

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ СХЕМ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ИСТОЧНИКА НА БАЗЕ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА

А. С. БЕЛЯЕВА^{1,2}, Г. Э. РОМАНОВА²

¹Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
190000, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: belyaevalina@inbox.ru

²Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

Представлен анализ принципиальных оптических схем источника с возможностью спектральной перестройки. Ни один из существующих перестраиваемых источников не позволяет осуществлять одновременную перестройку числа спектральных линий, их положения и полуширины отдельной спектральной линии. Такая спектральная перестройка возможна при применении акустооптической фильтрации вместе с источником широкополосного излучения. При этом особенности акустооптического фильтра приводят к низкой эффективности системы (5 % и менее), что ограничивает применение такого источника, например, в спектральном анализе сильно поглощающих сред. Выбор принципиальной схемы системы сопряжения широкополосного источника с акустооптическим фильтром также влияет на эффективность работы схемы и определяет ее дополнительные характеристики — сложность компонентов и габариты. Результаты моделирования работы системы, выполненного с использованием программы автоматизированного проектирования оптических систем Zemax Optic Studio, хорошо согласуются с результатами эксперимента.

Ключевые слова: перестраиваемый по спектру источник, разработка оптических систем, коэффициент использования светового потока, акустооптический фильтр

Введение. При разработке оптического прибора с перестраиваемым спектром на основе акустооптического фильтра (АОФ) спектральная фильтрация осуществляется путем подачи сигнала с определенной функцией частотной модуляции (ФЧМ) на акустооптический кристалл, в котором возникает объемная дифракционная решетка. Подаваемые ФЧМ позволяют выделять различное количество спектральных линий и регулировать их полуширину [1]. Это является уникальной особенностью приборов на основе АОФ, которые имеют большой потенциал и могут применяться во многих областях промышленности, науки и медицины.

Вследствие особенностей АОФ системы на их основе имеют низкий коэффициент использования светового потока, поэтому целью настоящей статьи является анализ принципиальных оптических схем с точки зрения их эффективности.

Разработка прибора на базе АОФ требует особого внимания к специфическим характеристикам акустооптического кристалла, к которым можно отнести следующие: угловая апертура кристалла, как правило, составляет не более 5°, входная и выходная апертуры не превышают 10×10 мм [2—4]. При формировании пучка на входе в фильтр с расходимостью больше 5° ширина выделяемой спектральной линии и размер пятна рабочего порядка будут изменяться. Кроме того, в случае если пучки лучей падают на кристалл под значительными углами, внутри кристалла могут возникнуть переотражения, что также влияет на эффективность использования светового потока. Помимо этого, при разработке и моделировании необходимо учитывать такое свойство самого материала, как двулучепреломление, в результате чего луч разделяется на два с разными направлениями вектора поляризации [5].

Как правило, АОФ применяют для использования в широком спектральном диапазоне с поляризованным излучением. Для работы с неполяризованным излучением и выделения рабочего порядка дифракции применяют поляризаторы, устанавливаемые до и после АОФ (рис. 1, а) [4]. Это приводит к уменьшению полезного светового потока на 50 % [2], однако при работе без поляризаторов будут возникать сложности при выделении дифрагированных рабочих порядков (рис. 1, б) [6].

