

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И ОПТОАКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА КРУГОВОЕ СКаниРОВАНИЕ СВЕТОВОГО ЛУЧА В ПРОЦЕССЕ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СПЕКТРА БЕССЕЛЕВА ПУЧКА

Белый В. Н. — академик НАН Беларуси, д.ф.-м.н., проф., заведующий центром, Институт физики НАН Беларуси, Минск. SPIN-код: 4534–5303. E-mail: v.belyi@dragon.bas-net.by

Хило П. А. — д.ф.-м.н., проф., зав. кафедрой, Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, Гомель. SPIN-код: 1026–7066. E-mail: khilo@gstu.by

Рыжевич А. А. — к.ф.-м.н., доцент, в.н.с., Институт физики НАН Беларуси, Минск. SPIN-код: 1933–6140. E-mail: a.ryzhevich@dragon.bas-net.by

Хило Н. А. — к.ф.-м.н., доцент, в.н.с., Институт физики НАН Беларуси, Минск. SPIN-код: 2393–0206. E-mail: n.khilo@dragon.bas-net.by

ACOUSTO-OPTIC AND OPTO-ACOUSTIC METHODS AND DEVICES

ANNULAR SCANNING OF A LIGHT RAY IN THE PROCESS OF ACOUSTO-OPTIC FILTRATION OF A BESSEL BEAM SPATIAL SPECTRUM

Belyi V. N. — academician of the NAS of Belarus, Sc.D., professor, head of the center, Institute of Physics of the NAS of Belarus, Minsk. E-mail: v.belyi@dragon.bas-net.by

Khilo P. A. — Sc.D., professor, head of the department, Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi, Gomel. E-mail: khilo@gstu.by

Ryzhevich A. A. — Ph.D., associate professor, leading researcher, Institute of Physics of the NAS of Belarus, Minsk. E-mail: a.ryzhevich@dragon.bas-net.by

Khilo N. A. — Ph.D., associate professor, leading researcher, Institute of Physics of the NAS of Belarus, Minsk. E-mail: n.khilo@dragon.bas-net.by

doi: 10.25210/jfor-2503-PXKDHD | edn: PXKDHD УДК/UDC 535.42 © Авторы/Authors, 2025

Поступила 26 ноября 2025 г.

Received November 26, 2025

Принята к печати 9 декабря 2025 г.

Accepted December 9, 2025

Аннотация

Предложен метод реализации акустооптической (АО) фильтрации пространственного спектра бесселевых световых пучков (БСП) при АО дифракции в анизотропных кристаллах. В результате пространственной модуляции светового пучка при изменении акустической частоты происходит круговое сканирование дифрагированного парциального светового пучка, выделенного из конуса плоских волн, составляющих падающий БСП. Показана возможность создания нового типа АО дефлектора с большими значениями углов развертки сканирующего луча. Проведен расчет диапазона частот дефлектора, необходимых для сканирования дифрагированного луча по полному азимутальному углу, в зависимости от направления распространения БСП по отношению к оптической оси кристалла и его угла конуса. Определена угловая ширина отдельного максимума АО дифракции при круговом сканировании для процесса взаимодействия БСП,

Abstract

The method of realization of acousto-optic (AO) filtration of a Bessel light beam (BLB) spatial spectrum at AO diffraction in anisotropic crystals is proposed. As a result of the spatial modulation of the light beam, when the acoustic frequency changes, there is an annular scanning of the diffracted partial light beam separated from the cone of plane waves, which form the incident BLB. The possibility of creation of a new type of the AO deflector with large values of scanning angle of a scanning ray is shown. The calculation is performed of the range of deflector frequencies necessary for scanning of a diffracted ray along the whole azimuthal angle depending on the direction of the BLB propagation relative to the optical axis of a crystal and its cone angle. The angular width is determined of separate maximum of the AO diffraction at annular scanning for the process of interaction of BLB propagating in a crystal of tetragonal symmetry in arbitrary direction relative to the forth order axis with ultrasound wave propagating



распространяющегося в кристалле тетрагональной симметрии в произвольном направлении относительно оси четвертого порядка с ультразвуковой волной, распространяющейся перпендикулярно оптической оси.

