

УДК 681.785.554

МНОГОЩЕЛЕВОЙ СПЕКТРОМЕТР С ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

И. М. ГУЛИС¹⁾, А. Г. КУПРЕЕВ¹⁾, И. Д. ДЕМИДОВ¹⁾, Е. С. ВОРОПАЙ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Отмечено, что многощелевые дисперсионные приборы для спектроскопии с пространственным разрешением обеспечивают одновременное получение на детекторе полного куба данных $I(x, y, \lambda)$. Как правило, в таких спектрометрах в качестве диспергирующего элемента используются призмы, но из-за значительной спектральной зависимости величины их дисперсии эффективность использования площади двумерного фотоприемника, на котором отображается информация, содержащаяся в кубе данных $I(x, y, \lambda)$, существенно уменьшается. Предложен принцип использования дифракционной решетки в качестве диспергирующего элемента, позволяющий существенно увеличить информационную емкость благодаря тому, что на детектор попадают световые пучки только необходимого порядка дифракции. Это обеспечивается за счет использования пропускающей дифракционной решетки, расположенной вблизи многощелевой входной маски спектрометра в неколлимированном пучке. Достоинством предложенной системы является возможность оперативного изменения дисперсии путем смещения

Образец цитирования:

Гулис И. М., Купреев А. Г., Демидов И. Д., Воропай Е. С. Многощелевой спектрометр с дифракционной решеткой для спектроскопии с пространственным разрешением // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. № 3. С. 4–11.

For citation:

Gulis I. M., Kupreyeu A. G., Demidov I. D., Voropay E. S. Multislit diffraction grating spectrometer for imaging spectroscopy. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2017. No. 3. P. 4–11 (in Russ.).

Авторы:

Игорь Михайлович Гулис – доктор физико-математических наук; профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета.

Александр Геннадьевич Купреев – кандидат физико-математических наук; научный сотрудник лаборатории нелинейной оптики и спектроскопии кафедры лазерной физики и спектроскопии и кафедры физической оптики физического факультета.

Иван Дмитриевич Демидов – аспирант кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета. Научный руководитель – И. М. Гулис.

Евгений Семенович Воропай – доктор физико-математических наук, профессор; заведующий кафедрой лазерной физики и спектроскопии физического факультета.

Authors:

Igor Gulis, doctor of science (physics and mathematics); professor at the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.

gulis@bsu.by

Alexander Kupreyeu, PhD (physics and mathematics); researcher at the laboratory of nonlinear optics and spectroscopy, department of laser physics and spectroscopy and department of physical optics, faculty of physics.

kupreev@bsu.by

Ivan Demidov, postgraduate student at the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.

ivandemidov@tut.by

Eugene Voropay, doctor of science (physics and mathematics), full professor; head of the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.

voropay@bsu.by

дифракционной решетки вдоль оптической оси. Проведено численное моделирование многоцелевого спектрометра. Показано, что при использовании объективов Nikon Nikkor AF 50 mm 1.4D полуширина кружков рассеяния в направлении дисперсии не превышает 15 мкм в рабочем спектральном диапазоне 405–700 нм, что соответствует спектральному разрешению на уровне 10 нм при числе разрешаемых пространственных элементов до $2 \cdot 10^4$.

Ключевые слова: мультиспектральный; дисперсионный; дифракционная решетка; многоцелевой.

MULTISLIT DIFFRACTION GRATING SPECTROMETER FOR IMAGING SPECTROSCOPY

I. M. GULIS^a, A. G. KUPREYEU^a, I. D. DEMIDOV^a, E. S. VOROPAY^a

^aBelarusian State University, Niezaliežnasci Avenue, 4, 220030, Minsk, Belarus

Corresponding author: I. M. Gulis (gulis@bsu.by)

Multislit dispersive instruments for imaging spectroscopy allow to snapshot a data cube $I(x, y, \lambda)$ on a photodetector. Usually such spectrometers use a prism as a dispersive element. Due to a significant spectral dependence of the prism dispersion, the efficacy of using the 2D photodetector area, where a data cube $I(x, y, \lambda)$ is projected, is substantially decreased. According to our approach, a diffraction grating dispersive element offers a dramatic increase in the information capacity owing to elimination of the useless diffraction-order rays due to location of a transmission diffraction grating near the multislit entrance mask of a spectrometer in a noncollimated beam. The proposed design has the advantage of quick dispersion tuning by shift of the grating along the optical axis. A computer simulation of a multislit spectrometer has been performed. It is shown that FWHM of beam spots in the dispersion direction is not higher than 15 μm in the working spectral range 405–700 nm when using the Nikon Nikkor AF 50 mm 1.4D photographic lenses. That corresponds to a spectral resolution of about 10 nm for the number of resolved spatial elements up to $2 \cdot 10^4$.