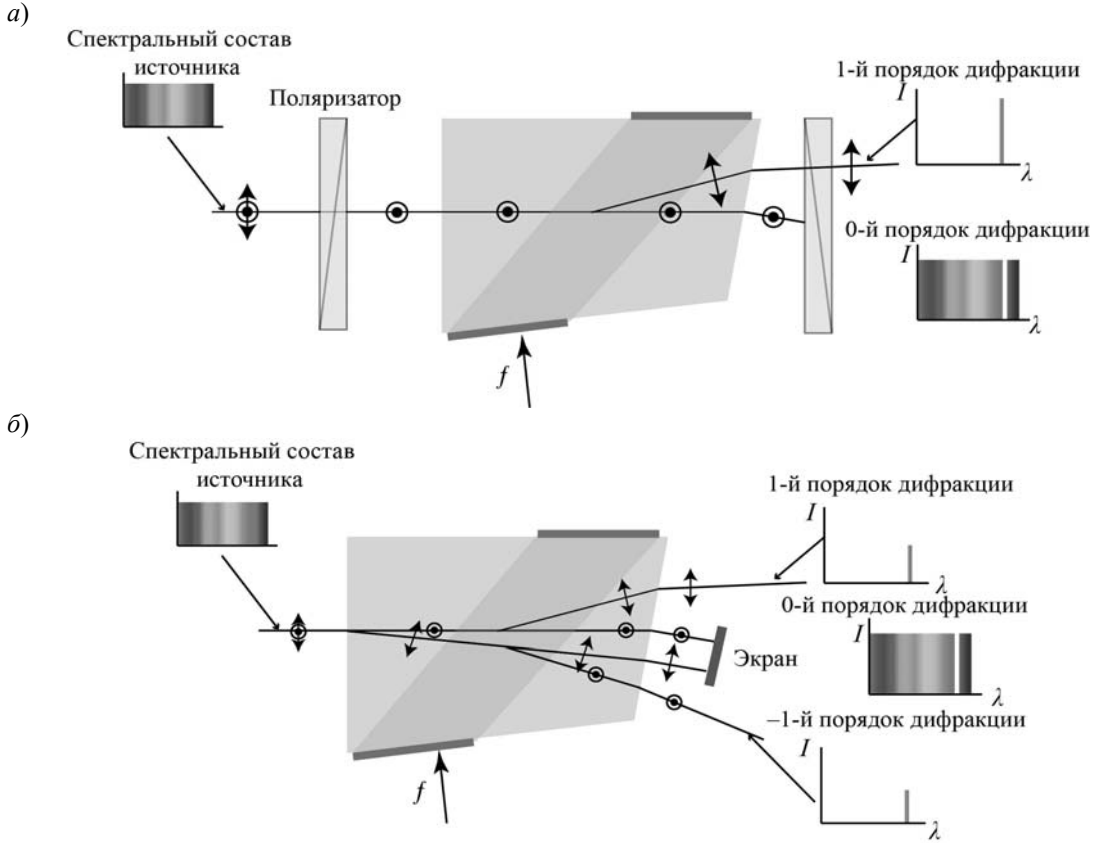


Рис. 1

При разработке систем с использованием АОФ выделяют следующие принципиальные схемы: конфокальный (рис. 2, а) и параллельный (рис. 2, б) ход луча [7]. Чаще всего используют конфокальную схему, в которой промежуточное изображение формируется внутри АОФ. В такой схеме АОФ вносит минимальный абберационный вклад [7, 8].

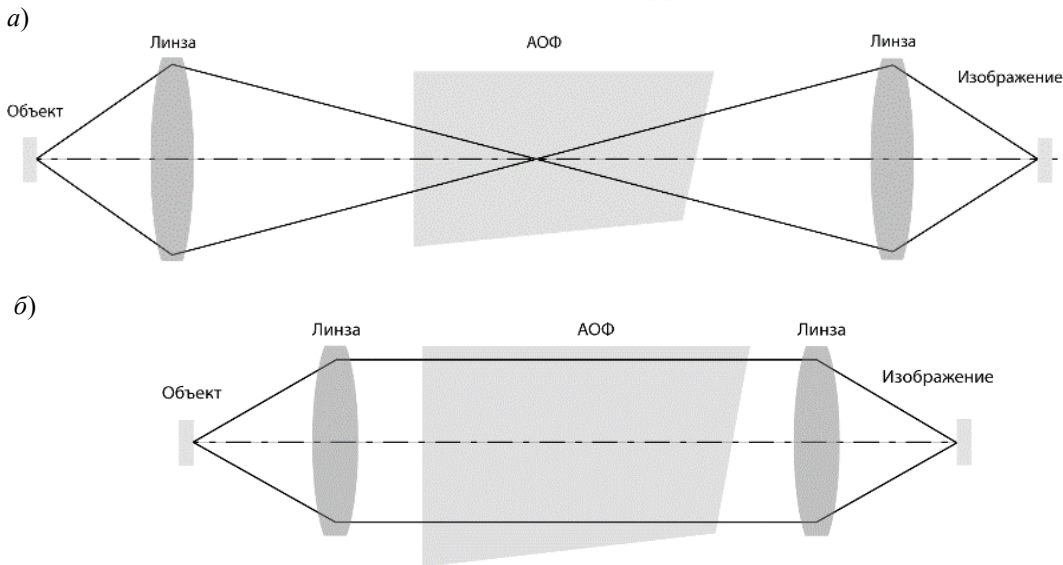


Рис. 2

При разработке перестраиваемого источника на базе АОФ наиболее важными являются два условия:

— эффективность ввода светового потока в ячейку зависит от степени согласования углов падения светового пучка с углами, в пределах которых эффективно происходит дифракция [9, 10]; этот параметр определяет прежде всего достижимую яркость источника и ширину спектральной линии [10];

— малые габариты разрабатываемого устройства.

