

На правах рукописи

Воронцова Елена Юрьевна

**ФОРМА ИЗОХРОМ В КОНОСКОПИЧЕСКИХ КАРТИНАХ
ОДНООСНЫХ КРИСТАЛЛОВ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ВЗАИМНОЙ
ОРИЕНТАЦИИ НОРМАЛИ К ПОВЕРХНОСТИ И
ОПТИЧЕСКОЙ ОСИ**

01.04.07 Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Тверь – 2018

Работа выполнена на кафедре прикладной физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тверской государственной академии наук и техники»

Научный руководитель **Колесников Александр Игоревич**,
кандидат физико-математических наук,
доцент

Официальные оппоненты: **Жукова Лия Васильевна**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», главный научный сотрудник кафедры физической и коллоидной химии Химико-технологического института УрФУ
Лисицын Владимир Сергеевич, кандидат физико-математических наук, ООО «Нефтегазгеофизика», ведущий инженер

Ведущая организация федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова»

Защита состоится 26 октября 2018 г. в 12:30 на заседании диссертационного совета Д 212.263.09 при ФГБОУ ВО «Тверской государственной академии наук и техники» по адресу: 170002, г. Тверь, Садовый переулок, 35, ауд. 226.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Тверского государственного университета по адресу: 170100, г. Тверь, ул. Володарского, 44а и в сети Интернет на сайте Тверского государственного университета <http://dissertations.tversu.ru/>

Автореферат разослан _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.263.09

Е.В. Барабанова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. За последние два десятилетия заметно вырос интерес к давно применяющемуся, и, казалось бы, достаточно разработанному методу исследования оптически прозрачных кристаллов в сходящемся линейно-поляризованном свете – методу коноскопии. Наиболее важное практическое значение метода коноскопии, крайне редко обсуждаемое в научных публикациях, но использующееся во всех оптических лабораториях, на предприятиях, выпускающих оптические кристаллы и устройства на их основе, а также закрепленное в метрологии качества оптических кристаллов в ГОСТах, ТУ, международных стандартах ИСО, состоит в возможности обнаружения даже небольших оптических неоднородностей в кристаллах путем анализа формы изохром. Аномальная двуосность, а также отклонения всех видимых линий изохром от их теоретической формы свидетельствуют о крупных оптических аномалиях в масштабах большей части объема кристалла или всего кристалла. Анализ оптических аномалий, выявляемых методом коноскопии, позволяет вносить коррективы в технологии выращивания кристаллов с целью получения максимальной однородности материала. Таким образом, коноскопия является вполне современным, развивающимся, многофункциональным и весьма чувствительным методом диагностики дефектоскопии и метрологии монокристаллов, применяемых в оптике.

Однако для правильной интерпретации вида коноскопических картин необходимы правильная физическая теория и соответствующий математический аппарат, позволяющие рассчитать форму изохромы любого порядка для любого кристалла с известными структурой, размерами, главными значениями показателей преломления и ориентацией взаимно-параллельных граней относительно оптической оси (осей). Между тем, тщательный анализ известных работ, связанных с коноскопией, позволяет уверенно утверждать, что метод нуждается и в развитии, и, в первую очередь, в пересмотре устоявшихся некорректных положений и формул, до сих пор применяющихся при анализе коноскопических картин. Это особенно важно потому, что наблюдающиеся в последнее время технические усовершенствования метода (использование лазеров и светодиодов, цифровой видеотехники, компьютеров- для расчета вида картин изохром) в значительной степени бесполезны, если они сочетаются с неправильной теорией.

Цель настоящей работы состояла в выводе без приближений уравнения изохром в коноскопической картине одноосного кристалла для самого общего случая произвольной взаимной ориентации оптической оси и нормали к кристаллу, а также в экспериментальной проверке

полученных соотношений и разработке методов поиска и классификации оптических аномалий в кристалле и расчета их параметров с помощью метода коноскопии.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

- Разработка способа вывода уравнения изохром одноосных кристаллов без применявшихся ранее приближений.
- Вывод уравнения кривой, описываемой вектором необыкновенной волны на выходной поверхности плоскопараллельного одноосного кристалла при вращении вокруг нормали к кристаллу луча, падающего на входную поверхность под постоянным углом.
- Анализ полученного уравнения изохром одноосных кристаллов и установление зависимостей вида коноскопических картин от параметров кристалла и особенностей оптической схемы для наблюдения изохром.
- Экспериментальная проверка выведенных уравнений на специально изготовленных оптических элементах из одноосных кристаллов парателлурита и ниобата лития со специальными, ранее не применявшимися ориентациями взаимно параллельных граней.
- Получение коноскопических картин кристаллов с оптическими аномалиями и расчет параметров оптических аномалий.
- Выработка технических рекомендаций по использованию метода лазерной коноскопии для анализа оптической однородности одноосных кристаллов.

Научная новизна:

- Впервые без ранее применявшихся приближений выведено уравнение изохром в коноскопических картинах одноосных кристаллов.
- Впервые получены данные об истинной форме изохром одноосных кристаллов при произвольных ориентациях нормали к поверхностям относительно оптической оси.
- Предсказываемые теоретически изохромы в виде кривых выше второго порядка подтверждены экспериментально и зафиксированы в коноскопических картинах одноосных кристаллов.
- Методом лазерной коноскопии исследованы оптические аномалии в монокристаллах парателлурита и ниобата лития – вариации показателей преломления, свили, аномальная двуосность.

Практическая значимость.

Метод лазерной коноскопии прошел испытания при тестировании оптического качества элементов, изготовленных из монокристаллов парателлурита и ниобата лития и предназначенных для акустооптических устройств. Элементы из одноосных кристаллов, прошедшие коноскопические исследования, использованы в качестве

светозвукопроводов в действующих современных устройствах – АОД (акустооптических дефлекторах лазерного излучения), АОМ (акустооптических модуляторах), АОПФ (акустооптических электронно-перестраиваемых фильтрах излучений и изображений), АОДЛ (акустооптических адаптивных дисперсионных линий задержки, предназначенных для сжатия и корреляции ультракоротких импульсов фемтосекундных лазеров).

Разработанный метод позволяет проводить экспресс-анализ оптической однородности не только партий элементов, но и крупногабаритных (до десятков сантиметров) монокристаллических буль. При этом в них выявляются такие оптические аномалии как локальные вариации показателей преломления, свили, аномальная двуосность.

Испытанный в работе метод лазерной коноскопии, основанный на полученном уравнении изохром, перспективен при решении таких задач как метрология оптической однородности, выявление оптических аномалий и механических напряжений в кристаллах, контроль параллельности плоскостей оптических элементов из кристаллов, а также изучение влияния различных физических воздействий на оптические параметры одноосных кристаллов в режиме реального времени.

Методология и методы исследований.

