

РАСЧЁТ КОМПАКТНЫХ S-ОБРАЗНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ СПЕКТРОГРАФОВ

© 2016 г. Р. Р. Ахметгалеева, аспирантка; Э. Р. Муслимов, канд. техн. наук;
Н. К. Павлычева, доктор техн. наук

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева –
КАИ, Казань

E-mail: e0123@mail.ru

Описана методика расчёта компактного спектрографа, оптическая схема которого включает голограммную дифракционную решетку с коррекцией аберраций и вогнутое проекционное зеркало. Для конкретной схемы проведено моделирование и оценка качества изображения. Представлены спектрографы, построенные по аналогичной схеме, но имеющие увеличенную светосилу или улучшенное пространственное разрешение.

Ключевые слова: спектрограф, вогнутая неклассическая дифракционная решетка, голограммная решетка, коррекция аберраций.

Коды OCIS: 120.6200, 230.1950, 090.2890, 220.1000.

Поступила в редакцию 23.09.2015.

Расчёт S-образной схемы спектрографа

К оптическим характеристикам современных спектральных приборов предъявляются жесткие и часто противоречивые требования. Так, с одной стороны, схема прибора должна быть максимально простой и компактной, а с другой она должна обеспечивать высокое разрешение и максимальное использование потока излучения в широком спектральном диапазоне. Широко используемые в спектральных приборах схемы с вогнутыми голограммными решетками отличаются конструктивной простотой, высоким коэффициентом пропускания и возможностью коррекции основных аберраций. В случае, если дисперсия и линейное увеличение в схеме определены, возможна коррекция дефокусировки по спектру, астигматизма и меридиональной комы в его центре [1]. Однако, если к отдельным характеристикам спектрального прибора, таким как эквивалентное относительное отверстие, спектральное и пространственное разрешение или одновременно регистрируемый спектральный диапазон предъявляются повышенные требования, указанных коррекционных возможностей оказывается недостаточно. В настоящей статье рассматриваются варианты расширения функциональных возможностей схем спектрографов с голограммными дифракционными решетками.

Одним из путей увеличения числа свободных коррекционных параметров в схемах спектрографов является введение дополнительных оптических компонентов. Примером может служить компактная оптическая схема спектрографа с голограммной дифракционной решеткой с коррекцией аберраций и вогнутым зеркалом, использованная в спектрографе Carl Zeiss CGS UV-NIR [2]. За счет использования двух отражений и большего числа свободных коррекционных параметров в подобной схеме удается достичь высокой светосилы и относительно высокого качества изображения при минимальных габаритах.

Нами рассмотрен вариант аналогичной оптической схемы спектрографа с вогнутой неклассической дифракционной решеткой (ВНДР) и дополнительным проекционным зеркалом. Поскольку при наличии двух отражательных элементов рабочие пучки лучей дважды меняют направление распространения, будем называть такую конфигурацию S-образной. Здесь и далее предполагается, что неклассическая дифракционная решетка представляет собой голограммную решетку первого поколения, т.е. изготавливается путем записи интерференционной картины от двух точечных когерентных источников излучения [3].

Общий вид рассматриваемой оптической схемы спектрографа представлен на рис. 1, где

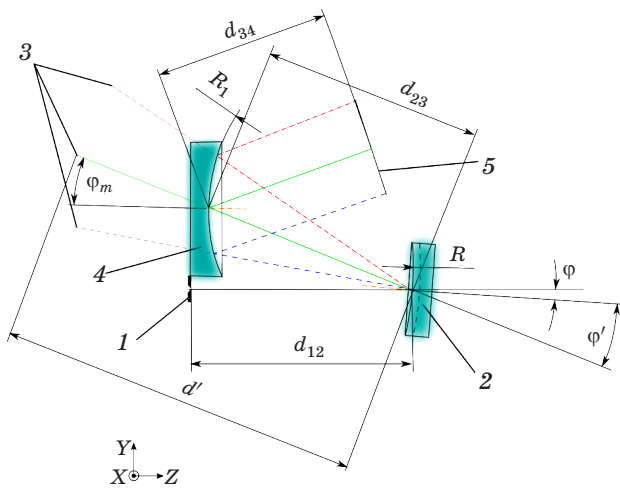


Рис. 1. Общий вид оптической схемы S-образного спектрографа: 1 – входная щель спектрографа, 2 – ВНР, 3 – спектр, формируемый ВНР, 4 – проекционное зеркало, 5 – плоскость фотоприемника.