Теоретические расчеты зачастую не дают возможности адекватно оценить эффективность использования светового потока, так как необходимо оценивать долю энергии, попадающую в диапазон эффективной дифракции, с учетом свойств реального источника (например, светодиода), имеющего сложное распределение светового потока в пространстве. Поэтому для выбора оптимального варианта необходимо выполнить моделирование системы и проверку эффективности ее работы с реальными компонентами.

Схема с конфокальным ходом луча. При конфокальном ходе луча изображение формируется в центре АОФ положительной линзой [11]. На рис. 3, а представлен рассчитанный вариант системы с конфокальным ходом луча в режиме последовательной трассировки луча. Оптимизация системы выполнялась с учетом характеристик АОФ: угловая апертура $2\omega = \pm 2,5^\circ$, размер промежуточного изображения 11 мм. При указанных ограничениях и использовании источника с размерами $1,6 \times 1,6$ мм длина оптической системы достигает 500 мм. При уменьшении длины оптической системы максимальный угол лучей относительно оптической оси $2\omega = \pm 2,5^\circ$ можно регулировать путем изменения размера диафрагмы, расположенной после светодиода. Однако уменьшение диаметра диафрагмы приводит к снижению коэффициента использования светового потока в системе. Параметры оптической системы, полученные по результатам оптимизации (фокусные расстояния линз f_1, f_2 , воздушные промежутки между компонентами оптической системы и диаметр диафрагмы), представлены на рис. 3, а.

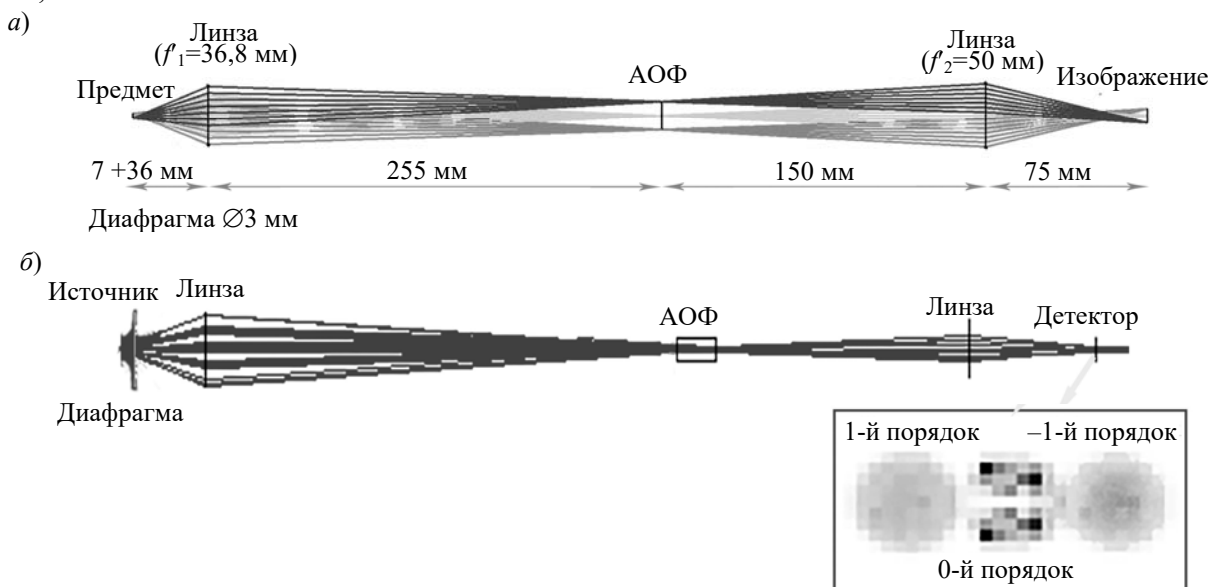


Рис. 3

Оценка энергетических характеристик системы выполнялась в режиме непоследовательной трассировки луча (рис. 3, б), эффективность определялась как доля энергии, попадающей на детектор размером 11×11 мм (соответствует размерам кристалла) в пределах угла $\omega = \pm 2,5^\circ$ (соответствует диапазону эффективной дифракции). При использовании рассматриваемой схемы на детектор в пределах указанного диапазона поступает только 3,5 % энергии.

