

Вестник ТвГУ. Серия "Физика". 2014. № 3. С. 66-83

ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТИ КРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ И ПАРАТЕЛЛУРИТА МЕТОДОМ КОНОСКОПИИ

УДК 535.525.

К. А. Морозова, Е. И. Каплунова, Е. В. Шмелева, М. Д. Кузьмина
Тверской государственный университет, Тверь, Россия

С помощью уравнения изохром одноосных кристаллов, выведенного без обычно применяемых упрощений, рассчитаны теоретические коноскопические картины идеальных кристаллов для различных углов между оптической осью и нормалью к кристаллу. На установке для лазерной коноскопии экспериментально исследованы крупногабаритные монокристаллы ниобата лития и парателлурита. Изучена эволюция коноскопических картин в светозвукопроводах работающих устройств.

Ключевые слова: *оптические аномалии, парателлурит, ниобат лития, метод коноскопии, акустооптическое устройство, угловая апертура, пьезооптический эффект, светозвукопровод*

1. Введение. Метод коноскопии более 150 лет используется при исследовании оптически анизотропных кристаллов. До настоящего времени с его помощью определялись такие характеристики кристаллов, как категория (высшая, средняя или низшая), оптический знак кристалла, угол между оптическими осями двуосного кристалла [1-3]. С помощью коноскопии приблизительно определяется ориентация нормали к взаимно параллельным плоскостям образца относительно оси (осей) кристалла, но только в случаях, когда нормаль составляет малый угол с осью одноосного кристалла или биссектрисой острого угла между осями двуосного кристалла. Метод позволяет выявлять в кубических и одноосных кристаллах аномальные одноосность и двуосность, а также по углу между наведенными осями в одноосном кристалле оценивать механические напряжения, приводящие из-за пьезооптического эффекта к изменениям оптической индикатрисы кристалла [3, 4]. Наблюдающийся в последние годы повышенный практический интерес к методу коноскопии обусловлен новыми возможностями его использования при исследованиях оптических эффектов в наноразмерных структурах жидких кристаллов, минералогии, голографии [5-8].

До настоящего времени коноскопические картины наблюдались, как правило, с помощью поляризационных микроскопов, что несколько ограничивало возможности метода, по крайней мере, при исследовании

больших элементов, вырезанных из кристаллов. При исследованиях с помощью микроскопов мы получаем только некоторую 2-D информацию о виде оптической индикатрисы в небольшом по площади и толщине участке кристалла, по которой трудно судить об оптических аномалиях в его глубине, от которого отрезана тонкая пластинка. Кроме того, при малых фокусных расстояниях объективов и малых угловых апертурах можно наблюдать изохромы только небольших порядков - не более нескольких десятков. Именно изохромы являются наиболее чувствительными объектами в коноскопических картинах к аномалиям и ориентации кристалла. Изогиры в виде темных областей в поле зрения менее информативны, они только затрудняют наблюдение изохром, и для их устранения даже применяют специальные методы [1].

Сравнительно недавно для получения коноскопических картин применяются лазеры [9-11]. Их линейно-поляризованные плоскопараллельные лучи преобразуются в пучки конической формы и при прохождении кристалла дают интерференционную коноскопическую картину на непрозрачном или матовом полупрозрачном экране. При таком способе наблюдения угол раствора конуса лучей и размеры исследуемых образцов практически не ограничены, поэтому можно, во-первых, получать изохромы высоких порядков (до десятков тысяч), и, во-вторых, иметь информацию об оптической однородности в глубине массивных кристаллов без необходимости вырезания из них тонких образцов.

Точная интерпретация вида коноскопической картины, полученной тем или иным способом, зависит от точности теории, предсказывающей форму изохром различных порядков в зависимости от толщины кристалла, длины волны излучения, главных показателей преломления и угла между нормалью к образцу и оптической осью (оптическими осями) кристалла. Однако анализ публикаций по данной тематике говорит о том, что даже в случае одноосных кристаллов используются приближенные соотношения, искажающие истинную форму изохром, особенно в случаях углов между нормалью и осью, промежуточных между 0° и 90° [2, 3, 9, 12-14]. В наиболее фундаментальной работе М. Борна [15] использовано минимальное число упрощений, в результате которых изохромы одноосных кристаллов в общем случае должны представлять собой кривые четвертого порядка. В более современных работах сделаны дополнительные упрощения, которые при расчетах дают для формы изохром только кривые второго порядка - окружности, эллипсы и гиперболы [2, 3, 7, 9, 12-14, 16]. Не исправляют положения и работы, в которых учитывается оптическая активность, приводящая к изменениям интенсивности самих изохром из-за изменения поляризации лучей, но

не к изменению их формы и координат в плоскости наблюдения [17-19]. Присутствие в коноскопической картине одноосного кристалла изохром в виде кривых порядка выше второго, с точки зрения современных представлений, должно свидетельствовать об аномальной двуосности или даже о целом комплексе оптических аномалий в кристалле. Между тем, авторы настоящей работы неоднократно наблюдали изохромы, не являющиеся кривыми второго порядка, в коноскопических картинах кристаллов, высокое структурное совершенство и идеальная оптическая однородность которых предварительно были установлены другими независимыми методами.

