

Оптический журнал

Физическая оптика
Physical optics

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-11-29-38

УДК 535.8

Исследование качества передачи стереоскопического изображения при акустооптической дифракции в кристалле парателлурита

Владислав Игоревич Батшев¹, Витольд Эдуардович Пожар²,
Олег Алексеевич Кананыхин^{3✉}

Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук,
Москва, Россия

¹batshev.vi@ntcup.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>

²vitold@ntcup.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0553-5410>

³kananykhin.oa@ntcup.ru

<https://orcid.org/0009-0005-9723-3250>

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрена задача получения спектральных стереоскопических изображений в оригинальной конфигурации, где для фильтрации пары световых пучков используется один акустооптический фильтр. **Цель работы.** Определение характера изменения качества изображения при изменении угла разведения пучков в акустооптическом фильтре для дальнейшей оптимизации спектральной стереосистемы. **Метод.** Исследуемая схема построения требует реализации дифракции света на ультразвуке в направлениях, отклоненных от плоскости (-110°), используемой в классических широкоапertureных акустооптических фильтрах на кристалле TeO_2 . Для этого создан измерительный стенд, позволяющий определить характеристики качества изображения при азимутальном повороте акустооптической ячейки. **Основные результаты.** На основе полученной серии изображений штриховой и радиальной монты были измерены значения контраста и разрешающей способности при различных углах поворота и показано, что эти характеристики снижаются довольно медленно, и это позволяет варьировать угол разведения пучков в разрабатываемой стереоскопической системе в значительных пределах (до 16°). **Практическая значимость.** Проведенное исследование демонстрирует возможность эффективного использования рассматриваемой схемы акустооптической фильтрации пары пучков в стереоспектральных устройствах, перспективных для систем технического зрения.

Ключевые слова: стереоскопия, видеоспектрометрия, акустооптическая фильтрация, парателлурит, широкоапertureная дифракция

Благодарность: исследование выполнено за счет гранта РНФ № 19-19-00606П. Результаты работы получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН.

Ссылка для цитирования: Батшев В.И., Пожар В.Э., Кананыхин О.А. Исследование качества передачи стереоскопического изображения при акустооптической дифракции в кристалле парателлурита // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 11. С. 29–38. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-11-29-38>

Коды OCIS: 170.1065, 300.0300, 300.6320

Quality assessment of stereoscopic images under acousto-optic diffraction in paratellurite crystal

VЛАДИСЛАВ И. БАТШЕВ¹, ВИТОЛД Е. ПОЗХАР², ОЛЕГ А. КАНАНЬХИН^{3✉}

Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

¹batshev.vi@ntcup.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>

²vitold@ntcup.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0553-5410>

³kananykhin.oa@ntcup.ru

<https://orcid.org/0009-0005-9723-3250>

Abstract

Subject of study. The problem of obtaining spectral stereoscopic images in an original configuration, where one acousto-optical filter is used to filter a pair of light beams, is considered. **Aim of study.** Determination of the nature of changes in image quality when changing the angle of beam separation in an acousto-optical filter for further the spectral stereo system optimization. **Method.** The imaging scheme can be implemented by means of light diffraction by ultrasound in directions deviated from the basic plane (-110) of TeO_2 crystal cell in classical wide-aperture acousto-optical tunable filters. A test-bench is created to determine the characteristics of image quality during azimuthal tunable rotation of the acousto-optical cell. **Main results.** The spectral images stack representing the dashed and radial test-targets was recorded and values of the contrast and the spatial resolution were calculated at different angles of inclination. It was revealed that the degradation is rather slow, so the inclination angle can be varied considerably (up to 16° parallax). **Practical significance.** The research demonstrates the prospects of the described scheme of acousto-optic filtering of a pair of beams for stereo-spectral devices, which are promising of technical vision systems.

Keywords: stereoscopy, video spectrometry, acousto-optic filtration, paratellurite, wide-aperture diffraction

Acknowledgment: the study was supported by the Russian Science Foundation grant № 19-19-00606П. The results of the work were obtained using the equipment of the Center for Collective Use of the Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS.

For citation: Batshev V.I., Pozhar V.E., Kananykhin O.A. Quality assesment of stereoscopic images under acousto-optic diffraction in paratellurite crystal [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 11. P. 29–38. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-11-29-38>

OCIS codes: 170.1065, 300.0300, 300.6320

ВВЕДЕНИЕ

Создание компактного устройства, позволяющего получать информацию о трехмерных (объемных) пространственных и спектральных свойствах объекта, т.е. выполнять регистрацию зависимости интенсивности от длины волны излучения, является актуальным для микроскопии [1, 2], дистанционного зондирования Земли [3], биомедицины [4–6], проверки пищевых продуктов [7], искусствоведческого анализа [8]. Акустооптическая (АО) фильтрация излучения представляется одним из эффективных методов для решения этой задачи благодаря возможности спектральной фильтрации пучков излучения, переносящих изображение, а также некоторым другим важ-

ным особенностям АО фильтров, которые обеспечивают высокое спектральное и пространственное разрешение, быструю перестройку по длине волны и произвольную спектральную адресацию, обладают компактностью и малым энергопотреблением [9]. Как было показано в работе [10], в АО фильтре могут одновременно дифрагировать два пучка, идущие по различным траекториям, а значит, существуют предпосылки для создания компактного и относительно недорогого стереоскопического спектрального прибора.

Ранее было предложено несколько подходов к решению этой задачи [11–13], но ни один из них, как показала экспериментальная проверка, не оказался в полной мере эффективным.

