

УДК 534.535

DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2023\\_4\\_57\\_25](https://doi.org/10.54341/20778708_2023_4_57_25)  
EDN: FFBNLF**ДВУХКООРДИНАТНАЯ АКУСТООПТИЧЕСКАЯ ДИФРАКЦИЯ  
ОГРАНИЧЕННЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В КРИСТАЛЛАХ ПАРАТЕЛЛУРИТА****Г.В. Кулак<sup>1</sup>, Т.В. Николаенко<sup>1</sup>, Л.В. Цалко<sup>1</sup>, П.И. Ропот<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина<sup>2</sup>Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск**TWO-COORDINATE ACOUSTOOPTIC DIFFRACTION OF LIMITED LIGHT  
BEAMS IN PARATELLURITE CRYSTALS****G.V. Kulak<sup>1</sup>, T.V. Nikolaenko<sup>1</sup>, L.V. Tsalko<sup>1</sup>, P.I. Ropot<sup>2</sup>**<sup>1</sup>I.P. Shamyakin Mozyr State Pedagogical University<sup>2</sup>B.I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk

**Аннотация.** Исследованы особенности акустооптической дифракции ограниченных световых пучков прямоугольного профиля на медленной сдвиговой ультразвуковой волне в кристаллах парателлурифта. Показано, что эффективность дифракции и ширина частотного пропускания акустооптического устройства в полярной плоскости значительно выше, чем в азимутальной. Установлено, что разрешающая способность устройства в режиме дефлектора может быть одинаковой для полярной и азимутальной плоскости за счет выбора размеров входной апертуры светового пучка.

**Ключевые слова:** акустооптическое взаимодействие, кристалл парателлурифта, ограниченный световой пучок, акустооптический дефлектор.

**Для цитирования:** Двухкоординатная акустооптическая дифракция ограниченных световых пучков в кристаллах парателлурифта / Г.В. Кулак, Т.В. Николаенко, Л.В. Цалко, П.И. Ропот // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 4 (57). – С. 25–29. – DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2023\\_4\\_57\\_25](https://doi.org/10.54341/20778708_2023_4_57_25). – EDN: FFBNLF

**Abstract.** The features of acoustooptical diffraction of limited light beams of a rectangular profile on a slow shear ultrasonic wave in paratellurite crystals were investigated. Diffraction efficiency and frequency transmission width of an acoustooptic device in polar plane are shown to be considerably higher than in azimuthal plane. It is established that the resolution of the device in the deflector mode can be the same for the polar and azimuthal planes due to the choice of the size of the input aperture of the light beam.

**Keywords:** acoustooptical interaction, paratellurite crystal, limited light beam, acoustooptical deflector.

**For citation:** Two-coordinate acoustooptic diffraction of limited light beams in paratellurite crystals / G.V. Kulak, T.V. Nikolaenko, L.V. Tsalko, P.I. Ropot // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2023. – № 4 (57). – P. 25–29. – DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2023\\_4\\_57\\_25](https://doi.org/10.54341/20778708_2023_4_57_25) (in Russian). – EDN: FFBNLF

**Введение**

В одноосных кристаллах реализуется широкоапертурная геометрия взаимодействия света и ультразвука [1]–[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. Другая геометрия АО взаимодействия реализуется в АО дефлекторах, когда волновой вектор ультразвука ортогонален волновому вектору дифрагированной световой волны [5]–[7]. При этом для светового пучка, падающего под углом Брэгга, в условиях анизотропной дифракции достигается высокая частотная ширина полосы пропускания

устройства на относительно низких УЗ частотах. Следует отметить, что АО взаимодействие в реальных условиях является, в общем случае, трехмерным [8], [9]. При этом для сильно расходящихся световых пучков необходимо учитывать особенности АО дифракции не только в полярной плоскости, но и ортогональной к ней азимутальной плоскости. При этом очевидно, что разрешающая способность и ширина полосы его пропускания в ортогональных плоскостях должны отличаться по величине.

В настоящей работе исследованы особенности анизотропной брэгговской АО дифракции светового пучка прямоугольного профиля на медленной сдвиговой УЗ волне в кристалле парателлурифта ( $\text{TeO}_2$ ) в полярной плоскости ( $\bar{1}10$ ) и азимутальной плоскости (001).

