

УДК 534.535

Г. В. Кулак

ДИФРАКЦИЯ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ НА ГИПЕРЗВУКЕ В ГИРОТРОПНЫХ КУБИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ

Для целей оптимизации акустооптических (АО) устройств (модуляторов, дефлекторов, фильтров, процессоров) необходимо знать влияние затухания высокочастотного ультразвука (гиперзвука) на характеристики дифрагированных световых пучков. В настоящее время брэгговская дифракция света на затухающих ультразвуковых (УЗ) волнах в негиротропных средах исследована для гауссовых пучков при малой мощности УЗ в работе [1], в плосковолновом приближении при сильном АО взаимодействии в работе [2], для коллимированных пучков с ограниченными амплитудными профилями при сильном взаимодействии света и УЗ в [3].

В настоящей работе изучено влияние УЗ затухания и формы амплитудных профилей световых пучков на особенности неколлинеарной брэгговской АО дифракции в гиротропных куби-

ческих кристаллах. Учтено влияние акустической гиротропии и электроиндуцированной анизотропии кристалла во внешнем электрическом поле.

Из уравнений Максвелла и материальных уравнений [4] для гиротропного кристалла, помещенного во внешнее электрическое поле \vec{E}^e , следует волновое уравнение вида:

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{\hat{\epsilon}}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \frac{2\alpha}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \text{rot} \vec{E} = \frac{1}{2c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\Delta \hat{\epsilon}^* + \Delta \hat{\epsilon}) \vec{E}, \quad (1)$$

где $\hat{\epsilon} = \epsilon_0 + \Delta \hat{\epsilon}^e$ — тензор диэлектрической проницаемости кристалла с учетом оптической анизотропии, индуцированной внешним электрическим полем; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость невозмущенного кристалла; α — параметр оптической активности; $\Delta \hat{\epsilon}$ — изменение тензора диэлектрической проницаемости кристалла за счет фотоупругого эффекта. Считается, что бегущая УЗ волна с вектором смещения $\vec{U} = \vec{U}_0 \exp[-i(\beta x) + i(Kx - \Omega t)]$, где β — коэффициент УЗ затухания, $K = \Omega/v$ — волновое число УЗ (Ω, v — циклическая частота и фазовая скорость УЗ соответственно), создает квазипериодическое в пространстве и периодическое во времени изменение тензора диэлектрической проницаемости $\Delta \hat{\epsilon}$, которое связано с упругими деформациями $U_{ik} = (1/2)(\nabla_k U_i + \nabla_i U_k)$ и фотоупругими параметрами P_{ijk} известными со-

отношениями: $\Delta \epsilon_{ij} = -\epsilon_0 P_{ijk} U_{kl}$. Изменение компонент тензора диэлектрической проницаемости внешним электрическим полем связано с электрооптическими коэффициентами r_{ijk} соотношениями: $\Delta \epsilon_{ij}^e = -r_{ijk} E_k$. Решение волнового уравнения (1) следует искать в виде суммы двух связанных волн с медленно меняющимися амплитудами:

$$E(x, z) = E(z) \exp[i(\vec{k}_0 x - \omega t)] + \vec{E}_1(z) \exp[i(\vec{k}_1 x - \omega_1 t)], \quad (2)$$

где $\vec{E}_0(z) = \vec{e}_0 A_0(z) + \vec{e}_2 B_0(z)$, $\vec{E}_1(z) = \vec{e}_1 A_1(z) + \vec{e}_2 B_1(z)$,

$$\vec{k}_0 = (\omega/c) n(\sin \varphi, 0, \cos \varphi), \quad \vec{k}_1 = [(\omega \pm \Omega)/c] n(-\sin \varphi, 0, \cos \varphi),$$

причем φ — угол между \vec{k}_0 и фронтом УЗ волны, а влияние ультразвука, гиротропии и внешнего электрического поля заключается в изменении $\vec{E}_0(z)$ и $\vec{E}_1(z)$ по сравнению со случаем негиротропной среды. В выражении (2) $\vec{e}_0 = [\vec{e}_2 \vec{k}_0] / [|\vec{e}_2 \vec{k}_0|]$, $\vec{e}_1 = [\vec{e}_2 \vec{k}_1] / [|\vec{e}_2 \vec{k}_1|]$ — единичные векторы поляризации, лежащие в плоскости рассеяния и перпендикулярные волновым векторам преломленной и дифрагированной волн соответственно; \vec{e}_2 — единичный вектор, ортогональный плоскости АО взаимодействия ХЗ. Подставив (2) в волновое уравнение (1), получим систему уравнений связанных волн, решение которой можно получить в замкнутой форме.

