

Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения Всероссийского научного центра «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»

На правах рукописи

УДК 535.345., 535.5., 535.012.2

ВЕТРОВ

Василий Николаевич

**ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИЯ ПЛАСТИЧЕСКИ
ДЕФОРМИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ.**

Специальность: **01.04.05**- Оптика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

***диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук***

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2012

Работа выполнена в ОАО «Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения Всероссийского научного центра «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»

Официальные оппоненты

*Доктор технических наук,
профессор*

Храмов В.Ю.

Доктор физико-математических наук

Фофанов Я.А.

Доктор физико-математических наук

Цветков А.Д.

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ)

Защита диссертации состоится 19 сентября 2012г. на заседании диссертационного совета Д 407 001 01 ФГУП НПК « ГОИ им. С.И. Вавилова» по адресу: 199034, СПб, В.О., Биржевая линия 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан « 8 » августа 2012г.

Ученый секретарь специализированного совета,
кандидат физико-математических наук

А. Г. Журенков

Общая характеристика работы.

Работа посвящена разработке научного направления: оптика и технология текстурированных кристаллических сред для ИК спектральной области. При неоднородной пластической деформации методом центрально-кольцевого изгиба, наряду с формоизменением кристалла, происходит геометрическая модификация оптических свойств лейкосапфира, т.е. изменяется пространственное расположение оптической индикатрисы кристалла. Текстурированный лейкосапфир позволяет решить принципиальную задачу для анизотропных сред: получение выпукло-вогнутых линз без двулучепреломления для параллельного и сходящегося пучков лучей. Для областей спектра 3,0-5,0 и 8,0-14,0 мкм разработана материалосберегающая технология деталей из кристаллов кремния и германия для получения полусферических оболочек, менисков и линз высокого оптического качества.

Актуальность темы.

Анализ научно-технической информации по оптоэлектронике за последние годы позволяет выявить основные тенденции развития кристаллических сред:

- разработка методов исследования и установление эксплуатационных возможностей уже применяемых, а также новых конструкционных материалов в части их устойчивости к дождевой и пылевой эрозии;
- поиск и разработка приемов изготовления новых оптических материалов (прежде всего, на основе тугоплавких окислов, нитридов и оксинитридов металлов) прозрачных в широкой области спектра (0,3 - 6,0 мкм), детали из которых могут работать в жестких аэродинамических условиях;
- поиск и разработка технологии деталей конструкционной оптики сложной конфигурации, обеспечивающих освоение ИК спектральной области до 14,0 мкм.

Настоящая работа посвящена разработке новых кристаллических материалов и технологии оптических деталей из них, рассматриваемых в рамках двух последних тенденций.

Цель и задача работы.

Цель настоящей работы – разработка основ технологии оптических материалов и элементов, полученных путем пластической деформации кристаллов, исследование и моделирование их свойств.

Задачами работы, связанными с достижением поставленной цели, явились:

- разработка нового технологического оборудования для исследования и проведения пластической деформации дисков при температурах до 2100 °С, разработка прессоснастки и оптимизация рабочей поверхности пресс-формы.
- исследование процессов неоднородной пластической деформации дисков кристаллов, установление общих закономерностей и оптимальных технологических параметров;
- разработка методов расчета геометрии деталей из пластически деформированных кристаллов и способов их получения, исследование их эксплуатационных характеристик;
- решение уравнений фотоупругости кристаллов для групп симметрии $m\bar{3}m$, 432 , $\bar{4}3m$ и оценки двойного лучепреломления в деталях из одноосных кристаллов с учетом направления оптической оси кристалла;
- исследование оптических и термомеханических свойств пластически деформированных кристаллов;
- реализация технологии оптических деталей из пластически деформированных кристаллов для задач отрасли.

Научная новизна.

Впервые выявлены динамические критерии неоднородной пластической деформации дисков лейкосапфира при центрально-кольцевом изгибе, позволяющие реализовать новые схемы исследования процесса и достичь больших степеней деформации, оптимизировать условия и разработать основы технологии оптических деталей разных типоразмеров из лейкосапфира. Для кристаллов кремния и германия определены технологические параметры деформации для получения полусферических деталей.

Экспериментально определен стадийный механизм неоднородной пластической деформации лейкосапфира: деформация изгиба с последующим добавлением деформации растяжения, обуславливающие формоизменение при центрально-кольцевом изгибе диска и образование текстуры: от разной степени деформированного кристалла до мозаичной структуры. Показано, что звезда скольжения при центрально-кольцевом изгибе обусловлена системой скольжения по призме, с учетом направления скольжения повторяется через 30° .

Обнаружено ранее не наблюдаемое явление разворота оптических осей кристалла в процессе неоднородной пластической деформации с сохранением трансляционной симметрии в направлении перпендикулярном к поверхности и образованием прямого конуса (в главном сечении веер) оптических осей с центром пересечения в фокусе, находящемся на оси симметрии детали.

В рамках волновой теории света рассмотрены изменения оптических свойств анизотропных оптических сред, обусловленные пространственной ориентацией оптической индикатрисы кристалла:

- составлены и решены уравнения определения и минимизации двойного лучепреломления в менисках и линзах из лейкосапфира и его текстурированного аналога;
- показано, что коэффициент отражения пластинки из одноосного монокристалла зависит от угла падения луча и угла рассогласования последнего с оптической осью кристалла;
- установлено, что степень поляризации прошедшей волны обуславливается отражением от выпуклой поверхности линз из текстурированного лейкосапфира, ее изменение по апертуре детали можно оценить по формуле, полученной в работе.

Предложен экспериментальный метод определения модуля упругости и коэффициента трения кристаллов при высоких температурах, а также модель расчета упругих характеристик лейкосапфира с учетом анизотропии свойств.

Впервые решено уравнение фотоупругости кристаллов для групп симметрии $m\bar{3}m$, 432 , $\bar{4}3m$, определены остаточные напряжения σ_{11} - σ_{22} и σ_{12} в полусферах из кремния.

Получены уникальные образцы из лейкосапфира в виде пластинок с переменным углом оптической оси кристалла к поверхности, не имеющие природного аналога, и оптические детали из текстурированных кристаллов.

Комплекс полученных результатов исследования является достаточным научно-техническим заделом для разработки промышленной технологии оптических деталей из кристаллов лейкосапфира, кремния, германия, решающей важную современную задачу отрасли.

Способы получения менисков, линз из лейкосапфира, кремния и германия, а также элементы прессоснастки защищены авторскими свидетельствами СССР и патентами РФ.

Практическая значимость работы и реализация результатов:

1. Разработан и изготовлен комплекс исследовательского и технологического оборудования для пластической деформации и рекристаллизационного прессования при температурах до 2100°C .

2. Разработаны способы получения менисков и линз из кристаллов для ИК области спектра с улучшенными эксплуатационными параметрами, а в части лейкосапфира - принцип минимизации двулучепреломления в оптических элементах:

- способ получения линз из лейкосапфира, кремния и германия (авторское свидетельство СССР №1773956, патенты на изобретение РФ №1773956, №2042518);
- способ получения линз с минимальным двулучепреломлением (патент на изобретение РФ № 2285757);
- способ получения асферической и полусферической линз из лейкосапфира для параллельного пучка лучей без двулучепреломления (патент на изобретение РФ № 2313809, № 2377614);

– способ получения линз для сходящегося пучка лучей (патент на изобретение РФ №2310216).

3. Получено решение уравнений фотоупругости кристаллов для групп симметрии $m\bar{3}m$, 432 , $\bar{4}3m$ и определения двойного лучепреломления по апертуре менисков и линз из лейкосапфира и его текстурированного аналога.

4. Предложены методы определения модуля упругости и коэффициента трения кристаллов в области высоких температур, разработана модель расчета упругих характеристик лейкосапфира.

5. Получены пластинки новой анизотропной среды с переменным углом оптической оси кристалла к поверхности, не имеющие природного аналога.

6. Получены и переданы Заказчику заготовки менисков и линз из пластически деформированного лейкосапфира, кремния и германия.

Исследования по теме диссертации выполнялись в рамках государственных программ. Результаты работы были использованы при проведении учебного процесса в СПб ГУ ИТМО.

В качестве основных защищаемых положений выносятся:

1. Метод неоднородной пластической деформации дисков лейкосапфира, кремния и германия позволяет получать текстурированные кристаллы высокого оптического качества; изменяя соотношение геометрических размеров фактора механического воздействия и образца можно изменять текстуру и приобретенные оптические свойства.

2. Для получения заготовки близкой к форме детали, методом центрально-кольцевого изгиба плоскость исходного диска кристалла необходимо ориентировать перпендикулярно оси симметрии высшего порядка, направляя усилие вдоль последней.

3. Механизм неоднородной пластической деформации состоит в следующем: основной вклад при формоизменении путем центрально-кольцевого изгиба диска лейкосапфира вносят плоскости скольжения X-типа, т.е. $[2\bar{1}\bar{1}0]$, системы скольжения реализуются по шести независимым симметрично-равным областям, образующим правильную шестиугольную звезду и 12 независимых участ-

ков, позволяющих получить пространственно ориентированную по радиусу текстуру фрагментов с неявно выраженными границами и малыми углами их взаимного разворота.

4. Сохраняется трансляционная симметрия только в слоях, перпендикулярных поверхности диска из Z-среза лейкосапфира, оптические оси кристалла остаются перпендикулярными поверхности заготовки и образуют конус оптических осей кристалла с фокусом в вершине.

