

ISSN 1561-2430 (Print)
ISSN 2524-2415 (Online)
УДК 534.535
<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-2-146-152>

Поступила в редакцию 11.10.2023
Received 11.10.2023

Г. В. Кулак¹, П. И. Ропот², О. В. Шакин³

¹Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина,
Мозырь, Республика Беларусь

²Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

³Государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

ДИФРАКЦИЯ СМЕЩЕННЫХ ГАУССОВЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ НА УЛЬТРАЗВУКЕ В КРИСТАЛЛАХ ПАРАТЕЛЛУРИТА

Аннотация. Исследована брэгговская дифракция смещенных гауссовых световых пучков на медленной сдвиговой ультразвуковой волне в кристаллах парателлурифта, в которых осуществляется эффективная перекачка энергии пучка из нулевого дифракционного порядка в первый. Установлено, что для оптимизации энергообмена дифрагированных световых пучков в рассматриваемой геометрии акустооптического взаимодействия необходимо использовать циркулярно-поляризованные световые пучки. Показано, что дифрагированные пучки имеют форму смещенных гауссовых пучков, пространственная структура которых определяется параметром смещения падающего пучка и мощностью ультразвука.

Ключевые слова: смещенный гауссов пучок, брэгговская дифракция света, дифракционная эффективность, одноосный гиротропный кристалл, кристалл парателлурифта

Для цитирования. Кулак, Г. В. Дифракция смещенных гауссовых световых пучков на ультразвуке в кристаллах парателлурифта / Г. В. Кулак, П. И. Ропот, О. В. Шакин // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2024. – Т. 60, № 2. – С. 146–152. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-2-146-152>

Gennadii V. Kulak¹, Peter I. Ropot², Oleg V. Shakin³

¹Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin, Muzyr, Republic of Belarus

²B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

³State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russian Federation

DIFFRACTION OF DISPLACED GAUSSIAN LIGHT BEAMS ON ULTRASOUND IN PARATELLURITE CRYSTALS

Abstract. The Bragg diffraction of displaced Gaussian light beams on a slow shear ultrasonic wave in paratellurite crystals, in which the beam energy is efficiently transferred from the zero diffraction order to the first, is investigated. It is established that circularly polarized light beams should be used to optimize the energy exchange of diffracted light beams in the considered geometry of acousto-optic interaction. It is shown that the diffracted beams have the form of displaced Gaussian beams, the spatial structure of which is determined by the displacement parameter of the incident beam and the ultrasound power.

Keywords: displaced Gaussian beam, Bragg diffraction of light, diffraction efficiency, uniaxial gyrotropic crystal, paratellurite crystal

For citation. Kulak G. V., Ropot P. I., Shakin O. V. Diffraction of displaced Gaussian light beams on ultrasound in paratellurite crystals. *Vestsi Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2024, vol. 60, no. 2, pp. 146–152 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-2-146-152>

Введение. Известно, что для кольцевой апертуры светового поля с равномерным освещением длина фокальной области увеличивается по сравнению с обычными пучками [1]. В [2] рассмотрен метод формирования кольцевого пучка посредством аподизации апертуры светового поля, в [3] исследованы особенности преобразования кольцевых пучков в бесселевы. Кольцевые световые пучки находят применение в задачах дистанционного лазерного зондирования атмосферы, а также при конструировании устройств оптической связи в свободном пространстве [4, 5]. При

этом используется свойство кольцевых пучков распространяться на большие расстояния без существенных потерь оптической мощности и искажения формы пучка.

В [6] исследованы особенности брэгговской дифракции ограниченных световых пучков различных амплитудных распределений (гауссова, прямоугольного и лоренцева) на ультразвуке. Показано, что дифракционная эффективность уменьшается при переходе от пучка прямоугольного профиля, который падает на акустооптическую ячейку, далее переходит к гауссову и, наконец, к лоренцеву профилю. Отметим, что при этом использовалась двумерная теория связанных волн, естественным образом учитывающая сложное амплитудное распределение падающего светового пучка.

