

УДК 681.785.554

МНОГОЩЕЛЕВОЙ СПЕКТРОМЕТР С ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ И ЗЕРКАЛЬНЫМИ ОБЪЕКТИВАМИ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

И. М. ГУЛИС¹⁾, А. Г. КУПРЕЕВ¹⁾, И. Д. ДЕМИДОВ¹⁾

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

Отмечено, что одной из разновидностей приборов для спектроскопии с пространственным разрешением являются многощелевые дисперсионные спектрометры для одновременной регистрации полного куба данных $I(x, y, \lambda)$. Констатируется, что применение дифракционной решетки вместо обычных для таких приборов призм позволяет существенно увеличить число регистрируемых спектральных каналов. Предложено схемное решение многощелевого дисперсионного спектрометра, в котором в качестве объективов выступают зеркала (внеосевые параболы). Благодаря этому достигается ахроматичность оптической системы, спектральный рабочий диапазон расширяется до $\sim 0,3\text{--}2,0$ мкм, упрощается оптическая система. В схемном решении использовано зеркало с фокусным расстоянием образующей параболы 127 мм, эффективным фокусным расстоянием 136,12 мм, диаметром рабочей области 50,8 мм, углом отклонения оптической оси 30° . Численное моделирование в программе оптического дизайна показало, что такая система позволяет обеспечить единовременный охват, в частности, видимого диапазона (450–750 нм), причем полуширина кружка рассеяния в направлении дисперсии не превышает 15 мкм (предел разрешения $\delta\lambda \leq 10$ нм). Проанализирована возможность изменения дисперсии и спектрального рабочего диапазона заменой решетки либо перемещением ее вдоль оптической оси.

Ключевые слова: мультиспектральный; дисперсионный; дифракционная решетка; многощелевой; зеркальный параболический объектив.

Образец цитирования:

Гулис И. М., Купреев А. Г., Демидов И. Д. Многощелевой спектрометр с дифракционной решеткой и зеркальными объективами для спектроскопии с пространственным разрешением // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2018. № 2. С. 4–10.

For citation:

Gulis I. M., Kupreyeu A. G., Demidov I. D. Multislit diffraction grating spectrometer with mirror lens for imaging spectroscopy. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2018. No. 2. P. 4–10 (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.

Authors:

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

gulis@bsu.by

Alexander G. 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 D. Demidov, postgraduate student at the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.

ivandemidov@tut.by

MULTISLIT DIFFRACTION GRATING SPECTROMETER WITH MIRROR LENS FOR IMAGING SPECTROSCOPY

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

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

Corresponding author: A. G. Kupreyeu (kupreev@bsu.by)

Multislit dispersion spectrometers with the snapshot $I(x, y, \lambda)$ data cube registration are effectively used for imaging spectroscopy. Using a diffraction grating, instead of a common prism, enables one to increase substantially the number of registered spectral channels. In the present paper we propose the optical design of a multislit dispersion spectrometer with off-axis parabolic mirror lenses. Owing to these mirrors, the optical system becomes simpler and mostly achromatic, possible working spectral range is extended to $\sim 0.3\text{--}2.0\ \mu\text{m}$. For the mirror lens in the scheme described, the focal distance of a parent parabola is 127 mm, the effective focal distance is 136.12 mm, the working diameter – 50.8 mm, the optical axis deflection angle – 30° . As demonstrated by computer simulation using the optical design program, the proposed scheme makes it possible to cover the whole, e. g., visible range (450–750 nm), FWHM in the dispersion direction being no more than 15 μm at the resolution limit $\delta\lambda \leq 10\ \text{nm}$. The possibility for variations in the dispersion and spectral range by the grating replacement or movement along the optical axis is analyzed.

Key words: multispectral; dispersive; diffraction grating; multislit; mirror parabolic lens.

Спектроскопия с пространственным разрешением (СПР) используется во множестве приложений (в числе которых дистанционное зондирование земной поверхности, медицина, биология, контроль качества продукции) как самостоятельно [1–5], так и в сочетании с другими аналитическими методами [6]. Поскольку важное значение имеет анализ нестационарных объектов [2; 3; 7], перспективны направления СПР, в рамках которых разрабатываются подходы к получению $I(x, y, \lambda)$ в одном акте измерения (snapshot hyperspectroscopy [8], или мгновенная гиперспектропия – МГС).

