

10

Оптимальная конфигурация акустооптического модулятора на кристалле $KY(WO_4)_2$

© М.М. Мазур¹, Л.И. Мазур¹, В.Э. Пожар²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Московская обл., п. Менделеево

² Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

E-mail: s-mmazur@mail.ru

Поступило в Редакцию 2 октября 2014 г.

Впервые определены упруго-оптические константы лазерного кристалла $KY(WO_4)_2$. Вычислены и проанализированы угловые зависимости коэффициента акустооптического качества. Показано, что управляющая мощность акустооптического модулятора мощного лазерного излучения на основе этого кристалла может быть снижена вдвое по сравнению с ранее известными конфигурациями.

Ранее было показано [1–3], что кристаллы семейства двойных калиевых вольфраматов $KRe(WO_4)_2$, где Re — атом металла, ответственного за люминесцентные свойства, являются не только эффективными лазерными материалами [4], но и обладают акустооптическими свойствами. Акустооптическое (АО) качество модулятора на таких материалах [5] оказалось всего в три раза ниже [1], чем у кристалла TeO_2 , превзойдя другие используемые на практике АО-материалы, например, кварц. Кроме того, у модуляторов на кристаллах этой группы имеется еще ряд полезных особенностей. Во-первых, благодаря их высокой лучевой стойкости [6] такие модуляторы могут быть использованы для управления характеристиками оптических пучков высокой интенсивности. Во-вторых, поскольку эти кристаллы используются в качестве активных лазерных сред, то на них возможно создание гибридных элементов, обеспечивающих одновременно и генерацию излучения, и управление им. В-третьих, важное свойство указанных модуляторов, связанное с совпадением значений определенных упруго-оптических

констант кристаллической среды, заключается в возможности создания поляризационно-нечувствительных модуляторов, обеспечивающих одинаковую эффективность дифракции для двух ортогональных поляризаций света. Все это делает их применение весьма перспективным.

По результатам работы [1], в которой были измерены характеристики „изотропной“ (без изменения направления поляризации) АО-дифракции в образцах $KY(WO_4)_2$ в системе координат, связанной с оптической индикатрисой (N_m, N_p, N_g) , было показано, что из всех исследованных конфигураций АО-взаимодействия максимальные значения коэффициента акустооптического качества M достигаются в случае распространения акустических волн вдоль оси N_g . Практический интерес представляет определение максимально достижимого значения M , которому соответствует минимально необходимая управляющая мощность ультразвука. Ниже описан метод определения упруго-оптических констант $P_{\alpha\beta}$ из экспериментальных данных, представлены вычисленные значения, рассчитаны угловые зависимости коэффициента АО-качества и определено его максимальное значение, а также проведена оценка параметров АО-модуляторов в оптимальной геометрии.

Коэффициент дифракции света на акустической волне описывается выражением

$$K_{dif} = \frac{\pi}{2} M I_{ac} L^2 \lambda^{-2}, \quad (1)$$

где I_{ac} — плотность мощности акустической волны, L — длина взаимодействия света и звука, λ — длина волны света. Коэффициент АО-качества определяется только характеристиками кристаллической среды и геометрией дифракции

$$M = \frac{n_i^3 n_d^3}{\rho V^3} P_{eff}^2, \quad (2)$$

где n_i, n_d — показатели преломления для падающей и дифрагированной волны; V — скорость звуковой волны, на которой происходит дифракция; ρ — плотность кристалла; P_{eff} — эффективное значение упруго-оптического модуля, выражающееся через комбинацию элементов фотоупругой матрицы $P_{\alpha\beta}$ ($\alpha, \beta = 1, \dots, 6$).

Для „изотропной“ геометрии дифракции при распространении светового пучка вдоль диэлектрических осей в формулу входят только элементы верхней половины матрицы ($\alpha = 1, \dots, 3$). В этой части матрицы, в кристаллах симметрии $2/m$, к которой принадлежит кристалл

калиево-иттриевого вольфрамата, насчитывается 12 ненулевых элементов ($P_{\alpha 4} = P_{\alpha 6} \equiv 0$), которые необходимо вычислить для определения P_{eff} в общем случае. Три элемента (P_{12}, P_{22}, P_{32}) можно вычислить непосредственно из значений коэффициентов АО-качества M , измеренных в соответствующей геометрии. А именно, ввиду того, что ось N_p совпадает с осью симметрии кристалла Y [7], при дифракции на продольной волне, распространяющейся в этом направлении, эффективное значение совпадает с соответствующим элементом

$$M^\alpha(U_{YY}) = \frac{(n_\alpha)^6}{\rho V_{YY}^3} (P_{\alpha 2})^2. \quad (3)$$