Key words: multispectral; dispersive; diffraction grating; multislit.

Спектроскопия с пространственным разрешением (СПР) в последние десятилетия все активнее используется в дистанционном зондировании земной поверхности, медицине, сельском хозяйстве, криминалистике, фармакологии, контроле качества продукции и других областях [1–5]. Массив спектрально-пространственной информации об объекте $I(x, y, \lambda)$ чаще всего получают путем последовательной регистрации спектра для участков изображения объекта (сканирование может осуществляться различными способами) [6], а также регистрации квазимонохроматических изображений интересующей области целиком в наборе длин волн (посредством переключаемых либо перестраиваемых светофильтров) [7]. Существенным ограничением обоих подходов является необходимость последовательного выполнения серии измерений, что не только времязатратно, но и принципиально ограничивает их применимость к работе с нестационарными объектами (например, земной ландшафт с движущимися объектами и изменяющейся освещенностью, органы и ткани *in vivo*, предметы на конвейере, пламя). В связи с этим перспективно направление СПР, в рамках которого разрабатываются подходы для получения $I(x, y, \lambda)$ в одном акте измерения (snapshot hyperspectroscopy [8], или мгновенная гиперспектроскопия – МГС).

В большинстве актуальных подходов МГС куб данных $I(x, y, \lambda)$ регистрируется на двумерной матрице фотоприемника, при этом способ отображения куба на плоскость имеет существенное значение с точки зрения информационной емкости и характеристик сигнала. Чаще всего используются различные варианты размещения на детекторе совокупности узкополосных спектральных изображений объекта либо спектров набора пространственных выборок (срезов) изображения объекта [9; 10]. Разрабатываются также подходы на основе более сложных принципов (хроматографический изображающий спектрометр (СТИС) [11], методы фурье-спектроскопии [12] и прочие), однако они ограниченно применимы для анализа объектов с резкими пространственными вариациями характеристик, а обеспечиваемый ими результат восстановления $I(x, y, \lambda)$ недостаточно устойчив к шумам.

Подходы, основанные на получении спектров от пространственных фрагментов изображения объекта, могут быть реализованы в различных вариантах. Так, реформатирование двумерного входного поля

изображения в столбец, выполняющий функцию входной щели дисперсионного спектрометра, осуществляется оптоволоконной системой [9], однако приборы такого рода сложные и дорогие, поэтому их применение целесообразно в рамках уникальных масштабных проектов, например астрономических. В более простом варианте изображение объекта строится на матрице микролинз [13], в общей фокальной плоскости которой формируется совокупность кружков рассеяния, выступающих в качестве функционального аналога системы входных щелей дисперсионного спектрометра. В результате в фокальной плоскости камерного объектива прибора формируется множество спектров. Недостатком такого подхода является высокий вклад рассеянного света от соседних микролинз и их границ [13], а также требование малой расходимости пучков, формирующих изображение на микролинзовой матрице.

В еще более простом варианте многощелевого дисперсионного спектрометра (МДС) в плоскости промежуточного изображения объекта размещается маска, содержащая множество отверстий, расположенных регулярным образом [14]. В таких приборах в качестве дисперсионного элемента обычно используются призмы невысокой дисперсии. При этом если рабочий спектральный диапазон МДС широк (например, от 400 до 700–800 нм), то проблемой становится сильная спектральная зависимость угловой дисперсии призмы (дисперсия большинства стекол в указанном диапазоне изменяется в 10–12 раз). Ослабление спектральной зависимости может быть достигнуто использованием составных призм [14], скомбинированных в установке с вычитанием дисперсии (расчеты показывают, что так можно уменьшить диапазон изменения дисперсии примерно до трехкратного). Однако при этом неизбежно существенное снижение общей дисперсии, которая может оказаться недостаточной для получения спектров даже небольшой длины от отдельных входных щелей – локальных спектров (ЛС) – в плоскости фотоприемника МДС.

Использование дифракционной решетки в качестве дисперсионного элемента позволяет обеспечить пренебрежимо малую спектральную вариацию угловой дисперсии даже в широком спектральном диапазоне. Однако традиционная схема установки дифракционной решетки в спектрометре (в параллельном пучке, формируемом коллиматорным объективом) неприемлема для МДС из-за неэффективного использования площади фотоприемника и уменьшения информационной емкости куба данных, поскольку отображает на детекторе близко расположенные спектры нулевого и ± 1 -го порядков (более высокие порядки целесообразно «отсекать» светофильтром).