Одной из причин этого являются существенные различия характеристик получаемых изображений — в качестве изображения и в спектральном разрешении.

В работе исследуется принципиально иная схема АО фильтрации двух пучков в наиболее эффективном АО кристалле — парателлурите (TeO_2). В этой схеме пара пучков разводится в азимутальной плоскости (рис. 1) симметрично, под небольшим углом α к полярной плоскости (-110). Такая геометрия близка к широкоапертурной (касательной) геометрии [14], обеспечивающей наибольшее угловое поле и используемой в классических широкоапертурных АО фильтрах на кристалле TeO_2 .

Принцип работы заключается в следующем. При дифракции линейно поляризованного света на фазовой решетке, создаваемой бегущей ультразвуковой волной, из всего светового потока лишь спектральная составляющая, удовлетворяющая условию Брэгга $\mathbf{k}_o^d = \mathbf{k}_e^i + \mathbf{q}$, где \mathbf{k}_o^d , \mathbf{k}_e^i , \mathbf{q} — волновые векторы дифрагированной и падающей световых волн и ультразвуковой волны, отклоняется и меняет поляризацию, что позволяет ее выделить. Длина волны дифрагированного излучения определяется частотой ультразвука, а также углами распространения света (θ , α) и звука (γ). Два пучка, составляющие стереопару, отколо-

нены симметрично относительно оси $[110]$ на угол α , а потому коэффициент дифракции пучков одинаков и они испытывают одинаковые пространственные искажения.

Целью работы является определение характера изменения качества изображения при изменении угла разведения пучков в таком АО фильтре для дальнейшей оптимизации спектральной стереосистемы. Ниже описан измерительный стенд, позволяющий определять характеристики качества изображения при азимутальном повороте АО ячейки, приведены результаты измерения контраста и разрешающей способности и обсуждается возможность использования исследуемой схемы АО фильтрации пары пучков для построения компактных стереоспектральных устройств.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Для исследования качества изображений, формируемых АО фильтром в двух стереоскопических каналах, собран измерительный стенд (рис. 2)

Исследуемый АО фильтр из кристалла TeO_2 имеет угол среза 7° , рабочий угол падения света 74° , диапазон возбуждаемых звуковых

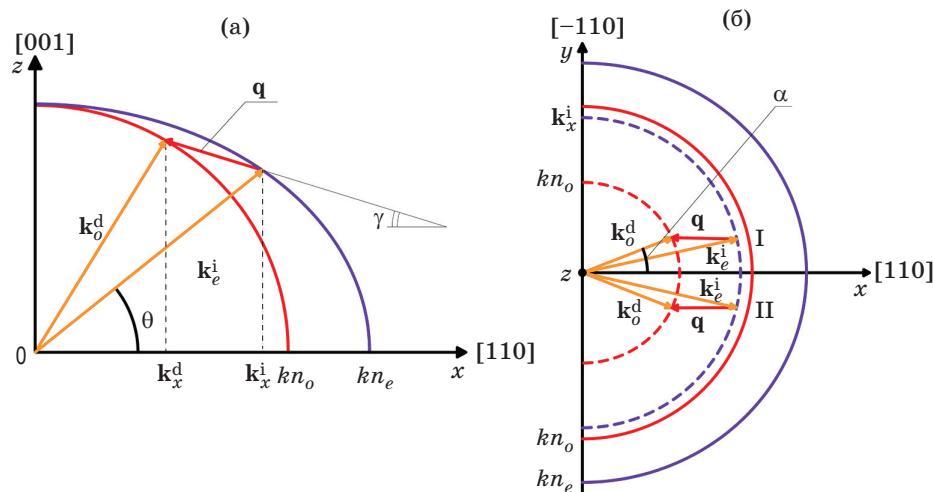


Рис. 1. Диаграммы волновых векторов при дифракции в одноосном кристалле пары пучков на одной ультразвуковой волне в полярной (а) и в азимутальной (б) плоскостях. \mathbf{k}_o^d , \mathbf{k}_e^i , \mathbf{q} — волновые векторы дифрагированной и падающей световых волн и ультразвуковой волны соответственно, углы распространения света — θ , α , звука — γ

Fig. 1. Diagrams of wave vectors during diffraction of a pair of beams in a uniaxial crystal on one ultrasonic wave in the (a) polar and (б) azimuthal planes. Here, \mathbf{k}_o^d , \mathbf{k}_e^i , \mathbf{q} are the wave vectors of diffracted and incident light waves and ultrasonic waves respectively, angles of light propagation are θ , α , angle sound propagation is γ

волн 60–120 МГц, соответствующий диапазону длин волн 450–800 нм, а выходная грань АО кристалла наклонена так, чтобы минимизировать хроматический сдвиг изображения [15, 16].

Стенд содержит лампу накаливания, пропускающую тестовый объект, промежуточное изображение которого формируется первым объективом в плоскости диафрагмы, установленной в фокальной плоскости второго объектива. Коллимированный пучок направ-

ляется на АО фильтр, а дифрагированное (отфильтрованное) излучение фокусируется третьим объективом на матричном приемнике излучения. При этом используется бесполяризаторная схема АО фильтра [17], в которой 0-й порядок дифракции (рис. 2а, пунктир) отклоняется в сторону от дифрагированного и не попадает в приемник.