При теоретических исследованиях, связанных с выводом точного уравнения изохром в коноскопических картинах одноосных кристаллов, использовано основное уравнение кристаллооптики – уравнение Френеля, записанное через направляющие косинусы падающей и двух преломленных волн, а также оптической оси и нормали к двум взаимно-параллельным поверхностям кристалла. Далее в теоретической части работы использованы методы преобразования координат при переносах и поворотах вокруг осей исходной системы координат, а также геометрическая схема хода обыкновенного и необыкновенного лучей через кристалл и проекционную систему до экрана, находящегося в фокальной плоскости. В экспериментальных исследованиях коноскопических картин одноосных монокристаллов парателлурита и ниобата лития применялись как традиционная поляризационная микроскопия, так и методика, при которой в качестве источников излучения применялись непрерывные лазеры видимого диапазона. При анализе формы изохром, изображения которых на полупрозрачном экране фиксировались цифровой видеокамерой, применялась компьютерная программа, позволяющая получать информацию об оптической однородности, свильности, механических напряжениях, клиновидности и аномальной двуосности кристаллов.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту:

- Решение уравнения изохром в коноскопических картинах одноосных кристаллов восьмого порядка показало, что изохромы одноосных кристаллов являются плоскими кривыми второго порядка – окружностями – только в случае совпадения нормали к поверхностям с оптической осью кристалла. Изохромы одноосных кристаллов являются кривыми четвертого порядка в единственном случае, когда нормаль к поверхностям ортогональна оптической оси. Во всех остальных случаях, когда нормаль и оптическая ось не совпадают и не ортогональны, изохромами одноосных кристаллов являются плоские кривые восьмого порядка.
- Полученное уравнение изохром позволяет при подстановке известных значений толщины кристалла, угла между нормалью к поверхности и оптической осью, главных показателей преломления обыкновенных и необыкновенных волн, а также фокусного расстояния проекционной системы, воссоздать графически с любой заданной точностью теоретический вид изохром в коноскопической картине.
- Сравнительный компьютерный анализ теоретически рассчитанного и полученного экспериментально методом лазерной коноскопии изображений изохром одноосного кристалла позволяет рассчитать вариации показателей преломления, а по ним – механические напряжения, приводящие к искажениям оптической индикатрисы кристалла.

Достоверность результатов. Достоверность результатов диссертационной работы обосновывается экспериментальной проверкой полученного уравнения изохром при получении коноскопических картин различных одноосных монокристаллов с классическими и ранее не исследованными ориентациями плоскостей вырезанных из них элементов, применением современных методов и оборудования, апробацией на научных конференциях, а также практическим использованием при метрологических исследованиях оптического качества монокристаллов, предназначенных для акустооптических и лазерных устройств. Основное содержание работы опубликовано в 10 статьях, включая 6 статей в журналах из списка ВАК.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены на IX Международной конференции «Прикладная физика» (г. Санкт-Петербург, Оптическое общество им. О.С. Рождественского, 2010), Международной конференции «International Conference on Functional Materials and Nanotechnologies» (Tartu, Estonia, 2013), VII Международной конференции по фотонике и информационной оптике (г. Москва, НИЯУ МИФИ, 2018).

Настоящая работа выполнена на кафедре прикладной физики Тверского государственного университета в соответствии с тематическим планом НИР, в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.», соглашение 14.574.21.0113 (RFMEFI57414X0113).

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 149 страницы основного текста, 66 рисунков, 2 таблицы и 94 наименования цитируемой литературы.

Личный вклад автора. Диссертантом совместно с научным руководителем проводились: выбор темы, постановка цели и задач исследований, планирование работы и структуры диссертации, обсуждение полученных результатов. В теоретической части работы автором самостоятельно проведены анализ известных способов вывода уравнений изохром, в коноскопических картинах одноосных кристаллов; установление приближений, приводивших ранее к уравнениям, не вполне корректно описывающим форму изохром для случаев, когда нормаль к поверхности кристалла и его оптическая ось не совпадают и не ортогональны; составление геометрической и математической схем расчета координат изохром без ранее применявшихся приближений и упрощений; вывод точного уравнения изохром одноосных кристаллов и его компьютерный анализ с помощью пакета математических программ «Maple». В экспериментальной части работы автором самостоятельно выполнены коноскопические исследования монокристаллов парателлурита и ниобата лития с помощью традиционной схемы, а также с применением лазеров видимого диапазона.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель исследований и задачи, решаемые в работе. Показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, описаны методология и методы исследования. Представлены основные научные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации работы, публикациях по теме диссертации, личном вкладе автора и объеме работы.

В первой главе, являющейся обзором научной литературы по теме диссертации, рассмотрены история, физические принципы, оптические схемы, современный математический аппарат и применение метода коноскопии. Проанализированы базовые положения кристаллооптики двупреломляющих кристаллов, из которых получены используемые в

настоящее время при расчете формы изохром в коноскопических картинах одноосных и двуосных кристаллов. Показано, что на сегодняшний день решения как этой, так и некоторых других задач кристаллооптики, относительно простых и наглядных по постановке, но важных в теоретическом и прикладном аспектах, либо получены приближенно для самых тривиальных случаев, либо вообще отсутствуют, как, например, для описания недавно обнаруженного явления четырехлучеотражения света от внутренних поверхностей одноосных кристаллов, ранее не предсказанного теоретически ни в одной из наиболее подробных и математизированных работ, посвященных отражению. Показано также, что ранее применявшиеся физические приближения и математические упрощения при выводе уравнений изохром в коноскопических картинах одноосных кристаллов приводят к тому, что полученные соотношения для всех случаев, кроме совпадения направлений нормали к поверхностям образца и оптической оси, не только количественно (координаты точек на кривых), но и с качественной стороны дают не вполне корректные результаты. Так, известное уравнение изохром одноосных кристаллов (1), в котором δ – разность фаз обыкновенной и необыкновенной волн, записанное в декартовой системе координат (x, y)

$$\delta = \frac{2\pi}{h\lambda} (N_e - N_o) \left[x^2 \left(\cos^2 \psi - \frac{1}{2} \sin^2 \psi \right) + y^2 \left(\cos^2 \psi + \frac{1}{2} \sin^2 \psi \right) - h x \sin 2\psi + h^2 \sin 2\psi \right], \quad (1)$$

где ψ – угол между оптической осью и нормалью к кристаллу, h – толщина кристалла, λ – длина волны излучения, N_e, N_o – главные показатели преломления обыкновенной и необыкновенной волн, показывает, что в общем случае изохромы – это плоские кривые второго порядка: при $\psi = 0$ это окружности, при $\text{tg } \psi < \sqrt{2}$ – это эллипсы, при $\text{tg } \psi > \sqrt{2}$ – это гиперболы. Между тем, эксперименты, проведенные в работе с различно ориентированными одноосными кристаллами парателлуриата ($\alpha - \text{TeO}_2$) и ниобата лития (LiNbO_3), отчетливо показывают, что, во-первых, изохромами могут являться кривые явно выше первого порядка (рисунок 1), и во-вторых, что сам угол $\psi = \text{arctg } \sqrt{2} \approx 54,73^\circ$ не является особенным, и при близких к этому значению меньших и больших углах вид наблюдаемых изохром существенным образом не изменяется.



