

## ИЗОБРАЖАЮЩИЙ СПЕКТРОМЕТР НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОГО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ФИЛЬТРА

Р.В. Скиданов<sup>1,2</sup>, А.А. Морозов<sup>1,2</sup>, А.П. Порфирьев<sup>1,2</sup>, В.А. Бланк<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,

<sup>2</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

### Аннотация

Рассмотрены свойства спектрального фильтра Edmund Optics (400–700 нм). Показано, что функция пропускания фильтра далека от идеальной формы, которую приводит производитель. Рассмотрен спектрометр на основе этого фильтра, показано, что, несмотря на не слишком хорошую функцию спектрального пропускания фильтра, удаётся добиться ошибки формирования спектра не более 13 %.

*Ключевые слова:* изображающий спектрометр, спектральный фильтр, перестраиваемый лазер.

*Цитирование:* Скиданов, Р.В. Изображающий спектрометр на основе дискретного интерференционного фильтра / Р.В. Скиданов, А.А. Морозов, А.П. Порфирьев, В.А. Бланк // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 5. – С. 716-720. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-716-720.

### Введение

В последнее время происходит популяризация новых методов, позволяющих получать и анализировать спектроскопическую информацию об объекте с пространственным разрешением и обеспечивающих получение для каждой малой области (точки) двумерного изображения объекта на входной апертуре прибора оптического спектра. Такие методы в научной литературе называются гиперспектральными, трёхмерные матрицы, содержащие зависимость интенсивности света от двух пространственных и спектральной координат, – гиперспектральными изображениями (ГСИ) [1].

Однако оптические схемы большинства современных спектрометров содержат дисперсионный элемент, такой как дифракционная решётка, что подразумевает использование первого порядка дифракции для разложения изображения в спектр, при этом приходится формировать спектральное изображение за счёт сканирования объекта щелевой диафрагмой. Такой подход оправдан, например, для задач дистанционного зондирования Земли, но для множества прикладных задач такие спектрометры слишком сложны, обладают слишком большой массой и просто неудобны в использовании. Для формирования гиперспектральных изображений в полевых условиях нужен относительно компактный гиперспектрометр. При этом желательно, чтобы гиперспектральные изображения были приемлемого качества. Наиболее удобны для этих целей гиперспектрометры на основе узкополосных спектральных фильтров [2–7]. Такие фильтры имеют функцию пропускания, которая смещается в спектральном диапазоне при смещении вдоль фильтра [2, 3, 6, 7] или является настраиваемой характеристикой фильтра [5]. По сути отличие гиперспектрометра от обычной фотокамеры состоит в наличии такого фильтра над светочувствительной матрицей. Таким образом, в формируемое изображение практически не вносятся дополнительных аберрационных искажений. Однако в большинстве работ по

фильтровым спектрометрам практически не уделяется внимание точности построения спектральных распределений и качеству используемых спектральных фильтров.

В настоящей статье рассматриваются свойства такого спектрального фильтра и созданного на его основе гиперспектрометра.

### 1. Исследование свойств спектрального фильтра

Узкополосный спектральный фильтр с функцией пропускания, которая менялась в диапазоне от 400 нм до 700 нм с шагом 5 нм, был закуплен у фирмы Edmund Optics. Фильтр имеет геометрические размеры 60×12 мм. Всего на фильтре 60 отдельных зон, в каждой из которых узкая функция пропускания шириной около 10 нм (рис. 1), таким образом, геометрическая ширина зоны с одной функцией пропускания составляет 1 мм.

Чтобы проверить это утверждение производителя, была проведена серия измерений функции спектрального пропускания этого фильтра. Для этого были использованы перестраиваемая лазерная система NT242 и камера. Длина волны лазерного излучения менялась от 362 нм до 743 нм с шагом 1 нм. Некоторое расширение спектрального диапазона по сравнению с диапазоном пропускания фильтра было сделано, чтобы убедиться в отсутствии пропускания вне видимого диапазона. Зависимость коэффициента пропускания фильтра от длины волны представлена на рис. 1.