Следует также заметить, что почти все экспериментальные или рассчитанные с помощью компьютеров картины изохром одноосных кристаллов, представленные в известных публикациях, относятся только к двум наиболее тривиальным случаям - оптическая ось совпадает с нормалью к кристаллу, и оптическая ось ортогональна нормали [2, 3, 4, 19]. Для этих случаев, когда изохромами являются, соответственно, окружности и гиперболы, результаты различных расчетов совпадают. Выражения для изохром опубликованы в [11, 20, 22] и использованы в настоящей работе для расчета формы изохром в коноскопических картинах кристаллов ниобата лития и парателлурита. Эти кристаллы широко применяются в акустооптике, оптике и оптоэлектронике, а ниобат лития - ещё и как материал для пьезопреобразователей акустооптических устройств. Максимально возможная оптическая однородность этих кристаллов является необходимым условием для достижения требуемых характеристик соответствующих устройств - эффективности дифракции, спектральной и пространственной разрешающей способности, качества изображений, подавления боковых максимумов аппаратных функций и т.д.

Целями настоящей работы являлись исследование оптической однородности крупногабаритных кристаллов ниобата лития и парателлурита методом лазерной коноскопии, а также расчет изменений показателей преломления и оценка механических напряжений в объёмах кристаллов, в которых наблюдаются искажения теоретической формы изохром.

2. Уравнения изохром одноосных кристаллов. В работах [11, 20-22] без каких-либо упрощений получены уравнения изохром для произвольной ориентации нормали к поверхностям кристалла относительно оптической оси z кристаллофизической системы координат. При этом выражение для разности хода обыкновенного и необыкновенного лучей с точностью до обозначений совпадает с аналогичными выражениями из работ [2, 3, 12, 15]. Это уравнение,

которое можно назвать уравнением коноскопической картины одноосного кристалла, имеет следующий вид:

$$(N_0^2 - N_e^2) \left[\frac{Y \sin \psi}{\frac{m\lambda\sqrt{X^2+Y^2+f^2}}{h} + \sqrt{N_0^2(X^2+Y^2+f^2) - X^2 - Y^2}} + \cos \psi \right]^2 = N_0^2 \left[\frac{X^2+Y^2 - N_e^2(X^2+Y^2+f^2)}{\left(\frac{m\lambda\sqrt{X^2+Y^2+f^2}}{h} + \sqrt{N_0^2(X^2+Y^2+f^2) - X^2 - Y^2} \right)^2} + 1 \right] \quad (1)$$

где N_0 – главное значение обыкновенного показателя преломления, N_e – главное значение необыкновенного показателя преломления, ψ – угол между нормалью к поверхности кристалла и оптической осью, m – порядок изохром, λ – длина волны света в вакууме, h – толщина кристалла, f – фокусное расстояние проекционной системы, X и Y – координаты точки в коноскопической картине.

Уравнение (1) в наибольшей степени удобно при практических компьютерных расчетах формы изохром любых порядков при произвольных углах ψ между оптической осью и нормалью к кристаллу, а также при исследованиях зависимостей вида коноскопических картин от толщины кристалла h , длины волны излучения λ , показателей преломления N_0 и N_e (и их вариаций ΔN_0 и ΔN_e), угла раствора конуса лучей, падающих на кристалл, т.е. от $A = 2\alpha_{\max}$ - удвоенного максимального угла падения (угловой апертуры), а также порядков изохром m .

Однако, для решения важного теоретического вопроса о порядке кривых - изохром одноосных кристаллов для общего случая произвольного угла ψ между оптической осью и нормалью, уравнение (1) следует привести к каноническому виду, при котором в левой части стоит многочлен от двух букв X и Y . После приведения к общему знаменателю, избавления от корней, раскрытия скобок и лексикографического расположения слагаемых, уравнение (1) приобретает следующий вид:

