

К вопросу о трехкратной брэгговской дифракции в кристалле парателлурита

© В.М. Котов, С.В. Аверин, А.И. Воронко, Е.В. Котов, С.А. Тихомиров

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
141120 Фрязино, Московская обл., Россия
e-mail: vmk277@ire216.msk.su

(Поступило в Редакцию 23 августа 2016 г.)

Исследован вариант трехкратной брэгговской дифракции в кристалле парателлурита, когда плоскость дифракции наклонена к оптической оси кристалла. Показано, что эффективные фотоупругие константы для анизотропной и изотропной дифракций практически не меняются с изменением угла наклона плоскости дифракции. Экспериментально получено трехкратное брэгговское рассеяние оптического излучения с длиной волны $0.63 \mu\text{m}$ в парателлурите на „медленной“ акустической волне с частотой 47.3 МГц. При подводимой к пьезопреобразователю электрической мощности 0.69 W относительные эффективности дифракционных порядков составили $\sim 0.4, 0.4, 0.1$ и 0.1 соответственно.

DOI: 10.21883/JTF.2017.07.44682.2021

Введение

Одной из интересных особенностей акустооптической (АО) дифракции в анизотропных средах является возможность двух- и трехкратного брэгговского рассеяний [1–3], когда оптическое излучение дифрагирует в два или три дифракционных порядка, каждый из которых является брэгговским. Выполнение строгого брэгговского синхронизма позволяет сконцентрировать все оптическое излучение в наивысшем порядке, при этом угол отклонения и изменение частоты света равны соответственно $n\Theta_p$ и nf , где Θ_p и f — угол рассеяния и частота смещения одиночного акта дифракции, n — номер дифракционного порядка. Интерес к многократной брэгговской дифракции возрос в настоящее время в связи с обработкой оптических изображений. Выяснилось, что многократные акты рассеяния позволяют получать двумерный контур изображения в процессе его фурье-обработки [4–6]. Поэтому более детальные исследования многократных процессов брэгговского рассеяния расширяют возможности использования АО взаимодействия для задач обработки оптических изображений.

В работе [2] достаточно подробно рассмотрено это явление на примере многократной (многофононной) дифракции в парателлурите (TeO_2), наиболее известном и широко используемом на практике АО кристалле. Самая эффективная дифракция в TeO_2 происходит при рассеянии света на поперечной звуковой волне V_s , распространяющейся вдоль направления кристалла с направлением сдвига вдоль $[1\bar{1}0]$ [2,7,8]. При этом возможна только анизотропная дифракция, сопровождающаяся „перебросом“ волнового вектора света с одной волновой поверхности на другую. Изотропная же дифракция, происходящая в пределах одной волновой поверхности, невозможна, для нее соответствующая фотоупругая константа равна нулю [2,7,8]. В связи с этим в [2] рассматривались варианты многофононной

дифракции в TeO_2 , использующие только анизотропную дифракцию. В этом случае многофононная дифракция возможна только с расстройкой брэгговского синхронизма, при этом наименьшая расстройка обеспечивается только в случае, когда плоскость дифракции содержит оптическую ось кристалла. Здесь дифракция происходит на фиксированной звуковой частоте. Например, трехфононная дифракция оптического излучения с длиной волны $0.63 \mu\text{m}$ происходит на частоте звука, равной ~ 27 МГц.

В настоящей работе рассматривается трехкратное брэгговское рассеяние света, когда плоскость дифракции наклонена к оптической оси кристалла. При достаточно больших углах наклона гиротропию кристалла можно не учитывать, задача существенно упрощается. В работе выполнен полный расчет процесса дифракции, получены его характеристики. В частности, выяснилось, что частота звука для реализации трехкратной дифракции не фиксирована, она меняется линейно с ростом угла наклона; становится возможной реализация изотропной дифракции на звуковой волне V_s ; ряд параметров дифракции практически не зависит от угла наклона и т.п. Все это существенно расширяет возможности акустооптики для управления параметрами оптического излучения посредством многофононного брэгговского рассеяния.

