

ПОЛУЧЕНИЕ И АНАЛИЗ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКИ НА ВЫПУКЛОЙ ПОВЕРХНОСТИ КАК ДИСПЕРГИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА

Карпеев С.В., Хонина С.Н., Харитонов С.И.

Институт систем обработки изображений РАН,

*Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет) (СГАУ)*

Аннотация

Исследуется диспергирующий элемент в виде дифракционной решётки на выпуклой зеркальной поверхности. Измерен профиль штриха изготовленной решётки, и проведено моделирование распределения энергии света по дифракционным порядкам в зависимости от длины волны для видимого диапазона длин волн. Разработана и изготовлена оптомеханика для необходимых юстировок элементов спектрального прибора. Проведена юстировка оптической схемы, и получены изображения точки для трёх длин волн монохроматического излучения. Распределения энергии света по дифракционным порядкам и координаты максимумов согласуются с результатами моделирования.

Ключевые слова: спектрометр, профиль штриха, распределения энергии по дифракционным порядкам, юстировка макетной оптической схемы.

Цитирование: Карпеев, С.В. Исследование дифракционной решётки на выпуклой поверхности как диспергирующего элемента / С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 211-217.

Введение

Перспективными спектрометрами для использования на малых КА являются изображающие спектрометры в конфигурации Оффнера [1–5]. Основными преимуществами таких спектрометров являются их компактный размер и возможность снижения хроматических aberrаций и дисторсии до низкого уровня. В простейшем случае спектрометр Оффнера содержит два концентрических зеркала. В качестве диспергирующего элемента используется дифракционная решётка, выполненная на одном из зеркал. Использование дифракционной решётки позволяет достичь большей компактности и меньших хроматических aberrаций. Моделирование работы такого спектрометра [6–8] подтвердило высокие характеристики получаемых в спектральных приборах изображений.

Наиболее сложным в реализации элементом спектрального прибора является дифракционная решётка спектрографа, выполненная на одном из зеркал, в нашем случае на выпуклом сферическом зеркале. Основными технологиями выполнения таких решёток являются нарезка на специальной делительной машине и голографическая литография. В России обе технологии представлены на НПО ГИПО (г. Казань), входящем в холдинг «Швабе». В качестве изображающего объектива спектрометра на этапе макетирования целесообразно использовать один из бытовых телеобъективов с соответствующими оптическими характеристиками, поскольку макетные испытания проводятся для видимого диапазона длин волн. Для видимого диапазона длин волн (430–630 нм) такой объектив вполне заменяет специальный объектив, разработанный для спектрометра [6, 7].

1. Изготовление и исследование решётки спектрометра

Существуют различные способы управления распределением энергии по дифракционным порядкам для дифракционных решёток. Например, для бинарных решёток можно получать произвольные распределения, формируя квазипериодические фазовые функции путём наложения нескольких дифракционных решёток [9]. Бинарные решётки наиболее технологичны при изготовлении методами литографии, но могут давать лишь симметричные порядки, поэтому их энергетическая эффективность ограничена. Наибольшую энергетическую эффективность, сосредоточенную в одном дифракционном порядке, обеспечивают решётки с треугольным профилем (решётки «с блеском»), но они наиболее сложны с технологической точки зрения. Обсуждению достоинств и недостатков различных типов дифракционных решёток, причём с учётом их технологической реализации, и будет посвящён данный раздел.

Предприятие НПО ГИПО имеет необходимое оборудование и опыт изготовления выпуклых и вогнутых дифракционных решёток [10]. Для пространственных частот в десятки линий на миллиметр, которые должны быть реализованы для рассчитанного спектрометра, оптимальной является технология нарезки. Разработанный чертёж решётки спектрометра показан на рис. 1.

Идеальной, как уже указывалось выше, является решётка с треугольным профилем, однако изготовитель не имеет возможности держать набор резцов для большого спектра пространственных частот, поэтому реализация формы профиля на данном предприятии может осуществляться лишь приближённой аппроксимацией в пределах зоны. Результат измерения одного из реальных профилей решётки на

микроинтерферометре Zygo New View 7000 приведён на рис. 2.

По данному рисунку можно сделать вывод, что для видимого диапазона профиль имеет высоту, значительно превышающую оптимальную высоту отражательной решётки $\lambda/4$. Однако и такой высокий профиль может обеспечить необходимые результаты, если высота соответствует набегу фазы по моду-

лю π для соответствующих длин волн. Таким образом, требуется предварительное численное исследование для реального профиля решётки. Очевидно, что исследование состоит в вычислении разложения в ряд Фурье (дающего распределение амплитуды света по порядкам дифракции) фазовых функций, соответствующих исследуемым профилям для разных длин волн.