### 1 Теоретически результаты и их обсуждение

На рисунке 1.1 представлена схема АО взаимодействия в кристаллах парателлурита с учетом дифракции в полярной плоскости  $XZ$  ( $X||[110]$ ,  $Z||[001]$ ) и азимутальной плоскости  $XY$  ( $X||[110]$ ,  $Y||[\bar{1}10]$ ).

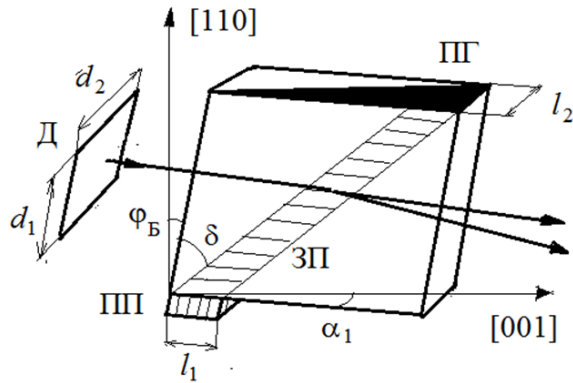


Рисунок 1.1 – Схема двухкоординатного АО модулятора-дефлектора на кристалле  $\text{TeO}_2$  (ПП – пьезопреобразователь, ПГ – поглотитель, Д – диафрагма, ЗП – УЗ пучок,  $\phi_B$  – угол Брэгга,  $\delta$  – угол сноса групповой скорости УЗ волны,  $\alpha_1$  – угол отклонения волнового вектора УЗ волны от направления  $[110]$  в кристалле; линейная апертура входного окна светового пучка (диафрагма) составила  $d_1 \times d_2$ ; размер пьезопреобразователя составил  $l_1 \times l_2$ )

На рисунке 1.1 входное оптическое излучение падает на монокристалл  $\text{TeO}_2$  перпендикулярно его входной грани. Апертура входного пучка имеет линейные размеры  $d_1 \times d_2$ . Бегущая УЗ волна возбуждается пьезопреобразователем (ПП) размером  $l_1 \times l_2$ . Длина АО взаимодействия  $l_d$  в полярной плоскости и фазовая скорость УЗ волны  $v$  даются соотношениями [3]:

$$\delta = \arctg \left\{ \left[ c_{44} - \frac{c_{11} - c_{12}}{2} \right] \sin \alpha_1 \frac{2 \cos^3 \alpha_1}{c_{11} - c_{12}} + c_{44} \sin^2 \alpha_1 \right\},$$

$$l_d = l_1 \left[ 1 - \frac{\cos(\delta)}{\sin(\delta - \phi_1)} \right],$$

$$v = \left[ \frac{0,5(c_{11} - c_{12}) \cos^2 \alpha_1 + c_{44} \sin^2 \alpha_1}{\rho} \right]^{1/2},$$

где  $l_1$  – размер пьезопреобразователя в плоскости АО взаимодействия  $XZ$ ,  $\delta$  – угол сноса групповой скорости УЗ пучка по отношению к фазовой,  $\phi_1$  – угол падения оптического излучения по отношению к оси  $X$  (в полярной плоскости),  $\rho$  – плотность кристалла;  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{44}$  – упругие постоянные  $\text{TeO}_2$ .

Будем считать, что падающая волна имеет необыкновенную «e» поляризацию, тогда дифрагированная волна имеет обыкновенную «o» поляризацию (рисунок 1.2). В таком случае дифракция света на ультразвуке имеет объемный характер. Условия пространственного и временного синхронизма позволяют установить соотношения между углами падения и дифракции в полярной плоскости  $XZ$  и азимутальной плоскости  $XY$  [2]. При этом эффективные фотоупругие постоянные, ответственные за процесс дифракционного рассеяния в полярной и азимутальной плоскостях, значительно различаются. Различаются также и величины расстройки фазового синхронизма. Следует отметить, что при анализе дифракционного процесса следует рассмотреть энергетические характеристики световых пучков в условиях объемной АО дифракции [1].

