

Акустооптические модуляторы на кристалле KYW

М.М.Мазур, Л.И.Мазур, В.Э.Пожар, В.Н.Шорин, Ю.П.Константинов

Разработаны и экспериментально исследованы два типа акустооптических модуляторов на новых акустооптических кристаллах $KY(WO_4)_2$. Проведено сравнение их характеристик с характеристиками существующих акустооптических модуляторов на кристаллах кварца и показано, что новые модуляторы обеспечивают выигрыши по эффективности почти в 10 раз, что устраняет необходимость водяного охлаждения таких устройств.

Ключевые слова: акустооптическая модуляция, мощное лазерное излучение, KYW.

1. Введение

Модуляция лазерного излучения используется в большинстве приложений лазеров: при передаче сигналов, локации, зондировании, обработке материалов. Во многих случаях наиболее подходящим средством модуляции являются акустооптические (АО) модуляторы, основанные на дифракции лазерного излучения на создаваемой акустической волной в кристалле объемной дифракционной решетке [1]. Достоинствами АО модуляторов являются малое время переключения, простота и удобство использования, относительно невысокая стоимость и большое разнообразие модификаций, что позволяет оптимизировать выбор устройства для конкретной задачи, в частности задать необходимую длину волны или широкий рабочий диапазон спектра. Это разнообразие, однако, не относится к задачам генерации и модуляции мощного лазерного излучения, в которых к оптическим элементам предъявляется требование высокой лучевой стойкости. Поэтому до сих пор фактически единственным материалом для АО модуляторов мощного лазерного излучения является кварц, кристаллический либо плавленый. И поскольку этот материал не отличается высоким АО качеством, то на АО модулятор приходится подавать управляющий высокочастотный (ВЧ) сигнал большой мощности (до 100 Вт). В свою очередь, это приводит к необходимости проточного водяного охлаждения рабочих кристаллов АО модуляторов [2], что существенно усложняет их использование. В связи с этим создание эффектив-

ных АО модуляторов интенсивного лазерного излучения, не требующих жидкостного охлаждения, является актуальной задачей.

Ранее нами было показано, что используемые в лазерных технологиях кристаллы семейства двойных калиевых вольфраматов $KMe(WO_4)_2$, где Me – металл (Gd, Y, Yb, Lu), являются эффективными АО кристаллами [3] и что они благодаря своей достаточно высокой лучевой стойкости [4] и прозрачности для света в широком спектральном диапазоне (0.4–5 мкм) [5] могут служить основой ряда АО устройств для управления мощным лазерным излучением. В настоящей работе исследованы созданные ранее АО модуляторы на основе $KY(WO_4)_2$ (KYW) [6] и показано, что они значительно эффективнее используемых сейчас классических АО модуляторов.

2. Устройство и особенности АО модуляторов из KYW

Кристаллы калиево-иттриевого вольфрамата KYW имеют выраженную анизотропию свойств, характерную для моноклинной сингонии. Поэтому при изготовлении АО модулятора большое значение имеет правильная ориентация кристаллического образца. Взаимная ориентация осей используемых координатных систем, кристаллографических, кристаллофизических и кристаллооптических, представлена на схеме АО модулятора (рис. 1).

В результате анализа АО характеристик кристалла KYW нами была выявлена возможность создания эффективного двухполяризационного АО модулятора [7] в такой геометрии, когда световая волна, распространяющаяся в направлении, близком к оси симметрии второго порядка кристалла Y, дифрагирует на продольной ультразвуковой волне, бегущей в направлении оси Z° (рис. 2, a). Затем в работе [6] было показано, что наибольшее значение коэффициента АО качества M_2 в случае дифракции на продольной звуковой волне достигается при ее распространении в плоскости Z'Y, которая получается поворотом плоскости Z°Y на угол -30° вокруг оси Y (рис. 2, б).

Для создания экспериментальных макетов АО модуляторов, на которых далее проводились исследования, был проведен анализ наиболее перспективных геометрий

М.М.Мазур, Л.И.Мазур, В.Н.Шорин. ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Россия, Московская обл., 141570 Менделеево; e-mail: mmmazur@vniiftri.ru

В.Э.Пожар. ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Россия, Московская обл., 141570 Менделеево; Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Россия, 117342 Москва, ул. Бултерова, 15; e-mail: v_pozhar@gambler.ru

Ю.П.Константинов. Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Россия, 117342 Москва, ул. Бултерова, 15

Поступила в редакцию 31 января 2017 г., после доработки – 5 мая 2017 г.