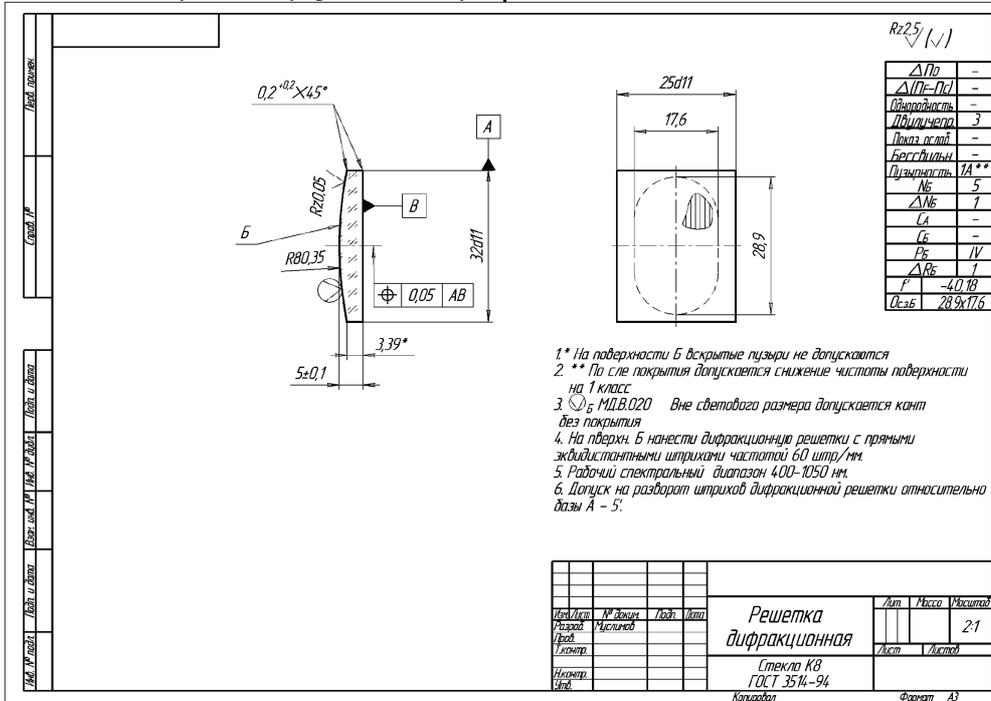


Рис. 1. Рабочий чертёж дифракционной решётки

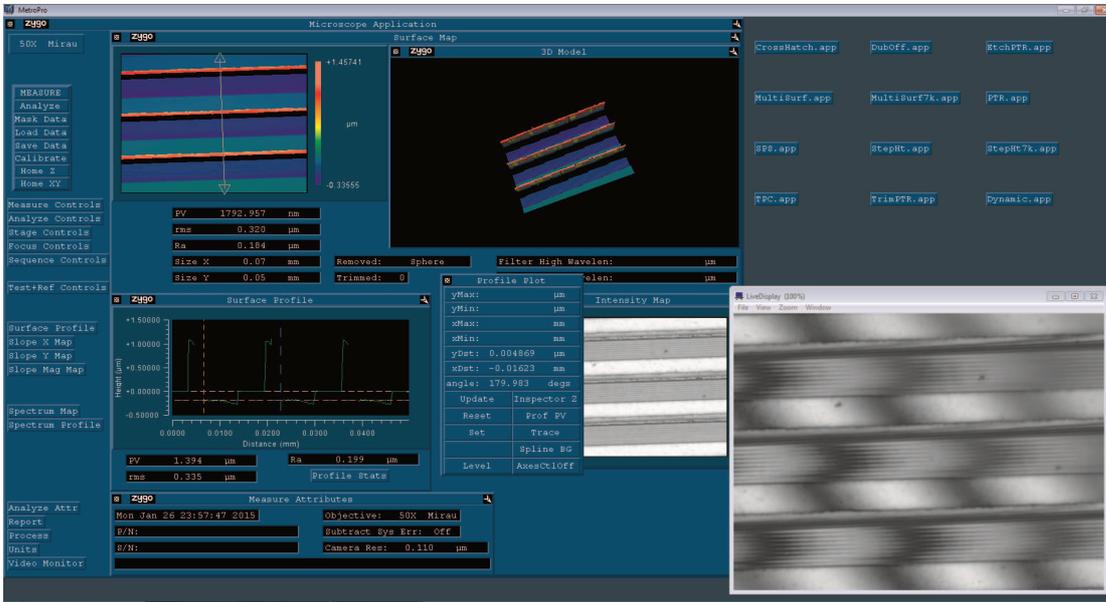


Рис. 2. Вид окна программы при измерении профиля дифракционной решётки на поверхности зеркала