Кроме того, важным параметром системы является возможность пространственного разделения порядков в плоскости изображения. Для решения данной задачи был разработан пользовательский объект, имитирующий акустооптическую дифракцию [12]. Такой пользовательский объект был встроен в систему с параметрами, полученными в режиме последовательной трассировки луча. По результатам моделирования можно предположить, что такая система позволяет пространственно разделить порядки дифракции.

Макет системы, построенной по конфокальной схеме, показан на рис. 4. В качестве источника излучения выбран светодиод CREE XD 16-LED, работающий от постоянного тока 0,15 А с напряжением 3 В. Положение АОФ выставлялось по пикам спектральной интенсивности рабочих порядков, соответствующим калиброванным значениям, с помощью спектрометра Ocean Optics Flame [13]. Мощность излучения измерялась в диапазоне длин волн $\lambda=450\div 650$ нм с шагом 100 нм измерителем мощности фирмы Thorlabs PM160 [14]. Для более точной оценки полезного сигнала, помимо темнового тока, снимались показатели засветки в помещении. Результаты измерения мощности излучения в рабочих порядках дифракции в системе с конфокальным ходом луча (P_1^k , P_{-1}^k) представлены в табл. 1.

Таблица 1

λ , нм	P_1^k , мВт	P_{-1}^k , мВт	$P_1^k + P_{-1}^k$, мВт
450	0,07	0,05	0,12
550	0,04	0,04	0,08
650	0,03	0,02	0,05

Как можно видеть на рис. 4, порядки дифракции разделяются между собой, однако из-за частичного рассеяния излучения нулевого порядка дифракции его диаметр увеличивается, что может привести к частичному переналожению нулевого и рабочих порядков. Это явление хорошо наблюдается при съемке с использованием поляризационной камеры [15]: на рис. 5, а приведена регистрируемая картина с углом вектора поляризации 0° (канал P0), на рис. 5, б — с углом вектора поляризации 90° (канал P90). Для того чтобы нулевой порядок дифракции не перекрывал рабочие порядки, необходимо уменьшить расходимость светового пучка.

