

**ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ АКУСТООПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ
ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ ГРУППЫ KREW**

**PERSPECTIVES OF DEVELOPMENT OF ACOUSTOOPTICAL DEVICES
BASED ON KREW CRYSTALS FOR CONTROLLING LASER RADIATION**

В. Я. Молчанов, К. Б. Юшков, О. Ю. Макаров, Н. Ф. Науменко, Н. Г. Захаров¹
V. Ya. Molchanov, K. B. Yushkov, O. Yu. Makarov, N. F. Naumenko, N. G. Zakharov¹

Федеральное государственное автономное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
¹ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

National University of Science and Technology MISIS,
4 Leninsky Prospekt, Moscow, 119049

¹Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics

Обсуждены перспективы применения нового акустооптического (АО) кристалла $KY(WO_4)_2$ в АО лазерных затворах, дисперсионных линиях задержки для шейпинга лазерных импульсов, спектральных фильтрах. Детально исследованы поверхности медленностей, фазовые скорости, акустические оси, указательные поверхности коэффициентов анизотропной дифракции в кристалле. Разработан и изготовлен АО лазерный затвор. Испытания АО лазерного затвора показали, что кристалл $KY(WO_4)_2$ более технологичен чем парателлурит и имеет в несколько раз большую лазерную стойкость.

The application perspectives of new acoustooptical (AO) $KY(WO_4)_2$ crystal in laser Q-switches, AO dispersive delay lines for laser pulse shaping, spectral tunable filters are discussed. The slowness curves, phase velocities, diffractive coefficients defining anisotropic acoustic divergence, acoustical axis's are investigated in details. AO laser Q-switch based on $KY(WO_4)_2$ crystal was designed and fabricated. The fabrication technology as well as preliminary Q-switch testing demonstrated that $KY(WO_4)_2$ crystal seems to be more preferable than traditional paratellurite owing to higher radiation resistance and in some technological aspects.

Введение

Кристаллы калий-редкоземельного вольфрамата (KREW) являются новейшим малоисследованным кристаллическим материалом для приборов фотоники. Одним из перспективных кристаллов группы KREW представляется калий-итриевый вольфрамат $KY(WO_4)_2$.

Кристаллы $KY(WO_4)_2$ обладают следующими элементами симметрии: осью второго порядка, плоскостью перпендикулярной оси, и вытекающим отсюда центром симметрии, то есть относятся голоэдрическому классу моноклинной сингонии C_{2h} . Угол моноклинности $\beta = 94^\circ$. Постоянные решетки $a = 8,05 \text{ \AA}$, $b = 10,35 \text{ \AA}$, $c = 7,54 \text{ \AA}$. Впервые оптические и нелинейные лазерные свойства моноклинных кристаллов $KY(WO_4)_2$ были исследованы в 2001 году в работе [1]. Определены главные показатели преломления, приведены ко-

эффициенты и характеристические длины волн для вычисления показателей преломления с помощью формул Зельмеера.

Упругие и фотоупругие свойства кристаллов $KY(WO_4)_2$ для изотропного акустооптического (АО) взаимодействия впервые были исследованы в 2012 году [2, 3]. Ранее кристаллы рассматривались исключительно как лазерные активные кристаллы с рядом перспективных свойств. Одним из таких свойств является высокая стойкость к воздействию лазерного излучения, превосходящая стойкость традиционных АО материалов, таких как парателлурит, ниобат лития и др.

Мы рассматриваем этот кристалл как перспективный материал для силовой фотоники, в частности, для АО внутрирезонаторных лазерных затворов, лазерных АО дисперсионных линии задержки (АОДЛЗ), АО-фильтров и т. д. Кристалл $KY(WO_4)_2$ характеризуется низкосимметричной моноклин-

ной элементарной ячейкой, и следовательно резко выраженной анизотропией упругих, фотоупругих и оптических свойств. Кристалл является двуосным.

Для создания АО-приборов требуется их детальное изучение его свойств. По данным работы [2, 3] АО-качество кристалла $KY(WO_4)_2$ в отдельных срезах в несколько раз может превышать АО-качество плавленого кварца. Эффективность АО взаимодействия может быть увеличена в случае квазиколлинеарной анизотропной дифракции в кристалле, когда фазовая скорость падающего света коллинеарна групповой скорости упругой волны [4, 5]. Дифракционные искажения акустического пучка в длинном кристалле должны учитываться как один из главных критериев при оптимизации АО-взаимодействия.

