

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
УНИКАЛЬНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Великовский Дмитрий Юрьевич

КРИСТАЛЛЫ СЕМЕЙСТВА КАЛИЙ-РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ
ВОЛЬФРАМАТОВ КАК МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АКУСТООПТИКИ

Специальность: 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в ФГБУН «Научно-технологический центр уникального приборостроения» РАН.

Научный руководитель: **Пожар Витольд Эдуардович,**
д.ф.-м.н., ФГБУН «Научно-технологический центр уникального приборостроения» РАН, зав.отд.

Научный консультант: **Мазур Михаил Михайлович,**
д.т.н., ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», зав.лаб.

Официальные оппоненты: **Писаревский Юрий Владимирович,**
д.ф.-м.н., ФГБУН «Институт кристаллографии имени А.В. Шубникова» РАН, гл.н.с.

Князев Григорий Алексеевич,
к.ф.-м.н, кафедра фотоники и физики микроволн физического факультета Московского Государственного Университета имени М.В. Ломоносова, доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования **“Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»”**

Защита состоится «10» декабря 2015 года в 15-30 на заседании диссертационного совета Д 501.001.66 на базе Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Физический факультет МГУ, ауд. ЦФА.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке МГУ имени М.В.Ломоносова и на сайте <http://phys.msu.ru/rus/research/disser/sovets-D501-001-66/>

Автореферат разослан «6» ноября 2015 года

Ученый секретарь диссертационного совета Д 501.001.66,
к.ф.-м.н.

И.Н.Карташов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Устройства для управления оптическим излучением находят широкое применение, связанное с ростом мощности лазерных излучателей. Акустооптические (АО) устройства успешно и эффективно используются для модуляции светового излучения и его управляемого отклонения. Однако, разнообразие эффективных АО материалов невелико, и такие свойства как лучевая стойкость не входили в число приоритетных характеристик, по которым они отбирались.

Новым направлением поиска является исследование акустооптических свойств лазерных материалов. Кристаллы семейства калий-редкоземельных вольфраматов $KRE(WO_4)_2$ (далее: *KREW*), в особенности калий-гадолиниевый вольфрамат $KGd(WO_4)_2$, являются широко известными лазерными материалами. В диссертации рассмотрены этот и другие кристаллы семейства – калий-лютециевый вольфрамат $KLu(WO_4)_2$ (кратко: *KLuW*) и калий-иттербиевый вольфрамат $KYb(WO_4)_2$ (кратко: *KYbW*). Особенности, связанные с использованием в качестве *RE*-элемента других лантаноидов, изучаются начиная с 70-х годов и до настоящего времени [1]. Кристаллы *KREW*, легированные иттербием, широко используются для получения импульсного излучения при пассивной модуляции мод [2]. Некоторые из них, например *KGW*, обладают очень высокой лучевой стойкостью, которая достигает 180 ГВт/см^2 при длительности импульсов $\tau = 20 \text{ нс}$ [3]. Это на порядок и более превышает показатели для любых используемых в акустооптике материалов. Кристаллы *KGW* так же являются активными материалами для комбинационного (рамановского) рассеяния с множеством уровней переходов.

В качестве акустооптических затворов для мощных твердотельных лазеров в настоящее время используются АО модуляторы на кварце SiO_2 , причем из-за высокой мощности управляющего сигнала устройства принудительно охлаждаются водой. Применение модуляторов на новых материалах с высоким акустооптическим качеством и лучевой стойкостью позволит отказаться от охлаждения АО ячейки и упростить конструкцию лазеров.

В ходе работы были исследованы фотоупругие и упругие свойства кристаллов со структурой *KREW*. Кристаллическая структура материалов была широко изучена ранее [4]. Существуют три стабильные структурные фазы. Низкотемпературная имеет моноклинную элементарную ячейку и является наиболее известной, благодаря своим лазерным свойствам. Это материалы с низкосимметричной элементарной ячейкой

кристаллографического класса $2/m$, и характеризуются оптической двуосностью. Что придает их исследованию дополнительную сложность и интерес, поскольку дифракция света на ультразвуковой волне в оптически двуосных средах до сих пор остается недостаточно широко исследованной областью акустооптики. Известно, что АО взаимодействие в таких средах имеет существенные особенности. Однако устройств, реализующих эти особенности, пока не разработано. Таким образом, поиск и освоение эффективных и технологичных оптически двуосных акустооптических кристаллов является важной практической задачей.

Цели и задачи диссертационной работы

1. Исследование акустических свойств кристаллов семейства $KRE(WO_4)_2$.
2. Исследование акустооптических свойств кристаллов семейства $KRE(WO_4)_2$.
3. Разработка АО устройств с новыми свойствами для управления лазерным излучением высокой мощности.

Положения, выносимые на защиту

1. Измерены значения скоростей звука и вычислены на их основе упругие константы кристаллов $KGd(WO_4)_2$, $KYb(WO_4)_2$ и $KLu(WO_4)_2$, позволяющие определять скорости и поляризации звуковых волн для произвольных направлений распространения в этих материалах, что необходимо для расчета характеристик акустооптических устройств.
2. Измеренные значения коэффициентов акустооптического качества кристаллов $KGd(WO_4)_2$, $KYb(WO_4)_2$ и $KLu(WO_4)_2$, и вычисленные по этим данным фотоупругие модули, позволяют определить удельную эффективность «изотропной» дифракции световых волн на фазовой дифракционной решетке, созданной ультразвуком, для произвольных направлений распространения.
3. Разработанные и апробированные методы определения значений компонент тензора упругости $c_{\alpha\beta}$ и фотоупругости $p_{\alpha\beta}$, позволяют проводить измерения и вычисления $c_{\alpha\beta}$ и $p_{\alpha\beta}$ для моноклинных кристаллов класса $2/m$.
4. Выявлены акустооптические характеристики лазерных кристаллов $KGd(WO_4)_2$, $KYb(WO_4)_2$ и $KLu(WO_4)_2$, позволяющие создавать на их основе эффективные устройства для управления высокоинтенсивным лазерным излучением.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в работе, получены диссертантом лично, либо в соавторстве при его непосредственном участии.

Научная новизна результатов и выводов

1. В полном объеме исследованы акустические свойства монокристаллов семейства калий-редкоземельных вольфраматов $KRE(WO_4)_2$, где $RE = Gd, Yb$ и Lu . Впервые определены полные матрицы **констант жесткости** сред $c_{\alpha\beta}$ в кристаллофизической системе координат. Рассчитаны и построены угловые диаграммы скоростей звука в пяти плоскостях, наиболее интересных с точки зрения практического применения. Показано, что значения скоростей обладают значительной угловой дисперсией, что необходимо учитывать и можно использовать при разработке акустических и акустооптических устройств на основе рассматриваемых кристаллов.
2. Впервые были измерены **коэффициенты акустооптического качества M** в случае изотропной дифракции (с сохранением плоскости поляризации) в $KRE(WO_4)_2$, где $RE = Gd, Yb$ и Lu .
3. На основе данных о коэффициентах M определены величины соответствующих **фотоупругих модулей $p_{\alpha\beta}$** . Полученные результаты позволяют утверждать, что кристаллы семейства $KRE(WO_4)_2$ являются в несколько раз более эффективными акустооптическими материалами, чем кварц SiO_2 .