Настоящая работа посвящена теоретическому исследованию акустооптической (АО) дифракции гауссовых световых пучков, когда кольцевое поле имеет форму смещенной функции Гаусса [3], т. е. $A_i(r) = A_{i0} \exp[-(r - r_0)^2 / w^2]$, где r_0 – параметр смещения пучка, w – полуширина пучка. Рассмотрена брэгговская дифракция светового пучка, распространяющегося в окрестности оптической оси одноосного гиротропного кристалла парателлуриита на медленной сдвиговой ультразвуковой (УЗ) волне [7]. При этом для достижения значительной эффективности дифракции могут использоваться линейно-поляризованные, а также циркулярно-поляризованные световые пучки

Геометрия анизотропной брэгговской дифракции. На рис. 1 представлена геометрия анизотропной брэгговской дифракции эллиптически поляризованных смещенных гауссовых пучков (СГП).

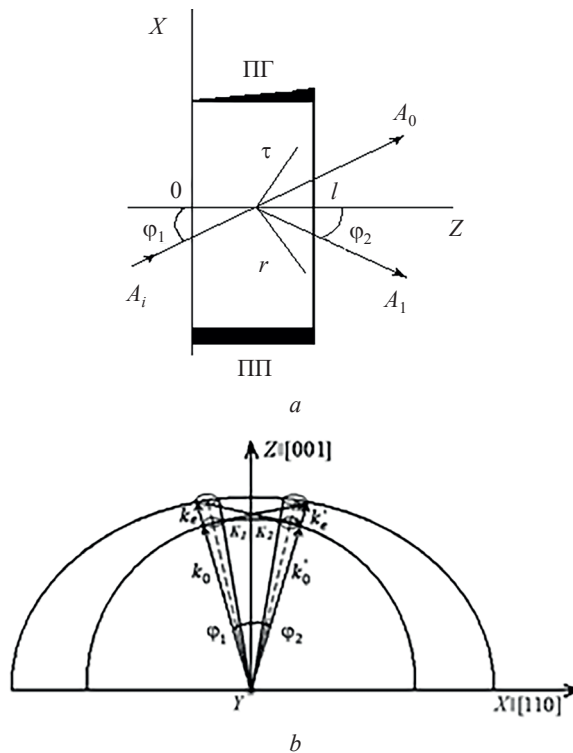


Рис. 1. Схема АО-взаимодействия СГП и УЗ-волны (а): ПП – пьезопреобразователь, ПП – поглотитель ультразвука, φ_1 и φ_2 – угол падения и дифракции соответственно; геометрия расположения преломленной и дифрагированной плоскостолновых компонент СГП в плоскости дифракции на медленной сдвиговой УЗ-волне в кристалле TeO_2 (б): $\vec{K}_{1,2}$ – волновые векторы ультразвука, $\vec{k}_{o,e}$, $\vec{k}'_{o,e}$ – волновые векторы преломленной и дифрагированной волн, 2δ – угол между волновыми векторами \vec{K}_1 и \vec{K}_2)

Fig. 1. AO diagram of the interaction between the DGB and the ultrasonic wave (a): PP – piezoelectric transducer, UA – ultrasound absorber, φ_1 and φ_2 – angle of incidence and diffraction, respectively; the geometry of the location of the refracted and diffracted plane-wave components of the DGB in the diffraction plane on a slow shear ultrasonic wave in a TeO_2 crystal (b): $\vec{K}_{1,2}$ are the ultrasound wave vectors, $\vec{k}_{o,e}$, $\vec{k}'_{o,e}$ are the wave vectors of the refracted and diffracted waves, 2δ is the angle between the wave vectors \vec{K}_1 and \vec{K}_2)

