

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОБРАЖАЮЩЕГО СПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ДИФРАКЦИОННОЙ ЛИНЗЫ*Скиданов Р.В., Бланк В.А., Морозов А.А.**Институт систем обработки изображений РАН,**Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет) (СГАУ)***Аннотация**

Рассмотрена возможность использования дифракционной линзы как простейшего изображающего спектрометра. Проведено экспериментальное построение спектрального изображения для белого, красного и зелёного светодиодов на основе последовательности изображений, полученных при сканировании вдоль оптической оси. При обработке изображений учитывалось влияние как рассеянных компонент исходной точки изображения, так и рассеянных компонент соседних точек. Осуществлено сравнение полученных спектральных распределений с интегральными спектрами этих светодиодов. Получены значения ошибок от 8 до 13 %.

Ключевые слова: изображающий спектрометр, дифракционная линза, спектр, обратная задача.

Введение

В последнее десятилетие в прикладной спектроскопии интенсивно развиваются новые методы, позволяющие получать и анализировать спектроскопическую информацию об объекте с пространственным разрешением, обеспечивающие получение для каждой малой области (точки) двумерного изображения объекта на входной апертуре прибора оптического спектра. Такие методы в научной литературе называются изображающей спектроскопией, трёхмерные матрицы, содержащие зависимость интенсивности света от двух пространственных и спектральной координат, – спектральными изображениями [1].

В большинстве современных изображающих спектрометров оптическая система, формирующая изображение, и дисперсионный элемент чётко разделены. В качестве дисперсионного элемента в изображающем спектрометре может использоваться как призма, так и дифракционная решётка. Однако существует дифракционный оптический элемент, который может объединить эти две функции.

Довольно давно предпринимаются попытки использования дифракционной линзы для различных приложений [2–7]. В том числе есть работы, посвящённые спектральным свойствам дифракционной линзы [7]. Однако высокая хроматическая аберрация не позволяет использовать дифракционную линзу в изображающих системах [4]. Дифракционная линза строит изображения для разных длин волн на разных расстояниях. Однако этот недостаток дифракционной линзы является скорее достоинством, если использовать её в качестве основы для спектрометра [8–10].

В работах [8, 9] рассматривается спектрометр, использующий в качестве дисперсионного элемента дифракционную линзу. При этом фокусируемый дифракционной линзой свет пропускается через диафрагму и попадает на фотодиод, т.е. рассматриваемый в работах [8, 9] спектрометр не является изображающим.

В работах [10, 11] рассматривается спектрометр на основе сочетания дифракционной линзы и дифракционной решётки, за счёт чего получается по-настоящему компактная конструкция. Однако этот спектрометр также не является изображающим. Однако дифракци-

онная линза позволяет также реализовать изображающий спектрометр [12]. В указанной работе проведено простейшее исследование по возможности использования дифракционной линзы в качестве основы для изображающего спектрометра. Однако авторы рассмотрели довольно простую ситуацию работы такого спектрометра, когда исходный объект – несколько разноцветных символов на мониторе, каждый из которых излучает в относительно узком спектральном диапазоне. Кроме того, для удобства символы разделены пространственно, что дополнительно упрощает задачу. При этом в [12] не было приведено ни одного спектра.

В работе [13] было представлено расширенное исследование и приводятся измеренные спектры для лазерных пучков (лазеры He-Ne и Cr-Ne). На изображающем спектрометре измерялся спектр точечного объекта, состоящий из одной спектральной линии. Т.е. из работ [12,13] можно сделать вывод, что дифракционная линза действительно позволяет получить спектральное изображение. Для подтверждения работоспособности такой конфигурации необходимо исследование о величине погрешности, с которой строится спектральное изображение в спектрометре на основе дифракционной линзы.

В данной статье исследуются погрешности построения спектрального изображения белого светодиода при помощи дифракционной линзы. Также строится спектральное изображение для структуры из нескольких светодиодов с разными спектральными свойствами.