Практическая значимость работы

1. **Показано**, что кристаллы семейства калий-редкоземельных вольфраматов $KRE(WO_4)_2$, где $RE = Gd, Yb$ и Lu , могут быть эффективно применены в областях, использующих акустооптические эффекты и требующих высокой лучевой стойкости.
2. Разработан и испытан **АО модулятор с высокой лучевой стойкостью**, слабо чувствительный к поляризации падающего света.
3. Предложены **схемы** нескольких акустооптических устройств на основе исследуемых оптически двуосных материалов. Показана возможность создания принципиально новых устройств акустооптики, например, дефлектора с большой угловой апертурой. Проведена оценка возможных параметров таких устройств, в том числе определены их рабочие ультразвуковые частоты. Проанализирована возможность создания **устройства нового типа**, обеспечивающего и генерацию излучения, и управление добротностью в одном кристалле.

4. Разработаны и аттестованы две **методики** Государственной службы стандартных справочных данных ГСССД: «Методика экспериментального определения упругих характеристик лазерных кристаллов моноклинной сингонии для задач акустооптики» и «Методика экспериментального определения фотоупругих характеристик лазерных кристаллов моноклинной сингонии для задач акустооптики».

Апробация работы

Основные результаты исследований докладывались на следующих международных и всероссийских конференциях:

1. 21st Annual Student Conference «Week of Doctoral Student 2012», Prague, Czech Republic, 2012;
2. 15th international conference on “Laser Optics 2012”, St. Petersburg, Russia, 2012;
3. VII Международная конференция “Фундаментальные проблемы оптики-2012” Санкт-Петербург, Россия, 2012 г.;
4. Фотоника и информационная оптика, МИФИ, Москва, Россия, 2013 г.;
5. Научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке», Менделеево, Россия, 2013г.;
6. ICONO/LAT’13 (International Conference on Coherent and Nonlinear Optics; and Lasers, Applications, and Technologies), Moscow, Russia, 2013;
7. 6-ая и 7-ая конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» ARMIMP 2013 и 2014, Суздаль, Россия;
8. XIV Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» («Волны-2014»), Красновидово, Россия, 2014 г.;
9. 12th School on Acousto-Optics and Applications, Druskininkai, Lithuania, 2014.

Разработанные методы сформулированы в виде сертифицированных методик:

1. Методика ГСССД МЭ 214 - 2013; Росс. научно-техн. центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия;
2. Методика ГСССД МЭ 225 - 2014; Росс. научно-техн. центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия.

Публикации

Материалы диссертационной работы опубликованы в 15 печатных работах, в том числе в 4 статьях в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК, а также в 9 докладах в сборниках трудов конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из Введения, 3 Глав и Заключения, изложена на 109 страницах и содержит 27 рисунков, 13 таблиц, 1 Приложение и 111 библиографических ссылок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее основные задачи, показана научная новизна и практическая значимость результатов, представлена структура диссертации.

В **Главе 1** даётся определение упругих характеристик кристаллических материалов кристаллографического класса $2/m$, к которым относятся кристаллы *KREW*. Упругие характеристики определяют механические и акустические свойства кристаллической среды – реакцию кристалла на механические нагрузки, что прямо или косвенно учитывается при использовании материала в любом качестве.

При упругой деформации S_{kl} в кристаллической среде возникают напряжения T_{ij} , описываемые при малых значениях законом Гука: $T_{ij} = C_{ijkl} S_{kl}$, где $i, j, k, l = 1, 2, 3$. Коэффициенты C_{ijkl} носят название коэффициентов упругости (констант жесткости) и составляют тензор четвертого ранга, имеющий 81 элемент. Благодаря свойству симметрии тензора упругости можно использовать сокращенную (редуцированную) запись $c_{\alpha\beta}$, где индексы $\alpha, \beta = 1, \dots, 6$ получаются попарным сворачиванием индексов i, j, k, l . В моноклинных кристаллах редуцированная матрица констант жесткости $c_{\alpha\beta}$ имеет 13 ненулевых элементов. Далее скорости V собственных мод акустических волн находятся из волнового уравнения $C_{jkl} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}$ при стандартном поиске решения в виде гармонической функции. Решая обратную задачу, по известным скоростям распространения упругих волн в разных направлениях, теоретически возможно найти константы жесткости C_{ijkl} .

Для определения скоростей использовался фазо-импульсный метод, основанный на обратном пьезоэффekte и двух-импульсной модуляцией исходного сигнала.

Регистрировались частотные резонансы между сложением импульсов, в противофазе проходящих через буфер в форме прямоугольного параллелепипеда, изготовленный из известного материала (например, из плавленого кварца), и через кристаллический образец из исследуемого материала такой же формы, что позволило определять скорость распространения упругих волн.

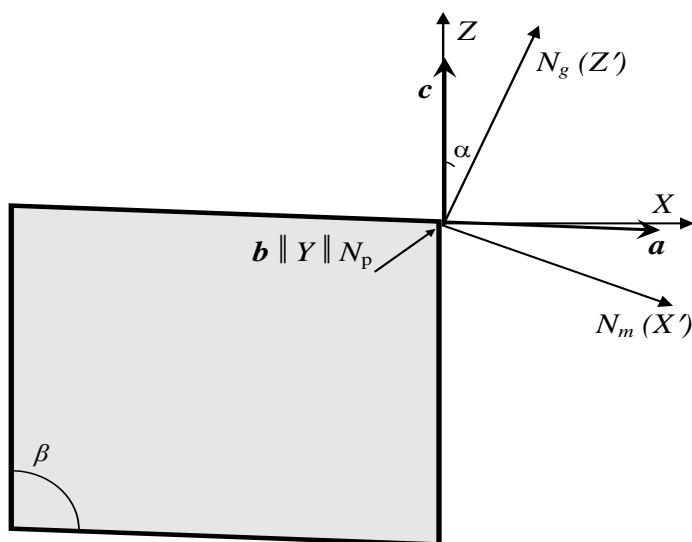


Рис.1. Используемые системы координат. Вектора a , b и c составляют базис элементарной ячейки, оси X , Y и Z относятся к кристаллофизической системе координат, N_m , N_p и N_g – оси оптической индикатрисы. Вектор b и оси Y , N_p направлены перпендикулярно плоскости рисунка и совпадают между собой. Угол между кристаллографическими осями $\beta \approx 94^\circ$. Параллелограмм отображает ориентацию граней моноклинного кристалла.

Необходимые для однозначного определения констант жесткости C_{ijkl} значения скоростей звука и направления их распространения можно выбрать множеством разных способов, и удобнее всего связать их с осями кристаллофизической системы координат. При выборе **систем координат** для кристаллов моноклинной сингонии существуют общепринятые рекомендации [5]:

- 1) ось Z направляется вдоль минимального вектора трансляции c элементарной ячейки кристалла, несовпадающей с осью симметрии второго порядка;
- 2) ось Y ориентирована вдоль оси симметрии второго порядка таким образом, чтобы система координат XYZ была правой;
- 3) ось X лежит внутри тупого угла элементарной ячейки и перпендикулярна осям Y и Z .