5. Изменения оптических и термомеханических свойств лейкосапфира при неоднородной пластической деформации:

- получение конуса оптических осей кристалла при деформации обуславливает изменение двулучепреломления, коэффициента отражения и степени поляризации излучения;
- изменение профиля поверхности детали в соответствии с углом разворота оптических осей кристалла позволяет получать линзы без двулучепреломления для параллельного и сходящегося пучков лучей;
- пластинка с переменным углом оптической оси кристалла к поверхности является поляризатором с переменной степенью поляризации излучения и линзой для необыкновенных лучей.
- мениск подобен плоскопараллельной пластинке, вырезанной перпендикулярно оптической оси кристалла, имитирует механические свойства изотропного тела и зависимость модулей упругости и сдвига, а также коэффициентам Пуассона от температуры.

Апробация работы.

Материалы диссертации были доложены на : VIII Всесоюзной конференции по методам получения и анализа высокочистых веществ, 30 мая - 2 июня 1988г., г. Горький.; VIII межотраслевом научно-техническом совещании «Кристаллические оптические материалы», 1991 г.; международном симпозиуме «Прикладная оптика – 94», 15-18 ноября, 1994 г. г. СПб; International conference “Photo mechanics-95”, 11-14 September 1995, Novosibirsk; международном симпозиуме «Прикладная оптика –96», 18-22 сентября 1996 г., г. СПб; международной

конференции «Физпром-96», 22-26 сентября 1996 г., г.Н. Новгород; IX Национальной конференции по росту кристаллов «НКПК-2000», 2000 г., г. Москва; IV международной конференции “Single Crystal Growth and Heat & Mass Transfer” ICSC 2001, г. Обнинск; VI международной конференции « Прикладная оптика – 2004», г. СПб; VII международной конференции « Прикладная оптика –2006», г. СПб; VIII международной конференции « Прикладная оптика –2008», г. СПб; 11 международной конференции «Физика диэлектриков (Диэлектрики-2008)», 3-7 июня 2008г, г. СПб; XVIII Петербургских чтениях по проблемам прочности и роста кристаллов», 21-24 октября 2008г., г. СПб, IX международной конференции « Прикладная оптика –2010», г. СПб.

Публикации.

Материалы диссертации опубликованы в 18 статьях, 25 тезисах и сборниках трудов отечественных и международных конференций, в описании 13 авторских свидетельств СССР и патентов РФ. Подана заявка на изобретение (2011124675/28 от 16.06.2011г.) Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Письменный В.А., Дукельский К.В., плоская линза из лейкосапфира и способ ее получения.

Вклад автора.

Соискатель являлся ответственным исполнителем, а затем руководителем тем и договоров по материалам, представленным в диссертационной работе. Общее число опубликованных автором работ составляет 122 из них по теме диссертации 56. Результаты, представленные в диссертации, получены автором лично и совместно с коллегами, которым автор выражает благодарность за сотрудничество. Автором исследования осуществлен целостный подход к развитию научного направления. Им выбраны и сформулированы научные и технологические направления исследований, в выполнении которых он принимал непосредственное участие. Основная часть печатных публикаций, авторских свидетельств на изобретение и патентов РФ написана лично автором.

Структура и объем диссертационной работы.

Диссертация включает введение, литературный обзор (глава), 6 глав с результатами исследований, общие выводы, заключение, список литературы и

приложения. Диссертация изложена на 310 страницах, включая 94 рисунка, 37 таблиц, библиографию и приложения, где представлены акты о внедрении и использовании результатов исследований.

Содержание работы.

В введении обоснована актуальность выбранного направления исследования, сформулированы цели работы, обобщены научные результаты и положения, выносимые на защиту. Описана структура диссертационной работы и отражена научная и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава содержит обзор развития конструкционных оптических кристаллических материалов, позволяющий выявить актуальность и предпосылки разработки технологических приемов получения оптических деталей из лейкосапфира. Известные способы получения менисков из монокристаллов, выращивание из расплава и механическая обработка, не позволяют получить направленную структуру материала в конечной детали, выявленную, как неотъемлемый атрибут кристаллического материала с высокой стойкостью к дождевой и пылевой эрозии.

Рассмотрено преломление света на границе анизотропной среды, одноосного кристалла: двулучепреломление в пластинке или точке на поверхности детали сложной формы, обусловлено величиной естественного двулучепреломления кристалла и углом p между оптической осью кристалла и направлением распространения необыкновенного луча:

$$\Delta n = n_0 - n = n_0 \left(1 - \frac{n_e}{\sqrt{n_o^2 \cdot \sin^2 p + n_e^2 \cdot \cos^2 p}} \right) \quad 1$$

n_e, n_o – показатели преломления необыкновенного и обыкновенного лучей.

Во второй главе рассмотрено современное состояние проблемы: пластическая деформация кристаллов. Проведенный анализ процессов, изменяющих текстуру кристаллов под влиянием внешних воздействий, позволил выбрать базовый технологический процесс: пластическую деформацию при центрально-кольцевом изгибе. Для лейкосапфира при неоднородной пластической деформации необходимо учитывать кристаллографические особенности структуры

кристалла и «нанизанную» на них анизотропию свойств. С этой целью разработана методика расчета основных технических характеристик: модулей упругости (Юнга) E , сдвига G и коэффициентов Пуассона μ_1, μ_2 монокристаллов корунда на основе известных значений 6 констант упругости $S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{33}, S_{44}, S_{14}$ и данных об ориентации произвольных осей U_i относительно кристаллофизических осей X_j : $U_i = a_{ij}X_j$ (a_{ij} - направляющие косинусы). При повышении температуры анизотропия упругих характеристик лейкосапфира увеличивается. Поверхность мениска из монокристалла обладает анизотропией упругих характеристик, достигающей разницы значений $\sim 26\%$ для числа Пуассона μ_2 . В мениске, из деформированного лейкосапфира, анизотропия упругих характеристик не наблюдается, причем величины модулей E, G, μ_1, μ_2 соответствуют максимальным величинам.

Для исследования процесса высокотемпературной деформации разработали комплекс исследовательского и технологического оборудования, позволяющий изменять и управлять параметрами: температурой, усилием или давлением, скоростью деформирования и степенью деформации в широком диапазоне значений, а также осуществлять высокотемпературную пластическую деформацию дисков с последующим отжигом при температурах до 2100°C .

Исследование пластической деформации при постоянной скорости деформирования в интервале $0,05-0,5$ мм/мин показали, что в дополнение к изгибу на второй стадии процесса появляется растяжение, лимитирующее формоизменение. Для выявления механизмов на разных стадиях процесса и получения заданной стрелы прогиба исследование проводили по следующим схемам:

- модель упругой деформации при центрально-кольцевом изгибе: $\sigma = \sigma(\dot{h})_{i,T}$
- модель неоднородной пластической деформации с заданной скоростью деформирования: $\sigma = \sigma(\dot{h})_{i,T}$
- модель пластической деформации с двумя скоростями деформирования, соответствующими этапам изгиба и растяжения: $\sigma = \sigma(\dot{h}_1, \dot{h}_2)_{i_1, i_2, T}$

Возникающие при деформации изгибающие, сжимающие, радиальные и тангенциальные растягивающие напряжения определяли с учетом изменения площади пятна контакта и конфигурации элементов при формоизменении.

Оба процесса, изгиб и растяжение, протекают одновременно, внося разный вклад в пластическую деформацию на разных стадиях процесса, т.е. скорость деформирования должна изменяться непрерывно в течение процесса.

Исследование процесса деформации показали необходимость использования динамических критериев: Kh , учитывающего свойства образца и величину прикладываемого усилия $Kh = h \times \delta / P$, (h – стрела прогиба, δ – толщина образца, P – усилие деформирования) или более универсальный для центрально-кольцевого изгиба $K\alpha = \alpha \times \delta / P$, где α – угол между направлением движения пуансона и поверхностью образца выше пятна контакта. Задаваемое критерием Kh или $K\alpha$ (рис.1) соотношение между усилием деформирования и стрелой прогиба, позволяет обеспечить оптимальную скорость при деформации диска.

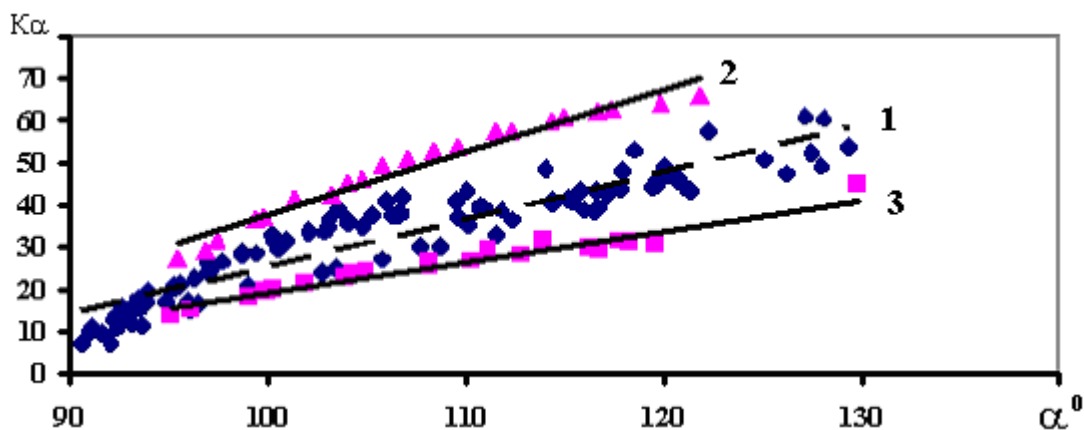


Рис.1. Значения критерия $K\alpha$ для проведения процесса неоднородной пластической деформации Z- дисков лейкосапфира (2,3 граничные значения).