Рассмотрим геометрию акустооптического взаимодействия (рис. 1), для которой ультразвуковая волна распространяется в кристалле парателлурита под малым углом $\delta \sim 1^\circ$ к оси X и занимает пространство между плоскостями $z = 0$ и $z = l$. Ось падающего СГП расположена в плоскости XZ под углом φ_1 к фронту УЗ-волны. Сечение поверхности волновых векторов плоскостью дифракции XZ и расположение плоскостных компонент падающего (k_o и k_e) и дифрагированного (k'_o и k'_e) СГП показано на рис. 1, *b*. При этом реализуются 2 дифракционных процесса: $\vec{k}_o + \vec{K}_1 = \vec{k}'_e$, $\vec{k}_e + \vec{K}_2 = \vec{k}'_o$, где \vec{K}_1, \vec{K}_2 – плоскостные компоненты акустического пучка. Для рассматриваемой геометрии АО-взаимодействия следует положить $\varphi_1 \approx \varphi_2 \approx \varphi = \arcsin(\lambda_0 v / 2n v)$, где λ_0 – длина световой волны в вакууме, $n = (n_o + n_e)/2$ – средний показатель преломления кристалла (n_o, n_e – обыкновенный и необыкновенный показатели преломления кристалла), v – фазовая скорость УЗ-волны.

Расчет эффективности дифракции. В рамках двумерной теории связанных волн система связанных дифференциальных уравнений для комплексных амплитуд дифрагированных волн $A_0(r), A_1(\tau)$ имеет вид [6]

$$\frac{\partial A_0}{\partial \tau} + i\chi A_1 = 0, \quad \frac{\partial A_1}{\partial r} + i\chi A_0 = 0, \quad (1)$$

где коэффициент связи дифрагированных волн χ выражается через свертки тензора диэлектрической проницаемости $\Delta \varepsilon_{ij} = -\varepsilon_{ik} \varepsilon_{lj} p_{klmn} U_{mn}$ (ε_{ij}, U_{mn} – компоненты тензора диэлектрической проницаемости и тензора УЗ-деформации) с векторами поляризации \vec{e}_0, \vec{e}_1 дифрагированных волн нулевого и первого порядка, т. е. $\chi = k^2 (\vec{e}_0 \Delta \varepsilon \vec{e}_1) / 2$; $\tau = z \sin \varphi - x \cos \varphi$, $r = z \sin \varphi + x \cos \varphi$, $k = 2\pi n / \lambda_0$. Если искать решение системы уравнений (1) методом Римана с использованием граничных условий $A_0(z = 0) = A_{i0}, A_1(z = 0) = 0$, то общее решение можно представить в виде

$$A_0(r) = A_i(r) - \frac{1}{2} v \int_{-1}^{+1} A_i[r - l(1 - q) \sin \varphi] \frac{J_1(v \sqrt{1 - q^2})}{\sqrt{1 - q^2}} dq, \quad (2)$$

$$A_0(\tau) = -i \frac{1}{2} v \int_{-1}^{+1} A_i[l(1 - q) \sin \varphi - \tau] J_0(v \sqrt{1 - q^2}) dq, \quad (3)$$

где $v = \chi l / kn^2 \cos \varphi$ – индекс модуляции УЗ-волной; $J_0(x), J_1(x)$ – функции Бесселя первого рода соответственно нулевого и первого порядка. При этом индекс модуляции выражается через коэффициент акустооптического качества M_2 [7]: $v = \frac{2\pi}{\lambda_0 \cos \varphi} \sqrt{\frac{M_2 P_a l}{2h}}$, где P_a – мощность ультразвука, h – ширина пьезопреобразователя.

В приближении слабого АО-взаимодействия ($v \leq 0,1$) в выражениях (2), (3) можно положить, что функции Бесселя удовлетворяют соотношениям: $J_0(x) \approx 1, J_1(x) \approx x$. Тогда выражения (2), (3) преобразуются к виду [8]

$$A_0(r') = A_i(r) - \frac{v^2 A_{0i}}{4g\sqrt{\pi}} \{ \text{erf}(r'_0 - r') - \text{erf}[2g + (r'_0 - r')] \}, \quad (4)$$

$$A_1(\tau') = -i \frac{v A_{0i}}{g\sqrt{\pi}} \{ \text{erf}(\tau'_0 - \tau') - \text{erf}[2g + (\tau'_0 - \tau')] \}, \quad (5)$$

где $r' = r / w, \tau' = \tau / w; g = l \sin \varphi / w; \text{erf}(x)$ – функция ошибок.