В настоящей работе предложены варианты схемных решений МДС с пропускающей дифракционной решеткой, в которых устранена проблема нежелательных порядков. Расчеты и экспериментальные оценки ориентированы на достижение спектрального разрешения $\delta\lambda \sim 10$ нм в диапазоне 400–700 нм (~ 30 спектральных полос), что достаточно для регистрации с минимальными искажениями спектров отражения земной поверхности, растений и других биологических объектов: как правило, в подобных спектрах отсутствуют структурные элементы с $\delta\lambda < 30$ нм.

Если предположить, что оптическая система спектрометра имеет увеличение 1:1, а ширина щелей и размеры пикселей составляют менее 5 мкм, то размер кружков рассеяния в направлении дисперсии будет определяться преимущественно абберациями оптической системы. В качестве ожидаемой ширины абберационно уширенного спектрального изображения щели $\Delta l_{\text{абер}}$ примем 15 мкм, что соответствует разрешению, достижимому при использовании в качестве объективов фотообъективов Nikon AF 50 mm. Таким образом, длина ЛС при 30 разрешаемых спектральных элементах составит ~ 450 нм. Указанным требованиям удовлетворяет маска со структурой, приведенной на рис. 1, а. Маска обеспечивает длину спектра 400 мкм, а выделенная на рис. 1, а, пунктирной линией структурная ячейка имеет размер примерно 100×100 мкм, что определяет пространственное разрешение на уровне 100 точек на 1 мм^2 . Оценив площадь рабочей области на фотоприемной матрице в 200 мм^2 , приходим к общему разрешению системы в размере $2 \cdot 10^4$ пространственных элементов, что достаточно для многих задач СПР.

Фотолитографически изготовлено несколько масок подобной структуры размером 24×36 мм, отличающихся масштабом структурных ячеек – 50×50 ; 100×100 и 200×200 мкм – и пропорциональными (аналогично рис. 1, а) размерами щелей. В целях экспериментальной апробации масок и оценки реальной разрешающей способности объективов был собран макет МДС в традиционной конфигурации с объективами Nikon Nikkor AF 50 mm 1.4D и Nikon Nikkor AF 50 mm 1.8D (Япония) в качестве коллиматорного и камерного соответственно и с призмой с преломляющим углом 30° в качестве дисперсионного элемента. На рис. 1, б, представлен фрагмент изображения на фотоприемнике (камера Nikon D3300, матрица 16×22 мм, $24 \cdot 10^6$ пк размером 4×4 мкм), полученный при равномерной засветке входной маски излучением ртутной лампы ПРК-4. На рис. 1, в, приведен пример ЛС, отмечены линии 435 и 546 нм и неразрешенный дублет 577/579 нм. Видно, что достигаемое спектральное разрешение – не хуже 10 нм, присутствует значительная вариация спектрального разрешения в зависимости от длины волны. Пространственное разрешение оценивается в 15 мкм.