Одним из методов МГС является получение спектров от совокупности малых фрагментов промежуточного изображения объекта (функциональный аналог системы входных щелей дисперсионного спектрометра), где пространственная фильтрация может осуществляться матрицей микролинз [9] либо маской, содержащей множество расположенных регулярным образом отверстий (щелей) [10]. В таких приборах в качестве дисперсионного элемента обычно используются призмы, существенная спектральная зависимость дисперсии которых ограничивает возможность работы в широком спектральном диапазоне. В [11] предложено решение, основанное на использовании дифракционной решетки (ДР) в качестве диспергирующего элемента, что позволяет обеспечить пренебрежимо малую спектральную вариацию угловой дисперсии даже в широком спектральном диапазоне. Подход предусматривает размещение пропускающей ДР в непосредственной близости от многощелевой маски, что дает возможность в широких пределах варьировать дисперсию системы перемещением ДР вдоль оптической оси и существенно увеличить эффективность использования площади фотоприемника за счет направления на него только одного порядка дисперсии решетки (второй и более высокие отсекаются светофильтром, более низкие – пространственной фильтрацией посредством дополнительной диафрагмы).

Предложенное в [11] схемное решение многощелевого дисперсионного спектрометра (МДС) на основе объективов Nikon Nikkor AF 50 mm 1.4D (Япония), согласно результатам численного моделирования, обеспечивает полуширину кружков рассеяния в направлении дисперсии $\leq 15\ \mu\text{m}$, лишь для края диапазона в отдельных точках поля она составляет $\leq 20\ \mu\text{m}$ (при пропускающей дифракционной решетке с 300 штрих/мм). Однако из-за использования рефрактивных объективов со стеклянной оптикой спектральный рабочий диапазон такого инструмента фактически ограничен видимой областью; кроме того, качество изображения снижается за счет хроматических aberrаций. В связи с этим представляет интерес разработка схемного решения на основе рефлективной системы.

Для формирования промежуточного изображения объекта на многощелевой маске спектрометра может применяться любая изображающая система, обеспечивающая достаточно малые числовые апертуры (NA) падающих на маску пучков от отдельных точек объекта. Последнее требование обусловлено необходимостью уменьшения aberrаций, вносимых решеткой, работающей в неколлимированных пучках (оценки показывают, что при $NA \leq 0,05$ указанные aberrации не вносят заметного вклада в размеры кружка рассеяния, формируемого в оптической системе моделируемого спектрометра). Микроскопные объективы при входной $NA \sim 0,5$ и более чем 10-кратном увеличении, как правило, удовлетворяют требованию малости NA для пучков в области изображения.

Для обеспечения эффективного блокирования пучков неиспользуемых порядков дифракции применяется диафрагма. Преимущественно симметричное прохождение световых лучей через нее достигается за счет реализации оптической системы как телецентрической: оси пучков от отдельных точек изображения на входе параллельны друг другу, а для центральной длины волны – и оптической оси. Поскольку после микроскопа оси пучков от разных точек поля существенно неколлинеарны, требуемая телецентричность при падении на многощелевую маску обеспечивается размещенной перед многощелевой маской плоско-выпуклой линзой, практически не вносящей искажений в изображение, получаемое на фотодетекторе.

Как и в рефрактивной системе из [11], разработанный спектрометрический модуль предусматривает «встречную» установку объективов таким образом, что их передние фокальные плоскости совпадают. Входное и выходное поля размещены в задних фокальных плоскостях первого и второго объективов соответственно. Благодаря этому пучки с параллельными оптическими осями на входе и на выходе также имеют параллельные оптические оси (так как система телецентрическая), в то же время размер отверстия в диафрагме минимален. При численном моделировании исходили из числовой апертуры пучков на входе в многощелевую маску – $NA = 0,042$ (относительное отверстие 1 : 12). Базовое моделирование проводилось для рабочего спектрального диапазона 450–750 нм.

На первом этапе рассматривалась система со сферическими зеркальными объективами. Численное моделирование проводилось для z -образной и Δ -образной конфигурации пучков и объективов в нулевом порядке дифракции, входное поле – квадрат со стороной 16 мм. Результаты показали высокий уровень aberrаций: в z -образной схеме доминирует астигматизм при небольшой коме, в Δ -образной астигматизм невелик, но кома существенна. Размеры кружков рассеяния в такой системе неприемлемо велики, хотя существует возможность уменьшения aberrаций, к примеру астигматизма зеркал посредством наклонной плоскопараллельной пластинки, расположенной в пучке [12].