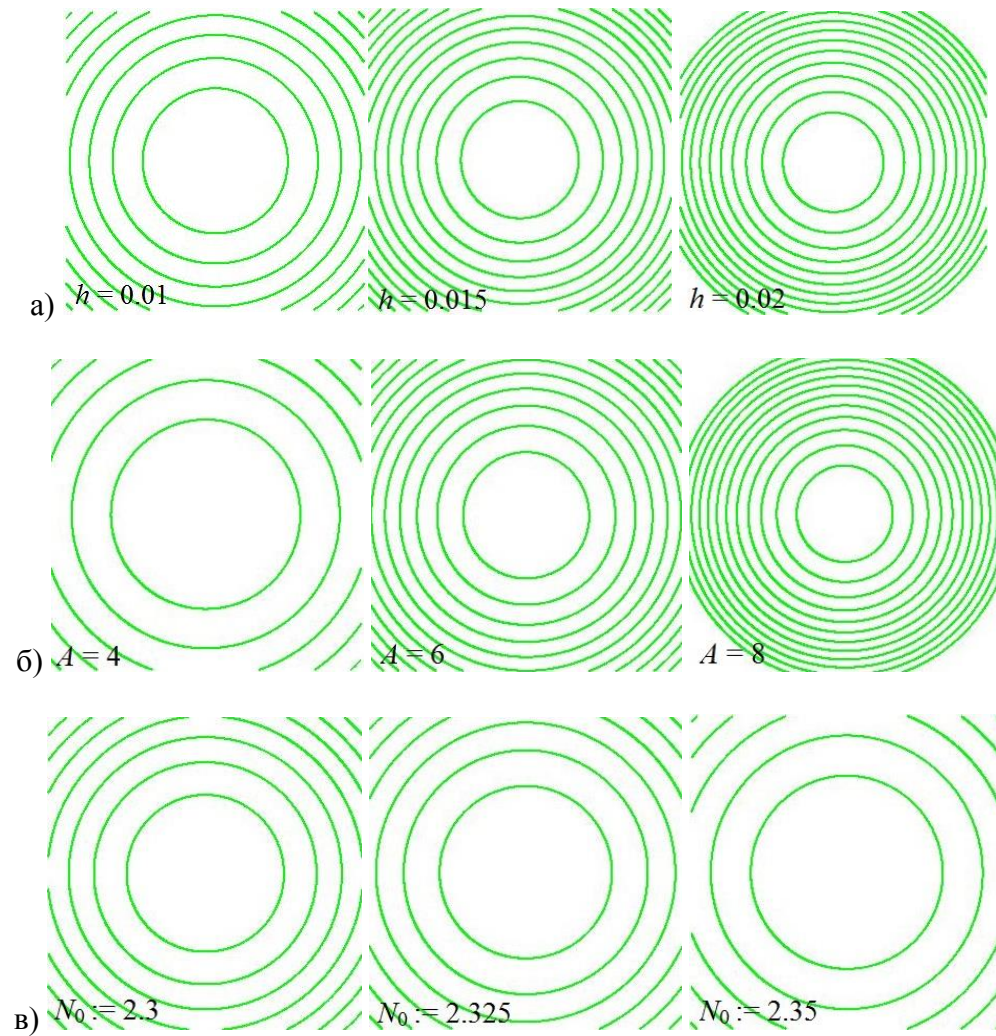
$$B_1 X^8 + B_2 X^6 Y^2 + B_3 X^6 + B_4 X^4 Y^4 + B_5 X^4 Y^2 + B_6 X^4 + B_7 X^2 Y^6 + B_8 X^2 Y^4 + B_9 X^2 Y^2 + B_{10} X^2 + B_{11} Y^8 + B_{12} Y^6 + B_{13} Y^4 + B_{14} Y^2 + B_{15} = 0 \quad (2)$$

В уравнении (2) коэффициенты B_i - это величины, зависящие от свойств и размеров кристалла, параметров оптической системы и

порядка изохромы. Они представляют собой чрезвычайно громоздкие выражения (каждая не менее 10 строк) и в настоящей работе не приводятся. При желании читатели смогут ознакомиться с ними на интернет-странице кафедры прикладной физики Тверского государственного университета, где они полностью представлены. В общем случае многочлен в первой части (2) не является симметрическим. Разумеется, все выведенные соотношения остаются неизменными и для одноосных оптических кристаллов, когда $N_o > N_e$.

Таким образом, в общем случае изохромы не являются кривыми второго порядка и описываются уравнениями восьмого порядка. Только в отдельных частных случаях изохромы могут быть кривыми второго порядка - окружностями, когда оптическая ось совпадает с нормалью, и гиперболами, когда оптическая ось ортогональна нормали. При небольших отклонениях угла ψ от 0° и 90° изохромы только напоминают окружности, эллипсы, параболы или гиперболы. При промежуточных значениях углов ψ компьютерные расчеты дают изохромы, даже внешне отличающиеся от кривых второго порядка и, кроме того, имеющие формы различных кривых для различных порядков m , т.е. формы, зависящие от угла падения света α . Читатели могут легко убедиться в этом, воспользовавшись уравнением изохром в виде (1) и подставив в него реальные данные для каких-либо одноосных кристаллов, изучаемых с помощью оптической системы с известным фокусным расстоянием f линзы или объектива, проецирующего коноскопическую картину на экран, а в случае использования поляризационного микроскопа - фокусным расстоянием его объектива.

3. Некоторые технические следствия, вытекающие из уравнения изохром. Согласно уравнению (1) в настоящей работе получены графически и исследованы теоретически коноскопические картины при изменениях таких параметров опыта, как толщина кристалла h , длина волны света λ , угловая апертура $A = 2\alpha_{\max}$, где α_{\max} - максимальный угол падения на кристалл луча из конуса лучей, принимающих участие в формировании изображения, а также главные значения N_o и N_e показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей и фокусное расстояние проекционной системы f . На рис. 1-2 представлены картины, относящиеся к классическому случаю - оптическая ось совпадает с нормалью к кристаллу ($\psi = 90^\circ$). Этих картин уже достаточно для формулировки важных выводов об оптимальных параметрах оптической системы для заданных размеров и показателей преломления кристалла.



