

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УКД 535.42

АМАНОВА
Марал Абдуллаевна

**ФАЗОВЫЕ И АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫЕ ГОЛОГРАММЫ
В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ КРИСТАЛЛАХ СИЛЛЕНИТОВ
С УЧЕТОМ ОБРАТНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА
И ФОТОУПРУГОСТИ**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.05 – оптика**

Минск, 2020

Работа выполнена в учреждении образования «Мозырский государственный педагогический университет имени И.П. Шамякина».

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ –

ШЕПЕЛЕВИЧ Василий Васильевич,
доктор физико-математических наук, профессор.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ФУРС Александр Николаевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой теоретической физики и
астрофизики Белорусского государственного
университета;

ХИЛО Николай Анатольевич,
кандидат физико-математических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник
Центра «Диагностические системы»
ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова
НАН Беларуси».

ОППОНИРУЮЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ –

**УО «Гродненский государственный
университет имени Янки Купалы».**

Защита состоится «27» ноября 2020 г. в 14.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.17 при Белорусском государственном университете по адресу: Минск, ул. Ленинградская, 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407.

Почтовый адрес: пр-т Независимости 4, Минск, 220030.

Телефон ученого секретаря: 209-57-09.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «__» октября 2020 года.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций
кандидат физ.-мат. наук доцент



О.Г. Романов

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее известными из оптически активных регистрирующих сред являются кубические фоторефрактивные пьезоэлектрические кристаллы класса 23 – силикосилленит висмута $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO), титаносилленит висмута $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO) и германосилленит висмута $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO).

От других регистрирующих сред кубические фоторефрактивные оптически активные пьезокристаллы семейства силленита: BSO, BGO и BTO – отличаются высокой светочувствительностью, прозрачностью, однородностью, высокой разрешающей способностью, реверсивностью процессов запись – считывание ^[1].

Эффект фотоиндуцированного изменения показателя преломления в кубических фоторефрактивных кристаллах семейства силленитов нашел широкое применение в адаптивной голографической интерферометрии ^[2], при разработке оптических корреляторов, фильтров новизны ^[3], устройств для выполнения оптических логических операций ^[4] и в других целях. В настоящее время в ведущих зарубежных изданиях публикуются всё новые работы, в которых содержится информация о расширении спектра практических применений кристаллов данного типа в различных интересных и важных голографических приложениях ^[5, 6].

Хорошо известно, что наиболее эффективное практическое использование кристаллов силленитов в голографических устройствах достигается при условии оптимизации выходных энергетических характеристик, записанных в них голограмм.

До недавнего времени в кристаллах силленитов рассматривалось формирование преимущественно фазовых голографических решеток. Поэтому теоретическое описание формирования голограмм в кристаллах класса 23, на основе которого определялись дифракционная эффективность голограммы и

¹ Marrakchi, A. Polarization properties of photorefractive diffraction in electro-optic and optically active sillenite crystals (Bragg regime) / A. Marrakchi, R. V. Johnson, A. R. Tanguay // J. Opt. Soc. Am. B. – 1986. – Vol. 3. – P. 321–336.

² Адаптивные методы обработки спекл-модулированных оптических полей / Ю. Н. Кульчин [и др.] – М. : Физматлит, 2009. – 288 с.

³ Tracking novelty filter using transient enhancement of gratings in photorefractive BSO / C. Soutar [et al.] // Opt. Comm. – 1991. – Vol. 86, № 3–4. – P. 255–259.

⁴ Feinleib, J. Reusable optical image storage and processing device / J. Feinleib, D. S. Oliver // Appl. Opt. – 1972, Vol. 11, № 12. – P. 2752–2759.

⁵ Optical amplification of Airy beams by photorefractive two-wave mixing / X. Yang [et al.] // Opt. Express. – 2018. – Vol. 26, № 6. – P. 7281–7287.

⁶ Optical reconstruction of non-diffracting beams via photorefractive holography / T. A. Vieira [et al.] // Appl. Phys. B. – 2017. – Vol. 123, № 4. – P. 134.

коэффициент усиления предметной световой волны, было адаптировано для голограмм этого типа. Однако экспериментально и теоретически было показано что в кристалле ВТО одновременно формируются не только фазовые, но и амплитудные голографические решетки, то есть создаются так называемые смешанные, или амплитудно-фазовые голограммы. *Смешанная голограмма* – это совокупность фазовой и амплитудной голографических решеток. Также было установлено, что при определенных пространственных ориентациях кристалла ВТО относительно плоскости распространения световых пучков влияние амплитудной составляющей голографической решетки может обусловить существенное увеличение дифракционной эффективности результирующей смешанной голограммы. Однако систематического изучения свойств таких голограмм не проводилось, и решение задачи об исследовании выходных характеристик, фазовых и амплитудно-фазовых голограмм, формируемых в фоторефрактивных кристаллах силленитов при их взаимодействии с лазерным излучением, является актуальным.

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы для повышения эффективности голографических интерференционных устройств, модуляторов в системах оптической обработки информации, оптических фильтров, систем цифровой микроскопии и других устройств, основанных на использовании фоторефрактивных кристаллов семейства силленитов BSO, ВТО, BGO.

Поскольку фоторефрактивные кристаллы сочетают в себе ряд полезных свойств, таких как высокая фоточувствительность, наличие электрооптических и пьезоэлектрических свойств, перспективных для реализации процессов записи и считывания голограмм, то изучение особенностей выходных энергетических характеристик, сформированных в них фазовых и амплитудно-фазовых голографических решеток является актуальной задачей.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Отдельные результаты настоящей диссертации получены в ходе выполнения научно-исследовательской работы *«Исследование голографически наноструктурированных динамических сред и их применение для управления световыми пучками и оптической диагностики»* – в рамках задания 1.2.01 *«Разработка методов создания, контроля и диагностики оптических микро- и наноструктур и формирование на их основе световых пучков с заданной поляризационно-фазовой структурой»* Государственной программы научных исследований *«Фотоника, опто- и микроэлектроника»* (№ государственной регистрации 20160359 от 16.03.2016; сроки выполнения НИР с 04.01.2016 по 31.12.2020).