Изготовители представили 3 образца профилей на двух образцах решёток, причём на одной из них (решётка 1) было выполнено два участка с разными профилями, один из которых был получен путём дополнительного жидкостного травления нарезанного профиля. Графики профилей, полученные путём обработки измерений, проведённых на микроинтерфе-

рометре, приведены на рис. 3. Здесь профиль рис. 3а соответствует неотравленному участку решётки 1, профиль рис. 3б – протравленному, а профиль рис. 3в – решётке 2.

Видно, что травление (профиль рис. 3б) привело к полному удалению зубца высотой около 2 мкм, присутствующего на неотравленном профиле. Кроме того,

появились весьма значительные шумы – видимо, травление было неізотропным. И визуально протравленный участок имеет слегка матовую поверхность. Результаты моделирования дифракции света для разных длин волн на трёх измеренных профилях приведены на рис. 4 в том же порядке, что и профили на рис. 3. Кроме результатов для реальных профилей, на рис. 4з приведён результат для идеального прямоугольного профиля высотой 0,13 мкм. Из данного рисунка видно, что реальный профиль рис. 4б можно рассматривать как приближение прямоугольного с высотой 0,5λ для средней длины волны.

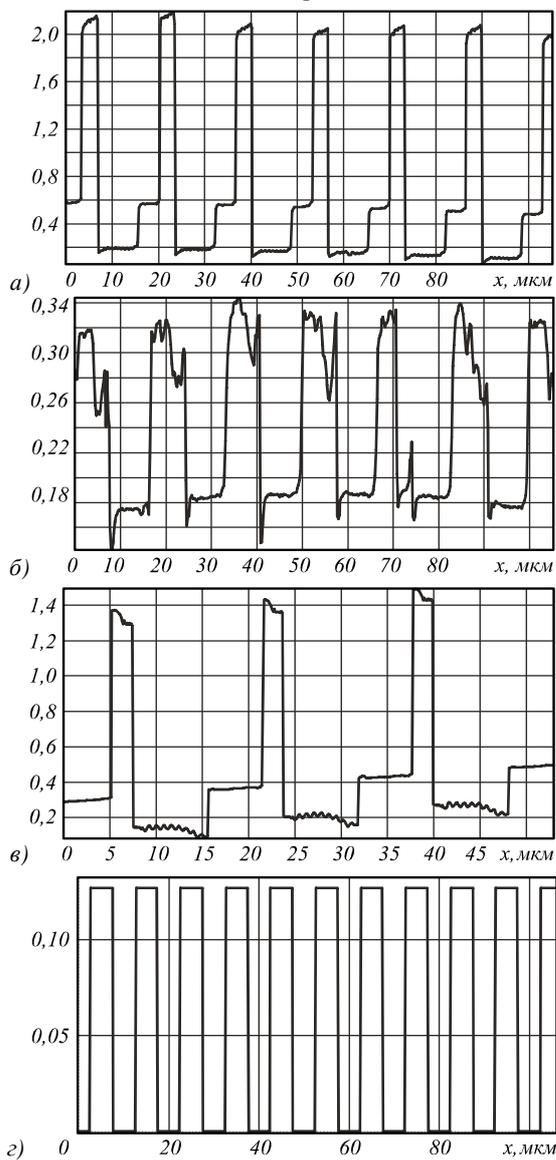


Рис. 3. Вид профилей отражающих решёток

Результаты моделирования показывают существенную асимметрию в картине дифракции между +1 и -1 порядками, особенно для профилей рис. 3а и рис. 3в. Это объясняется асимметричным профилем решётки. Эффективность для разных длин волн существенно зависит от формы профиля решётки, причём рабочий первый порядок у разных решёток находится по разные стороны от оптической оси. В среднем эффективность в первом порядке для разных длин волн меняется в пределах 15–35%.

