

УДК 548.0:534:535.4

Влияние мощности звука на процесс формирования двухмерного контура оптического изображения

В. М. Котов, Г. Н. Шкердин, С. В. Аверин, Е. В. Котов

Дано объяснение влияния акустической мощности на процесс формирования двухмерного контура изображения, возникающего в результате двухкратной брэгговской дифракции, разработана теоретическая модель. Модель учитывает эллиптичность оптических волн и кривизну поверхностей волновых векторов. Эксперименты, выполненные на основе одноосного гиротропного кристалла парателлуриата, полностью подтвердили выводы теории.

PACS: 41.20.-q

Ключевые слова: мощность звука, брэгговская дифракция, контур изображения, теоретическая модель, эксперимент.

Введение

Одной из важных задач в области распознавания объектов является выделение двухмерного контура изображения объекта. Контур как малая часть изображения позволяет значительно сократить вычислительные ресурсы и в то же время дает возможность отслеживать такие параметры изображения, как форма, размеры, перемещение и т. д.

Акустооптическое (АО) взаимодействие широко применяется для этих целей [1—3]. В работе [4] впервые экспериментально продемонстрирована возможность выделения двухмерного контура посредством двухкратной брэгговской АО-дифракции, происходящей в кристалле парателлуриата (TeO_2). Однако наблюдаемый эффект не был теоретически объяснен. Более того, неясен сам факт возникновения двухмерного контура в первом дифракционном порядке в результате двухкратной дифракции, неясен процесс формирования контура с изменением мощности звуковой волны и т. п.

В данной работе развита теоретическая модель процесса формирования контура изображения, в ко-

торой учитывается эллиптичность собственных оптических волн, распространяющихся в монокристалле TeO_2 вблизи его оптической оси, учтена кривизна волновых поверхностей TeO_2 , а также изменение ориентации эллипсов поляризации дифрагировавших лучей в процессе АО-дифракции. Это позволило в конечном итоге объяснить формирование двухмерного контура, а также другие эффекты, наблюдаемые в экспериментах.

Теория

Рассмотрим двухкратную брэгговскую дифракцию, происходящую в кристалле TeO_2 , когда падающий и дифрагировавшие лучи распространяются вблизи оптической оси кристалла Z .

Полагаем, что происходит анизотропная дифракция света на звуке, т. е. дифракция с изменением оптической моды. Акустическая волна с волновым вектором \mathbf{q} распространяется ортогонально оси Z . Обозначим через \mathbf{e}_x и \mathbf{e}_y единичные векторы, ортогональные друг другу и направленные, соответственно, вдоль осей X и Y .

Ввиду того, что оптические волны, распространяющиеся в TeO_2 вблизи OZ , являются в общем случае эллиптически поляризованными, то поля нулевого, первого и второго дифракционных порядков можно записать в виде векторов [5, 6]:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_0 &= E_0 \frac{(-i\beta_0 \mathbf{e}_x + \mathbf{e}_y)}{\sqrt{1+\beta_0^2}}; & \mathbf{E}_1 &= E_1 \frac{(\mathbf{e}_x - i\beta_1 \mathbf{e}_y)}{\sqrt{1+\beta_1^2}}; \\ \mathbf{E}_2 &= E_2 \frac{(-i\beta_2 \mathbf{e}_x + \mathbf{e}_y)}{\sqrt{1+\beta_2^2}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где E_k — амплитуды дифракционных порядков, β_k — их эллиптичности, которые, в свою очередь,

Котов Владимир Михайлович, ведущий научный сотрудник.
Шкердин Геннадий Николаевич, ведущий научный сотрудник.

Аверин Станислав Владимирович, ведущий научный сотрудник.

Котов Евгений Владимирович, младший научный сотрудник.
Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал (ФИРЭ РАН).

Россия, 141100, г. Фрязино МО, пл. Введенского, 1.
Тел. (495) 785-56-39. E-mail: vmk277@ire216.msk.su

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2011 г.

определяются согласно выражению из работы [6] в виде:

$$\beta_k = \frac{2G}{n_1^2(\theta_k) - n_2^2(\theta_k) + \sqrt{[n_1^2(\theta_k) - n_2^2(\theta_k)]^2 + 4G^2}}. \quad (2)$$

Здесь $n_1(\theta_k)$, $n_2(\theta_k)$ — показатели преломления собственных волн кристалла в отсутствие гиротропии.

Для одноосного кристалла имеем следующие соотношения:

$$n_1(\theta_k) = \frac{n_0 n_e}{\sqrt{n_0^2 \sin^2 \theta_k + n_e^2 \cos^2 \theta_k}}, \quad n_2(\theta_k) = n_0. \quad (3)$$

В выражении (3) n_0 , n_e — главные показатели преломления кристалла, θ_k — угол между направлением распространения луча и оптической осью. В выражении (3) $G \approx n_0^2 n_e^2 G_{33}$, где G_{33} — компонента псевдотензора гирации. В нашем случае единичный вектор \mathbf{e}_x направлен вдоль распространения акустической волны \mathbf{q} , а вектор \mathbf{e}_y — ортогонален \mathbf{q} и оптической оси Z кристалла.