Ключевые слова: акустооптический фильтр/дефлектор, бесселев световой пучок, селективный фазовый синхронизм

perpendicular to the optical axis.

Keywords: acousto-optic filter/deflector, Bessel light beam, selective phase matching

Введение

Среди устройств, используемых для развертки лазерных пучков, акустооптические дефлекторы (АОД) имеют важное преимущество, а именно высокое быстродействие в сочетании с достаточно большим углом сканирования. Наилучшие характеристики АОД получены при использовании анизотропной дифракции Брэгга, при которой угловая ширина синхронизма существенно больше, чем в случае изотропной дифракции. В видимой и ближней ИК-областях оптического спектра наибольшее применение нашли анизотропные АОД на парателлурите (TeO_2) — акустооптическом материале, обладающем оптимальным набором АО характеристик. Базовым свойством АО взаимодействия является зависимость волновой расстройки от акустической частоты, что ограничивает максимальный угол сканирования. Ослабить это ограничение можно в режиме селективного синхронного взаимодействия акустической волны с отдельными компонентами пространственного спектра светового поля. Данный подход обсуждается далее для случая бесселева падающего пучка.

1. Геометрия АО дифракции

Бесселев световой пучок распространяется в кристалле тетрагональной симметрии под некоторым углом θ к оптической оси z (рис. 1, а). Отметим, что данная схема отличается от использованной в [1], где в кристалле распространялся кольцевой пучок со структурой Фурье спектра БСП. Более симметричная геометрия реализуется, когда $\theta = \pi/2$ (рис. 1, б). При этом ультразвуковая волна распространяется в отрицательном направлении оси x .

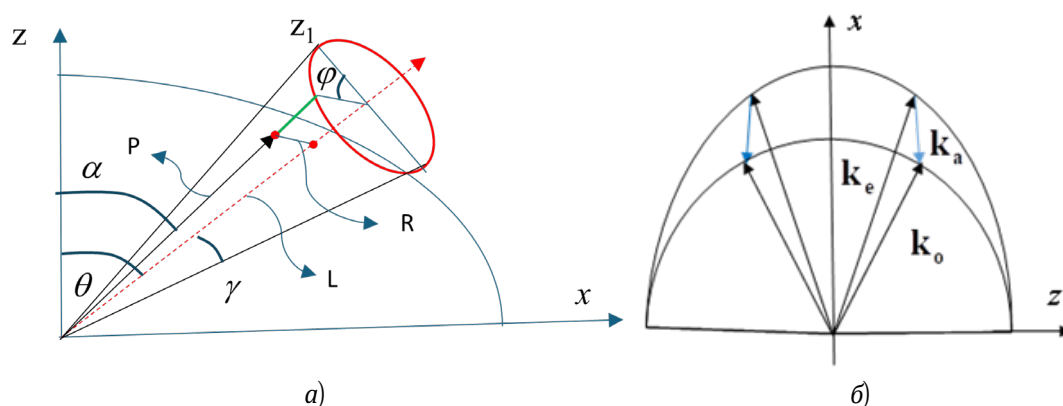


Рис. 1. Геометрия АО взаимодействия в оптически положительном кристалле при распространении БСП в произвольном направлении (а) и перпендикулярно оптической оси (б).