Цель и задачи исследования

Цель диссертации – теоретически определить зависимости дифракционной эффективности пропускающих и отражательных фазовых и смешанных голограмм, сформированных в кристаллах силленитов, от их толщины, ориентационного угла и удельного вращения с учетом обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов совместно с электрооптическим эффектом для повышения эффективности использования этих кристаллов в голографических устройствах.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие *задачи*:

– выявить влияние амплитудной составляющей пропускающей смешанной голограммы, записанной в кристалле ВТО семейства срезов $\{110\}$, $\{112\}$ и $\{111\}$, на зависимость дифракционной эффективности голограммы от толщины кристалла и ориентационного угла, и её особенности;

– теоретически изучить влияние оптической активности, обратного пьезоэлектрического эффекта и фотоупругости кристалла BSO на зависимость дифракционной эффективности сформированных в нём пропускающих голограммы от значений ориентационного угла, удельного вращения и толщины кристаллической пластинки;

– установить степень влияния обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов на нормальную составляющую обратного тензора диэлектрической проницаемости кубического фоторефрактивного пьезокристалла ВТО;

– определить закономерности, которые могут быть использованы для управления энергетическими и поляризационными характеристиками световых волн при их дифракции на отражательной смешанной голограмме, сформированной в кристалле ВТО среза (001).

Объектом настоящего исследования является дифракционная эффективность фазовых и амплитудно-фазовых голограмм, сформированных в кристаллах силленитов.

Предметом исследования являются закономерности дифракции лазерного излучения на голографических решетках в кристаллах ВТО и BSO, обусловленные влиянием обратного пьезоэлектрического эффекта, фотоупругости и оптической активности.

При подготовке диссертационной работы использованы следующие основные *методы*: метод связанных волн, методы численного решения системы дифференциальных уравнений связанных волн, адаптированные для описания восстановления предметной световой волны в фоторефрактивном пьезокристалле, методы компьютерного моделирования.

Научная новизна

1. Теоретически с учетом обратного пьезоэффекта установлены условия оптимизации процесса считывания смешанных амплитудно-фазовых пропускающих голограмм, сформированных в фоторефрактивном пьезокристалле ВТО семейства срезов $\{110\}$, $\{112\}$ и $\{111\}$.

2. Изучено влияние обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов на нормальную составляющую обратного тензора диэлектрической проницаемости фоторефрактивного пьезокристалла ВТО.

3. Выявлен характер влияния удельного вращения плоскости поляризации и различных значений толщины кристалла на форму зависимости величины дифракционной эффективности пропускающих голограмм от ориентационного угла кристалла ВSO при учете обратного пьезоэлектрического эффекта и фотоупругости.

4. Установлено поляризационное условие, при котором для смешанной отражательной голограммы достигается максимальная относительная интенсивность предметной волны.

Положения, выносимые на защиту

1. Максимальные значения дифракционной эффективности амплитудно-фазовой пропускающей голограммы, сформированной в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$, достигаются в кристаллических образцах срезов $\{110\}$ и $\{112\}$. При толщине кристалла до 10 мм для кристаллических образцов таких срезов значения дифракционной эффективности голограммы отличаются менее, чем на 10%. При дальнейшем увеличении толщины кристалла дифракционная эффективность голограммы уменьшается, однако скорость ее убывания для кристалла среза $\{110\}$ меньше, чем для кристалла среза $\{112\}$.

2. В кубическом фоторефрактивном кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ обратный пьезоэлектрический и фотоупругий эффекты обуславливают изменение как максимального и минимального числовых значений нормальной составляющей обратного тензора диэлектрической проницаемости, так и ориентации указательной поверхности относительно кристаллографических осей. Указанные изменения происходят при записи как пропускающих, так и отражательных голограмм в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$.

3. Влияние обратного пьезоэлектрического эффекта, фотоупругости и оптической активности в кристаллической пластинке $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ среза $(\bar{1}\bar{1}0)$ при изменении произведения удельного вращения кристалла на его толщину приводит к трансформации графика зависимости дифракционной эффективности голограммы от ориентационного угла. С изменением толщины или удельного вращения кристалла имеет место сдвиг локальных максимумов

зависимости дифракционной эффективности голограммы относительно значений ориентационного угла кристалла.

Личный вклад соискателя ученой степени

Результаты диссертационной работы, сформулированные в защищаемых положениях и выводах, получены соискателем самостоятельно. Научный руководитель В.В. Шепелевич сформулировал тему, цель и задачи исследований, осуществлял руководство ими, участвовал в обсуждении и анализе полученных результатов. Соавторы публикаций А. В. Макаревич, В. Н. Навныко внесли вклад в разработку компьютерных программ. С. М. Шандаровым оказывалась консультативная помощь на этапах выбора методов анализа и интерпретации результатов. П. И. Ропот, А. А. Грабар, М. В. Цыгика, А. М. Атаев, М. В. Федоренко, В. В. Юдицкий принимали участие в анализе и обсуждении отдельных результатов диссертационного исследования.

Апробация диссертации и информация об использовании её результатов

Основные результаты диссертационной работы были апробированы в ходе следующих научных мероприятий:

– IX Международная научно-практическая интернет-конференция «Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам» (Мозырь, МГПУ им. И.П. Шамякина, 24–27 марта 2017 г.);

– VI Республиканская научная конференция студентов, магистрантов и аспирантов «Актуальные вопросы физики и техники» (Гомель, ГГУ им. Ф. Скорины, 26 апреля 2017 г.);

– XXX Международная школа-симпозиум по голографии, когерентной оптике и фотонике (Калининград, БФУ им. И. Канта, 2–6 октября 2017 г.);

– XI Международная научно-техническая конференция «Квантовая электроника» (Минск, БГУ, 13–17 ноября 2017 г.);

– VI Конгресс физиков Беларуси, посвященный Году науки в Республике Беларусь (Минск, Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, 20–23 ноября 2017 г.);

– X Юбилейная Международная научно-практическая интернет-конференция «Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам» (Мозырь, МГПУ им. И.П. Шамякина, 27–30 марта 2018 г.);

– 19th International Conference & School «Foundations & Advances in Nonlinear Science» and 4th International Symposium «Advances in Nonlinear Photonics» (Minsk, BSU, 24–28 September 2018);

– XI Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам» (Мозырь, МГПУ им. И.П. Шамякина, 28–29 марта 2019 г.);

– IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 29–31 января 2020 г.);

– XII Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам» (Мозырь, МГПУ им. И.П. Шамякина, 5–6 марта 2020 г.).