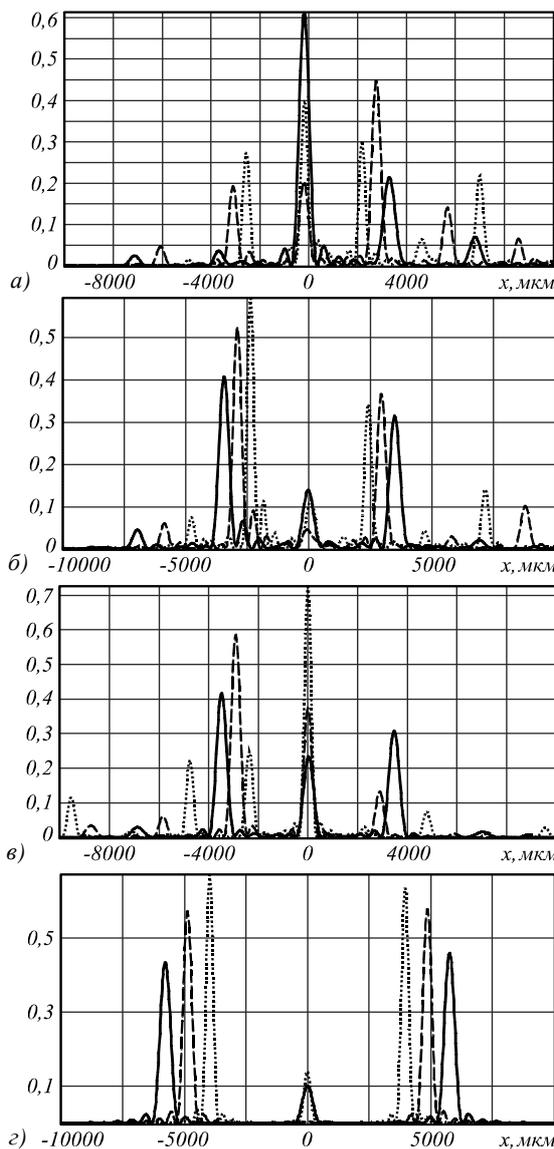


Рис. 4. Распределение порядков в фокальной плоскости: для излучения 440 нм (точечная линия), 540 нм (пунктирная линия), 640 нм (сплошная линия), для соответствующих профилей на рис. 3

Натурные эксперименты с измерителем мощности показали результаты, близкие к расчётным. В точности сопоставить эти результаты не представляется возможным, поскольку области, где проводились измерения профиля и области засветки, при измерении мощности существенно различаются по размерам, а профиль решётки может меняться по апертуре, что будет показано далее. Если оценивать по результатам моделирования в целом, то, по нашему мнению, наилучший результат показывает профиль рис. 3б. Однако использование решётки с таким профилем затруднено тем, что травление проводилось только для половины площади решётки. Граница раздела протравленной и непротравленной зон перпендикулярна штрихам и не является резкой, следовательно, свойства спектров будут меняться по высоте щели и, следовательно, по апертуре изображения. Данный эффект в следующем разделе продемонстрирован на-

глядно на экспериментальных распределениях интенсивности, полученных при юстировке спектрометра.

2. Сборка и юстировка оптической схемы спектрометра

Эскиз оптической системы спектрометра со всеми необходимыми размерами и допусками приведён на рис. 5.

Основным отличием от системы, рассчитанной в [6, 7], является замена штатного объектива на бытовой телеобъектив «Юпитер–21М», предназначенный для фотоаппаратов типа «Зенит». Этот объектив име-