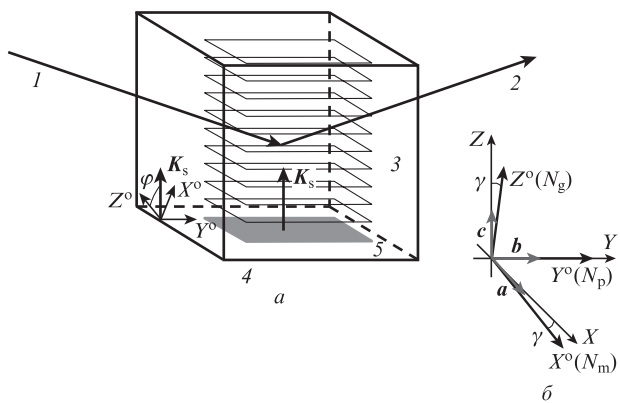


Рис.1. Оптическая схема АО модулятора (а) и координатные системы (б): 1, 2 – падающий и дифрагированный световые пучки; 3 – акустическая волна, создающая объемную (брэгговскую) решетку; 4 – АО ячейка (светозвукопровод, рабочий кристалл); 5 – акустический излучатель (пьезопреобразователь); K_s – волновой вектор акустической волны; a, b, c – базисные векторы кристаллической решетки (кристаллографическая система); XYZ – кристаллофизическая (ортонормированная) система; $X^o Y^o Z^o$ – образованная осями оптической индикатрисы N_m, N_p, N_g кристаллооптическая система, полученная при повороте системы XYZ на угол $\gamma \approx 17.5^\circ$ вокруг оси Y [8].

АО взаимодействия. С этой целью были рассмотрены геометрии, в которых свет распространяется в направлении, близком к оси Y , как на рис.2, а ультразвуковая волна – в ортогональной плоскости XZ . На рис.3 приведены зависимости от направления распространения ультразвуковой волны (K_s) всех основных физических параметров, влияющих на выбор геометрии дифракции: коэффициента АО качества M_2 , скорости звуковых волн и угла отклонения направления групповой скорости от направления фазовой скорости (угла сноса звуковой волны). Звуковая волна распространяется в плоскости $X^o Z^o$ под углом φ к оси Z^o .

В результате для исследований были выбраны две геометрии дифракции: наиболее эффективная и двухполяризационная. Первая (рис.2,б), соответствующая углу $\varphi = -30^\circ$, обеспечивает максимальное значение коэффициента АО качества M_2 , для чего свет должен быть поляризован вдоль оси Z^o . Для двухполяризационного АО модулятора из соображений удобства был выбран угол

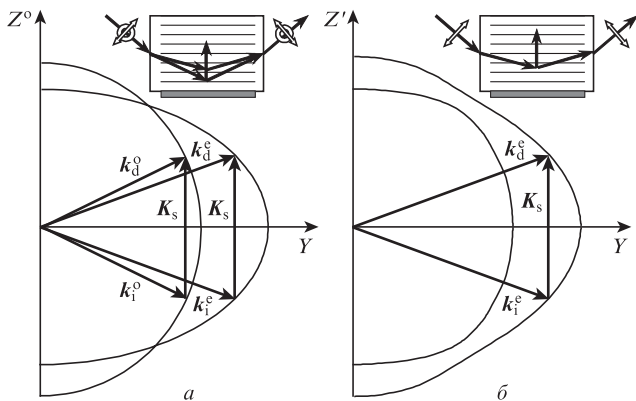


Рис.2. Векторные диаграммы АО дифракции в модуляторах, созданных в «двухполяризационной» геометрии (а) и в наиболее эффективной геометрии для линейно поляризованного излучения (б); $k_i^{o,e}$ и $k_d^{o,e}$ – волновые векторы падающей и дифрагированной обыкновенной и необыкновенной волн соответственно.