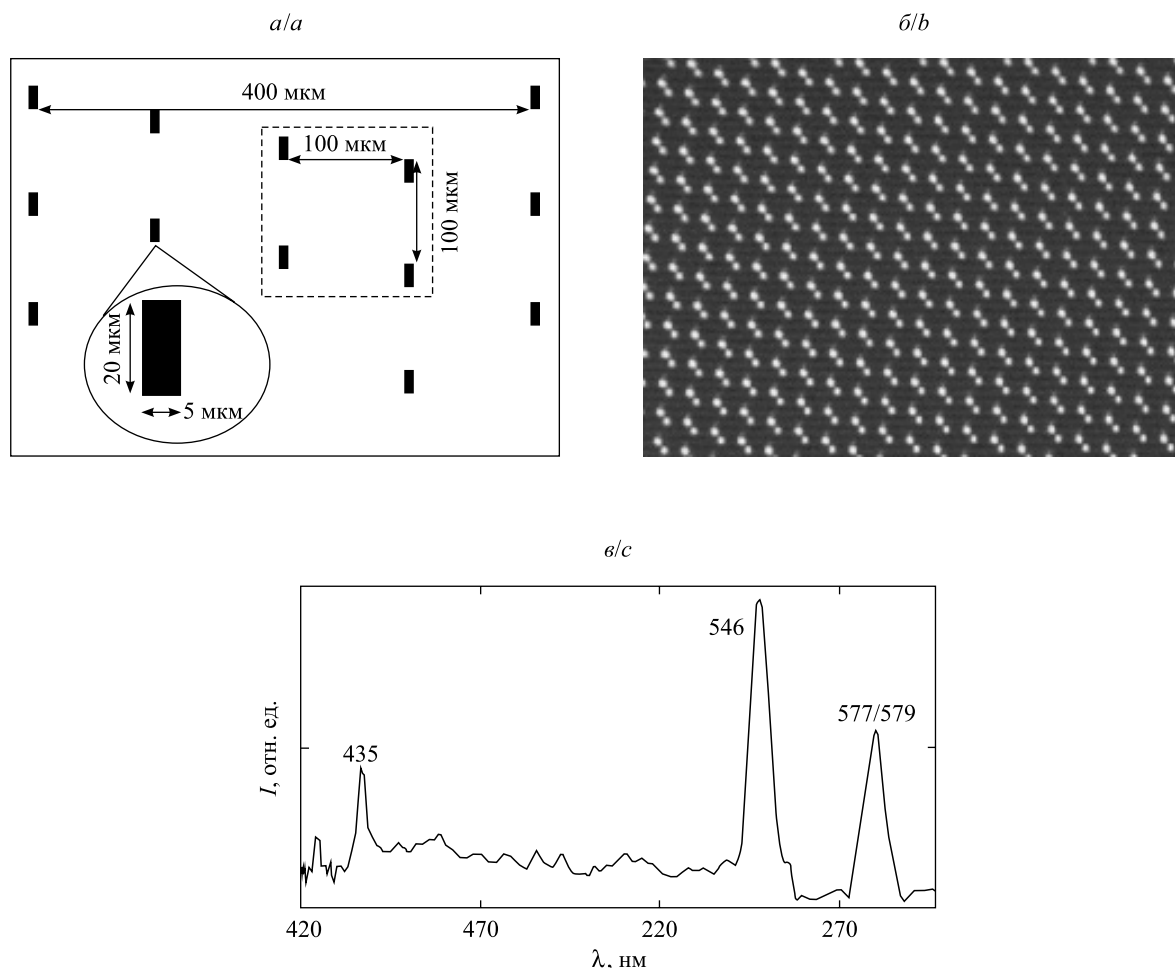


Рис. 1. Результаты экспериментальной апробации макета МДС с призмой в качестве диспергирующего элемента:
 а – структура маски; б – изображение множества ЛС на фотоприемнике;
 в – пример ЛС. I – интенсивность излучения

Fig. 1. Results of experimental approbation of a multislit dispersive spectrometer model with a prism as a dispersive element: a – mask scheme; b – image of several local spectra on the photodetector; c – example of a local spectrum. I – intensity of radiation

Предлагаемый принцип использования пропускающей дифракционной решетки в МДС иллюстрируется на рис. 2, a . На рис. 2, b , показано мнимое изображение (O_λ) точки O , соответствующее лучам с длиной волны λ , прошедшим через решетку; на фотодетекторе P ему соответствует точка O_λ^1 . Линейная дисперсия такого спектрометра следующая:

$$\frac{dl}{d\lambda} = h \frac{d\varphi}{d\lambda} \frac{l_b}{l_f} = h \frac{m}{t \cos \beta} \frac{l_b}{l_f},$$

где $\frac{d\varphi}{d\lambda}$ – угловая дисперсия решетки; h – расстояние от маски до решетки; $\frac{l_b}{l_f}$ – увеличение системы;

m и β – порядок и угол дифракции; t – период решетки (см. рис. 2). Для получения ЛС небольшой длины дифракционную решетку следует располагать на малом расстоянии от маски. К примеру, для решетки с 300 штрих/мм при $h = 5$ мм и нормальном падении для первого порядка $\frac{dl}{d\lambda} = 1,5 \cdot 10^{-3}$ мм/нм спектральный интервал $\Delta\lambda = 300$ нм отображается на длине 450 мкм. Выбором числовой апертуры входных (формирующих изображение на маске) пучков и диаметра линзы L можно блокировать прохождение пучков всех порядков дифракции, кроме первого.

Ряд факторов ограничивают возможности и область применения такой простой системы. Прежде всего, это aberrации, вносимые решеткой при большой числовой апертуре проходящих пучков. В качестве приблизительной оценки влияния этого фактора могут быть использованы результаты анализа

отклонения точек пересечения с плоскостью M (см. рис. 2) краевых лучей пучка от соответствующей точки для осевого луча (что определяет верхний предел размеров абберационного кружка рассеяния): для решетки с 300 штрих/мм при числовой апертуре (NA), равной 0,05, отклонение не превышает 10 мкм.