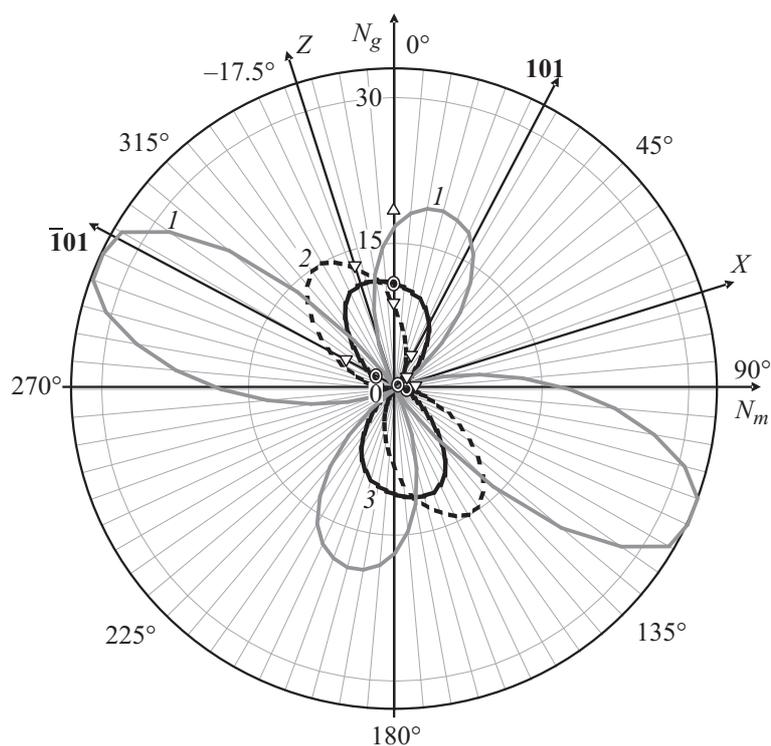
Здесь аргумент U_{YY} обозначает моду и направление распространения ультразвука, а индекс α — поляризацию света, причем везде далее α нумерует оси системы координат, в которой измерялись и вычислялись элементы матрицы $P_{\alpha\beta}$: индексы 1, 2, 3 соответствуют осям оптической индикатрисы N_m, N_p, N_g соответственно, ориентация которых относительно кристаллофизических осей кристалла X, Y, Z [7] отображена на рисунке.

Для определения остальных элементов матрицы $P_{\alpha\beta}$ необходимо использовать дифракцию на акустических волнах, распространяющихся в плоскости XZ , перпендикулярной оси симметрии. В общем случае акустическая волна с волновой нормалью \mathbf{k} , вектор смещения которой \mathbf{a} лежит в этой же плоскости, имеет проекции на обе оси N_m и N_g , так что эффективное значение упруго-оптического модуля P_{eff} выражается через линейную комбинацию трех элементов матрицы $P_{\alpha\beta}$

$$M^m(U_{AB}) = \frac{n_m^6}{\rho V_{AB}^3} [k_1 a_1 P_{11} + k_3 a_3 P_{13} + (k_1 a_3 + k_3 a_1) P_{15}]^2. \quad (4)$$

Здесь представлено выражение для коэффициента АО-качества при дифракции световой волны, поляризованной по оси N_m на акустической волне моды U_{AB} . Измерение дифракции на трех разных акустических волнах: на двух квазипродольных U_{11}, U_{33} и одной квазисдвиговой U_{13} , — позволило получить для трех неизвестных модулей P_{11}, P_{13}, P_{15} три уравнения с различными коэффициентами $k_i a_j$.

Поскольку эта система уравнений квадратична, она имеет 8 комбинаций решений. Из них были выделены только те, которые удовлетворяют физическим требованиям: $P_{\alpha\beta}$ — действительные числа, $P_{\alpha\beta} > 0$ при



Зависимость АО-качества кристалла $KY(WO_4)_2$ от направления распространения ультразвуковой волны в плоскости XZ кристалла. Треугольники и кружки — исходные экспериментальные результаты, кривые — расчет: 1 — для квазисдвиговой звуковой волны (с деформацией в плоскости XZ) при поляризации света по оси N_g ; 2 — для квазипродольной волны при поляризации по оси N_g ; 3 — то же при поляризации по оси N_m . X, Z — кристаллофизические оси кристалла, N_g, N_m — оси оптической индикатрисы [7], оси Y и N_p расположены перпендикулярно плоскости рисунка и совпадают.