1. Анализ акустических поверхностей медленности и фазовых скоростей кристаллов $KY(WO_4)_2$

Для наглядного представления анизотропии акустических свойств кристалла чаще всего используется поверхность рефракции или поверхность медленности (обратных скоростей акустических волн) [6]. Нормаль к поверхности в произвольной точке определяет направление групповой скорости. Изменение групповой скорости при малом отклонении волновой нормали от заданного направления определяет расходимость акустического пучка вследствие дифракции. Максимальные дифракционные искажения пучка могут наблюдаться при его распространении в направлениях близких к акустической оси, которая является одним из особых направлений.

Кристалл $KY(WO_4)_2$ относится к точечной группе симметрии $2/m$ моноклинной сингонии, то есть содержит только два элемента симметрии: ось симметрии второго порядка и перпендикулярную ей плоскость симметрии. Наличие центра симметрии при пересечении оси и плоскости симметрии означает отсутствие пьезоэлектрических свойств в анализируемом кристалле. Для описания кристаллов этой группы выберем систему кристаллофизических осей, для которой ось симметрии второго порядка параллельна кристаллофизической оси Z , а XY – плоскость симметрии. В этом случае матрица C_{ij} выглядит так

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} 184,2 & 60,9 & 84,7 & 0 & 0 & 23,7 \\ 60,9 & 148,8 & 67,2 & 0 & 0 & -4,0 \\ 84,7 & 67,2 & 176,8 & 0 & 0 & 13,7 \\ 0 & 0 & 0 & 68,9 & 6,8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6,8 & 34,8 & 0 \\ 23,7 & -4 & 13,7 & 0 & 0 & 43,4 \end{pmatrix} \times 10^9 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2).$$

Значения упругих констант соответствуют опубликованным в [2, 3]. Эти значения использованы при расчетах акустических свойств кристалла $KY(WO_4)_2$.

Поверхность медленности состоит из трех полостей, соответствующих трем линейно поляризованным акустическим волнам, распространяющимся в произвольном направлении кристалла: квазипродольной и двум квазисдвиговым (квазипоперечным). Классификация волн основана на соотношении их поляризаций: для квазипродольных волн угол поляризации $\Phi < 45^\circ$ (где Φ – угол между волновым вектором \mathbf{k} и вектором механических смещений \mathbf{u}), для квазисдвиговых волн $\Phi > 45^\circ$. Скорости и углы поляризации определяются в результате решения уравнения Кристоффеля [6].

На рис. 1 изображены сечения поверхности медленности кристалла $KY(WO_4)_2$ тремя координатными плоскостями: XY (а), XZ (б) и YZ (в). В используемой кристаллофизической системе плоскость XY является плоскостью симметрии, поэтому верхняя и нижняя части рис. 1, б и 1, в зеркально симметричны относительно горизонтальной линии (след плоскости XY). На рис. 1, а (плоскость XY) одна из волн (чисто поперечная мода) всегда поляризована вдоль оси Z . Ей соответствует эллипс в сечении поверхности медленности (жирная линия). В точках акустических осей (направления $X-49,5^\circ$ и $X+5,1^\circ$) поперечная мода переходит с полости поверхности медленности, соответствующей быстрой квазипоперечной волне на полость медленной квазипоперечной волны и обратно.

На рис. 2, а–в показаны зависимости фазовых скоростей квазипродольной (красные линии), быстрой квазисдвиговой (синие линии) и медленной квазисдвиговой (зеленые линии) акустических волн от направления распространения в плоскостях XY , XZ и YZ кристалла $KY(WO_4)_2$. Жирными линиями выделена чисто поперечная волна.