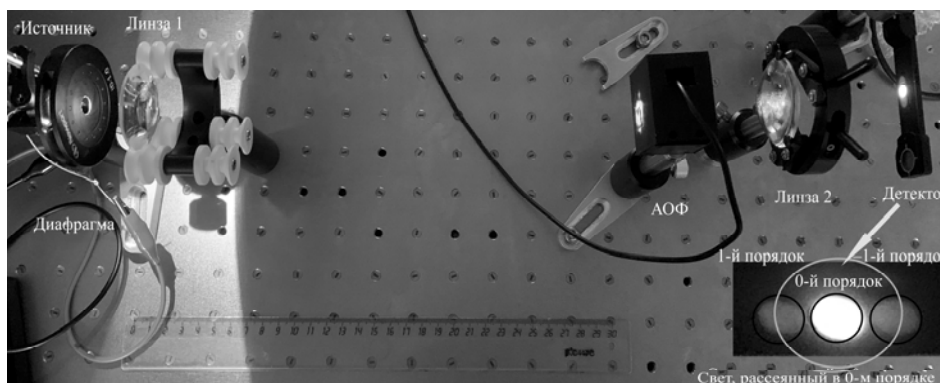


Рис. 4

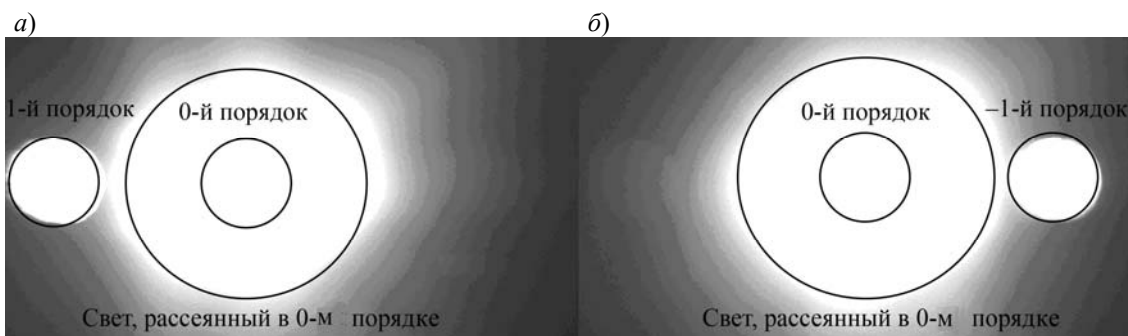


Рис. 5

Схема с параллельным ходом луча. Главными достоинствами схемы с параллельным ходом луча являются малые габариты и отсутствие диафрагм, которые не пропускают значительное количество светового потока. Согласно результатам выполненных ранее расчетов и анализа [16], наибольшую эффективность обеспечивает система с линзой на основе полного внутреннего отражения (ПВО). В данном случае при использовании светодиода CREE XD 16-LED можно обеспечить расходимость пучка после линзы $2\theta_{1/2} = 7^\circ$ при диаметре линзы 20 мм и длине 15 мм (рис. 6), а коэффициент использования светового потока в такой системе составляет до 30 %.

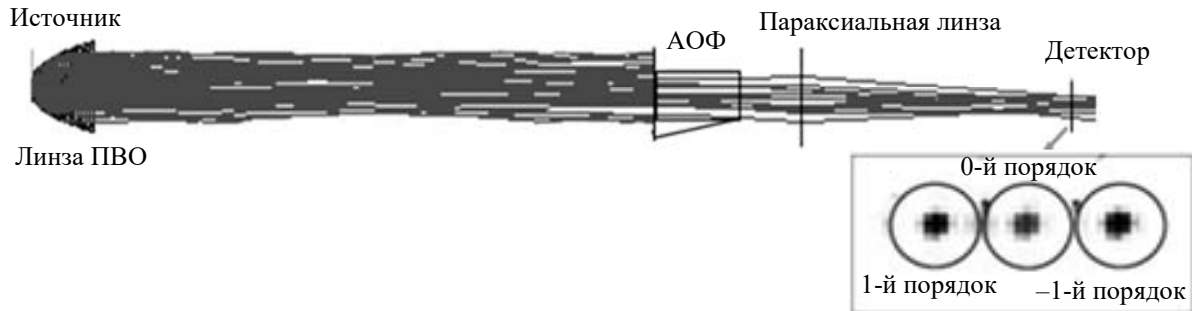


Рис. 6

Экспериментальная проверка эффективности системы с параллельным ходом луча проводилась на установке, в которой вместо упомянутой выше линзы [16] был подобран вариант готовой оптики фирмы Carclo Optics 10412 [17], обеспечивающей расходимость пучка $2\theta_{1/2} = 16,9^\circ$. Очевидно, из-за отличия характеристик линзы от расчетного варианта эффективность такой системы будет невелика — по результатам расчета эффективность использования светового потока составила 1,8 %. При таких параметрах расстояние между линзой и ячейкой существенно влияет на эффективность системы, что является ее главным недостатком. Необходимо также учесть требование о разделении рабочих порядков. С учетом этих особенностей АОФ необходимо расположить на расстоянии 130 мм от линзы, а длина всей системы должна составлять 250 мм (рис. 7).