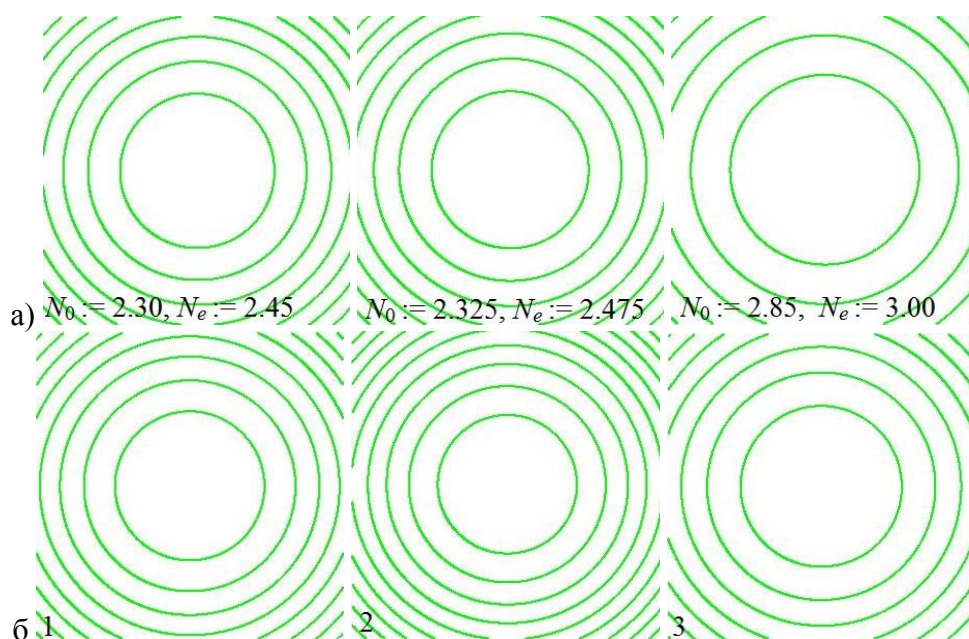
Р и с . 1 . Коноскопические картины одноосных кристаллов для различных параметров оптической системы и различных главных значений показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей:

а) $N_0 := 2.2931, N_e := 2.2452, \psi := 0^\circ, A := 10^\circ, \lambda := 5.461 \cdot 10^{-7} \text{ м}, f := 0.20 \text{ м}$

б) $N_0 := 2.2931, N_e := 2.2452, \psi := 0^\circ, A := 10^\circ, \lambda := 5.461 \cdot 10^{-7} \text{ м}, f := 0.20 \text{ м}, h := 0.01 \text{ м};$

в) $N_e := 2.45, \psi := 0^\circ, A := 10^\circ, \lambda := 5.461 \cdot 10^{-7} \text{ м}, f := 0.20 \text{ м}, h := 0.01 \text{ м}]$

Для картин а-в фокусное расстояние $f = 0,35 \text{ м}$, для всех картин длина волны излучения $\lambda = 500 \text{ нм}$.



Р и с . 2 . Коноскопические картины одноосных кристаллов для различных параметров оптической системы и различных главных значений показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей

Для картин а-б фокусное расстояние $f = 0,35$ м, для всех картин длина волны излучения $\lambda = 500$ нм

а) $\psi := 0^\circ, A := 10^\circ, \lambda := 5.461 \cdot 10^{-7}$ м, $f := 0.20$ м, $h := 0.01$ м, $\lambda := 5.461 \cdot 10^{-7}$ м;

б) $\psi := 0^\circ, A := 10^\circ, f := 0.20$ м, $h := 0.01$ м

1 – $\lambda := 4.678 \cdot 10^{-7}$ м, $N_0 := 2.3478, N_e := 2.5164$;

2 – $\lambda := 5.461 \cdot 10^{-7}$ м, $N_0 := 2.2931, N_e := 2.4520$;

3 – $\lambda := 6.328 \cdot 10^{-7}$ м, $N_0 := 2.2597, N_e := 2.4119$]

Изменения, возникающие в коноскопических картинах при изменениях одной из шести величин - h, A, N_0, N_e, f и λ - и постоянстве остальных, сводятся к следующим пунктам:

1. При увеличении толщины кристалла h число наблюдаемых изохром увеличивается, и коноскопическая картина стягивается к центру, расстояния между соседними изохромами уменьшаются.
2. При увеличении угловой апертуры A (угла раствора конуса лучей, падающих на кристалл) число наблюдаемых изохром увеличивается при одновременном увеличении площади коноскопической картины.
3. При увеличении модуля разности главных показателей преломления $\Delta N = |N_e - N_0|$ и, соответственно, относительного

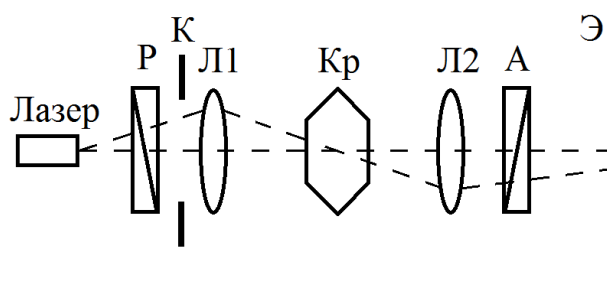
двупреломления $\Delta N/N_0$, число изохром увеличивается, расстояния между ними уменьшаются.

4. При увеличении фокусного расстояния f расстояния между соседними изохромами увеличиваются при одновременном увеличении площади коноскопической картины.
5. При увеличении длины волны излучения λ расстояния между изохромами также увеличиваются при неизменной площади коноскопической картины.

При более детальном рассмотрении отмеченных закономерностей с помощью уравнения (1) устанавливается, что все они имеют нелинейный, а иногда и немонотонный характер и описываются чрезвычайно громоздкими математическими выражениями. Тем не менее, для решения прикладных задач, связанных с оптимизацией условий наблюдения и информативностью коноскопических картин, и эти выводы весьма полезны. Из них, в частности, вытекают преимущества лазерных систем для коноскопии кристаллов по сравнению с поляризационными микроскопами. Конструкции таких микроскопов, их короткофокусные объективы не позволяют размещать и исследовать крупногабаритные кристаллы. При исследованиях тонких пластинок, специально вырезанных из кристаллов, во-первых, теряется информация об оптической однородности оставшегося материала, и, во-вторых, число изохром в коноскопической картине тонкой пластинки, согласно п. 1-2 мало и обычно не превышает нескольких единиц - нескольких десятков. Между тем, именно изохромы больших порядков, их формы зачастую являются наиболее чувствительными к оптическим аномалиям кристалла.