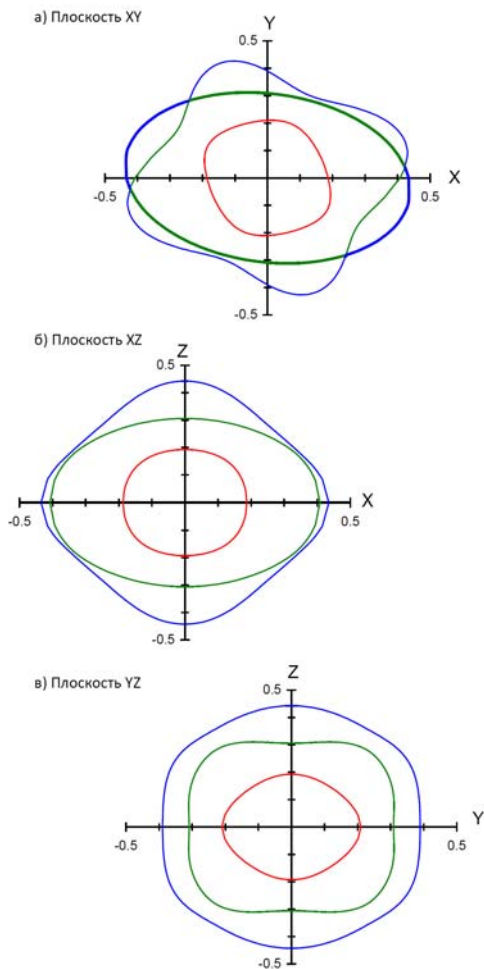


Рис. 1. Сечения поверхности медленностей для квази-продольной, быстрой квазипоперечной и медленной квазипоперечной акустических волн плоскостями XY (а), XZ (б) и YZ (в)

2. Анализ акустических осей и анизотропии дифракционной расходимости ультразвуковых пучков в кристаллах $KY(WO_4)_2$

Акустическая анизотропия кристалла характеризуется наличием и определенным расположением особых направлений разного типа: продольных и поперечных нормалей, а также акустических осей. Свойства особых направлений: поперечная поляризация одной из объемных акустических волн, слабая зависимость характеристик акустических волн от разориентации среза относительно заданного направления волновой нормали, нулевой угол отклонения потока энергии – используются в целом ряде устройств, в том числе акустооптических.

Акустической осью является направление, вдоль которого наблюдается вырождение, то есть могут распространяться две или даже три объемные акустические волны с одинаковой фазовой

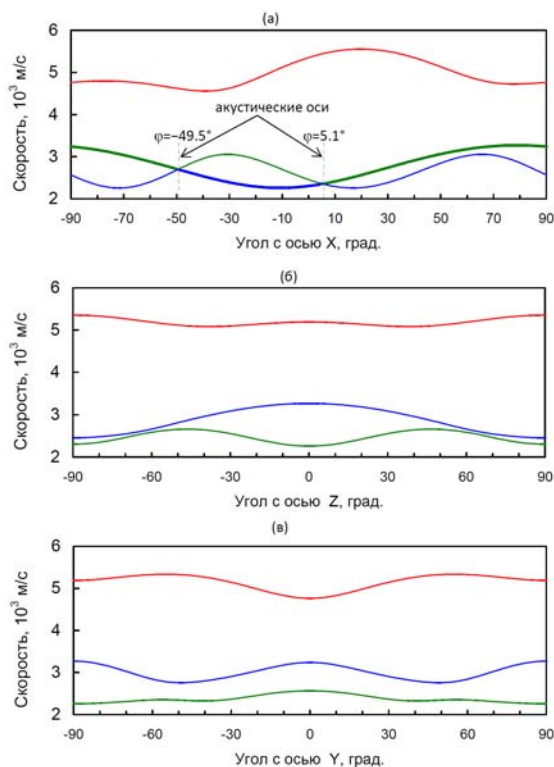


Рис. 2. Фазовые скорости квазипродольной, быстрой квазисдвиговой и медленной квазисдвиговой акустических волн в плоскостях XY (а), XZ (б) и YZ (в)

скоростью, но различными векторами поляризации. Типы акустических осей подробно исследовались в [7] на основе инвариантного метода [6].

В кристалле произвольной симметрии акустические оси образуют конус 12-го порядка. Конус акустических осей распадается на отдельные направления, за исключением случая поперечной изотропии (например, в гексагональных кристаллах). Ориентация акустических осей в кристалле, их общее число и тип вырождения зависят, прежде всего, от симметрии кристалла.

