

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Воронцовой Елены Юрьевны

«Форма изохром в коноскопических картинах одноосных кристаллов при произвольной взаимной ориентации нормали к поверхности и оптической оси»,
представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Актуальность темы.

Быстрое развитие оптики, оптоэлектроники и лазерной техники, наблюдающееся в последние десятилетия, сопровождается повышением требований к структурному совершенству и оптической однородности применяемых в устройствах материалов. Среди них существенную долю составляют искусственно выращиваемые монокристаллы – изотропные, одноосные и двуосные. При этом многие одноосные кристаллы, например, парателлурит, ниобат лития, кварц, молибдат свинца, не только обладают ценными оптическими свойствами, но для ряда современных оптоэлектронных устройств фактически не имеют альтернативы. Различные важнейшие параметры таких устройств – разрешающая способность, соотношение сигнал-шум, коэффициент нелинейных искажений, спектральное разрешение, быстродействие, лазерная прочность, угловая апертура и т. д. – в настоящее время приближаются к своим теоретическим значениям, и их улучшение может быть достигнуто только за счет дальнейшего повышения оптического качества выращиваемых и используемых кристаллов. В связи с этим требуются как можно более чувствительные неразрушающие метрологические методы, обеспечивающие выявление, установление локализации и измерение малейших оптических аномалий в одноосных кристаллах. При этом желательно тестирование как можно больших объемов массивных кристаллов, что дает возможности отбора наилучшего материала и наиболее экономного его разрезания на элементы. Для достижения указанных целей мог бы использоваться метод коноскопии, являющийся интерференционным и не уступающим по чувствительности хорошо разработанному методу наблюдения кристалла в параллельных лучах. Однако, как показано в диссертации, до настоящего времени не разработан математический аппарат, корректно описывающий форму изохром в коноскопических картинах одноосных кристаллов, в особенности, для случаев, когда ось кристалла и нормаль к его поверхности не совпадают и не ортогональны. Поскольку изохромы являются наиболее информативной и чувствительной к оптическим неоднородностям частью коноскопических картин, актуальность темы работы Воронцовой Е. Ю. не вызывает сомнений.

Методы и объекты исследований.

В теоретической части диссертации использованы алгебраические методы решения (без ранее применявшихся упрощений) основного уравнения кристаллооптики – уравнения Френеля – для случая одноосного кристалла, которое связывается в рамках специально разработанной оптической схемы с направляющими косинусами нормали к кристаллу, его оптической оси и волновых векторов падающей, обыкновенной и необыкновенной волн. Используемые методы преобразования систем координат с помощью поворотов позволяют определять направление вектора необыкновенной волны в кристалле, рассчитывать разность хода обыкновенной и необыкновенной волн и получать координаты линий равной разности их хода на плоскости наблюдения, ортогональной оси начального пучка и находящейся на известном фокусном расстоянии от линзы проекционной системы. Полученное уравнение восьмой степени, записанное в оптимальном для компьютерных расчетов виде, при подстановке данных – толщины кристалла, длины волны излучения, фокусного расстояния проекционной системы, главных показателей преломления и угла между нормалью и оптической осью, позволяет вычислять и графически воспроизводить изохромы любых порядков в коноскопических картинах одноосных кристаллов. В диссертации математически, в том числе, с привлечением понятий симметрии, проанализированы наиболее важные с практической стороны частные случаи взаимного расположения оптической оси и нормали к кристаллу.

В экспериментальной части диссертации объектами исследований являлись плоскопараллельные отполированные элементы с различными ориентациями противоположных граней, вырезанные из одноосных кристаллов парателлурита, ниобата лития и ниобата бария – стронция. Их коноскопические картины были получены как классическим методом – с помощью поляризационных микроскопов, так и с применением нового метода, при котором в качестве источников излучения являются лазеры видимого диапазона, а изображения изохром фиксируются на полупрозрачном экране цифровой камерой, расположенной соосно исходному коническому пучку. При сравнении теоретических и экспериментальных картин использованы компьютерные методы обработки изображений. Для анализа оптических искажений в кристаллах парателлурита, возникающих при выделении тепла в работающих акустооптических дисперсионных линиях задержки, использована фемтосекундная лазерная система.