Разработанный подход позволил реализовать исследования процесса неоднородной пластической деформации по следующим схемам:

- модель пластической деформации по критерию Kh : $\sigma = \sigma(\dot{h}, Kh)_T$
- модель пластической деформации по критерию $K\alpha$ с постоянной и переменной угловой скоростью: $\sigma = \sigma(\dot{\alpha}, K\alpha)_T$

Экспериментальные результаты, полученные при использовании критерия $K\alpha$, и функциональная зависимость фактор Шмида от угла α позволили

выявить особенности механизма неоднородной пластической деформации лейкосапфира, заключающиеся в суперпозиции различных систем скольжения на стадии изгиба и растяжения.

На рис.2 приведена фотография мениска лейкосапфира (\varnothing 72 мм, $h=19$ мм), полученная в поляризованном свете, на которой отчетливо видны линии скольжения и изохромы двулучепреломления, их форма зависит от направлений пластической деформации, кривизны мениска и внутренних остаточных напряжений. Рис. 2б дает представление о геометрической схеме плоскостей и направлений скольжения при пластическом формоизменении диска. Видно, что основной вклад в образование мениска вносят плоскости X, т.е. плоскости типа $[2 \bar{1} \bar{1}0]$. При пластической деформации действуют сразу все плоскости и направления системы скольжения, в результате чего плоскости скольжения образуют правильную шестиугольную звезду. Звезда системы скольжения позволяет реализовать скольжение по шести независимым симметрично-равным плоскостям. За счет образования входящих и выходящих углов звезды каждая плоскость скольжения системы делится пополам. В итоге получаем 12 независимых участков системы скольжения.

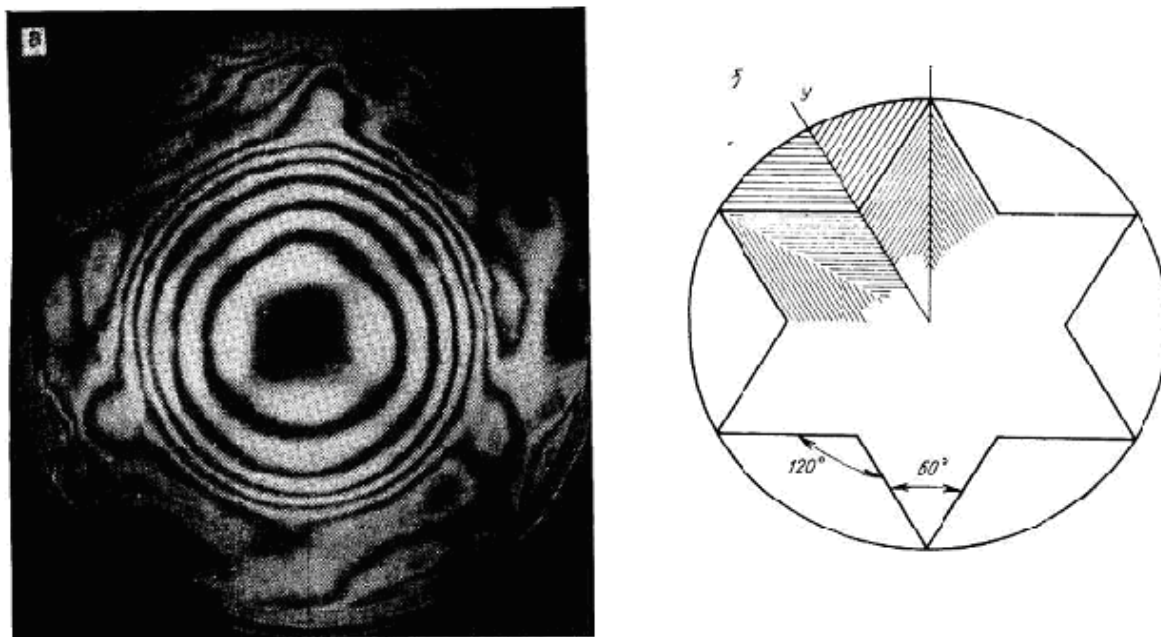


Рис. 2. Картина изохром и линий скольжения со стороны выпуклой поверхности деформированного мениска лейкосапфира (а) и схема плоскостей и направлений скольжения деформации (б).

Рентгеноструктурным анализом установлено, что биссектрисами входящих углов звезды являются направления Y (т.е. типа $[01 \bar{1}0]$), а биссектрисами выходящих углов направления X (т.е. типа $[2 \bar{1} \bar{1}0]$). Морфологически наличие звезды систем скольжения можно рассматривать, как начальную стадию общего процесса деградации решетки монокристалла и перехода материала от моно к поликристаллическому состоянию. По мере увеличения h первоначально действующие плоскости скольжения искривляются. При этом иногда вместо скольжения в краевых частях происходит образование переориентированных на углы $10..15^\circ$ областей, т. е. сбросов [1].

Пластически деформированный кристалл по оптическим свойствам занимает промежуточное, управляемое процессом пластической деформации, положение между моно и поликристаллическими структурными состояниями вещества, характеризуемое пространственно ориентированной по радиусу текстурой фрагментов с неявно выраженными границами и малыми углами их взаимного разворота соответствующей текстурированному кристаллу.

Изменение толщины диска и площади поверхности мениска при увеличении стрелы прогиба (рис. 3) показывает, что в начале процесс деформации слабо зависит от скорости деформирования: в материале преобладают напряжения описываемые тензором второго порядка.

При увеличении стрелы прогиба процесс лимитирован растяжением, обуславливающим скорость деформирования меньше чем на начальной стадии, что соответствует объемным напряжениям, описываемым тензором третьего порядка. Критерием стадийности пластической деформации при центрально – кольцевом изгибе как видно, являются напряжения, возникающие в материале, которые обеспечивают сочетание направлений и плоскостей скольжения для изменение текстуры материала.

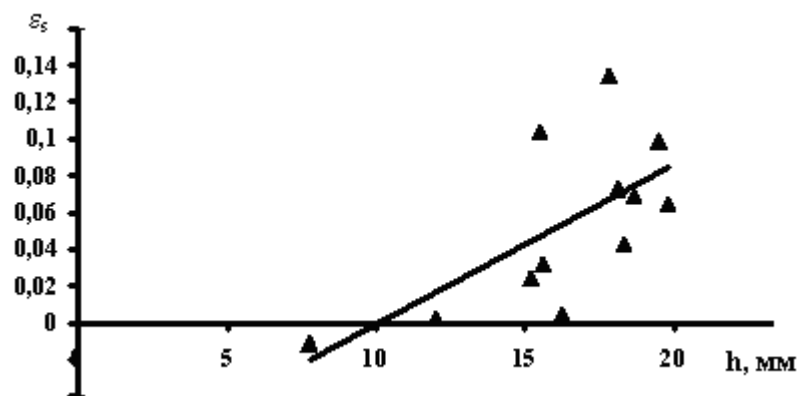


Рис.3. Зависимость относительного изменения внешней поверхности мениска ε_s от стрелы прогиба (диск $\varnothing 80$ мм).

Исследование процесса неоднородной пластической деформации и влияния технологических параметров на формоизменение дисков лейкосапфира позволили разработать основы технологии менисков и выпукло-вогнутых линз из лейкосапфира.

В третьей главе диссертации приведены результаты исследования влияния технологических параметров на процесс пластической деформации кристаллов кремния и германия. Определены оптимальные условия деформации при получении полусферических деталей. Показано, что для получения осесимметричных выпукло-вогнутой заготовок, необходимо совпадение плоскости диска с высокосимметричными плоскостями кристалла $[001]$, $[111]$.

В главе рассмотрены технико-экономическая эффективность технологии менисков и выпукло-вогнутых линз из лейкосапфира, кремния, германия:

во-первых, позволяет сохранить высокую прозрачность среды, близкую к теоретической, и получить заготовку близкую к форме детали, что сокращает расход кристалла и абразивного материала на единицу продукции,

во-вторых, пластическое формоизменение, по сравнению с профильным выращиванием монокристаллов, позволяет придать заготовкам оптимальную кристаллографическую ориентацию,

в-третьих, пластическая деформация позволяет получать детали со свойствами, близкими к свойствам монокристаллов, а в некоторых случаях повышает прочность материала и зависимые от нее эксплуатационные характеристики.

Таблица 1.

Эффективность использования материала ($W = M_{\text{мех}}/M_{\text{деф}}$), при изготовлении деталей из кристаллов для ИК спектра.

	Al ₂ O ₃	Si	Ge
	∅80,0мм, h=5,5мм	∅100мм h=7.0 мм	∅100,0мм h=7,3мм
W	2,9	6,0	3,5

Коэффициент полезного использования материала, полученный в работе, показывает экономию до 83% массы кристалла (таб.1), что говорит о конкурентоспособности разработанной технологии оптических деталей.