Как видно из рис. 1, фильтр имеет несколько недостатков:

- на любом участке фильтра, кроме области пропускания, заявленной производителем фильтра, присутствует небольшое пропускание во всех остальных областях, которые могут вносить весьма существенный вклад в формирование изображения на светочувствительной матрице за фильтром;

- форма функции пропускания сильно меняется от зоны к зоне;

– ширина функции пропускания по полуспаду больше шага фильтра, т.е. функции пропускания в соседних зонах перекрываются;

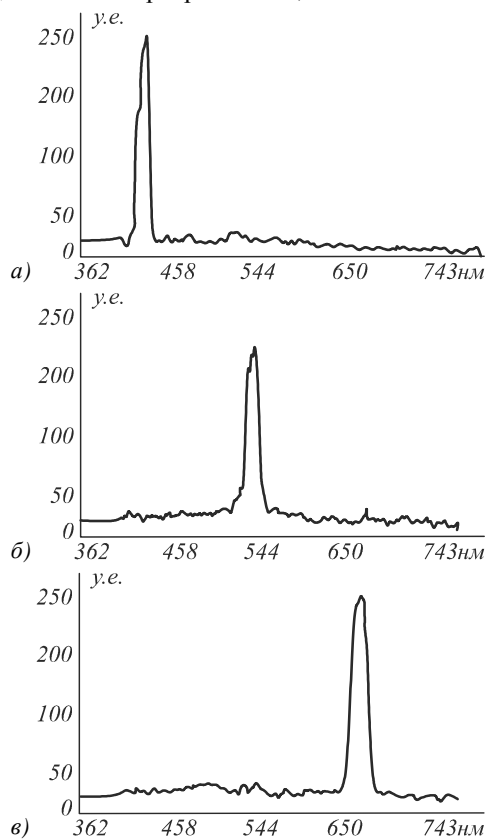


Рис. 1. Функция пропускания фильтра на участке, соответствующем пропусканию на 440 нм (а), на участке, соответствующем пропусканию на 560 нм (б), на участке, соответствующем пропусканию на 680 нм (в)

– ширина функции пропускания по полуспаду меняется от 11 нм в коротковолновой области до почти 20 нм в длинноволновой.

Исходя из замеченных недостатков, сказать, насколько качественные спектральные изображения удастся получить на спектрометре с таким фильтром, можно будет только после проведения экспериментов со спектрометром.

## 2. Конструкция спектрометра на основе спектрального фильтра

Ввиду простоты конструкции спектрометра ограничимся фотографией спектрометра без оптической схемы. На рис. 2 представлена фотография спектрометра с обозначением основных частей.

Следует заметить, что в рабочем состоянии представленная на рис. 2 конструкция закрыта светонепроницаемым кожухом, который исключает возможность попадания света на светочувствительную матрицу, минуя объектив. Для корректной работы фильтра использовался сильно диафрагмированный объектив с диафрагменным числом 16 и фокусным расстоянием 54 мм. Спектральный фильтр длиной 60 мм смещается с помощью шагового двигателя перед светочувствительной матрицей размером 12 мм. Т.к. каждая часть

изображения должна пройти через все 60 областей с разным спектральным пропусканием, то полная величина перемещения составляет 72 мм. Скорость перемещения фильтра можно менять, при максимальной скорости перемещения процесс сканирования изображения занимает около 70 с. После процесса сканирования полученные изображения разрезались по зонам, соответствующим разным функциям пропускания (рис.3), а затем из фрагментов склеивались спектральные компоненты изображений (рис. 4).

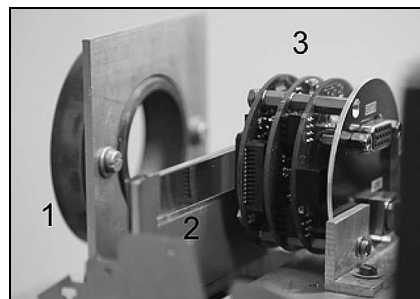


Рис. 2. Фотография спектрометра на основе спектрального фильтра: 1 – объектив, 2 – спектральный фильтр, 3 – светочувствительная матрица