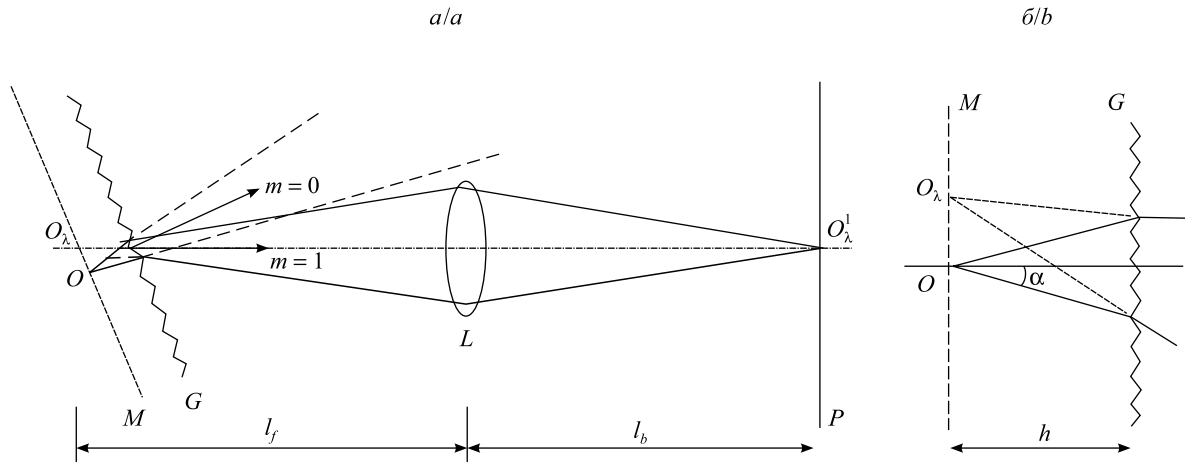


Рис. 2. Схема формирования спектрального изображения в МДС с дифракционной решеткой:
a – расположение компонентов системы и прохождение пучков разных порядков дифракции;
b – увеличенный фрагмент области, содержащей объект и дифракционную решетку.
M – щелевая маска; *G* – дифракционная решетка; *L* – объектив; *P* – фотодетектор;
 α – апертурный угол; *m* – порядок дифракции

Fig. 2. Schematic of the spectral image formation in a multislit dispersive spectrometer with a diffraction grating: *a* – system layout and propagation of different diffraction order beams; *b* – zoomed fragment of area containing object and diffraction grating. *M* – slit mask; *G* – diffraction grating; *L* – lens; *P* – photodetector; α – aperture angle; *m* – diffraction order

В реальной системе абберации объективов зачастую вносят существенный вклад в размер кружка рассеяния. Моделирование схемы, приведенной на рис. 2, в программе для оптического дизайна *ZEMAX*[®] показало, что использование объектива Nikon Nikkor AF 50 mm (увеличение варьировалось от 0,5 до 2,0) дает неудовлетворительные результаты по размерам кружков рассеяния, что, вероятно, обусловлено оптимизацией объектива для работы с удаленными объектами. В связи с этим предложен и проанализирован вариант схемы с двумя объективами (рис. 3).

Учитывая то, что объективы оптимизированы для работы с объектами, расстояние до которых много больше расстояния до изображения, целесообразно рассматривать систему, в которой оси отклоненных дифракционной решеткой пучков от разных точек поля (маски) параллельны друг другу (телецентрическая система) и для средней длины волны рабочего диапазона параллельны оптической оси объектива. Тогда угол α_0 падения осевых лучей пучков, формирующих изображение на маске, должен быть равен $\alpha_0 = \arcsin \frac{m\lambda}{t}$ (к примеру, при $m = 1$, N (количество штрихов) = $\frac{1}{t} = 300 \text{ мм}^{-1}$ и $\lambda_0 = 550 \text{ нм}$, $\alpha_0 = 0,166$).

Рабочей областью маски будем считать окружность с радиусом R_{\max} . Осевые лучи пучков от отдельных щелей маски параллельны оптической оси, поэтому они пересекаются в переднем фокусе объектива 3 – в точке O . Разместив объектив 5 так, что его соответствующий фокус совпадает с точкой O , получаем симметричную схему. В плоскости P , перпендикулярной общей оптической оси и проходящей через точку O , целесообразно разместить диафрагму, блокирующую порядки дифракции.

Размер пятна D'_0 , получаемого от точки маски, находящейся на удалении R_{\max} от центра в плоскости P в направлении оси y , приближенно равен

$$D'_0 = \frac{f \cdot 2NA}{\cos \left(\arctg \frac{R_{\max}}{f} \right)},$$

где f – фокусное расстояние объектива; NA – числовая апертура пучков, формирующих изображение на маске. Условие отсутствия пересечения пятна в плоскости D от пучка, отвечающего коротковолновому краю рабочего диапазона $\lambda_c = 400 \text{ нм}$, с пятном от пучка нулевого порядка можно оценить как

$$y_0 - y_c = f \left(\operatorname{tg} \alpha_0 - \operatorname{tg} \left(\arcsin \left(\frac{m(\lambda_0 - \lambda_c)}{t} \right) \right) \right) > D'_0, \quad (1)$$