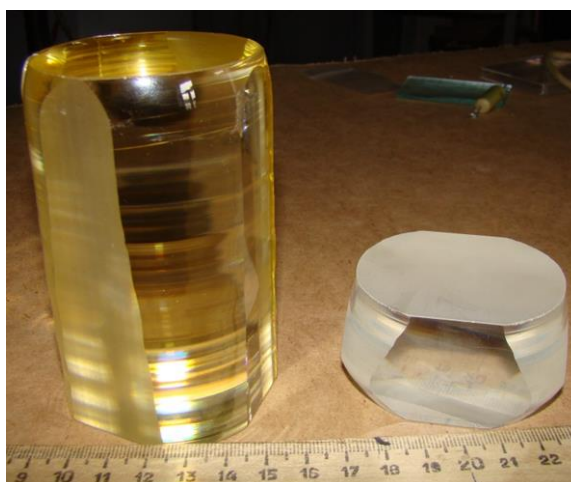
Из п. 1-5 следует также, что после предварительных расчетов с помощью уравнения (1) можно, комбинируя сочетания угловой апертуры осветительной системы A , фокусного расстояния проекционной системы f и длины волны используемого излучения λ , получить максимально информативную коноскопическую картину крупногабаритного кристалла с известной толщиной h и известными показателями преломления N_o и N_e .

4. Оптические аномалии в кристаллах ниобата лития и парателлурита, выявленные методом коноскопии. Для получения коноскопических картин была использована экспериментальная установка, включающая лазер с длиной волны излучения 532 нм, коллиматор, поляризатор, линзу, преобразующую параллельный лазерный пучок в конический, анализатор, проекционную линзу и полупрозрачный матовый экран, за которым находилась цифровая камера, фиксирующая изображения изохром (рис. 3).



Р и с . 3 . Схема получения коноскопических картин с помощью лазерного излучения

Были исследованы крупногабаритные кристаллы ниобата лития (LiNbO_3) диаметром до 70 мм и парателлуриита ($\alpha - \text{TeO}_2$) диаметром до 65 мм, выращенные способом Чохральского (рис. 4). Для наблюдения коноскопических картин перпендикулярно и вдоль оптической оси кристаллов были прополированы пары взаимно параллельных граней больших размеров.



Р и с . 4 . Фотографии кристаллических буль ниобата лития (слева) и парателлуриита (справа), изученных методом коноскопии

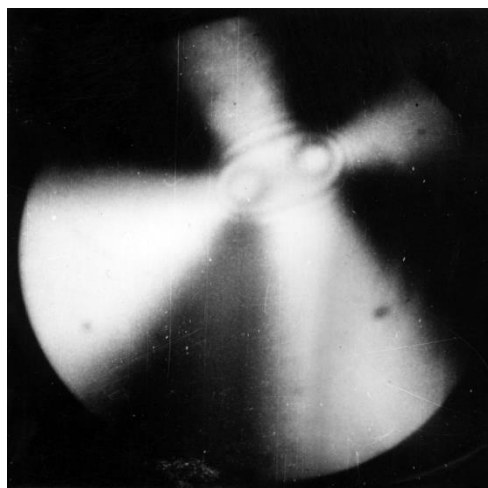
О значительных механических напряжениях в больших объемах теоретически одноосных кристаллов свидетельствует аномальная двуосность. Наиболее явно она заметна в виде темных пятен - выходов наведенных осей в центре коноскопической картины, когда теоретическая оптическая ось совпадает с нормалью к поверхностям образца. Угол между осями $2V$ рассчитывается из геометрии опыта согласно формуле:

$$2V = 2 \arcsin \left\{ \frac{\sin[\arctg(l/2d)]}{N_0} \right\}, \quad (3)$$

где l - расстояние между точками выхода осей на экране, d - расстояние между выходной поверхностью кристалла и экраном.



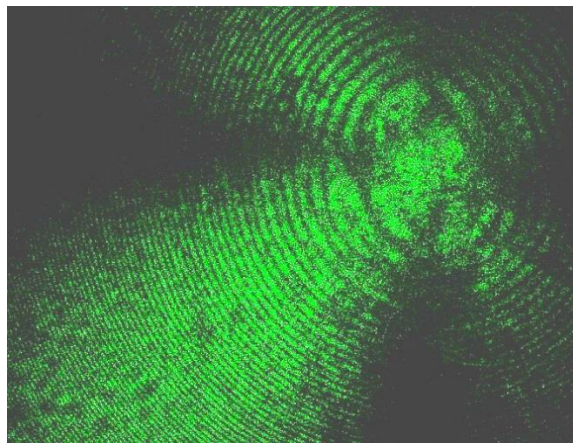
Р и с . 5 . Коноскопическая картина монокристалла ниобата лития. Угол аномальной двуосности $2V = 50'$



