

# ДИФРАКЦИОННАЯ ЛИНЗА В ИЗОБРАЖАЮЩЕМ СПЕКТРОМЕТРЕ

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

<sup>1</sup>Институт систем обработки изображений РАН

<sup>2</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва (национально исследовательский университет)

Рассмотрена возможность использования дифракционной линзы как простейшего изображающего спектрометра. Проведено экспериментальное построение спектрального изображения для белого, красного и зеленого светодиодов. При обработке изображений учитывалось влияние рассеянных компонент исходной точки и соседних точек изображения. Было проведено сравнение полученных спектральных распределений со спектрами этих светодиодов, полученных при помощи спектрометра. Получены СКО от 8 до 13%.

## 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, трехмерные 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 четко 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 дифракционную линзу в качестве основы для спектрометра [8-10]. В работе [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. В работе [12] простейшее исследование по возможности использования дифракционной линзы в качестве основы для изображающего спектрометра. Однако в работе [12] 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 ещё сильнее упрощает задачу. При этом [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 50мм для длины волны равной 500нм. Для эксперимента использовалась четырёхуровневая дифракционная линза, описанная в [4]. Диаметр линзы составлял 8мм.

На рисунке 1 представлена оптическая схема эксперимента.

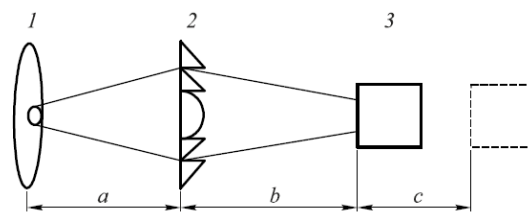


Рисунок 1 – Схема установки. 1 – диод, расположенный на расстоянии  $a$  от дифракционной линзы 2, 3 – ПЗС камера, расположенная на расстоянии  $b=40$ мм от дифракционной линзы. ПЗС-камера установлена на перемещающемся столике с шагом перемещения 0,5мм,  $c=20$ мм

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  $1390 \times 1040$ . В эксперименте камера перемещалась на расстоянии от 40мм до 60мм с шагом 0,5мм. Каждому изображению соответствует своя длина волны. Диод располагался для удобства юстировки близко к оптической оси.

На рисунке 2 представлены примеры изображений светодиода на нескольких расстояниях, что соответствует длинам волн 481нм, 505 нм и 550нм. Размер изображения светодиода на рисунке 2 составил около 100мкм (22 пиксела на ПЗС матрице).

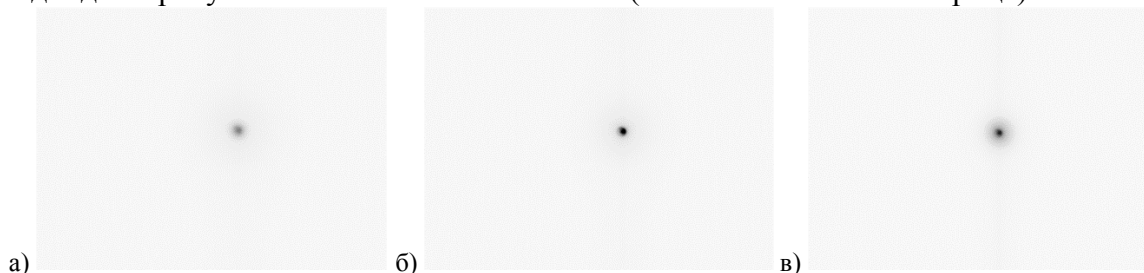


Рисунок 2 – Экспериментальные изображения: 481нм (а), 505нм (б), 550нм (в)

### 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 растра изображения и дополнительно к этому меняет свой размер. Этого не избежать, даже если расположить изображение светодиода точно в центре. В этом случае остается изменение масштаба изображения. Для преодоления этого эффекта экспериментальные изображения подвергались геометрической трансформации растяжения/сжатия относительно центра растра изображения с коэффициентом равным отношению расстояний. После этого преобразования изображение любого размера сохраняет размер и положение для любой длины волны.

Для не изображающего спектрометра с дифракционной линзой [8] процедура восстановления спектра по последовательности измерений довольно простая. В самой работе [8] авторы дополнительную обработку для устранения рассеянных компонент не осуществляют. Но правильно после получения последовательности распределений интенсивности на разных расстояниях  $I_j(x,y)$  необходимо решить систему линейных уравнений.