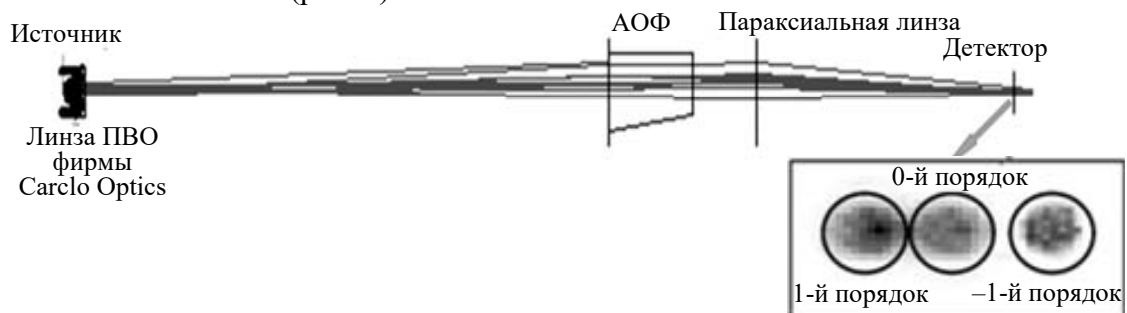


Рис. 7

Макет, собранный на основе схемы с параллельным ходом луча, показан на рис. 8.

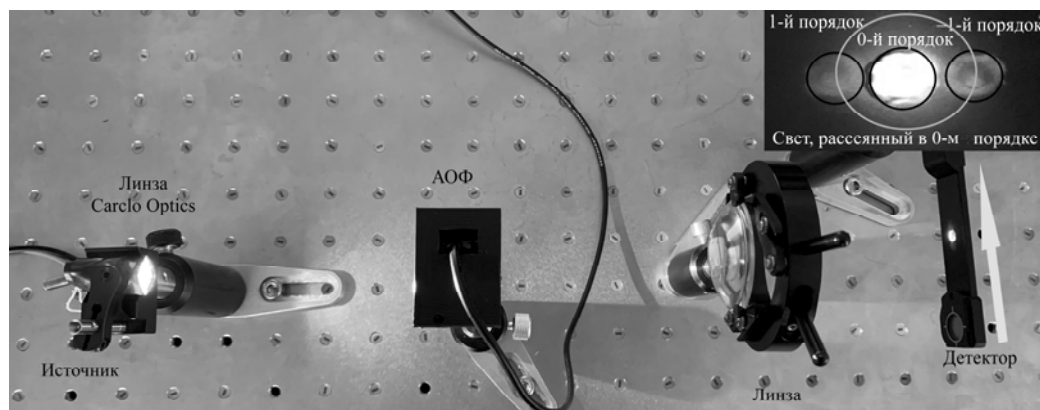


Рис. 8

Следует отметить, что в системе наблюдается неравномерность распределения энергии в пятне, обусловленная особенностями работы линзы на основе ПВО. Кроме того, нет возможности контролировать расходимость пучка отдельным оптическим элементом. Условия проведения эксперимента в данном случае были те же, что и в схеме с конфокальным ходом луча. Результаты измерения энергии в дифракционных порядках в системе с параллельным ходом луча (P_1^{II} , P_{-1}^{II}) представлены в табл. 2.

Таблица 2

λ , нм	P_1^{II} , мВт	P_{-1}^{II} , мВт	$P_1^{\text{II}} + P_{-1}^{\text{II}}$, мВт
450	0,03	0,03	0,06
550	0,02	0,02	0,04
650	0,01	0,01	0,02

Заключение. Проанализированы принципиальные оптические схемы с точки зрения эффективности их сопряжения с АОФ. Применение пользовательского объекта АОФ позволило определить предполагаемые положения порядков дифракции на детекторе с целью подтверждения возможности их пространственного разделения. Полученные результаты позволяют утверждать, что данные теоретического анализа согласуются с результатами эксперимента. Таким образом, наиболее эффективной системой, с точки зрения использования светового потока, является система с параллельным ходом луча с индивидуально разработанной линзой, обеспечивающей минимальные углы падения светового пучка на акустооптическую ячейку.