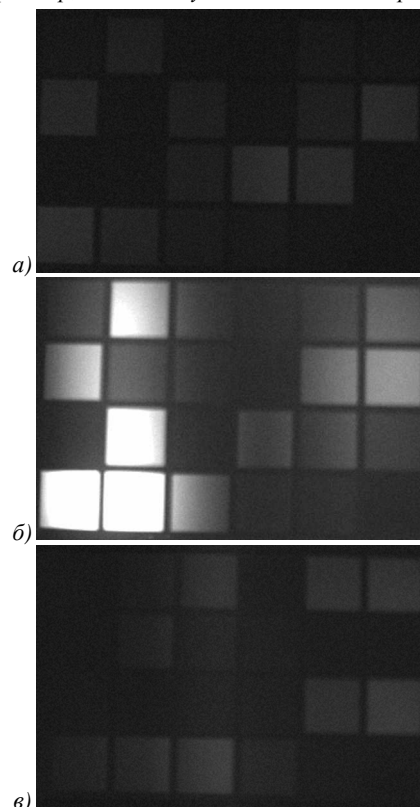


Рис. 3. Примеры полученного изображения после спектрального фильтра: (а) в крайнем правом положении (красная область), (б) среднее положение (зелёная область), (в) в крайнем левом положении (фиолетовая область)

Как видно из рис. 3, изображения по краям спектрального диапазона фильтра намного темнее, чем изображение из центра, связано это с малой чувствительностью матрицы, осветлять же изображения за счёт изменения коэффициента усиления нельзя для получения правильного спектрального распределения.

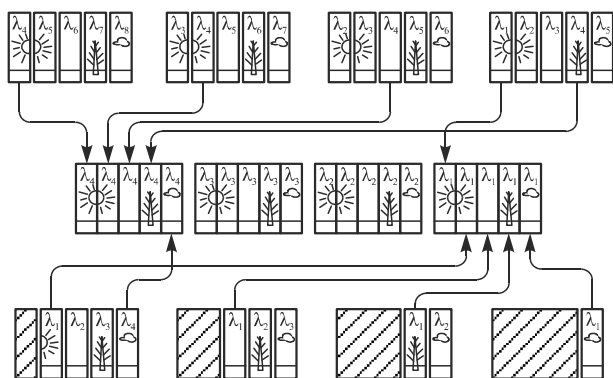


Рис. 4. Схема склейки спектральных компонент из исходных изображений

После склейки получается набор изображений, каждое из которых содержит только одну длину волны (рис. 5).

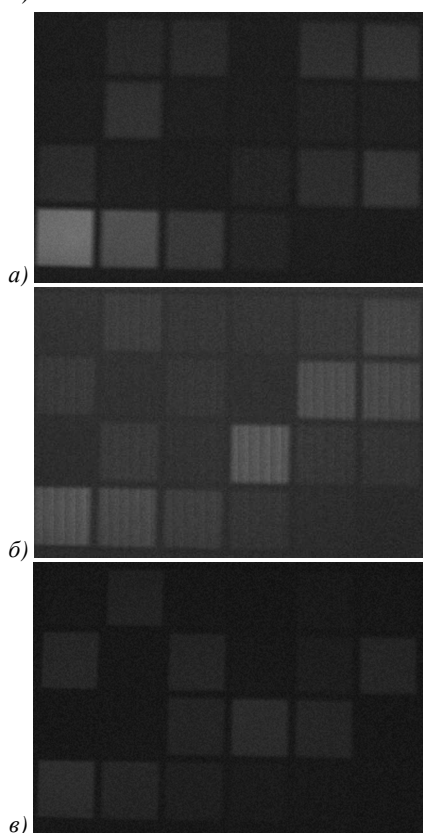


Рис. 5. Примеры спектральных компонент после склейки: (а) длина волны 650 нм, (б) длина волны 550 нм, (в) длина волны 450 нм

Как видно из рис. 5, в результате склейки фрагментов полученных на спектрометре изображений качество полученных компонент довольно высокое. Но для точного определения погрешности построения спектров гиперспектрометром необходимо проведение экспериментов с источниками света, для которых точно известно спектральное распределение.

### 3. Измерение спектра белого и цветных светодиодов

В работе [8] для проверки спектрометра на основе дифракционной линзы были использованы бе-

лый, зелёный и красный светодиоды, спектры которых были точно получены на спектрометре MS7501. Эти же диоды используются в качестве тест-объектов и в этой работе. На рис.6 представлены компоненты спектрального изображения, соответствующие длинам волн 570 нм (рис. 6а), 600 нм (рис. 6б), 640 нм (рис. 6в).