Для исходной юстировки АО ячейки использовался лазер, излучение которого с помощью системы зеркал и диафрагм позволяет

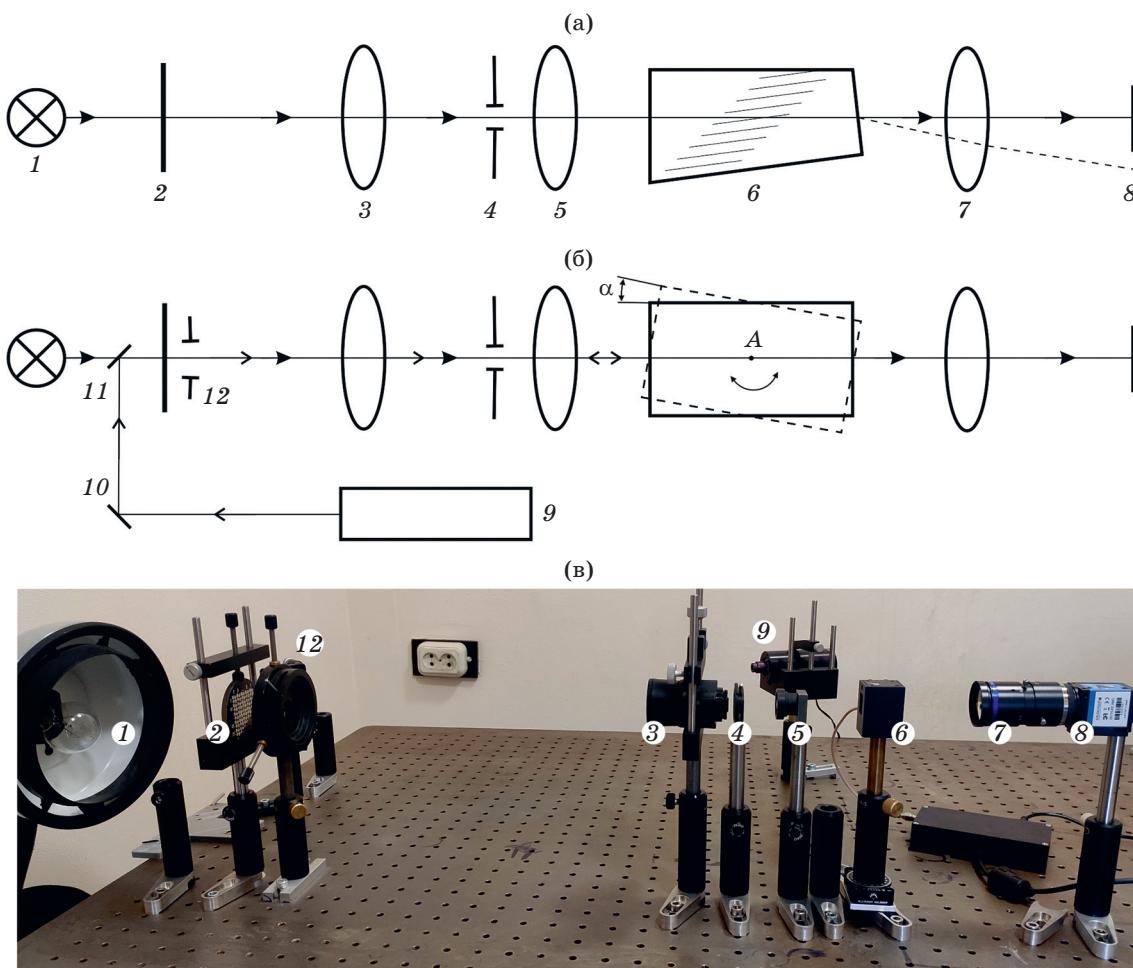


Рис. 2. Схема измерительного стенда в вертикальной (а) и горизонтальной (б) проекциях и его макет (в). — Лампа накаливания — 1, тестовый объект — 2, объектив, формирующий промежуточное изображение, — 3, диафрагма — 4, установленная в фокальной плоскости объектива 5, АО фильтр — 6, дифрагированное излучение фокусируется объективом 7 на матричном приемнике излучения 8. Для исходной юстировки АО ячейки использовались лазер 9, система зеркал 10–11 и диафрагмы 12 и 4. На рис. 2а пунктиром обозначен 0-й порядок дифракции. Точкой А обозначен центр верхней грани кристалла (рис. 2б)

Fig. 2. Scheme of the measuring stand in (a) vertical and (b) horizontal projections, and (v) its layout. (1) Incandescent lamp, (2) test object, (3) intermediate image forming lens, (4) diaphragm installed in the focal plane of the (5) lens, (6) acousto-optical tunable filter, diffracted radiation is focused by (7) lens on (8) matrix radiation receiver. (9) Laser, (10–11) a system of mirrors, and (12 and 4) diaphragms were used for the initial adjustment of the acousto-optical cell. The dotted line in Fig. 2a denotes the 0th order of diffraction.

Point A denotes the center of the crystal upper face (Fig. 2б)

по автоколлимационному блику от входной грани установить ее перпендикулярно лазерному пучку. Акустооптический фильтр установлен на поворотной платформе так, что его плоскость симметрии, совпадающая с полярной плоскостью АО кристалла, располагается вертикально. Он может разворачиваться в ортогональной, горизонтальной плоскости, соответствующей азимутальной плоскости АО кристалла, вокруг центра верхней грани кристалла (точка A). Поскольку через АО фильтр проходили параллельные пучки лучей, точное расположение оси вращения не являлось принципиальным, а смещение пучка, происходящее при повороте АО кристалла, компенсировалось сдвигом третьего объектива и фотоприемника.