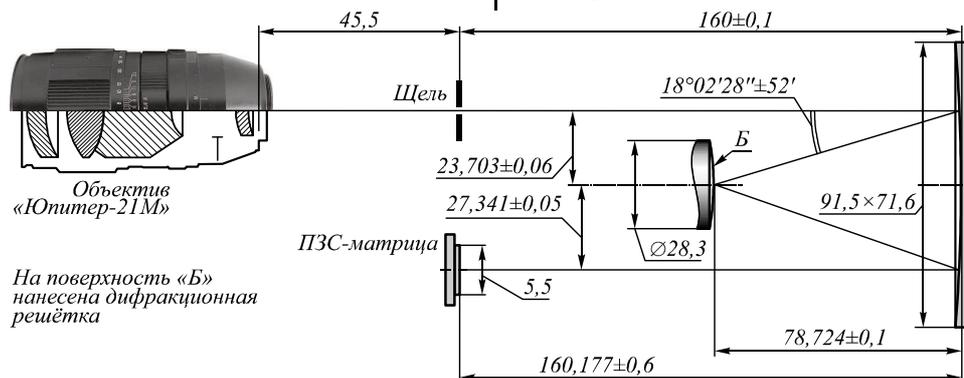


Рис. 5. Оптическая система спектрометра

При заводском способе производства оптико-механических приборов необходимая точность установки элементов обеспечивается точным изготовлением механической конструкции с держателями оптики. И лишь для наиболее критичных в плане точности установки элементов предусмотрены дополнительные приточки установочных элементов в процессе сборки и юстировки. Из рис. 5 видно, что допуск на установку основных элементов схемы не превышает 0,06–0,1 мм линейной погрешности и 52' угловой. Обеспечить такие точности в процессе изготовления механических деталей макета не представлялось возможным, поэтому все элементы оптической системы были смонтированы на общем основании из дюралюминия толщиной 8 мм с креплением на оптико-механических юстировочных приспособлениях производства фирмы Standa. Эти приспособления обеспечивали поперечное перемещение щели, регулировку сферического зеркала вдоль оптической оси и по высоте, регулировку решётки поперёк оптической оси и вдоль оптической оси и, наконец, регулировку ПЗС-матрицы вдоль и поперёк оптической оси. Указанные перемещения вкупе со штатной наводкой на резкость объектива позволяют полностью реализовать все степени свободы для регулировки взаимного положения элементов схемы.

Основной целью первого этапа испытаний было получение изображения монохроматического точечного источника света для разных длин волн. Эта задача становится выполнимой при наличии перестраиваемой в широком диапазоне лазерной системы EKSPLA NT-200. У этого лазера пучок носит астигматический характер. Для улучшения пучка применялась пространственная фильтрация в точечном источнике с 20× мик-

ет основные параметры (светосила и фокусное расстояние), сходные с параметрами штатного объектива. Решётка спектрометра изготавливалась и приобреталась в комплекте с зеркалом на НПО ГИПО. Щель спектрометра шириной 15 мкм была изготовлена на фотопостроителе CLWS-200 в виде маски из хрома. ПЗС-камера имеет 2048×1526 пикселей, размер чувствительной области – 5×6,55 мм, размер пиксела – 3,5 мкм. При испытаниях макета такой малый размер пиксела позволяет более подробно изучить пятно рассеяния.

рообъективом и точечной диафрагмой 40 мкм. Но всё равно пятно на выходе точечного источника имеет эллиптическую форму. Экспериментальным путём было выяснено, что фокальное пятно объектива «Юпитер 21М» при освещении сколлимированным пучком от такого источника становится симметричным лишь при диафрагмировании до относительного отверстия 1:16. При открывании диафрагмы пучок становится эллиптическим и освещает края щели. На ПЗС при этом мы также видим изображение края щели. Что важно, щель расположена параллельно штрихам решётки, и её расфокусированное изображение, представляющее собой полосу, падает практически на всю длину штрихов дифракционной решётки. Поэтому после решётки в расфокусированном изображении мы видим разные распределения энергии между порядками, соответствующие разным частям решётки (профилям рис. 3а и рис. 3б). На рис. 6 приведены соответствующие распределения интенсивности для трёх длин волн – 430 нм (синий, рис. 6а), 530 нм (зелёный, рис. 6б) и 630 нм (красный, рис. 6в). Наиболее наглядным является распределение рис. 6а), где имеются нулевой, +1 и –1 порядки дифракции. В левой части рисунка видно, как исчезает нулевой порядок и остаются примерно одинаковые +1 и –1 порядки, что соответствует результатам, показанным на рис. 4б. Эта часть решётки имеет профиль типа рис. 3б. А в правой части видна асимметрия в распределении между +1 и –1 порядками, что соответствует профилю типа рис. 3а. Подобные картины наблюдаются и для зелёного (рис. 6б), и красного (рис. 6в) цветов. В силу дисперсионных свойств решётки здесь один из первых порядков уже уходит за пределы поля ПЗС-матрицы, а верхний порядок на рисунках является нулевым.