Выражения (2)–(5) позволяют рассчитать амплитудное распределение дифрагированного пучка нулевого и первого порядка для любого уровня акустической мощности и широкого класса падающих световых пучков. Эффективность η акустооптической дифракции определяется соотношением

$$\eta = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} |A_1(\tau)|^2 d\tau}{\int_{-\infty}^{+\infty} |A_0(r)|^2 dr + \int_{-\infty}^{+\infty} |A_1(\tau)|^2 d\tau}. \tag{6}$$

Численный анализ амплитуды дифрагированного пучка. Численные расчеты проводились для акустооптической дифракции излучения с длиной волны $\lambda_0 = 532$ нм на медленной сдвиговой УЗ-волне, распространяющейся под малым углом $\delta \sim 1^\circ$ к оси [110] кристалла парателлуриата (TeO_2). Полагалось, что коэффициент АО-качества для линейно-поляризованной падающей световой волны равен [7] $M_2 = 515 \cdot 10^{-18} \text{ с}^3/\text{Г}$.

На рис. 2 показана зависимость амплитуды дифрагированной волны $|A_1|$ от угла Брэгга φ и нормированной координаты τ/w . Из него следует, что для любых углов Брэгга φ дифрагированное световое поле имеет вид смещенного гауссового светового пучка. При увеличении угла Брэгга максимальная амплитуда дифрагированного светового пучка возрастает.

Зависимость амплитуды дифрагированной волны $|A_1|$ от нормированной поперечной координаты τ/w при различных нормированных параметрах смещения τ_0/w представлена на рис. 3, а; при этом на рис. 3, б показана зависимость амплитуды дифрагированной волны $|A_1|$ от нормированной координаты τ/w при различных значениях мощности ультразвука P_a .

Из рис. 3, а следует, что максимальное значение $|A_1|$ не зависит от величины параметра смещения τ_0 . При этом глубина провала амплитуды СГП в центре светового пучка ($\tau = 0$) увеличивается с возрастанием нормированного параметра смещения τ_0 . Максимальное значение $|A_1|$ увеличивается, а глубина спада амплитуды в центре светового пучка уменьшается с возрастанием мощности ультразвука P_a , как показано на рис. 3, б.

На рис. 4 представлена зависимость дифракционной эффективности η от мощности ультразвука P_a , рассчитанная по формуле (6), при различных значениях длины АО-взаимодействия l .

Из рис. 4 следует, что для СГП эффективность дифракции достигает максимального значения 56 % при УЗ-мощности 35 мВт на длине АО-взаимодействия $l = 9$ мм. При увеличении мощности ультразвука имеет место обратная перекачка энергии светового пучка из нулевого в первый дифракционный порядок (так, для УЗ-мощности 0,2 Вт эффективность дифракции снижается до 42 %). С увеличением длины АО-взаимодействия максимальное значение дифракционной эффективности достигается при меньших УЗ-мощностях. Следует отметить, что эффективность дифракции η остается неизменной при варьировании параметра смещения СГП τ_0 . Это обусловлено тем, что при изменении параметра смещения τ_0 имеет место лишь изменение формы профиля СГП при неизменной в таких условиях световой мощности дифрагированного пучка.