Снижение aberrаций может быть достигнуто в схеме с параболическими зеркалами в качестве объективов. Наименьший размер кружков рассеяния при моделировании прохождения нулевого порядка отмечен в Δ -образной схеме. В связи с этим именно такая система взята за основу для построения спектрального модуля. Для дальнейшего моделирования принималось, что толщина подложки многощелевой маски и дифракционной решетки составляет 2 мм, дифракционная решетка – пропускающая (300 штрих/мм). Материал подложки маски и решетки – кварц ($n = 1,458$).

В отличие от рефрактивной системы при использовании зеркальных объективов необходимо учитывать затенение пучка оптическими элементами при изломе оптической оси. В случае протяженного входного поля угол поворота оптической оси, необходимый для прохождения без затенения, может быть велик даже при малой числовой апертуре. Для построения системы применялись внеосевые параболы, которые обеспечивают наклон оптической оси без существенного увеличения aberrационного вклада. Поскольку в дальнейшем планируется макетирование схемы, параметры оптических элементов выбирались с учетом доступности для изготовления либо приобретения.

Общий вид оптической системы МДС приведен на рис. 1. При конструировании использовались следующие параметры объективов 8 и 10 (соответствуют параметрам одной из промышленно выпускаемых моделей внеосевой параболы): угол отклонения оптической оси $\alpha = 30^\circ$, диаметр рабочей области составляет 50,8 мм, радиус кривизны – 254 мм, эффективное фокусное расстояние – 136,12 мм, фокусное расстояние образующей параболы – 127 мм, минимальная толщина зеркал – 2,7 мм, расстояние между базовыми плоскостями зеркал – 297,65 мм. Штриховая структура решетки и покрытие маски располагаются на поверхностях, обращенных к зеркалу 7 (последнее делает возможным нанесение светопоглощающего покрытия на материал маски для уменьшения рассеянного света в системе).

Для формирования изображения на маске использован 4-линзовый микроскопный объектив (МО) (увеличение составило $\sim 8,5$ раза). Диаметр рабочего поля изображения – 16 мм (соответствует минимальному размеру детектора камеры Nikon D3300, планируемой к использованию в качестве фоторегистратора), что позволяет наблюдать в предметной плоскости МО поле диаметром 1,95 мм. Расходящиеся после микроскопа пучки от разных точек поля коллинеаризуются плоско-выпуклой линзой 4, расположенной вблизи плоскости маски (материал – кварц, радиус – 80 мм, толщина – 1 мм). Наклон линзы и пластинок к оптической оси МО нужен для обеспечения выхода по нормали к ДР пучков средней длины волны рабочего диапазона (600 нм). Моделирование в режиме непоследовательной трассировки проводилось для набора длин волн 450; 520; 600; 680; 750 нм.

Результаты численного моделирования показывают (рис. 2), что при размещении щелей маски в ряду через 400 мкм (ряд – в направлении дисперсии) со сдвигом последующих рядов на 100 мкм в направлении дисперсии оптическая система обеспечивает отображение кружков рассеяния в спектральном диапазоне 450–750 нм. При размере щелей в маске 5×20 мкм полуширина кружков в направлении дисперсии (рис. 3) преимущественно $\Delta l \leq 10$ мкм (лишь в отдельных точках поля $\Delta l \leq 15$ мкм), что