Количественная оценка степени дифракционной расходимости акустической волны может быть получена в результате расчета двух собственных значений плоского тензора кривизны поверхности медленности – квадратичных коэффициентов анизотропии, или коэффициентов дифракции, W_1 и W_2 . Квадратичные коэффициенты анизотропии были впервые предложены для анализа анизотропной дифракционной расходимости

и искажений акустических пучков в кристаллах в работе [8]. Дифракция объемных волн двумерна, и для описания искажения формы пучка в его поперечном сечении необходимы три параметра – расходимость вдоль двух главных осей сечения и поворот этих осей по отношению к исходным осям.

В общем случае дифракционную расходимость объемной акустической волны можно определить с помощью плоского тензора кривизны поверхности рефракции [9] или его главных значений, квадратичных коэффициентов анизотропии, и азимутального угла [8]. Используя подходы работы [10] можно показать, что компоненты тензора дифракции \hat{W} могут быть выражены аналитически. Основные уравнения для расчета коэффициентов W_1 и W_2 приведены в [8] и ранее использовались для исследования анизотропии дифракционной расходимости акустических волн в АО кристаллах ниобата лития LiNbO_3 [9, 11], KDP [12].

Для АОДЛЗ, основанных на квазиколлинеарном взаимодействии акустического и оптического лучей, наибольший интерес представляют акустические волны, распространяющиеся в плоскости симметрии и поляризованные перпендикулярно к ней, поскольку при их отражении в этом случае не возникает дополнительных акустических мод. В кристалле $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ такие волны распространяются в плоскости симметрии XU и поляризованы вдоль оси Z .

В общем случае для акустической волны направления собственных векторов тензора дифракции описываются двумя углами, а соответствующие им собственные значения удобно классифицировать по величине: $W_1 > W_2$. При приближении к акустическим осям конического типа один из коэффициентов дифракции, характеризующих распространение вырожденных волн (обычно быстрой, применяемой в АО-затворах и медленной квазипоперечных, применяемой в АОДЛЗ) быстро растет по величине. Поэтому положение акустических осей в кристалле важно учитывать при выборе геометрии акустооптического элемента. В низко-симметричных кристаллах с ярко выраженной анизотропией часто существуют акустические оси «общего положения». Поведение скоростей акустических волн не всегда позволяет «увидеть» такие оси, зато их наличие и положение в кристалле можно «визуализировать» с помощью построения указательных поверхностей коэффициентов дифракции.

На рис. 3 показаны проекции указательных поверхностей двух квадратичных коэффициентов

анизотропии, W_1 (а) и W_2 (б), для квазипродольной волны в кристалле $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$. Благодаря сильной анизотропии упругих свойств кристалла, для квазипродольной волны можно ожидать значительную дифракционную расходимость акустического пучка при распространении вдоль некоторых направлений, так как значения W_1, W_2 изменяются от 0,4 до 2,2 (для сравнения, в ниобате лития, $0,6 < W_1, W_2 < 1,8$). Поведение основных характеристик акустических волн, распространяющихся в плоскости симметрии кристалла XU , представлено на рис. 4 в зависимости от угла φ с осью X . Кроме фазовых скоростей волн (рис. 4, а), показаны углы сноса акустической энергии ψ (рис. 4, б) для квазипродольной, поперечной и квазипоперечной волн, которые изменяются в интервалах $(-14,8^\circ \dots +17,7^\circ)$, $(-20,7^\circ \dots +20,7^\circ)$ и $(-32,5^\circ \dots +33,4^\circ)$, соответственно.

Для поперечной (сдвиговой) волны, на которой работают АОДЛЗ, поляризованной вдоль оси Z , показаны коэффициенты дифракции (рис. 4, в). Здесь коэффициент W_1 характеризует дифракционную расходимость сдвиговой волны в плоскости XU , а коэффициент W_2 – перпендикулярно к этой плоскости. Поэтому первый меняется монотонно в окрестности акустических осей, а второй характеризует конические точки на поверхности медленности.

