

# Коллинеарная акустооптическая фильтрация полихроматических световых пучков Эйри в одноосных кристаллах

Г. В. Кулак<sup>1</sup>, Т. В. Николаенко<sup>1</sup>, А. П. Ропот<sup>2</sup>, О. В. Шакин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Мозырский государственный педагогический университет, Мозырь, Беларусь;

*e-mail: g.kulak57@mail.ru*

<sup>2</sup>Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск;

<sup>3</sup>Государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Исследованы особенности коллинеарной акустооптической фильтрации световых пучков Эйри *o*- и *e*- типа в одноосных кристаллах. С использованием метода интегралов перекрытия найдено выражение для эффективности дифракции в зависимости от параметров акустооптического взаимодействия, а также от значений интегралов перекрытия. Показано, что для светового пучка Эйри в кристалле ниобата лития в условиях поперечного фазового синхронизма и в диапазоне оптического спектра 0,4-0,7 мкм достижима полоса пропускания фильтра ~0,4-0,3 нм.

**Ключевые слова:** коллинеарное акустооптическое взаимодействие, световые пучки Эйри, акустооптическая фильтрация, одноосный кристалл, эффективность дифракции, разрешение фильтра.

## Введение

В работе [1] было показано, что уравнение Шредингера параболического типа (аналогичное уравнение применяется в оптике) имеет решение в виде волнового пакета, описываемого функцией Эйри специального вида [1]. Перенос этого результата в волновую оптику являлся очевидным, так как дифракция светового поля в свободном пространстве также описывается параболическим уравнением [2]. В работах [3, 4] дан обзор самоускоряющихся пучков Эйри, особенности их генерация, контроля и потенциальные приложения. Значительный интерес представляют процессы коллинеарной АО фильтрации полихроматических квазибездифракционных световых пучков на ультразвуке в анизотропных средах [5].

В настоящей работе с использованием метода интегралов перекрытия рассмотрена АО фильтрация полихроматических ЭП при коллинеарном АО взаимодействии в одноосных кристаллах.

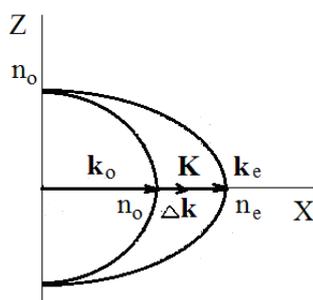


Рис. 1 – Диаграмма волновых векторов падающего и дифрагированного ЭП при заданной частоте ( $f$ ) ультразвука и длине волны ( $\lambda$ ) света.

Кроме обычного продольного фазового согласования, квазибездифракционные световые пучки должны удовлетворять условиям поперечного фазового согласования. Такое согласование связано с тем, что ЭП с различными поляризациями имеют

различную пространственную структуру. При этом вычисление интегралов перекрытия ( $g_m$ ) позволяет найти их максимальные значения в условиях поперечного синхронизма.

### Теоретические результаты и их обсуждение

Рассмотрим геометрию АО взаимодействия, при которой УЗ волна распространяется в кристалле  $LiNbO_3$  в направлении оси  $X$  и занимает пространство между плоскостями  $x = 0$  и  $x = l$ . Будем считать, что падающая волна в одноосном кристалле имеет обыкновенную «о» поляризацию и является ЭП  $o$ -типа [6]. В свою очередь, дифрагированная волна имеет необыкновенную «е» поляризацию и является ЭП  $e$ -типа (рис. 1). Ось падающего БСП  $o$ -типа расположена в плоскости  $XZ$ . При этом реализуются условия пространственного  $\mathbf{k}_o + \mathbf{K} + \Delta\mathbf{k} = \mathbf{k}_e$  и временного  $\omega + \Omega = \omega_d$  синхронизма, где  $\mathbf{k}_o$  ( $\mathbf{k}_e$ ) – волновой вектор ЭП  $o$ -типа ( $e$ -типа),  $\mathbf{K}$  – волновой вектор УЗ волны,  $\Delta\mathbf{k}$  – расстройка фазового синхронизма (продольное фазовое рассогласование).

Эффективность АО дифракции  $\eta = |A_e(x=l)|^2 / |A|^2$ , где  $A_e(x)$  – комплексная амплитуда дифрагированной волны и  $A$  – амплитуда падающей на кристалл световой волны, дается соотношением:

$$\eta = \frac{\chi^2 \sin^2 \left[ l \sqrt{\chi^2 + (\Delta k_x / 2)^2} \right]}{\chi^2 + (\Delta k_x / 2)^2}, \quad (1)$$

где

$$\chi = \frac{\pi n_o^4 g_m p_{\text{эф}}}{2n\lambda_0} \sqrt{\frac{2I_a}{\rho v^3}}, \quad \Delta k_x = \left( -\frac{2\pi n_o}{\lambda_0^2} \right) \left[ e - \left( \frac{\lambda_0 f}{n_o v} \right) \eta - 1 \right] \Delta\lambda,$$