Рисунок 1 – Изохромы одноосного монокристалла парателлуриата в виде кривых выше второго порядка. Угол между нормалью к кристаллу и оптической осью составляет 17°

С точки зрения следствий, вытекающих из приближенного уравнения изохром, по картине, представленной на рисунке 1, можно сделать вывод о грубом искажении оптической индикатрисы кристалла. Однако это не соответствует действительности, поскольку элемент, вырезанный из этого же кристалла ортогонально оптической оси, дает классическую картину изохром в виде концентрических окружностей.

Таким образом, применение приближенного уравнения изохром может приводить к грубым погрешностям метрологического характера при оценках оптической однородности монокристаллов.

Общий обзор современного состояния теории в области метода коноскопии, проведенный в первой главе, дает следующие результаты:

- Для одноосных кристаллов известно приближенное уравнение изохром. Уравнение изогир отсутствует.
- Для двуосных кристаллов известно приближенное уравнение изохром, выведенное с еще большим числом упрощений, чем в случае одноосных кристаллов. Уравнение изогир также отсутствует.

Во второй главе представлена процедура получения без приближений уравнения изохром в коноскопических картинах одноосных кристаллов. Вывод уравнения состоит из двух этапов. На первом этапе решается более простая, но также не рассмотренная в известной литературе задача получения уравнения кривой, которую на второй (выходной) поверхности одноосного кристалла описывает волновой вектор необыкновенной волны при вращении вокруг нормали к поверхности падающего под постоянным углом α на первую (входную) поверхность луча монохроматического света. При этом в отличие от известных приближенных методов решения, исходная система уравнений получается при использовании уравнения Френеля, записанного не в координатной форме, а через направляющие косинусы векторов нормали, оптической оси, а также падающей и преломленных обыкновенной и необыкновенной волн:

$$\frac{1-(m_1k_1+m_2k_2+m_3k_3)^2}{1-(m_1l_1+m_2l_2+m_3l_3)^2} = \frac{k_1^2+k_2^2}{N_e^2} + \frac{k_3^2}{N_o^2}, \quad (2)$$

где m_i – направляющие косинусы единичного вектора нормали, l_i – направляющие косинусы волнового вектора падающей волны, k_i – направляющие косинусы волнового вектора преломленной необыкновенной волны в кристаллографической системе координат, N_o и N_e – главные показатели преломления обыкновенной и необыкновенной волн.

Далее, применяя повороты и соответствующие преобразования системы координат, получаем значения направляющих косинусов векторов падающей волны и необыкновенной волны, выраженные уже через координаты пересечения волнового вектора необыкновенной волны

со второй поверхностью кристалла. Выражения для направляющих косинусов подставляются в уравнение Френеля, записанное в форме (2). В результате этого, после преобразований, включающих приведение к общему знаменателю и приведение подобных членов, получается уравнение четвертой степени, которое здесь не приводится вследствие крайней громоздкости (1 страница). Однако в этом уравнении уже отсутствуют введенные ранее неизвестные промежуточные неизвестные величины l_i и угол γ , характеризующий поворот двух осей системы координат на выходной поверхности кристалла до совмещения с ними кристаллофизической системы координат XOY , матрица которого имеет вид

$$\begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где ψ – угол поворота, совмещающего ось Z кристаллографической системы координат с нормалью к поверхности \bar{m} . Левая часть полученного уравнения представляет собой многочлен четвертой степени от двух букв x и y , который может быть разложен на два сомножителя, одним из которых является множитель $(x^2 + y^2 + h^2)$, где h – толщина кристалла. На этот множитель можно произвести сокращение многочлена, поскольку уравнение $x^2 + y^2 + h^2 = 0$ заведомо не имеет действительных решений. После сокращения получаем следующее уравнение второй степени

$$A_1 x^2 + A_2 y^2 + A_3 y + A_4 = 0, \quad (4)$$

где $A_1 = N_o^2(N_e^2 - \sin^2 \alpha)$, $A_2 = N_o^2 N_e^2 - \sin^2 \alpha (N_e^2 \sin^2 \psi + N_o^2 \cos^2 \psi)$, $A_3 = 2h \sin \psi \cos \psi \sin^2 \alpha (N_o^2 - N_e^2)$, $A_4 = -h \sin^2 \alpha (N_o^2 \sin^2 \psi + N_e^2 \cos^2 \psi)$, α – угол между падающим лучом и нормалью.

Уравнение (4) – это уравнение кривой, которую описывает продолжение волнового вектора \bar{k} необыкновенной волны на выходной поверхности кристалла при вращении падающего луча под постоянным углом α вокруг нормали к кристаллу. В случае тривиального случая $\psi = 0$ (оптическая ось совпадает с нормалью к кристаллу) уравнение (4) – это уравнение окружности

$$x^2 + y^2 = \frac{N_e^2 h^2 \sin^2 \alpha}{N_o^2 (N_e^2 - \sin^2 \alpha)}. \quad (5)$$

Во всех остальных случаях $(0 < \psi \leq \frac{\pi}{2})$ мы имеем уравнение эллипса. Анализ (4) показывает, что центры эллипсов не совпадают с началом координат кроме случая, когда оптическая ось ортогональна нормали $\psi = \frac{\pi}{2}$. При этом значении угла между осью и нормалью эллипсы имеют рассчитанный по формуле (4) максимальный эксцентриситет. На рисунке 2 показана система вложенных эллипсов – кривых пересечения

волновыми векторами необыкновенной волны выходной поверхности одноосного кристалла при различных углах падения α вращающегося исходного луча для случая, когда угол ψ между нормалью к кристаллу и оптической осью составляет 20° .

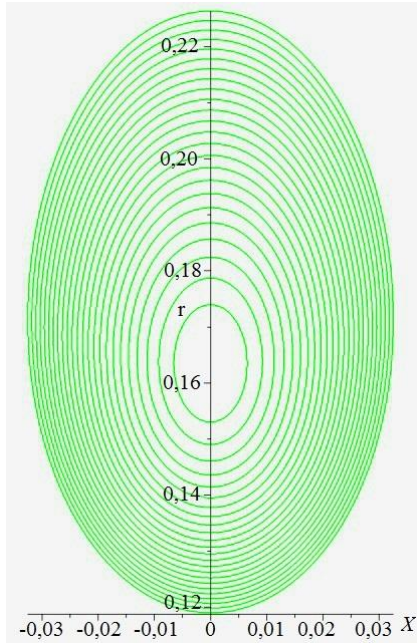


Рисунок 2 – Система вложенных эллипсов-кривых пересечения волновых векторов \vec{k} необыкновенной волны с выходной поверхностью одноосного кристалла, полученных при вращении под различными постоянными углами α лучей вокруг нормали к кристаллу, составляющей угол 20° с оптической осью