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

где  $I(x,y,\lambda_i)$  - элементы спектрального изображения,  $b_i, b_j$  - расстояния соответствующие длинам волн,  $k_i$  - диафрагменное число дифракционной линзы,  $I_j(x,y)$  - распределения интенсивности снятые на расстояниях  $b_j$ ,  $A$  - площадь пиксела в ПЗС матрице. Диафрагменное 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 (4,65мкм\*4.65мкм). Это действительно так, диаметр линзы 8мм при фокусном расстоянии 50мм, т.е. размер дифракционного пятна рассеяния будет около 4мкм. При смещении на определенное 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

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

где  $R = (b_j - b_i) k_i^{-1}$  - размер пятна размытия точки при смещении из фокуса, при  $j=i$ , в расчетах 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 (рисунок 3) 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  $\eta$  - спектральная чувствительность,  $h$  - глубина рельефа,  $n$  - показатель преломления материала линзы.

Также была учтена спектральная чувствительность ПЗС матрицы [14]. Таким образом, на рисунке 3 представлены обработанные изображения.

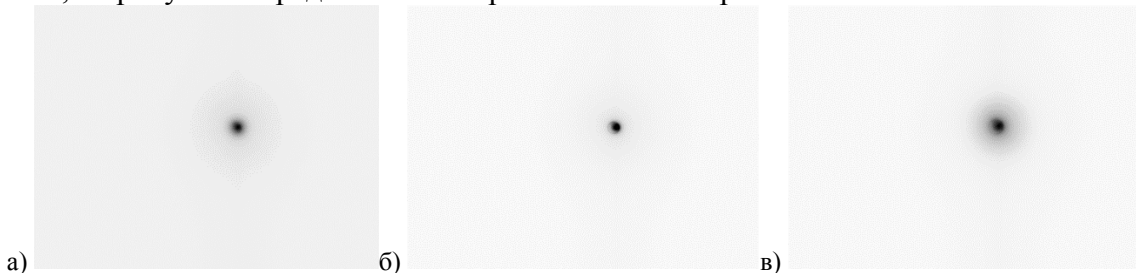


Рисунок 3 – Обработанные изображения: 481нм (а), 505нм (б), 550нм (в)

В результате решение системы уравнений (2) для изображений диода, для одной из его точек было получено следующее спектральное распределение (рисунок 4а). В качестве эталона выступает участок спектра белого светодиода, полученный на спектрометре MS7501 (темная линия). Относительная ошибка измерения спектра на этом спектрометре не более 2%.

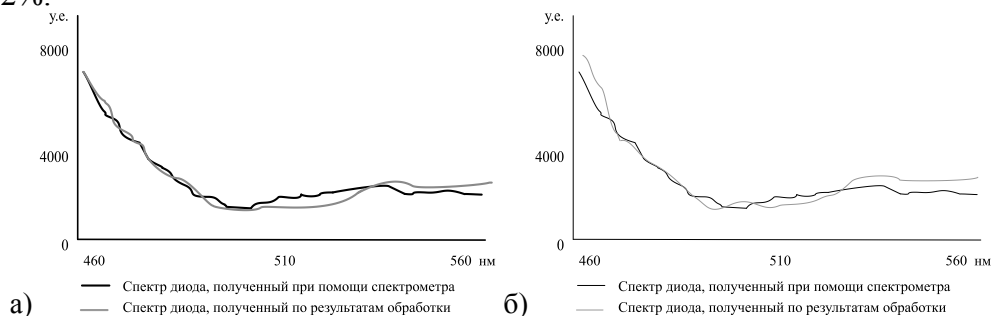


Рисунок 4 – Спектр диода, полученный при помощи спектрометра и по результатам обработки набора экспериментальных изображений по формуле (2)(а), спектр диода, полученный при помощи спектрометра и по результатам обработки набора экспериментальных изображений по упрощенному методу (б)

СКО восстановления спектра составило 11%. Впрочем, для таких компактных объектов как светодиод, можно использовать с небольшой потерей точности упрощенный способ получения спектрального изображения. Можно после получения геометрически скорректированного изображения убрать рассеянную компоненту на всех изображениях (она определяется простой пороговой обработкой). 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 рисунке 3 приведен пример обработанных таким образом изображений для длин волн: 481нм, 505нм, 550нм.

На основании полученных изображений также можно получить спектральное распределение для каждой точки изображения (рисунок 4).

Как видно из рисунка 4 наблюдается некоторое ухудшение 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.

Рассмотрим также спектральное изображение структуры из зеленых, красных и белого светодиодов в форме креста, в центре располагается белый диод, по вертикали зеленые диоды, по горизонтали красные диоды (рисунок 5). 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.