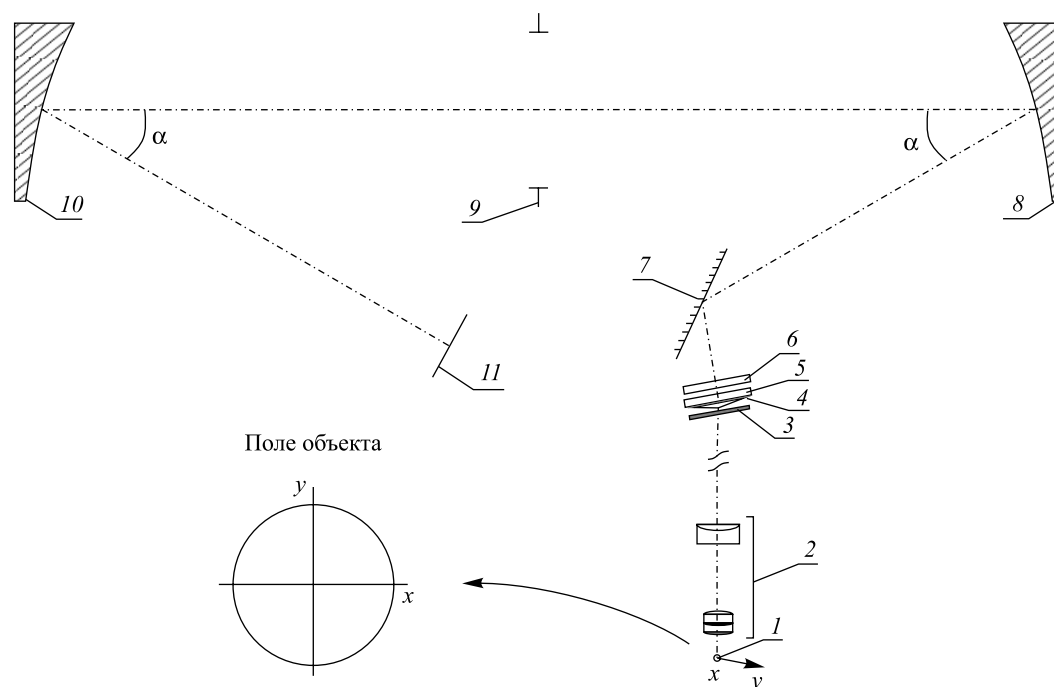


Рис. 1. Оптическая система МДС: 1 – объект; 2 – микроскоп; 3 – полосовой светофильтр; 4 – плоско-выпуклая линза; 5 – маска на стеклянной подложке; 6 – пропускающая дифракционная решетка; 7 – плоское зеркало; 8, 10 – зеркальные объективы (внеосевая парабола); 9 – диафрагма; 11 – фотодетектор.
Ось, лежащая в плоскости дисперсии, – y ; ось, ортогональная плоскости дисперсии, – x

Fig. 1. Optical design of multislit dispersive spectrometer: 1 – object; 2 – microscope; 3 – bandpass filter; 4 – plain-convex lens; 5 – mask on a glass substrate; 6 – transmissive diffractive grating; 7 – flat mirror; 8, 10 – mirror lenses (off-axis parabola); 9 – window; 11 – photodetector.
Axis laying in dispersion direction is y , axis normal to dispersion direction is x

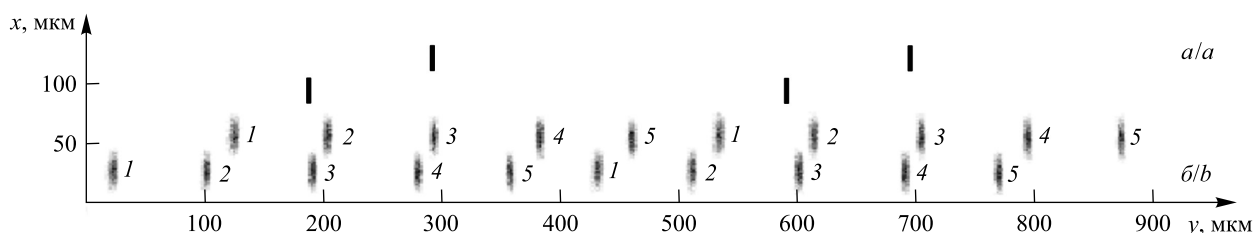


Рис. 2. Результаты моделирования спот-диаграмм от 4 щелей маски (а) для длин волн (б), нм:
1 – 750; 2 – 680; 3 – 600; 4 – 520; 5 – 450

Fig. 2. Modeled spot-diagrams for a mask with 4 slits (a) and beams of following wavelengths (b), nm:
1 – 750; 2 – 680; 3 – 600; 4 – 520; 5 – 450

соответствует спектральному разрешению не хуже 10 нм (линейная дисперсия $\sim 1,2 \cdot 10^{-3}$ мм/нм). Полуширина в направлении оси x (ортогональном дисперсии) не превышает 25–30 мкм. Таким образом, рассматриваемая рефлективная схема пригодна для реализации на ее основе МДС. Более того, спектральное разрешение в ней превосходит полученное в рефрактивной системе [11]. Схемное решение допускает применение зеркальных объективов с параметрами, выбор которых определяется требованиями по линейной дисперсии и габаритам системы. Однако при использовании зеркал с большим углом отклонения оптической оси α вероятно увеличение aberrаций, также следует учитывать, что для объективов с большим α может оказаться затруднительным обеспечить размещение диафрагмы (см. рис. 1, 9) (необходимой для блокирования 0-го и –1-го порядков без виньетирования +1-го порядка) в общем переднем фокусе.