Четвертая глава содержит описание усовершенствованных рентгеновских и поляризационно-оптических методов исследования крупногабаритных образцов пластически деформированных кристаллов. Для оценки механических свойств кристаллов предложен метод определения коэффициента трения в паре лейкосапфир-графит при высоких температурах. Предположив равенство напряжений, возникающих в центре заготовки при прогибе, равном половине толщины диска, можно получить зависимость коэффициента трения для конкретных условий и геометрических параметров:

$$\mu = \frac{\sigma_{y1} \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \alpha \cdot W_{n1} - P \cdot (r'' - C)}{\sigma_{y1} \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \alpha \cdot W_{n1}} \quad 2$$

где W_{n1} - статический момент центральной части. Величины коэффициента трения, полученные для дисков диаметром 48, 80 и 120 мм в матрице из графита, равны $0,2 \div 0,4$, что соответствует теоретическим предположениям.

Пятая глава посвящена исследованию изменений текстуры и пространственной ориентации кристаллографических плоскостей в мениске лейкосапфира. Исследование субструктуры с наружной и внутренней сторон мениска, проведенные рентгеновским методом (метод широкорасходящегося пучка) показали, что дефекты структуры, искажающие дифракционную линию, сильнее проявляется на внутренней стороне мениска. Пластическая деформация под действием сжимающих напряжений приводит к появлению участков кристалла с постепенным переходом от одной ориентировки к другой, что проявляется в

расширении и изгибе дифракционных линий на рентгенограммах. Искажения линии на рентгенограмме увеличиваются к краю заготовки, где наблюдается резкий излом и расширение, а также уменьшение размера структурных составляющих. Искажения носят анизотропный характер и наиболее отчетливо наблюдаются в направлениях $[10\bar{1}0]$. При исследовании фрагментов заготовок, т.е. кольцевых зон, подтверждено, что центральная часть является наименее искаженной. На рентгенограмме от краевой зоны заготовки появились дифракционные кольца, которые можно интерпретировать, как дебаевские кольца, штриховая структура которых представляет собой отражения от отдельных мозаичных элементов. Штриховки достаточно тонкие, что соответствует структурному совершенству отдельных элементов мозаики. Однако, и в этой части заготовки имеется ориентация элементов мозаики.

Результаты исследования позволяют констатировать наличие неоднородной по радиусу текстуры, от разной степени деформированного кристалла до мозаичной структуры на краю мениска. Определение ориентации кристаллографических плоскостей, проведенное по отражениям от плоскостей (001) и (104), установило, что наружная поверхность мениска соответствует Z-плоскости (001) кристалла.

Поляризационно-оптическая картина мениска, полученная в полярископе ПКС-125 с диффузным источником света ($\lambda=550$ нм) при круговой поляризации, имеет три ярко выраженные зоны (рис.2): центральную зону однородной деформации, включающую пятно нулевого порядка и пять концентрических колец, зону неоднородной пластической деформации с тремя фестонами и концентраторами напряжений, проявляющих тригональную симметрию лейкосапфира и краевую зону однородной деформации с полосами 11—14-го порядков. Зона, в которой проявляются кристаллографические особенности пластической деформации лейкосапфира, обусловлена геометрическим отбором элементарных механизмов скольжения по известным системам [1].

Поляризационно-оптические исследования балочек и пластинок из менисков, вырезанных по взаимно перпендикулярным плоскостям, показали образование прямого конуса оптических осей кристалла с фокусом на оси симметрии детали. На рис.4 представлен мениск из лейкосапфира с накладными микроконоскопами, помещенный между скрещенными поляроидами, а так же пластинка в поляризационном микроскопе. Отклонение коноскопического креста от центра микроконоскопов и его образование в поляризационном микроскопе указывает на направление оптической оси кристалла перпендикулярно поверхности образца. Как показало измерение, отклонение оптических осей кристалла от радиальных направлений в мениске не более $2,2^\circ$.

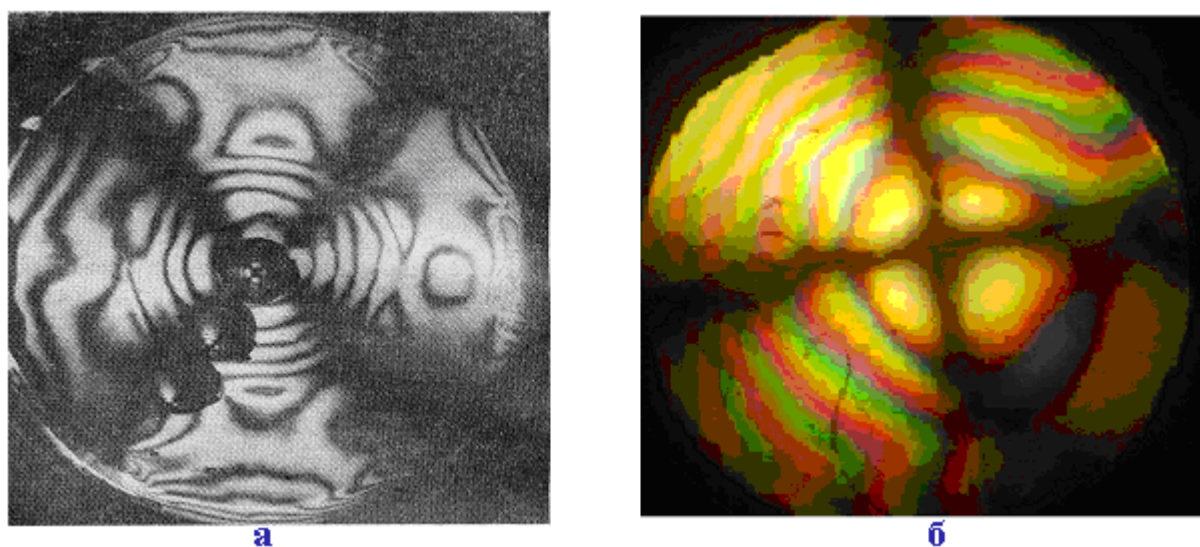


Рис.4. Отклонение коноскопического креста в микроконоскопах на поверхности мениска из лейкосапфира (а) и фотография пластинки из текстурированного лейкосапфира в поляризационном микроскопе (б), (параллельный пучок света, николи скрещены).

Дефекты, возникающие при высокотемпературной пластической деформации дисков кремния и германия, не изменяют спектры пропускания в диапазоне 2-20 мкм. Результаты по направленному пропусканию и рассеянию образцов, вырезанных из разных частей заготовок кремния, показывают увеличение рассеяния света на краю мениска, обусловленное образованием более выраженной текстуры при больших степенях деформации. Однако, полученные величины оптических параметров текстурированных кристаллов, как и двулучепреломление в деталях равное $4\div 6 \times 10^{-5}$, соответствуют высокому оптическому качеству.

Особое место в главе отводится исследованию остаточных напряжений в полусферических оболочках из пластически деформированного кремния и влиянию технологических параметров на их распределение в детали. Эпюры остаточных напряжений σ_{11} - σ_{22} и σ_{12} , измеренные относительно направлений [100], [010], [hk0] показали, что оба типа напряжений знакопеременны, причем последние в два раза меньше и распределение их по направлениям типа [100] более однородно.

Диск Z-среза лейкосапфира, превращенный в мениск путем пластической деформации изгиба, теряет свою трансляционную симметрию в слоях, перпендикулярных оптической оси и сохраняет ее вдоль направлений, перпендикулярных его поверхности, т.е. вдоль оптической оси кристалла. Эти направления можно рассматривать, как новые оптические оси, образующие угловую апертуру. Такой апертуре соответствует точка, в которой пересекутся непараллельные друг другу оптические оси, образуя фокус оптических осей кристалла.

Таблица 2.
Свойства лейкосапфира и его текстурированного аналога.

Свойства	Текстурированный кристалл	Монокристалл
Плотность г/см ³	3,98	3,98
Структура, сингония	текстурированный лейкосапфир	монокристаллическая, тригональная
Область прозрачности, мкм	0,3 – 6,0	0,3 – 6,0
Оптическая индикатриса	эллипс для каждой точки	эллипс, $n_0 < n_e$
Геометрическое положение оптических осей кристалла	конус с фокусом	параллельно
Наведенное двулучепреломление	менее $n \cdot 10^{-5}$	0 (на уровне чувствительности методик)

Лейкосапфир с модифицированными свойствами (таб.2), обусловленными текстурой материала, позволяет рассматривать его, как новый кристаллический оптический материал для УФ, видимой и ИК областей спектра.

Свойства оптических деталей из текстурированного лейкосапфира рассмотрены в главе 6.

Радиальная направленность оптических осей кристалла в деталях, обуславливающая пространственное расположение оптической индикатрисы кристалла, позволяет минимизировать двулучепреломление и получать элементы с новыми оптическими свойствами:

- мениск с оптической осью кристалла перпендикулярной поверхности в каждой точке,
- полусферическую и асферическую линзы без двойного лучепреломления для лучей параллельных оси симметрии детали,
- линзу с минимальным двулучепреломлением для сходящегося пучка лучей,
- плоскопараллельные пластинки с переменным углом наклона оптической оси кристалла к поверхности.

В мениске из текстурированного лейкоапфира при нормальном падении луча на поверхность детали двулучепреломление отсутствует, т.к. лучи распространяется по оптической оси кристалла.