Преломленный в кристалл бесселев пучок ТН- (или е-) поляризован и характеризуется конусом волновых векторов k_e , проекция которых на оптическую ось пучка $k_{||}$, вследствие анизотропии кристалла, зависит от азимутального угла φ . В то же время, поперечные компоненты конуса волновых векторов проходящего БСП не зависят от угла φ , что следует из граничного условия для этих векторов при нормальном падении бесселева пучка на кристалл. С целью наглядности угол φ на рис. 1, а показан в смещенной вдоль оси пучка плоскости. Волновые векторы k_e распространяющегося в кристалле е-БСП формируют на волновой е-поверхности эллипс, расстояние от точек которого до о-поверхности в направлении оси x (вдоль волнового вектора акустической волны) зависит от азимутального угла φ . Это и обуславливает возможность селективной АО дифракции е-о типа для выделенной плосковолновой компоненты е-БСП. При соответствующей перестройке частоты звука в АО процесс последовательно вовлекаются все плосковолновые компоненты е-БСП в пределах азимутального угла $0 \div 2\pi$. Тем самым осуществляется перестройка АО передаточной функции, что является перспективной АО технологией в настоящее время (см. [2]). Аналогичный процесс происходит и в схеме на рис. 1, б. Отличие состоит в том, что при заданной частоте звука синхро-

низм в схеме 1, а реализуется для двух плосковолновых компонент, а в схеме 1, б — для четырех. В действительности в процессе АО дифракции будет участвовать некоторое множество плоских волн в окрестности синхронизма, в результате чего дифрагированное поле приобретет структуру пучка гауссова типа.

1.1. Расчет резонансной частоты

Проведем далее расчет резонансной акустической частоты дефлектора как функции азимутального угла φ . Пусть падающий на кристалл БСП имеет угол конуса γ_{in} . Тогда из граничного условия непрерывности поперечного волнового числа q получаем

$$\sin \gamma_{in} = \tilde{n}_e \sin \gamma, \text{ где } \tilde{n}_e = \sqrt{\frac{n_o^2 n_e^2}{(n_e^2 - n_o^2) \cos^2 \alpha + n_o^2}}. \quad (1)$$

Для расчета угла α (см. рис. 1, а) воспользуемся следующей цепочкой преобразований

$$k_e = k_{||} + q \rightarrow k_e e_z = (k_{||} + q) e_z \rightarrow k_e \cos \alpha = k_{||} \cos \theta + q \sin \theta \cos \varphi. \quad (2)$$

Из (2) с учетом того, что $k_{||} = k_e \cos \gamma$, $q \rightarrow k_e \sin \gamma$, следует выражение для $\cos \alpha$:

$$\cos \alpha = \cos \theta \cos \gamma + \sin \theta \sin \gamma \cos \varphi. \quad (3)$$

При заданном угле θ уравнения (1) и (3) позволяют численно определить функцию $\gamma = \gamma(\varphi)$.

Для расчета акустической частоты исходим из векторного уравнения фазового синхронизма

$$k_e - k_a e_x = k_o \rightarrow k_e e_x - k_a = k_o e_x \rightarrow k_e \cos \gamma \sin \theta - k_e \sin \gamma \cos \varphi \cos \theta - k_a = k_{ox}, \quad (4)$$

где k_a — волновое число акустической волны.

Тогда для y - и z - проекций k_e получим

$$k_e e_y = k_{oy} \rightarrow -k_e \sin \gamma \sin \varphi = k_{oy}, \quad k_e e_z = k_{oz} \rightarrow k_e \cos \alpha = k_{oz}. \quad (5)$$

Далее из (4) и (5) следует уравнение $(k_e \cos \gamma \sin \theta - k_e \sin \gamma \cos \theta \cos \varphi - k_a)^2 + (k_e \sin \gamma \sin \varphi)^2 + (k_e \cos \alpha)^2 = k_o^2$, из которого находим волновое число звука k_a ,

$$k_a = k_e \cos \gamma \sin \theta - k_e \sin \gamma \cos \theta \cos \varphi - \sqrt{k_o^2 - (k_e \sin \gamma \sin \varphi)^2 - (k_e \cos \alpha)^2}, \quad (6)$$

а также акустическую частоту $f = k_a v / (2\pi)$, где v — скорость ультразвуковой (УЗ) волны.