1. Экспериментальное получение серии изображений с помощью дифракционной линзы

Для проверки возможности восстановления спектрального распределения для каждой точки изображения для объектов с широким спектром был проведён эксперимент, в котором строилась серия изображений белого светодиода с помощью дифракционной линзы с фокусным расстоянием 50 мм для длины волны, равной 500 нм. Для эксперимента использовалась четырёхуровневая дифракционная линза, описанная в [4]. Диаметр линзы составлял 8 мм.

На рис.1 представлена оптическая схема эксперимента.

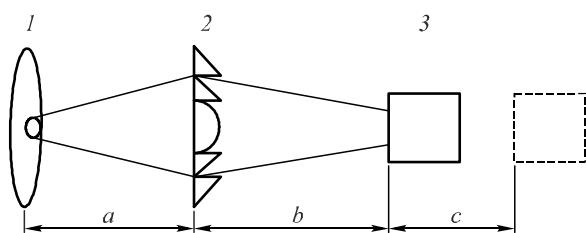


Рис. 1. Схема установки: 1 – диод, расположенный на расстоянии a от дифракционной линзы 2, 3 – ПЗС-камера, расположенная на расстоянии $b = 40$ мм от дифракционной линзы. ПЗС-камера установлена на перемещающемся столике с шагом перемещения $0,5$ мм, $c = 20$ мм

При этом расстояние от светодиода до дифракционной линзы $a = 2000$ мм было намного больше, чем расстояние от дифракционной линзы до ПЗС-камеры (ВИДЕОСКАН-2-205) с разрешением 1390×1040 . В эксперименте камера перемещалась на расстоянии от 40 мм до 60 мм с шагом $0,5$ мм. Каждому изображению соответствует своя длина волны. Диод располагался для удобства юстировки близко к оптической оси.

На рис. 2 представлен участок спектра белого светодиода, полученный на спектрометре MS7501 (рис. 2). Относительная ошибка измерения спектра на этом спектрометре не более 2% .

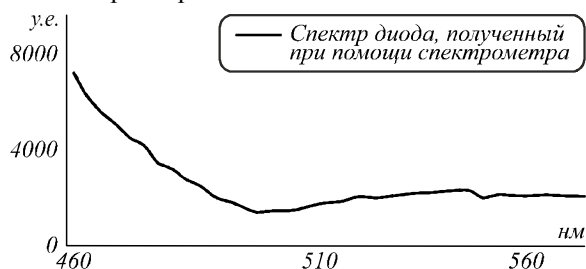


Рис. 2. Участок спектра белого светодиода (эталон)

Спектральное распределение на рис. 2 в дальнейшем предполагается использовать в качестве эталонного спектра для сравнения спектров отдельных точек изображения светодиода, полученных с помощью дифракционной линзы.

На рис. 3а представлен пример изображения светодиода на расстоянии $50,5$ мм, что соответствует длине волны 505 нм. Размер изображения светодиода на рис. 3 составил около 100 мкм (22 пиксела на ПЗС-матрице).

2. Обработка экспериментальных изображений для получения спектрального изображения

Однако напрямую без предварительной обработки использовать экспериментальные изображения нельзя. Дело в том, что из-за изменения расстояния от линзы до изображения меняется его масштаб. Т.е. изображение светодиода смещается относительно центра раstra изображения и дополнительно к этому меняет свой размер. Этого не избежать, даже если расположить изображение светодиода точно в центре. В этом случае остаётся изменение масштаба изображения. Для преодоления этого эффекта экспериментальные изображения подвергались геометрической трансформации растяжения/сжатия относительно

центра раstra изображения с коэффициентом, равным отношению расстояний. На рис. 3 представлено изображение светодиода на расстоянии, соответствующем длине волны 505 нм после геометрической трансформации. После этого преобразования изображение любого размера сохраняет размер и положение для любой длины волны.