Практическая значимость полученных в диссертации результатов обусловлена возможностью их использования в голографической интерферометрии, при конструировании электрооптических модуляторов и в других оптических устройствах, изготовленных на основе фоторефрактивных кристаллов BSO и ВТО. Исследование условий оптимизации выходных характеристик голограмм, записанных в кубических фоторефрактивных кристаллах, представляет интерес как в научном, так и в практическом отношении в связи с возможностью выяснения значения обратного пьезоэлектрического эффекта, фотоупругости и оптической активности в достижении максимальной дифракционной эффективности голограмм и в энергообмене световых волн, а с полученными при этом результатами связаны перспективы постановки новых экспериментов и расширения возможностей практического применения голографических устройств, созданных на базе кубических фоторефрактивных кристаллов.

Результаты, полученные в ходе диссертационных исследований автора, используются в учебном процессе учреждения образования «Мозырский государственный педагогический университет имени И.П. Шамякина» (имеется два акта о внедрении результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс УО МГПУ им. И.П. Шамякина).

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 16 научных работах, из которых: 5 – статьи в научных изданиях, соответствующих п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 2,3 авторского листа), 11 – статьи в сборниках материалов научных конференций.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и одного приложения.

Полный объем диссертации составляет 100 страниц. Диссертация содержит 18 рисунков на 17 страницах, 2 таблицы на 2 страницах и 1 приложение на 2 страницах. Библиографический список содержит 171 наименование, включая собственные публикации соискателя ученой степени.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **главе 1** приведен аналитический обзор научной литературы по теме исследования; в результате анализа изученных источников выявлен ряд проблем, актуальных в оптике фоторефрактивных кристаллов, указаны нерешенные проблемы, определяющие цель и задачи исследования.

В **разделе 1.1** содержится аналитический обзор литературы о разработке и исследовании формирования объемных голограмм в кубических фоторефрактивных пьезокристаллах класса симметрии 23.

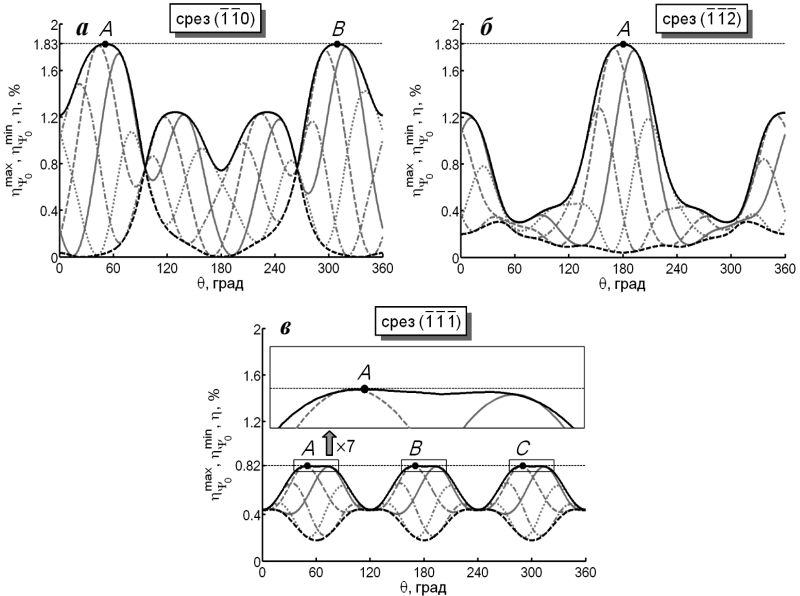
В **разделе 1.2** рассмотрены различные формы записи уравнений Максвелла и уравнений связи, используемые для описания оптически активных сред.

В **разделе 1.3** обоснована предпочтительность применения ковариантного метода Ф. И. Федорова для определения отличных от нуля независимых компонент тензоров, ранг которых выше третьего. С применением ковариантных методов академика Ф. И. Федорова и в соответствии с предложенной методикой определены отличные от нуля независимые компоненты флексоэлектрического тензора четвертого ранга f_{ijmr} , характерного для кристалла класса 23. Показано, что число отличных от нуля и независимых компонент этого тензора зависит от типа его внутренней симметрии: у тензора с внутренней симметрии вида $[V^2]V^2$ имеется пять таких компонент, а у тензора с внутренней симметрией $[[V^2]^2]$ – только три [1, 7, 11].

В **главе 2** выполнена теоретическая оптимизация процесса считывания смешанных пропускающих голограмм, сформированных в фоторефрактивном пьезокристалле семейства силленитов ВТО произвольного среза. Определены кристаллические срезы, в которых достигается наибольшая дифракционная эффективность голограмм [2, 9, 12, 13, 15, 16]. При этом в **разделе 2.1** приведена система дифференциальных уравнений связанных волн, использованная для описания дифракции световой волны на смешанной пропускающей голограмме в кубическом фоторефрактивном кристалле.

В **разделе 2.2** исследована зависимость дифракционной эффективности η смешанных голограмм, сформированных в пластинках толщиной $d = 7,7$ мм срезов $(\bar{1}\bar{1}0)$, $(\bar{1}\bar{1}2)$ и $(\bar{1}\bar{1}1)$ из кристалла ВТО, от ориентационного угла θ при разных азимутах линейной поляризации Ψ_0 взаимодействующих световых пучков: $0, 45^\circ, 90^\circ$ и 135° (рисунок 1). Установлены зависимости максимальных

$\eta_{\Psi_0}^{\max}(\theta)$ и минимальных $\eta_{\Psi_0}^{\min}(\theta)$ значений дифракционной эффективности голограмм от угла θ , которые представляют огибающие для функций $\eta(\theta)$, полученных при фиксированных значениях Ψ_0 . Выявлено, что наиболее высокие значения дифракционной эффективности η^{\max} голограмм достигаются в кристаллах срезов $(\bar{1}\bar{1}0)$ и $(\bar{1}\bar{1}2)$.



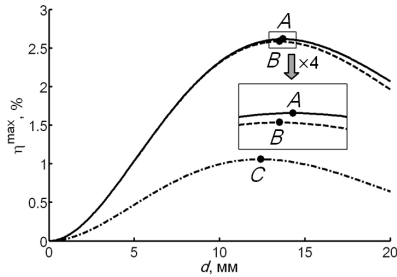
Серые сплошная, штриховая, штрихпунктирная и пунктирная линии – зависимости $\eta(\theta)$ при $\Psi_0 = 0, 45^\circ, 90^\circ$ и 135° соответственно; черные сплошная и штриховая линии – соответствующие зависимости $\eta_{\Psi_0}^{\max}(\theta)$ и $\eta_{\Psi_0}^{\min}(\theta)$.