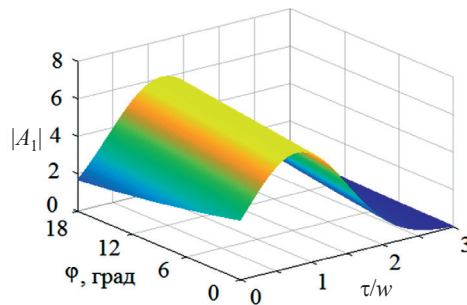


Рис. 2. Зависимость амплитуды $|A_1|$ от угла Брэгга φ и нормированной координаты τ/w (кристалл TeO_2 , $l = 5$ мм, $\lambda_0 = 532$ нм, $P_a = 0,5$ Вт, $M_2 = 515 \cdot 10^{-18} \text{ с}^3/\text{Г}$, $h = 4$ мм, $w = 4$ мм, $\tau_0 = 3,2$ мм, $A_{i0} = 1$)

Fig. 2. Dependence of amplitude $|A_1|$ on the Bragg angle φ and the normalized coordinate τ/w (TeO_2 crystal, $l = 5$ mm, $\lambda_0 = 532$ nm, $P_a = 0.5$ W, $M_2 = 515 \cdot 10^{-18} \text{ с}^3/\text{Г}$, $h = 4$ mm, $w = 4$ mm, $\tau_0 = 3,2$ mm, $A_{i0} = 1$)

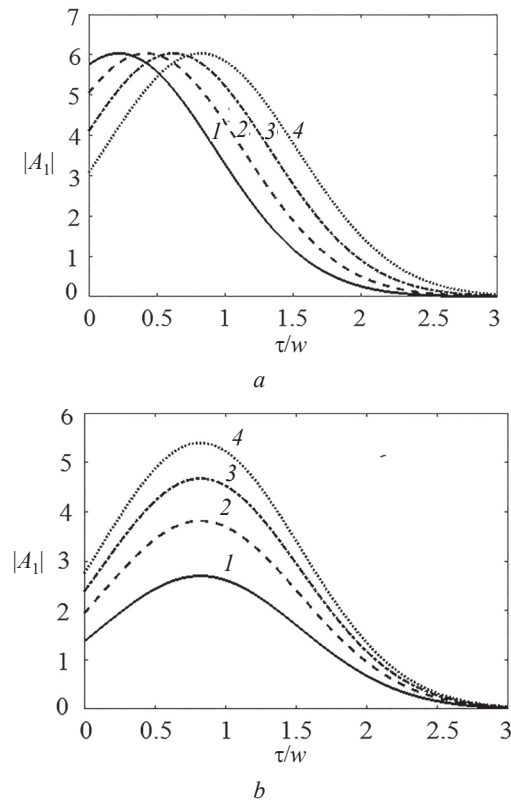


Рис. 3. Зависимость амплитуды СГП $|A_1|$ от нормированной координаты τ/w :
a – при различных нормированных параметра смещения τ_0' : 1 – 0,2, 2 – 0,4, 3 – 0,6, 4 – 0,8;
b – при различных мощностях ультразвука P_a :
 1 – 0,1 Вт, 2 – 0,2 Вт, 3 – 0,3 Вт, 4 – 0,4 Вт (кристалл TeO_2 , $l = 5$ мм, $\lambda_0 = 532$ нм, $M_2 = 515 \cdot 10^{-18} \text{ с}^3/\text{г}$, $h = 4$ мм, $w = 4$ мм, $P_a = 0,5$ Вт (*a*), $\tau_0 = 3,2$ мм (*b*), $\varphi = 1^\circ$, $A_{i0} = 1$)

Fig. 3. Dependence of the amplitude of the DGB $|A_1|$ on the normalized coordinate τ/w :
a – for various normalized displacement parameters τ_0' : 1 – 0.2, 2 – 0.4, 3 – 0.6, 4 – 0.8;
b – at different ultrasound powers P_a :
 1 – 0.1 W, 2 – 0.2 W, 3 – 0.3 W, 4 – 0.4 W (TeO₂ crystal, $l = 5$ mm, $\lambda_0 = 532$ nm, $M_2 = 515 \cdot 10^{-18} \text{ s}^3/\text{g}$, $h = 4$ mm, $w = 4$ mm, $P_a = 0.5$ W (*a*), $\tau_0 = 3.2$ mm (*b*), $\varphi = 1^\circ$, $A_{i0} = 1$)