Авторы выражают благодарность Научно-технологическому центру уникального приборостроения РАН за предоставленное оборудование, а также ведущему программисту Университета ИТМО Т. И. Жуковой за помощь в разработке пользовательского объекта АОФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Machikhin A. S. et al. Acousto-optical tunable filter for a swept light source with variable transmission function // Proc. SPIE. 2018. Vol. 10815. P. 108150L. DOI:10.1117/12.2502756.
2. Hall H. et al. Design of a wavelength-tunable light source using an acousto-optic tunable filter // Novel Optical Systems Design and Optimization X; Intern. Society for Optics and Photonics. 2007. Vol. 6668. P. 66680W. DOI: 10.1117/12.749945.
3. Vila-Francés J. et al. Analysis of acousto-optic tunable filter performance for imaging applications // Optical Engineering. 2010. Vol. 49, N 11. P. 113203. DOI: 10.1117/1.3509243.
4. Wang J. et al. Overall design technology of hyperspectral imaging system based on AOTF // Intern. Symp. on Optoelectronic Technology and Application 2014: Imaging Spectroscopy, and Telescopes and Large Optics; Intern. Society for Optics and Photonics. 2014. Vol. 9298. P. 929804.
5. Calpe-Maravilla J. et al. 400–to 1000–nm imaging spectrometer based on acousto-optic tunable filters // J. of Electronic Imaging. 2006. Vol. 15, N 2. P. 023001. DOI: 10.1117/12.565587.
6. Vila-Francés J. et al. Improving the performance of acousto-optic tunable filters in imaging applications // J. of Electronic Imaging. 2010. Vol. 19, N 4. P. 043022. DOI: doi.org/10.1117/1.3518139.
7. Machikhin A. S., Batshev V. I., Pozhar V. E. Aberration analysis of AOTF-based spectral imaging systems // JOSA A. 2017. Vol. 34. P. 1109–1113. DOI: 10.1364/JOSAA.34.001109.
8. Suhre D. R., Denes L. J., Gupta N. Telecentric confocal optics for aberration correction of acousto-optic tunable filters // Applied Optics. 2004. Vol. 43, N 6. P. 1255–1260. DOI: 10.1364/AO.43.001255.
9. Зубринов И. И., Сапожников В. К., Шелопут Д. В. Широкополосный акустооптический фильтр // Журн. технической физики. 1997. Т. 67, № 6. С. 50–53.
10. Балакиев В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 279 с.

11. *Batshev V. I. et al.* Design of an optical system for coupling a wideband light source with an acousto-optical tunable filter // 23rd Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics; Intern. Society for Optics and Photonics. 2017. Vol. 10466. P. 1046639. DOI: 10.1117/12.2286647.
12. *Beliaeva A. S. et al.* Computer modelling of acousto-optical diffraction in optical systems design // Optical Design and Testing X; Intern. Society for Optics and Photonics. 2020. Vol. 11548. P. 1154814. DOI: 10.1117/12.2572919.
13. Малогабаритные спектрометры FLAME [Электронный ресурс]: <<https://oceanoptics.ru/spectrometers/333-flamespectr.html>>, 12.06.2021.
14. Беспроводные измерители мощности с датчиком [Электронный ресурс]: <<https://azimp.ru/thorlabs/wireless-power-meter-with-sensor/>>, 12.06.2021.
15. Further information about the pixel-based polarizer [Электронный ресурс]: <<https://www.alliedvision.com/en/products/featured-products/application-note-pixel-based-polarizer.html>>, 12.06.2021.
16. *Romanova G. E., Batshev V. I., Beliaeva A. S.* Design of an optical illumination system for a tunable source with acousto-optical filtering // J. of Optical Technology. 2021. Vol. 88, N 2. P. 66—71. DOI: 10.1364/JOT.88.000066.
17. 10.0mm Narrow Spot Plain TIR (10412) [Электронный ресурс]: <<http://www.carlo-optics.com/optic-10412?opticfamily=10mm>>, 12.06.2021.

Сведения об авторах

Алина Сергеевна Беляева

— аспирант; СПбГУАП, кафедра конструирования и технологий электронных и лазерных средств, ассистент; Университет ИТМО; инженерно-исследовательский факультет; E-mail: belyaevalina@inbox.ru

Галина Эдуардовна Романова

— канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; инженерно-исследовательский факультет; E-mail: romanova_g_e@mail.ru

Поступила в редакцию
16.06.2021 г.

Ссылка для цитирования: Беляева А. С., Романова Г. Э. Анализ эффективности принципиальных схем перестраиваемого источника на базе акустооптического фильтра // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 11. С. 933—940.

