

УДК 535.42

Г. В. Кулак, Г. В. Крох, Т. В. Николаенко

**АКУСТООПТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЧНО
ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПОЛИХРОМАТИЧЕСКИХ СВЕТОВЫХ
ПУЧКОВ В КРИСТАЛЛАХ ПАРАТЕЛЛУРИТА**

Исследована брэгговская дифракция частично поляризованных полихроматических световых пучков в кристаллах парателлурита. Рассчитана матрица когерентности световых пучков, дифрагированных в первый порядок. Численные расчеты проведены для дифракционной эффективности полихроматического излучения с гауссовым профилем спектра. Показано, что с увеличением ширины спектра падающего

излучения эффективность дифракции уменьшается. Это связано с уменьшением интенсивности света при отклонении длины волны от центральной и с селективными особенностями брэгговской дифракции.

Ключевые слова: дифракция света на ультразвуке, полихроматическое излучение, одноосный кристалл.

Введение. Многие лазерные источники, например, CO_2 –лазеры [1], инжекционные лазеры [2] при определенных условиях генерируют частично поляризованное излучение (ЧПИ), степень поляризации которого существенно зависит от анизотропии резонатора, его поляризационной селективности, свойств и состояния активной среды. При изучении дифракции лазерного излучения на ультразвуке необходим учёт как спектральных, так и поляризационных характеристик лазерного излучения. Экспериментальное исследование брэгговской дифракции ЧПИ на УЗ волнах в одноосных кристаллах парателлуриата (TeO_2) проведено в [2] с акцентом на особенностях рассеяния неполяризованного излучения на медленной сдвиговой акустической моде. Однако до настоящего времени не проводились достаточно полные теоретические исследования рассеяния полихроматических световых пучков на УЗ волнах в кристаллах TeO_2 . В одноосных кристаллах реализуется широкоапертурная геометрия взаимодействия света и ультразвука [3], [4]. При этом плоскость акустооптического (АО) взаимодействия проходит через оптическую ось, а волновой вектор ультразвуковой (УЗ) волны составляет с перпендикуляром к оптической оси некоторый угол $\alpha \neq 0$. Такая геометрия АО взаимодействия имеет место, когда на диаграмме волновых векторов падающего и дифрагированного света касательные к волновым поверхностям параллельны.

Корректное описание процесса брэгговского рассеяния ЧПИ может, быть достигнуто на основе применения аппарата матрицы когерентности [5], [6]; при этом необходимо учитывать конечную ширину спектра падающего на ультразвуковую решетку излучения.

Результаты исследования и их обсуждение. В настоящей работе рассмотрены особенности брэгговской АО дифракции частично поляризованных полихроматических световых пучков на ультразвуковых (УЗ) волнах в кристаллах парателлуриата. При этом исследовались особенности широкоапертурной АО дифракции на медленной сдвиговой УЗ волне широкополосного излучения ИК диапазона с центральной длиной волны $\lambda_0 = 750$ нм. При численных расчетах предполагалось, что распределение интенсивности падающего полихроматического излучения имеет гауссову форму:

$$I(\lambda) = \exp \left\{ -4 \ln 2 (\lambda - \lambda_0)^2 / \Delta \lambda_0^2 \right\},$$

где $\Delta\lambda_0$ – полная ширина распределения по уровню 0,5 от максимального значения;

λ_0 – центральная длина волны источника.

Такое распределение интенсивности излучения может быть достигнуто, например, с помощью полупроводникового светодиода.

Расчеты проводились для анизотропной АО дифракции БСП, распространяющихся вблизи оптической оси гиротропного кристалла парателлуриата (TeO_2). Дифракция осуществлялась на медленной сдвиговой УЗ волне, распространяющейся с фазовой скоростью $v = 617$ м/с вдоль оси $[110]$ и поляризованной вдоль оси $[\bar{1}10]$. Геометрия АО взаимодействия представлена на рисунке 1.