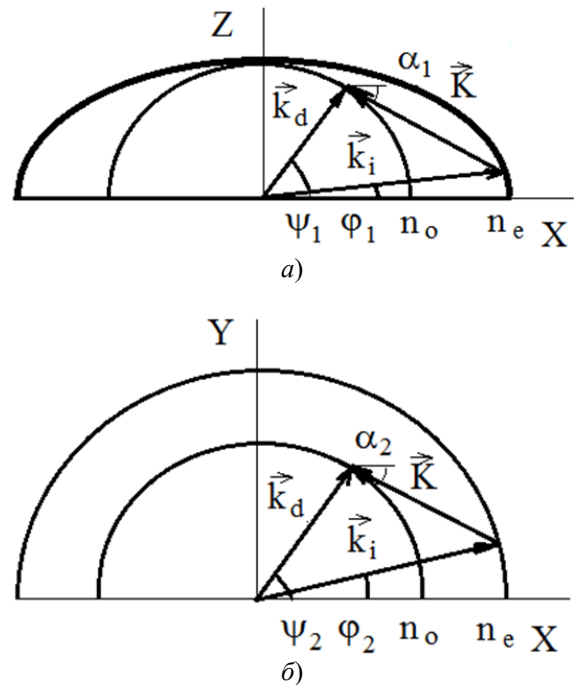


Рисунок 1.2 – Диаграмма волновых векторов в полярной (а) и азимутальной (б) плоскости:  $Z$  – оптическая ось кристалла,  $n_o$ , ( $n_e$ ) – обыкновенный (необыкновенный) показатели преломления кристалла,  $\phi_1$  – угол падения в полярной плоскости (отсчитывается от оси  $X$ ),  $\psi_1$  – угол дифракции в полярной плоскости,  $\alpha_1$  – угол ориентации волнового вектора ультразвука по отношению к оси  $X$  в полярной плоскости,  $\phi_2$  – угол падения в азимутальной плоскости,  $\psi_2$  – угол дифракции в азимутальной плоскости,  $\alpha_2$  – угол ориентации волнового вектора ультразвука по отношению к оси  $X$  в азимутальной плоскости

В соответствии с результатами работы [2] в полярной плоскости  $XZ$  угол падения света  $\varphi_1$  находится из соотношения:

$$\varphi_1 = \operatorname{arccotg} \left( \frac{n_e}{n_o \sqrt{\eta \sin \alpha_1 + \cos \alpha_1}} \right),$$

где  $\eta = \lambda f / n_o v$  ( $v(f)$  – фазовая скорость (центральная частота) УЗ волны,  $\lambda$  – длина световой волны). Угол дифракции  $\psi_1 = 90^\circ - \alpha_1$ . Отстройка фазового синхронизма имеет вид:

$$\Delta k_1 = \left( -\frac{2\pi n_o}{v} \right) \times$$

$$\times \left( \sqrt{(\xi(\varphi_1) - \eta)^2 + 2\eta \xi(\varphi_1)(1 - \cos(\varphi_1 - \alpha_1))} - 1 \right) \Delta f_1,$$

где  $\xi(\theta_1) = \frac{n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta_1 + n_e^2 \sin^2 \theta_1}}$ ,  $\Delta f_1$  – ширина

полосы пропускания устройства в полярной плоскости.

Эффективность АО взаимодействия в полярной плоскости находим из соотношения:

$$\eta_\theta = \left| \frac{\chi_1 \sin \left( l_d \sqrt{\chi_1^2 + (\Delta k_1 / 2)^2} \right)}{\sqrt{\chi_1^2 + (\Delta k_1 / 2)^2}} \right| B_{BL1},$$

где постоянная связи ( $\chi_1$ ) дается соотношением

$$\chi_1 = \left( \frac{\pi n_o^3 p_{eff}^1}{\lambda \sin \theta_1 \sin \psi_1} \right) \sqrt{\frac{2P_a}{l_1 l_2 \rho v^3}},$$

причем  $P_a$  – мощности ультразвуковой волны  $p_{eff}^1 = (p_{12} - p_{11}) - \frac{p_{44} \sin(2\alpha)}{8}$  – эффективная фотоупругая постоянная для АО рассеяния в полярной плоскости ( $p_{11}, p_{12}, p_{44}$  – фотоупругие постоянные [5]); параметр  $B_{BL1}$  обусловлен конечной апертурой входного окна устройства  $d_1$  и находится из соотношения [1]:

$$B_{BL1} = \sin c^{-2} \left( \frac{\chi_1 l_d}{\pi} \right) \times$$

$$\times \int_{-\infty}^{+\infty} \sin c^2 \bar{X} \sin c^2 \sqrt{\chi_1^2 l_d^2 + G_1^2 \bar{X}^2} d\bar{X},$$

где  $G_1 = \lambda l_1 f / n_o d_1 v$  – параметр Гордона; здесь  $\sin c(\bar{X}) = \sin(\pi \bar{X}) / (\pi \bar{X})$ .