Далее произведен расчет разности хода между обыкновенной и необыкновенной волнами. В известных работах приближения связаны с отказом от трудоемкого нахождения направления вектора необыкновенной волны. В настоящей работе, благодаря предварительному нахождению расстояния $\sqrt{x^2 + y^2}$ между выходом на вторую поверхность нормали и волнового вектора необыкновенной волны, решение для разности хода между волнами оказывается возможным, и для интерференционных максимумов (изохром) $\Delta = m\lambda$ записывается в виде

$$\Delta = m\lambda = \frac{(x^2 + y^2 + h^2) \sin \alpha}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \sin \alpha \left(\frac{h \sin \alpha}{\sqrt{N_o^2 - \sin^2 \alpha}} - \sqrt{x^2 + y^2} \right) - \frac{hN_o^2}{\sqrt{N_o^2 - \sin^2 \alpha}} \quad (6)$$

Для вывода уравнения изохром на плоскости наблюдения – фокальной плоскости проекционной системы – использована геометрическая схема, представленная на рисунке 3. Оси x' и y' системы координат на экране, находящемся на фокальном расстоянии f от выходной поверхности кристалла, выбраны так, чтобы они были параллельны осям x и y на выходной поверхности. Тогда равны углы, составляющие с осями отрезки OA и $O'A'$, проведенными из начала систем координат в точки выходов векторов необыкновенной волны на выходной поверхности кристалла и на экране. Заметив, что в уравнении для разности хода Δ (6) x и y входят только в виде суммы квадратов, и,

обозначив эту сумму, как B^2 , перепишем (6) с учетом соотношений между координатами систем xoy и $x'o'y'$, что дает систему уравнений:

$$\left\{ \Delta = m\lambda = \frac{(B^2 + h^2) \sin \alpha}{B} + \sin \alpha \left(\frac{h \sin \alpha}{\sqrt{N_o^2 - \sin^2 \alpha}} - B \right) - \frac{hN_o^2}{\sqrt{N_o^2 - \sin^2 \alpha}} \right. \quad (7)$$

$$\left. \left\{ \frac{ctg^2 \alpha}{f^2} [A_1(x')^2 + A_2(y')^2] \right\} B^2 + \left(\frac{A_3(y')ctg \alpha}{f} \right) B + A_4 = 0, \quad (8)$$

где коэффициенты A_1, A_2 и A_3 уже вычислены в (4). Решая второе - квадратное относительно B - уравнение (8), берем знак плюс перед корнем (поскольку $x^2 + y^2 \geq 0$) и подставляем найденное значение B в (7), после чего получаем, наконец, уравнение изохром одноосного кристалла. В него входят только параметры оптической системы и данные о кристалле - фокусное расстояние проекционной линзы, длина волны излучения λ , толщина кристалла h , угол ψ между нормалью и оптической осью, главные показатели преломления N_o и N_e , порядок максимума m , а также координаты точек изохром на плоскости наблюдения.

После преобразований уравнение (7) приобретает вид (в целях очевидного удобства записи штрихи у координат x' и y' теперь опущены):

$$(N_o^2 - N_e^2) \left[\frac{y \sin \psi}{\frac{m\lambda\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}}{h} + \sqrt{N_o^2(x^2 + y^2 + f^2) - x^2 - y^2}} + \cos \psi \right]^2 =$$

$$= N_o^2 \left[\frac{x^2 + y^2 - N_e^2(x^2 + y^2 + f^2)}{\left(\frac{m\lambda\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}}{h} + \sqrt{N_o^2(x^2 + y^2 + f^2) - x^2 - y^2} \right)^2} + 1 \right] \quad (9)$$

Полученное без каких-либо приближений и упрощений, уравнение (9) дает исчерпывающие ответы на все вопросы, связанные с формой и расположением изохром в коноскопических картинах одноосных кристаллов, и в такой записи наиболее эффективно при компьютерных исследованиях влияния оптических аномалий, неоднородностей и физических воздействий на искажения индикатрисы кристалла.

Для окончательного решения важного теоретического вопроса о порядке плоских кривых - изохром одноосных кристаллов при произвольных значениях угла ψ между оптической осью и нормалью уравнения (9) преобразованного в работе путем избавления от корней, раскрытия скобок, приведения подобных членов и их лексикографического расположения. В результате в левой части имеем многочлен восьмой степени от двух букв:

$$B_1x^8 + B_2x^6y^2 + B_3x^6 + B_4x^4y^4 + B_5x^4y^2 + B_6x^4 + B_7x^2y^6 + B_8x^2y^4 +$$

$$B_9 x^2 y^2 + B_{10} x^2 + B_{11} y^8 + B_{12} y^6 + B_{13} y^4 + B_{14} y^2 + B_{15} = 0 \quad (10)$$

где B_i – коэффициенты, в которые входят величины, характеризующие свойства и размеры кристалла, длина волны излучения, параметры оптической системы и порядок изохром. Они представляют собой чрезмерно громоздкие выражения, в силу чего ниже представлен только один – самый компактный коэффициент B_1 :

$$B_1 = \left((4(N_o^2 - (N_o^2 - N_e^2) \cos^2 \psi)^2 m^2 \lambda^2 (N_o^2 - 1) h^2 + (h^2 N_e^2 N_o^2 - (N_o^2 - (N_o^2 - N_e^2) \cos^2 \psi) \cdot (m^2 \lambda^2 + (N_o^2 - 1) h^2) - h^2 N_o^2))^2 - 4(h^2 N_e^2 N_o^2 - (N_o^2 - (N_o^2 - N_e^2) \cos^2 \psi)(m^2 h^2 + (N_o^2 - 1) h^2) - h^2 N_o^2)^2 \cdot (2N_o^2 - (2(N_o^2 - N_e^2)) \cos^2 \psi)^2 m^2 \lambda^2 h^2 (N_o^2 - 1) \right) \quad (11)$$

Для практических целей значительно удобнее пользоваться уравнением (9), а (10) имеет теоретическое значение.