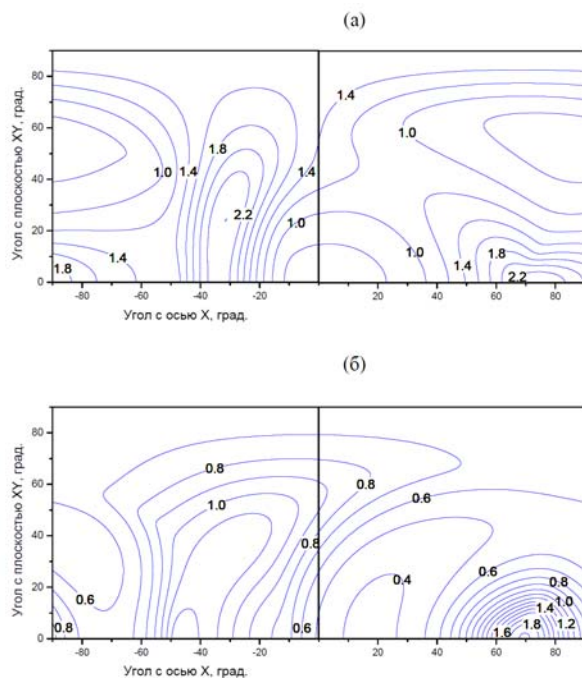


Рис. 3. Указательные поверхности квадратичных коэффициентов анизотропии W_1 (а) и W_2 (б) квазипродольной волны в кристалле $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$

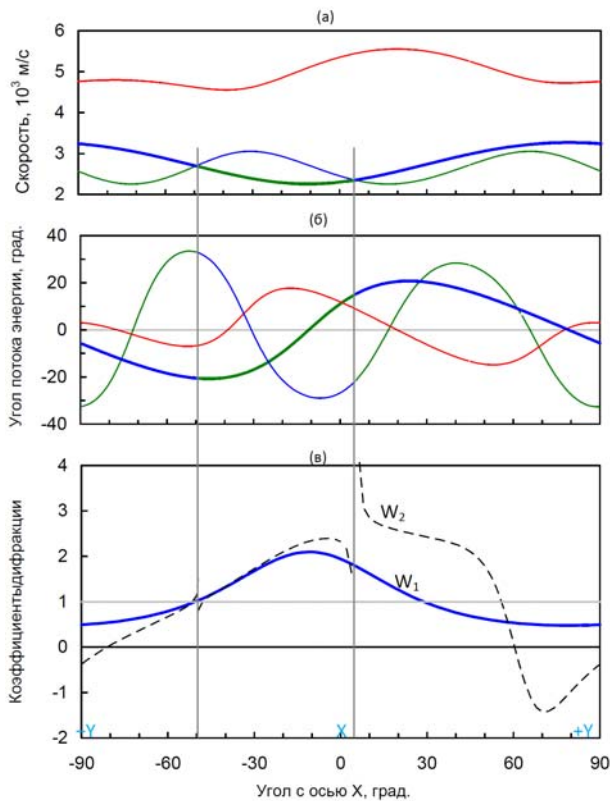


Рис. 4. Фазовые скорости (а) и углы сноса энергии (б) для трех волн в плоскости XY; коэффициенты W_1 и W_2 (в) расходимости сдвиговой волны

При распространении поперечной волны вдоль направлений, составляющих с осью X угол от 60° до 120°, наблюдается уменьшение дифракционной расходимости акустической волны как в плоскости XY, так и в перпендикулярном направлении, то есть имеет место частичная автоколлимация акустического пучка за счет анизотропии.

3. Разработка и изготовление АО лазерного затвора на основе кристалла KY(WO₄)₂

В Центре Акустооптики МИСиС выполнен комплекс работ для освоения технологии производства АО модуляторов (лазерных затворов) и АОДЛЗ на основе кристалла KY(WO₄)₂. Разработаны методы рентгеновской ориентации кристалла KY(WO₄)₂. Изменена конструкция ловушки и принцип идентификации пиков отражений. Разработана технология резки, шлифовки и полировки кристалла. Класс чистоты полировки является решающим фактором, определяющим стойкость оптических граней прибора к лазерному излучению. По разработанной технологии были изготовлены образцы кристалла для определения порога лазерной стойкости. Образцы переданы в РФЯЦ-

ВНИИЭФ на испытания. Разработана технология отражающих покрытий с коэффициентом остаточного отражения от грани 0,1 %.

Отработана технология изготовления пьезопреобразователей методом вакуумной диффузии активных атомов в нанослоях и полный цикл технологических операций для лазерного затвора на основе кристалла KY(WO₄)₂. Отработаны режимы металлизации и диффузионного соединения. Установлено, что кристалл без термоудара допускает нагрев до 300 °С при вакууме порядка 10⁻⁶ мм рт. ст. без нарушения полировки граней по оптическому классу, что косвенно свидетельствует о его повышенной стойкости к лазерному излучению. Изотропная геометрия АО взаимодействия в приборе соответствует [3].