1.2. Расчет дефлектора и обсуждение результатов

На рис. 2, а, в, д показана зависимость резонансной частоты ультразвуковой волны, а на рис. 2, б, г, е — зависимость угла конуса светового пучка в ТН-поляризованном-БСП от азимутального угла φ . Расчет проведен для кристалла TeO_2 и длины волны $\lambda = 0.63$ мкм, причем показатели преломления $n_o = 2.25$, $n_e = 2.41$, а скорость УЗ волны $v = 2.1$ км/с. БСП распространялся под углом 10 градусов к оптической оси кристалла, а угол γ конуса пучка в воздухе равен 2, 5 и 10 градусов. С использованием графиков (рис. 2) определялся частотный диапазон Δf дефлектора, а также длина когерентности $L_{\text{кор}}$ е-БСП в кристалле. Длина когерентности определялась как расстояние, для которого максимальная разность фаз между световыми лучами из конуса достигает значения π .

Как видно из рис. 2, максимальный угол конуса имеет место при $\varphi = 0$, а минимальный — при $\varphi = \pi$. Тогда для угла конуса $\gamma_{in} = 2^\circ$ получаем $L_{\text{кор}} = 205$ мкм и $\Delta f = 15.3$ МГц. В свою очередь для угла конуса $\gamma_{in} = 5^\circ$ имеем $L_{\text{кор}} = 82$ мкм и $\Delta f = 38.1$ МГц, а для угла $\gamma_{in} = 10^\circ$ получаем $L_{\text{кор}} = 41$ мкм, $\Delta f = 76$ МГц.

Из симметрии графиков следует, что на заданной частоте звука в синхронизме будут находиться две плосковолновые компоненты падающего БСП с азимутальными углами φ и $360^\circ - \varphi$. Следовательно, угловое расстояние между ними будет минимальным, равным нулю для $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 180^\circ$, и максимальным, равным 180° для $\varphi = 90^\circ$ и $\varphi = 270^\circ$.

Как отмечено выше, на заданной частоте звука в АО процессе будет участвовать некоторое множество плосковолновых компонент из конуса БСП. Пусть $f(\varphi_0)$, $f(\varphi_0 + \Delta\varphi_+)$ и $f(\varphi_0 - \Delta\varphi_-)$ — резонансные частоты для центральной φ_0 и некоторых боковых $\varphi_0 \pm \varphi_\pm$ компонент БСП. Тогда фазовая расстройка на длине кристалла L между центральной и боковыми компонентами будет равна $\Delta\Phi_\pm = 2\pi L \sin \alpha_\pm |f(\varphi_0) - f(\varphi_0 \pm \Delta\varphi_\pm)| / v$, где $\alpha_\pm = \alpha(\varphi_0 \pm \Delta\varphi_\pm)$. Полагая $\Delta\Phi_\pm = \pi$, получим уравнение для расчета $\Delta\varphi_\pm$:

$$|f(\varphi_0) - f(\varphi_0 \pm \Delta\varphi_\pm)| = \frac{v}{2L \sin \alpha_\pm}. \quad (7)$$

Для TeO_2 при длине кристалла $L = 1$ см правая часть (7) равна $0.105 / (l \sin \alpha_\pm)$ МГц. Сумма $\Delta\varphi = \Delta\varphi_+ + \Delta\varphi_-$ представляет собой диапазон φ — компонент БСП, участвующих в АО процессе. Порядок величины (7) можно оценить, полагая $\sin \alpha_\pm = 0.5$ и $l = 1$. Тогда из (7) $\Delta f_\pm(\varphi_0) \approx 0.2$ МГц. Из рис. 2 видно, что угловая ширина зависит от угла φ , причем ее минимум имеет место при $\varphi = 90^\circ$ и 270° , а максимум — при $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 180^\circ$. Кроме того, рис. 2 показывает уширение максимума функции $f(\varphi)$ при возрастании угла

конуса γ_{in} . Следовательно, на максимальной акустической частоте угловая ширина $\Delta\varphi$ максимальна и возрастает с увеличением угла конуса γ_{in} , падающего на входную грань кристалла БСП.