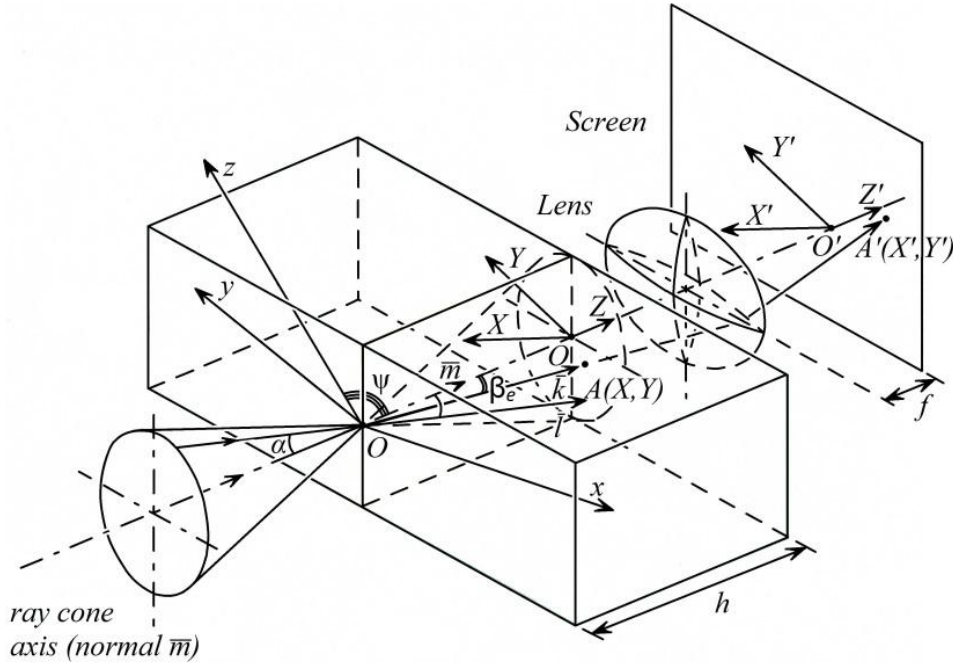


Рисунок 3 – Схема, поясняющая взаимное расположение одноосного кристалла, его кристаллофизической системы координат xuz и системы $X'O'Y'$ в плоскости экрана, на котором с помощью применяемой системы, имеющей фокусное расстояние f , рассматривается коноскопическая картина

Далее во второй главе представлен анализ уравнения изохром одноосного кристалла. Оно является уравнением восьмой степени по обоим переменным x и y , причем x и y входят в него только в четвертых степенях. Обозначив левую часть (10) $F(x, y)$, находим непосредственной проверкой, что $F(x, y) = F(-x, y)$, откуда следует, что изохромы – в общем случае – кривые восьмого порядка – всегда симметричны относительно оси Y - проекции оптической оси на плоскость наблюдения.

Коэффициенты B_i при парах слагаемых в виде произведений $x^n y^k$ и $x^k y^n$ в общем случае различны, поэтому не выполняется в общем

случаев необходимое и достаточное условие $F(x, y) = F(-x, -y)$ для того, чтобы изохромы являлись центросимметричными кривыми с центром инверсии в начале координат $(0,0)$ – точке пересечения нормали к кристаллу с плоскостью наблюдения.

Для важного случая, при котором нормаль к кристаллу совпадает с его оптической осью ($\psi = 0$) в качестве изохром имеем кривые второго порядка – окружности, радиусы которых вычисляется по следующей формуле

$$R_m = \{[(4h^2 m \lambda N_o^2 N_e^2 - m^3 \lambda^3 N_e^2 - h^2 m \lambda N_o^2 - h^2 m \lambda N_e^2 + \\ + 2\sqrt{h^4 N_o^2 (h^2 N_o^4 - 2h^2 N_o^2 N_e^2 + h^2 N_e^4 + m^2 \lambda^2 N_e^2)}) m \lambda] / \\ m^4 \lambda^4 N_e^4 - 4h^2 m^2 \lambda^2 N_o^2 N_e^4 + 2h^2 m^2 \lambda^2 N_o^2 N_e^2 + 2h^2 m^2 \lambda^2 N_e^4 + h^4 N_o^2 - \\ - 2h^4 N_o^2 N_e^2 + h^4 N_e^4\}^{\frac{1}{2}}. \quad (12)$$

На рисунке 4 представлены изохромы нескольких последовательных порядков ($m = 0, 1 \dots$) некоторого кристалла, построенные согласно (12).

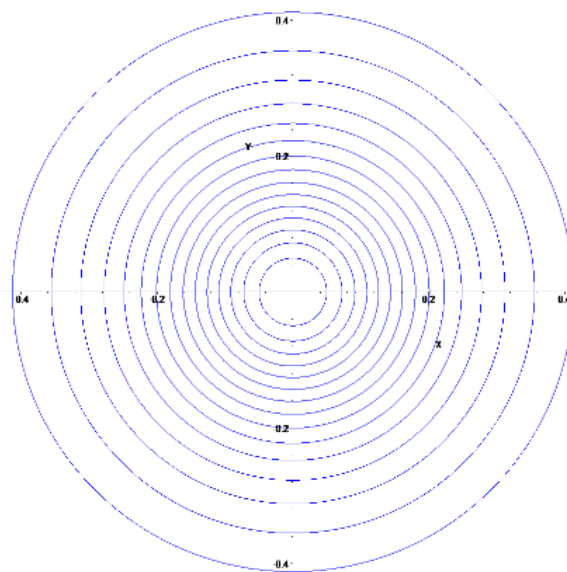


Рисунок 4 – Изохромы полученные из уравнения (9) и имеющие радиусы R_m , рассчитанные по формуле (12)

Для другого практически важного случая, когда оптическая ось ортогональна нормали к кристаллу ($\psi = 90$) изохромами являются не кривые второго порядка – гиперболы, а напоминающие их по форме кривые четвертого порядка. Они имеют ось симметрии 4, совпадающую с нормалью, и центр инверсии 1 (С). На рисунке 5 представлены изохромы нескольких порядков в коноскопической картине кристалла парателлурита, вырезанного в плоскости оптической оси ($\psi = 90$), построенные путем компьютерного расчета согласно уравнению (9).

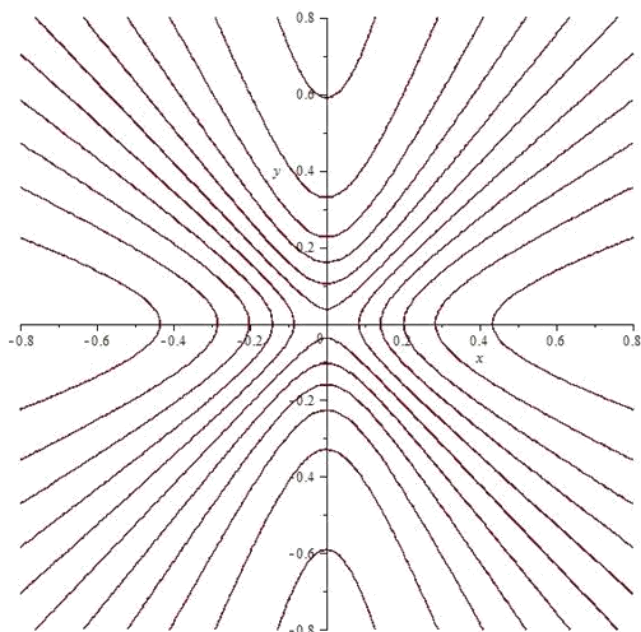


Рисунок 5. Изохром нескольких порядков в коноскопической картине, построенные в результате компьютерного решения уравнения изохром одноосного кристалла для пластины толщиной 2 см из парателлурита, вырезанной в плоскости оптической оси $\psi = 90^\circ$ и освещаемой гомоцентрическим пучком монохроматического излучения с длиной волны $\lambda = 5,461 \cdot 10^{-7} \text{ м}$, проецируемым после прохождения кристалла на экране оптической системой с фокусным расстоянием $f = 20 \text{ см}$

В качестве примера, на рисунке 6 представлены теоретические положения и формы изохром в коноскопической картине кристалла парателлурита, нормаль к поверхности которого составляет угол ($\psi = 15^\circ$) с оптической осью. Во второй главе диссертации приведены аналитические картины для других значений углов ψ промежуточных между 0° и 90°