Данные изображения носят тестовый характер и не требуют точной юстировки схемы. Для получения рабочих изображений точки была установлена вторая решётка (профиль рис. 3в). Юстировка схемы осуществлялась при задиафрагмированном объективе. Вначале осуществлялась наводка объектива на резкость в плоскость щели и совмещение щели и полученного изображения точки. Мы добивались получения пятна круглой формы после прохождения щели без дифракционных полос, свидетельствующих о попадании света на края щели. Дальнейшая юстировка оптической

системы состояла в последовательной регулировке положения элементов по ходу лучей света до достижения безабберационного изображения точки. Были получены изображения точки в разных цветах. На рис. 7а приведено увеличенное изображение пятна рассеяния точки в синем цвете. Размеры максимума по уровню 0,5 в пятне рассеяния составляют 4×4 пиксела, то есть около 15 мкм, что соответствует ширине щели 15 мкм и паспортному разрешению объектива «Юпитер-21М». Отсюда можно сделать вывод, что потери разрешения в спектрометре нет.

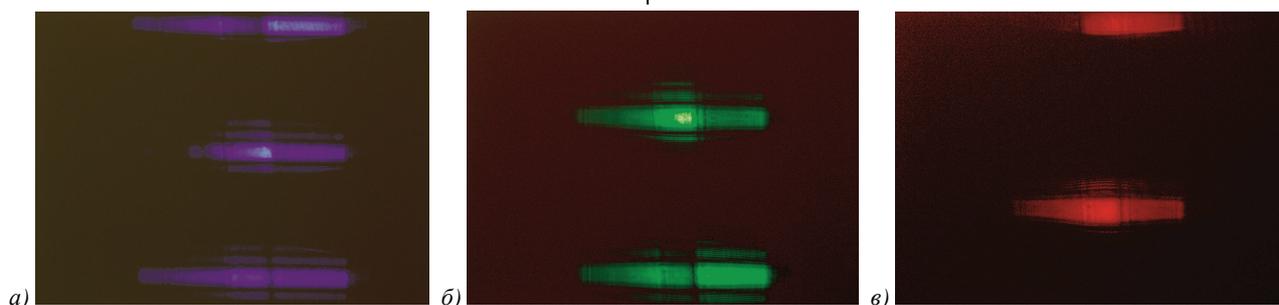


Рис. 6. Исследование эффективности разных типов решёток

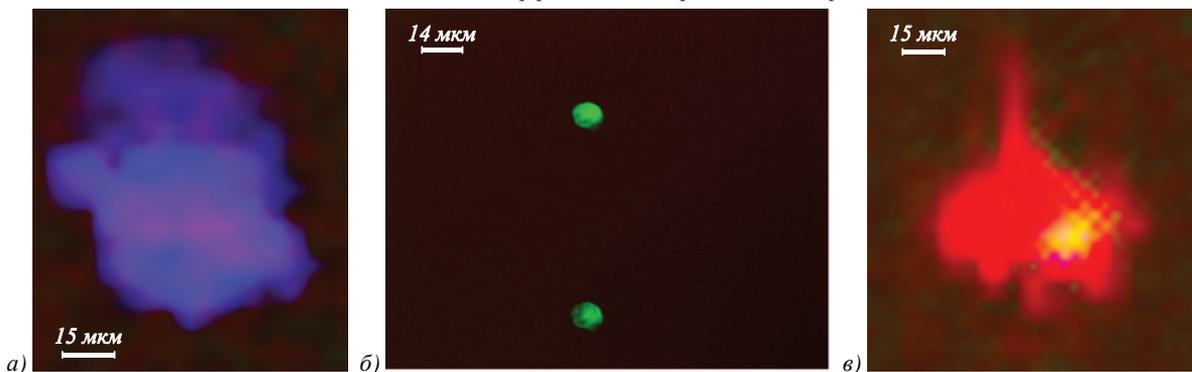


Рис. 7. Изображения точек для разных цветов

Для зелёного (рис. 7б) приведено дефокусированное изображение для рабочего первого порядка, который находится внизу рисунка. Видно соотношение интенсивностей, примерно соответствующее рис. 4в, и даже границы лепестков диафрагмы, что свидетельствует о правильной настройке объектива на бесконечность. Также приведено изображение пятна рассеяния точки для красного цвета (рис. 7в). Изображение в первом порядке здесь примерно в два раза интенсивнее, чем в нулевом, что соответствует результатам моделирования. Вид пятна рассеяния несколько хуже, чем для синего, но если рассматривать размеры максимума, то они приблизительно те же. Паразитная засветка вокруг максимума просто стала лучше видна, поскольку увеличилась общая интенсивность, а никакой коррекции освещённости не делалось.

Измеренное расстояние между изображениями точек синего и красного цветов в первом порядке дифракции составляет около 1300 мкм, что соответствует результатам расчётов и моделирования.