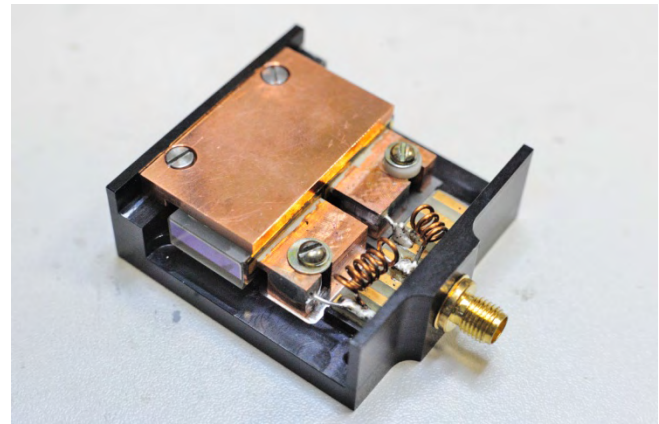


Рис. 5. АО лазерный затвор, разработанный на основе кристалла KY(WO₄)₂

На рис. 5 показана фотография прибора на основе кристалла KY(WO₄)₂. Основные параметры: рабочая длина волны лазерного излучения 2,1 мкм, центральная рабочая частота 50 МГц, длина преобразователя 40 мм, ширина 3,0 мм, эффективность дифракции в рабочей поляризации 61 % при управляющей мощности 20 Вт. Прибор имеет термостабильную конструкцию, согласующая система рассчитана на большие токи, что позволяет работать прибору при управляющей мощности 20 Вт на металлическом столике без охлаждения. Для стабильной работы прибора целесообразно применять охлаждение элементами Пельтье. Измерение параметров прибора на длине волны 2,1 мкм было выполнено на фемтосекундном параметрическом генераторе в ООО «Авеста-Проект» (г. Троицк).

Для определения лучевой стойкости АО-затвора на основе кристалла KY(WO₄)₂ применялось импульсно-периодическое излучение Ho:YAG системы на длине волны 2,1 мкм. Параметр распро-

странения тестового пучка излучения составлял $M^2 \approx 1,3$, частота следования импульсов достигала 20 кГц, а длительность импульсов была ≈ 30 нс. Для создания требуемой плотности энергии излучение гольмиевой системы формировалось двухлинзовой системой. Диаметр пучка в точке исследования измерялся методом ножа Фуко по уровню $1/e^2$ от максимальной интенсивности.

Определение предельной лучевой стойкости осуществлялось по визуальному исследованию с помощью микроскопа объема и поверхностей кристалла АО-затвора после каждой серии облучения. Плотность энергии излучения варьировалась от 1 Дж/см² до 12 Дж/см². Ни поверхностных, ни объемных повреждений кристалла не наблюдалось. При максимальной нагрузке были проведены несколько серий воздействия с общей количеством импульсов излучения $\approx 10^7$, что подтверждает высокую лучевую стойкость материала и нанесенных просветляющих покрытий.

Заключение

Технологические особенности изготовления прибора и его предварительные испытания показали, что кристалл $KY(WO_4)_2$ более технологичен в ряде аспектов, чем традиционный парателлуриит и перспективен для создания АО лазерных затворов и АОДЛЗ, работающих при высокой лазерной мощности, так как обладает более высокой эффективностью дифракции, чем затворы на основе кварца.

На основе кристалла $KY(WO_4)_2$ представляется целесообразным изготавливать АОДЛЗ, стойкие к лазерному излучению. В наиболее полной форме функциональные особенности применения АОДЛЗ на основе парателлуриита для управления сверхбыстрыми лазерными полями опубликованы в совместных статьях сотрудников Центра Акустооптики НИТУ «МИСиС» и РФЯЦ-ВНИИЭФ [13, 14].