Угол падения светового пучка в азимутальной плоскости (рисунок 1.2, б)

$$\varphi_2 = \arccos \left[ \frac{\eta \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 + \sin \alpha_1 \cos \alpha_2}{\xi(\varphi_1) \sin \varphi_1} \right],$$

где  $\alpha_2$  – угол, который волновой вектор УЗ волны составляет с осью  $X$  в азимутальной плоскости  $XY$  (рисунок 2, б); угол дифракции  $\psi_2 = 90^\circ - \alpha_2$ .

Отстройки фазового синхронизма ( $\Delta k_2$ ) для азимутальной плоскости даются соотношением:

$$\Delta k_2 = -\frac{2\pi n_o}{v} \times$$

$$\times \left( \sqrt{(\xi(0) - \eta)^2 + 2\eta \xi(\theta_2)(1 - \cos(\theta_2 - \alpha_2))} - 1 \right) \Delta f_2,$$

где  $\xi(0) = n_e / n_o$ ,  $\Delta f_2$  – ширина полосы пропускания в азимутальной плоскости.

Эффективность дифракции для азимутальной плоскости определяем из соотношения:

$$\eta_\varphi = \left| \frac{\chi_2 \sin \left( l_d \sqrt{\chi_2^2 + (\Delta k_2 / 2)^2} \right)}{\sqrt{\chi_2^2 + (\Delta k_2 / 2)^2}} \right| B_{BL2},$$

где постоянная ( $\chi_2$ ) связи

$$\chi_2 = \left( \frac{\pi n_e n_o^2 p_{eff}^2}{\lambda \sin \theta_2 \sin \psi_2} \right) \sqrt{\frac{2P_a}{l_1 l_2 \rho v^3}},$$

причем

$$p_{eff}^2 = (p_{12} - p_{11}) \frac{\sin(2\alpha)}{2} + \frac{p_{44}}{4}.$$

Таким образом, для используемых на практике кристаллов  $\text{TeO}_2$  выполняется соотношение:  $p_{eff}^2 < p_{eff}^1$  [6]. Параметр  $B_{BL2}$  обусловлен конечной апертурой входного окна фильтра  $d_2$  в азимутальной плоскости и находится из соотношения:

$$B_{BL2} = \sin c^{-2} \frac{\chi_2 l_2}{\pi} \times$$

$$\times \int_{-\infty}^{+\infty} \sin c^2 \bar{X} \sin c^2 \sqrt{\chi_2^2 l_2^2 + G_2^2 \bar{X}^2} d\bar{X},$$

где  $G_2 = \frac{\lambda l_2 f}{n_o d_2 v}$  – параметр Гордона в плоскости  $XY$ .

Коэффициенты  $B_{BL1}$  и  $B_{BL2}$ , входящие в выражения (1.1) и (1.2), учитывают ограниченность световых пучков, падающих на АО ячейку с прямоугольным профилем, то есть с апертурой  $d_1 \times d_2$ . Следует отметить, что параметрам Гордона  $G_{1,2} \sim 1$  соответствует функционирование АО устройства в режиме модулятора света; при  $G_{1,2} \ll 1$  – реализуется режим АО дефлектора, а при  $G_{1,2} \gg 1$  имеет место режим визуализации УЗ полей [1]. Если положить:  $d_1 = d_2 = 1$  см,  $l_1 = l_2 = 0,5$  см,  $\lambda = 0,63$  мкм,  $v = 620$  м/с,  $n_o = 2,25$ , то параметр Гордона составляет  $G_{1,2} \approx 0,022$ . Такое устройство функционирует в режиме АО дефлектора.

## 2 Результаты расчетов

На рисунке 2.1 представлена зависимость эффективности дифракции  $\eta_{\theta, \varphi}$  для дифракции в полярной плоскости (а) и азимутальной плоскости (б) от мощности ультразвука при различных углах наклона волнового вектора УЗ волны по отношению к направлению [110] в кристалле.