Кристаллографические срезы: *a* – $(\bar{1}\bar{1}0)$; *б* – $(\bar{1}\bar{1}2)$; *в* – $(\bar{1}\bar{1}1)$

Рисунок 1. – Зависимости дифракционной эффективности голограмм, записанных в кристалле ВТО толщиной 7,7 мм, от ориентационного угла θ

В разделе 2.3 для кристаллических пластинок толщиной $d = 7,7; 16$ и 20 мм рассчитаны и построены указательные поверхности для максимальной дифракционной эффективности η^{\max} . В результате анализа указательных поверхностей показано, что при фиксированных значениях d значения η^{\max} во всех симметрично эквивалентных кристаллических срезах одинаковы и максимальны для голограмм, сформированных в кристаллах срезов $\{110\}$.

В диапазоне толщин кристаллического образца, удовлетворяющем условию $0 \leq d \leq 10$ мм, значения η^{\max} в кристаллах срезов $\{110\}$ и $\{112\}$ приблизительно одинаковы, однако при большей толщине образца кристаллы срезов $\{110\}$ значительно превосходят по дифракционной эффективности кристаллы, соответствующие семейству срезов $\{112\}$ (рисунок 2).



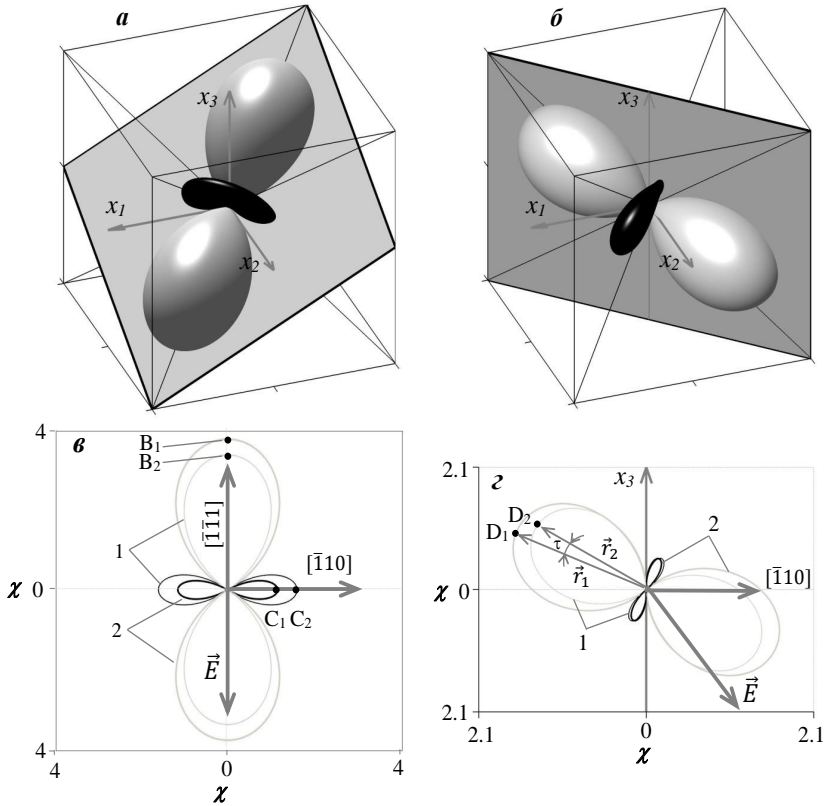
Соответствие семейства срезов и типа линии:

$\{110\}$ – сплошная; $\{112\}$ – штриховая; $\{111\}$ – штрихпунктирная

Рисунок 2. – Зависимости η^{\max} от толщины d кристалла ВТО

В главе 3 произведен анализ закономерностей изменения компонент обратного тензора диэлектрической проницаемости кристалла ВТО под действием электрического поля \vec{E}_{SC} . Исследовано влияние гиротропии, пьезоэлектрических свойств кубических фоторефрактивных кристаллов класса симметрии 23 и ориентации пластинки среза ($\bar{1}\bar{1}0$) на дифракционную эффективность пропускающих голографических решеток.

В разделе 3.1 с учетом обратного пьезоэлектрического эффекта и фотоупругости исследовано изменение компонент обратного тензора диэлектрической проницаемости кубических фоторефрактивных кристаллов класса симметрии 23 под влиянием электрического поля пространственного заряда объемной голографической решетки. Построены указательные поверхности нормальной составляющей обратного тензора диэлектрической проницаемости кристалла ВТО для типичных, используемых при записи голографических решеток ориентаций вектора напряженности электрического поля пространственного заряда относительно кристаллографической системы координат. Произведен анализ сечений указательных поверхностей и определены кристаллографические направления, в которых достигаются экстремальные значения нормальной составляющей обратного тензора диэлектрической проницаемости (рисунок 3).



x_1, x_2, x_3 – оси сферической системы координат; \vec{E} – электрическое поле;
1 – без учета, **2** – с учетом обратного пьезоэлектрического эффекта

Рисунок 3. – Указательные поверхности нормальной составляющей обратного тензора и их сечения:

a, δ – $\vec{E}_{SC} || [\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ и δ, ε – $\vec{E}_{SC} || [\bar{1}\bar{1}\bar{2}]$

Показано, что при фиксированном направлении вектора напряженности электрического поля пространственного заряда обратный пьезоэлектрический эффект и фотоупругость могут обуславливать как увеличение, так и уменьшение нормальной составляющей обратного тензора диэлектрической проницаемости [3].

В разделе 3.2 с учетом линейного электрооптического, обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов произведено теоретическое

исследование зависимости дифракционной эффективности пропускающих голограмм, сформированных в образце фоторефрактивного кристалла BSO, от ориентационного угла, величины удельного вращения и толщины кристалла.

На примере пластинки толщиной 8 мм из кристалла BSO среза $(\bar{1}\bar{1}0)$ показано, что пьезоэффект и оптическая активность существенно влияют на характер исследуемой зависимости (рисунок 4).