$\alpha, \beta = 1, 2, 3$. Поскольку для однозначного решения задачи необходимы дополнительные данные, были выполнены измерения коэффициента АО-качества M для еще нескольких направлений распространения звука, а именно для квазипродольных мод в кристаллографических направлениях $X, Z, [101]$ и $[10\bar{1}]$, а также для квазипоперечной волны

Упруго-оптические коэффициенты кристалла $KY(WO_4)_2$ в системе координат, связанной с осями оптической индикатрисы (N_m, N_p, N_g)

P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{31}	P_{32}	P_{33}	P_{15}	P_{25}	P_{35}
0.12	0.17	0.33	0.15	0.05	0.35	0.14	0.10	0.27	-0.04	-0.02	-0.14

в направлении N_g со смещением \mathbf{a} в плоскости XZ . Затем вычисления P_{11}, P_{13}, P_{15} были выполнены повторно с использованием полученных дополнительно данных. Из всех полученных допустимых наборов решений были выбраны значения, совпавшие (с точностью до погрешности) по результатам основных и дополнительных измерений.

Определение двух других групп модулей, а именно P_{21}, P_{23}, P_{25} и P_{31}, P_{33}, P_{35} было проведено аналогичным образом с использованием коэффициентов АО-качества, полученных при дифракции света, поляризованного по осям N_p и N_g соответственно.

Всего в ходе исследований на трех образцах кристалла $KY(WO_4)_2$ было измерено от 4 до 7 значений коэффициентов АО-качества для каждой из трех поляризаций света. Результаты вычислений приведены в таблице. Общая абсолютная погрешность определения упруго-оптических коэффициентов составила примерно $\pm 0,05$.

Полученные значения упруго-оптических коэффициентов позволяют рассчитать угловую зависимость коэффициента акустооптического качества M для наиболее интересных с практической точки зрения геометрий дифракции (см. рисунок).

Как видно из графиков, максимальное значение коэффициента АО-качества ($M \approx 33 \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$) достигается при дифракции света, поляризованного по оси N_g , на квазисдвиговой волне, имеющей деформации в плоскости XZ , при распространении этой волны в направлении $+25^\circ$ к оси N_m . Это значение АО-качества в 2 раза больше, чем найденное ранее экспериментально значение M при этой геометрии дифракции.

Представляет практический интерес также и дифракция на квазипродольной волне, генерацию которой иногда легче осуществить. В этом случае максимальное значение коэффициента АО-качества M достигается для световой волны с поляризацией вдоль оси N_g при дифракции на квазипродольной волне в случае распространения последней под углом -30° к оси N_g . Коэффициент M при этом достигает величины

$15 \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$, превышая тоже почти в 2 раза максимальное известное до сих пор значение (вдоль оси N_g).

Таким образом, необходимая управляющая мощность, подаваемая на ультразвуковой преобразователь АО-модулятора, может быть снижена вдвое при оптимальном выборе геометрии АО-взаимодействия. А вычисленные значения упруго-оптических констант (12 из 20) позволяют рассчитать коэффициент АО-качества для любой геометрии „изотропной“ дифракции света.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 13-02-01254_а и 13-00-14379_ир.

Список литературы

- [1] Мазур М.М., Кузнецов Ф.А., Мазур Л.И., Павлюк А.А., Пустовойт В.И. // Неорганические материалы. 2011. Т. 47. № 12. С. 1–7.
- [2] Мазур М.М., Великовский Д.Ю., Кузнецов Ф.А., Мазур Л.И., Павлюк А.А., Пожар В.Э., Пустовойт В.И. // Акустический журнал. 2012. Т. 58. № 6. С. 701–709.
- [3] Mazur M.M., Velikovskiy D.Yu., Mazur L.I., Pavluk A.A., Pozhar V.E., Pustovoit V.I. // Ultrasonics. 2014. V. 54. P. 1311–1317.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2014.01.009>
- [4] Senthil Kumaran A., Moorthy Babu S., Ganesamoorthy S., Bhaumik I., Karnal A.K. // J. Crystal Growth. 2006. V. 292. Iss. 2. P. 368–372.
- [5] Mazur M.M., Velikovskiy D.Yu., Mazur L.I., Pozhar V.E., Pustovoit V.I., Pavluk A.A. // 15th Int. conf. „Laser Optics 2012“. S.-Petersburg, 2012. Proc. P. 29.
- [6] Mochalov I.V. // Optical Engineering. 1996. V. 36. N 6. P. 1660–1669.
- [7] Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики. М.: Наука, 1979. 640 с.