В асферической линзе для лучей параллельного пучка, направленных параллельно оси симметрии детали, двулучепреломление отсутствует при распространении необыкновенного луча вдоль оптических осей кристалла, радиально направленных в заготовке. Для этого необходимо определить внешнюю поверхность детали. В работе выведено и решено уравнение сечения поверхности линзы главной плоскостью кристалла, как функция угла α , характеризующего отклонение точки на поверхности линзы от оси симметрии (рис.5):

$$\begin{cases} x = R - \frac{R(n-1)}{(n\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\alpha} - 1)} \\ y = \frac{R(n-1)}{(n\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\alpha} - 1)} \cdot \operatorname{tg}\alpha \end{cases} \quad 3$$

где R - радиус внешней (выпуклой) поверхности линзы, n - показатель преломления обыкновенного луча.

Анализ системы уравнений (3) показывает, что в уравнении для координаты x второй член характеризует отклонение координаты от полусферы радиуса R и ответственен за прохождение луча после преломления по соответствующей

оптической оси кристалла. Выражение для координаты y показывает изменение профиля, обусловленное отклонением луча от оси симметрии детали. Для параксиального пучка лучей получим тривиальный результат: двулучепреломление в плоско-выпуклых или плоско-вогнутых линзах отсутствует.

Преобразуем систему уравнений (3) и получим выражение (4) в которое, подставив $y_1 = y/R$, $x_1 = x/R$, получим уравнение (5) в безразмерной системе координат:

$$y = (R - x) \sqrt{\frac{1}{n^2} \cdot \left(\frac{R(n-1)}{R-x} + 1 \right)^2 - 1} \quad 4$$

$$y_1 = (1 - x_1) \sqrt{\left(\frac{1 - (x_1/n)}{1 - x_1} \right)^2 - 1} \quad 5$$

Уравнения (3),(4),(5) описывают сечение поверхности асферической линзы главной плоскостью кристалла, в которой отсутствует двулучепреломление лучей направленных параллельно оси симметрии детали.

Применим эту же физическую модель для получения полусферической линзы без двулучепреломления. Для этого на стадии пластической деформации необходимо развернуть оптические оси кристалла так, чтобы после преломления луча на поверхности, необыкновенный луч был направлен вдоль оптической оси кристалла. В этом случае деформацию осуществляют пуансоном с рабочей поверхностью, сечение которой описывается уравнением параболы:

$$y^c = ax + b \quad 6$$

где $c = 0,7369 n_0 + 1,0110$; a и b коэффициенты, обусловленные заданными величинами R и d_0 – толщиной линзы по оси симметрии.

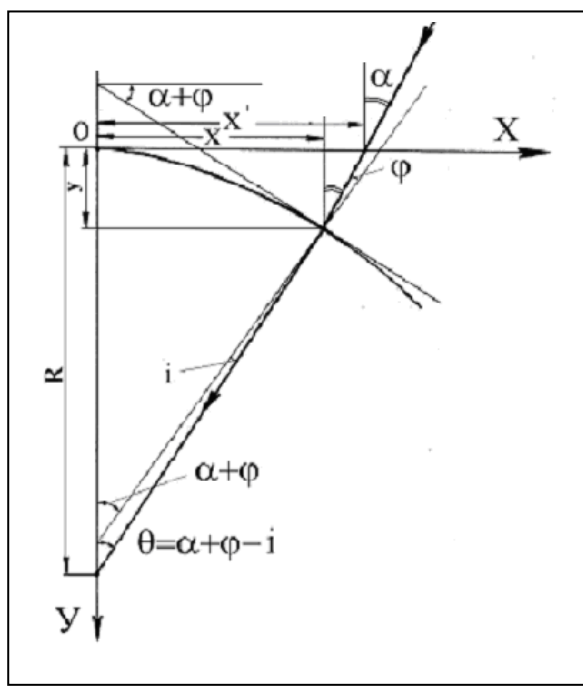


Рис.5 . Схема преломления луча сходящегося пучка на поверхности оптической детали из деформированного лейкосапфира.

уравнение (7) , описывающее преломление лучей сходящегося пучка на поверхности линзы из текстурированного лейкосапфира (рис. 5). Для заданного распределения угла

падения лучей, радиуса и длины волны ($R=60\text{мм}$, $\lambda=0,535\text{мкм}$) получено решение в виде уравнения третьего порядка (8), характеризующего поверхность линзы, в которой необыкновенные лучи направлены вдоль оптических осей кристалла.

$$\frac{dy}{dx'} = \frac{n \cdot \frac{x' - \text{tg } \alpha \cdot y}{R - y} \cdot \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha} - \text{tg } \alpha \cdot \sqrt{1 + \left[\frac{x' - \text{tg } \alpha \cdot y}{R - y} \right]^2}}{n \left[1 + \text{tg } \alpha \cdot \frac{x' - \text{tg } \alpha \cdot y}{R - y} \right] \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha} - (1 + \text{tg}^2 \alpha) \sqrt{1 + \left[\frac{x' - \text{tg } \alpha \cdot y}{R - y} \right]^2}} \cdot [1 - \text{tg}' \alpha \cdot y] \quad 7$$

$$y(x) = 5,39484 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 0,00835968 \cdot x^2 + 0,0125951 \cdot x - 0,0229493 \quad 8$$

В таб.3 приведены свойства элементов из текстурированного лейкосапфира, отражающие изменение двойного лучепреломления по апертуре.

Таблица 3.

Свойства деталей из текстурированного лейкосапфира.

	Мениск	Асферическая линза	Линза ¹ для сходящегося пучка лучей	Полусферическая линза
Уравнение сечения поверхности детали главной плоскостью	$y = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{x}{R}\right)^2}$	$y = (R-x) \sqrt{\frac{1}{n^2} \left(\frac{R(n-1)}{R-x} + 1\right)^2 - 1}$	$y = 5,39484 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 0,00835968 \cdot x^2 + 0,0125951 \cdot x - 0,0229493$	$y = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{x}{R}\right)^2}$
Двулучепреломление для параллельного пучка лучей направленного по оси симметрии детали.	$x_1=0,$ $n_0 - n = 0$ $x_1 \neq 0,$ $n_0 - n = f(x_1)$	$x_1=0,$ $n_0 - n = 0$ $x_1 \neq 0,$ $n_0 - n = 0$	$x_1=0, n_0 - n = 0$ $x_1 \neq 0,$ $n_0 - n = f(x_1)$	$x_1=0,$ $n_0 - n = 0$ $x_1 \neq 0,$ $n_0 - n = 0$

1- $x \in [0,40\text{мм}]$ $R=60\text{мм}$, $\lambda=0,535\text{мкм}$

Плоскопараллельные пластинки с переменным углом наклона оптической оси кристалла к поверхности - новые оптические элементы, впервые полученные в этой работе. Они вырезаны перпендикулярно оси симметрии мениска или полусферической линзы и частично наследуют их свойства.

Глава 7 посвящена разработке методов расчета двойного лучепреломления, коэффициента отражения и степени поляризации света в деталях из текстурированного лейкосапфира, а так же исследованию их изменения по апертуре деталей.

На поверхности линзы из текстурированного лейкосапфира можно выделить три области изменения угла между направлением падающего луча и осью симметрии линзы β , обусловленные изменением угла падения луча, а также отклонением необыкновенного луча от нормали и оптической оси кристалла в заданной точке.

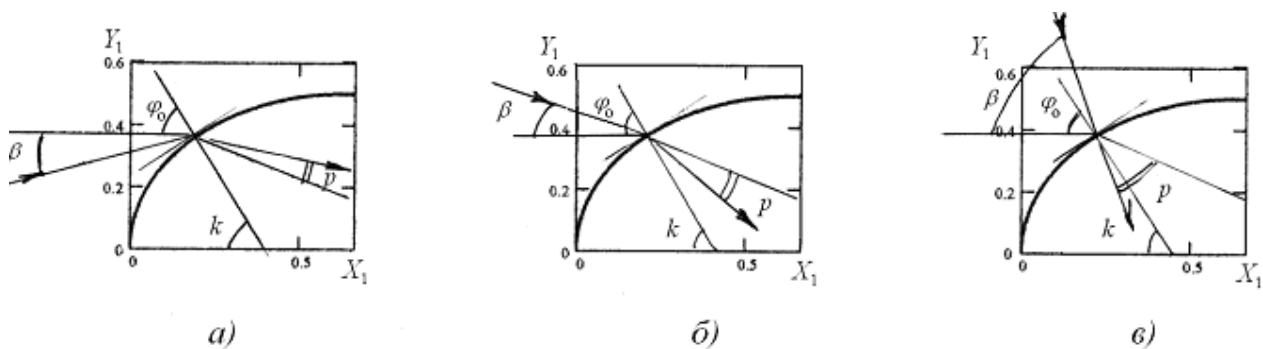


Рис.6. Схема преломления лучей на а поверхности линзы при разных углах наклона параллельного пучка лучей (а - $\beta < 0$, б - $0 < \beta < \varphi_0$, в - $\varphi_0 < \beta$).