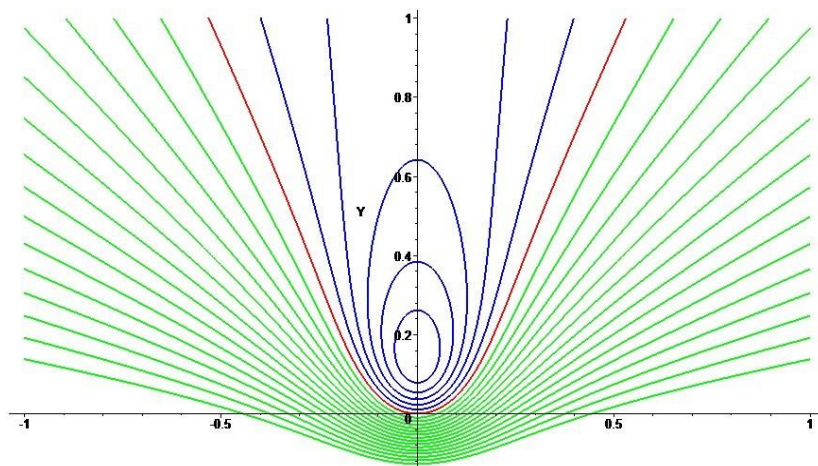


Рисунок 6 – Теоретическая картина изохром в коноскопической картине кристалла парателлурита для угла между нормалью к поверхностям и оптической осью $\psi = 15^\circ$

В конце второй главы проанализированы изменения общего вида семейства изохром при увеличении угла между нормалью и оптической осью кристалла.

В третьей главе проведена экспериментальная проверка корректности полученного уравнения изохром одноосных кристаллов. С этой целью были изготовлены элементы из одноосных монокристаллов

парателлурита и ниобата лития. При этом в качестве ориентаций для взаимно-параллельных граней элементов были выбраны, помимо классических плоскостей, ортогональных ($\psi = 0^\circ$) и параллельных ($\psi = 90^\circ$) оптической оси, и ориентации, коноскопические картины для которых ранее детально не изучались. Изохромы, зафиксированные в экспериментах, сравнивались с теоретически рассчитанными согласно уравнению (9). Оптический элемент с редкими ориентациями оптической оси относительно нормалей к двум парам граней, специально изготовленный из кристалла парателлурита для сравнения экспериментальной и теоретической коноскопических картин, представлен на рисунке 7.

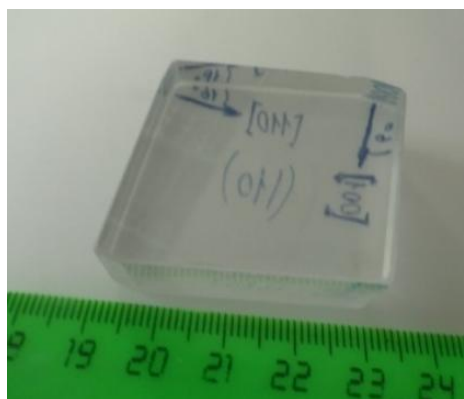


Рисунок 7 – Экспериментальный образец одноосного монокристалла парателлурита с гранями, нормали к которым составляют с оптической осью углы ($\psi = 16^\circ$) и ($\psi = 84^\circ$)

Теоретические и экспериментальные коноскопические картины кристалла парателлурита с гранями, нормали к которым составляют 16° (а) и 84° (б), представлены на рисунке 8. Экспериментальные картины получены с помощью пучков расходящегося лазерного света видимого диапазона с длинами волн 533 нм и 488 нм.

Совпадение теоретических и экспериментальных коноскопических картин для всех исследованных кристаллооптических ориентаций граней экспериментальных образцов полностью подтвердило корректность точного уравнения изохром одноосных кристаллов.

Далее оно использовано при расчетах параметров, характеризующих оптические аномалии, которые были исследованы в работе в кристаллах ниобата лития и парателлурита методом лазерной коноскопии. К числу обнаруженных аномалий относятся свили (рисунок 9), мелкие локальные вариации показателей преломления (рисунок 10) и аномальная двуосность (рисунок 11).

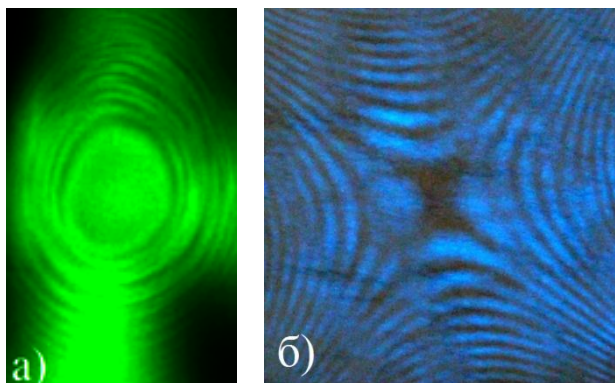


Рисунок 8 – Теоретические (верхний ряд) и экспериментальные (нижний ряд) картины изохром в лазерных коноскопических картинах крупногабаритного элемента из монокристалла парателлуриита для пар граней с углами между нормалью и осью 16° (а) и 84° (б)

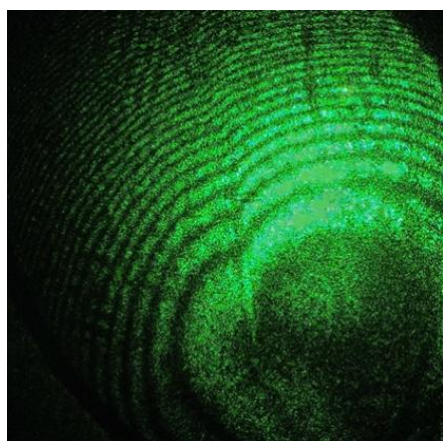
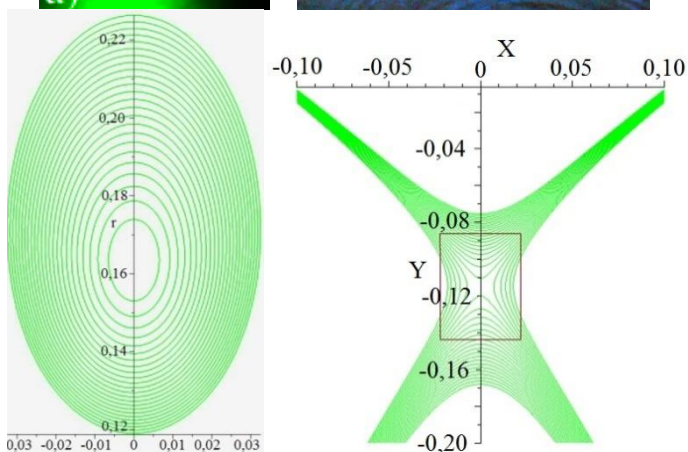