причем  $\lambda_0$  – центральная длина световой волны,  $\Delta\lambda$  – отклонение длины волны света от центральной,  $f$  – частота УЗ волны,  $v$  – фазовая скорость сдвиговой УЗ волны;  $e = n_e / n_o$ , причем  $n_o$  ( $n_e$ ) – обыкновенный (необыкновенный) показатели преломления кристалла;  $p_{\text{эф}} = p_{14}$  ( $p_{14}$  – фотоупругая постоянная,  $\rho$  – плотность кристалла,  $v$  – фазовая скорость УЗ волны,  $n = (n_o + n_e) / 2$ ,  $I_a$  – интенсивность УЗ волны). Интеграл перекрытия  $g_m$  дифрагированных волн находим из соотношения:

$$g_m = \frac{\int_0^l \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (\mathbf{e}_e^* \mathbf{e}_o) dx dy dz \int_0^l \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (\mathbf{e}_o^* \mathbf{e}_e) dx dy dz}{\int_0^l \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |\mathbf{e}_e|^2 dx dy dz \int_0^l \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |\mathbf{e}_o|^2 dx dy dz}. \quad (2)$$

Вектор-функции поляризации падающего ЭП  $o$ -типа  $\mathbf{e}_o(x, y, z)$  и дифрагированного пучка  $e$ -типа  $\mathbf{e}_e(x, y, z)$  приведены в работе [7]. ЭП характеризуются размерным ( $w_0$ ) и безразмерным ( $a$ ) параметрами.

С использованием соотношений (1)–(2) рассмотрим физические характеристики АО фильтрации ЭП в диапазоне оптического спектра 0,4–0,7 мкм [6]. Выберем для исследования в качестве центральной длины волны перестраиваемого фильтра длину волны  $\lambda_0 = 0,6$  мкм. Для данной длины волны света показатели преломления кристалла  $LiNbO_3$  соответственно равны:  $n_o = 2,29$ ,  $n_e = 2,2$  [6]. Зависимости эффективности

дифракции  $\eta$  от ширины полосы спектра  $\Delta\lambda$  акустооптического перестраиваемого фильтра (АОПФ) для центральной длины волны  $\lambda_0 = 0,6$  мкм представлены на рис. 4.

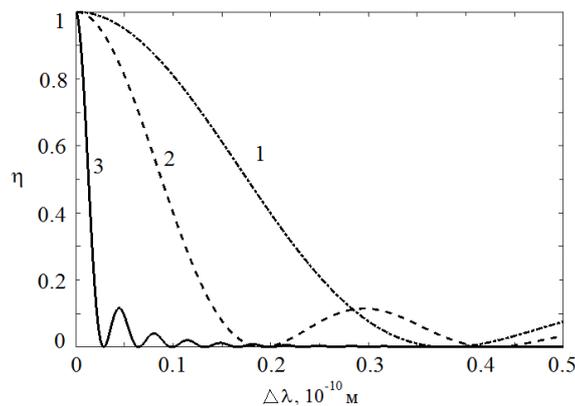


Рис. 4. — Зависимость эффективности дифракции ЭП  $\eta$  от ширины полосы пропускания  $\Delta\lambda$  при условии максимальной эффективности дифракции для различных длин АО взаимодействия  $l$ : 5 (1), 10 (2), 15 (3) (кристалл  $\text{LiNbO}_3$ ;  $I_a = 0,81$  Вт/см<sup>2</sup>(1);  $I_a = 0,2$  Вт/см<sup>2</sup>(2);  $I_a = 0,09$  Вт/см<sup>2</sup>(3),  $f = 570$  МГц,  $w_0 = 100$  мкм,  $a = 0,1$ ;  $\lambda_0 = 0,6$  мкм).