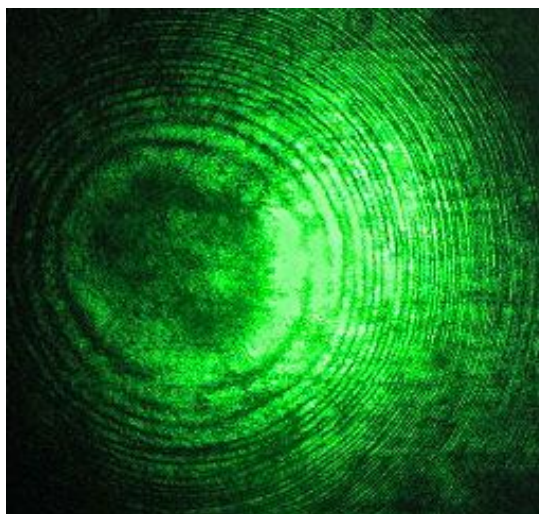
Р и с . 6 . Коноскопическая картина монокристалла парателлурифта. Угол аномальной двуосности $2V = 1^{\circ}20'$

Величины $2V$ могут достигать в наиболее напряженных объемах кристаллов ниобата лития и парателлурифта максимальных значений $1,5^{\circ}$ - $2,5^{\circ}$. При аномальной двуосности менее 10 - $15'$ выходы осей не разрешаются на экране, однако по эксцентриситету эллипсов, которые наблюдаются вместо теоретических окружностей, можно также рассчитать малые значения углов $2V$. На рис. 5-6 представлены

полученные с помощью лазера в направлении оптической оси коноскопические картины крупногабаритных кристаллов ниобата лития и парателлурита со значительной аномальной двуосностью в приповерхностных объемах буль.



Р и с . 7 . Коноскопическая картина центральной части кристаллической були ниобата лития. $2V = 20'$

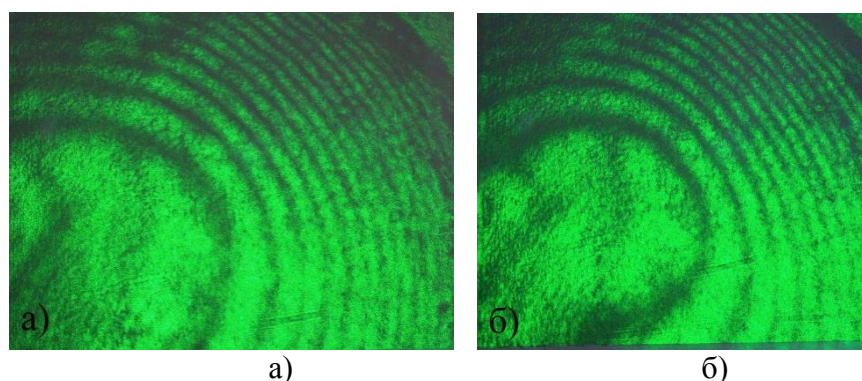


Р и с . 8 . Коноскопическая картина центральной части кристаллической були парателлурита.
 $2V = 13'$

В объемах кристаллов ниобата лития и парателлурита, выращиваемых способом Чохральского, остаточные механические

напряжения обычно распределены таким образом, что аномальная двуосность убывает по радиусу от боковой цилиндрической поверхности к центральной осевой части кристалла, где снижается в несколько раз и достигает приемлемых для оптических материалов значений – менее $20'$ - $15'$. На рис. 7-8 представлены коноскопические картины центральных объемов кристаллов ниобата лития и парателлурита.

Высокая чувствительность коноскопических картин к градиентам показателей преломления, вызванных неравномерным нагревом материала светозвукопровода в работающем акустооптическом устройстве, позволяет непосредственно наблюдать возникновение аномальной двуосности в теоретически одноосных кристаллах. На рис. 9 показаны изменения формы изохром первого порядка в коноскопической картине монокристалла парателлурита, являющегося светозвукопроводом дефлектора. Изохромы наблюдались на полупрозрачном экране, установленном перпендикулярно оптической оси дефлектора. Первая картина (а) соответствует выключенному дефлектору при комнатной температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Форма изохром в виде эллипсов, а не окружностей на этой картине объясняется тем, что оптическая ось дефлектора не совпадает с оптической осью кристалла, и в меньшей степени тем, что входная и выходная грани кристалла не были параллельными. Вторая картина (б) получена через 20 с после включения дефлектора., когда градиент температуры, направленной влево вдоль осей эллипсов изохром, составлял $\sim 5\text{ K/cm}$, на пьезопреобразователь подавалась электрический сигнал мощностью 3,5 Вт и частотой 80 МГц.



Р и с . 9 . Коноскопические картины кристалла парателлурифта - светозвукопровода акустооптического дефлектора, полученные от объемов материала, находящихся на расстоянии 5-10 мм от пьезопреобразователя, расположенного на изображениях слева:
 а) выключенный дефлектор, температура 20 °С;
 б) дефлектор через 20 с после включения, температура материала в левой части картины 35,4 °С, температура материала на правом крае коноскопической картины 33,7 °С; частота ультразвука 80 МГц; акустическая мощность 3,5 Вт; угол между наведенными оптическими осями ~ 45'