Другая система координат, называемая диэлектрической, связана с осями оптической индикатрисы: N_m , N_p и N_g . При этом ось N_p совпадает с осью симметрии

второго порядка кристалла и, соответственно, с осью Y , а оси N_m и N_p лежат в плоскости XZ и образуют с осями X и Y угол α (см Рис.1). Вследствие дисперсии значение угла α зависит от длины волны света λ и может изменяться в видимом диапазоне почти на 2° . Обе системы координат являются ортонормированными декартовыми.

ТАБЛИЦА 1. Значения коэффициентов упругости $c_{\alpha\beta}$ кристаллов $KRE(WO_4)_2$ в кристаллофизической системе координат (X , Y и Z).

Константы жесткости	$c_{\alpha\beta} \times 10^9$, кг/(м·с ²)			Погрешность, $\times 10^9$, кг/(м·с ²)
	KGd(WO ₄) ₂	KYb(WO ₄) ₂	KLu(WO ₄) ₂	
c_{11}	181.4	187.5	189.0	0.6
c_{12}	86.3	85.7	86.1	0.6
c_{13}	61.5	60.5	60.6	0.5
c_{15}	-22.4	-25.7	-26.3	0.4
c_{22}	171.7	182.8	185.2	0.6
c_{23}	67.5	68.2	67.9	0.6
c_{25}	-12.9	-15.3	-15.3	0.4
c_{33}	135.3	165.4	168.8	0.6
c_{35}	4.8	2.7	2.8	0.1
c_{44}	69.7	68.2	68.5	0.2
c_{46}	-2.5	-11.6	-13.4	0.1
c_{55}	41.9	45.2	46.5	0.2
c_{66}	39.5	29.0	26.4	0.1

Скорости распространения упругих волн в кристалле KLu(WO₄)₂ составили от 1711 м/с для сдвиговых волн до 5242 м/с для продольных. Значения скоростей для других исследованных материалов имеют несколько меньший разброс, и определены с погрешностью ± 2 м/с. Затухание ультразвука не более 3 дБ/см для сдвиговой моды при частотах 75 – 100 МГц и слабо заметно для продольной волны при длине образца 3 см.

Для однозначного определения 13-ти констант жесткости достаточно 16-ти значений скорости распространения упругих волн вдоль выбранных 6-ти различных направлений. Измерение скорости звуковых волн производилось двух-импульсным методом на плоскопараллельно ориентированных образцах кристаллов. Точность ориентации образцов, на которых выполнялись измерения скоростей звука, была не хуже

5'. Длины различных образцов лежали в диапазоне от 6.5 до 25 мм. Исследования проводилась при комнатной температуре от 18 до 24 градусов Цельсия. При измерении скоростей упругих волн был использован частотный диапазон 25 – 100 МГц, при этом для каждого направления частота перестраивалась в ограниченном интервале, который составлял в разных случаях от 15 до 40 МГц. На каждом образце регистрировалось от 90 до 300 частотных резонансов.

При расчете **констант жесткости** использовался метод, предложенный К.С. Александровым [6], основанный на решении уравнений Кристоффеля для соответствующих направлений. Симметрия моноклинных кристаллов позволяет непосредственно из измеренных скоростей вычислить только 4 упругих модуля: c_{22} , c_{44} , c_{66} и c_{46} . Шесть модулей (c_{11} , c_{33} , c_{55} , c_{13} , c_{15} и c_{35}) однозначно определяются из системы уравнений. Оставшиеся три модуля (c_{12} , c_{23} и c_{25}) попарно определяются из условия равенства нулю детерминанта уравнения Кристоффеля.

Таким образом, **впервые** были определены константы жесткости и полная **матрица упругости** материалов $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$, $\text{KYb}(\text{WO}_4)_2$ и $\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$, имеющих моноклинную структуру кристаллографического класса $2/m$.

По найденным значениям матрицы коэффициентов упругости $c_{\alpha\beta}$ материала путем решения волнового уравнения для различных направлений можно определить угловые зависимости скоростей в произвольных плоскостях.

На Рис.2 приведены диаграммы скоростей распространения упругих волн в одном из исследованных материалов в пяти плоскостях, наиболее интересных с точки зрения создания АО устройств. Приведены зависимости для кристалла $\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ который в исследованном семействе отличается наиболее выраженной акустической анизотропией и наименьшей скоростью ультразвука – свойствами, важными для достижения высоких характеристик АО устройств.