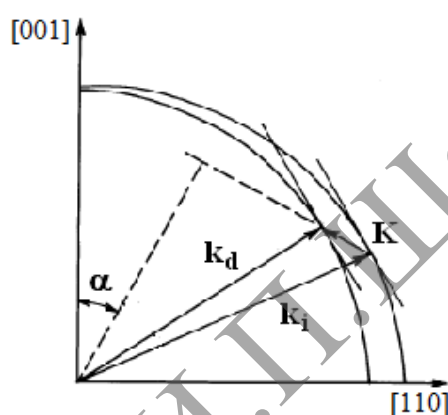


Рисунок 1. – Геометрия широкоапертурной АО дифракции в одноосных кристаллах

Поляризационные и энергетические характеристики дифрагированного пучка определяются элементами 2×2 -матрицы когерентности [4]:

$$J = \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda}^{\lambda_0 + \Delta\lambda} (L_1 J_0 L_1^\dagger) d\lambda, \quad (1)$$

где J_0 – матрица когерентности падающего частично эллиптически поляризованного полихроматического излучения;

L_1 – матрица Джонса акустооптической ячейки для дифрагированного пучка;

L_1^\dagger – эрмитово-сопряженная с ней матрица.

Элементы матрицы L_1 связывают проекции амплитуд падающей и дифрагированной световых волн на оси X_1 и Y_1 системы координат $X_1 Y_1 Z_1$, полученной поворотом координатной системы XYZ на угол ϕ_0

вокруг оси Y . Так как $\varphi_0 \ll 1$, то элементы матрицы Джонса L в системе XYZ практически совпадают с элементами матрицы L_1 [6].

Матрица J_0 имеет вид [6]:

$$J_0 = \frac{1}{2} I \begin{pmatrix} 1 + P_0 \cos \psi_0 \cos 2\varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \sin \psi_0 + i \sin 2\varepsilon_0 \\ \cos \varepsilon_0 \sin \psi_0 - i \sin 2\varepsilon_0 & 1 - P_0 \cos \psi_0 \cos 2\varepsilon_0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где P_0 – степень поляризации;

ψ_0 – угол между направлением наибольшей поляризации падающего света и плоскостью рассеяния YZ ;

$\varepsilon_0 = \arctg \tau_0$ – угол эллиптичности;

τ_0 – параметр эллиптичности (отношение величин малой и большой осей эллипса поляризации эллиптически поляризованной составляющей падающего света).

Элементы матрицы L_{ij} находим с учетом особенностей дифракции света длины волны λ отличной от брэгговской λ_0 , на медленной сдвиговой ультразвуковой волне в кристаллах TeO_2 . Эти элементы определяются выражениями:

$$L_{ij} = \chi_{ij} \frac{\sin l_d \sqrt{\chi_{ij}^2 + \delta(\lambda - \lambda_0)^2}}{\sqrt{\chi_{ij}^2 + \delta(\lambda - \lambda_0)^2}}, \quad j = 1, 2, \quad (3)$$

где постоянные связи (χ_{ij}) и коэффициент δ находятся из соотношений:

$$\chi_{ij} = \left(\frac{\pi n_o^3 \Delta b_{ij}}{\lambda_0 \sin \theta_1 \sin \psi_1} \right) \sqrt{\frac{2P_a}{l_1 l_2 \rho^3}},$$

$$\delta = \left(-\frac{2\pi n_o}{\lambda^2} \right) \left\{ \sqrt{\xi(\theta_1) - \eta)^2 + 2\eta\xi(\theta_1)(1 - \cos(\theta_1 - \gamma_1))} - 1 \right\},$$

причем

$$\xi(\theta_1) = \frac{n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta_1 + n_e^2 \sin^2 \theta_1}}, \quad \eta = \frac{\lambda f}{n_o v}.$$