Система координат XYZ выбрана так, что продольная либо сдвиговая УЗ волна распространяется вдоль кристаллографической оси ОХ, а под углом φ к оси ОZ падает коллимированный световой пучок с функцией пространственного распределения $T(x)$, поляризованный под углом ψ к плоскости дифракции. С использованием результатов работ [1, 2] эффективность дифракции η на выходной грани $z=l$ области АО взаимодействия можно представить в виде:

$$\eta = \frac{1}{dl} \int_{-d/2}^{d/2} T(x) |E_1(x, l)|^2 dx, \quad (3)$$

где $E_1(x, l)$ — комплексная векторная амплитуда дифрагированной волны; d — параметр, величина которого удовлетворяет соотношению: $d \gg W$ (W — радиус поперечного сечения падающего светового пучка), I_1 — интенсивность падающего света. Следует отметить, что в случае дифракции на сдвиговой гиперзвуковой волне, распространяющейся вдоль кристаллографической оси второго порядка, амплитуда вектора смещений УЗ волны $\vec{U}_0 = A[\vec{e}_2 \cos(\rho_a x) + \vec{e}_3 \sin(\rho_a x)]$ (A — амплитуда смещения, ρ_a — параметр акустической гиротропии, \vec{e}_3 — единичный вектор вдоль оси ОZ).

Численные расчеты с использованием выражения (3) проводились для коллимированных пучков с гауссовым $T(x) = \exp[-(x/2W)^2]$, лоренцевым $T(x) = 1/[1 + (4\pi x/3W)^2]$ и прямоугольным $T(x) = 1(|x| \leq W)$ профилями поперечного распределения амплитуды светового поля. Рассмотревались случаи АО дифракции излучения He-Ne лазера ($\lambda_0 = 0,6328$ мкм) на продольной и сдвиговой УЗ волнах, распространяющихся соответственно вдоль осей [111] и [100] гиротропного кубического кристалла германата висмута.



Исследованы зависимости эффективности дифракции η от интенсивности УЗ I_a для пучков с различными амплитудными профилями при дифракции на продольной УЗ волне, распространяющейся вдоль оси [111]. Показано, что максимальное значение эффективности дифракции (100 %) достигается лишь для световых пучков с прямоугольным амплитудным профилем; эффективность дифракции гауссовых пучков выше, чем лоренцевых. С увеличением коэффициента затухания ультразвука β эффективность дифракции уменьшается для пучков гауссова и лоренцева профилей. Для пучка прямоугольного профиля при увеличении β максимум дифракционной эффективности смещается в сторону больших акустических мощностей, а высота дифракционного максимума изменяется незначительно. Следует отметить, что для падающего светового пучка прямоугольного профиля p -поляризации ($\psi=0$) максимальное значение дифракционной эффективности при наличии гиротропии достигается при несколько больших акустических мощностях, чем при "выключенной" гиротропии кристалла ($\rho=0$).

Эффективность дифракции изменяется при изменении интенсивности УЗ волны и различных значениях коэффициента затухания β . При увеличении коэффициента УЗ затухания максимальное значение эффективности дифракции достигается при больших интенсивностях ультразвука.

В случае дифракции на сдвиговой УЗ волне учитывалась акустическая гиротропия кристалла. Исследована зависимость эффективности дифракции η от длины l области АО взаимодействия для различных значений напряженности внешнего электрического поля E^e , приложенного вдоль оси [010]. При увеличении внешнего электрического поля дифракционная эффективность также увеличивалась. Этот физический эффект объясняется тем, что индуцированное внешним электрическим полем линейное двулучепреломление подавляет циркулярное, вследствие чего нарушается обычная периодическая зависимость $\eta(l)$ и возможен практический полный обмен энергией между нулевым и первым дифракционными порядками.

Литература

1. Cohen G., Gordon E. I. Bell. Syst. Techn. J. 1969. Vol. XLIV. — № 4. — P. 693.
2. Пилипович В. А., Щербак Ю. М. Известия АН БССР. Сер. физ. -мат. наук. 1976. — № 4. — С. 103.
3. Бельй В. Н., Войтенко И. Г., Кулак Г. В. ЖПС. 1992. Т. 56. — № 5-6. — С. 831.
4. Федоров Ф. И. Теория гиротропии. Мн., 1976. — 456с.

Summary

The influences of ultrasonic decaying and a cross-section profiles of the incident light beams on the participants of Bragg acoustooptical diffraction is studied. It is shown that maximum light diffraction efficiency is reached for beams of rectangular amplitude profiles. For Gauss beams amplitude profile the diffraction efficiency is higher then for Lorentz beams. With increasing of the extinction coefficient the diffraction efficiency is reduce. The influence of the external electrical fields on the diffraction efficiency under the diffraction on the sheer ultrasonic wave is investigated. Under the increasing of the external electrical field the diffraction efficiency may be reached until one hundred percent.