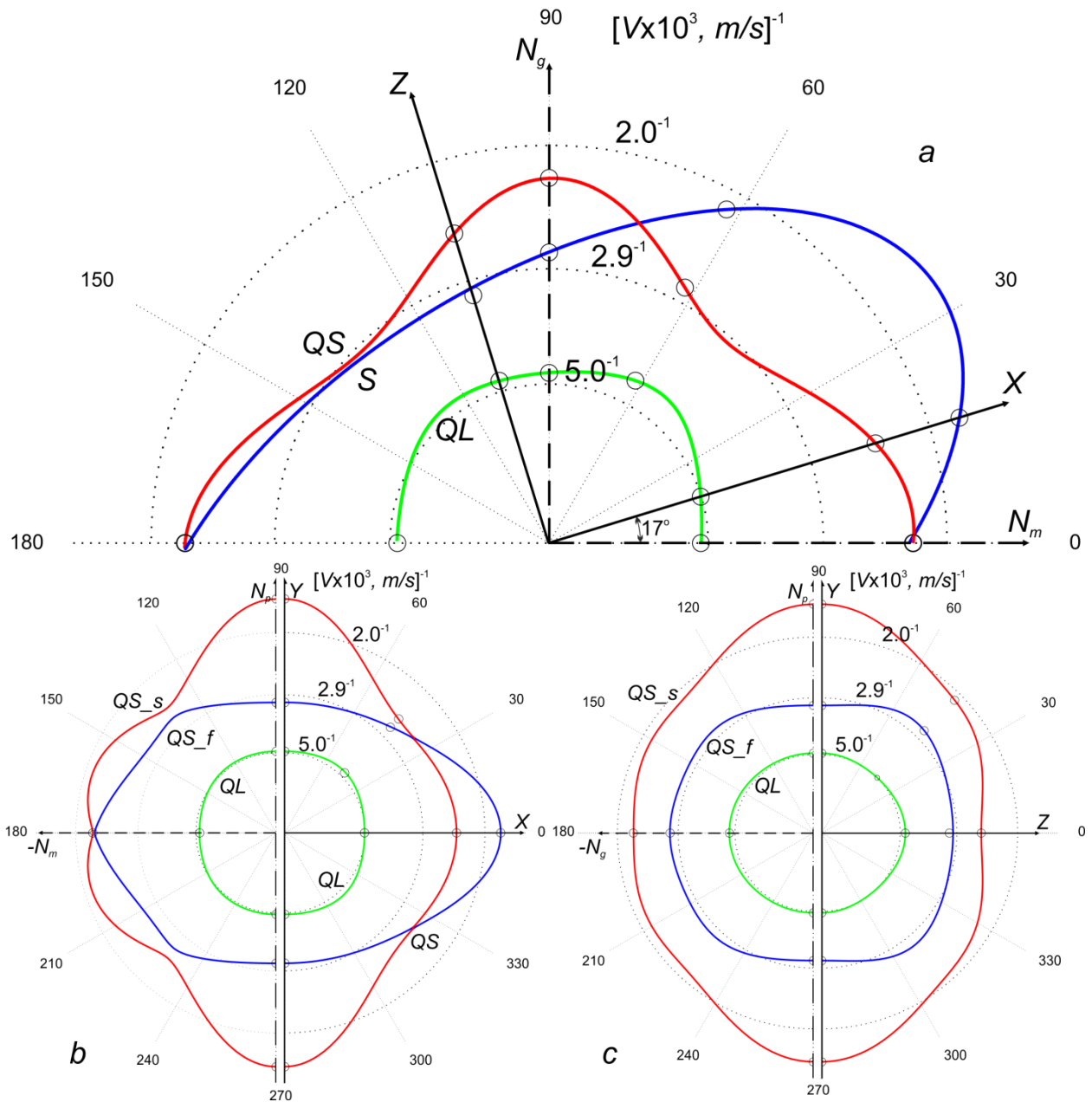


Рис.2. Акустические свойства кристаллов $\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$. Сечения поверхности медленностей (V^{-1}) ультразвуковых волн в 5-ти различных плоскостях: (a) плоскостью XZ; (b) плоскостями $N_m N_p$ (слева) и XY (справа); (c) – плоскостями $N_p N_g$ (слева) и YZ (справа). S – сдвиговая мода, QL – квази-продольная мода, QS – квази-сдвиговая мода, QS_f – “медленная” квази-сдвиговая мода, и QS_s – “быстрая” квази-сдвиговая мода. Отмечены измеренные экспериментально скорости.

Таким образом, в **Главе 1** показаны результаты исследования объемных акустических свойств монокристаллов $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$, $\text{KYb}(\text{WO}_4)_2$ и $\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$, проведенного впервые. Получены полные матрицы констант упругости сред $c_{\alpha\beta}$, и по определенным константам рассчитаны и построены диаграммы скоростей звука. Сечения поверхности медленностей, построенных по определенным константам жесткости $c_{\alpha\beta}$,

совпадают с поверхностью акустической медленности, полученной экспериментально с помощью визуализации дифракционной картины методом Шеффера-Бергмана.

Исследованию фотоупругих характеристик кристаллов *KREW* посвящена **Глава 2**. Кристаллы $KRE(WO_4)_2$ прозрачны в видимом и ИК-диапазонах, демонстрируют заметную оптическую анизотропию и характеризуются значительным акустооптическим эффектом. Например, *KLuW* имеет диапазон прозрачности 0.4-5.5 мкм, который превышает диапазон прозрачности широко применяемого в акустооптике TeO_2 . Фотоупругостью называют изменение оптических свойств среды под действием механической нагрузки. Они зависят от акустической и оптической анизотропии, и в общем случае описываются тензором P_{ijkl} , который ввиду симметрии может быть сведен к матрице $p_{\alpha\beta}$, где $\alpha, \beta = 1-6$. В кристаллах моноклинной сингонии редуцированная матрица $p_{\alpha\beta}$ имеет 20 элементов.

Изменение компонент тензора диэлектрической непроницаемости (описывающего эллипсоид Френеля) ΔB_{ij} прямо пропорционально величине упругой деформации кристалла S_{kl} : $\Delta B_{ij} = P_{ijkl} S_{kl}$. Изменения оптической индикатрисы, описываемой тензором диэлектрической проницаемости ε_{ij} , даются следующим выражением:

$$\Delta \varepsilon_{ij} = -\varepsilon_{mi} \varepsilon_{nj} P_{ijkl} S_{kl}.$$

Изменения показателя преломления, вызванные бегущей в среде ультразвуковой волной, носят периодический по пространству характер, и для распространяющегося светового пучка они играют роль фазовой дифракционной решетки. В результате селективной (брэгговской) дифракции света на такой структуре происходит отклонение светового пучка с длиной волны, удовлетворяющей условию Брэгга между длиной волны света λ и частотой ультразвука f . Это явление используется для определения фотоупругих характеристик материала методом Диксона [7] по интенсивности дифрагированного (отклоненного) светового потока $I_d \sim I_i M W_{ac} L^2$. Коэффициент акустооптического качества материала M (также обозначаемый в литературе M_2): определяется эффективным значением фотоупругого модуля p_{eff} и другими характеристиками материала: плотностью ρ и показателем преломления кристалла n , а также скоростью звука V . Одной из принципиальных проблем этого метода является то, что коэффициент АО качества M выражается квадратично через значение фотоупругого модуля p_{eff} . Потому из значения M нельзя напрямую найти знак соответствующего фотоупругого

модуля. В некоторых простых геометриях значение имеет только абсолютная величина фотоупругого коэффициента, но в общем случае знак величины важен, поскольку эффективное значение фотоупругого модуля p_{eff} определяется как алгебраическая сумма нескольких коэффициентов $p_{\alpha\beta}$.

Определение упруго-оптических характеристик кристаллов осуществлялось в диэлектрической системе координат. Выбор системы отсчета обусловлен, прежде всего, тем, что при фотоупругом эффекте происходит анализ компонент деформации оптической индикатрисы в ее осях симметрии, т.е. в диэлектрических осях N_m , N_p и N_g . Таким образом, были определены фотоупругие модули $p_{\alpha\beta}^*$. Экспериментальное исследование проведено с образцами, описанными в **Главе 1**, и при таких же условиях.

В работе определены фотоупругие модули верхней половины матрицы, описывающие так называемую изотропную дифракцию, при которой поляризация света сохраняется. Этому соответствуют коэффициенты $p_{\alpha\beta}$ с первым индексом равным 1 ($N_m \rightarrow N_m$), 2 ($N_p \rightarrow N_p$) или 3 ($N_g \rightarrow N_g$).

При анализе введены следующие обозначения: $M_{\gamma\delta}^{\alpha\beta}(\kappa)$ – коэффициент АО качества, измеренный для падающей световой волны, распространяющейся в направлении κ с поляризацией в направлении α , и принимающей после АО взаимодействия поляризацию β , при дифракции на акустической волне, распространяющейся в направлении γ со смещением по оси δ . При этом для простоты оси диэлектрической системы координат обозначаются следующим образом: m соответствует оси N_m , p – оси N_p (которая совпадает с Y), а g – оси N_g .