Содержание работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 149 страницах основного текста, содержит 66 рисунков, 2 таблицы и 94 наименования цитируемой литературы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, решаемые в работе. Обоснованы научная новизна и практическая значимость результатов, полученных в работе. Представлены научные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации работы, о публикациях по теме диссертации и о личном вкладе автора в полученные результаты.

В первой главе подробно рассмотрены физические основы метода коноскопии, его история, традиционные и современные его приложения в науке и технике. Представлена мировая динамика публикаций, связанных с коноскопией. Проанализированы способы и результаты вывода известных уравнений, описывающих изохромы одноосных кристаллов. Показано, что вследствие использованных при их выводе физических приближений и математических упрощений, известные соотношения для всех случаев, кроме совпадения оси и нормали к кристаллу или их ортогональности, не только количественно, но и на качественном уровне, т. е. даже при визуальном рассмотрении коноскопических картин, дают не вполне корректные результаты. Полученные в главе выводы подтверждают необходимость усовершенствования математического аппарата, описывающего форму изохром одноосных кристаллов.

Во второй главе представлена процедура получения этого уравнения без ранее применявшихся приближений. Сначала выводится уравнение для кривой, описываемой волновым вектором необыкновенной волны на выходной поверхности кристалла. Это уравнение на втором этапе, после расчета разностей хода обыкновенной и необыкновенной волн и введения системы координат на плоскости наблюдения, используется далее для получения итогового уравнения изохром одноосных кристаллов. В представленном далее анализе выведенного уравнения, записываемого и в классическом виде – как многочлена от двух неизвестных, равного нулю, и в виде, удобном при его компьютерном численном решении, показано, что в общем случае – при произвольной взаимной ориентации оптической оси и нормали к поверхности – изохромы одноосных кристаллов – это плоские кривые восьмого порядка, имеющие достаточно сложную геометрическую форму. В случае ортогональности оптической оси и нормали это кривые четвертого порядка, только внешне напоминающие классические гиперболы. И только при совпадении направлений оси и нормали мы имеем согласие полученного и известного ранее результатов – изохромы представляют собой семейство концентрических окружностей с центром в месте выхода оптической оси. Представлена формула для радиусов изохром в зависимости от их порядков, имеющая для метода коноскопии значение, аналогичное формуле для интерференционных колец Ньютона как линий равной толщины. В конце главы разобраны вопросы относительно изменения вида семейств изохром при изменениях параметров кристалла и оптической системы, а также о замкнутости этих кривых.

В третьей главе осуществлена прямая экспериментальная проверка правильности полученного уравнения изохром одноосных кристаллов.

Специально изготовленные из парателлурита и ниобата лития крупногабаритные оптические элементы, вырезанные как в классических направлениях, так и имевшие ранее не применявшиеся кристаллографические ориентации, изучались методом коноскопии с использованием лазеров видимого диапазона, а также по традиционной схеме – с помощью поляризационных микроскопов. Получено подтверждение теоретически рассчитанных согласно выведенному уравнению и зафиксированных экспериментально форм изохром. С помощью метода лазерной коноскопии, дополненного разработанным в диссертации математическим аппаратом, в кристаллах парателлурита и ниобата лития выявлены, классифицированы и исследованы оптические аномалии различных пространственных масштабов – свили, вариации показателей преломления, аномальную двуосность. Рассчитаны остаточные послеростовые механические напряжения, приводящие вследствие эффекта фотоупругости к обнаруженным оптическим неоднородностям. Проанализированы следствия технического характера, вытекающие из уравнения изохром и позволяющие оптимизировать условия наблюдения коноскопических картин. Представлен обзор возможных новых приложений метода коноскопии, обусловленных появлением способа сравнения теоретических и экспериментальных картин изохром. В качестве удачных примеров таких приложений приведены результаты наблюдений температурной инверсии оптического знака кристаллов SBN, а также изученные методом лазерной коноскопии в режиме реального времени изменения формы изохром кристаллов парателлурита, входящих в состав включенных устройств – акустооптических дефлекторов и акустооптических дисперсионных линий задержки, предназначенных для сжатия и корреляции импульсов фемтосекундных лазеров. Показано, что обусловленные поглощением ультразвука выделение тепла и нагревание кристалла всего лишь на несколько градусов приводят к хорошо наблюдаемым искажениям коноскопической картины, что может использоваться для контроля режимов работы акустооптических устройств многих типов и, в частности, спектрометров астрофизического назначения.