В качестве тестовых объектов использовались штриховая и радиальная миры [18]. Серия измерений проводилась при углах разворота АО ячейки α от -8° до $+8^\circ$ с шагом 2° в диапазоне длин волн от 450 до 800 нм с шагом 10 нм.

Исследования выявили различие в качестве изображения в зависимости от пространственной ориентации штрихов: в вертикальном направлении (соответствующем полярной плоскости, p) происходит спектрально зависимое отклонение света, что приводит к некоторому размытию изображения. В горизонтальном (азимутальном, s) направлении этого не наблюдается. Для наглядности на рис. 3в, г приведены распределения интенсивности вдоль отрезков, отмеченных на рис. 3а.

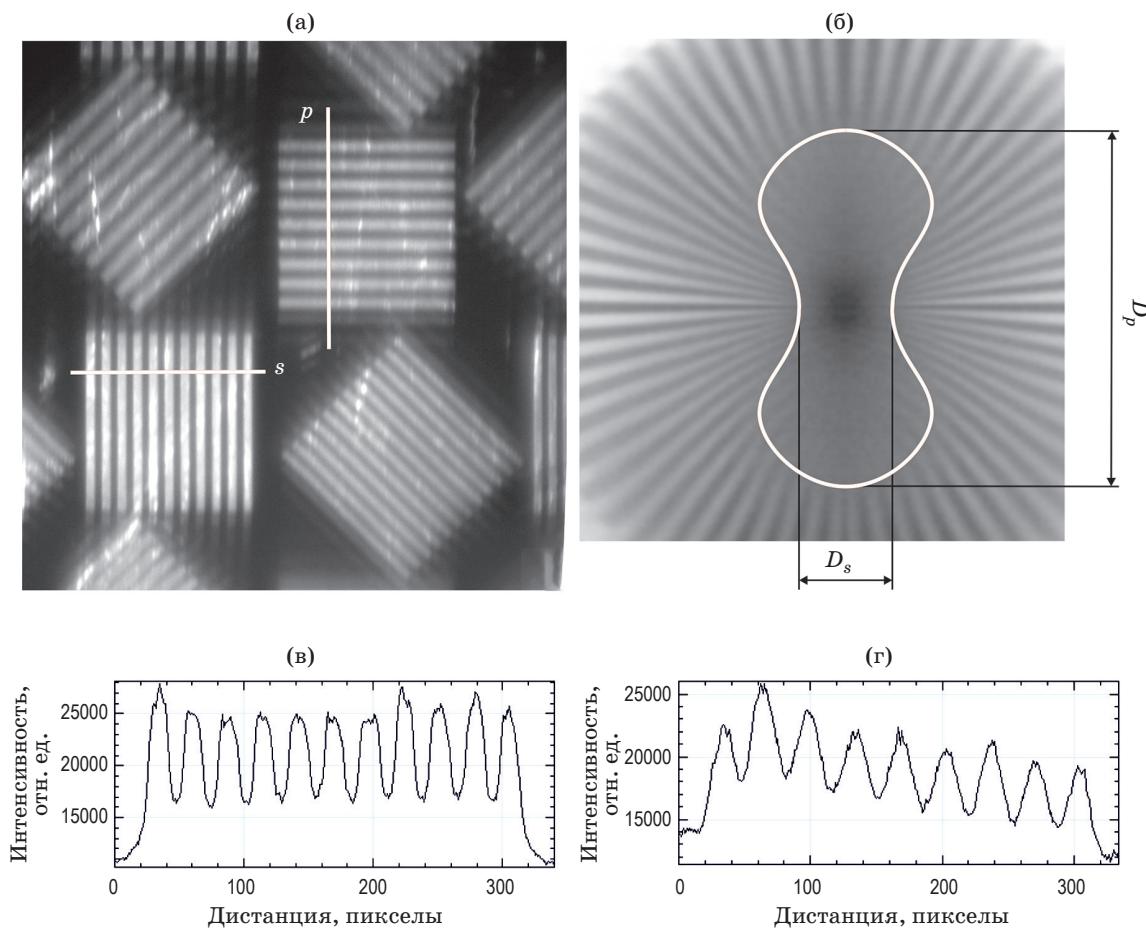


Рис. 3. Фрагменты изображений штриховой (а) и радиальной (б) миры и определенные из них распределения интенсивности в горизонтальном (азимутальном, s) (в) и вертикальном (соответствует полярной плоскости, p) (г) направлениях ориентации штрихов миры

Fig. 3. Fragments of images of the (a) dashed and (b) radial targets and the intensity distributions determined from them in (в) the horizontal (azimuth, s) and (г) vertical (corresponds to the polar plane, p) orientation directions of the dashed target

Видно, что контраст различается примерно в полтора раза.

Фрагмент изображения радиальной миры (рис. 3б) демонстрирует плавное изменение контраста. Кривая очерчивает условную границу исчезновения контрастного изображения штрихов миры, внутри которой контраст стирается. Величины D_p и D_s , характеризующие размеры этой фигуры в вертикальном и горизонтальном направлениях, в дальнейшем использовались для оценки разрешающей способности системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Иллюстрация качества изображений при разных значениях угла разворота АО ячейки α на длине волны 600 нм приведена на рис. 4. Вид-

на симметрия искажений. Оценка характеристик качества изображений проводилась по серии таких изображений при разных углах разворота и длинах волн излучения.