При дифракции света эффективный коэффициент АО качества в общем виде задается следующей формулой для собственной оптической моды:

$$M_{\gamma\delta}^{\alpha\beta}(\kappa) = \frac{n_\alpha^3 n_\beta^3}{\rho V^3} \left(p_{i1} \tilde{u}_{mm}^{(\gamma\delta)} + p_{i2} \tilde{u}_{pp}^{(\gamma\delta)} + p_{i3} \tilde{u}_{gg}^{(\gamma\delta)} + 2p_{i4} \tilde{u}_{ng}^{(\gamma\delta)} + 2p_{i5} \tilde{u}_{mg}^{(\gamma\delta)} + 2p_{i6} \tilde{u}_{nm}^{(\gamma\delta)} \right)^2, \quad (1)$$

где $i = 1, \dots, 6$. Здесь ρ – плотность кристалла, $\tilde{u}_{\sigma\tau}^{(\gamma\delta)} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_\sigma}{\partial x_\tau} + \frac{\partial u_\tau}{\partial x_\sigma} \right) = \frac{1}{2} (a_\sigma m_\tau + a_\tau m_\sigma)$,

$u_{\sigma\tau}$ – компонента тензора деформации, вызываемой акустической волной, возбуждаемой в направлении оси γ с вектором смещения по оси δ . В последнем выражении a_σ – проекция вектора поляризации ультразвуковой волны, m_τ – соответствующая проекция волнового вектора. Компоненты тензора деформации определяются из

собственного значения и собственного вектора уравнения Кристоффеля для соответствующей акустической моды.

ТАБЛИЦА 2. Значения коэффициентов акустооптического качества $M_{\gamma\delta}^{\alpha\beta}(K)$ изотропной дифракции в кристаллах $KRE(WO_4)_2$, и значения соответствующих фотоупругих модулей $p_{\alpha\beta}^*$ в диэлектрической системе координат $(N_m, N_p$ и $N_g)$.

	KGd(WO ₄) ₂		KYb(WO ₄) ₂		KLu(WO ₄) ₂		
	M	$p_{\alpha\beta}^*$	M	$p_{\alpha\beta}^*$	M	$p_{\alpha\beta}^*$	
$M_{mm}^{mm}(g)$	0.75	0.11	0.68	0.10	0.74	0.10	p_{11}^*
$M_{mm}^{pp}(g)$	1.0	0.13	1.3	0.14	1.9	0.17	p_{21}^*
$M_{mm}^{gg}(p)$	1.3	0.13	1.1	0.12	0.89	0.11	p_{31}^*
$M_{pp}^{mm}(g)$	1.8	0.14	0.57	0.08	1.1	0.11	p_{12}^*
$M_{pp}^{pp}(g)$	0.11	0.04	0.30	0.06	0.22	0.05	p_{22}^*
$M_{pp}^{gg}(m)$	0.78	0.09	0.68	0.08	0.57	0.08	p_{32}^*
$M_{gg}^{mm}(p)$	6.1	0.23	8.7	0.26	7.7	0.28	p_{13}^*
$M_{gg}^{pp}(m)$	5.9	0.23	7.4	0.29	11	0.35	p_{23}^*
$M_{gg}^{gg}(p)$	11	0.28	14	0.35	10	0.31	p_{33}^*
$M_{gm}^{mm}(p)$	3.0	−0.053	0.7	0.011	0.77	0.012	$ p_{15}^* $
$M_{gm}^{pp}(m)$	0.5	−0.025	<0.06	−0.009	0.1	−0.009	$ p_{25}^* $
$M_{gm}^{gg}(p)$	19	−0.13	15	0.092	14	0.093	$ p_{35}^* $

a) Значения коэффициентов M приведены в общепринятых единицах $10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$;

Модули p_{12} , p_{22} и p_{32} вычисляются, соответственно, из коэффициентов АО качества $M_{pp}^{mm}(g)$, $M_{pp}^{pp}(g)$, $M_{pp}^{gg}(m)$ или $M_{pp}^{pp}(m)$. Остальные модули входят в выражение для эффективного значения коэффициентов АО качества в комбинации (1), а потому их можно найти только из решения систем уравнений. Это связано с тем фактом, что упругие волны, распространяющиеся вдоль направлений N_g и N_m , не являются чистыми модами, а представляют собой квазипродольные и квазиперечные волны, которые в

общем случае имеют различные ненулевые составляющие в проекции на кристаллофизические оси. Что бы отбросить неправдоподобные значения фотоупругих модулей p_{15}^* , p_{25}^* и p_{35}^* , пришлось воспользоваться следующим соображением. Обычно, величины таких модулей не превосходят значения первых девяти компонент матрицы: $|p_{\alpha\beta}| < p_{\alpha\alpha}$ ($\alpha = 1, 2, 3, \beta = 1, 2, 3, 5$). Однако, такое утверждение не может претендовать на абсолютность, поскольку не обосновано существующими математическими моделями, связывающих упругие и фотоупругие свойства кристаллов с их симметрией. Из-за этого модули p_{15}^* , p_{25}^* и p_{35}^* , а также их значения, указаны как модули величин.

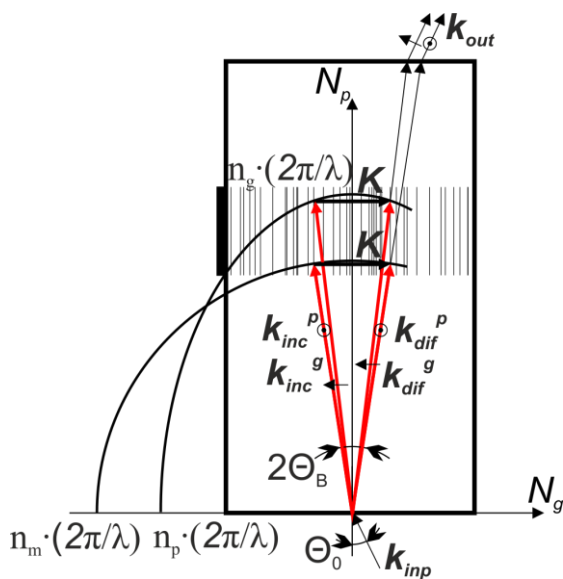
Таким образом, общая погрешность определения упруго-оптических модулей составила примерно 10% для наибольших значений $p_{\alpha\beta}$. Для остальных модулей, значения p которых могут оказаться близки к нулю, можно считать их абсолютную погрешность той же, что и для наибольших. Соответственно абсолютная погрешность составила примерно ± 0.04 .

В **Главе 2** приведены результаты исследования эффективности дифракции света на фазовой дифракционной решетке, созданной бегущей ультразвуковой волной для монокристаллов семейства $KRE(WO_4)_2$, где $RE = Gd, Yb$ и Lu . Получены коэффициенты акустооптического качества M в случае изотропной дифракции с сохранением поляризации света. По определенным значениям коэффициента качества M найдены 12 значений фотоупругих модулей $p_{\alpha\beta}$, характеризующие изотропную дифракцию, из 20 ненулевых значений компонент фотоупругого тензора.