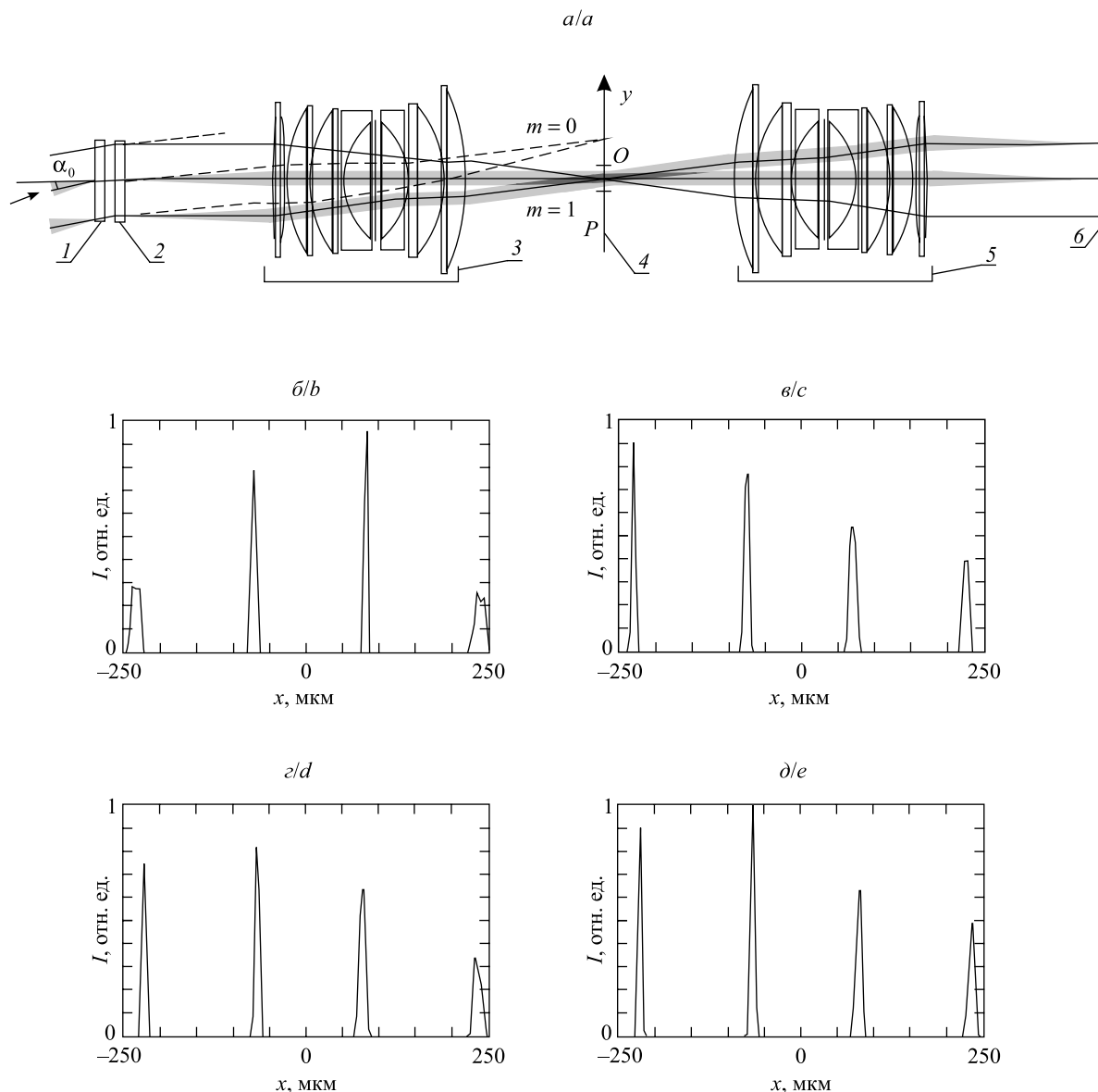


Рис. 3. Оптическая схема МДС на основе объективов Nikon Nikkor AF 50 mm (а): 1 – многосlitная маска; 2 – пропускающая дифракционная решетка; 3, 5 – объектив; 4 – диафрагма; 6 – детектор. Направление дисперсии (ось y) указано стрелкой, ось x перпендикулярна плоскости рисунка; результаты численного моделирования сечения кружков рассеяния в направлении y для центра поля (б), крайней точки поля, лежащей на биссектрисе угла между x и y (в), края поля в направлении y (д) и направлении x (е)