Разработанное схемное решение МДС благодаря применению рефлективных объективов предоставляет возможность расширить рабочий спектральный диапазон до $\sim 0,3$ – $2,0$ мкм (полоса пропускания кварцевых элементов), обеспечивая предел разрешения не хуже $\delta\lambda = 10$ нм. При этом система сохраняет все преимущества использования дифракционной решетки в качестве диспергирующего элемента –

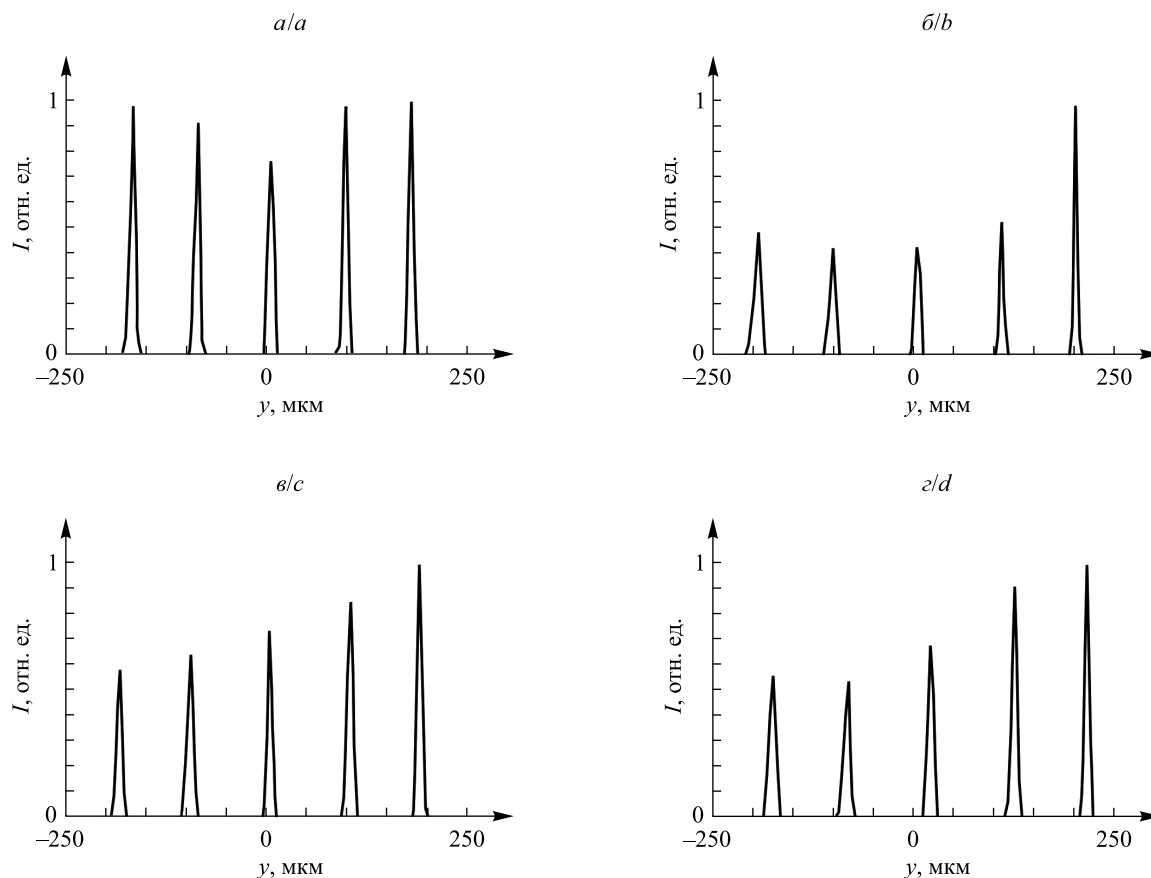


Рис. 3. Сечения кружков рассеяния в направлении дисперсии для точечных источников, лежащих в центре поля объекта (а), на краю поля в направлении дисперсии y (см. рис. 1) (б) и перпендикулярно направлению дисперсии x (в), а также точки на краю поля, равноудаленной от точек в направлениях x и y (г).
Длины волн (слева направо), нм: 750; 680; 600; 520; 450