В АОДЛЗ используется анизотропное квази-коллинеарное взаимодействие в длинном кристалле. По этой причине, эффективность АОДЛЗ может быть достаточно высокой даже при не очень высоком значении эффективной фотоупругой константы материала. Данные по фотоупругим константам анизотропной дифракции в кристалле $KY(WO_4)_2$ в литературе отсутствуют. В связи с этим в Центре Акустооптики НИТУ «МИСиС» организованы соответствующие работы. Для измерений по методу Диксона изготовлен буфер на

основе плавленого кварца с пьезопреобразователями и образец кристалла $KY(WO_4)_2$ с базовой ориентацией по осям XYZ . Из образца будут последовательно изготавливаться призмы с расчетными ориентациями относительно кристаллографических осей для измерения эффективных фотоупругих констант, ответственных за квази-коллинеарное взаимодействие.

Благодарности

Авторы выражают благодарность А. В. Конященко и С. Ю. Тенякову за организацию и проведение определительных испытаний АО лазерного затвора на основе кристалла $KY(WO_4)_2$. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты 17-07-00279, 18-07-00670).

Список литературы

1. Kaminskii A. A., Konstantinova A. F., Orekhova V. P. et al. Optical and nonlinear laser properties of the $\chi(3)$ -active monoclinic α - $KY(WO_4)_2$ crystals // Crystallography Reports. 2001. V. 46, № 4. P. 733–741.
2. Mazur M. M., Velikovskiy D. Yu., Mazur L. I. et al. Elastic and photo-elastic characteristics of laser crystals potassium rare-earth tungstates $KRE(WO_4)_2$, where RE = Y, Yb, Gd and Lu // Ultrasonics. 2014. V. 54. P. 1311–1317.
3. Мазур М. М., Кузнецов Ф. А., Мазур Л. И. и др. Упругие и фотоупругие свойства монокристаллов $KY(WO_4)_2$ // Неорганические материалы. 2012. Т. 48, № 1. С. 74–80.
4. Molchanov V. Ya., Chizhikov S. I., Makarov O. Yu. et al. Adaptive acousto-optic technique for femtosecond laser pulses shaping // Appl. Opt. 2009. V. 48, № 7. P. 118–124.
5. Молчанов В. Я. и др. Теория и практика современной акустооптики. – М.: МИСиС, 2015.
6. Федоров Ф. И. Теория упругих волн в кристаллах. – М.: Наука, 1965.
7. Хаткевич А. Г. Акустические оси в кристаллах // Кристаллография. 1962. Т. 7, № 5. С. 742–747.
8. Науменко Н. Ф., Переломова Н. В., Бондаренко В. С. Распространение ограниченных акустических пучков в кристалле ниобата лития // Кристаллография. 1983. Т. 28. С. 607–608.
9. Naumenko N., Chizhikov S., Molchanov V. Yushkov K. Anisotropic Diffraction of Acoustic

Waves in Crystals Used in Acoustooptic Dispersive Delay Lines // Proc. IEEE Ultrasonics Symp., Prague, July 22–25. 2013. P. 500–503.

10. Хаткевич А. Г. Дифракция и распространение пучков ультразвукового излучения в монокристаллах // Акустический журнал. 1978. Т. 24, С. 108–115.

11. Naumenko N. F., Chizhikov S. I., Molchanov V. Ya., Yushkov K. B. Anisotropic diffraction of bulk acoustic wave beams in lithium niobate // Ultrasonics. 2015. V. 63, P. 126–129.

12. Науменко Н. Ф., Макаров О. Ю., Юшков К. Б. Исследование и разработка дисперсионных линий задержки с повышенным быстродействием для управления формой ультракоротких

лазерных импульсов: Отчет о научно-исследовательской работе № АААА-Б17-217052270081-3. М.: НИТУ «МИСиС», 2016.

13. Chizhikov S. I., Garanin S. G., Goryachev L. V., Molchanov V. Ya., Romanov V. V., Rukavishnikov N. N., Sokolovskii S. V., Voronich I. N., Yushkov K. B. Acoustooptical adaptive correction of a chirped laser pulse spectral profile in a Nd-phosphate glass regenerative amplifier // Laser Physics Letters. 2013. V. 10, № 1. P. 015301.

14. Yushkov K. B., Romanov V. V., Rogozhnikov G. S., Molchanov V. Ya. 70 GHz arbitrary modulation of chirped laser pulses by means of acoustooptics // Optics Letters. 2016. V. 41, № 23. P. 5442–5445.