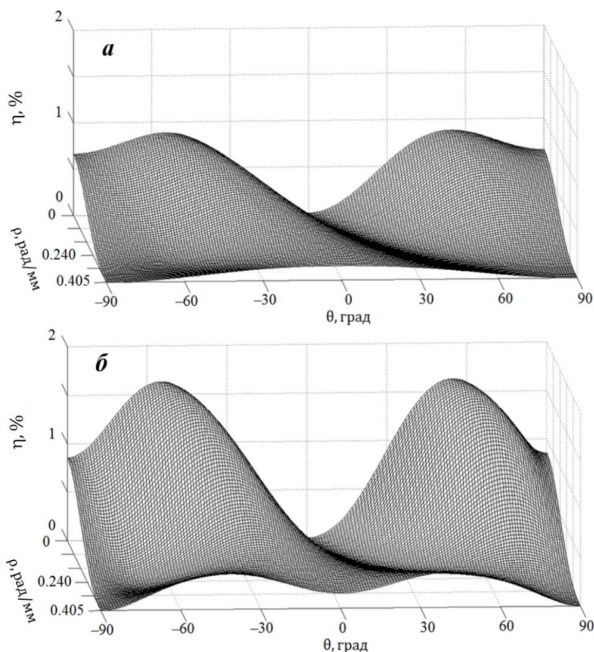


Рисунок 4. – Зависимость дифракционной эффективности η голограмм, сформированных в кристалле BSO толщиной 8 мм, от ориентационного угла θ и значения удельного вращения ρ кристалла:

***a* – без учета пьезоэффекта; *б* – с учетом пьезоэффекта**

Установлено, что без одновременного учета пьезоэффекта и оптической активности адекватное описание дифракционной эффективности не достигается: в пренебрежении обратным пьезоэлектрическим эффектом и фотоупругостью при расчетах получаются значения дифракционной эффективности голограммы, заниженные приблизительно в два раза.

Показано, что при изменении знака оптической активности кристалла (связанного с использованием энантиоморфных модификаций кристалла или

обусловленного эффектом Фарадея) может иметь место смещение максимумов дифракционной эффективности относительно значения ориентационного угла, равного нулю – зеркально симметричное для пластинки толщиной 8 мм, асимметричное для пластинки толщиной 3,45 мм [4, 8, 10, 14].

В главе 4 исследованы выходные характеристики отражательных голограмм в фоторефрактивных кристаллах. В разделе 4.1 изучены закономерности усиления предметной волны при встречном двухволновом взаимодействии на объемной отражательной смешанной голограмме, сформированной в кубическом оптически активном фоторефрактивном пьезокристалле ВТО; произведен анализ зависимости относительной интенсивности предметной световой волны от входных азимутов линейной поляризации опорной и предметной волн в условиях их одновременной дифракции на смешанной отражательной голограмме в кристалле ВТО.

В разделе 4.2 установлено поляризационное условие, при котором относительная интенсивности предметной волны достигает максимальных значений при дифракции на смешанной отражательной голограмме; показано, что условия достижения максимальной относительной интенсивности предметной волны для фазовой и смешанной отражательных голограмм существенно различаются [5, 6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. В результате анализа научной литературы определен круг задач для исследования и обоснована предпочтительность ковариантного метода Ф. И. Федорова для определения отличных от нуля независимых компонент тензоров, ранг которых выше третьего. Соответствующая методика адаптирована для определения компонент флексоэлектрического тензора f_{ijmr} кристаллов класса симметрии 23, и определены отличные от нуля компоненты тензора f_{ijmr} применительно к двум вариантам его внутренней симметрии: $V[V^2]^2$ и $V[[V^2]^2]$. Выявлено, что при повышении симметрии тензора число неравных друг другу отличных от нуля компонент тензора уменьшается [1, 7, 11].

2. Теоретически исследована дифракционная эффективность смешанных пропускающих голограмм в кристалле ВТО срезов $(\bar{1}\bar{1}0)$, $(\bar{1}\bar{1}\bar{2})$ и $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ от ориентационного угла θ . В результате анализа указательных поверхностей дифракционной эффективности смешанных голограмм, сформированных в пластинках кристалла ВТО указанных срезов и толщины $d = 7,7; 16$ и 20 мм, установлено, что [2, 9, 12, 13, 15, 16]:

– наибольшая дифракционная эффективность голограммы, сформированной в кристаллической пластинке толщиной $d = 7,7$ мм, достигается в кристаллах двух срезов: $(\bar{1}\bar{1}0)$ и $(\bar{1}\bar{1}2)$, – и равна 1,83%; а в пластинке среза $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ наибольшая эффективность дифракции η^{\max} не превышает 0,82%;

– максимальное значение дифракционной эффективности пропускающих голограмм, сформированных в кристаллических пластинках толщиной $d = 16$ мм, $\eta^{\max} = 2,52\%$ и может быть достигнуто только в срезах $\{110\}$; при использовании среза $\{112\}$ $\eta^{\max} = 2,47$; в пластинке среза $\{111\}$ эта величина существенно меньше: $\eta^{\max} = 0,94\%$;

– величина максимальной дифракционной эффективности голограмм, сформированных в пластинках толщиной $d = 20$ мм из кристаллических срезов $\{110\}$, $\{112\}$ и $\{111\}$, равна соответственно 2,07%; 1,96% и 0,64%.

Симметрия указательных поверхностей дифракционной эффективности смешанных пропускающих голограмм, сформированных в кристалле ВТО, выше симметрии самого кристалла и характеризуется наличием трёх биполярных осей четвертого порядка (вместо биполярных осей второго порядка, имеющих у кристалла) и четырёх биполярных осей третьего порядка (вместо полярных осей третьего порядка), что соответствует принципу Неймана.

3. Установлены закономерности изменения компонент обратного тензора диэлектрической проницаемости кристалла ВТО под действием электрического поля пространственного заряда. Выявлено, что при ориентации вектора электрического поля пространственного заряда \vec{E}_{SC} вдоль направления $[\bar{1}\bar{1}1]$ максимальное значение нормальной составляющей обратного тензора диэлектрической проницаемости кристалла ВТО достигается вдоль направлений $[\bar{1}\bar{1}1]$ и $[11\bar{1}]$, а наименьшее – в направлении, перпендикулярном вектору \vec{E}_{SC} . Вследствие обратного пьезоэлектрического эффекта и фотоупругости изменяются как максимальное и минимальное числовые значения нормальной составляющей обратного тензора диэлектрической проницаемости (увеличиваются для положительных компонент и уменьшаются – для отрицательных), так и ориентация её указательной поверхности в пространстве [3].