1. Теория

На рис. 1 представлена трехмерная векторная диаграмма трехкратной АО дифракции в одноосном кристалле, плоскость дифракции P наклонена к оптической оси кристалла OZ на угол α . Для определенности рассматривается одноосный положительный кристалл. Падающее излучение с волновым вектором \mathbf{K}_0 в результате АО взаимодействия с акустической волной \mathbf{q}

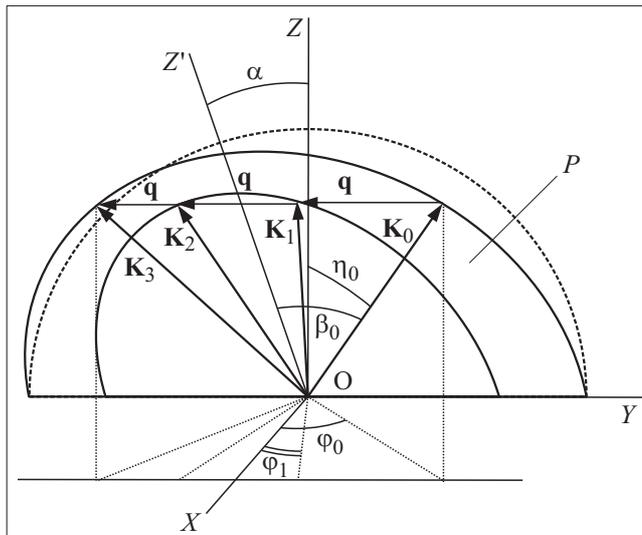


Рис. 1. Векторная диаграмма трехкратной брэгговской дифракции.

($\mathbf{q} \perp OZ$), последовательно дифрагирует в направления $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2$ и \mathbf{K}_3 , являющиеся первым, вторым и третьим дифракционными порядками соответственно. Ось OZ' является проекцией оптической оси OZ на плоскость дифракции P . Угол между \mathbf{K}_0 и OZ' обозначен β_0 . Будет подразумеваться, что углы между векторами $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \mathbf{K}_3$ и OZ' равны $\beta_1, \beta_2, \beta_3$. Последние углы на диаграмме не показаны, чтобы не перегружать рисунок. Углы между векторами $\mathbf{K}_0-\mathbf{K}_3$ и оптической осью OZ равны $\eta_0-\eta_3$, показан только угол η_0 . Углы между проекциями $\mathbf{K}_0-\mathbf{K}_3$ на плоскость OXY и осью OX равны $\varphi_0-\varphi_3$, приведены только углы φ_0 и φ_1 по вышеуказанным соображениям. Полагается, что дифракция происходит в монокристалле TeO_2 . Будем рассматривать дифракцию излучения с длиной волны $0.63 \mu\text{m}$. Оси OX, OY, OZ соответствуют кристаллографическим направлениям $[1\bar{1}0], [110]$ и $[001]$ кристалла TeO_2 . Полагаем, что угол наклона α больше 3° , поэтому гиротропией кристалла для выбранной длины волны света пренебрегаем. В этом приближении поверхности волновых векторов одноосного кристалла описываются выражениями [8,9]

$$\frac{k_z^2}{k_n^2} + \frac{k_y^2}{k_e^2} = 1, \quad k_z^2 + k_y^2 = k_0^2, \quad (1)$$

где $k_0 = 2\pi n_0/\lambda k_e = 2\pi n_e/\lambda, k_n = 2\pi n_\alpha/\lambda,$

$$n_\alpha = n_0 n_e \left(n_0^2 \sin^2 \alpha + n_e^2 \cos^2 \alpha \right)^{-1}. \quad (2)$$

Здесь n_0, n_e — главные показатели преломления кристалла, λ — длина волны света, α — угол наклона плоскости дифракции к оптической оси OZ, k_z, k_y — проекции волнового вектора света на оси OZ' и OY соответственно. Нетрудно показать, что волновой вектор звука трехкратной брэгговской дифракции определяется