Fig. 3. Optical design of a multislit dispersive spectrometer based on Nikon Nikkor AF 50 mm lenses (a): 1 – multislit mask; 2 – transmission diffraction grating; 3, 5 – lens; 4 – diaphragm; 6 – detector. The dispersion direction (y -axis) is indicated by an arrow, the x -axis is perpendicular to the plane of the figure; the computer simulation results for beam spots in the y direction at the center of the field (b), at the extreme point lying on the bisector of the angle between the x and y directions (c), at the field edge in the y (d) and x (e) directions

где y_c – смещение центра кружка рассеяния пучка с λ_c относительно центра кружка пучка с λ_0 ; y_0 – смещение оси пучка нулевого порядка. Для малых углов α_0 условие (1) можно упростить:

$$NA < \frac{1}{2} \left(\alpha_0 - \frac{\lambda_0 - \lambda_c}{t} \right). \quad (2)$$

К примеру, при указанных выше параметрах из (2) следует, что NA должна быть меньше 0,05. Оптимальна овальная форма диафрагмы для отсечения порядков с размером b_y (вдоль направления y) и в перпендикулярном направлении b_x (вдоль направления x):

$$b_y = f \left(\frac{\lambda_K - \lambda_C}{t} + 2NA \right), \quad b_x = f \cdot 2NA,$$

где λ_K – длина волны длинноволнового края рабочего спектрального диапазона.

Для оценки изображающих характеристик предложенной системы проведено численное моделирование в программе *ZEMAX*[®]. Оптическая система построена на базе объективов Nikon Nikkor AF 50 mm 1.4D. Для формирования изображения на маске применялся четырехлинзовый микроскопный объектив (МО) (увеличение ~8,5 раза). Диаметр рабочего поля изображения составляет 16 мм (минимальный размер детектора камеры Nikon D3300), что соответствует диаметру поля в предметной плоскости МО, равному 1,95 мм. Для того чтобы сделать параллельными оси пучков от разных точек поля после прохождения МО, использована плоско-выпуклая линза, расположенная вблизи плоскости маски (стекло ВК7 с $n = 1,5168$, радиус составляет 85 мм, толщина – 1 мм).

При моделировании задавался размер щелей в маске 5×20 мкм, толщина ее подложки – 2 мм, толщина пропускающей дифракционной решетки – 2 мм (обе – стекло ВК7). Моделирование проводилось для спектрального диапазона 405–700 нм (центральная длина волны размером 550 нм – ось соответствующего пучка, параллельная оптической оси системы). Результаты показывают, что полуширина кружков рассеяния в направлении дисперсии $\Delta l \leq 15$ мкм (лишь для края диапазона в отдельных точках $\Delta l \leq 20$ мкм). На рис. 3, б–г, показаны сечения кружков рассеяния для длин волн 405; 500; 600 и 700 нм.

Предложенный принцип СПР с использованием многощелевой маски и дифракционной решетки в качестве диспергирующего элемента обеспечивает одновременную регистрацию пространственно-спектрального куба данных с дисперсией, практически неизменной во всем спектральном рабочем диапазоне. При этом величина линейной дисперсии системы может изменяться посредством продольного сдвига дифракционной решетки, что позволяет в широких пределах варьировать аналитические характеристики приборов, построенных на основе предлагаемого принципиального схемного решения. Проанализированный вариант оптической системы адаптирован для экспериментального прототипирования. Представляется перспективным использование прибора для СПР биообъектов, включая флуоресцентную микроспектрометрию, в исследованиях в области фотодинамической терапии.