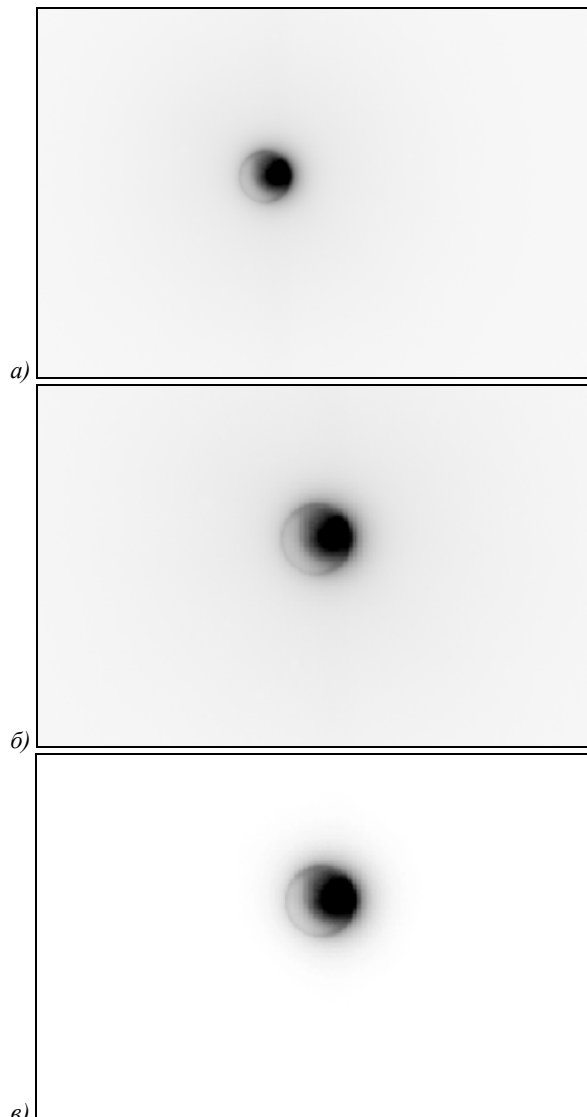


Рис. 3. Экспериментальное изображение, соответствующее длине волны 505 нм (а), экспериментальное изображение после геометрической трансформации (б), экспериментальное изображение с удалённой фоновой засветкой (в)

Для неизображающего спектрометра с дифракционной линзой [8] процедура восстановления спектра по последовательности измерений довольно простая.

В работе [8] авторы не осуществляют дополнительную обработку для устранения рассеянных компонент. Но правильно после получения последовательности распределений интенсивности на разных расстояниях $I(x,y)$ необходимо решить систему линейных уравнений.

$$I_j(x, y) = \sum_{i=1}^N I(x, y, \lambda_i) \frac{A}{A + (b_j - b_i)^2 k_i^{-2} \pi / 4}, j = \overline{1, N}, (1)$$

где $I(x, y, \lambda_i)$ – элементы спектрального изображения, b_i, b_j – расстояния, соответствующие длинам волн, k_i – дифракционное число дифракционной линзы, $I_j(x, y)$ – распределения интенсивности, снятые на расстояниях b_j , A – площадь пиксела в ПЗС-матрице. Дифракционное число для дифракционной линзы определяется по формуле $k_i = d/b_i$, где d – диаметр

линзы. Формула (1) была выведена из геометрических соображений. Для точного фокуса, когда расстояние b_j соответствует длине волны, мы считали, что размер пятна рассеяния меньше размера пиксела ПЗС-матрицы (4,65 мкм×4,65 мкм). Это действительно так: диаметр линзы 8 мм при фокусном расстоянии 50 мм, т.е. размер дифракционного пятна рассеяния будет около 4 мкм. При смещении на определённое расстояние мы считали размер пятна, исходя из геометрических соображений. Для изображающего спектрометра эта система уравнений усложняется, поскольку надо учесть вклад в рассеянную компоненту соседних точек на объекте

$$I_j(x, y) = \sum_{i=1}^N \int_{u^2+v^2 < R^2} \frac{I(x+u, y+v, \lambda_i) A}{A + (b_j - b_i)^2 k_i^{-2} \pi / 4} du dv, j = \overline{1, N}, (2)$$

где $R = (b_j - b_i)k_i^{-1}$ – размер пятна размытия точки при смещении из фокуса.