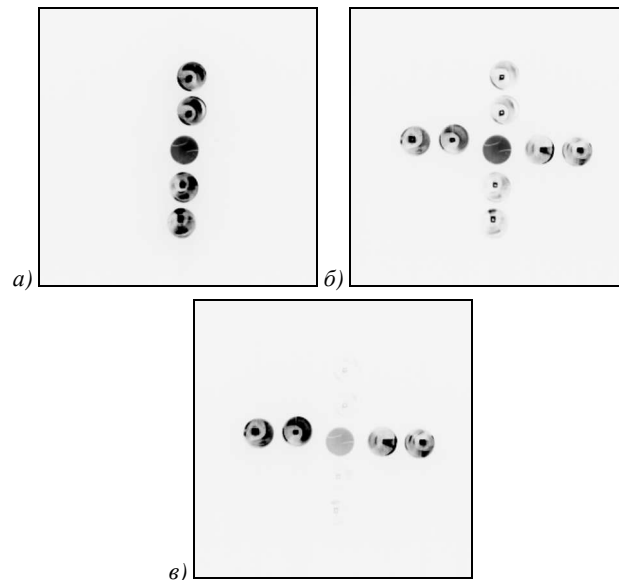


Рис. 6. Компоненты спектрального изображения, соответствующие длинам волн 570 нм (а), 600 нм (б), 640 нм (в)

На основе полного набора компонент спектрального изображения были получены спектры белого светодиода (в центре на рис. 6), зелёного светодиода (вертикальный ряд на рис. 6), красного светодиода (горизонтальный ряд на рис. 6).

На рис. 7а представлен полный спектр белого светодиода, полученный на фильтровом спектрометре (сплошная линия) в сравнении со спектром, полученным на спектрометре MS7501 (пунктирная линия). На рис. 7б представлен спектр красного светодиода, полученный на фильтровом спектрометре в сравнении с эталонным спектром, полученным на спектрометре MS7501. На рис. 7в представлен спектр зелёного светодиода, полученный на фильтровом спектрометре в сравнении с эталонным спектром, полученным на спектрометре MS7501.

На основе полученных спектральных распределений и сравнения их с эталонными распределениями в диапазоне от 400 нм до 700 нм были получены значения ошибки (среднеквадратичное отклонение) измерения спектрального распределения для фильтрового спектрометра. Для спектра белого светодиода такая ошибка составила 11 %, для зелёного – 13 %, для красного – 9 %. Такая величина вполне позволяет использовать гиперспектрометр на основе спектрального фильтра, например в задаче анализа биологических тканей. Как следует из [10] при гиперспектральном анализе биологических образцов мелкие детали спектра не принципиальны, важна лишь его общая форма.

### Заключение

Исследована работа изображающего фильтрового гиперспектрометра. Проведённое сравнение на основе измерения спектра белого и цветных светодиодов в исследуемом спектрометре и высокоточном промышленном спектрометре MS 7501 показало, что, несмотря на неидеальную функцию пропускания фильтра, в целом погрешность формирования спектрального распределения невелика и составляет не более 13 %.

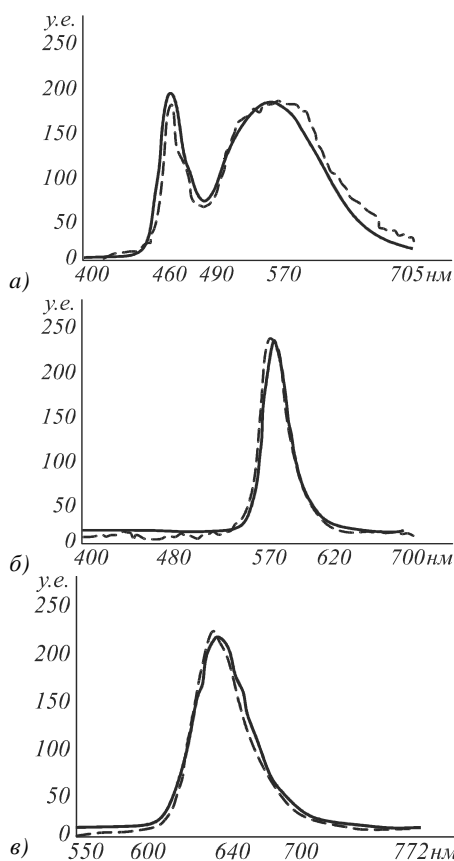


Рис. 7. Спектры белого (а), красного (б), зелёного (в), полученные на фильтровом спектрометре (сплошная линия) в сравнении со спектрами, полученными на спектрометре MS7501 (пунктирная линия)

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения программы повышения конкурентоспособности (соглашение №СИЗГ/21-2014 от 21 января 2015 г.).