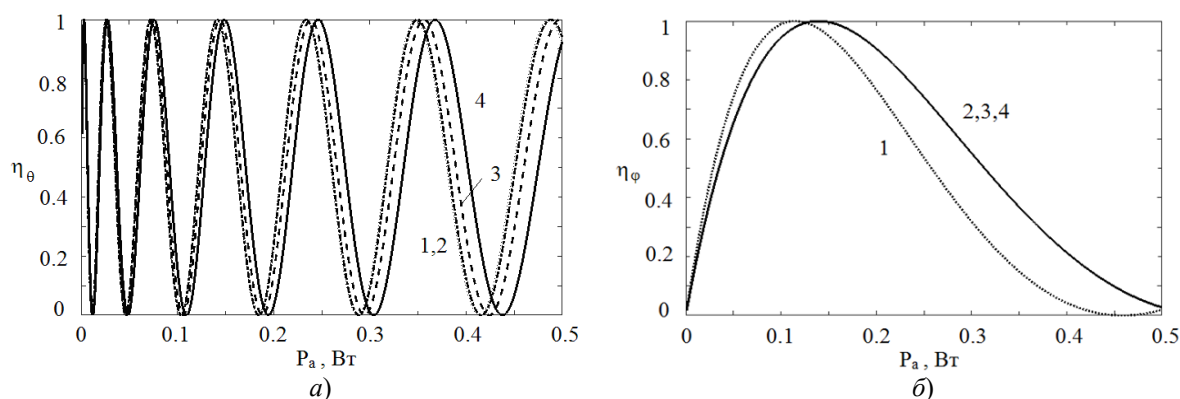


Рисунок 2.1 – Зависимость эффективности дифракции в полярной плоскости  $\eta_\theta$  (а) и азимутальной плоскости  $\eta_\phi$  (б) от акустической мощности при различных углах наклона  $\alpha_{1,2}$ :  $3^\circ$  (1),  $4^\circ$  (2),  $5^\circ$  (3),  $6^\circ$  (4) (кристалл  $\text{TeO}_2$ ,  $n_o = 2,25$ ,  $n_e = 2,41$ ,  $\lambda = 0,63$  мкм,  $d_1 = d_2 = 1$  см,  $l_1 = l_2 = 0,5$  см)

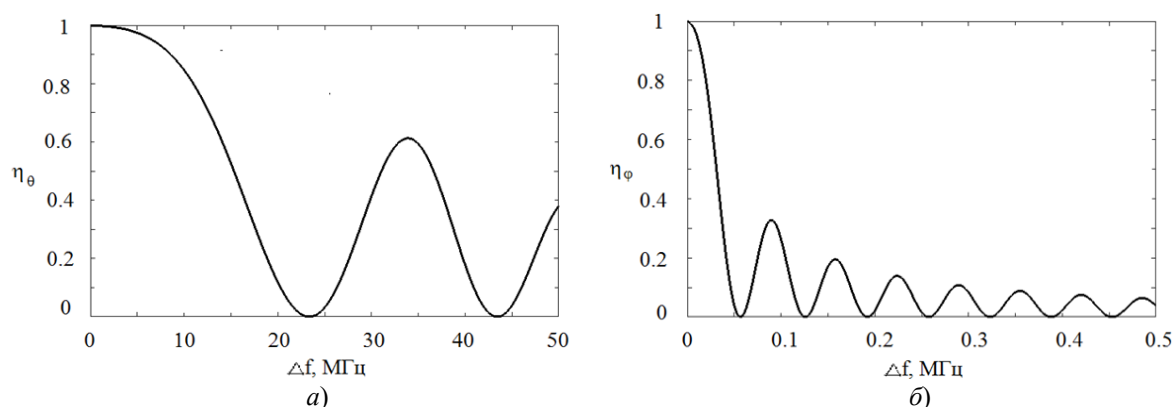


Рисунок 2.2 – Зависимость эффективности дифракции при АО взаимодействии в полярной  $\eta_\theta$  (а) и азимутальной  $\eta_\phi$  (б) плоскости от ширины полосы пропускания  $\Delta f$  (кристалл  $\text{TeO}_2$ ,  $n_o = 2,25$ ,  $n_e = 2,41$ ,  $\lambda = 0,63$  мкм,  $d_1 = d_2 = 1$  см,  $l_1 = l_2 = 0,5$  см,  $\alpha_{1,2} = 6^\circ$ , максимальной эффективности дифракции  $\eta_\theta \approx \eta_\phi \approx 1$  соответствует акустическая мощность  $P_a = 0,16$  Вт).

Из рисунка 2.1 следует, что имеют место осциллирующие зависимости эффективности дифракции при увеличении мощности ультразвука [1]. Вследствие значительно меньшего значения эффективной фотоупругой постоянной для дифракции в азимутальной плоскости по сравнению с полярной, при дифракции в азимутальной плоскости максимальное значение дифракционной эффективности достигается при значительно больших акустических мощностях, чем при дифракции в полярной плоскости. При акустической мощности  $P_a = 0,16$  Вт достигается примерно одинаковое значение дифракционной эффективности  $\eta_\theta \approx \eta_\phi \approx 1$  для угла наклона  $\alpha_{1,2} = 6^\circ$  [3], [4].