В частности, зависимость контраста K элементов штриховой миры, выделенных квадратом на рис. 4а (2), от угла разворота АО фильтра α имеет симметричный характер с медленным снижением по мере возрастания угла α (рис. 4а). Эта зависимость имеет аналогичный характер на всех длинах волн.

Разрешающая способность (в штрихах на миллиметр) рассчитывалась по формулам

$$R_p = N/(\pi D_p), \quad R_s = N/(\pi D_s),$$

где N — число штрихов миры, D_p и D_s обозначены на рис. 3б.

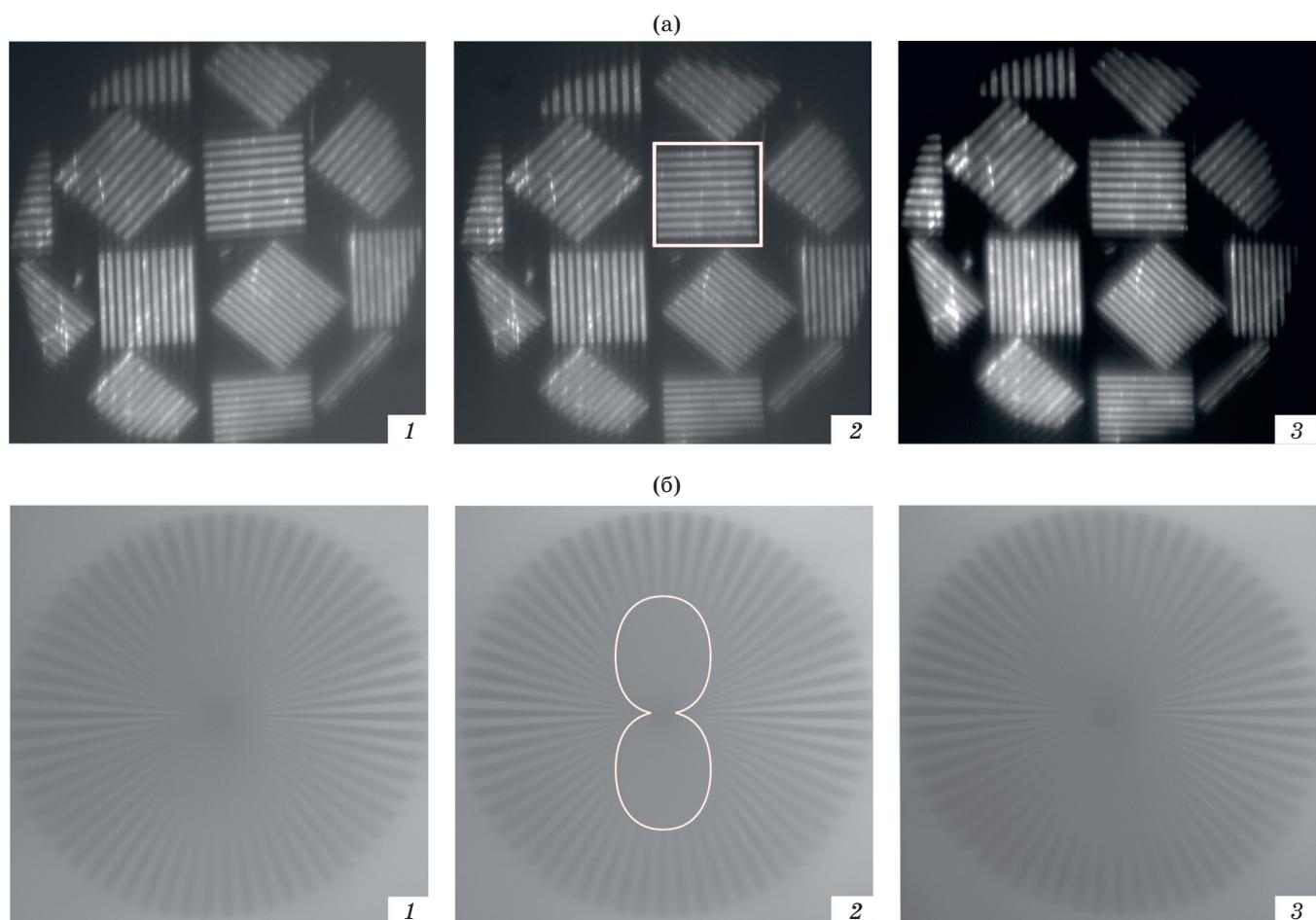


Рис. 4. Полученные изображения штриховой (а) и радиальной (б) миры при развороте на одинаковый угол α против (1) и по часовой стрелке (3) в сравнении с неповернутым изображением (2)

Fig. 4. The resulting images of the (a) dashed and (b) radial targets when rotated by the same angle α (1) counterclockwise and (3) clockwise in comparison with the (2) non-rotated image

Результаты расчета разрешающей способности
Resolution calculation results

λ , нм	R_p										R_s	
	α , град											
	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	$\alpha = 0^\circ$		
500	23,8	24,8	25,5	26,7	27,8	27,1	25,3	25,2	24,2	66,3		
600	20,9	21,1	21,5	22,1	22,3	22,0	21,5	21,0	20,9	64,2		
700	17,5	18,1	18,5	18,6	19,1	18,9	18,5	18,2	17,4	62,2		

Примечание. Результаты расчета разрешающей способности представлены в вертикальном (p) направлении в зависимости от угла разворота АО кристалла α и от длины волны. В горизонтальном (s) направлении приведены данные только для симметричного положения ($\alpha = 0$).