Рисунок 9 – Серия изломов на соседних изохромах вдоль оптической аномалии – свили в коноскопической картине монокристалла парателлуриита, полученной с помощью лазера с длиной волны излучения 533 нм на полупрозрачном экране в направлении оптической оси $\psi = 0^{\circ}$

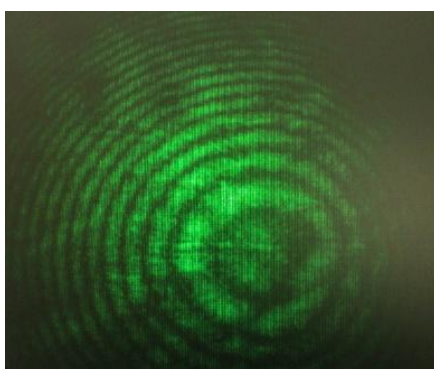


Рисунок 10 – Отдельные мелкие ОА мезоуровня, выявленные методом лазерной коноскопии в монокристалле парателлуриита



Рисунок 11 – Коноскопическая картина anomalously двуосного монокристалла ниобата лития, полученная с помощью лазерного излучения на полупрозрачном экране. Угол аномальной двуосности $2V = 50'$

Показаны способы расчета механических напряжений, приводящих, вследствие пьезооптического эффекта, к искажениям оптической индикатрисы кристаллов.

В главе также проанализированы следствия технического характера, вытекающие из уравнения изохром. Сделаны выводы относительно оптимальных параметров оптической схемы в методе лазерной коноскопии – длине волны излучения, угловой апертуре, фокусного расстояния проекционной системы. Даны теоретические обоснования для возможности отказа в методе лазерной коноскопии от использования проекционной системы, установленной после кристалла (рисунок 12)

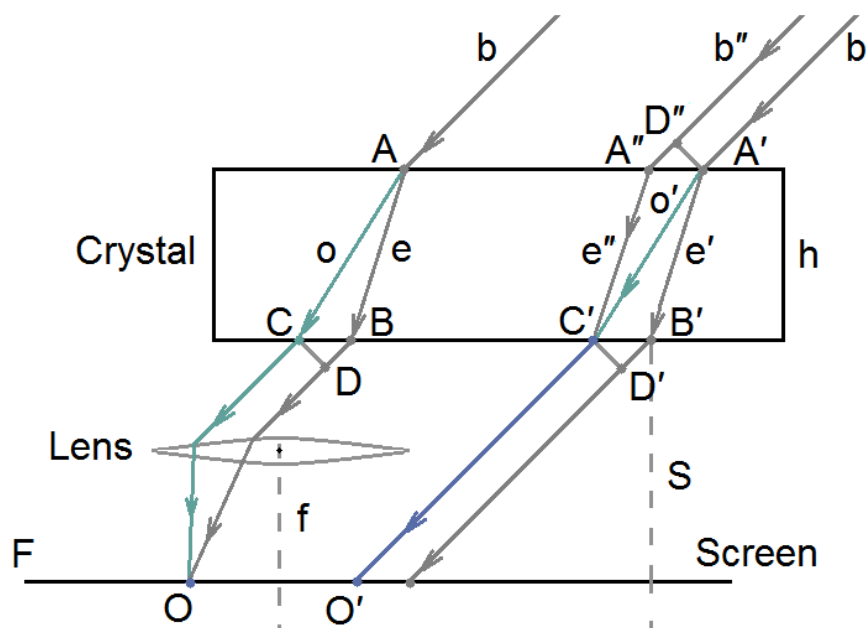


Рисунок 12 – Пояснение равенства разности хода между обыкновенными и необыкновенными лучами при получении коноскопической картины с применением проекционной линзы (слева) и без неё (справа)

На основе анализа возможностей, даваемых методом лазерной коноскопии, дополненным математическим аппаратом, базирующимся на точном уравнении изохром, сделан вывод о перспективности его использования в метрологии оптической однородности не только небольших оптических элементов, но и массивных буль одноосных кристаллов.

Метод лазерной коноскопии пригоден для обнаружения клиновидности у плоскопараллельных поверхностей оптических элементов и расчета угла клина. Еще более важной для научных и практических целей является возможность использования метода при наблюдениях в режиме реального времени изменений оптической индикатрисы кристалла, подвергаемого различным физическим воздействиям, например, прохождению сверхмощных импульсов

фемтосекундных лазеров или мощных потоков ультразвука. На рисунке 13 представлены сравнительные коноскопические картины светозвукопровода из кристалла парателлуриата, входящего в состав работающей АОДЛ (акустооптической дисперсионной линии задержки), при различных мощностях ультразвука.

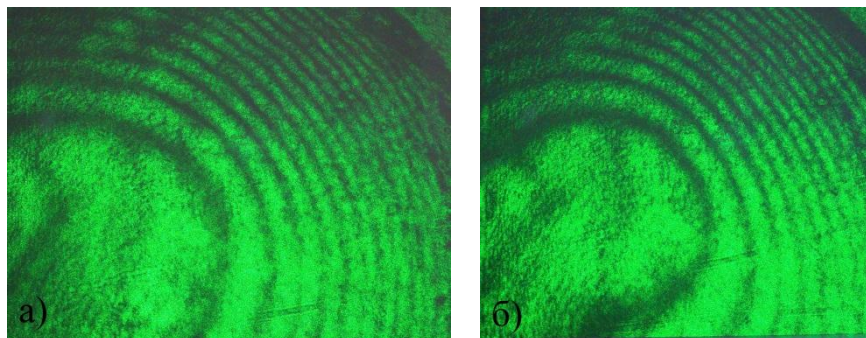


Рисунок 13 – сравнительные коноскопические картины, полученные при съемах СЗП из кристалла парателлуриата во время работы АОДЛ при различных ультразвуковых мощностях на оси лазерного фемтосекундного пучка с помощью лазера с длиной волны излучения 533нм: а) мощность ультразвука $P=1$ Вт, частота ультразвука $f = 56$ МГц, б) мощность ультразвука $P=3$ Вт, частота ультразвука $f = 72$ МГц

В заключительной части третьей главы представлен обзор возможных применений метода лазерной коноскопии при тестировании оптического качества монокристаллов, предназначенных для современных устройств фотоники, оптоэлектроники и акустооптики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении диссертационной работы проведены теоретические исследования, включающие анализ современного математического аппарата, предназначенного для описания вида изохром в коноскопических картинах одноосных кристаллов. Сделанный при этом вывод о необходимости уточнения известных соотношений, полученных с использованием существенных приближений и не вполне корректно описывающих истинную форму изохром, позволил сформулировать способ отыскания соответствующего точного уравнения.

Введенное без приближений уравнение изохром одноосных кристаллов является уравнением не второй, а восьмой степени. Изохромы являются только в двух частных случаях взаимной ориентации нормали к поверхностям и оптической оси кривыми второго и четвертого порядков, а в общем случае – кривыми восьмого порядка, имеющими сложную форму и ранее не наблюдававшимися экспериментально. Записанное в удобном для численного решения виде, уравнение позволяет не только рассчитывать и представлять графически картину изохром, но и путем

компьютерного сравнения ее с картиной, зафиксированной экспериментально, быстро обнаруживать и классифицировать оптические аномалии, а также получать данные о вариациях показателей преломления и механических напряжениях в кристалле.