При $j = i$ в расчётах будем считать, что пятно рассеяния по площади совпадает с площадью пиксела. В дискретном случае интеграл в формуле (2) вырождается в сумму по пятну рассеяния точки для соответствующей длины волны. Система уравнений (2) для широкого спектрального диапазона имеет высокую вычислительную сложность. Количество точек в дискретном варианте, по которым проводится суммирование, может достигать нескольких тысяч. Для случая, когда объект, для которого формируется спектральное изображение, относительно компактен, вычислительная сложность несколько снижается. Так, для светодиода (рис. 2б) нужно учесть всего несколько десятков точек. Кроме этого при выполнении процедуры восстановления спектра учитывалась разная дифракционная эффективность дифракционной линзы для разных длин волн, которая вычислялась по формуле [13]

$$\eta = \frac{\sin^2 \left[(n-1)h \frac{\pi}{\lambda} - \pi \right] \sin^2 \left[(n-1)h \frac{\pi}{4\lambda} \right]}{\left((n-1)h \frac{\pi}{\lambda} - \pi \right)^2 \left((n-1)h \frac{\pi}{4\lambda} \right)^2},$$

где η – спектральная чувствительность, h – глубина рельефа, n – показатель преломления материала линзы.

Также была учтена спектральная чувствительность ПЗС-матрицы [14]. В результате решения системы уравнений (2) для изображений диода для одной

из его точек было получено следующее спектральное распределение (рис. 4).

СКО восстановления спектра составило 11%. Впрочем, для таких компактных объектов, как светодиод, можно использовать упрощённый способ получения спектрального изображения с небольшой потерей точности и после получения геометрически скорректированного изображения (рис. 2б) убрать рассеянную компоненту на всех изображениях (она определяется простой пороговой обработкой).

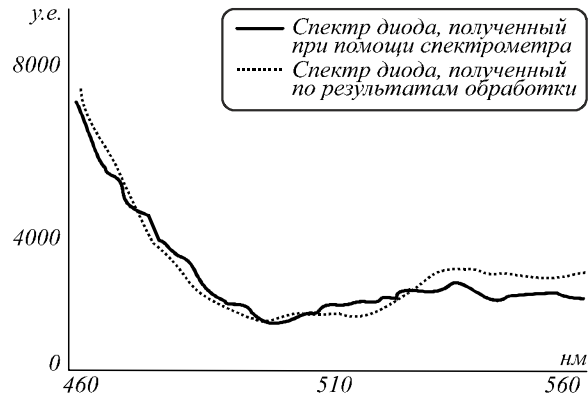


Рис. 4. Спектр диода, полученный при помощи спектрометра и по результатам обработки набора экспериментальных изображений по формуле (2)

Для этого определялось среднее значение интенсивности рассеянного света за пределами изображения светодиода для каждого изображения отдельно, затем это значение вычиталось из каждого экспериментального изображения. На рис. 3в приведён пример обработанного таким образом изображения для длины волны 505 нм.

На основании полученных изображений также можно получить спектральное распределение для каждой точки изображения (рис. 5).

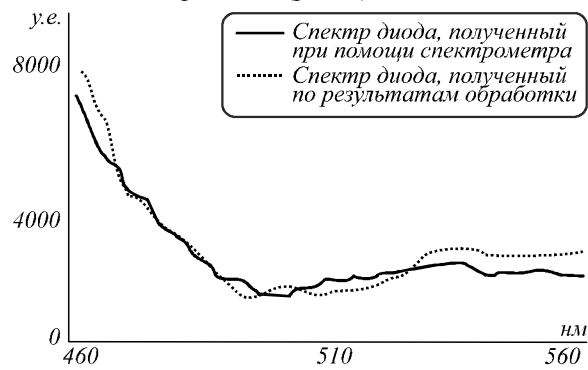


Рис. 5. Спектр диода, полученный при помощи спектрометра и по результатам обработки набора экспериментальных изображений по упрощённому методу

Как видно из рис. 5, наблюдается некоторое ухудшение (по сравнению с рис. 4) соответствия спектра, полученного на спектрометре (тёмная линия), и спектра, полученного после обработки последовательности изображений, сформированных дифракционной линзой. СКО в этом случае составило 13%, что на 2% больше, чем СКО точного решения. Однако время обработки при этом снижается более чем на порядок, и в некоторых случаях для получения

спектральных изображений компактных объектов можно использовать упрощенный алгоритм.