Угол падения луча параллельного оси симметрии детали φ_0 , обуславливает границы областей а-б и определяется из выражения: $\varphi_0 = -\arctg(-1/(y_1))$, где y_1 уравнение профиля линзы. Для областей, выделенных на рис. 6, можно составить следующие соотношения:

$$p = i_\beta + \gamma - K \quad 9a$$

$$p = -i_\beta - \gamma + K \quad 9б$$

$$p = i_\beta - \gamma + K \quad 9в$$

где $\sin i_\beta = \sin \varphi_\beta / n$ - угол преломления необыкновенного луча, $\gamma = \arctg(y_1 / (1 - x_1))$ - угол между оптической осью кристалла и осью симметрии, $K = \varphi_0$ - угол между нормалью и осью симметрии детали. Подставляя, выражение для угла преломления в выражение (9а), с учетом положительного отчета углов по часовой стрелке получаем (10):

$$\sin \varphi_\beta = n \cos p [\operatorname{tg} p \cos \alpha + \sin \alpha], \quad 10$$

где принято обозначение: $\alpha = -\gamma + K$.

Учитывая, что преобразованное выражение (1) имеет вид:

$$n = n_0 n_e / \cos p \sqrt{n_0^2 \operatorname{tg}^2 p + n_e^2} \quad 11$$

подставляем (11) в выражения (10) и далее преобразуем относительно аргумента $\operatorname{tg} p$ в квадратное уравнение:

$$(Ln_0^2 - 1) \cdot \operatorname{tg}^2 p - 2\operatorname{tg} p \cdot \operatorname{tg} \alpha + Ln_e^2 - \operatorname{tg}^2 \alpha = 0 \quad 12$$

где $L = \sin^2 \varphi_\beta / n_0 n_e \cos^2 \alpha$.

Решение уравнения (12) позволяет определить угол рассогласования необыкновенного луча с оптической осью кристалла для точки поверхности детали:

$$p = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha \pm \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha - (Ln_0^2 - 1)(Ln_e^2 - \operatorname{tg}^2 \alpha)}}{Ln_0^2 - 1} \right) \quad 13$$

Полученная формула (13) универсальна, т.к. в данной системе координат является решением уравнений (9а), (9б) и (9в). Подставив значения угла p в (1) можно определить двойное лучепреломление по апертуре детали.

Для подобных условий в полусферической линзе двулучепреломление определяется по формулам (13) и (11), однако y_1' - производная сечения полусферической поверхности линзы, а $\gamma = \varphi_0 - \arcsin(\sin \varphi_0 / n_0)$.

Для мениска из текстурированного лейкосапфира, угол K и γ равны, уравнение (12) превращается в неполное квадратное уравнение (14), а решение имеет вид (15):

$$n_0^2 (\sin^2 \varphi_\beta - n_e) \cdot \operatorname{tg}^2 p + n_e^2 \sin^2 \varphi_\beta = 0 \quad 14$$

$$p = \operatorname{arctg} (\sqrt{n_e^2 / n_0^2 (n_e / \sin \varphi_\beta - 1)}) \quad 15$$

Для мениска из одноосного монокристалла, угол γ принимает нулевые значения и решение уравнения (12) при наклонном падении лучей принимает следующий вид:

$$p = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{tg} \varphi_0 \pm \sqrt{\operatorname{tg}^2 \varphi_0 - (Ln_0^2 - 1) \cdot (Ln_e^2 - \operatorname{tg}^2 \varphi_0)}}{Ln_0^2 - 1} \right) \quad 16$$

где $L = \sin^2 \varphi_\beta / n_0 n_e \cos^2 \varphi_0$, а $\varphi_\beta = \varphi_0 - \beta$.

Полученные выражения (15), (16) и (11) позволяют определить показатель преломления n и двулучепреломление в точке поверхности мениска из лейкосапфира (или других одноосных кристаллов) и текстурированного аналога. В таб.4 приведены формулы для определения n и $n-n_0$ в деталях для параллельного пучка лучей направленных по оси симметрии детали.

Таблица 4.

Формулы расчета показателя преломления необыкновенного луча и двулучепреломления в деталях из лейкосапфира.

Лейкосапфир			
Текстурированный			Монокристаллический
Мениск	Полусферическая линза	Асферическая линза	Мениск
Лучи направлены по оси симметрии $\beta = 0$			
$x_I=0 \quad n - n_0 = 0$ $x_I>0$ $\varphi_0 = -\arctg(-1/(y_1))$ $p = \arctg \sqrt{\frac{n_e^2}{n_0^2 \left(\frac{n_e}{\sin \varphi_0} - 1\right)}}$ $n = n_0 n_e / \cos p \sqrt{n_0^2 \operatorname{tg}^2 p + n_e^2}$	$x_I=0 \quad n - n_0 = 0$ $x_I>0 \quad n - n_0 = 0$	$x_I=0 \quad n - n_0 = 0$ $x_I>0 \quad n - n_0 = 0$	$x_I=0 \quad n - n_0 = 0$ $x_I>0$ $\varphi_0 = -\arctg(-1/(y_1))$ $p = \arctg \frac{\operatorname{tg} \varphi_0 \pm \sqrt{\operatorname{tg}^2 \varphi_0 - (Ln_0^2 - 1)(Ln_e^2 - \operatorname{tg}^2 \varphi_0)}}{Ln_0^2 - 1}$ $L = \sin^2 \varphi_0 / n_0^2 n_e^2 \cos^2 \varphi_0$ $n = n_0 n_e / \cos p \sqrt{n_0^2 \operatorname{tg}^2 p + n_e^2}$

Модификация оптических свойств лейкосапфира позволяет получить пластинки с переменным углом оптической оси кристалла к поверхности и реализовать уникальные условия нормального падения луча на поверхность последней. В этом случае, для определения двойного лучепреломления в каждой точке поверхности, угол p определяют из выражения (17), приведенного в монографии [2] для случая, когда фронт волны параллелен поверхности, а оптическая ось кристалла находится в плоскости перпендикулярной последней:

$$\operatorname{tg} p = \frac{n_e^2}{n_0^2} \operatorname{tg} \gamma \quad 17$$

где угол γ - угол отклонения оптической оси кристалла от нормали, обуславливается расстоянием от центральной точки пластинки. Для случая наклонного падения лучей на пластинки угол p определяется из общего решения уравнения (12) и для разных точек поверхности приведен в таб.5.

Таблица 5

Формулы расчета показателя преломления необыкновенного луча и двулучепреломления в пластинках из лейкосапфира ($\beta \neq 0$)

Для центральной точки поверхности пластинок ($y_1=0$)	
$p = \arctg \frac{\sqrt{(Ln_e^2 \cdot (Ln_0^2 - 1))}}{Ln_0^2 - 1} \quad \text{где } L = \sin^2 \beta / n_0^2 n_e^2, \quad n = n_0 n_e / \cos p \sqrt{n_0^2 \operatorname{tg}^2 p + n_e^2}$	
Для точек поверхности пластинок ($y_1 > 0$)	
<p>Пластинка из заготовки мениска</p> $p = \arctg \frac{\operatorname{tg} \alpha \pm \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha - (L_1 n_0^2 - 1)(L_1 n_e^2 - \operatorname{tg}^2 \alpha)}}{L_1 n_0^2 - 1}$ <p>где $L_1 = \sin^2 \beta / n_0^2 n_e^2 \cos^2 \alpha$ $\alpha = \gamma_1 = \arctg(y_1 / (1 - x_1))$ $n = n_0 n_e / \cos p \sqrt{n_0^2 \operatorname{tg}^2 p + n_e^2}$</p>	<p>Пластинка из заготовки полусферической линзы</p> $p = \arctg \frac{\operatorname{tg} \alpha \pm \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha - (L_1 n_0^2 - 1)(L_1 n_e^2 - \operatorname{tg}^2 \alpha)}}{L_1 n_0^2 - 1}$ <p>где $L_1 = \sin^2 \beta / n_0^2 n_e^2 \cos^2 \alpha, \quad \alpha = \gamma_2$ $\gamma_2 = \arctg\left(\frac{y_1}{1 - x_1}\right) - \arcsin\left(\sqrt{\frac{n_e^2 y_1^2}{((1 - x_1)^2 + y_1^2) n_0^2 n_e^2 - (n_0^2 - n_e^2) y_1^2}}\right)$ $n = n_0 n_e / \cos p \sqrt{n_0^2 \operatorname{tg}^2 p + n_e^2}$</p>

В работе получены зависимости двулучепреломления от геометрических размеров и расстояния луча до оси симметрии детали, направления оптической оси кристалла и дисперсии показателей преломления лейкосапфира.

В главе рассмотрен разработанный ранее метод расчета коэффициента отражения (пропускания) кристаллических деталей с учетом изменения направления оптической оси кристалла. Адаптирована модель преломления света на поверхности прозрачного одноосного кристалла [4-5] для деталей из текстурированного лейкосапфира. Для исключения осцилляции интенсивности отраженного света от пластинки при изменении разности фаз [4] предложено видоизмененное выражение (18) :

$$r_i^2 = (|A'_1|^2 + |B'_1|^2) / 2 \quad 18$$

A'_1, B'_1 – амплитуды отраженных лучей при толщинах $d = \lambda \cdot i / 10$

$$r^2_{\text{ср}} = \sum r_i^2 / 10 \quad 19$$

где $i = 1, 2 \dots 10$. Как показал опыт интервала $0,1 \cdot \lambda$ достаточно для получения достоверных результатов. Выявлено влияние направления оптической оси кристалла на отражение света в пластинках и деталях. Для линз из текстурированного лейкосапфира, при падении лучей по оси симметрии, отражение света минимальное.