Note. The results of calculating the resolution are presented in the vertical (p) direction depending on the angle of rotation of the acousto-optical crystal α and on the wavelength. In the horizontal (s) direction, data are given only for the symmetrical position ($\alpha = 0$).

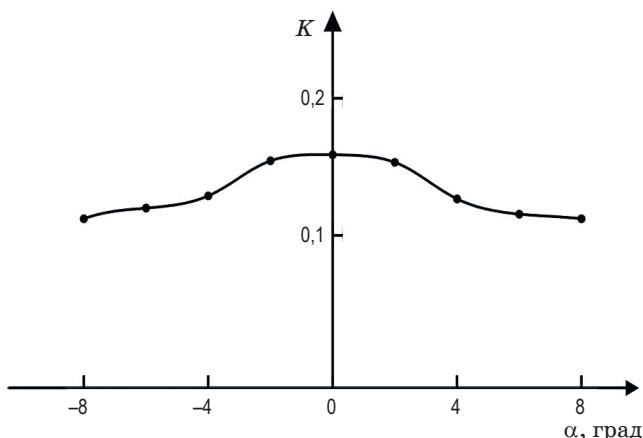


Рис. 5. Зависимость контраста изображения элемента миры от угла поворота АО кристалла

Fig. 5. Dependence of the image contrast of the target element on the angle of acousto-optical crystal rotation

В таблице представлены результаты расчета разрешающей способности в зависимости от ориентации штрихов (вертикального и горизонтального направлений), угла разворота АО кристалла и от длины волны излучения.

Из таблицы видно, что в вертикальном направлении разрешающая способность незначительно (8–15%) снижается при развороте АО ячейки. Качество изображения в целом выше на коротких длинах волн, но и падение разрешающей способности на коротких длинах волн более заметно. Разрешающая способность по горизонтали превышает вертикальную примерно в 3 раза.

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЯ

Полученные результаты, показывающие умеренное снижение основных характеристик при развороте оптических пучков относительно плоскости симметрии АО ячейки на угол $|\alpha| \leq 8^\circ$, обосновывают возможность построения стереоскопической спектральной регистрирующей системы рассмотренной конфигурации. Один из возможных вариантов построения такой установки с использованием входной разводящей призмы представлен на рис. 6.

Световой поток от светящегося или подсвечиваемого объекта разделяется призмой на два пучка, отклоненные на одинаковый угол относительно оси системы. Сфокусированные первым объективом внутри АО ячейки изображения объекта отображаются вторыми объективами на приемники излучения в двух каналах. Скрепленные поляризаторы пропускают только дифрагированное, изменившее поляризацию излучение. Пара спектральных изображений объекта с разных ракурсов позволяет построить стереоскопическое изображение на выбранной длине волны.

Такая конфигурация двухканальной спектральной регистрирующей системы весьма компактна. При стандартных размерах АО ячейки в схеме может быть обеспечен базис стереосъемки порядка 5–10 мм, что позволит использовать разрабатываемое устройство для наблюдения за близкорасположенными объектами, удаленными на расстояние до 1 м.

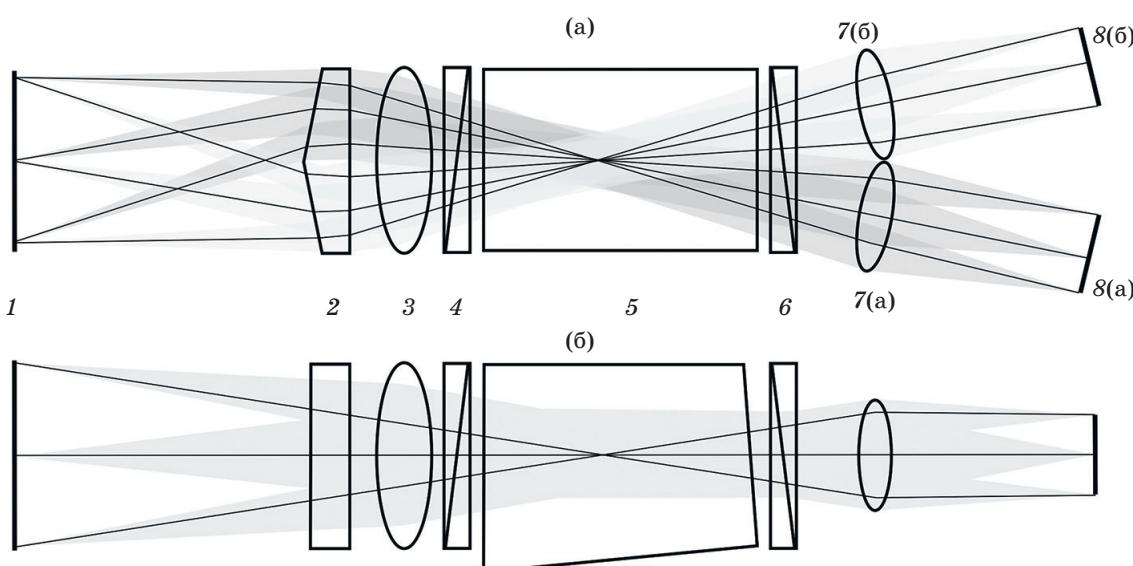


Рис. 6. Схема двухканальной спектральной регистрирующей системы для стереоскопии. Виды сверху — (а), сбоку — (б). Светящийся или подсвечиваемый объект — 1, призма — 2, объектив — 3, поляризаторы — 4, 6, АО ячейка — 5, объектив — 7, приемники излучения в двух каналах — 8