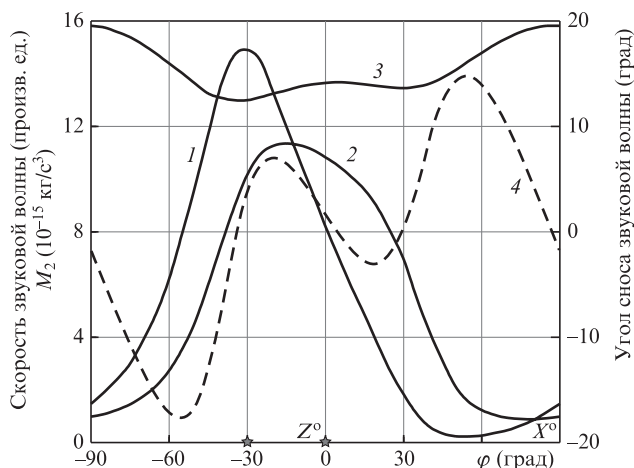


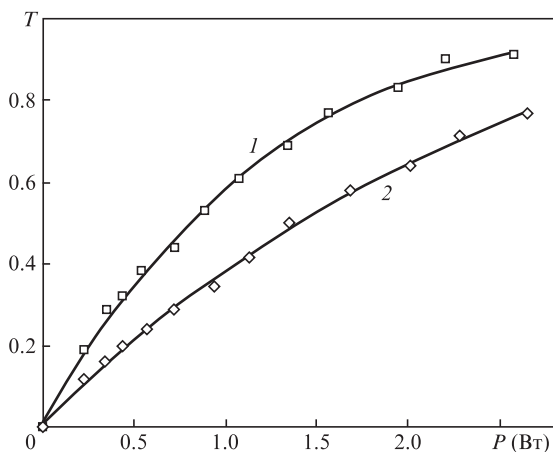
Рис.3. Рассчитанные зависимости АО и акустических характеристик в кристаллах KYW при распространении света вдоль оси Y от направления излучения ультразвука (угла φ), распространяющегося в плоскости, содержащей ось Y : коэффициента АО качества M_2 для света с поляризациями вдоль осей Z^o (1) и X^o (2), скорости звуковой волны (максимальное значение равно 5.55 км/с при $\varphi = \pm 90^\circ$) (3) и угла сноса звуковой волны (4). Звездочками отмечены направления, соответствующие двум выбранным геометриям АО модуляторов.

$\varphi = 0$, который обеспечивает близкие и достаточно большие значения M_2 для света обеих поляризаций. Кроме того, в этой геометрии основание модулятора и грань, на которую нанесен пьезопреобразователь, ориентированы нормально к оптическим осям, как это обычно делается в лазерной оптике. Видно, что для выбранных углов $\varphi = -30^\circ$ и 0 , отмеченных звездочкой на рис.3, угол сноса звуковой волны невелик: 3.4° и 1.6° соответственно. Это важно при создании АО модуляторов, т.к. при большем угле сноса потребуется АО ячейка большего размера, а также могут возникнуть дополнительные сложности при юстировке модулятора. Скорости звуковых волн при $\varphi = -30^\circ$ и 0 равны 4.56×10^5 и 4.79×10^5 см/с соответственно.

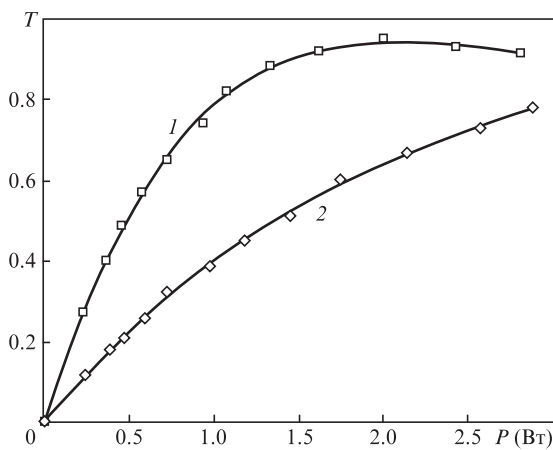
Для выбранных геометрий дифракции были изготовлены и исследованы два АО модулятора разного типа. Их АО ячейки выполнены в виде призм с оптическими гранями, перпендикулярными оси Y кристалла. Эти грани были просветлены для света с длиной волны 1.06 мкм, так что общий коэффициент пропускания устройства (в отсутствие ультразвука) составил 99%.

3. Исследование характеристик модуляторов

На первом этапе определялась дифракционная эффективность АО модуляторов. В исследованиях использовался гелий-неоновый лазер с круговой поляризацией излучения с длиной волны $\lambda = 632.8$ нм. Линейная поляризация лазерного пучка с произвольным направлением вектора поляризации создавалась с помощью дополнительного кристаллического поляризатора. Экспериментальные результаты для разных ориентаций линейной поляризации падающего излучения (рис.4) в целом соответствуют классической зависимости коэффициента дифракции T от подаваемой на модуляторы мощности P : $T = \sin^2[(\pi/2)\sqrt{P/P_0}]$, где P_0 – мощность, обеспечивающая полную дифракцию света. Вычисления дифракционной эффективности АО модуляторов, определяемой как кру-



a



b

Рис.4. Зависимости коэффициента дифракции от ВЧ мощности, подаваемой на АО модулятор на кристалле KYW, для двух собственных оптических мод в случаях двухполяризованной (a) и наиболее эффективной (б) геометрий. Свет поляризован вдоль осей Z^o (1) и X^o (2). Точки – экспериментальные данные, кривые – аппроксимация.