В линзах из текстурированного лейкосапфира, лучи направленные по оси симметрии линз после преломления распространяются вдоль оптической оси кристалла, для определения степени поляризации света можно использовать соотношения для изотропных сред [3]. Для параллельных оси симметрии линз лучей выведена формула для оценки степени поляризации излучения:

$$\Delta = \frac{\left[1 - \cos^2 \left(\varphi_0 - \arctg \left[\frac{\sin \varphi_0}{\sqrt{(n_0)^2 - \sin^2 \varphi_0}} \right] \right) \right]}{1 + \cos^2 \left(\varphi_0 - \arctg \left[\frac{\sin \varphi_0}{\sqrt{(n_0)^2 - \sin^2 \varphi_0}} \right] \right)} \quad 20$$

В вершине асферической и полусферической линз, подобно ортогональному падению луча на пластинку, поляризация света не изменяется. Для неосевых лучей степень поляризации зависит от угла падения, который пропорционален отклонению луча от оси симметрии линзы.

Разработанные методы и алгоритмы позволяют априори рассчитать параметры деталей и изменение оптических параметров по апертуре.

В заключении обобщены результаты исследования и рассмотрен вопрос использования результатов в оптическом материаловедении.

В приложении приведены акты внедрения, использования результатов исследования и временная технологическая инструкция на процесс получения заготовок менисков лейкосапфира диаметром до 80 мм.

Основные результаты и выводы

В работе проведен комплекс физических и технологических исследований по выявлению механизмов неоднородной пластической деформации, особенности их влияния на оптические и прочностные характеристики кристаллических деталей. Разработан ряд новых методов исследования технологического процесса и оптических свойств деталей. Разработан научно-обоснованный подход расчета оптических деталей из деформированного лейкосапфира с учетом направления оптической оси кристалла и выполнено моделирование изменения их свойств. Обнаруженное явление геометрической модификации оптических свойств лейкосапфира, позволяет направленно изменять их неоднородной пластической деформацией. Получены научные результаты, позволяющие сформулировать следующие выводы.

1. Неоднородная пластическая деформация дисков кристаллов лейкосапфира, кремния и германия путем центрально-кольцевого изгиба является методом получения текстурированных кристаллов высокого оптического качества; изменяя соотношение геометрических размеров образца и фактора механического воздействия можно изменять текстуру и приобретенные оптические свойства.
2. Разработаны основы технологии оптических деталей неоднородной пластической деформацией кристаллов лейкосапфира, кремния и германия. Получены оптические детали: мениски, полусферические оболочки, линзы и пластинки из текстурированных кристаллов.
3. Установлено, что при центрально-кольцевом пластическом изгибе лейкосапфир приобретает текстуру: сохраняется трансляционная симметрия вдоль направлений перпендикулярных поверхности диска из Z-среза, т.е. вдоль оптической оси кристалла. Эти направления – новые оптические оси, образуют конус, угловую апертуру и фокус оптических осей кристалла. Текстура обуславливает новые оптические свойства, т.е. при формоизменении происходит геометрическая модификация оптических свойств лейкосапфира.

Для области спектра 0,3 – 6,0 мкм разработан оптический материал – текстурированный лейкосапфир с конусом оптических осей кристалла и техно-

логия элементов конструкционной оптики: менисков, выпукло-вогнутых линз и пластинок с переменным углом оптической оси кристалла к поверхности.

4. Выявлены кристаллографические особенности процесса неоднородной пластической деформации лейкосапфира, кремния и германия при центрально-кольцевом изгибе, позволяющие выделить основные стадии процесса и механизмы деформации дисков. Показано, что преобладающим процессом является изгиб диска в начале деформации, при больших стрелах прогиба лимитирующий процесс – растяжение.

Для получения заготовки близкой к форме детали методом центрально-кольцевого изгиба плоскость исходного диска кристалла необходимо ориентировать перпендикулярно оси симметрии высшего порядка, направляя усилие вдоль последней.

5. Разработан метод расчета поверхности линз из текстурированного лейкосапфира, обеспечивающий распространение необыкновенных лучей вдоль оптических осей кристалла, т.е. без двулучепреломления.

6. Разработан обобщенный алгоритм расчета двулучепреломления в деталях из одноосных кристаллов с учетом направления оптической оси кристалла. Исследовано изменение двулучепреломления в деталях из лейкосапфира и его текстурированного аналога. При падении параллельного или наклонного относительно оси симметрии детали пучка лучей определена зависимость двулучепреломления от геометрических размеров и расстояния луча до оси симметрии детали, направления оптической оси кристалла и дисперсии показателей преломления лейкосапфира.

7. Разработаны методы расчета коэффициента отражения и степени поляризации излучения в деталях из текстурированного лейкосапфира, учитывающие направление оптической оси кристалла. Изучено их изменение по апертуре мениска, полусферической и асферической линз.

8. На основании разработанной модели расчета упругих характеристик мениска из текстурированного лейкосапфира установлено, что зависимость модулей Юнга и сдвига, а также чисел Пуассона от температуры подобна их изменению

для плоскопараллельной пластинки лейкосапфира, вырезанной перпендикулярно оптической оси кристалла. Определен модуль упругости лейкосапфира (0001) при температуре 2020 °С и его изменение в интервале 0-2020⁰С.

9. Установлена зависимость остаточных напряжений σ_{11} - σ_{22} и σ_{12} в полусферических деталях из кремния от технологических параметров процесса неоднородной пластической деформации. Показано, что оба типа напряжений являются знакопеременными: имеются области растяжения, сжатия и сдвига противоположных знаков.

10. Полученные научные и технологические результаты вносят вклад в развитие оптического материаловедения и формируют основы нового научного направления: оптика и технология текстурированных кристаллических сред.

Цитируемая литература:

1. Классен-Неклюдова М.В., Багдасаров А.С., Рубин и сапфир, М., Наука, 1974г, 236с.
2. Шустер А, Введение в теоретическую оптику, пер. с английского под ред. проф. К.К. Баумгарта, Л-М, ОНТИ, 1935г, 376 с.
3. Федоров Ф.И., Оптика анизотропных сред, М, 2004г, 381с.
4. Константинова А.Ф., Лонский Э.С., Прохождение света через пластинку из одноосного кристалла при наклонном падении//Кристаллография, 1977, т.22, вып .1, с14-20.
5. Константинова А.Ф., Гречушников Б.Н., Бокунь Б.В., Валяшко Е.Г., Оптические свойства кристаллов, Минск, 1995г, 302 с.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Волынец Ф.К., Ветров В.Н., Обзор // Отраслевой реферативный сборник «Зарубежная военная техника» 1984, вып.8(8),с. 54-63.
2. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Шкульков А.В., Петров Ю.Б., Печенков А.Ю.. Получение высокочистых кристаллических оксидных материалов индукционной плавкой в холодном тигле // VIII Всесоюзная конференция по методам получения и анализа высокочистых веществ, Горький, 30 мая-2 июня 1988, с. 72.
3. Адылов Г.Т., Ветров В.Н., Рыжиков Э.Н., Игнатенков Б.А. Уразаева Э.Н., Синтез высокочистых оксинитридных фаз в системе Al-Zr-O-N методом плавки в условиях солнечного нагрева // VIII Всесоюзная конференция по методам получения и анализа высокочистых веществ, Горький, 30 мая-2 июня 1988, с. 238.
4. Адылов Г.Т., Рыжиков Э.Н., Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Уразаева Э.Н., Параметр элементарной ячейки системы $Al_2O_3-MgAl_2O_4$, // Известия АН СССР. Неорганические материалы, 1988, т.24, №3, стр. 515-517.
5. Ветров В.Н., Шкульков А.В., Петров Ю.Б., Печенков А.Ю., Игнатенков Б.А., Получение высокочистых оксидных материалов индукционной плавкой в холодном тигле // Высокочистые вещества, АН СССР, 1989, №3, с.136-140.
6. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Ананьева Г.В., Ягмурова Г.П., Афанасьев И.И. Андрианова Л.К., Структура и двулучепреломление деформированных дисков лейкосапфира//Оптико-механическая промышленность,1991, №3,с.15-19.
7. Афанасьев И.И., Андрианова Л.К., Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Изменение оптических свойств лейкосапфира после высокотемпературной пластической деформации // Физика твердого тела»,1991, т.33, №4, с.1173-1177.
8. Сибикина Н.Л., Афанасьев И.И., Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Киселев А.П., Белевцева П.И., Оптические свойства пластически деформированного лейкосапфира // Оптико-механическая промышленность»,1992, №4, с.53-55.
9. Афанасьев И.И, Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Калинина М.П., Пространственные модели упругости монокристаллов лейкосапфира//Оптический журнал», 1992, №11, с.29-31.

