны 633 нм. При этом формирование голограммы сопровождается изменениями как амплитуды, так и знака поля пространственного заряда. Диссертантом выполнено подробное экспериментальное исследование температурной зависимости эффективности встречного взаимодействия световых волн на отражательных голограммах в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}$. Эти голограммы удалось сформировать за счет интерференции опорного светового пучка с сигнальным пучком, отраженным от выходной грани кристалла.

Важны для понимания физических процессов и проведенные экспериментальные исследования эффекта фазовой демодуляции при двухволновом взаимодействии на отражательных динамических голограммах. Голограммы были индуцированы в различных срезах кристаллов силиката и

титаната висмута при круговой поляризации опорного пучка. Диссертантом выполнен сравнительный анализ полученных данных с результатами, предсказанными теорией. Показано, что соответствие теоретических выводов с данными эксперимента в кристаллах селенитов достигается лишь в случае, когда сдвиги фазовой и амплитудной составляющих динамической отражательной голограммы относительно ее интерференционной картины принципиально отличаются от значений, характерных для известных механизмов перераспределения зарядов.

В работе Н.И. Буримова проведен теоретический анализ вклада флексоэлектрического эффекта в фоторефрактивный отклик, наблюдаемый при встречном взаимодействии стационарной опорной волны с фазово-модулированной сигнальной волной. Показано, что благодаря обратному флексоэлектрическому эффекту отражательные голограммы диффузионного типа в фоторефрактивных кристаллах содержат фазовую составляющую со сдвигом $\varphi_g = 0$ или $\varphi_g = \pi$ относительно распределения интенсивности света в формирующей интерференционной картине. Это объясняет наблюдаемый в подобных голограммах линейный режим фазовой демодуляции при встречном взаимодействии пучков. Диссертантом также проведен важный для приложений в науке и технике комплекс экспериментальных исследований голографической интерферометрии при встречном взаимодействии световых волн на отражательных голограммах. Измерены параметры механических колебаний отражающих объектов с учетом вклада обратного флексоэлектрического и фотоупругого эффектов в фоторефрактивный отклик кристаллов.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации Н.И. Буримова результатов подтверждается корректностью постановки задач и исходных теоретических положений. Анализ проведен при вполне обоснованном выборе математического аппарата и использовании известных литературных данных. Достоверность результатов теоретического анализа подтверждается данными экспериментов, непосредственно проведенных диссертантом.

К **основным научным и практическим результатам** диссертационного исследования Н.И.Буримова можно отнести следующее:

1. В фоторефрактивных решетках на кристаллах титаната бария и сульфида кадмия выявлены два эффекта, которые влияют на максимальные значения коэффициента двухпучкового усиления для решеток пропускающего типа. Оказалось, что одним из эффектов является фотоупругий эффект, дополнительный вклад которого в изменение диэлектрической проницаемости материала анизотропен и определяется углом между вектором решетки и оптической осью кристалла. Второй эффект заключается во вкладе пьезоэлектрической составляющей электрической поляризации в статическую диэлектрическую проницаемость кристалла. Оценка этих вкладов позволила определить оптимальные углы между взаимодействующими пучками и выбрать оптимальную

ориентацию вектора решетки для создания новых устройств динамической голографии.

2. В стационарной пропускающей фоторефрактивной решетке на кристалле ниобата лития X-среза, электрически закороченном вдоль полярной оси, предсказано существование поверхностного рельефа, появляющегося на механически свободной границе образца. Также предсказано наличие дополнительного приграничного возмущения компонент тензора диэлектрической непроницаемости кристалла. Получено, что поверхностный рельеф и возмущения компонент тензора приводят к появлению новых эффектов, например, к анизотропной дифракции и рассеянию света в приграничной области кристалла. Обнаруженные эффекты важны при разработке устройств оптической обработки информации, использующих поверхностные акустические волны, а также фоторефрактивные и акустофоторефрактивные эффекты в планарных волноводах.

3. При встречном взаимодействии линейно поляризованных световых волн с длиной волны $\lambda = 633$ нм в кристалле титаната висмута обнаружена и доказана связь величины и знака коэффициента усиления фоторефрактивной решетки с изменением характеристик поля пространственного заряда голограммы, которые обусловлены увеличением интенсивности внешней некогерентной подсветки на длине волны $\lambda_i \approx 515$ нм. Предложен способ управления величиной и знаком коэффициента двухпучкового усиления с помощью внешней подсветки.

4. Опробован способ дистанционного измерения спектра механических колебаний отражающих объектов с амплитудами в пикометровом и нанометровом диапазонах спектра. Также предложен метод определения флексоэлектрических параметров фоточувствительных кристаллов, использующий принцип голографической интерферометрии при встречном взаимодействии световых волн на отражательных голограммах.