Векторные поля \mathbf{E}_0 , \mathbf{E}_1 и \mathbf{E}_2 связаны между собой системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{E}_0}{dz} &= -pf_1 \mathbf{E}_1 \exp(-i\eta_0 z); \\ \frac{d\mathbf{E}_1}{dz} &= pf_1 \mathbf{E}_0 \exp(i\eta_0 z) - pf_2 \mathbf{E}_2 \exp(-i\eta_1 z); \\ \frac{d\mathbf{E}_2}{dz} &= pf_2 \mathbf{E}_1 \exp(i\eta_1 z), \end{aligned} \quad (4)$$

где $p = 2\nu/L$, ν — параметр Рамана—Ната, зависящий от мощности акустической волны;

L — длина АО-взаимодействия;

η_0 , η_1 — отстройки от брэгговского синхронизма;

f_1 , f_2 — коэффициенты, отражающие влияние эллиптичности на процесс дифракции.

В нашем рассмотрении учитывалась кривизна поверхностей волновых векторов в рамках модели, описанной в [4], исходя из которой находились величины η_0 , η_1 путем геометрических построений. Решая систему (4) стандартным методом [7], можно определить поля дифракционных порядков. Конечные решения не приводятся вследствие их громоздкости. Путем компьютерных построений находилось двухмерное распределение амплитуд дифрагировавших излучений, т. е., по сути, определялись передаточные функции АО-взаимодействия.

На рис. 1 приведены расчетные распределения амплитуды первого дифракционного порядка при разных величинах параметра Рамана—Ната ν , равного $3,8\sqrt{2}\pi$; $4,1\sqrt{2}\pi$; $4,4\sqrt{2}\pi$ (рис. а, б и в, соот-

ветственно). Видно, что распределение на всех рисунках сильно неравномерно. Для осуществления двухмерного оконтуривания необходимо наличие участков на передаточных функциях, обладающих двухмерной симметрией. На приведенных рисунках таких ярко выраженных участков нет. Однако есть участки, в которых просматривается некая, хотя и сильно искаженная, симметрия. В частности, это наблюдается в середине рисунков: здесь центральная область представляет собой сильно изломанную линию. На рис. 1, а эта линия ассиметрична; на 1, б линия имеет наиболее симметричный вид, причем в центре рисунка просматривается область в виде ромба; на 1, в наблюдаемая симметрия практически полностью разрушается.

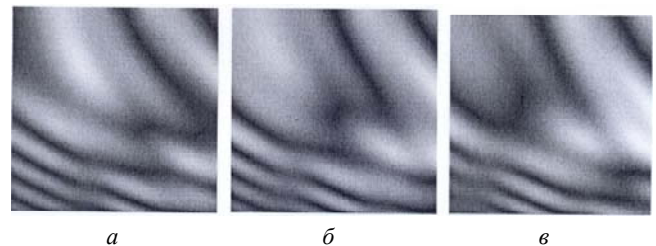


Рис. 1. Передаточные функции первого дифракционного порядка, построенные при значениях параметра Рамана—Ната ν , равного $3,8\sqrt{2}\pi$ (а), $4,1\sqrt{2}\pi$ (б) и $4,4\sqrt{2}\pi$ (в)

На рис. 2 приведены численные результаты Фурье-обработки оптического изображения в виде прямоугольного отверстия при тех же величинах параметра ν , что и на рис. 1, т. е. равного $3,8\sqrt{2}\pi$; $4,1\sqrt{2}\pi$; $4,4\sqrt{2}\pi$ (рис. а, б и в, соответственно). Из анализа рисунков видно, что на рис. 2, б, полученном при $\nu = 4,1\sqrt{2}\pi$, проявляется достаточно резкий двухмерный контур. При больших и меньших значениях ν эффект оконтуривания полностью пропадает. Другими словами, передаточная функция, достаточно далекая от круговой симметрии, но имеющая двухмерную симметрию, позволяет формировать двухмерный контур оптического изображения. Передаточные функции, не имеющие двухмерной симметрии, не обеспечивают выделения двухмерного контура изображения.