4. С учетом линейного электрооптического, обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов произведено теоретическое исследование зависимости дифракционной эффективности пропускающих голограмм, сформированных в образце фоторефрактивного кристалла BSO, от ориентационного угла, величины удельного вращения и толщины кристалла. Показано, что без одновременного учета пьезоэффекта и оптической активности

адекватное описание дифракционной эффективности не достигается, в частности в пренебрежении обратным пьезоэлектрическим эффектом и фотоупругостью при расчетах получены значения дифракционной эффективности голограммы, заниженные приблизительно в два раза. При фиксированном значении удельного вращения $\rho = 0,405$ рад/мм и толщины кристалла $d = 8$ мм под влиянием пьезоэффекта зависимость $\eta(\theta)$ из «одногорбой» трансформируется в «двугорбую», симметричную относительно прямой $\theta = 0$; указанная симметричность нарушается при изменении толщины пластинки. При изменении знака удельного вращения без изменения абсолютного значения этой величины имеет место «зеркальное отражение» зависимости $\eta(\theta)$ относительно $\theta = 0$ [4, 8, 10, 14].

5. Изучены закономерности усиления предметной волны при встречном двухволновом взаимодействии на объемной отражательной смешанной голограмме, сформированной в кубическом оптически активном фоторефрактивном пьезокристалле ВТО. В результате анализа зависимости относительной интенсивности предметной световой волны от входных азимутов линейной поляризации опорной и предметной волн в условиях их одновременной дифракции на смешанной отражательной голограмме в кристалле ВТО установлено поляризационное условие, при котором относительная интенсивность предметной волны достигает максимальных значений при дифракции на смешанной отражательной голограмме. Показано, что режимы дифракции световых волн на амплитудно-фазовой голограмме и на фазовой голограмме существенно отличаются [5, 6].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы для расчета относительной интенсивности предметной световой волны при одновременной дифракции опорной и предметной волн на смешанных и фазовых отражательных голографических решетках в кубических фоторефрактивных пьезокристаллах. На их основе можно производить теоретическую оценку толщины кристалла и выбор оптимальных срезов в целях достижения максимальной дифракционной эффективности голограмм.

Результаты теоретического исследования зависимости выходных характеристик голограмм, сформированных в фоторефрактивных кристаллах различной толщины, от ориентационного угла и удельного вращения кристалла могут быть основанием для повышения эффективности устройств динамической голографии, в которых используются кристаллы ВТО.

Полученная в ходе выполнения диссертации функция-многочлен может использоваться при выборе направления среза и толщины кристаллической пластинки в диапазоне $0 < d \leq 30$ мм.

Результаты, полученные при исследовании одновременного влияния обратного пьезоэлектрического эффекта, фотоупругости и удельного вращения кристалла на выходные энергетические характеристики голограмм, могут быть полезными при практическом решении задачи оптимизации их практического использования – в целях предварительного выбора параметров кристалла и условий формирования голограмм.

Основные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены при выполнении научно-исследовательской работы «Исследование голографически наноструктурированных динамических сред и их применение для управления световыми пучками и оптической диагностики», выполненной в рамках задания 1.2.01 «Разработка методов создания, контроля и диагностики оптических микро- и наноструктур и формирование на их основе световых пучков с заданной поляризационно-фазовой структурой» Государственной программы научных исследований «Фотоника, опто- и микроэлектроника» (№ госрегистрации 20160359 от 16.03.2016; сроки выполнения НИР с 04.01.2016 по 31.12.2020).

Полученные результаты диссертационного исследования являются основанием для вывода о перспективности использования кристаллов ВТО и BSO в голографических устройствах различного назначения, в частности, в голографических интерферометрах.

Методические указания «Теория световых волн в фоторефрактивном кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, с одновременным учетом вкладов обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов, а также оптической активности» и «Методика применения ковариантных методов академика Ф. И. Федорова для определения отличных от нуля компонент тензоров физических величин в кристаллах», разработанные с использованием результатов диссертационного исследования и апробированные в образовательном процессе по дисциплинам «Введение в квантовую электронику» и «Нелинейная оптика и голография» на инженерно-физическом факультете учреждения образования «Мозырский государственный педагогический университет имени И.П. Шамякина» (имеется два акта о внедрении результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс УО МГПУ им. И.П. Шамякина), могут быть использованы для ознакомления студентов физических специальностей с физической сутью и механизмом фоторефрактивного эффекта, расширения знаний о практическом применении фоторефрактивных кристаллов и знакомства с принципом действия современных приборов бесконтактного контроля.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

**Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения
о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий
в Республике Беларусь**

1. Amanowa, M. A. Kristallardaky fiziki ululyklaryň tenzorlarynyň noldan tarawutly komponentlerini kesgitlemekde Akademik F. I. Fedorowyň kowariant usullaryny ulanmak (О применении ковариантных методов академика Ф. И. Федорова в определении отличных от нуля компонентов тензоров физических величин в кристаллах) / М. А. Amanowa, W. W. Şepelewiç, A. M. Ataýew // Türkmenistanda uým we tehnika (Наука и техника в Туркменистане). – 2018. – № 3. – С. 90–94.

2. Дифракционная эффективность смешанных пропускающих голограмм в фоторефрактивном оптически активном пьезокристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ произвольного среза / А. В. Макаревич, В. В. Шепелевич, В. Н. Навныко, М. А. Аманова, С. М. Шандаров // Кристаллография. – 2019. – Т. 64, № 5. – С. 782–788.

Переводная версия

Diffraction Efficiency of Mixed Transmission Holograms in a Photorefractive Optically Active $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ Piezoelectric Crystal of Arbitrary Cut / A. V. Makarevich, V. V. Shepelevich, V. N. Navnyko, M. A. Amanova, S. M. Shandarov // Crystallography reports. – 2019. – Vol. 64, № 5. – P. 780–786.

3. Изменение компонентов обратного тензора диэлектрической проницаемости кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ под действием электрического поля пространственного заряда / В. Н. Навныко, М. А. Аманова, В. В. Шепелевич, В. В. Юдицкий // Вестник БрГУ. Серия 4, Физика. Математика. – 2019. – № 2. – С. 24–34.

4. Влияние обратного пьезоэлектрического эффекта, фотоупругости и оптической активности на дифракционную эффективность пропускающих голограмм в фоторефрактивном кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ / М. А. Аманова, В. В. Шепелевич, А. В. Макаревич, В. В. Навныко // ЖПС. – 2020. – Т. 87, № 2. – С. 328–334.

Переводная версия

Influence of Inverse Piezoelectric Effect, Photoelasticity, and Optical Activity on the Diffraction Efficiency of Transmitting Holograms in Photorefractive Crystal $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ / M. A. Amanova, V. V. Shepelevich, A. V. Makarevich, V. N. Navnyko // Journal of Applied Spectroscopy. – 2020. – Vol. 87, № 2. – P. 349–356.