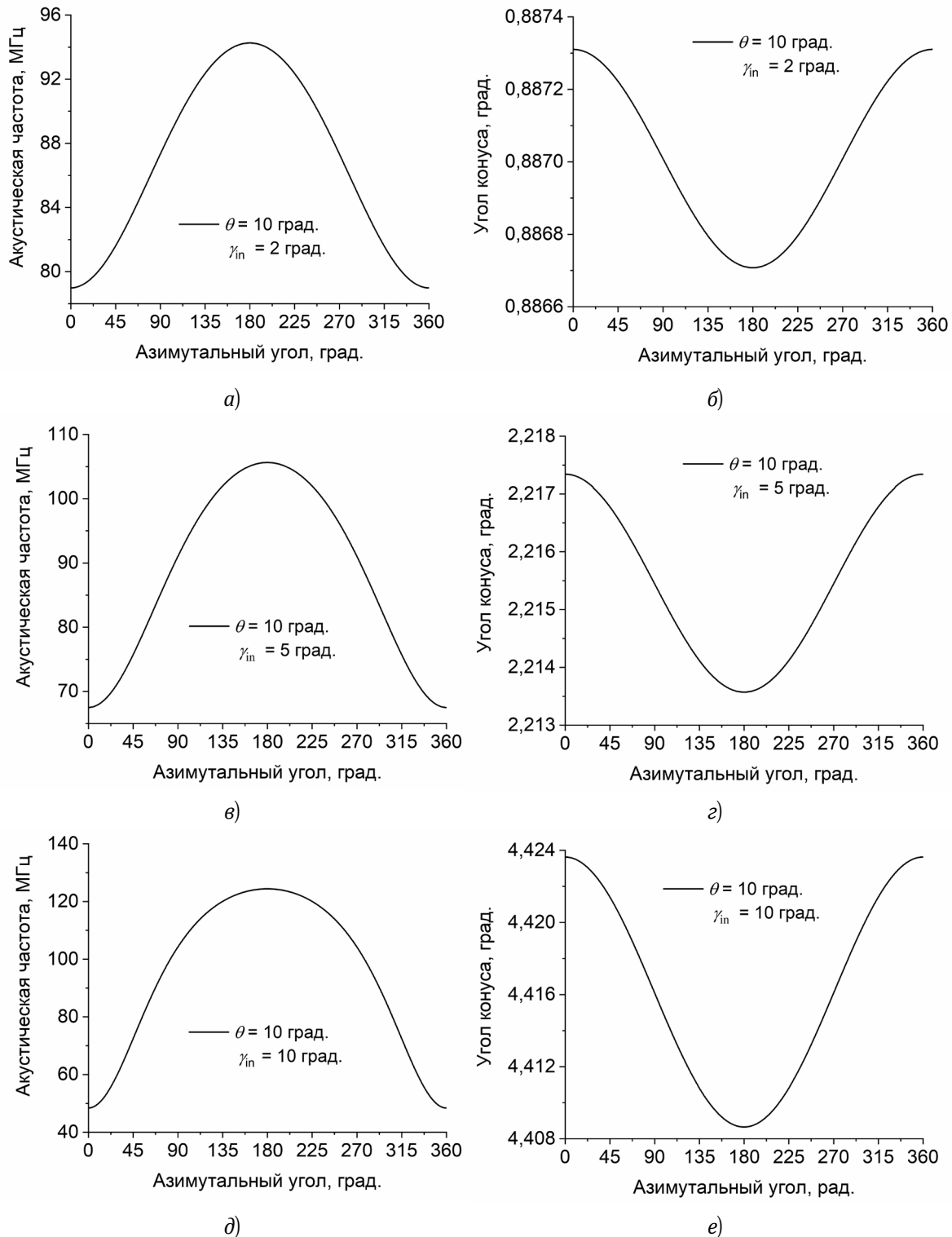


Рис. 2. Зависимость от азимутального угла φ частоты УЗ волны, необходимой для синхронного АО взаимодействия, (а, в, д) и угла конуса необыкновенной волны (б, г, е). Угол распространения бесселева пучка относительно оптической оси равен 10 град.