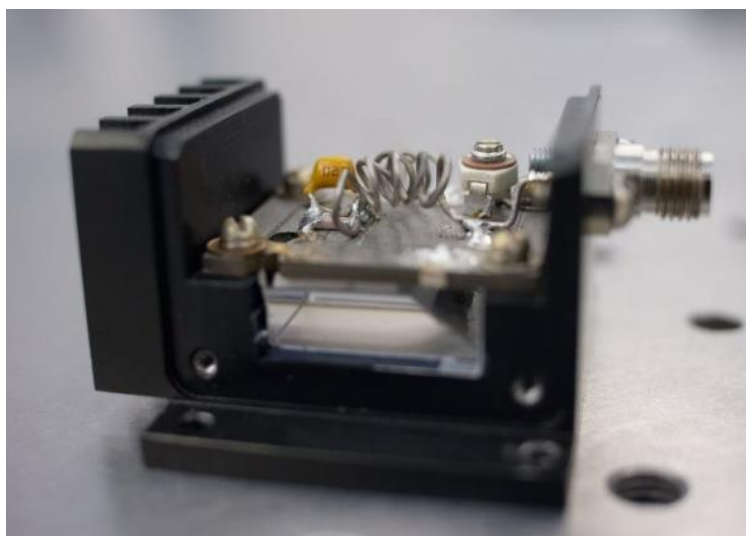
В **Главе 3** представлено изучение семейства лазерных кристаллов $KRE(WO_4)_2$ в качестве акустооптических материалов. Они могут использоваться для создания устройств управления лазерным излучением высокой мощности. Рассмотрены перспективные классические устройства (модулятор, дефлектор, фильтр) и проведена оценка достижимых характеристик. Проанализирована возможность создания устройства нового типа, обеспечивающего и генерацию излучения, и управление добротностью.

Предложен, разработан и испытан **модулятор произвольно поляризованного излучения**. Как видно из диаграммы взаимодействия (см. Рис.3б), на одной и той же ультразвуковой волне K , распространяющейся в направлении оси N_g диэлектрической системы координат в ограниченном пространстве, возможна изотропная (без изменения

поляризации) дифракция обеих световых волн поляризаций N_m и N_p . Важно, что эффективность АО дифракции на продольной моде ультразвука в выбранной геометрии оказалась для обеих поляризационных составляющих примерно одинаковой. Таким образом, после дифракции соотношение этих компонент не изменится. Для практики важно также, что акустическая волна, распространяющаяся в указанном направлении, не испытывает сноса в плоскости $N_p N_g$, и незначительно, не более чем на 1° , отклоняется в плоскости $N_m N_g$ из-за анизотропии.



(а)



(б)

Рис.3. Диаграмма волновых векторов акустооптического взаимодействия поляризационно нечувствительного модулятора (а), и акустооптический модулятор, изготовленный на кристалле $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ (б). Прямоугольником схематично обозначена АО ячейка.

Эффективность акустооптической модуляции (АОМ) испытанного устройства достигала 80% на длине волны света 532 нм при 1 Вт управляющей мощности на частоте ультразвука около 85 МГц, поданной на пьезопреобразователь шириной не более 1.5 мм и длиной АО взаимодействия 22 мм. Эффективность АОМ достигала 98% на 633 нм при 2.5 Вт при тех же условиях. В ближнем ИК-диапазоне эффективность оказалась ниже: 64% на 4 Вт при 1.06 мкм. Таким образом, по эффективности дифракции модулятор на KGW примерно втрое уступает существующим устройствам на кристалле TeO_2 , которые используют дифракцию на продольной L -моду ультразвука в направлении $[001]$ света с поляризацией вдоль $[100]$ и коэффициентом АО качества $M = 34.5 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$. При этом модулятор на KGW имеет на несколько порядков более высокую оптическую стойкость,

а по сравнению с модуляторами на кварце требует заметно меньшую управляющую мощность.

Аналогичное устройство предложено на кристалле $\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$, коэффициенты АО качества которого больше, чем значения $M \text{ KGW}$, из которого изготовлен модулятор. Практически важный спектральный диапазон такого устройства лежит от 0.8 до 3 мкм, где кристалл KLuW , легированный ионами редкоземельных металлов (Nd, Er, Ho, Yb, Tm), можно использовать для генерации лазерного излучения с длинами волн λ от ~ 0.85 до 2.9445 мкм, в зависимости от используемого источника света для накачки. На длине волны 2.9 мкм управляющая мощность, обеспечивающая коэффициент дифракции более 80%, составит примерно 4 Вт, при длине пьезопреобразователя 4 см и ширине 0.5 мм. Таким образом, по эффективности дифракции модулятор на KLuW примерно вдвое уступает существующим на кристалле TeO_2 .

Сочетание лазерных и акустооптических свойств в одном материале открывает возможность **объединить** функции генерации излучения и модуляции добротности лазера в **одном функциональном элементе**. На Рис.4 показана ориентация осей такого элемента на кристалле $\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$.

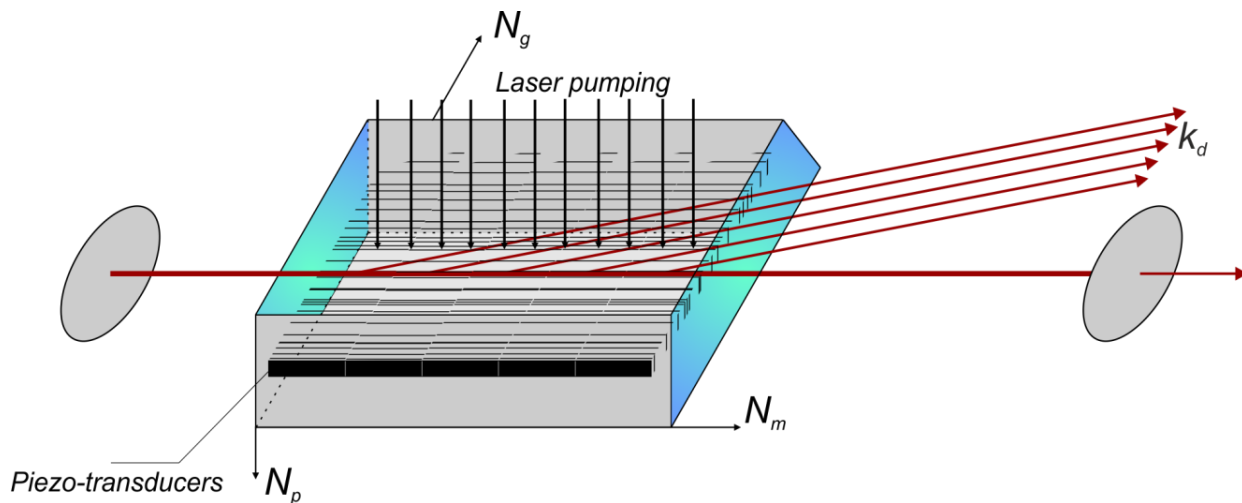


Рис.4. Схема активного лазерного элемента на основе кристалла KLuW с совмещенным АО модулятором добротности

Накачка лазерного элемента внешним излучением осуществляется в вертикальной плоскости, а дифракция происходит в горизонтальной, регулируя условия для существования генерации света. Таким образом, осуществляется модуляция добротности лазера.

Благодаря реализации двух функций в одном кристаллическом образце возможно уменьшить оптические потери и упростить конструкция лазера. Благодаря более высокой АО эффективности кристалла KLuW, чем у используемого сейчас кварца, можно отказаться от активного охлаждения этого элемента.