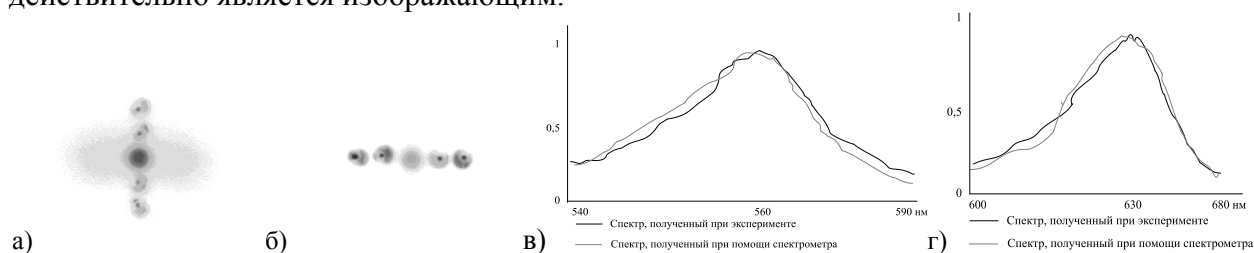


Рисунок 5 – Изображение структуры из зеленых, красных и белого диода (в центре). (а) – положение матрицы, при котором видны зеленые диоды, (б) – положение матрицы, при котором видны красные диоды, спектр зеленого диода, полученный в эксперименте в сравнении с его же спектром, измеренных на MS7501 (в), спектр красного диода, полученный в эксперименте в сравнении с его же спектром, измеренных на MS7501 (г)

Из рисунка 5 хорошо видно, что изображения красного и зеленого диода формируются на разных расстояниях от линзы. На рисунке 10 представлены спектры, полученные для зеленого и красного диодов в сравнении с их же спектрами, измеренными на MS7501.

Значение СКО на рисунке 5в - 8%, на рисунке 5г – 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 (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 не изображающих 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).

### **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 погрешности формирования спектральных изображений с помощью дифракционной линзы с погрешностью 8-13%, что примерно соответствует погрешности существующих образцов гиперспектральных камер.

### **Литература**

1. Воропай Е.С. Дисперсионный гиперспектрометр с реконфигурируемой входной апертурой на основе микрозеркальной матрицы // Вестник БГУ, 2009. Сер.1, №3. С. 31-35.
2. Хонина С.Н. Бинарная линза: исследование локальных фокусов // Компьютерная оптика, 2011. Т. 35, №3. С. 339-346.
3. Buralli D. A. Design of diffractive singlets for monochromatic imaging // Applied optics, 1991. Vol. 30(16). P. 2151-2158.
4. Казанский Н.Л. Формирование изображений дифракционной многоуровневой линзой // Компьютерная оптика, 2011. Т. 38, № 3. С. 325-345.
5. Motogaito A. Fabrication of Binary Diffractive Lenses and the Application to LED Lighting for Controlling Luminosity Distribution // Optical and Photonics Journal, 2013. Vol. 3(1). P. 67-73.
6. Miyamoto K. The phase Fresnel lens // Journal of the Optical Society of America, 1961. Vol. 51(1). P. 17-20.
7. Faklis D. Spectral properties of multiorder diffractive lenses // Applied Optics, 1995. Vol. 34(14). P. 2462-2468.
8. Kitaura N. Spectrometer employing a micro-Fresnel lens // Optical Engineering, 1995. Vol. 34. P.584-588.
9. Park Y. Miniaturization of a Fresnel spectrometer // 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 // Optical Letters, 2011. Vol. 36. P. 2023-2025.
11. Yang C. Demonstration of a PDMS based hybrid grating and Fresnel lens (G-Fresnel) device // Optics Express, 2010. Vol. 18 (23). P. 23529-23534.
12. Lyons D. Image spectrometry with a diffractive optic // Proc. SPIE, 1995. Vol. 2480. P.123-131.
13. Lyons D. The DOE in "DOIS" a diffractive optic image spectrometer // Proc. SPIE, 1996. Vol. 2689. P. 274-283.
14. Петропавловский Ю. Особенности применения ПЗС-матриц с межстрочным переносом // Компоненты и технологии, 2009. № 5. С. 17-24.
15. Конструкторское бюро специального приборостроения URL: [http://www.kbsp.ru/projects/detail.php?ELEMENT\\_ID=12](http://www.kbsp.ru/projects/detail.php?ELEMENT_ID=12) (дата обращения: 9.04.2015).