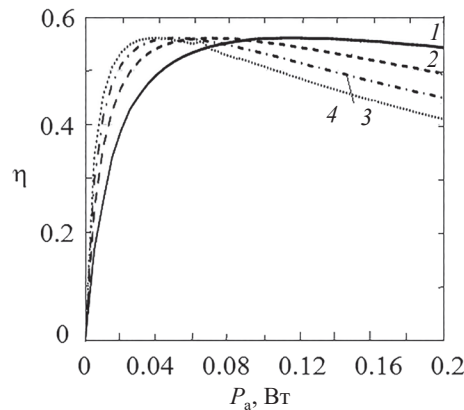


Рис. 4. Зависимость эффективности дифракции η от мощности ультразвуковой волны P_a при различных длинах АО-взаимодействия l : 1 – 3 мм, 2 – 5 мм, 3 – 7 мм, 4 – 9 мм (кристалл TeO_2 , $\lambda_0 = 532$ нм, $\tau_0 = 3,2$ мм, $M_2 = 515 \cdot 10^{-18} \text{ с}^3/\text{г}$, $h = 4$ мм, $w = 4$ мм, $\varphi = 1^\circ$, $A_{i0} = 1$)

Fig. 4. Dependence of diffraction efficiency η on ultrasonic wave power P_a at different AO interaction lengths l : 1 – 3 mm, 2 – 5 mm, 3 – 7 mm, 4 – 9 mm (TeO₂ crystal, $\lambda_0 = 532$ nm, $\tau_0 = 3.2$ mm, $M_2 = 515 \cdot 10^{-18} \text{ s}^3/\text{g}$, $h = 4$ mm, $w = 4$ mm, $\varphi = 1^\circ$, $A_{i0} = 1$)

Заклучение. Таким образом, при брэгговской дифракции смещенных кольцевых гауссовых пучков в кристаллах парателлуриата, имеет место эффективная перекачка энергии пучка из нулевого дифракционного порядка в первый. Из-за пространственной ограниченности пучка дифракционная эффективность не достигает максимального значения [9]. Для более эффективного энергообмена дифрагированных световых пучков следует использовать взаимодействие с более высоким параметром акустооптического качества в одноосном гиротропном кристалле. При этом для рассматриваемой геометрии акустооптического взаимодействия в парателлуриате и малом угле Брэгга ($\varphi \sim 1^\circ$) максимальная эффективность реализуется для циркулярно-поляризованных световых пучков ($M_2 = 793 \cdot 10^{-18} \text{ с}^3/\text{г}$) [7]. Дифрагированные пучки имеют форму смещенных гауссовых пучков, причем форма пучка существенно зависит от параметра смещения падающего пучка и мощности ультразвука.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания по программе Союзного государства «Компонент-Ф» (НИР шифр «Бессель» Российской Федерации и Республики Беларусь).

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the task under the program of the Union State “Component-F” (research code “Bessel” of the Russian Federation and the Republic of Belarus).

Список использованных источников

1. Linfoot, E. H. Diffraction Images in Systems with an Annular Aperture / E. H. Linfoot, E. Wolf // Proc. Phys. Soc. Sect. B. – 1953 – Vol. 66, № 2. – P. 145–149. <https://doi.org/10.1088/0370-1301/66/2/312>
2. Wolford, W. T. Use of Annular Aperture to Increase Focal Depth / W. T. Wolford // J. Opt. Soc. Am. – 1960. – Vol. 50, № 8. – P. 749–753. <https://doi.org/10.1364/josa.50.000749>
3. Формирование бесселевых световых пучков на больших расстояниях из кольцевых полей / Н. А. Хило [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2022. – Т. 58, № 1. – С. 90–100. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2022-58-1-90-100>
4. Long-range propagation of annular beam for lidar application / T. Shiina [et al.] // Opt. Commun. – 2007. – Vol. 279, № 1. – P. 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2007.07.029>
5. Gerçekcioglu, H. Annular beam scintillations in strong turbulence / H. Gerçekcioglu, Ya. Baykal, C. Nakiboglu // J. Opt. Soc. Am. A. – 2010. – Vol. 27, № 8. – P. 1834–1839. <https://doi.org/10.1364/josaa.27.001834>
6. Белый, В. Н. Дифракция световых пучков на затухающих ультразвуковых волнах в оптически изотропных средах / В. Н. Белый, И. Г. Войтенко, Г. В. Кулак // Журн. прикладной спектроскопии. – 1992. – Т. 56, № 5–6. – С. 831–836.
7. Блистанов, А. А. Кристаллы квантовой и нелинейной оптики / А. А. Блистанов. – М.: МИСИС, 2000. – 431 с.
8. Прудников, А. П. Интегралы и ряды / А. П. Прудников. Ю. А. Брычков, О. И. Маричев. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2003. – Т. 2. – 664 с.
9. Балакший, В. И. Физические основы акустооптики / В. И. Балакший, В. Н. Парыгин, Л. Е. Чирков. – М.: Радио и связь, 1985. – 279 с.