Fig. 3. Cross-section of spots in dispersion direction for point sources: in object field center (а), on the edge of field in dispersion direction y (see fig. 1) (б) and direction orthogonal to dispersion direction x (с), on the edge of field equidistant of edge points in x - and y -directions (д).
Wavelengths (left-to right), nm: 750; 680; 600; 520; 450

единовременную регистрацию куба данных с практически неизменной во всем рабочем спектральном диапазоне дисперсией, которую можно варьировать в широких пределах продольным сдвигом решетки. Последнее обстоятельство обеспечивает высокую функциональную гибкость системы. Так, в рамках промоделированной схемы можно, например, удвоить спектральное разрешение, увеличив вдвое расстояние от маски до решетки. При этом, естественно, вдвое сокращается спектральный диапазон, укладываемый на фотоприемную матрицу без перекрытия спектров от соседних по горизонтали щелей. Важно отметить, что вследствие малости длины спектров переход к новому диапазону, например от 450–600 к 600–750 нм, в обсуждаемом случае реализуется простым переключением соответствующих полосовых фильтров и не требует поворота диспергирующего элемента.

Дисперсию и рабочий спектральный диапазон можно перестраивать как изменением расстояния от маски до решетки, так и заменой дифракционной решетки. Например, при решетке с 300 штрих/мм, расположенной на расстоянии 2,4 мм от подложки маски (вдоль нормали), ширина рабочего спектрального диапазона составляет 300 нм. Другие примеры реализации различных спектральных диапазонов приведены в таблице. Минимально допустимое расстояние между подложкой и решеткой определяется требуемым теоретическим пределом разрешения системы, так как чем ближе решетка к маске, тем меньше эффективное число штрихов дифракционной решетки и спектральный предел разрешения.

Отметим, что aberrации системы оказывают существенное влияние на достижимый предел спектрального разрешения. Так, в случаях, когда углы падения пучков на объективы больше или пучки имеют большой диаметр, aberrации также выше и предел разрешения увеличивается (например, при максимальном сближении решетки и маски их рабочие поверхности разделяет стеклянная подложка толщиной 2 мм – для решетки с 600 штрих/мм, а также для решетки с 150 штрих/мм). С другой стороны, в случае

пучков малого диаметра, падающих практически только на центральную область зеркал, качество изображения существенно улучшается (для решетки с 600 штрих/мм). Моделирование подтверждает, что во всех указанных случаях пучки нулевого порядка дифракции отсекаются диафрагмой (см. рис. 1, 9). Размер отверстия диафрагмы определяется из соображений минимизации виньетирования при полном затенении пучков прочих порядков дифракции. В упомянутой системе с решеткой, имеющей 300 штрих/мм, моделировалась диафрагма с круглым отверстием диаметром 20 мм, которая оставалась пригодной и при смещении дифракционной решетки вдоль оптической оси.

Возможности перестройки дисперсии и рабочего спектрального диапазона в МДС
Possible dispersion and working spectral range variants in multislit dispersive spectrometer

Дифракционная решетка, штрих/мм	Расстояние от подложки маски до решетки, мм	Ширина рабочего спектрального диапазона, нм	Пример спектрального диапазона, нм	Предел спектрального разрешения*, нм
300	2,4	300	450–750	10
300	5,0	180	320–500	5
300	0	560	330–890	22
600	3,0	120	240–360	3
150	3,0	800**	700–1500	60

*Для большинства точек поля. **Отображается на 200–250 мкм детектора.

Благодаря возможности оперативного получения пространственно-спектральной информации с повышенным спектральным разрешением в широком спектральном диапазоне и технологической простоте использование приборов на базе МДС представляется перспективным для многих приложений СПР, в том числе спектроскопии биообъектов (флуоресцентной микроспектрометрии) и медицинских приложений (фотодинамической терапии). Применение промышленно выпускаемых зеркал позволяет упростить макетирование и производство приборов, сократить их стоимость.