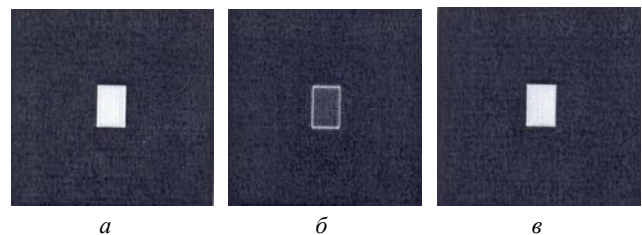


Рис. 2. Формирование двухмерного контура изображения прямоугольного отверстия в результате компьютерной Фурье-обработки при тех же значениях параметра Рамана—Ната, как и на рис. 1

Эксперимент

Этот эффект исследовался экспериментально. Суть Фурье-обработки оптических изображений посредством линз описана, например, в [8]. Основные параметры, используемые нами в эксперименте, совпадают с параметрами работы [4]. В качестве исходного изображения было взято прямоугольное отверстие, представляющее собой щель размером $1 \times 1,5$ мм, освещаемую с одной стороны расширенным пучком He—Ne-лазера ($\lambda = 0,63$ мкм). АО-ячейка, посредством которой осуществлялась двухкратная дифракция, выполнена из монокристалла TeO_2 , к грани (110) которого приклеен пьезопреобразователь из LiNbO_3 , генерирующий поперечную акустическую волну с частотой 35,5 МГц. Длина АО-взаимодействия — 6 мм, размеры преобразователя — 6×4 мм. В процессе эксперимента менялась мощность акустической волны.

На рис. 3 приведены фотографии изображений после Фурье-обработки. Пятна справа — нулевой дифракционный порядок, слева — первый. Фотографии (а), (б), (в) получены при напряжениях, приложенных к пьезопреобразователю, равных 4,5; 5,1 и 6,0 В, соответственно. Эти напряжения, по нашим оценкам, соответствуют параметрам Рамана—Ната ν , используемым для построения изображений на рис. 2.



а



б



в

Рис. 3. Экспериментально наблюдаемое формирование контура изображения в первом дифракционном порядке при различных напряжениях:
а — $V = 4,5$ В; б — $V = 5,1$ В; в — $V = 6,0$ В

Эксперименты показали, что по мере роста напряжения на преобразователе, т. е. роста акустической мощности, двухмерный контур в первом дифракционном порядке начинает формироваться только при достижении некоторого значения напряжения. Наиболее контрастный контур образуется при напряжениях 5,0—5,2 В. При дальнейшем увеличении напряжения контур начинает размываться и исчезать. На рис. 3, б приведена ситуация, когда контур становится наиболее резким, на рис. 3, а контур еще не сформировался, на рис. 3, в контур практически исчез. Таким образом, результаты эксперимента полностью подтверждают процесс формирования двухмерного контура в результате двухкратной брэгговской дифракции, предсказанный развитой нами теорией. Показано, что формирование контура происходит только при достижении некоторого значения мощности звука, исчезая при меньших или больших значениях.

Выводы

1. Развита теория двухкратной брэгговской дифракции в кристаллах, обладающих гиротропией, с учетом эллиптичности собственных оптических волн.
2. Показано, что теоретическая модель описывает возникновение двухмерного контура в первом дифракционном порядке.
3. Эксперименты, выполненные на базе гиротропного одноосного кристалла TeO_2 , подтвердили факт образования двухмерного контура в первом дифракционном порядке и продемонстрировали процесс формирования контура в ходе изменения мощности акустической волны.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-07-00047, грант № 12-07-00233) и гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации НШ-3317.2010.9.

Литература

1. Babkina T. M., Voloshinov V. B. // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2001. V. 3. P. S54.
2. Балакиев В. И., Вопоишиов В. Б. // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. С. 85.
3. Balakshy V. I., Kostyuk D. E. // Appl. Optics. 2009. V. 48. P. 24.
4. Котов В. М., Аверин С. В., Шкердин Г. Н., Воронко А. И. // Квантовая электроника. 2010. Т. 40. С. 368.
5. Сиротин Ю. И., Шаскопская М. П. Основы кристаллофизики. — М.: Наука, 1979.

6. Ярус А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. — М.: Мир, 1987.

7. Котов В. М. // ЖТФ. 1993. Т. 63. В. 11. С. 103.

8. Francis T. S., lam-Choon Khoo. Principles of Optical Engineering. — New-York: Willey and Sons, 1990.

Effect of the acoustic power on the forming process of the optical image edge enhancement

V. M. Kotov, G. N. Shkerdin, S. V. Averin, E. V. Kotov

Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Fryazino Branch,

1 Vvedensky sq., Fryazino, Moscow region, 141195, Russia

E-mail: vmk277@ire216.msk.su

The theoretical model is developed for explaining the acoustic power effect on the forming process of the optical image edge enhancement generated as a result of the two-phonon. This model takes into account the ellipticity of the optical waves and the surfaces curvature of the wave vectors. The experiments which were fulfilled on the basis of a gyrotropic uniaxial crystal of paratellurite have completely confirmed the theoretical conclusions.

PACS: 41.20.-q

Keywords: acoustic power, Bragg diffraction, image edge, theoretical model, experiment.

Bibliography — 8 references.

Received November 20, 2011