Fig. 6. Scheme of a two-channel spectral recording system for stereoscopy. (a) Top, (b) side views. (1) Luminous or illuminated object, (2) prism, (3) objective, (4, 6) polarizers, (5) acousto-optical cell, (7) objective, (8) radiation detectors in two channels

Для обеспечения больших дистанций съемки необходим больший базис стереосъемки, что потребует изменения оптической схемы: вместо призмы может использоваться, например, система зеркал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное экспериментальное исследование зависимости качества изображения оптической системы, содержащей широкоапертурный АО фильтр из парателлурита, от ориентации АО ячейки показало, что при ее повороте

в азимутальной плоскости на угол до $\pm 8^\circ$ снижение разрешающей способности не превосходит 15%, причем искажения носят симметричный характер. Это создает возможность построения компактной системы одновременного анализа трехмерных пространственных и спектральных свойств объектов на основе единого АО фильтра. Предложена оптическая схема такого устройства для анализа близкорасположенных объектов, которая может найти применение в машинном зрении, в биомедицинских исследованиях, для неразрушающего контроля и в других приложениях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Roth G.A., Tahiliani S., Neu-Baker N.M., et al. Hyperspectral microscopy as an analytical tool for nanomaterials // Wiley Interdiscip. Rev.: Nanomed. Nanobiotechnol. 2015. V. 7(4). P. 565–579. <https://doi.org/10.1002/wnan.1330>
- Dong X., Jakobi M., Wang S., et al. A review of hyperspectral imaging for nanoscale materials research // Appl. Spectrosc. Rev. 2019. V. 54(4). P. 285–305. <http://dx.doi.org/10.1080/05704928.2018.1463235>
- Goetz A.F.H. Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view // Remote Sensing of Environment. 2009. V. 113. P. S5–S16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2007.12.014>

REFERENCES

- Roth G.A., Tahiliani S., Neu-Baker N.M., et al. Hyperspectral microscopy as an analytical tool for nanomaterials // Wiley Interdiscip. Rev.: Nanomed. Nanobiotechnol. 2015. V. 7(4). P. 565–579. <https://doi.org/10.1002/wnan.1330>
- Dong X., Jakobi M., Wang S., et al. A review of hyperspectral imaging for nanoscale materials research // Appl. Spectrosc. Rev. 2019. V. 54(4). P. 285–305. <http://dx.doi.org/10.1080/05704928.2018.1463235>
- Goetz A.F.H. Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view // Remote Sensing of Environment. 2009. V. 113. P. S5–S16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2007.12.014>