10. Киселев А.П., Афанасьев И.И., Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Получение менисков из монокристаллического кремния высокотемпературной пластической деформацией // «Оптический журнал» 1992, № 5, с.65-66.
11. Киселев А.П., Игнатенков Б.А., Ветров В.Н., Афанасьев И.И., Выпукловогнутые заготовки оптических деталей из монокристаллического кремния // «Оптический журнал», 1992, №11, с.46-48.
12. Афанасьев И.И., Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Киселев А.П. Материалосберегающая технология оптических линз из кристаллических ИК-материалов // Симпозиум «Прикладная оптика-94» 1994, СПб, Тезисы докладов, с.63
13. Афанасьев И.И., Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Киселев А.П., Сибикина Н.Л., Менисковые линзы из пластически деформированного кремния для ИК-техники // Симпозиум «Прикладная оптика-94» 1994, СПб, Тезисы докладов, с.71.
14. Афанасьев И.И., Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Сибикина Н.Л., Минимизация двулучепреломления в деталях из пластически деформированного лейкосапфира // Симпозиум «Прикладная оптика-94», 1994, СПб, Тезисы докладов, с.71.
15. Afanas'ev I.I., Kiselev A.P., Vetrov V.N., Sibikina N.L., Ignatenkov B.A., Thermoplastic stresses in meniscus lenses manufactured from deformed silicon single crystals // International conference "Photomechanics-95" 11-14 September 1995, Novosibirsk, Russia, p.7.
16. Игнатенков Б.А., Киселев А.П., Письменный В.А., Миронов И.А., Шаевич С.Л., Ветров В.Н., Рассеяние излучения в оптическом монокристаллическом германии // Симпозиум «Прикладная оптика-96», 18-22 сентября 1996, СПб, Программа и тезисы докладов, с. 204.
17. Киселев А.П., Афанасьев И.И., Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Технология оптических деталей сложной формы на основе пластической деформации монокристаллов // Симпозиум «Прикладная оптика-96», 18-22 сентября 1996, СПб, Программа и тезисы докладов, с. 178.
18. Афанасьев И.И., Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Чупраков А.М., Текстурированные оптические монокристаллы сложной формы // Международная конференция «Физпром-96», 22-26 сентября 1996, Н. Новгород, тезисы докладов с.36

19. Афанасьев И.И, Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Остаточные напряжения в менисках из пластически деформированного монокристалла кремния // Оптический журнал, 1998, т65, №3, с. 30-34.
20. Афанасьев И.И, Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Заготовки оптических деталей из деформированных кристаллов кремния для ИК техники//IX Национальная конференция по росту кристаллов НКПК-2000, М, Россия, 2000, с.225.
21. Афанасьев И.И, Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Технология оптических деталей сложной формы на основе деформации монокристаллов // «IX Национальная конференция по росту кристаллов НКПК-2000»М, Россия, 2000, с.210.
22. Afanas'ev I.I., Vetrov V.N., Ignatenkov B.A., Texturated sapphire crystals new optical medium // Fourth International Conference "Single Crystal Growth and Heat & Mass Transfer" ICSC 2001, Obninsk, v.3, p 585-588.
23. Afanas'ev I.I., Vetrov V.N., Ignatenkov B.A., Thermoplastic stresses in domes from deformed single crystal silicon // Fourth International Conference "Single Crystal Growth and Heat & Mass Transfer" ICSC 2001, Obninsk, v.3, p 642-648.
24. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Минимизация двулучепреломления в линзах из лейкосапфира //Сборник трудов шестой международной конференции «Прикладная оптика – 2004» СПб, Россия, 2004, т.3, с. 102.
25. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А.Урбанович Е.В., Отражение параллельного пучка лучей света из пластически деформированного лейкосапфира // Сборник трудов седьмой международной конференции «Прикладная оптика – 2006» СПб, Россия, 2006, т.3,с.249-253 (файл 3-53).
26. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Двулучепреломление в деталях сложной формы из одноосных кристаллов//Оптический журнал, 2006 г., 73, №3, с. 64-66.
27. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Двулучепреломление в линзах из лейкосапфира // Оптический журнал, 2006, т.73, №5, с. 54-56.
28. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А. Расчет фокуса выпукло-вогнутой линзы из деформированного лейкосапфира//Оптический журнал, 2006, т.73, №.9, с 48-50.

29. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А Урбанович Е.В., Отражение параллельного пучка лучей света из пластически деформированного лейкосапфира // Оптический журнал, 2007, т.74, №7, с 65-67.
30. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А Урбанович Е.В., Поляризация света в линзах из деформированного лейкосапфира//Оптический журнал, 2007,т.74, №10,с.76-78.
31. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Текстурированный оптический лейкосапфир// Оптический журнал, 2008, т.75, №2, с. 70-73
32. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Двойное лучепреломление в деталях из лейкосапфира при наклонном падении лучей// Сборник трудов восьмой международной конференции « Прикладная оптика–2008» СПб, Россия, 2008, с. 98-102.
33. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Оптические свойства пластически деформированного лейкосапфира// Сборник трудов восьмой международной конференции « Прикладная оптика – 2008» СПб, Россия, 2008, с.103-105.
34. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Оптические свойства пластически деформированного лейкосапфира// Материалы 11 международной конференции «Физика диэлектриков (Диэлектрики-2008)» СПб 3-7 июня 2008, т.2, с. 22-23.
35. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А Урбанович Е.В., Расчет коэффициентов отражения света от поверхностей изотропной линзы из пластически деформированного лейкосапфира//// Материалы 11 международной конференции «Физика диэлектриков (Диэлектрики-2008)» СПб 3-7 июня 2008, т.2, с. 24-25.
36. Письменный В.А., Ветров В.Н., Морфология поверхности и кристаллографический аспект при образовании пор, газовых пузырей и включений в лейкосапфире// Сборник материалов «XVIII Петербургские чтения по проблемам прочности и роста кристаллов» 21-24 октября 2008г. СПб, Часть 1, с.264-265
37. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Двойное лучепреломление в деталях из лейкосапфира при наклонном падении лучей//Оптика и спектроскопия, 2009, т.106, №1, стр. 154-158.
38. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Определение двойного лучепреломления в полусферических оболочках из лейкосапфира// Оптический журнал, 2009, т.76, № 7, с.92-95.

39. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Определение показателя преломления необыкновенного луча при наклонном падении пучка света на полусферическую линзу из текстурированного лейкосапфира // Сборник трудов девятой международной конференции «Прикладная оптика 2010» СПб, Россия, 2010, с.67-70.
40. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Пластинка лейкосапфира с переменным углом наклона оптической оси кристалла к поверхности // Сборник трудов девятой международной конференции «Прикладная оптика 2010» СПб, 2010, с.61-63.
41. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Анизотропия механических свойств оптических деталей их лейкосапфира // Сборник трудов девятой международной конференции «Прикладная оптика 2010» СПб, Россия, 2010, с.70-73.
42. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Двойное лучепреломление в пластинках лейкосапфира // Оптика и спектроскопия, 2012, т.112, №1, стр. 147-149.
43. Адылов Г.Т., Биберштейн Б.Е., Ветров В.Н., Рыжиков Э.Н., Игнатенков Б.А. // Авторское свидетельство СССР № 245829.
44. Ветров В.Н., Рыжиков Э.Н., Игнатенков Б.А., Шенгелия Е.А., Способ получения заготовки поликристаллического оптического материала алюмомагние-вой шпинели // Авторское свидетельство СССР №1412237.
45. Ветров В.Н., Рыжиков Э.Н., Игнатенков Б.А., Шенгелия Е.А., Назаров А.Н., Способ получения поликристаллического оптического материала на основе оксидов // Авторское свидетельство СССР №1543811.
46. Азимов С.А., Адылов Г.Т., Биберштейн Б.Е., Волынец Ф.К., Ветров В.Н., Рыжиков Э.Н., Игнатенков Б.А. // Авторское свидетельство СССР №240572
47. Игнатенков Б.А., Ветров В.Н., Рыжиков Э.Н., Борисов Б.А., Рогайлин М.И., Шенгелия Е.А., Пресс-форма горячего прессования // Авторское свидетельство СССР №1555136, Бюллетень №13 от 07.04.90.
48. Адылов Г.Т., Уразаева Э.Н., Максудов А.А. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., // Авторское свидетельство СССР №312498
49. Азимов С.А., Адылов Г.Т., Ветров В.Н., Рыжиков Э.Н., Игнатенков Б.А., Уразаева Э.Н., Максудов А.А. // Авторское свидетельство СССР №261977

50. Афанасьев И.И., Андрианова Л.К. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Рыжиков Э.Н. // Способ получения оптических линз // Авторское свидетельство СССР №1773956.
51. Афанасьев И.И., Игнатенков Б.А., Киселев А.П., Ветров В.Н., Миронов И.А., Петровский Г.Т., Письменный В.А., Способ получения оптических линз // Патент РФ №2042518, Бюллетень №24 от 27.08.95.
52. Афанасьев И.И., Андрианова Л.К. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Рыжиков Э.Н. Способ получения оптических линз // Патент РФ №1773956, Бюллетень №41 от 07.11.92.
53. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Письменный В.А., Петровский Г.Т., Рыжиков Э.Н., Дукельский К.В., Способ получения линз // Патент РФ № 2285757 Бюллетень №29 от 20.10.06.
54. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А. Письменный В.А. Петровский Г.Т., Рыжиков Э.Н., Дукельский К.В., Способ получения оптических линз из монокристаллов // Патент РФ № 2313809 Бюллетень №36 от 27.12.07.
55. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А. Письменный В.А. Петровский Г.Т., Рыжиков Э.Н., Дукельский К.В., Способ получения оптических линз с минимальным двулучепреломлением // Патент РФ № 2310216 Бюллетень №31 от 10.11.07.
56. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Письменный В.А., Дукельский К.В., Способ получения оптических линз из лейкосапфира// Патент РФ № 2377614 Бюллетень №36 от 27.12.09.