Оптическая двуосность кристаллов также позволяет создать на их основе новые виды АО устройств, которые нереализуемы в одноосных материалах, как правило, используемых в акустооптике. Например, возможно создание **дефлектора** со значительной полосой перестройки и **большой угловой апертурой**, которая позволяет, в частности, осуществлять эффективную модуляцию гауссового пучка в его перетяжке.

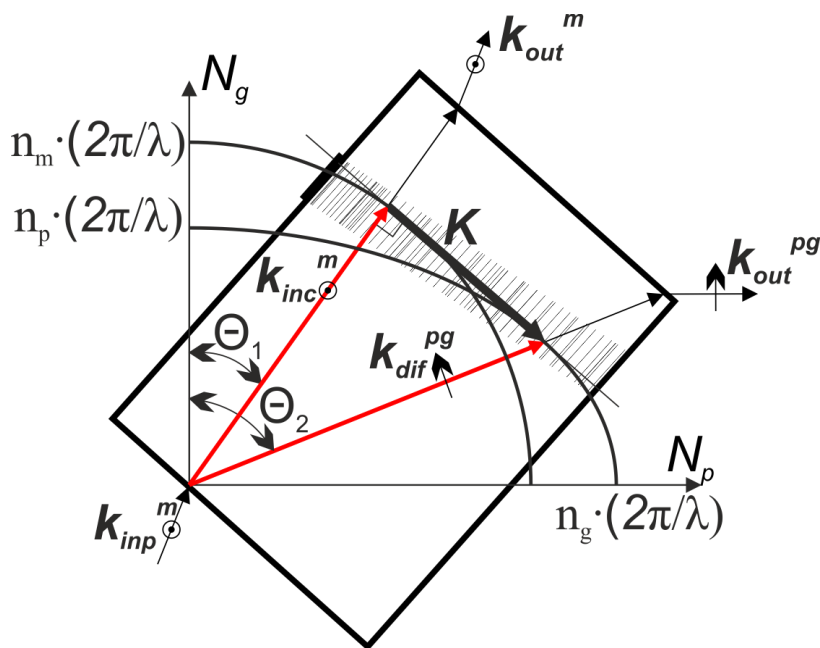


Рис.5. Диаграмма волновых векторов акустооптического взаимодействия широкоапертурного дефлектора на кристалле KLu(WO₄)₂. Прямоугольником схематично обозначена АО ячейка.

Такая геометрия (см. Рис.5) минимизирует поперечные размеры пучка и, соответственно, время переключения модулятора $\tau = d/V_{ac} \sim 1/\Delta\Theta_1$, которое может достигать 20 нс и менее. Большая угловая апертура позволяет также проводить операции над пучками, переносящими изображения. При этом режим дефлектора позволяет осуществлять наряду с амплитудной модуляцией еще и пространственное управление пучком, существенно расширяя возможные виды управления лазерным излучением.

Эту геометрию (см. Рис.5) отличают еще два важных для практической реализации свойства: это ортогональность падающего светового пучка акустическому столбу ($k_{inc} \perp K$), что обеспечивает удобную конфигурацию и большой угол отклонения

дифрагированного пучка, что, впрочем, делает необходимым использование весьма высоких частот ультразвука. Для кристалла KLuW частота управляющего сигнала при длинах волн света 1.064 мкм и 1.55 мкм составит соответственно 1.1 и 0.8 ГГц. Используется геометрия дифракции, предусматривающая трансформацию направления поляризации света из N_m в плоскость $N_p N_g$, для чего используется медленная сдвиговая акустическая волна.

Коллинеарные акустооптические фильтры традиционно представляют особый интерес, поскольку позволяют получить высокое спектральное разрешение при малой мощности управляющего сигнала. Для применений в спектроскопии и для фильтрации изображений необходима широкая угловая апертура, которая достигается в приосевых направлениях взаимодействия, т.е. вдоль диэлектрических осей N_m , N_p и N_g .

Анализ показал, что АО взаимодействие вдоль оси N_g характеризуется наиболее реалистичными параметрами, один из которых – частота, необходимая для фазового синхронизма. Перестраиваемый АО фильтр в этой геометрии (см. Рис.6) имеет снос акустического пучка, как и коллинеарный фильтр на α -SiO₂. Среди трех исследованных материалов, на кристалле KYbW возможно получить лучшее спектральное разрешение $\delta\lambda \sim 1/\Delta n$ за счет большей оптической анизотропии $\Delta n = n_p - n_m$. Ширина полосы пропускания такого фильтра при длине взаимодействия 1 см может составить $\delta\lambda = 0.7$ нм при $\lambda = 632.8$ нм.

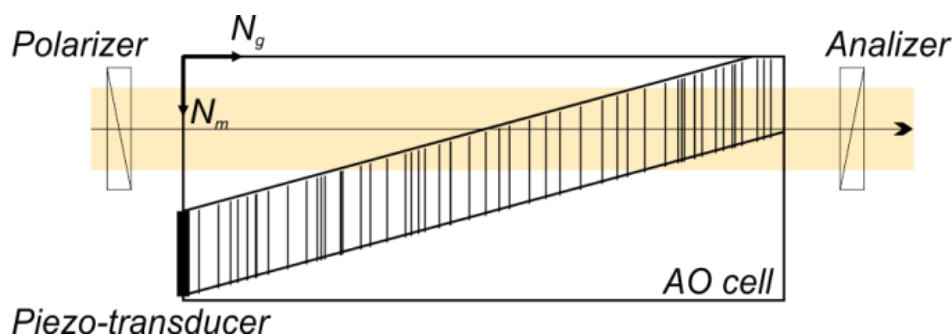


Рис.6. Схематическое изображение (эскиз) перестраиваемого акустооптического фильтра на KYb(WO₄)₂

В **Главе 3** приведены результаты испытания нового акустооптического модулятора для неполяризованного излучения на кристалле KGd(WO₄)₂, показавшего близкую к 100% эффективность модуляции, и способного выдерживать оптическое излучение высокой мощности. Показано, что кристаллы KGd(WO₄)₂, KYb(WO₄)₂ и