Здесь введены следующие обозначения: P_a – мощности ультразвуковой волны, ρ – плотность кристалла, $\Delta b_{11} = \Delta b_{22} = 0$, $\Delta b_{12} = \Delta b_{21} = (p_{12} - p_{11}) - p_{44} \sin(2\alpha)/8$ – эффективная фотоупругая постоянная в полярной плоскости (p_{11}, p_{12}, p_{44} – фотоупругие постоянные

[7]); параметр; $l_1 \times l_2$ – размер преобразователя; θ_1 – угол дополнительный к углу падения в полярной плоскости (отсчитывается от оси X), ψ_1 – угол, дополнительный к углу дифракции в полярной плоскости, α – угол ориентации волнового вектора ультразвука по отношению к оси X в полярной плоскости; ρ – плотность кристалла; v – фазовая скорость УЗ волны; f – частота УЗ волны, P_a – мощность ультразвука; l_d – длина АО взаимодействия с учетом отклонения групповой скорости УЗ волны от фазовой [3]; n_0 (n_e) – обыкновенный (необыкновенный) показатели преломления кристалла.

Подставив (2) и (3) в (1), получим следующие выражения для элементов матрицы когерентности дифрагированного пучка:

$$\begin{aligned}
 J_{11} &= \frac{1}{2} \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda}^{\lambda_0 + \Delta\lambda} L_{12}^2 I(\lambda) d\lambda - \frac{1}{2} P_0 \cos^2(\epsilon_0) \times \\
 &\times \left[\cos(\psi_0) \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda}^{\lambda_0 + \Delta\lambda} L_{12}^2 I(\lambda) d\lambda \right], \\
 J_{22} &= \frac{1}{2} \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda}^{\lambda_0 + \Delta\lambda} L_{12}^2 I(\lambda) d\lambda + \frac{1}{2} P_0 \cos^2(\epsilon_0) \times \\
 &\times \left[\cos(\psi_0) \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda}^{\lambda_0 + \Delta\lambda} L_{12}^2 I(\lambda) d\lambda \right], \\
 J_{12} &= J_{21} = 0.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Эффективность дифракции η и степень поляризации P дифрагированного излучения связаны с элементами матрицы (4) соотношениями:

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{1}{k} (J_{11} + J_{22}), \quad P = \left[1 - \frac{4J_{11}J_{22}}{(J_{11} + J_{22})^2} \right]^{1/2} \\
 k &= \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda}^{\lambda_0 + \Delta\lambda} I(\lambda) d\lambda.
 \end{aligned} \tag{5}$$

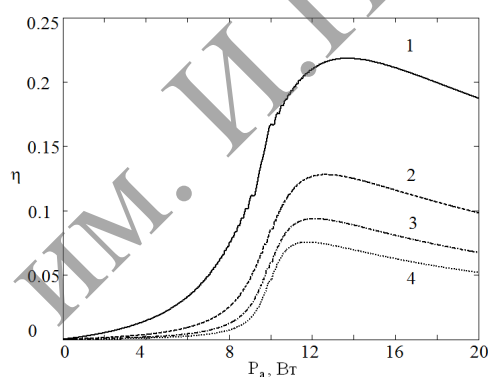
Таким образом, для рассматриваемой геометрии АО взаимодействия, азимут поляризации $\psi = 0$, эллиптичность полностью поляризованной составляющей дифрагированного пучка $\tau = 0$, степень поляризации $P \neq 1$ [6].

С использованием полученных соотношений (5) проводились численные расчеты для случая брэгговской дифракции ИК излучения с

центральной длиной волны $\lambda_0 = 750$ нм на медленной сдвиговой УЗ волне частотой $f = 159$ МГц.

На рисунке 2 представлена зависимость дифракционной эффективности η от мощности P_a ультразвука при различных значениях ширины спектра $\Delta\lambda$ падающего линейно поляризованного излучения. Видно, что с увеличением $\Delta\lambda$ эффективность дифракции уменьшается, что объясняется меньшей эффективностью рассеяния боковых участков спектра по сравнению с центральной частью.