Проведенные в работе экспериментальные коноскопические исследования одноосных кристаллов парателлурита и ниобата лития полностью подтвердили корректность выведенного уравнения изохром. Испытанный в диссертационных исследованиях и обоснованный теоретически метод лазерной коноскопии показал свою перспективность для внедрения, помимо научных исследований, в метрологию и диагностику однородности одноосных кристаллов – как массивных буль, так и больших партий оптических элементов.

В результате исследований, проведенных в диссертационной работе, сделаны следующие выводы:

1. Впервые выведено уравнение изохром в коноскопических картинах (являющееся уравнением восьмой степени) одноосных кристаллов без ранее применявшихся приближений и упрощений.
2. В плоскости наблюдения, ортогональной оси конуса лучей, изохромы являются кривыми второго порядка – окружностями, когда оптическая ось и нормаль к поверхности кристалла совпадают. Изохромы являются кривыми четвертого порядка, напоминающими гиперболы, когда оптическая ось и нормали перпендикулярны. При любых других взаимных ориентациях оптической оси и нормали изохромы – это кривые восьмого порядка.
3. Коноскопическая картина одноосного кристалла имеет ось симметрии бесконечного порядка только в случае совпадения нормали с оптической осью кристалла. Коноскопическая картина имеет ось симметрии четвертого порядка в случае взаимной ортогональности нормали и оси. Во всех остальных случаях взаимной ориентации нормали и оптической оси кристалла коноскопическая картина имеет только плоскость симметрии, след которой на плоскости наблюдения совпадает с проекцией на нее оптической оси.
4. Выведенное уравнение позволяет, после подстановки необходимых данных о размерах, показателях преломления, ориентации оптической оси кристалла, а также о параметрах оптической схемы, получать с помощью компьютерного расчета координаты и графическое теоретическое изображение изохром для любых порядков интерференционных максимумов и минимумов в коноскопической картине кристалла.
5. Экспериментальная проверка уравнения с помощью испытанного в работе метода лазерной коноскопии на монокристаллах различных веществ полностью подтверждает совпадение рассчитанных теоретически и реальных коноскопических картин одноосных кристаллов, в том числе,

для ранее не изученных вариантов взаимной ориентации нормали и оптической оси.

6. Метод лазерной коноскопии позволяет путем сравнения формы и расположения изохром в теоретических и экспериментальных коноскопических картинах обнаруживать в кристаллах и классифицировать оптические аномалии макроуровня и мезоуровня – вариации показателей преломления, клиновидность образцов, а также получать численные характеристики оптических неоднородностей и по их значениям рассчитывать механические напряжения в кристалле, приводящие к неоднородностям.

7. Метод лазерной коноскопии пригоден для экспресс-контроля оптической однородности кристаллов как в виде массивных буль, так и в виде изготовленных из них элементов. При этом чувствительность метода к относительным вариациям показателей преломления, составляющая $\sim 10^{-5}$, не уступает чувствительности других – более дорогостоящих, сложных, громоздких методов, применяющихся в настоящее время.

8. Метод лазерной коноскопии позволяет проводить непосредственные наблюдения и изучение влияния различных физических воздействий – импульсов лазеров, пучков ультразвука, температуры – на оптические параметры кристаллов во время работы оптоэлектронных и лазерных устройств, в состав которых входят кристаллы.

Основные публикации по теме диссертации:

В журналах из списка ВАК:

1. **Воронцова Е.Ю.**, Гречишкин Р.М., Каплунов И.А., Колесников А.И., Молчанов В.Я., Талызин И.В., Третьяков С.А. Проявление гиротропии при рассеянии света в кристаллах парателлурита // Оптика и спектроскопия. – 2008. – Т.104, №6. – С.976-979.
2. Колесников А.И., Шелопаев А.В., Каплунов И.А., Талызин И.В., **Воронцова Е.Ю.** Ослабление света монокристаллами парателлурита // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2009. – №4. – С.27-30.
3. Kolesnikov A.I., Kaplunov I.A., Ivanova A.I., Tretiakov S.A., Talyzin I.V., Makyshkin Yu.A., Grechishkin R.M., **Vorontsova E.Yu.** Isochrome shapes in the conoscopic patterns of uniaxial crystals // Ferroelectrics. – 2012. – V.441, №1. – P.75-83.
4. Колесников А.И., Малышкина О.В., Каплунов И.А., Иванова А.И., Третьяков С.А., Гречишкин Р.М., **Воронцова Е.Ю.** Определение дислокационной структуры в монокристаллах парателлурита методом фотоупругости // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. – 2014. – №1. – С.81-89.

5. Kolesnikov A.I., Kaplunov I.A., Talyzin I.V., Tretiakov S.A., Gritsunova O.N., **Vorontsova E.Yu.** Factures of light attenuation in crystals under violation of the Bouger Low // Crystallography Reports. – 2008. – V.53, №7. – P.1144-1149.
6. Kolesnikov A.I., Grechishkin R.M., Tretiakov S.A., Ivanova A.I., Kaplunova E.I., **Vorontsova E.Yu.**, Molchanov V.Ya. Laser conoscopy of large –sized optical crystals // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2013. – V.49. – P.012037.

Другие рецензируемые издания:

1. Чижиков С.И., Ильяшенко С.Е., Третьяков С.А., Архипова М.А., Молчанов В.Я., **Воронцова Е.Ю.**, Спиридонов А.Р., Каплунов И.А., Колесников А.И., Залетов А.Б. Измерение константы Верде кристаллов парателлуриата для ультрафиолетового света с длиной волны 355нм // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Физика. – 2009. – №7. – С.19-22.
2. Архипова М.А., Молчанов В.Я., **Воронцова Е.Ю.**, Лопатин А.А., Колесников А.И., Талызин И.В., Залетов А.Б. Изохромы в одноосных кристаллах в виде кривых порядка выше второго // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Физика. – 2009. – №7. – С.23-26.
3. **Воронцова Е.Ю.**, Каплунов И.А., Колесников А.И., Талызин И.В., Третьяков С.А., Чигиринский С.А. Наблюдение вращения плоскости поляризации лазерного света, рассеянного монокристаллами парателлуриата // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Физика. – 2007. – №3. – С.65-71.
4. **Воронцова Е.Ю.**, Колесников А.И., Мамкина Н.О., Молчанов В.Я., Талызин И.В., Третьяков С.А., Чигиринский С.А., Шелопаев А.В. Анализ распределения интенсивности в коноскопических картинах одноосных кристаллов // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Физика. – 2007. – №3. – С.80-86.

Технический редактор А.В. Жильцов
Подписано в печать 21.08.2018. Формат 60 × 84 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ №387.
Тверской государственный университет
Редакционно-издательское управление
Адрес: Россия, 170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33.
Тел. РИУ: (4822) 35-60-63.