тизна линейного участка зависимости $w = T/P|_{T \ll 1} = \pi^2/(4P_0)$, подтвердили результаты предварительного теоретического анализа, основанного на полученных ранее данных измерения скоростей и фотоупругих коэффициентов: один модулятор продемонстрировал максимальную эффективность (рис.4,б), а в другом АО модуляторе эффективности дифракции для обеих поляризаций были близки (рис.4,а).

Для проверки те же измерения были проведены повторно с использованием лазерного излучения с длиной волны 1.06 мкм, а полученные результаты были пересчитаны с учетом зависимости дифракционной эффективности от длины волны оптического излучения $w \propto n^6(\lambda)/\lambda^2$, обусловленной в том числе дисперсией показателя преломления $n(\lambda)$. Погрешность оценки дифракционной эффективности при этом не превышает 20%, что соответствует точности определения упругооптических характеристик [9].

На втором этапе для сравнения с существующими аналогами в той же оптической схеме были выполнены измерения дифракционной эффективности промышленно выпускаемого АО модулятора неполяризованного излучения МЗ-321, в котором в качестве рабочей среды используется кристаллический кварц (рис.5).

По результатам измерений (рис.6) эффективности двух созданных АО модуляторов на кристалле KYW превы-

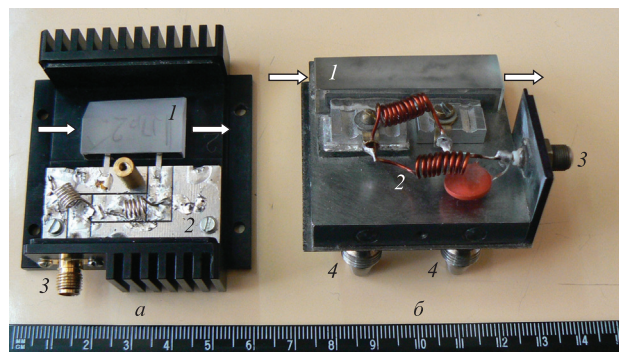


Рис.5. АО модуляторы для управления мощным лазерным излучением – разработанный АО модулятор на кристалле KYW, не требующий охлаждения (a), и серийно выпускаемый АО модулятор МЗ-321 на кварце с водяным охлаждением (б): 1 – АО ячейка; 2 – согласующие ВЧ элементы; 3 – ВЧ разъем для управляющего сигнала; 4 – система водяного охлаждения; белыми стрелками обозначено направление распространения света.

шают эффективность АО модулятора МЗ-321 в 3.7 и 6.6 раза. Следует при этом отметить, что АО модулятор МЗ-321 имеет существенно более длинный ультразвуковой преобразователь, чем АО модуляторы на кристалле KYW (40 и 24 мм соответственно), что обеспечивает ему значительно большую длину АО взаимодействия и делает полученную оценку не вполне корректной. Кроме того, следует учесть, что ультразвуковые преобразователи сопоставляемых АО модуляторов имеют разную ширину: 3 мм для МЗ-321 и 2.5 мм для АО модуляторов на кристалле KYW.

Точный расчет, учитывающий все эти факторы (кривая 4 на рис.6), показал, что созданные АО модуляторы на кристалле KYW эффективнее АО модулятора МЗ-321 при прочих равных условиях в 5.1 и 9.2 раза. Это сравнение, основанное на экспериментальных результатах, полностью соответствует оценкам, полученным по данным прежних вычислений фотоупругих констант и коэффициентов АО качества M_2 (эффективности различаются в 6 и 10 раз).