5. Аманова, М. А. Исследование двухволнового взаимодействия на смешанной отражательной голограмме в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ среза (001)

/ М. А. Аманова, В. Н. Навныко, В. В. Шепелевич // Проблемы физики, математики и техники. – 2020. – Т. 42, № 1. – С. 7–11.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

6. Зависимость коэффициента усиления предметной световой волны от толщины фоторефрактивного кристалла $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ / В. В. Шепелевич, А. В. Макаревич, М. А. Аманова, А. А. Грабар, М. В. Цыгика // Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам : материалы IX Международной научно-практической интернет-конференции, Мозырь, 24–27 марта 2017 г. / УО МГПУ им. И. П. Шамякина ; редкол.: И. Н. Ковальчук (отв. ред.) [и др.]. – Мозырь, 2017. – С. 198–200.

7. Аманова, М. А. О применении ковариантных методов академика Ф. И. Федорова к определению отличных от нуля компонент тензоров физических величин в кристаллах / М. А. Аманова // Актуальные вопросы физики и техники : материалы VI Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 26 апреля 2017 г. : в 3 ч. / ГГУ им. Ф. Скорины ; редкол.: А. В. Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2017. – Ч. 2. – С. 7–10.

8. Экспериментальное и теоретическое изучение ориентационной зависимости коэффициента усиления предметной световой волны при двухволновом взаимодействии от толщины кристалла $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ / В. В. Шепелевич, А. В. Макаревич, С. М. Шандаров, М. А. Аманова, М. В. Федоренко // XXX Международная школа-симпозиум по голографии, когерентной оптике и фотонике : материалы школы-симпозиума, Калининград, 2–6 октября 2017 г. / БФУ им. И. Канта ; под ред. : канд. физ.-мат. наук И. В. Алексеенко. – Калининград, 2017. – С.131–132.

9. Аналитическое решение системы уравнений связанных волн и исследование его на экстремум для случая амплитудно-фазовых голограмм в кубических фоторефрактивных кристаллах / В. В. Шепелевич, А. В. Макаревич, С. М. Шандаров, М. А. Аманова, М. В. Федоренко // Квантовая электроника : материалы XI Международной научно-технической конференции, Минск, 13–17 ноября 2017 г. / БГУ; редкол.: М. М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 20–21.

10. Оптимизация коэффициента усиления предметной световой волны в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ при различных значениях его толщины и угла пространственной ориентации / В. В. Шепелевич, А. В. Макаревич, С. М. Шандаров, М. А. Аманова, М. В. Федоренко, П. И. Ропот // VI Конгресс физиков Беларуси, посвященный Году науки в Республике Беларусь, Минск, Беларусь, 20–23 ноября 2017 г. : сборник научных трудов / Институт физики

им. Б. И. Степанова НАН Беларуси; редкол.: С. Я. Килин (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 196–197.

11. Аманова, М. А. О применении ковариантных методов академика Ф. И. Федорова к определению отличных от нуля компонент тензоров физических величин в кристаллах / М. А. Аманова, В. В. Шепелевич // Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам : материалы X Юбилейной Международной научно-практической интернет-конференции, Мозырь, 27–30 марта 2018 г. / УО МГПУ им. И. П. Шамякина ; редкол. : Е. М. Овсюк (отв. ред.) [и др.]. – Мозырь, 2018. – С. 174–176.

12. Исследование фоторефрактивных характеристик кристалла $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ для применения в динамической интерферометрии / А. В. Макаревич, В. В. Шепелевич, М. А. Аманова, А. А. Грабар, М. В. Цигика, П. И. Ропот // Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам : материалы X Юбилейной Международной научно-практической интернет-конференции, Мозырь, 27–30 марта 2018 г. / УО МГПУ им. И. П. Шамякина ; редкол.: Е. М. Овсюк (отв. ред.) [и др.]. – Мозырь, 2018. – С. 204–205.

13. Смешанные пропускающие голограммы в фоторефрактивном оптически активном пьезокристалле ВТО / В. В. Шепелевич, А. В. Макаревич, В. Н. Навныко, М. А. Аманова, С. М. Шандаров // Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам : материалы XI Международной научно-практической конференции, Мозырь, 28–29 марта 2019 г. / УО МГПУ им. И. П. Шамякина ; редкол.: Т. В. Карпинская (отв. ред.) [и др.]. – Мозырь, 2019. – С. 267–268.

14. Изучение вкладов обратного пьезоэлектрического эффекта, фотоупругости и оптической активности в дифракционную эффективность голограмм, сформированных в фоторефрактивном кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ / М. А. Аманова, В. В. Шепелевич, А. В. Макаревич, В. Н. Навныко // IX международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов, Москва, 29–31 января 2020 г. / Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» ; редкол.: В. Г. Родин (отв. ред.) [и др.]. – Москва, Россия, 2020. – С. 55–56.

15. Теоретическая оптимизация выходных характеристик смешанных голограмм в фоторефрактивном кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ произвольного среза / А. В. Макаревич, В. В. Шепелевич, В. Н. Навныко, М. А. Аманова, С. М. Шандаров // IX международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов, Москва, 29–31 января 2020 г.

/ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» ; редкол.: В. Г. Родин (отв. ред.) [и др.]. – Москва, Россия, 2020. – С. 298–299.

16. Влияние обратного пьезоэлектрического эффекта, фотоупругости и оптической активности на дифракционную эффективность смешанных пропускающих голограмм в фоторефрактивном кристалле $\text{V}_{12}\text{TiO}_{20}$ / М. А. Аманова, В. В. Шепелевич, А. В. Макаревич, В. Н. Навыко // Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам : материалы XII Международной научно-практической конференции, Мозырь, 5–6 марта 2020 г. / УО МГПУ им. И. П. Шамякина ; редкол.: Т. В. Карпинская (отв. ред.) [и др.]. – Мозырь, 2020. – С. 123–124.



РЕЗЮМЕ

Аманова Марал Абдуллаевна

Фазовые и амплитудно-фазовые голограммы в фоторефрактивных кристаллах силленитов с учетом обратного пьезоэлектрического эффекта и фотоупругости

Ключевые слова: фазовая голограмма, амплитудно-фазовая голограмма, фоторефрактивный кристалл, обратный пьезоэлектрический эффект, фотоупругий эффект, компоненты тензора, оптическая активность, срез кристалла, пропускающая голограмма, отражающая голограмма, дифракционная эффективность, указательная поверхность.