5. Доказано существование упругих деформаций, которые вследствие обратного флексоэлектрического эффекта воздействуют на голограмму отражательного типа, сформированную в фоторефрактивном пьезокристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Cu,Fe}$, и обеспечивают дополнительный вклад в фоторефрактивный отклик. Предложены методы регистрации флексоэлектрического вклада в фоторефрактивный отклик, а также способы оценки величины флексоэлектрического коэффициента исследуемого кристалла. Для этого предложено использовать адаптивную голографическую интерферометрию с встречным взаимодействием волн правой и левой циркулярной поляризации.

Результаты диссертационного исследования Н.И.Буримова могут быть полезными и **рекомендованными для использования** в научно-исследовательских институтах и университетах, занимающихся научными разработками в области радиофизики, оптики, акустики, голографии, оптической обработки информации, акустоэлектроники и акустооптики. К таким организациям относятся Институт общей физики РАН (Москва), Физический институт РАН (Москва), Институт радиотехники и электроники РАН (Москва), Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Акустический институт

(Москва), Физико-технический институт (Москва), Московский технический университет «МИСИС», НПО НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха (Москва), Санкт-Петербургский государственный университет, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург), Государственный университет авиационного приборостроения (Санкт-Петербург), ИТМО (Санкт-Петербург) и другие организации.

По теме диссертационного исследования Н.И. Буримов опубликовал **86 работ**, в том числе более **20 статей** в журналах, включенных в Перечень ВАК. Из списка публикаций 3 статьи опубликованы в зарубежных журналах, индексируемых системой «Web of Science», остальные работы представлены в российских журналах, переводные версии которых индексируются системой «Web of Science». Кроме того, соискатель является автором 2-х патентов на изобретения, одной коллективной монографии, а также нескольких статей в научных журналах и сборниках научных трудов. Результаты исследований представлены в большом числе тезисов докладов на международных и всероссийских научных конференциях, совещаниях и семинарах (всего около 50 тезисов, из них 8 - на зарубежных конференциях; 7 – в сборниках материалов конференций, индексируемых системой «Scopus»).

В опубликованных работах достаточно полно отражены основные результаты диссертационного исследования Н.И.Буримова, и эти результаты хорошо известны специалистам.

Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

В диссертационной работе можно отметить следующие **недостатки**:

1. При описании работы торцевых и квазипланарных преобразователей диссертантом отмечена возможность широкополосного возбуждения с их помощью поверхностных акустических волн. Однако при этом практически не обсуждался главный недостаток предложенного метода возбуждения звука: низкая эффективность преобразования мощности по сравнению со стандартными ВШП излучателями. Также не сделаны оценки величины потерь, обусловленных возможным паразитным излучением акустической волны в объем кристалла.

2. Диссертант включил в список литературы большое число ссылок на тезисы докладов, сделанных им на научных конференциях. В докторской диссертации, в отличие от кандидатской диссертации, авторских ссылок на тезисы докладов, по возможности, следует избегать.

3. Содержание диссертации несколько эклектично, и в текст диссертации включены фрагменты, имеющие лишь косвенное отношение к теме диссертационного исследования. Например, в разделе 2.2. излишне подробно обсуждается технология изготовления торцевых и квазипланарных пьезоэлектрических преобразователей. Очевидно, что создание установки и разработка технологии ионного травления кристаллов представляет сложную техническую проблему. Однако подробное описание технологии оправдано в тексте диссертаций по техническим, а не физико-математическим наукам.

4. Рукопись диссертации аккуратно оформлена и написана легким для понимания языком. Тем не менее, в тексте рукописи можно найти ошибки. Например, на странице 76 формула (1.44) для скорости акустических волн неверна. На странице 134 дважды повторяется один и тот же фрагмент текста, а в ссылке [126] неверно указано имя автора.

Замеченные недостатки не влияют на общее самое благоприятное впечатление от диссертационной работы Н.И. Буримова. Диссертация является законченной научной работой, в которой на основании выполненных автором исследований определены параметры акустических волн и подробно изучены характеристики динамических голограмм в фоторефрактивных пьезокристаллах. Автором проведено детальное теоретическое, а также экспериментальное исследование характерных для фоторефрактивных сред эффектов, при которых проявляется связь электромагнитных, электрических и упругих полей. Результаты исследования имеют важное прикладное значение для решения задач акустоэлектроники, фоторефрактивной нелинейной оптики, динамической голографии и адаптивной голографической интерферометрии.

Работа Н.И. Буримова соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а диссертант заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности «01.04.03 -радиофизика».

Доклад Н.И. Буримова по теме диссертации заслушан и одобрен на заседании кафедры физики колебаний физического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (Протокол № 2 от 9 сентября 2016 года).

Декан физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова
доктор физико-математических наук, профессор
Сысоев Николай Николаевич



Заведующий кафедрой физики колебаний
физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова
доктор физико-математических наук, профессор
(специальность 01.04.03 – радиофизика)
Вятчанин Сергей Петрович