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF SCHEMATIC DIAGRAMS OF A TUNABLE SOURCE BASED ON AN ACOUSTO-OPTIC FILTER

A. S. Belyaeva^{1,2}, G. E. Romanova²

¹St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 190000, St. Petersburg, Russia
E-mail: belyaevalina@inbox.ru

²ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

Principle optical schematics of the source with the possibility of spectral adjustment are analyzed. None of the existing tunable sources allows simultaneous rearrangement of the number of spectral lines, their position, and the half-width of a separate spectral line. Such spectral rearrangement is possible with the use of acousto-optic filtration together with a broadband radiation source. At the same time, the features of the acousto-optic filter cause the system low efficiency (5% or less), which limits the use of such a source, for example, in the spectral analysis of highly absorbing media. The choice of a schematic diagram of a broadband source interface system with an acousto-optic filter also affects the efficiency of the circuit and determines its additional characteristics - the complexity of components and dimensions. Results of simulation of the system operation performed using the optical design software Zemax Optical Studio, are reported to be in good agreement with the results of the experiment.

Keywords: spectrum tunable source, development of optical systems, light flux utilization factor, acousto-optic filter

REFERENCES

1. Machikhin A.S. et al. *Proc. SPIE*, 2018, vol. 10815, pp. 108150L, DOI:10.1117/12.2502756.
2. Hall H. et al. *Novel Optical Systems Design and Optimization X. International Society for Optics and Photonics*, 2007, vol. 6668, p. 66680W, DOI: 10.1117/12.749945.
3. Vila-Francés J. et al. *Optical Engineering*, 2010, no. 11(49), pp. 113203, DOI: 10.1117/1.3509243.

4. Wang J. et al. *International Symposium on Optoelectronic Technology and Application 2014: Imaging Spectroscopy; and Telescopes and Large Optics*, International Society for Optics and Photonics, 2014, vol. 9298, pp. 929804.
5. Calpe-Maravilla J. et al. *Journal of Electronic Imaging*, 2006, no. 2(15), pp. 023001, DOI: 10.1117/12.565587.
6. Vila-Francés J. et al. *Journal of Electronic Imaging*, 2010, no. 4(19), pp. 043022, DOI: doi.org/10.1117/1.3518139.
7. Machikhin A.S., Batshev V.I., Pozhar V.E. *JOSA A*, 2017, vol. 34, pp. 1109–1113, DOI: 10.1364/JOSAA.34.001109.
8. Suhre D.R., Denes L.J., Gupta N. *Applied Optics*, 2004, no. 6(43), pp. 1255–1260, DOI: 10.1364/AO.43.001255.
9. Zubrinov I.I., Sapozhnikov V.K., Sheloput D.V. *Technical Physics*, 1997, no. 6(67), pp. 50–53. (in Russ.)
10. Balakshy V.I., Parygin V.N., Chirkov L.E. *Fizicheskiye osnovy akustooptiki* (Physical Foundations of Acousto-Optics), Moscow, 1985, 279 p. (in Russ.)
11. Batshev V.I. et al. *23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, International Society for Optics and Photonics, 2017, vol. 10466, pp. 1046639, DOI: 10.1117/12.2286647.
12. Beliaeva A.S. et al. *Optical Design and Testing X. International Society for Optics and Photonics*, 2020, vol. 11548, pp. 1154814, DOI: 10.1117/12.2572919.
13. <https://oceanoptics.ru/spectrometers/333-flamespectr.html>. (in Russ.)
14. <https://azimp.ru/thorlabs/wireless-power-meter-with-sensor/>. (in Russ.)
15. *Further information about the pixel-based polarizer*, <https://www.alliedvision.com/en/products/featured-products/application-note-pixel-based-polarizer.html>.
16. Romanova G.E., Batshev V.I., Beliaeva A.S. *Journal of Optical Technology*, 2021, no. 2(88), pp. 66–71, DOI: 10.1364/JOT.88.000066.
17. *10.0mm Narrow Spot Plain TIR (10412)*, <http://www.carclo-optics.com/optic-10412?opticfamily=10mm>.

Data on authors

- Alina S. Belyaeva** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Design and Technology of Electronic and Lazer Devices, Assistant, ITMO University, Faculty of Engineering Research; E-mail: belyaevalina@inbox.ru
- Galina E. Romanova** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Engineering Research; E-mail: romanova_g_e@mail.ru

For citation: Belyaeva A. S., Romanova G. E. Analysis of the effectiveness of schematic diagrams of a tunable source based on an acousto-optic filter. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 11. P. 933–940 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-11-933-940