$\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ позволяют создать классические АО устройства, обеспечивающие высокую лучевой стойкость, а также новые виды, обеспечивающие большую угловую апертуру ($\sim 2^\circ$), малое время переключения (до 20 нс), слабую чувствительность к поляризации. Это позволит заменить кварц SiO_2 во многих областях акустооптики, где он используется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для кристаллов семейства $\text{KRE}(\text{WO}_4)_2$, где $RE = \text{Gd}, \text{Yb}$ и Lu , измерены скорости распространения всех акустических мод в различных направлениях. По этим данным определены упругие характеристики материалов. Исследована анизотропия акустических свойств каждого кристалла. Проведено сравнение материалов и показано, что $\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ имеет наибольший диапазон скоростей распространения, от 1711 м/с для сдвиговых волн до 5242 м/с для продольных. Также показано, что наибольшее отличие поверхности медленности от сферы характерно для того же материала. Традиционно, выраженная анизотропия акустических свойств характерна для эффективных акустооптических материалов.
2. Фотоупругие свойства кристаллов $\text{KRE}(\text{WO}_4)_2$ изучены для случая изотропной дифракции (с сохранением поляризации оптического излучения) впервые. Определены все характеристики, необходимые для численного определения параметров акустооптического взаимодействия в случае изотропной дифракции, и для качественной оценки – в случае анизотропной дифракции (с поворотом плоскости поляризации света). Максимальное значение коэффициента акустооптического качества составило $19 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ для кристалла $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ при дифракции света с поляризацией вдоль оси N_g и сдвиговой моды звука, распространяющейся вдоль оси N_g с поляризацией вдоль N_m . Величина более чем на порядок превосходит коэффициент качества кварца, и менее чем в два раза уступает акустооптическому качеству парателлурита (оксида теллура) при изотропной дифракции.
3. Показано, что кристаллы $\text{KRE}(\text{WO}_4)_2$ являются материалами, подходящими для создания эффективных акустооптических устройств. Предложен, создан и испытан новый акустооптический модулятор для неполяризованного излучения на кристалле $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$, показавший близкую к 100% эффективность модуляции, и способный управлять оптическим излучением высокой мощности. Исследована возможность создания новых типов устройств, обеспечивающих большую угловую апертуру ($\sim 2^\circ$), малое время переключения (до 20 нс), слабую чувствительность к поляризации.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

I. Журналы из списка ВАК

1. М. М. Мазур, Д. Ю. Великовский, Ф.А.Кузнецов, Л. И. Мазур, А. А. Павлюк, В. Э. Пожар, В. И. Пустовойт. Упругие и фотоупругие свойства монокристаллов $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$. // Акустический журнал. Том 58. № 6. Стр. 701–709 (2012).
2. M.M. Mazur, D.Yu. Velikovskiy, L.I. Mazur, A.A. Pavluk, V.E. Pozhar, V.I. Pustovoi. Elastic and photo-elastic characteristics of laser crystals Potassium Rear-Earth Tungstates $\text{KRE}(\text{WO}_4)_2$, where $\text{RE} = \text{Y}, \text{Yb}, \text{Gd}$ and Lu . // Ultrasonics. 54 (5). Pp. 1311–1317 (2014). <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2014.01.009>.
3. D.Yu. Velikovskii, M.M. Mazur, A.A. Pavlyuk, V.E. Pozhar, S.F. Solodovnikov, L. I. Yudanov. Investigation of the $\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ crystal as an acousto-optic material // Phys. Wave Phenom. Vol. 23. No. 1. Pp. 58-62 (2015).
4. D.Yu. Velikovskii, V.E. Pozhar, M.M. Mazur. Acousto-optic devices based on potassium rear-earth tungstates laser crystals. // Acta Physica Polonica A. Vol. 127. No. 1. Pp. 75-77 (2015).

II. Другие публикации

1. D. Yu. Velikovskiy, V. E. Pozhar, M. M. Mazur. Acousto-optics devices for high-power laser beam, // ^{f-6} in WDS'12 Proceedings of Contributed Papers: Part III – Physics (eds. J. Safrankova and J. Pavlu). Prague. Matfyzpress. Pp. 65–68 (2012). ISBN 978-80-7378-226-9.
2. M.M. Mazur, D. Yu. Velikovskii, L.I.Mazur, A.A. Pavluk, V.E. Pozhar, V.I. Pustovoi. Acousto-optic modulator made of KGW crystal. // 15th international conference on “Laser Optics 2012”. P. 29 (2012).
3. Д.Ю. Великовский, А.В. Перчик. Разработка стенда для исследования акустооптических устройств на новых материалах // VII Международная конференция “Фундаментальные проблемы оптики-2012”. Стр.196 (2012).
4. Д.Ю. Великовский, М.М. Мазур, В.Э. Пожар. Проект коллинеарного акустооптического фильтра на лазерном кристалле $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$. // Фотоника и информационная оптика. МИФИ. Москва. Стр. 124-125 (2013).
5. D.Yu. Velikovskiy, M.M. Mazur, V.E. Pozhar. Development of acousto-optical devices made of KGW laser crystal // The International Conference on Coherent and Nonlinear Optics and The Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT'13) (2013).

6. Д.Ю. Великовский. Методика экспериментального определения упругих характеристик лазерных кристаллов моноклинной сингонии для задач акустооптики / Д.Ю. Великовский, М.М. Мазур, В.Э. Пожар. – М., 2013, –22с. – Деп. в ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» 20.08.2013 г., № 908а.
7. Д.Ю. Великовский, М.М. Мазур, В.Э. Пожар. Методика определения констант жесткости моноклинных кристаллов на примере $KRE(WO_4)_2$, где $RE = Y, Yb, Lu, Gd$. // бая международная конференция акустооптические и радиолокационные методы измерений информации ARMIMP-2013. Стр.214-215 (2013).
8. Д.Ю. Великовский, М.М. Мазур, А.А. Павлюк, В.Э. Пожар, С.Ф. Солодовников, Л.И. Юданова. Изучение кристалла $KLu(WO_4)_2$ как акустооптического материала. // Труды школы-семинара «Волны-2014». Секция 6, стр. 4 (2014).
9. D. Velikovskiy, V. Pozhar, M. Mazur. Acousto-optic devices based on laser crystals KREW // Abstract book of the 12th School on Acousto-Optics and Applications. P. 44 (2014).
10. Д.Ю. Великовский, М.М. Мазур, В.Э. Пожар. Методика экспериментального определения фотоупругих характеристик моноклинных кристаллов. // 7ая международная конференция акустооптические и радиолокационные методы измерений информации ARMIMP-2014. Стр. 183-185 (2014).
11. Д.Ю. Великовский. Методика экспериментального определения фотоупругих характеристик лазерных кристаллов моноклинной сингонии для задач акустооптики / Д.Ю. Великовский, М.М. Мазур, В.Э. Пожар. – М., 2014, –28с. – Деп. в ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» 02.09.2014 г., № 918а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

-
- 1 D. Kasprowicz, M.G. Brik, A. Majchrowski, E. Michalski, P. Gluchowski. // Journal of Alloys and Compounds. Vol. 577. Pp. 687–692 (2013).
 - 2 U. Griebner, S. Rivier, V. Petrov, M. Zorn, G. Erbert, M. Weyers, X. Mateos, M. Aguilo, J. Massons, F. Diaz. // Opt. Exp. 13. Pp.3465–3470 (2005).
 - 3 I.V. Mochalov. // Opt. Eng. 36(6). Pp. 1660–1669 (1997).
 - 4 Клевцов П.В., Козеева Л.П., Харченко Л.Ю., Павлюк А.А. // Кристаллография. Т. 19. № 3. Стр. 552-558 (1974).
 - 5 Ю.И. Сиротин, М.П. Шаскольская. Основы кристаллофизики. // М: Наука, 1979.
 - 6 К.С. Александров. // Кристаллография. Т. 3. № 5. Стр. 623–626 (1958).

7 *R.W. Dixon, M.G. Cohen.* // *Appl. Phys. Lett.* V. 8, No. 8. Pp. 205-206 (1966).