Измерив линейные размеры эллипса можно рассчитать расстояние между его фокусами, а по этому расстоянию и расстоянию d от экрана до дефлектора найти угол $2V$ между прямыми, проведенными от дефлектора к фокусам. Зная величины осей эллипса, увеличившего свой эксцентриситет при включенном устройстве, и рассчитав расстояние между новыми фокусами, можно найти новый угол $2V_1$ между прямыми, проведенными из дефлектора в фокусы. Разность углов $2V_1 - 2V_0$ следует считать углом $2V_a$ аномальной двуосности, связанной с неравномерным нагревом кристалла. Несложные расчеты приводят к следующей формуле, в которой учитывается различие углов между осями в кристалле и на воздухе:

$$2V_a = 2V_1 - 2V_0 = 2\arcsin\left\{\frac{\sin\left[\arctg\left(\sqrt{a_1^2 - b_1^2}/d\right)\right]}{n}\right\} - \arcsin\left\{\frac{\sin\left[\arctg\left(\sqrt{a_0^2 - b_0^2}/2d\right)\right]}{N_0}\right\} \quad (4)$$

В (4) a_1, b_1, a_0, b_0 – размеры осей эллипса, d - расстояние между центром выходной грани дефлектора и экраном, n - показатель преломления, который можно считать равным показателю преломления обыкновенного луча. Расчеты согласно (4), в которых $d = 35$ см, $n_0 = 2.28$, с учетом погрешностей дают для величины $2V_a$ значение $43 \pm 1'$. Эта величина должна считаться достаточно большой, поскольку

при входном контроле оптического качества кристаллов парателлуриита, из которых вырезаются светозвукопроводы, от материала требуется, чтобы двуосность не превышала 30' в приповерхностных объемах кристаллов и 20' – во внутренних объемах. Следует, однако, заметить, что при выходе на стационарный режим согласно расчетам, температурные градиенты в материале уменьшаются, а также аномальная двуосность уменьшается до значений 10'-15'.

Оценки механических напряжений σ в объемах кристаллов парателлуриита, в которых наблюдается аномальная двуосность с углом $2V_\alpha$ между наведенными осями, можно провести с помощью формулы (5), представленной в работе [3]:

$$\operatorname{tg} V_\alpha = \frac{\sqrt[4]{[(\pi_{1\mu} - \pi_{2\mu})\sigma_\mu]^2 + (2\pi_{\varepsilon\mu}\sigma_\mu)^2}}{\sqrt{N_o^{-2} - N_\varepsilon^{-2}}}, \quad (5)$$

где $\pi_{i\mu}$ - пьезооптические коэффициенты, V_α - половина угла между осями. Расчеты согласно (5) дают величины механических напряжений для максимальных углов двуосности $\sim 2 \cdot 10^6$ Па, для минимальных углов двуосности (10'-15') $\sim 2 \cdot 10^5$ Па.

Аналогичные эксперименты, проведенные с устройствами других типов, например, с акустооптическими фильтрами на основе крупногабаритных кристаллов парателлуриита, показывают, что даже при выходе на стационарные режимы работы наведенная оптическая двуосность в материале может достичь 30'-1°. Это должно учитываться определенным образом при расчетах и конструировании устройств с целью уменьшения тепловых градиентов в светозвукопроводах и достижения планируемых характеристик акустооптического взаимодействия.

5. Заключение. Высокая чувствительность формы и расположения изохром к дефектам структуры и оптическим аномалиям материала в коноскопических картинах одноосных кристаллов делает метод коноскопии перспективным для контроля оптического качества кристаллов, применяемых в акустооптике, а также для изучения оптических искажений, возникающих из-за выделения тепла в светозвукопроводах работающих акустооптических устройств различных типов. Представленный математический аппарат, разработанный без обычно применявшихся приближений при выводе уравнений изохром, позволяет более точно численно описывать теоретические коноскопические картины и правильно интерпретировать отклонения от них в реальных кристаллах. Среди таких возможностей –

определение вариаций показателей преломления и величин механических напряжений в объемах кристаллов с обнаруженными аномалиями.

Ряд выводов технического характера, следующих из развитой теории, говорит о необходимости усовершенствования коноскопических оптических схем, в том числе, наиболее перспективных, в которых источниками излучения являются лазеры. Применение широких лазерных пучков позволяет исследовать однородность крупногабаритных кристаллов, предназначенных для изготовления светозвукопроводов, а также изучать эволюцию оптических аномалий, возникающих в работающих акустооптических устройствах. Развитие метода должно включать автоматизацию процессов позиционирования и перемещения кристаллов и разработку алгоритмов для компьютерной обработки изображений изохром, позволяющей получать информацию об оптической однородности локальных объемов, расположенных послойно по глубине материала крупногабаритного кристалла или большого светозвукопровода.

Список литературы

1. Стойбер Р., Морзе С. Определение кристаллов под микроскопом // М.: Мир. 1974. С. 124-134.
2. Шувалов Л.А., Урусовская А.А., Желудев И.С. Современная кристаллография. Т.4. Физические свойства кристаллов // М.: Наука. 1981. С. 350-357.
3. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллографии // М.: Наука. 1975. С. 257-259.
4. Cozzzella N., Lebeau M., Majni G., Paone N., Rinaldi D. Quality inspection of anisotropic scintillating lead tungstate (PbWO_4) crystals through measurement of interferometric fringe pattern parameters // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. V. A469 (2001) P. 331-339.
5. Saito K., Sugavara S., Guo J.Q. and Tsai A.P. Determination of Quasi-Crystallographic Orientations of Al-Pd-Mn Icosahedral Phase by Means of Light Figure Method // Jpn. J. Appl. Phys. 2000. V. 39. P. 5173.
6. Sirat G.Y., Psaltis, D. Conoscopic Holography // Opt. Lett. 1985. V. 10. P. 4-6.