Спектры, полученные для разных точек светодиода, немного различаются (рис. 6). На рис. 6а отмечены разные точки, в которых измерялся спектр. Спектр для точки, отмеченной стрелочкой, показан на рис. 5. Спектры для точек, отмеченных треугольником и квадратом, показаны на рис. 6б, в соответственно.

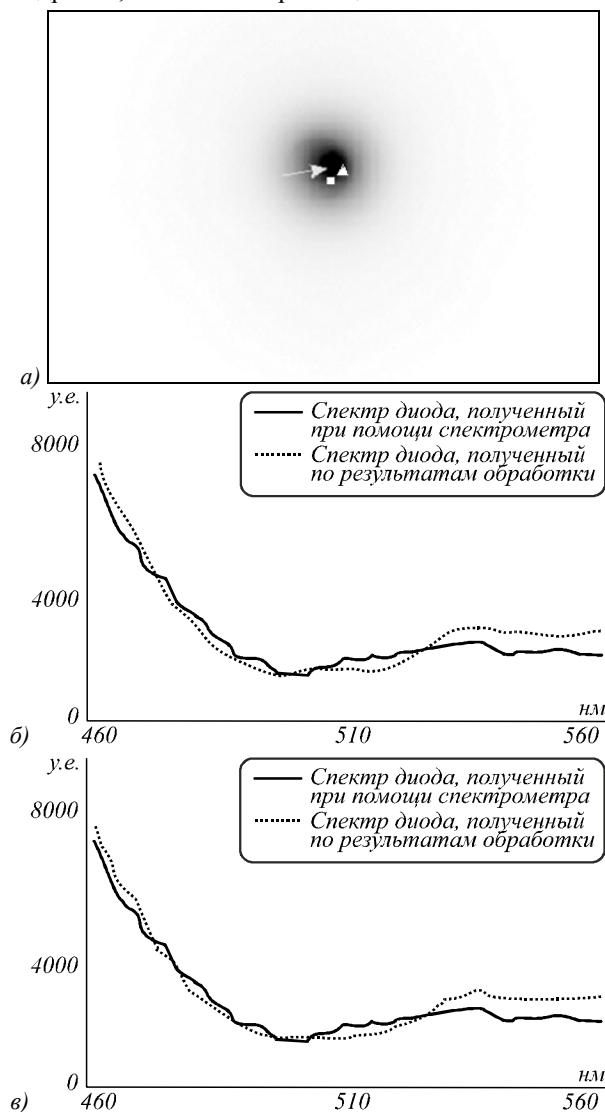


Рис. 6. Спектр диода, полученный при помощи спектрометра и по результатам обработки набора экспериментальных изображений по упрощенному методу

Для рис. 6б, в графики незначительно отличаются от графика на рис. 5, и значение СКО составляет около 13 %.

Рассмотрим также спектральное изображение структуры из зелёных, красных и белого светодиодов в форме креста, в центре располагается белый диод, по вертикали – зелёные диоды, по горизонтали – красные диоды (рис. 7). Спектры таких диодов довольно сильно отличаются друг от друга, и, получая спектральное изображение такого объекта, мы тем самым подтверждаем, что спектрометр на основе дифракционной линзы действительно является изображающим.

Из рис. 7 хорошо видно, что изображения красного и зелёного диодов формируются на разных расстояниях от линзы. На рис. 8 представлены спектры, полученные для зелёного и красного диодов, в сравнении с их же спектрами, измеренными на MS7501.