### Литература

1. **Воропай, Е.С.** Дисперсионный гиперспектрометр с реконфигурируемой входной апертурой на основе микрозеркальной матрицы / Е.С. Воропай, И.М. Гулис, А.Г. Купреев [и др.] // Вестник БГУ. – 2009. – Сер. 1, № 3. – С. 31-35. – ISSN 0321-0367.
2. **Tack, N.** A compact, high-speed, and low-cost hyperspectral imager / N. Tack, A. Lambrechts, S. Soussan, L. Haspeslagh // Proceeding of SPIE. – 2012. – Vol. 8266. – P. 82660Q1-13.
3. **Geelen, B.** A snapshot multispectral imager with integrated, tiled filters and optical duplication / B. Geelen, N. Tack, A. Lambrechts // Proceeding of SPIE. – 2013. – Vol. 8613. – P. 861314-1-13.

4. Spectral camera pfd [Electronical Resource]. – URL: <http://www.specim.fi/files/pdf/core/datasheets/PFD%20Spectral%20Camera-v3-11.pdf>. – 2015.
5. **Gat, N.** Imaging Spectroscopy Using Tunable Filters: A Review / N. Gat // Proceeding of SPIE. – 2000. – Vol. 4056. – P. 50-64.
6. **Correia, J.H.** High-selectivity single-chip spectrometer in silicon for operation in visible part of the spectrum / J.H. Correia, M. Bartek, R.F. Wolfenbuttel // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2000. – Vol. 47(3). – P. 553-559.
7. **Jayapala, M.** Monolithic integration of flexible spectral filters with CMOS image sensors at wafer level for low cost hyperspectral imaging / M. Jayapala, A. Lambrechts, N. Tack, B. Geelen, B. Masschelein [Electronical Resource]. – 2013. – URL: [http://www.imagesensors.org/Past%20Workshops/2013%20Workshop/2013%20Papers/07-02\\_053jayapala.pdf](http://www.imagesensors.org/Past%20Workshops/2013%20Workshop/2013%20Papers/07-02_053jayapala.pdf). – 2015.
8. **Казанский, Н.Л.** Моделирование гиперспектрометра на спектральных фильтрах с линейно-изменяющимися параметрами / Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов, С.Н. Хонина, С.Г. Вологовский, Ю.С. Стрелков // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 256-270.
9. **Скиданов, Р.В.** Исследование изображающего спектрометра на основе дифракционной линзы / Р.В. Скиданов, В.А. Бланк, А.А. Морозов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 218-223. – ISSN 0134-2452.
10. **Nansen, C.** Using hyperspectral imaging to determine germination of native Australian plant seeds / C Nansen, G. Zhao, N. Dakin, C. Zhao, S.R. Turner // J. Photochem. & Photobio. B. – 2015/ -Vol. 145(19). – P. 15173-15180.

### References

- [1] Voropay ES, Gulis IM, Kupreev AG, at al. The dispersion hyperspectrometer with reconfigurable input aperture on the basis of the micro-mirror matrix [in Russian]. Herald BSU 2009; 1(3): 31-5.
- [2] Tack N, Lambrechts A, Soussan S, Haspeslagh L. A compact, high-speed, and low-cost hyperspectral imager. Proceeding of SPIE 2012; 8266: 82660Q1-13. DOI:10.1117/12.908172.
- [3] Geelen B, Tack N, Lambrechts A. A snapshot multispectral imager with integrated, tiled filters and optical duplication. Proceeding of SPIE 2013; 8613: 861314-1-13. DOI:10.1117/12.2004072.
- [4] Source: <<http://www.specim.fi/files/pdf/core/datasheets/PFD%20Spectral%20Camera-v3-11.pdf>>.
- [5] Gat N. Imaging Spectroscopy Using Tunable Filters: A Review. Proceeding of SPIE 2000; 4056: 50-64.
- [6] Correia JH, Bartek M, Wolfenbuttel RF. High-selectivity single-chip spectrometer in silicon for operation in visible part of the spectrum. IEEE Transactions on Electron Devices 2000; 47(3): 553-9.
- [7] Jayapala M, Lambrechts A, Tack N, Geelen B, Masschelein B. Monolithic integration of flexible spectral filters with CMOS image sensors at wafer level for low cost hyperspectral imaging. Source: <[http://www.imagesensors.org/Past%20Workshops/2013%20Workshop/2013%20Papers/07-02\\_053-jayapala.pdf](http://www.imagesensors.org/Past%20Workshops/2013%20Workshop/2013%20Papers/07-02_053-jayapala.pdf)>.
- [8] Kazanskiy NL, Kharitonov SI, Khonina SN, Volotovskiy SG, Strelkov YuS. Simulation of hyperspectrometer on spectral linear variable filters. Computer Optics 2014; 38(2): 256-70.
- [9] Skidanov RV, Blank VA, Morozov AA. Study of an imaging spectrometer based on a diffraction lens. Computer Optics 2015; 39(2): 218-23.
- [10] Nansen C, Zhao G, Dakin N, Zhao C, Turner SR. Using hyperspectral imaging to determine germination of native Australian plant seeds. J. Photochem. & Photobio. B. 2015; 145(19): 15173-80.