Из рисунка 2 следует, что с увеличением ширины спектра падающего излучения $\Delta\lambda$ эффективность дифракции уменьшается. Это связано с тем, что при отклонении длины волны падающего света от брэгговской λ_0 уменьшается эффективность дифракции боковых участков спектра. При значительных ширинах спектра $\Delta\lambda$ имеет место выраженный максимум эффективности дифракции. Данный эффект объясняется уменьшением интенсивности света при отклонении его длины волны λ от центральной λ_0 и ее увеличением при увеличении интенсивности ультразвука. Как следует из выражений (5), даже при линейной поляризации падающего света ($P_0=1$) дифрагированный свет является частично поляризованным ($P<1$).



$\Delta\lambda = 20$ (1), 40 (2), 60 (3) и 80 нм (4) ($\Delta\lambda_0 = 400$ нм, $l_1 = 2$ см, $l_2 = 2$ см, $P_0 = 1$, $\psi_0 = 0$, $\lambda_0 = 750$ нм, TeO_2)

Рисунок 2. – Зависимость дифракционной эффективности η падающего линейно поляризованного полихроматического гауссова светового пучка от мощности УЗ волны P_a для различных ширин спектра падающего пучка

Выводы. Таким образом, при акустооптической дифракции полихроматических световых пучков эффективность широкоугольной дифракции в одноосных кристаллах уменьшается при увеличении ширины спектра падающего излучения. При этом даже для полностью поляризованного падающего светового пучка дифрагированный пучок становится частично поляризованным. Данные особенности акустооптической дифракции необ-

ходимо учитывать при конструировании широкоапертурных неколлинеарных перестраиваемых фильтров.

Список основных источников

1. Поляризация CO_2 лазера с анизотропным резонатором / В. П. Кабашников [и др.] // ЖПС. – 1978. – Т. 29, № 3. – С. 436–441.
2. Влияние поляризации инжекционных лазеров на эффективность акустооптического взаимодействия в анизотропных кристаллах / В. А. Кандратьев [и др.] // Квант. электрон. – 1983. – Т. 10, № 3. – С. 638–639.
3. Спектральное пропускание широкоапертурного брэгговского акустооптического фильтра на парателлурите / В. Б. Волошинов [и др.] // ЖПС. – 1990. – Т. 52, В. 2. – С. 284–289.
4. Зубринов, И. И. Широкополосный акустооптический фильтр / И. И. Зубринов, В. К. Сапожников, Д. В. Шелопут / ЖТФ. 1997. – Т. 67, № 6. – С. 50–53.
5. Chakraborty, B. Depolarizing effect of propagation of a polarized polychromatic beam through an optically active medium: a generalized study / В. Chakraborty // JOSA – 1986. – Т. 3, № 8. – P. 1422–1427.
6. Белый, В. Н. Акустооптическое взаимодействие частично поляризованных полихроматических световых пучков в кубических кристаллах / В. Н. Белый, И. Г. Войтенко, Г. В. Кулак // ЖПС. – 1988. – Т. 49, № 5. – С. 830–833.
7. Акустические кристаллы. Справочник / А. А. Блистанов [и др.] ; под ред. М. П. Шаскольской. – М. : Наука, 1986. – 629 с.

Gennadii Kulak, Grigorii Krokh, Tatiana Nikolaenko

ACOUSTOOPTICAL INTERACTION OF PARTIALLY POLARIZED POLYCHROMATIC LIGHT BEAMS IN PARATELLURITE CRYSTALS

Summary. The Bragg diffraction of partially polarized polychromatic light beams on the ultrasonic waves is investigated. The coherent matrix elements of radiation diffracted into the first order are calculated. The numerical calculation of the diffraction efficiency for polychromatic radiation having a Gaussian spectral profile is carried out. It is shown that under enhancing of spectral bandwidth the diffraction efficiency is reduced. It is connected with the reduction of light intensity under deviation of the light length from central one and the participants of Bragg diffraction selectivity.

Keywords: diffraction of light by ultrasound, polychromatic radiation, uniaxial crystal.