Важно отметить, что угол сканирования светового луча при АО дифракции в режиме селективного синхронизма будет возрастать при увеличении угла конуса γ_{in} падающего БСП и может быть достаточно большим, что демонстрирует рис. 1, б, а также следует из графиков на рис. 2 и формулы (7).

Наряду с очевидным преимуществом (большие углы сканирования) предложенная схема АО дефлектора имеет определенный недостаток. Он состоит в относительно низкой энергетической эффективности вследствие того, что при заданной акустической частоте в АО процесс вовлекается только часть падающего БСП, выделенная условием фазового синхронизма.

Рассматриваемый здесь дефлектор может быть классифицирован также как АО фильтр пространственных частот, перестраивающий форму лазерного пучка за счет управления АО передаточной функцией.

Выводы

Фильтрация частотного спектра светового поля является, как известно [3], одним из важных свойств АО процесса. Перестраиваемые АО фильтры находят в настоящее время различные применения. Световые пучки, в то же время, характеризуются, кроме частотного, также пространственным спектром. Следовательно, представляет интерес исследование возможностей фильтрации и пространственных частот (ПЧ) при АО дифракции. В этом отношении особое место занимают БСП, которые характеризуются большой угловой шириной спектра ПЧ и в то же время низкой расходимостью. В настоящей работе предложен метод фильтрации ПЧ бесселевых пучков в процессе их АО дифракции в анизотропных кристаллах. Показано, что результатом фильтрации ПЧ при брэгговской дифракции является угловое сканирование светового луча по круговой траектории.

Найдены условия существования локального по азимутальному углу фазового синхронизма в процессе неколлинеарной е-о АО дифракции БСП за счет изменения акустической частоты. Показано, что в результате такого типа дифракции реализуется АО фильтр/дефлектор, сканирующий по азимутальному углу парциальный световой пучок, выделенный из конуса плоских волн падающего БСП. Проведен расчет диапазона частот дефлектора, необходимых для сканирования дифрагированного луча по полному азимутальному углу, в зависимости от направления распространения БСП по отношению к оптической оси кристалла и его угла конуса. Проведен анализ и оценка угловой ширины фильтра азимутальных компонент БСП, формирующих дифрагированный пучок. Предложенный метод позволяет увеличить угол сканирования светового пучка за счет перехода дефлектора в режим фильтра азимутальных ПЧ бесселева светового пучка.

Список литературы

1. Belyi, V.N., Khilo, N.A., Varanetskiy, A.M., Ropot, P.I., Agashkov, A.V., Khilo, P.A. Acousto-optic control of Bessel-like beam parameters in the far zone with the use of uniaxial TeO₂ and NaBi(MoO₄)₂ crystals // IEEE Xplore. 2024. P. 15-19. DOI: 10.1109/WECONF61770.2024.10564657
2. Yushkov, K., Chiznikov, A., Obydenkov, D., Molchanov, V. Phase-tuned acousto-optic spatial filter // Optics Letters. 2024. Vol. 49. Iss. 14/15. P. 3866-3869.
3. Балакиев В.Н., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 280 с.

doi: 10.25210/jfop-2503-PXKDHD | edn: PXKDHD УДК/UDC 535.42 © Авторы/Authors, 2025

Поступила 26 ноября 2025 г.

Received November 26, 2025

Принята к печати 9 декабря 2025 г.

Accepted December 9, 2025

Белый В.Н., Хило П.А., Рыжевич А.А., Хило Н.А. Круговое сканирование светового луча в процессе акустооптической фильтрации пространственного спектра бесселева пучка // Физические основы приборостроения. 2025. Т. 14. № 3 (57). С. 107-111. DOI: 10.25210/jfop-2503-PXKDHD. EDN: PXKDHD