соотношением

$$q = 2k_e \sqrt{\frac{k_n^2 - k_0^2}{9k_n^2 - k_e^2}}. \quad (3)$$

Все последующие вычисления выполнялись на основании выражений (1), (2) и векторной диаграммы при следующих параметрах: $\lambda = 0.63 \mu\text{m}, n_0 = 2.26, n_e = 2.41$. Скорость звука в кристалле бралась равной 617m/s . В силу симметрии АО взаимодействия $\beta_0 = \beta_3$ и $\beta_1 = \beta_2$. Расчеты показали, что частота звука растет линейно с ростом α и подчиняется соотношению $f \approx 10^7 \alpha$, где частота f выражается в Hz, угол α — в deg. Например, при $\alpha = 5^\circ$ частота равна 50MHz . Углы $\beta_0-\beta_3$ также линейно зависят от α , они описываются соотношениями $\beta_0 = \beta_3 \approx 0.4\alpha, \beta_1 = \beta_2 \approx 0.12\alpha$. Углы $\eta_0-\eta_3$ и $\varphi_0-\varphi_3$ связаны с углами α и $\beta_0-\beta_3$ соотношениями

$$\cos \eta_{0-3} = \cos \alpha \cos \beta_{0-3},$$

$$\cos \varphi_{0-3} = \sin \alpha \cos \beta_{0-3} / \sin \eta_{0-3}. \quad (4)$$

Знание углов $\eta_0-\eta_3$ и $\varphi_0-\varphi_3$ необходимо для вычисления фотоупругих констант. Здесь также в силу симметрии рассматриваемого варианта дифракции $\eta_0 = \eta_3, \eta_1 = \eta_2, \varphi_0 = \varphi_3, \varphi_1 = \varphi_2$. Расчеты показывают, что $\varphi_0 = \varphi_3 = 21.6^\circ, \varphi_1 = \varphi_2 = 7.52^\circ$, и эти значения не меняются с изменением угла α (!). Эффективные фотоупругие константы для дифракции „необыкновенного“ луча в „обыкновенный“ ($e-o$) и „обыкновенного“ в „обыкновенный“ ($o-o$) вычислялись согласно выражениям

$$P_{\text{eff}(e-o)} = 0.5(P_{11} - P_{12}) \cos \eta_0 \cos(\varphi_0 + \varphi_1),$$

$$P_{\text{eff}(o-o)} = -0.5(P_{11} - P_{12}) \sin 2\varphi_1. \quad (5)$$

Оказалось, что $P_{\text{eff}(e-o)}$ и $P_{\text{eff}(o-o)}$ практически не зависят от α , они равняются 0.105 и 0.032 соответственно.

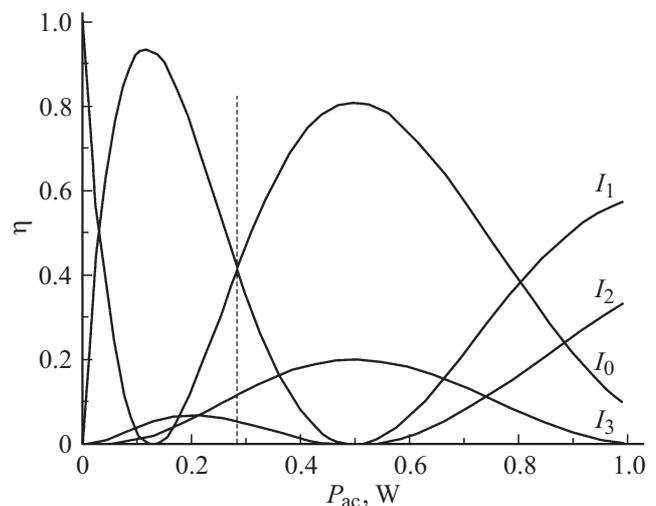


Рис. 2. Зависимости эффективности дифракции 0-, 1-, 2- и 3-го брэгговских порядков от акустической мощности P_{ac} .