Заключение

Разработаны чертежи, и изготовлены основные зеркальные элементы спектрометра, в том числе дифрак-

ционная решётка на выпуклой сферической поверхности. Измерен профиль штриха изготовленной дифракционной решётки, и проведено моделирование распределения энергии света по дифракционным порядкам в зависимости от длины волны для видимого диапазона длин волн. Разработана и изготовлена оптомеханика для необходимых юстировок элементов спектрометра. Проведена юстировка макетной оптической схемы, и получены изображения точки для трёх длин волн монохроматического излучения. Распределения энергии света по дифракционным порядкам и координаты максимумов согласуются с результатами моделирования. Достигнутое разрешение соответствует паспортному разрешению изображающего объектива.

Благодарности

Авторы выражают благодарность А.А. Белокопытову за разработку чертежей и изготовление решётки.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда №14-31-00014.

Литература

1. Mouroulis, P. Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy / P. Mouroulis,

- R.G. Sellar, D.W. Wilson, J.J. Shea, R.O. Green // Optical Engineering. – 2007. – Vol. 46(6) – P. 063001.
2. **Mouroulis, P.** Convex grating types for concentric imaging spectrometers / P. Mouroulis, D.W. Wilson, P.D. Maker, R.E. Muller // Applied Optics. – 1998. – Vol. 37(31), – P. 7200-7208.
 3. **Prieto-Blanco, X.** Analytical design of an Offner imaging spectrometer / X. Prieto-Blanco, C. Montero-Orille, B. Couce, R. de la Fuente // Optics Express. – 2006. – Vol. 14(20). – P. 9156-9168.
 4. **Prieto-Blanco, X.** The Offner imaging spectrometer in quadrature / X. Prieto-Blanco, C. Montero-Orille, H. González-Nuñez, M.D. Mouriz, E.L. Lago, R. de la Fuente // Optics Express. – 2010. – Vol. 18(12). – P. 12756-12769.
 5. **Lee, J.H.** Optical Design of a Compact Imaging Spectrometer for STSAT3 / J.H. Lee, T.S. Jang, H.-S. Yang, S.-W. Rhee // Journal of the Optical Society of Korea. – 2008. – Vol. 12(4). – P. 262-268.
 6. **Казанский, Н.Л.** Моделирование работы гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, в рамках геометрической оптики / Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов, А.В. Карсаков, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 271-280.
 7. **Досколович, Л.Л.** О коррекции эффекта перекрытия дифракционных порядков в спектрометре на основе схемы Оффнера / Л.Л. Досколович, Е.А. Безус, Д.А. Быков // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 777-781.
 8. **Казанский, Н.Л.** Моделирование работы космического гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера / Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов, Л.Л. Досколович, А.В. Павельев // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 1. – С. 70-76.
 9. **Berezny, A.E.** Computer-generated holographic optical elements produced by photolithography / A.E. Berezny, S.V. Karpeev, G.V Uspleniev // Optics and Lasers in Engineering. – 1991. – Vol. 15(5). – P. 331-340.
 10. **Знаменский, М.Ю.** Пропускающие нарезные дифракционные решетки для ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областей спектра / М.Ю. Знаменский, Я.К. Лукашевич, А.Ф. Скочилов, Н.А. Федуллова // Оптический журнал. – 2014. – № 3. – С.51-54.