7. Brett L., Van Horn, Winter Henning H. Analysis of the conoscopic measurement for uniaxial liquid-crystal tilt angles // *Applied Optics*. 2001. V. 40. № 13. P. 2089-2094.
8. Punin O.Yu., Stuckenberg A.G. Anomalous Crystal Optics of Heterogeneous Crystals // *Crystallography Reports*. 2003. V. 50. №2. P. 297-307.
9. Bajor A., Salbut L., Szwedowski A. Imaging conoscope for investigation of optical inhomogeneity in large boules of uniaxial crystals // *Review of scientific instruments*/ 1998. V. 69. №3. P. 1476-1487.
10. Kolesnikov A.I., Grechishkin R.M. Tretiakov S.A., Molchanov V.Ya., Ivanova A.I., Kaplunova E.I. Vorontsova E.Yu. Laser conoscopy of large-sized optical crystals // *Functional materials and Nanotechnologies 2013*. IOP Publishing. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 49 (2013) 012037 doi: 10.1088/1757-899X/49/1/012037. P. 1-4.
11. Kolesnikov A.I., Grechishkin R.M., Tretiakov S.A., Molchanov V.Ya., Ivanova A.I., Kaplunova E.I., Vorontsova E.Yu. Laser conoscopy of large-sized optical crystals // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2013. V. 49. 012037.
12. Москалев В.А., Нагибина И.М., Полушкина Н.А., Рубин В.Л. Прикладная физическая оптика // С. Петербург. 1995. С. 279-286.
13. Константинова А.Ф., Решетников Б.Н., Бокуть Б.В., Валяшко Е.Г. Оптические свойства кристаллов // Минск: «Навука 1 тэхніка». 1995. С. 98-105.
14. Konstantinova A.F., Rudoy K.A., Nabatov B.V., Evtushenko E.A., Strogonov V.I., and Pikul O.Yu. The influence of Optical Activity on the Intensity and Polarization Parameters of Transmitted Light in Crystals // *Crystallography Reports*. 2003. V. 48. №5. P. 823-831.
15. Борм М., Вольф Э. Основы оптики // М.: Наука. 1973 С. 640-648.
16. Pekka H. Äyräs, Ari T. Friberg, Matti A.J. Kaivola, Martti M. Salomaa. Conoscopic interferometry of surface-acoustic-wave substrate crystals. // *Applied Optics*. 1999. V. 38. №25. P. 5399-5407.

17. Wen T.D., Raptis Y.S., Anastassakis E., Lalov I.I., Miteva A.I. Interference patterns under normal incidence of birefringent, optically active plane parallel plates // I. Appl. Phys D: Appl. Phys. 1995. V. 28. P.2128-2134.
18. Mamedov N., Yamamoto N., Shim Y., Ninomiya Y., Takizawa T. Extended application of light figures to optically active materials with transversally isotropic dielectric function // Jap. J. Appl. Phys. 2003. V. 42. P. 5045-5152.
19. Rudoi K.A., Navatov B.V., Strogonov V., Konstantinova A.F., Alekseeva L.V., Evtushenko E.A., Kidyarov B.I. Conoscopic Figures of Optically Active Uniaxial Crystals // Crystallography Reports. 2003. V. 48. № 2. P. 300-304.
20. Воронцова Е.Ю., Колесников А.И., Молчанова Н.О., Молчанов В.Я., Талызин И.В., Третьяков С.А., Чигиринский С.А., Шелопаев А.В. Анализ распределения интенсивности в коноскопических картинах одноосных и двуосных кристаллов // Вестник ТвГУ. Серия «Физика». 2004. №4(6). С. 106-113.
21. Архипова Н.А., Молчанов В.Я., Воронцова Е.Ю., Лопатин А.А., Колесников А.И., Талызин И.В., Залетов А.Б. Изохромы в однородных кристаллах в виде кривых порядка выше второго // Вестник ТвГУ. Серия «Физика» 2009. Выпуск 6. С. 5-8.
22. Колесников А.И., Каплунов И.А., Талызин И.В., Гречишкин Р.М, Ильяшенко С.Е. Исследование формы изохром в коноскопических картинах одноосных кристаллов // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. №4. С. 410-414.

**INVESTIGATION OF OPTICAL UNIFORMITY OF LITHIUM
NIOBATE AND PARATELLURITE CRYSTALS BY THE METHOD
OF CONOSCOPY**

К.А. Morozova, Е.І. Kaplunova, Е.V. Shmeleva, M.D. Kuzmina

Tver State University, 170100 Tver, Russia

Theoretical conoscopic figures were calculated for different angles between optical axis and normal to surface of ideal crystals making use of exact isochrome equation. Large-sized single crystals of lithium niobate and paratellurite were examined experimentally with a setup for laser conoscopy. The evolution of conoscopic figures were studied under the working conditions of acousto-optic devices.

Keywords: *optical anomalies, paratellurite, lithium niobate, method of conoscopy, acoustooptic devices, angular aperture, piezooptic effect*

Об авторах:

МОРОЗОВА Кристина Александровна – магистрант физико-технического факультета ТвГУ.

КАПЛУНОВА Елена Ивановна – магистрант физико-технического факультета ТвГУ.

ШМЕЛЕВА Екатерина Валерьевна – магистрант физико-технического факультета ТвГУ.

КУЗЬМИНА Мария Дмитриевна – магистрант физико-технического факультета ТвГУ.