Зависимость эффективности дифракции  $\eta_{\theta,\phi}$  от ширины полосы пропускания устройства  $\Delta f$  АО дефлектора при длине волны  $\lambda = 0,63$  мкм для полярной (а) и азимутальной (б) плоскости дифракции представлены на рисунке 2.2.

Основными характеристиками АО дефлектора являются ширина полосы пропускания  $\Delta f$  и

число разрешимых положений дифрагированного пучка  $N$ . Ширина полосы пропускания АО дефлектора рассчитывалась по уровню 50% от максимального значения дифракционной эффективности (с учетом симметричной зависимости при  $\Delta f_{1,2} > 0$  и  $\Delta f_{1,2} < 0$ ) и составила  $\Delta f_1 = 22$  МГц для АО дифракции в полярной плоскости и  $\Delta f_2 = 0,08$  МГц – в азимутальной плоскости. Другой характеристикой АО дефлектора является число разрешимых положений соответственно в полярной и азимутальной плоскости, то есть  $N_{\theta,\phi} = \tau_{1,2} \Delta f_{1,2}$ , где  $\tau_{1,2} = d_{1,2} / v$  – время прохода звукового пучка через световой пучок соответственно в полярной и азимутальной плоскости [1]. Следовательно, условие одинакового разрешения в полярной и азимутальной плоскостях ( $N_\theta = N_\phi$ ) формулируется как:  $\Delta f_1 / \Delta f_2 = d_2 / d_1$ .

### Заключение

Таким образом, эффективность брэгговской дифракции света на медленной сдвиговой ультразвуковой волне в кристалле парателлуриата

и ширина полосы частотной перестройки ультразвука в полярной ( $\bar{1}10$ ) плоскости и азимутальной (001) плоскости значительно отличаются по величине. При определенных параметрах светового пучка прямоугольного профиля устройство может функционировать в режиме модуляции или дефлекции. Разрешающая способность устройства в режиме дефлектора может быть одинаковой для полярной и азимутальной плоскости за счет выбора размеров входной апертуры светового пучка.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Балакший, В.Н. Физические основы акустооптики / В.Н. Балакший, В.Н. Парыгин, Л.Е. Чирков. – Москва: Радио и связь, 1985. – 279 с.
2. Мачихин, А.С. Аберрации изображения в акустооптическом перестраиваемом фильтре / А.С. Мачихин, В.Э. Пожар // ЖТФ. – 2010. – Т. 80, В. 10. – С. 101–107.
3. Спектральное пропускание широкоапертурного брэгговского акустооптического фильтра на парателлурите / В.Б. Волошинов, Н.С. Казак, А.С. Лугина [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. Yano, T. TeO<sub>2</sub> anisotropic Bragg light deflector without midband degeneracy / T. Yano, Kawabuichi, A. Fukumoto, A. Watanabe // Appl. Phys. Letts. – 1975. – Vol. 26, № 12. – P. 689–691.

6. Warner, A.W. Acousto-optical light deflectors using optical activity in paratellurite / A.W. Warner, D.L. White, W.A. Bonner // J. Appl. Phys. – 1972. – Vol. 43, № 11. – P. 4489–4495.

7. Магдич, Л.Н. Акустооптические устройства и их применение / Л.Н. Магдич, В.Я. Молчанов. – Москва: Советское радио, 1978. – 111 с.

8. Балакший, В.И. Пространственная структура акустооптического фазового синхронизма в одноосных кристаллах / В.И. Балакший, Д.Е. Костюк // Оптика и спектроскопия. – 2006. – Т. 101, № 2. – С. 298–304.

9. Мачихин, А.С. Передача изображений при широкоугольном акустооптическом взаимодействии / А.С. Мачихин, В.Э. Пожар // Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40, № 9. – С. 837–841.

Поступила в редакцию 05.07.2023.

#### Информация об авторах

Кулак Геннадий Владимирович – д.ф.-м.н., профессор  
Николаенко Татьяна Викторовна – к.ф.-м.н., доцент  
Цалко Людмила Васильевна – ст. преподаватель  
Ропот Петр Иосифович – к.ф.-м.н., доцент