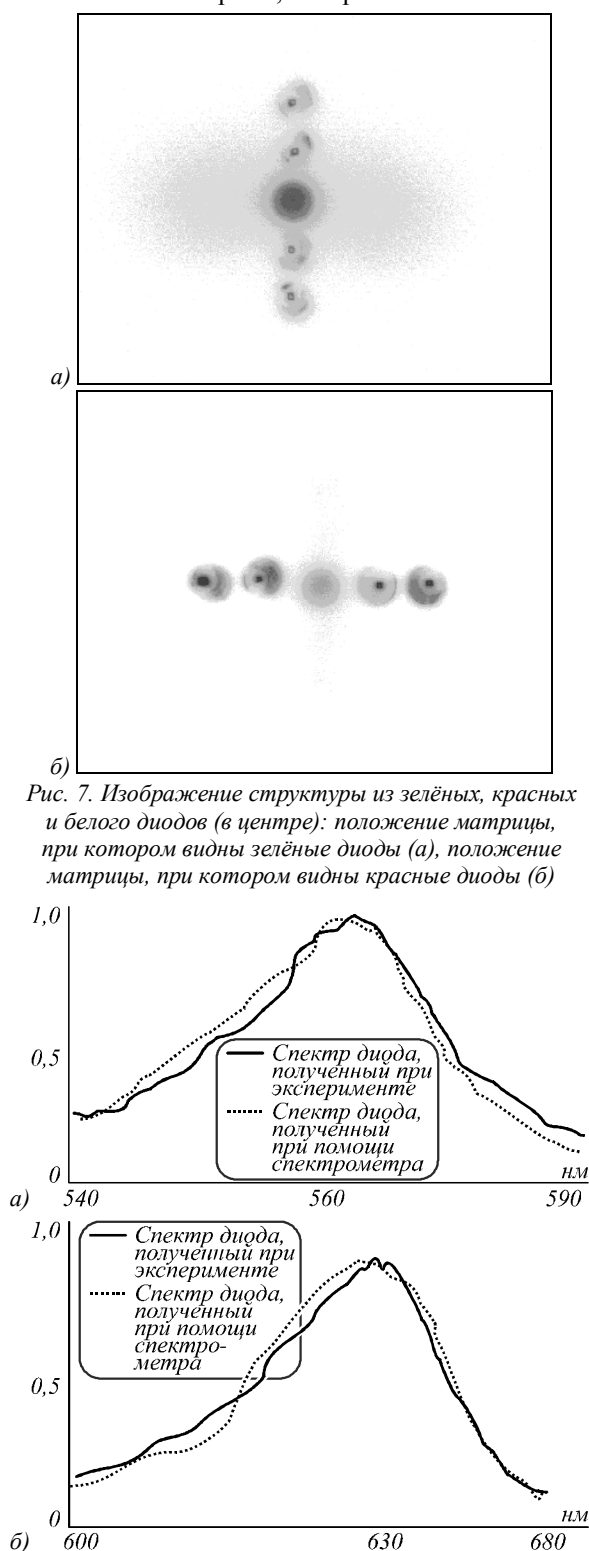


Рис. 7. Изображение структуры из зелёных, красных и белого диодов (в центре): положение матрицы, при котором видны зелёные диоды (а), положение матрицы, при котором видны красные диоды (б)

Рис. 8. Спектр зелёного диода, полученный в эксперименте, в сравнении с его же спектром, измеренные на MS7501 (а), спектр красного диода, полученный в эксперименте, в сравнении с его же спектром, измеренные на MS7501 (б)

Значение СКО на рис. 8а – 8%, на рис. 8б – 11%. Значение СКО, полученное в эксперименте, довольно велико (8–13%), но надо учитывать три обстоятельства:

1. Спектр отдельно взятой точки на спектральном изображении не должен полностью совпадать со спектром всего диода (рис. 6б,в) (спектрометр измеряет интегральную характеристику).

2. Исследовался только участок спектра, но ПЗС-матрица чувствительна также к компонентам за пределами измеряемого диапазона, следовательно, они также вносят искажения при восстановлении спектра. В дальнейшем этого можно избежать установкой отсекающих лишнее светофильтров.

3. Обычный уровень ошибок изображающих спектрометров довольно велик по сравнению с ошибками неизображающих спектрометров (1–2%). Обычно производители гиперспектральных камер указывают ошибку в измерении спектра в пределах 5–10% [15]. Т.е. в нашем эксперименте получены сопоставимые по точности результаты при заведомо более простой конструкции.

При работе с более сложными изображениями в будущем стоит использовать точный метод на основе системы (2).