Обе фотоупругие константы не равны нулю. Другими словами, расчеты указывают на возможность существования трехкратного рассеяния с использованием как анизотропного, так и изотропного вариантов дифракции.

За основу расчета эффективностей дифракционных порядков трехкратной брэгговской дифракции использована методика, изложенная в [1,8]. Параметры Рамана–Ната ν_{e-o} и ν_{o-o} для анизотропного и изотропного актов дифракции, входящие в уравнения, вычислялись согласно выражениям

$$\nu_{e-o} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{M_{2(e-o)}L}{2H} P_{ac}}, \quad \nu_{o-o} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{M_{2(o-o)}L}{2H} P_{ac}}, \quad (6)$$

где L и H — длина АО взаимодействия и высота акустического столба соответственно, $M_{2(e-o)}$ и $M_{2(o-o)}$ — коэффициенты АО качества материала, равные $M_{2(e-o)} = \frac{n_0^6 p_{\text{eff}(e-o)}^2}{\rho V^3}$, $M_{2(o-o)} = \frac{n_0^6 p_{\text{eff}(o-o)}^2}{\rho V^3}$, где ρ — плотность кристалла, V — скорость звуковой волны. В нашем случае $M_{2(e-o)} \approx 1040 \cdot 10^{-18} \text{ s}^3/\text{g}$, $M_{2(o-o)} \approx 92 \cdot 10^{-18} \text{ s}^3/\text{g}$. В выражении (6) P_{ac} — мощность звука.

На рис. 2 приведены зависимости эффективности дифракции η нулевого, 1-, 2- и 3-го дифракционных порядков, обозначенные как I_0, I_1, I_2 и I_3 , от мощности звука P_{ac} . Видно, что характер изменения эффективности дифракции всех порядков — осциллирующий. Вертикальной штриховой линией указана мощность звука и соответствующие ей интенсивности дифракционных порядков, которые наблюдались нами в эксперименте (см. ниже).

Отметим попутно, что, согласно расчетам, все излучение может быть сконцентрировано в третьем порядке дифракции. Это реализуется при мощности звука $P_{ac} \approx 4.8 \text{ W}$. Таким образом, существует возможность практически 100%-ного отклонения всего падающего излучения в наивысший порядок.

2. Эксперимент и обсуждение экспериментальных результатов

На рис. 3 приведена оптическая схема экспериментальной установки. Оптическое излучение с длиной волны $0.63 \mu\text{m}$, генерируемое He–Ne-лазером 1, направляется на четверть-волновую пластинку 2, после которой — на АО ячейку 3. На ячейку подается электрический сигнал 4. За ячейкой расположен анализатор 5 для анализа поляризаций выходящих из ячейки лучей. Пятна от лучей наблюдаются на экране 6. Пятно 7 — непродифрагировавший луч, пятна 8, 9 и 10 — лучи, продифрагировавшие в первый, второй и третий порядки соответственно. АО ячейка 3 выполнена из монокристалла TeO_2 с размерами $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \text{ cm}$ вдоль направлений $[001]$, $[110]$ и $[1\bar{1}0]$ кристалла. Вдоль $[1\bar{1}0]$ распространялась „медленная“ звуковая волна, генерируемая пьезопреобразователем из LiNbO_3 . Частота звука — 47.3 MHz .

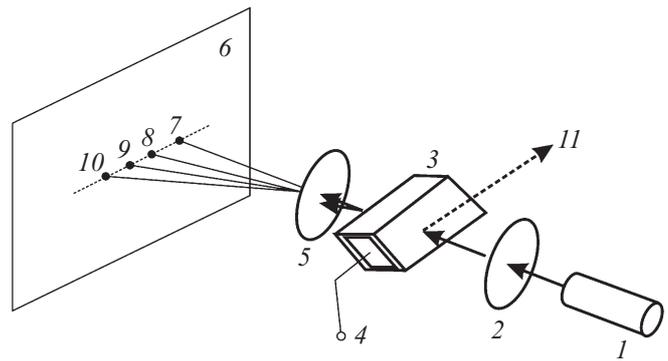


Рис. 3. Оптическая схема экспериментальной установки.