Библиографические ссылки

1. Lu G., Fei B. Medical hyperspectral imaging : a review // J. Biomed. Opt. 2014. Vol. 19, № 1. Article ID: 010901. DOI: 10.1117/1.JBO.19.1.010901.
2. 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. DOI: 10.5194/amt-8-4383-2015.
3. Gao L., Smith R. T. Optical hyperspectral imaging in microscopy and spectroscopy – a review of data acquisition // J. Biophotonics. 2015. Vol. 8, issue 6. P. 441–456. DOI: 10.1002/jbio.201400051.
4. Kuula J., Pölönen I., Puupponen H.-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. DOI: 10.1117/12.918555.
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, issue 2. P. 157–171. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2013.04.001.
6. Torabzadeh H., Morsdorf F., Schaepman M. E. Fusion of imaging spectroscopy and airborne laser scanning data for characterization of forest ecosystems : a review // ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 2014. Vol. 97. P. 25–35. DOI: 10.1109/igarss.2014.6946660.
7. Lefebvre J. Real time hyperspectroscopy for dynamical study of carbon nanotubes // ACS Nano. 2016. Vol. 10, issue 10. P. 9602–9607. DOI: 10.1021/acsnano.6b05077.
8. Hagen N., Kudenov M. W. Review of snapshot spectral imaging technologies // Opt. Eng. 2013. Vol. 52, № 9. P. 090901-1–090901-23. DOI: 10.1117/1.OE.52.9.090901.
9. 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. DOI: 10.1086/650397.
10. Bodkin A., Sheinis A., Norton A., et al. Snapshot hyperspectral imaging – the hyperpixel array camera // Algorithms and technologies for multispectral, hyperspectral, and ultraspectral imagery XV (Orlando, 13–17 April, 2009) : proc. SPIE. 2009. Vol. 7334. P. 73340H-1–73340H-11.
11. Гулис И. М., Купреев А. Г., Демидов И. Д. и др. Многоцелевой спектрометр с дифракционной решеткой для спектроскопии с пространственным разрешением // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. № 3. С. 4–11.
12. Voropai E. S., Gulis I. M., Kupreev A. G. Astigmatism correction for a large-aperture dispersive spectrometer // J. Appl. Spectrosc. 2008. Vol. 75, issue 1. P. 150–155. DOI: 10.1007/s10812-008-9000-2.

References

1. Lu G., Fei B. Medical hyperspectral imaging : a review. *J. Biomed. Opt.* 2014. Vol. 19, No. 1. Article ID: 010901. DOI: 10.1117/1.JBO.19.1.010901.
2. 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. DOI: 10.5194/amt-8-4383-2015.

3. Gao L., Smith R. T. Optical hyperspectral imaging in microscopy and spectroscopy – a review of data acquisition. *J. Biophotonics*. 2015. Vol. 8, issue 6. P. 441–456. DOI: 10.1002/jbio.201400051.
4. Kuula J., Pölonen I., Puupponen H.-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. DOI: 10.1117/12.918555.
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, issue 2. P. 157–171. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2013.04.001.
6. Torabzadeh H., Morsdorf F., Schaepman M. E. Fusion of imaging spectroscopy and airborne laser scanning data for characterization of forest ecosystems : a review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2014. Vol. 97. P. 25–35. DOI: 10.1109/igarss.2014.6946660.
7. Lefebvre J. Real time hyperspectroscopy for dynamical study of carbon nanotubes. *ACS Nano*. 2016. Vol. 10, issue 10. P. 9602–9607. DOI: 10.1021/acs.nano.6b05077.
8. Hagen N., Kudenov M. W. Review of snapshot spectral imaging technologies. *Opt. Eng.* 2013. Vol. 52, No. 9. P. 090901-1–090901-23. DOI: 10.1117/1.OE.52.9.090901.
9. 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. DOI: 10.1086/650397.
10. Bodkin A., Sheinis A., Norton A., et al. Snapshot hyperspectral imaging – the hyperpixel array camera. *Algorithms and technologies for multispectral, hyperspectral, and ultraspectral imagery XV* (Orlando, 13–17 April, 2009) : proc. SPIE. 2009. Vol. 7334. P. 73340H-1–73340H-11.
11. Gulis I. M., Kupreyeu A. G., Demidov I. D., et al. Multislit diffraction grating spectrometer for imaging spectroscopy. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2017. No. 3. P. 4–11 (in Russ.).
12. Voropai E. S., Gulis I. M., Kupreev A. G. Astigmatism correction for a large-aperture dispersive spectrometer. *J. Appl. Spectrosc.* 2008. Vol. 75, issue 1. P. 150–155. DOI: 10.1007/s10812-008-9000-2.

Статья поступила в редакцию 25.11.2017.
Received by editorial board 25.11.2017.