References

1. **Mouroulis, P.** Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy / P. Mouroulis, R.G. Sellar, D.W. Wilson, J.J. Shea, R.O. Green // Optical Engineering. – 2007. – Vol. 46(6) – P. 063001.
2. **Mouroulis, P.** Convex grating types for concentric imaging spectrometers / P. Mouroulis, D.W. Wilson, P.D. Maker, R.E. Muller // Applied Optics. – 1998. – Vol. 37(31), – P. 7200-7208.
3. **Prieto-Blanco, X.** Analytical design of an Offner imaging spectrometer / X. Prieto-Blanco, C. Montero-Orille, B. Couce, R. de la Fuente // Optics Express. – 2006. – Vol. 14(20). – P. 9156-9168.
4. **Prieto-Blanco, X.** The Offner imaging spectrometer in quadrature / X. Prieto-Blanco, C. Montero-Orille, H. González-Nuñez, M.D. Mouriz, E.L. Lago, R. de la Fuente // Optics Express. – 2010. – Vol. 18(12). – P. 12756-12769.
5. **Lee, J.H.** Optical Design of a Compact Imaging Spectrometer for STSAT3 / J.H. Lee, T.S. Jang, H.-S. Yang, S.-W. Rhee // Journal of the Optical Society of Korea. – 2008. – Vol. 12(4). – P. 262-268.
6. **Kazanskiy, N.L.** Modeling action of a hyperspectrometer based on the Offner scheme within geometric optics / N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, A.V. Karsakov, S.N. Khonina // Computer Optics. – 2014. – Vol. 38(2). – P. 271-280.
7. **Doskolovich, L.L.** On the compensation of the diffraction orders overlap effect in the Offner spectrometer / L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, D.A. Bykov // Computer Optics. – 2014. – Vol. 38(4). – P. 777-781.
8. **Kazanskiy, N.L.** Modeling the performance of a spaceborne hyperspectrometer based on the Offner scheme / N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, L.L. Doskolovich, A.V. Pavelyev // Computer Optics. – 2015. – Vol. 39(1). – P. 70-76.
9. **Berezny, A.E.** Computer-generated holographic optical elements produced by photolithography / A.E. Berezny, S.V. Karpeev, G.V Uspleniev // Optics and Lasers in Engineering. – 1991. – Vol. 15(5). – P. 331-340.
10. **Znamenskiy, M.Yu.** Transmissive threaded diffraction gratings for ultraviolet, visible and infrared regions of the spectrum / M.Yu. Znamenskiy, Ya.K. Lukashovich, A.F. Skochilov, N.A. Fedulova // Journal of Optical Technology. – 2014. – Vol. 3. – P. 51-54.

STUDY OF THE DIFFRACTION GRATING ON A CONVEX SURFACE AS A DISPERSIVE ELEMENT

*S.V. Karpeev, S.N. Khonina, S.I. Kharitonov
Image Processing Systems Institute,
Russian Academy of Sciences,
Samara State Aerospace University*

Abstract

A dispersive element in the form of the diffraction grating on a convex mirror surface is investigated. The groove profile of the grating is measured and the intensity distribution between the diffraction orders is calculated as a function of wavelength for the visible spectrum. Optomechanical elements for the required alignments of the spectrometer elements are designed and fabricated. Adjustment of a prototype optical scheme is implemented and point images for three monochromatic incident wavelengths are obtained. The energy distribution between the diffraction orders and the intensity maxima positions are in agreement with the simulation results.

Keywords: spectrometer, groove profile, energy distribution between the diffraction orders, adjustment of a prototype optical scheme.

Citation: Karpeev SV, Khonina SN, Kharitonov SI. Study of the diffraction grating on the convex surface as a dispersive element. Computer Optics 2015; 39(2): 211-7.

Сведения об авторах

Карпеев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва; ведущий научный сотрудник Института систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, модовые и поляризационные преобразования, волоконная оптика, оптическая обработка изображений.

E-mail: karp@smr.ru.

Sergei Vladimirovich Karpeev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov. Leading researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing.

Сведения об авторе Хонина Светлана Николаевна – см. стр. 195 этого номера.

Харитонов Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, доцент кафедры технической кибернетики, старший научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики Института систем обработки изображений РАН. 1984 г. – окончил физический факультет Самарского государственного университета. 1993 г. – защитил кандидатскую диссертацию на тему «Асимптотические методы дифракционного расчёта фокусаторов лазерного излучения». 2010 г. – защитил докторскую диссертацию на тему «Асимптотические методы расчёта дифракции когерентного электромагнитного излучения на дифракционных оптических элементах». Область научных интересов: дифракционная, квантовая оптика, физика плазмы. В списке научных работ С.И. Харитонova 87 статей, 5 авторских свидетельств и патентов.

E-mail: prognoz2007@gmail.com.

Sergey Ivanovich Kharitonov, senior researcher of Diffractive Optics laboratory of the Image Processing Systems Institute of RAS, Doctor of Physical and Mathematical Sciences. 1984 – graduated from Physics department of Samara State University. 1993 – defended his dissertation "Asymptotic methods of calculation of the diffraction of laser radiation focuser". 2010 – defended his doctoral thesis on "Asymptotic methods for calculating the diffraction of coherent electromagnetic radiation in diffractive optical elements". Research interests: diffraction, quantum optics, plasma physics. Kharitonov's list of scientific papers includes 87 articles, 5 patents.

*Поступила в редакцию 27 марта 2015 г.
Окончательный вариант – 10 апреля 2015 г.*