Для корректности следует сравнить характеристики исследуемых модуляторов на KYW с АО модуляторами

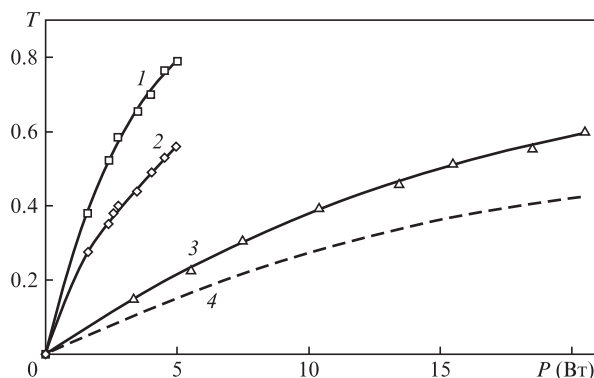


Рис.6. Зависимости коэффициента дифракции от подаваемой ВЧ мощности для двух АО модуляторов на KYW и аналогичного модулятора на SiO₂ в случаях наиболее эффективной геометрии взаимодействия (кривая 1 на рис.4,б) (1), двухполяризованной геометрии (кривая 2 на рис.4,а) (2) и АО модулятора МЗ-321 на кварце (3), а также зависимость 3, пересчитанная для размеров ультразвукового излучателя модуляторов на KYW, равных размеру излучателя модулятора на SiO₂ (4). Точки – экспериментальные данные, кривые – аппроксимация.

на основе парателлуриита (TeO_2), являющегося наиболее используемым и высокоэффективным АО материалом. В то время как рассчитанная эффективность АО модуляторов на кристалле КУУ в зависимости от геометрии дифракции примерно в 2–3 раза меньше, чем модуляторов на кристалле TeO_2 , лучевая прочность последнего материала существенно ниже. Для парателлуриита порог лазерно-индуцированного пробоя короткими импульсами равен примерно 0.3 ГВт/см^2 [10] на длине волны 1 мкм. Та же величина для кристалла $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ (КГВ), относящегося к тому же семейству калиевых вольфраматов, что и $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$, составляет не менее 50 ГВт/см^2 [4]. Исследования модулятора на кристалле КУУ показали его устойчивость к импульсному лазерному излучению длительностью 10 нс с интенсивностью 0.85 ГВт/см^2 . И кристалл, и просветляющее покрытие выдержали эту интенсивность. Таким образом, для мощного лазерного излучения характеристики разработанных модуляторов имеет смысл сравнивать с характеристиками АО модулятора на кварце, чья лучевая прочность соизмерима с прочностью кристалла КГВ [10].

4. Выводы

Экспериментальная проверка подтвердила теоретические расчеты, демонстрирующие уникальные свойства АО модуляторов на кристалле КУУ. В частности, их эффективность в геометрии рис.2,б превышает эффективность типичного АО модулятора на кварце примерно в 10 раз. В другой геометрии (рис.2,а) АО модуляторы на КУУ обеспечивают примерно равные эффективности дифрак-

ции для обеих поляризационных компонент светового пучка, что позволяет осуществлять модуляцию неполяризованного излучения без существенных потерь. Эти модуляторы также превосходят по эффективности кварцевые более чем в пять раз.

Оба разработанных модулятора не требуют водяного охлаждения, поскольку управляющие мощности не приводят к перегреву АО ячейки. Они могут эффективно использоваться как для внутрирезонаторной модуляции добротности, так и для модуляции излучения вне резонатора.

Авторы благодарны Л.Н.Магдичу за интерес к работе.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-29-11802-офи_м.

1. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. *Физические основы акустооптики* (М.: Радио и связь, 1985).
2. Тарасов Л.В. *Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения* (М.: Радио и связь, 1981).
3. Mazur M.M., Velikovskiy D.Yu., Mazur L.I., Pavluk A.A., Pozhar V.E., Pustovoit V.I. *Ultrasonics*, **54**, 1311 (2014); <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2014.01.009>.
4. Mochalov I.V. *Opt. Eng.*, **36** (6), 1660 (1996).
5. Mateos X., Solé R., Gavalda Jna., Aguiló M., Massons J., Diaz F. *Opt. Mater.*, **28**, 423 (2006).
6. Мазур М.М., Мазур Л.И., Пожар В.Э. *Письма в ЖТФ*, **42** (5), 91 (2015).
7. Мазур М.М., Кузнецов Ф.А., Мазур Л.И., Павлюк А.А., Пустовойт В.И. *Неорганические материалы*, **48** (12), 74 (2012).
8. Kaminskii A.A., Konstantinova A.F., Orekhova V.P., Butashin A.V., Klevtsova R.F., Pavlyuk A.A. *Crystallogr. Rep.*, **46** (4), 665 (2001).
9. Mazur M.M., Mazur L.I., Pozhar V.E. *Ultrasonics*, **73**, 231 (2017). DOI: 10.1016/j.ultras.2016.08.008.
10. Ristau D. (Ed.) *Laser-Induced Damage in Optical Materials* (Boca Raton–London–New York: CRC Press, 2015, p. 300).