Длина АО взаимодействия — 0.6 cm . Путем наклона АО ячейки добивалась ситуация, когда появлялись все дифрагировавшие лучи с максимально возможной эффективностью. При наклоне плоскости дифракции на угол $\sim 4.8^\circ$, определяемом по углу отражения луча 11 от передней грани кристалла с соответствующим пересчетом для учета преломления на границе и напряжении на пьезопреобразователе 8.3 V , относительные эффективности лучей составили $\sim 0.4, 0.4, 0.1$ и 0.1 для 0-, 1-, 2- и 3-го порядков соответственно. Электрическая мощность, соответствующая напряжению 8.3 V при нагрузке 50Ω , равна 0.69 W . Полученные эффективности соответствуют случаю, отмеченному на рис. 3 вертикальной линией, соответствующей $P_{ac} \approx 0.28 \text{ W}$. Это означает, что коэффициент преобразования электрической мощности в акустическую равен ~ 0.41 . Все расхождения между теоретическими и экспериментальными данными могут быть объяснены неполным согласованием импедансов электрического и оптического трактов, неточностью используемой нами модели, конечной расходимостью оптических и акустических лучей, неточной ориентацией кристалла и т.п. В любом случае наблюдается хорошее согласие теории и эксперимента.

3. Заключение

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Рассмотрена трехкратная брэгговская дифракция в плоскости, наклоненной к оптической оси кристалла на угол α . Показано, что рассматриваемая геометрия позволяет рассчитать все параметры взаимодействия: частотно-угловые характеристики, эффективные фотоупругие константы, эффективность дифракции всех порядков как функции мощности звука.

2. Показано, что эффективные фотоупругие константы, определяющие эффективность трехкратной дифракции, не зависят от наклона плоскости дифракции, и на длине волны света $0.63 \mu\text{m}$ равны 0.105 и 0.0312 для анизотропного и изотропного актов рассеяния соответственно.

3. Эксперименты, выполненные на основе монокристалла TeO_2 , выбранного в качестве материала АО ячейки, подтвердили основные выводы теории: получена трехкратная брэгговская дифракция на частоте звука 47.3 МГц с относительными эффективностями, равными 0.4, 0.4, 0.1 и 0.1 для 0-, 1-, 2- и 3-го дифракционных порядков соответственно.

Полученные результаты могут найти применение в системах обработки оптических сигналов, в которых используется многократное брэгговское рассеяние.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты № 16-07-00064, 14-07-00014) и гранта президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации НШ-3317.2010.9.

Список литературы

- [1] Балакий В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 280 с.
- [2] Раковский В.Ю., Щербаков А.С. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 7. С. 107–114.
- [3] Волошинов В.Б., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Некоторые особенности анизотропной дифракции Брэгга // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физ., астр. 1976. Т. 17. № 3. С. 305–312.
- [4] Котов В.М., Аверин С.В., Шкердин Г.Н., Воронко А.И. // Квант. электрон. 2010. Т. 40. Вып. 4. С. 368–370.
- [5] Котов В.М., Шкердин Г.Н., Булюк А.Н. // Квант. электрон. 2011. Т. 41. Вып. 12. С. 1109–1113.
- [6] Котов В.М., Шкердин Г.Н., Григорьевский В.И. // Радиотехн. и электрон. 2013. Т. 58. Вып. 3. С. 256–263.
- [7] Xu J., Stroud R. Acousto-Optic Devices: Principles, Design and Applications. John Wiley and Sons, Inc., 1992. 652 p.
- [8] Котов В.М. Акустооптика. Брэгговская дифракция многоцветного излучения. М.: Янус-К, 2016. 286 с.
- [9] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 719 с.