В заключении представлены выводы, сделанные на основании результатов проведенных диссертационных исследований.

Новизна исследований и полученных результатов.

1. Впервые без ранее применявшихся приближений получено и проанализировано уравнение изохром в коноскопических картинах одноосных кристаллов для любых взаимных ориентаций оптической оси и нормали к поверхности.
2. Предсказанные теоретически изохромы в виде кривых порядков выше первого экспериментально обнаружены и зафиксированы в коноскопических картинах кристаллов парателлурита и ниобата лития.
3. Впервые метод лазерной коноскопии, дополненный разработанным математическим аппаратом, использован при обнаружении, классификации

и численных оценках оптических неоднородностей в одноосных кристаллах – вариаций показателей преломления, свилей, аномальной двуосности.

Практическая значимость полученных результатов.

Теоретические и экспериментальные результаты, полученные автором, имеют безусловную практическую значимость для метрологии оптической однородности одноосных монокристаллов, применяемых в оптоэлектронике и лазерной технике. Разработанные в ней методики могут использоваться как в научных учреждениях, в которых разрабатываются новые типы приборов, так и на предприятиях, на которых выращиваются кристаллы и изготавливаются элементы для современных оптических, акустооптических, электрооптических, магнитооптических и других оптоэлектронных устройств.

Общая оценка диссертационной работы.

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ, написана четким научным языком в хорошем литературном стиле, содержит весьма яркий и понятный иллюстративный материал, а также ссылки на большое число публикаций по теме работы. Однако следует отметить и некоторые недостатки, которых не лишена работа.

- В первой главе содержатся обширные материалы, подчеркивающие недостаточную разработанность некоторых аспектов современной кристаллооптики, в частности, обсуждается наблюдение никем ранее не предсказанного явления четырехлучеотражения света внутри одноосных кристаллов. Представляется, что данная часть текста могла быть существенно сокращена, поскольку напрямую слабо связана с темой диссертации.
- При рассмотрении истории получения известных соотношений, описывающих форму изохром одноосных кристаллов, уместно было бы сформулировать свое видение причин, по которым до сих пор в данной области не наблюдалось принципиального развития.
- В тексте обнаружено несколько неточностей или опечаток. Так, в диссертации на стр. 51, формула (1.43), а также и в автореферате на стр. 8, формула (1), в правой части одного и того же выражения для разности фаз между обыкновенной и необыкновенной волн, во-первых, не закрыта квадратная скобка и, во-вторых, в последнем слагаемом неправильно поставлена первая, а не вторая степень при неизвестном X .

Заключение.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Е. Ю. Воронцовой.

Список публикаций и научных конференций, на которых представлялись результаты, полученные автором, свидетельствует о высокой степени апробации работы. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Оценивая

работу в целом, можно утверждать, что она представляет собой законченное научное исследование, выполненное на высоком уровне. Полученные в ней новые результаты имеют очевидное теоретическое значение для кристаллооптики, существенно поднимая уровень применяемого в методе коноскопии математического аппарата. Большая практическая значимость результатов вытекает из появившихся возможностей сравнительного анализа теоретических и экспериментальных изображений изохром, позволяющего обнаруживать и численно оценивать оптическую однородность больших объемов одноосных монокристаллов

По объему решенных задач, актуальности темы исследования и практической значимости диссертационная работа полностью удовлетворяет требованиям ВАК, изложенным в положении № 842 от 24.09.2013 г. «О присуждении ученых степеней» и предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.07, а ее автор – Воронцова Елена Юрьевна заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

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

Лия Васильевна Жукова

620002 г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
тел. +7 (343) 375-47-13
l.v.zhukova@urfu.ru