References

1. Linfoot E. H., Wolf E. Diffraction Images in Systems with an Annular Aperture. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 1953, vol. 66, no. 2, pp. 145–149. <https://doi.org/10.1088/0370-1301/66/2/312>
2. Wolford W. T. Use of Annular Aperture to Increase Focal Depth. *Journal of the Optical Society of America*, 1960, vol. 50, no. 8, pp. 749–753. <https://doi.org/10.1364/josa.50.000749>
3. Khilo N. A., Ropot P. I., Petrov P. K., Belyi V. N. The formation of Bessel light beams at large distances from annular fields. *Vestsi Natsyonal'най akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2022, vol. 58, no. 1, pp. 90–100 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2022-58-1-90-100>
4. Shiina T., Yoshida K., Ito M., Okamura Y. Long-range propagation of annular beam for lidar application. *Optics Communication*, 2007, vol. 279, no. 1, pp. 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2007.07.029>
5. Gerçekcioglu H., Baykal Ya., Nakiboglu C. Annular beam scintillations in strong turbulence. *Journal of the Optical Society of America A*, 2010, vol. 27, no. 8, pp. 1834–1839. <https://doi.org/10.1364/josaa.27.001834>
6. Bely V. N., Voitenko I. G., Kulak G. V. Diffraction of light beams on attenuated ultrasonic waves in optically isotropic media. *Journal of Applied Spectroscopy*, 1992, vol. 56, pp. 513–517. <https://doi.org/10.1007/bf00661758>
7. Blistanov A. A. *Crystals of Quantum and Nonlinear Optics*. Moscow, National University of Science and Technology “MISIS”, 2000. 431 p. (in Russian).
8. Prudnikov A. P., Brychkov Yu. A., Marichev O. I. *Integrals and Series. Vol. 2*. 2nd ed. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 664 p. (in Russian).
9. Balakshi V. I., Parygin V. N., Chirkov L. E. *Physical Fundamentals of Acousto-Optics*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985. 279 p. (in Russian).

Информация об авторах

Кулак Геннадий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики и математики, Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина (ул. Студенческая, 28, 247760, Мозырь, Республика Беларусь). E-mail: g.kulak57@mail.ru

Ропот Петр Иосифович – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: p.ropot@dragon.bas-net.by

Шакин Олег Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры конструирования и технологии электронных и лазерных средств, Государственный университет аэрокосмического приборостроения (ул. Большая Морская, 67, 190000, Санкт-Петербург, Российская Федерация). E-mail: oshakin@mail.ru

Information about the authors

Gennadii V. Kulak – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Professor of the Department of Physics and Mathematics, Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin (28, Studentskaya Str., 247760, Mozyr, Republic of Belarus). E-mail: g.kulak57@mail.ru

Peter I. Ropot – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Leading Researcher, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: p.ropot@dragon.bas-net.by

Oleg V. Shakin – Dr. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Means, State University of Aerospace Instrumentation (67, Bol'shaya Morskaya Str., 190000, Saint Petersburg, Russian Federation). E-mail: oshakin@mail.ru