Однако, исходя из полученных результатов, можно говорить о работоспособности этого простейшего изображающего спектрометра, состоящего всего из одной дифракционной линзы.

Заключение

Исследована погрешность работы простейшего изображающего спектрометра, в котором изображающая система и дисперсионный элемент составляют единое целое – спектрометр на основе дифракционной линзы.

Результаты проведенных экспериментов по формированию спектрального изображения из серии изображений, сформированных дифракционной линзой, позволяют говорить о погрешности формирования спектральных изображений с помощью дифракционной линзы с погрешностью 8–13%, что примерно соответствует погрешности существующих образцов гиперспектральных камер.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 14-31-00014).

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. **Хонина, С.Н.** Бинарная линза: исследование локальных фокусов / С.Н. Хонина, А.В. Устинов, Р.В. Скиданов // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 3. – С. 339-346. – ISSN 0134-2452.
3. **Buralli, D. A.** Design of diffractive singlets for monochromatic imaging / D.A. Buralli, G.M. Morris // Applied Optics. – 1991. – Vol. 30(16). – P. 2151-2158. – ISSN 1559-128X.

4. **Казанский, Н.Л.** Формирование изображений дифракционной многоуровневой линзой / Н.Л. Казанский, С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов, А.А. Морозов, С.И. Харитонов, С.Г. Вологовский // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 38, № 3. – С. 325-345. – ISSN 0134-2452.
5. **Motogaito, A.** Fabrication of Binary Diffractive Lenses and the Application to LED Lighting for Controlling Luminosity Distribution / A. Motogaito, Kazumasa Hiramatsu // Optical and Photonics Journal. – 2013. – Vol. 3(1). – P. 67-73. – ISSN 2160-8881.
6. **Miyamoto, K.** The phase Fresnel lens / K. Miyamoto // Journal of the Optical Society of America. – 1961. – Vol. 51(1). – P. 17-20. – ISSN 1084-7529.
7. **Faklis, D.** Spectral properties of multiorder diffractive lenses / D. Faklis, G.M. Morris // Applied Optics. – 1995. – Vol. 34(14). – P. 2462-2468.
8. **Kitaura, N.** Spectrometer employing a micro-Fresnel lens / N. Kitaura, S. Ogata, Y. Mori // Optical Engineering. – 1995. – Vol. 34. – P.584-588.
9. **Park, Y.** Miniaturization of a Fresnel spectrometer / Y. Park [et al.] // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. – 2008. – Vol. 10. – P. 095301.
10. **Yang, C.** Proposal and demonstration of a spectrometer using a diffractive optical element with dual dispersion and focusing functionality / C. Yang, P. Edwards, K. Shi, Z. Liu // Optical Letters. – 2011. – Vol. 36. – P. 2023-2025.
11. **Yang, C.** Demonstration of a PDMS based hybrid grating and Fresnel lens (G-Fresnel) device / C. Yang, K. Shi, P. Edwards, Z. Liu // Optics Express. – 2010. – Vol. 18(23). – P. 23529-23534.
12. **Lyons, D.** Image spectrometry with a diffractive optic / D. Lyons // Proceedings of SPIE. – 1995. – Vol. 2480. – P. 123-131.
13. **Lyons, D.** The DOE in “DOIS” a diffractive optic image spectrometer / D. Lyons, K. Whitcomb // Proceedings of SPIE. – 1996. – Vol. 2689. – P. 274-283.
14. **Петропавловский, Ю.** Особенности применения ПЗС-матриц с межстрочным переносом / Ю. Петропавловский // Компоненты и технологии. – 2009. – № 5. – С. 17-24.
15. Конструкторское бюро специального приборостроения [Электронный ресурс]. – 2015. – URL: http://www.kbsp.ru/projects/detail.php?ELEMENT_ID=12 (дата обращения: 9.04.2015).