## AN IMAGING SPECTROMETER BASED ON A DISCRETE INTERFERENCE FILTER

R.V. Skidanov<sup>1,2</sup>, A.A. Morozov<sup>1,2</sup>, A.P. Porfirev<sup>1,2</sup>, V.A. Blank<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Image Processing Systems Institute,

Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

<sup>2</sup>Samara State Aerospace University, Samara, Russia

### Abstract

The article describes properties of the spectral filter Edmund Optics (400–700 nm). The filter's transmission function is shown to be essentially different from an ideal form claimed by the manufacture. A spectrometer based on this filter is considered. It is shown that even with the filter's spectral transmission function not being very good, it is still possible to generate the desired spectrum with an error of not more than 13 %.

**Keywords:** imaging spectrometer, spectral filter, tunable laser.

**Citation:** Skidanov RV, Morozov AA, Porfiriev AP, Blank VA. An imaging spectrometer based on a discrete interference filter. *Computer Optics* 2015; 39(5): 716-20. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-716-720.

**Acknowledgements:** The work was partially funded by the RFBR grant No. 14-01-00849.

---

### Сведения об авторах

Сведения об авторе **Скиданов Роман Васильевич** см. стр. 677 этого номера.

**Морозов Андрей Андреевич**, 1987 года рождения, в 2008 получил степень бакалавра в СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». В 2010 получил степень магистра в СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». В списке научных работ А.А. Морозова 5 статей. Область научных интересов: дифракционная оптика.

E-mail: [ragefalcon@mail.ru](mailto:ragefalcon@mail.ru).

**Andrey Andreevich Morozov** (b. 1987). He received his bachelor of Applied Mathematics and Physics (2008) in SSAU. He received his master of Applied Mathematics and Physics (2010) in SSAU. He is co-author of 5 scientific papers. His research interests are currently diffractive optics.

**Порфирьев Алексей Петрович**, 1987 года рождения, в 2010 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ) по специальности «Прикладные математика и физика». Кандидат физико-математических наук (2013 год). Ассистент кафедры технической кибернетики СГАУ, научный сотрудник лаборатории микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН). Область научных интересов: дифракционная оптика, оптическое манипулирование.

E-mail: [porfirev.alexey@smr.ru](mailto:porfirev.alexey@smr.ru).

**Alexey Petrovich Porfirev** (b. 1987) graduated (2010) from Samara State Aerospace University (SSAU), majoring in Applied Physics and Mathematics. Candidate in Physics and Mathematics (2013). Currently he is an assistant professor in Technical Cybernetics department of SSAU and a researcher in Micro- and Nanotechnologies laboratory of the Image Processing Systems Institute of the RAS (IPSI RAS). His current research interests include diffractive optics and optical manipulation.

**Бланк Вероника Александровна**, 1992 года рождения, в 2013 получила степень бакалавра в СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». Область научных интересов: дифракционная оптика.

E-mail: [veronica\\_b@smr.ru](mailto:veronica_b@smr.ru).

**Veronika Alexandrovna Blank** (b. 1992). She received her bachelor in Applied Mathematics and Physics (2013) in SSAU. Her research interests are currently diffractive optics.

---

Поступила в редакцию 3 ноября 2015 г.  
Окончательный вариант – 19 ноября 2015 г.