Цель работы – теоретически определить зависимости дифракционной эффективности пропускающих и отражательных фазовых и смешанных голограмм, сформированных в кристаллах силленитов, от их толщины, ориентационного угла и удельного вращения с учетом обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов совместно с электрооптическим эффектом для повышения эффективности использования этих кристаллов в голографических устройствах.

Методы исследования и использованная аппаратура: метод связанных волн, методы численного решения системы дифференциальных уравнений связанных волн, методы компьютерного моделирования.

Полученные результаты и их новизна: с учетом обратного пьезоэффекта установлены условия оптимизации процесса считывания смешанных пропускающих голограмм, сформированных в фоторефрактивном пьезокристалле ВТО семейства срезов $\{110\}$, $\{112\}$ и $\{111\}$. Изучено влияние пьезоэффекта на нормальную составляющую обратного тензора диэлектрической проницаемости при фиксированном направлении вектора напряженности электрического поля пространственного заряда. Выявлен характер влияния оптической активности, обратного пьезоэлектрического эффекта и фотоупругости на дифракционную эффективность пропускающих голограмм в пьезоэлектрических кристаллах BSO.

Рекомендации по использованию: полученные результаты являются основанием для вывода о перспективности использования кристаллов ВТО и BSO в голографических устройствах различного назначения, в частности в голографических интерферометрах.

Область применения: полученные результаты исследования могут быть использованы для ознакомления студентов физических специальностей с физической сутью и механизмом фоторефрактивного эффекта, расширения знаний о практическом применении фоторефрактивных кристаллов.

Аманавя Марал Абдулаеўна

**Фазавыя і амплітудна-фазавыя галаграмы ў фотарэфрактыўных
крышталях сіленітаў з улікам зваротнага п'езаэлектрычнага ефекту
і фотапругкасці**

Ключавыя словы: фазавая галаграма, амплітудна-фазавая галаграма, фотарэфрактыўны крышталі, зрэз крышталі, зваротны п'езаэлектрычны эффект, фотапругкі эффект, кампаненты тэнзара, аптычная актыўнасць, прапускаючая галаграма, адбівальная галаграма, дыфракцыйная актыўнасць, указальная паверхня.

Мэта работы – тэрэтычна вызначыць залежнасці дыфракцыйнай актыўнасці прапускаемых і адбівальных фазавых і змешаных галаграм, сфармаваных у крышталях сіленітаў, ад іх таўшчыні, арыентацыйнага вугла і ўдзельнага вярчэння з улікам зваротнага п'езаэлектрычнага і фатоупругкага ефектаў сумесна з электрааптычнымі эфектамі для павышэння актыўнасці выкарыстання гэтых крышталі ў галаграфічных прыладах.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: метады звязаных хваляў, метады лікавага рашэння сістэмы дыферэнцыяльных ураўненняў звязаных хваляў, метады камп'ютарнага мадэлявання.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: з улікам зваротнага п'езаэфекта ўстаноўлены ўмовы аптымізацыі працэсу счытвання змешаных прапускаючых галаграм, якія сфарміраваны ў фотарэфрактыўным п'езакрышталі ВТО сямейства зрэзаў $\{110\}$, $\{112\}$ і $\{111\}$. Вывучаны ўплыў п'езаэфекту на нармальную складальную зваротнага тэнзара дыэлектрычнай праніцаемасці пры фіксіраваным накірунку вектара напружанасці электрычнага поля прасторавага зараду. Выяўлены характар ўплыву аптычнай актыўнасці, зваротнага п'езаэлектрычнага ефекту і фотапругкасці на дыфракцыйную актыўнасць прапускаючых галаграм у п'езаэлектрычных крышталях BSO.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: атрыманыя вынікі з'яўляюцца падставой для вываду аб перспектывнасці выкарыстання крышталі ВТО і BSO ў галаграфічных прыладах рознага прызначэння, у прыватнасці ў галаграфічных інтэрферометрах.

Сфера ўжывання: атрыманыя вынікі могуць быць выкарыстаны з фізічнай сутнасцю і механізмам фотарэфрактыўнага ефекту, пашырэння ведаў аб практычным прымяненні фотарэфрактыўных крышталіў.

SUMMARY

Amanova Maral Abdullayevna

Phase and amplitude-phase holograms in photorefractive sillenite crystals taking into account the inverse piezoelectric effect and photoelasticity

Keywords: phase hologram, amplitude-phase hologram, photorefractive crystal, inverse piezoelectric effect, photoelastic effect, tensor components, optical activity, crystal slice, transmission hologram, reflecting hologram, diffraction efficiency, pointing surface.

The purpose of the research – theoretically determine the dependence of the diffraction efficiency of transmitting and reflecting phase and mixed holograms formed in sillenite crystals on their thickness, orientation angle, and specific rotation, taking into account the reverse piezoelectric and photoelastic effects together with the electro-optical effect to increase the efficiency of using these crystals in holographic devices.

Research methods and equipment used: coupled wave method, methods of numerical solution of a system of differential equations of coupled waves, computer simulation methods.

The results obtained and their novelty: taking into account the inverse piezoelectric effect, the conditions for optimizing the reading process of mixed transmission holograms formed in a photorefractive BTO piezoelectric crystal $\{110\}$, $\{112\}$, and $\{111\}$ cuts family are established. The effect of the piezoelectric effect on the normal component of the inverse dielectric permittivity tensor for a fixed direction of the electric field intensity vector of a spatial charge is studied. The nature of the influence of optical activity, inverse piezoelectric effect, and photoelasticity on the diffraction efficiency of transmission holograms in BSO piezoelectric crystals is revealed.

Recommendations for use: the results obtained are the basis for a conclusion about the prospects of using BTO and BSO crystals in holographic devices for various purposes, in particular in holographic interferometers.

Field of application: the obtained research results can be used to familiarize students of physical specialties with the physical essence and mechanism of the photorefractive effect, to expand knowledge about the practical application of photorefractive crystals.



Подписано в печать 20.10.2020 г. Формат 60x84/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,32.
Тираж 60 экз. Заказ 391.

Республиканское унитарное предприятие «Информационно-
вычислительный центр Министерства финансов Республики Беларусь».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№2/41 от 29.01.2014.
Ул. Кальварийская, 17, 220004, г. Минск.