Библиографические ссылки

1. Xie Y., Sha Z., Yu M. Remote sensing imagery in vegetation mapping : a review // *J. Plant Ecol.* 2008. Vol. 1, № 1. P. 9–23.
2. Lu G., Fei B. Medical hyperspectral imaging : a review // *J. of Biomed. Optics.* 2014. Vol. 19, № 1. P. 010901-1–010901-23.
3. Thompson D. R., Leifer I., Bovensmann H., et al. Real-time remote detection and measurement for airborne imaging spectroscopy: a case study with methane // *Atmos. Meas. Tech.* 2015. Vol. 8, № 10. P. 4383–4397.
4. Kuula J., Pölonen I., Puupponen H., et al. Using VIS/NIR and IR spectral cameras for detecting and separating crime scene details // *Proc. SPIE.* 2012. Vol. 8359. P. 83590P-1–83590P-11.
5. Qin J., Chao K., Kim M. S., et al. Hyperspectral and multispectral imaging for evaluating food safety and quality // *J. Food Eng.* 2013. Vol. 118, № 2. P. 157–171.
6. Mouroulis P., Green R. O., Chrien T. G. Design of pushbroom imaging spectrometers for optimum recovery of spectroscopic and spatial information // *Appl. Opt.* 2000. Vol. 39, № 13. P. 2210–2220.
7. Tran C. D. Principles, Instrumentation, and Applications of Infrared Multispectral Imaging, An Overview // *Anal. Lett.* 2005. Vol. 38, № 5. P. 735–752.
8. Hagen N., Kudenov M. W. Review of snapshot spectral imaging technologies // *Opt. Eng.* 2013. Vol. 52, № 9. P. 090901-1–090901-23.
9. Bland-Hawthorn J., Bryant J., Robertson G., et al. Hexabundles: imaging fiber arrays for low-light astronomical applications // *Opt. Expr.* 2011. Vol. 19, № 3. P. 2649–2661.
10. Bodkin A., Sheinis A., Norton A., et al. Video-rate chemical identification and visualization with snapshot hyperspectral imaging // *Proc. SPIE.* 2012. Vol. 8374. P. 83740C-1–83740C-13.
11. Volin C. E., Gleeson T. M., Descour M. R., et al. Portable computed-tomography imaging spectrometer // *Proc. SPIE.* 1996. Vol. 2819. P. 224–230.
12. Kudenov M. W., Dereniak E. L. Compact real-time birefringent imaging spectrometer // *Opt. Expr.* 2012. Vol. 20, № 16. P. 17973–17986.
13. Sugai H., Hattori T., Kawai A., et al. The Kyoto tridimensional spectrograph II on Subaru and the University of Hawaii 88 in telescopes // *Publ. Astron. Soc. Pac.* 2010. Vol. 122, № 887. P. 103–118.
14. Bodkin A., Sheinis A., Norton A., et al. Snapshot hyperspectral imaging – the hyperpixel array camera // *Proc. SPIE.* 2009. Vol. 7334. P. 73340H-1–73340H-11.

References

1. Xie Y., Sha Z., Yu M. Remote sensing imagery in vegetation mapping : a review. *J. Plant Ecol.* 2008. Vol. 1, No. 1. P. 9–23.
2. Lu G., Fei B. Medical hyperspectral imaging : a review. *J. Biomed. Optics.* 2014. Vol. 19, No. 1. P. 010901-1–010901-23.
3. Thompson D. R., Leifer I., Bovensmann H., et al. Real-time remote detection and measurement for airborne imaging spectroscopy: a case study with methane. *Atmos. Meas. Tech.* 2015. Vol. 8, No. 10. P. 4383–4397.

4. Kuula J., Pölonen I., Puupponen H., et al. Using VIS/NIR and IR spectral cameras for detecting and separating crime scene details. *Proc. SPIE*. 2012. Vol. 8359. P. 83590P-1–83590P-11.
5. Qin J., Chao K., Kim M. S., et al. Hyperspectral and multispectral imaging for evaluating food safety and quality. *J. Food Eng.* 2013. Vol. 118, No. 2. P. 157–171.
6. Mouroulis P., Green R. O., Chrien T. G. Design of pushbroom imaging spectrometers for optimum recovery of spectroscopic and spatial information. *Appl. Opt.* 2000. Vol. 39, No. 13. P. 2210–2220.
7. Tran C. D. Principles, Instrumentation, and Applications of Infrared Multispectral Imaging, An Overview. *Anal. Lett.* 2005. Vol. 38, No. 5. P. 735–752.
8. Hagen N., Kudenov M. W. Review of snapshot spectral imaging technologies. *Opt. Eng.* 2013. Vol. 52, No. 9. P. 090901-1–090901-23.
9. Bland-Hawthorn J., Bryant J., Robertson G., et al. Hexabundles: imaging fiber arrays for low-light astronomical applications. *Opt. Expr.* 2011. Vol. 19, No. 3. P. 2649–2661.
10. Bodkin A., Sheinis A., Norton A., et al. Video-rate chemical identification and visualization with snapshot hyperspectral imaging. *Proc. SPIE*. 2012. Vol. 8374. P. 83740C-1–83740C-13.
11. Volin C. E., Gleeson T. M., Descour M. R., et al. Portable computed-tomography imaging spectrometer. *Proc. SPIE*. 1996. Vol. 2819. P. 224–230.
12. Kudenov M. W., Dereniak E. L. Compact real-time birefringent imaging spectrometer. *Opt. Expr.* 2012. Vol. 20, No. 16. P. 17973–17986.
13. Sugai H., Hattori T., Kawai A., et al. The Kyoto tridimensional spectrograph II on Subaru and the University of Hawaii 88 in telescopes. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 2010. Vol. 122, No. 887. P. 103–118.
14. Bodkin A., Sheinis A., Norton A., et al. Snapshot hyperspectral imaging – the hyperpixel array camera. *Proc. SPIE*. 2009. Vol. 7334. P. 73340H-1–73340H-11.

Статья поступила в редколлегию 05.05.2017.
Received by editorial board 05.05.2017.