References

1. **Voropay, E.S.** The dispersion hyperspectrometer with reconfigurable input aperture on the basis of the micro-mirror matrix / E.S. Voropay, I.M. Gulis, A.G. Kupreev [et al.] // Herald BSU. – 2009. – Vol. 1(3). – P. 31-35. – ISSN 0321-0367.
2. **Khonina, S.N.** Binary lens: investigation of local focuses / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, R.V. Skidanov // Computer Optics – 2011. – Vol. 35(3). – P. 339-346. – ISSN 0134-2452.
3. **Buralli, D. A.** Design of diffractive singlets for monochromatic imaging / D.A. Buralli, G.M. Morris // Applied Optics. – 1991. – Vol. 30(16). – P. 2151-2158. – ISSN 1559-128X.
4. **Kazanskiy, N.L.** Formation of images using multilevel diffractive lens / N.L. Kazanskiy, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, A.A. Morozov, S.I. Kharitonov, S.G. Volotovskiy // Computer Optics. – 2014. – Vol. 38(3). – P. 325-345. – ISSN 0134-2452.
5. **Motogaito, A.** Fabrication of Binary Diffractive Lenses and the Application to LED Lighting for Controlling Luminosity Distribution / A. Motogaito, Kazumasa Hiramatsu // Optical and Photonics Journal. – 2013. – Vol. 3(1). – P. 67-73. – ISSN 2160-8881.

6. **Miyamoto, K.** The phase Fresnel lens / K. Miyamoto // Journal of the Optical Society of America. – 1961. – Vol. 51(1). – P. 17-20. – ISSN 1084-7529.
7. **Faklis, D.** Spectral properties of multiorde diffraction lenses / D. Faklis, G.M. Morris // Applied Optics. – 1995. – Vol. 34(14). – P. 2462-2468.
8. **Kitaura, N.** Spectrometer employing a micro-Fresnel lens / N. Kitaura, S. Ogata, Y. Mori // Optical Engineering. – Vol. 34. – 1995. – P.584-588.
9. **Park, Y.** Miniaturization of a Fresnel spectrometer / Y. Park [et al.] // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. – 2008. – Vol. 10. – P. 095301.
10. **Yang, C.** Proposal and demonstration of a spectrometer using a diffractive optical element with dual dispersion and focusing functionality / C. Yang, P. Edwards, K. Shi, Z. Liu // Optical Letters. – 2011. – Vol. 36. – P. 2023-2025.
11. **Yang, C.** Demonstration of a PDMS based hybrid grating and Fresnel lens (G-Fresnel) device / C. Yang, K. Shi, P. Edwards, Z. Liu // Optics Express. – 2010. – Vol. 18 (23). – P. 23529-23534.
12. **Lyons, D.** Image spectrometry with a diffractive optic/ D. Lyons // Proceedings of SPIE. – 1995. – Vol. 2480. – P.123-131.
13. **Lyons, D.** The DOE in “DOIS” a diffractive optic image spectrometer/ D. Lyons, K. Whitcomb // Proceedings of SPIE. – 1996. – Vol. 2689. – P. 274-283.
14. **Petropavlovskiy, U.** Application features CCD with inter-line transfer / U. Petropavlovskiy // Components and technologies. – 2009. – Vol. 5. – P. 17-24.
15. Special design Bureau of instrument engineering. Source: <http://www.kbsp.ru/projects/detail.php?ELEMENT_ID=12>.

STUDY OF AN IMAGING SPECTROMETER BASED ON A DIFFRACTION LENS

R.V. Skidanov, V.A. Blank, A.A. Morozov

*Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences,
Samara State Aerospace University*

Abstract

The possibility of using a diffraction lens as a simple imaging spectrometer was demonstrated. Spectral images for white, red and green LEDs were experimentally generated on the basis of a sequence of images obtained by scanning along the optical axis. A comparison of the obtained spectral distributions with the integrated spectra of the LEDs under study was conducted. The error was found to vary from 8 to 13%.

Keywords: imaging spectrometer, diffraction lens, spectrum, inverse problem.

Сведения об авторах

Сведения об авторе Скиданов Роман Васильевич – см. стр.186 этого номера.

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: veronika_b@smr.ru.

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

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.

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.

*Поступила в редакцию 30 марта 2015 г.
Окончательный вариант – 14 апреля 2015 г.*