Ширина полосы АО фильтрации рассчитывалась по уровню 50 % от максимального значения дифракционной эффективности. В условиях продольного и поперечного синхронизма ширина полосы пропускания составила  $\Delta\lambda_{1/2} = 0,38$  нм ( $l = 5$  см),  $\Delta\lambda_{1/2} = 0,2$  нм ( $l = 10$  см),  $\Delta\lambda_{1/2} = 0,04$  нм ( $l = 15$  см). В условиях опыта наряду с рассмотренной шириной спектра, обусловленной условиями брэгговского синхронизма, следует учитывать также изменение ширины спектра, связанное с уширением ультразвукового и светового пучков [8]. Расчет данных ширин спектра для ультразвукового ( $\Delta\lambda_S$ ) и светового ( $\Delta\lambda_L$ ) пучков достигается с использованием соотношений:  $\Delta\lambda_{S,L} = \lambda_0 \varphi_{S,L}^2 / 4$ , где  $\varphi_S$  — расходимость УЗ пучка,  $\varphi_L$  — расходимость светового пучка. Таким образом, общая ширина спектра составляет [9]:  $\Delta\lambda_{об} = \Delta\lambda_{1/2} + \Delta\lambda_S + \Delta\lambda_L$ . Следует отметить, что для квазибездифракционных ЭП выполняются естественные соотношения:  $\Delta\lambda_L \ll \Delta\lambda_{1/2}$ ,  $\Delta\lambda_L \ll \Delta\lambda_S$ . В таком случае, использование ЭП для АО фильтрации предпочтительнее, например, чем гауссовых пучков. Положив, к примеру,  $\Delta\lambda_S = 0,2$  нм,  $\Delta\lambda_L = 0,02$  нм получим, что  $\Delta\lambda_{tot} = 0,6$  нм ( $l = 5$  см),  $\Delta\lambda_{tot} = 0,42$  нм ( $l = 10$  см),  $\Delta\lambda_{tot} = 0,26$  нм ( $l = 15$  см). Спектральная разрешающая способность АО фильтрации дается соотношением:  $N_\lambda = \delta\lambda / \Delta\lambda_{tot}$ , где  $\delta\lambda$  — ширина исследуемого диапазона спектра. Для рассматриваемого диапазона спектра  $\delta\lambda = 300$  нм получаем следующие значения:  $N_\lambda \approx 500$  ( $l = 5$  см),  $N_\lambda \approx 714$  ( $l = 10$  см),  $N_\lambda \approx 1154$  ( $l = 15$  см).

### Заключение

Таким образом, в одноосных кристаллах в широком диапазоне оптического спектра возможна коллинеарная АО фильтрация полихроматических ЭП  $o$ - и  $e$ -типов для различных мод длин АО взаимодействия в условиях поперечного синхронизма дифрагированных волн. Для кристаллов ниобата лития в диапазоне оптического спектра 0,4-0,7 мкм ширина полосы пропускания АО фильтра при длине АО

взаимодействия  $l=15$  см может составить  $\sim 0,26$  нм. При этом разрешающая способность АО фильтрации  $\sim 1154$ .

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (грант № Ф20Р-286) и Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ): проект № 20-57-00004.

### Литература

1. Berry M. V., Balazs N. L. Nonspreading wave packets. American. Journal of Physics. 1979. V. 47. P. 264–267.
2. Siviloglou G. A., Christodoulides D. N. Accelerating finite energy Airy beams. Opt. Lett. 2007. V. 32. P. 979-981.
3. Hu Yi, Siviloglou G.A., Zhong P., Efremidis N.K., Christodoulides D.N., Chen Z. Self-accelerating Airy Beams: Generation, Control, and Application. Nonlinear Photonics and Novel Optical Phenomena, Springer Series in Jptical Sciences 170, DOI 10. 1007/978-1-4614-3538-9\_1. ©Springer Series+Business Media New York 2012. Chepter 1. P. 1–46.
4. Khilo N.A., Belyi V.N., Kazak N.S., Ropot P.I. Acoustooptic refraction-influenced generation of tunable incomplete Airy beams. Journal Optics. 2014. V. 16. 085702 (10 pp).
5. Мачихин А. С., Пожар В. Э. Аберрации изображения в акустооптическом перестраиваемом фильтре. ЖТФ. 2010. Т. 80, В. 10. С. 101–107.
6. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир. 1987.
7. Zhou G., Chen R., Chu X. Propagation of Airy beams in uniaxial crystals orthogonal to the optical axis. Optics Express. 2012. V. 20, № 3. P. 2205–2214.
8. Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
9. Волошинов В. Б., Казак Н. С., Лугина А. С., Надененко А. В., Павленко В. К., Санников Ю. А. Спектральное пропускание широкоапертурного брэгговского акустооптического фильтра на парателлурите. ЖПС. 1990. Т. 52, В. 2. С. 284–289.

## Collinear acousto-optical filtration of polychromatic Airy light beams in uniaxial crystals

G. V. Kulak<sup>1</sup>, A. P. Ropot<sup>2</sup>, T. V. Nikolaenko<sup>1</sup>, O. V. Shakin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Mozyr State Pedagogical University, Belarus; e-mail: g.kulak57@mail.ru*

<sup>2</sup>*Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk;*

<sup>3</sup>*Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia*

The features of collinear acousto - optical filtration of Airy o-and e-type light beams in uniaxial crystals are studied. Using the method of overlap integrals, an expression is found for the diffraction efficiency depending on the parameters of the acousto-optical interaction, as well as on the values of the overlap integrals. It is shown that for Airy light beam for a lithium niobate crystal under conditions of transverse phase synchronism and in the range of the optical spectrum of 0.4-0.7 microns, the filter bandwidth of  $\sim 0.4-0.3$  nm is achievable.

**Keywords:** collinear acousto-optical interaction, Airy light beams, acousto-optical filtration, uniaxial crystal, diffraction efficiency, filter resolution.