4. Lu G., Fei B. Medical hyperspectral imaging: A review // *J. Biomed. Opt.* 2014. V. 19(1). P. 010901. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.19.1.010901>
5. Gutiérrez-Gutiérrez J.A., Pardo A., Real E., et al. Custom scanning hyperspectral imaging system for biomedical applications: Modeling, benchmarking, and specifications // *Sensors.* 2019. V. 19. № 7. P. 1692. <https://doi.org/10.3390/s19071692>
6. Halicek M., Fabelo H., Ortega S., et al. In-vivo and ex-vivo tissue analysis through hyperspectral imaging techniques: Revealing the invisible features of cancer // *Cancers.* 2019. V. 11. № 6. P. 756. <https://doi.org/10.3390/cancers11060756>
7. Dale L.M., Thewis A., Boudry C., et al. Hyperspectral imaging applications in agriculture and agro-food product quality and safety control: A review // *Appl. Spectrosc. Rev.* 2013. V. 48. № 2. P. 142–159. <https://doi.org/10.1080/05704928.2012.705800>
8. Daniel F., Mounier A., Pérez-Arantegui J., et al. Hyperspectral imaging applied to the analysis of Goya paintings in the Museum of Zaragoza (Spain) // *Microchem. J.* 2016. V. 126. P. 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.11.044>
9. Chang C.I. Hyperspectral imaging: Techniques for spectral detection and classification. N.Y.: Springer New York, 2003. 370 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9170-6>
10. Пожар В.Э., Мачихин А.С. Спектрально-поляризационные системы трехмерного технического зрения на основе акустооптической фильтрации // Светотехника. 2022. № 5. С. 32–35.
11. Batshev V., Machikhin A., Pozhar V. Quality assessment of stereoscopic spectral images obtained with use acousto-optic diffraction in a single TeO₂ crystal // Proc. Meetings on Acoustics. 2020. V. 38(1). P. 030021. <https://doi.org/10.1121/2.0001261>
12. Мачихин А.С., Батшев В.И., Пожар В.Э. и др. Акустооптический стереоскопический спектрометр полного поля для восстановления объемной структуры объектов в произвольных спектральных интервалах // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 6. С. 871–877. <http://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-6-871-877>
13. Naumov A.A., Gorevoy A.V., Machikhin A.S., et al. Estimating the quality of stereoscopic endoscopic systems // *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. № 1421. P. 012044. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1421/1/012044>
14. Волошинов В.Б., Москера Х.С. Широкоапertureное акустооптическое взаимодействие в двулучепреломляющих кристаллах // Опт. и спектроскоп. 2006. Т. 101. № 4. С. 677–684.
15. Епихин В.М., Калинников Ю.К. Компенсация спектрального дрейфа угла дифракции неколлинеарного акустооптического фильтра // ЖТФ. 1989. Т. 59(2). С. 160–163.
16. Machikhin A., Batshev V., Pozhar V. Aberration analysis of AOTF-based spectral imaging systems // *JOSA A.* 2017. V. 34(7). P. 1109–1113. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.34.001109>
17. Волошинов В.Б., Молчанов В.Я., Бабкина Т.М. Акустооптический фильтр неполяризованного электромагнитного излучения // ЖТФ. 2000. Т. 70 № 9. С. 93–98.
18. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Ч. 4. Оценка качества оптического изображения и измерение его характеристик. СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2005. 67 с.
4. Lu G., Fei B. Medical hyperspectral imaging: A review // *J. Biomed. Opt.* 2014. V. 19(1). P. 010901. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.19.1.010901>
5. Gutiérrez-Gutiérrez J.A., Pardo A., Real E., et al. Custom scanning hyperspectral imaging system for biomedical applications: Modeling, benchmarking, and specifications // *Sensors.* 2019. V. 19. № 7. P. 1692. <https://doi.org/10.3390/s19071692>
6. Halicek M., Fabelo H., Ortega S., et al. In-vivo and ex-vivo tissue analysis through hyperspectral imaging techniques: Revealing the invisible features of cancer // *Cancers.* 2019. V. 11. № 6. P. 756. <https://doi.org/10.3390/cancers11060756>
7. Dale L.M., Thewis A., Boudry C., et al. Hyperspectral imaging applications in agriculture and agro-food product quality and safety control: A review // *Appl. Spectrosc. Rev.* 2013. V. 48. № 2. P. 142–159. <https://doi.org/10.1080/05704928.2012.705800>
8. Daniel F., Mounier A., Pérez-Arantegui J., et al. Hyperspectral imaging applied to the analysis of Goya paintings in the Museum of Zaragoza (Spain) // *Microchem. J.* 2016. V. 126. P. 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.11.044>
9. Chang C.I. Hyperspectral imaging: Techniques for spectral detection and classification. N.Y.: Springer New York, 2003. 370 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9170-6>
10. Pozhar V.E., Machikhin A.S. Spectral-polarization systems of three-dimensional technical vision based on acousto-optic filtering // *Light and Eng.* 2022. V. 30. № 5. P. 37–42. <https://doi.org/10.33383/2022-088>
11. Batshev V., Machikhin A., Pozhar V. Quality assessment of stereoscopic spectral images obtained with use acousto-optic diffraction in a single TeO₂ crystal // Proc. Meetings on Acoustics. 2020. V. 38(1). P. 030021. <https://doi.org/10.1121/2.0001261>
12. Machikhin A.S., Batshev V.I., Pozhar V.E., Mazur M.M. Acousto-optical full-field stereoscopic spectrometer for 3D reconstruction in an arbitrary spectral interval // *Computer Opt.* 2016. V. 40. № 6. P. 871–877. <http://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-6-871-877>
13. Naumov A.A., Gorevoy A.V., Machikhin A.S., et al. Estimating the quality of stereoscopic endoscopic systems // *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. № 1421. P. 012044. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1421/1/012044>
14. Voloshinov V.B., Mosquera J.C. Wide-aperture acousto-optic interaction in birefringent crystals // *Opt. and Spectrosc.* 2006. V. 101. № 4. P. 635–641. <http://dx.doi.org/10.1134/S0030400X06100225>
15. Epikhin V.M., Kalinnikov Yu.K. Compensation de la dérive spectrale de l'angle de diffraction dans un filtre acousto-optique non-collinéaire [in Russian] // *Zurnal tehnicheskoy fiziki.* 1989. V. 59(2). P. 160–163. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&id=19782342>
16. Machikhin A., Batshev V., Pozhar V. Aberration analysis of AOTF-based spectral imaging systems // *JOSA A.* 2017. № 34(7). P. 1109–1113. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.34.001109>
17. Voloshinov V. B., Molchanov V. Y., Babkina T. M. Acousto-optic filter of nonpolarized electromagnetic radiation // *Technical Physics.* 2000. V. 45. P. 1186–1191.
18. Kirillovskii V.K. Optical measurements. P. 4. Optical image quality assessment and its characteristics measurement [in Russian]. St. Petersburg: ITMO State University Press, 2005. 67 p.

АВТОРЫ

Владислав Игоревич Батшев — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 26325278700; <https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>; batshev.vi@ntcup.ru

Витольд Эдуардович Пожар — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 6603147714; <https://orcid.org/0000-0003-0553-5410>; vitold@ntcup.ru

Олег Алексеевич Кананыхин — инженер-исследователь, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; <https://orcid.org/0009-0005-9723-3250>; Scopus ID: 57222349624; kananykhin.oa@ntcup.ru

AUTHORS

Vladislav I. Batshev — PhD (Engineering), Senior Researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 26325278700; <https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>; batshev.vi@ntcup.ru

Vitold E. Pozhar — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Full Professor, Department Head, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 6603147714; <https://orcid.org/0000-0003-0553-5410>; vitold@ntcup.ru

Oleg A. Kananykhin — Research Engineer, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; <https://orcid.org/0009-0005-9723-3250>; Scopus ID: 57222349624; kananykhin.oa@ntcup.ru

Статья поступила в редакцию 02.06.2023

Одобрена после рецензирования 06.08.2023

Принята к печати 26.09.2023

The article was submitted to the editorial office 02.06.2023

Approved after review 06.08.2023

Accepted for publication 26.09.2023