использованы следующие обозначения: d_{12} – расстояние от центра входной щели до вершины решетки, d_{23} – расстояние от вершины решетки до вершины зеркала, d_{34} – расстояние от вершины зеркала до центра фотоприемника, d' – расстояние от вершины решетки до плоскости промежуточного изображения, R – радиус кривизны поверхности решетки, R_1 – радиус кривизны поверхности зеркала, φ – угол падения излучения на решетку, φ' – угол дифракции для средней длины волны рабочего диапазона спектра, φ_m – угол падения излучения на зеркало.

Очевидно, что число конструктивных параметров, которые можно использовать для коррекции aberrаций, в такой схеме больше, чем в схеме с одиночной решеткой. Однако вследствие увеличения их количества записать аналитические выражения для условий коррекции aberrаций затруднительно. Поэтому для расчета оптической схемы была использована стандартная процедура автоматизированной оптимизации оптических систем, реализованная в ППП Zemax. В качестве стартовой точки оптимизационного процесса использовалась схема спектрографа с плоским полем с голограммной дифракционной решеткой, aberrации которой минимизированы по методике, изложенной в [1], и вогнутым сферическим зеркалом, работающим с увеличением, близким к 1. Полагалось, что голограммная решетка записана с помощью двух точечных источников на длине волны 488 нм (аргоновый лазер). Угол разворота зер-

кала выбран исходя из конструктивных соображений. Исходные данные для расчета схемы были выбраны на основе анализа характеристик существующих малогабаритных приборов рассматриваемого класса [2, 4–6]. Рабочий спектральный диапазон – 200–1000 нм, длина схемы – не более 60 мм, эквивалентное относительное отверстие (отношение светового диаметра решетки к расстоянию от входной щели до решетки) – не менее 1:2,4, длина изображения спектра – не менее 25 мм.

Далее проводилась численная оптимизация системы в следующем режиме. В качестве свободных варьируемых параметров использовались радиусы кривизны дифракционной решетки и зеркала, углы наклона всех компонентов схемы и расстояния между ними, а также координаты источников записи голограммной решетки. Оценочная функция содержала взвешенную сумму среднеквадратических значений поперечных aberrаций лучей на средней и крайних длинах волн рабочего диапазона. Также в оценочную функцию были включены слагаемые, определяющие граничные условия. В качестве последних использовались геометрические условия свободного прохождения рабочих пучков в системе, постоянство линейной дисперсии в схеме, предельные значения габаритов и угловых величин. Отметим, что весовые коэффициенты для aberrаций лучей в сагиттальной плоскости были в 5 раз меньше, чем для aberrаций в меридиональной плоскости.

Конструктивные параметры оптической схемы спектрографа, полученные в результате оптимизации, приведены в сводной таблице (табл. 1).

Рассмотрим качество изображения, достигаемое в схеме. Линейный предел разрешения определим по графикам аппаратных функций (АФ) спектрографа (АФ – относительное распределение освещенности в монохроматическом изображении щели). АФ спектрографа для входной щели шириной 50 мкм представлены на рис. 2. Линейный предел разрешения, определяемый как ширина АФ по уровню 0,5, составляет 58,0, 50,0 и 50,7 мкм для длин волн 600, 200 и 1000 нм соответственно. С учетом линейной дисперсии, равной 31 нм/мм, определим спектральное разрешение – 1,8, 1,5 и 1,6 нм. Поперечный размер пятен рассеяния составляет 352,2 мкм для центра спектра и 44,5 и 70,4 мкм для его краев (рис. 3).

Таблица 1. Конструктивные параметры схем спектрографов

Параметр		Базовая S-образная схема	Схема с уточненными параметрами записи ВНДР	Схема с пространственным разрешением	Светосильная схема
Дифракционная решетка	Радиус кривизны	83,93 мм	88,44 мм	90,787 мм ($k^* = -0,398$)	60,161 мм
	Частота штрихов	397 штр/мм	374 штр/мм	251 штр/мм	544 штр/мм
	Длина волны записи	488 нм	488 нм	441,6 нм	441,6 нм
	Координаты источников записи	(112,273 мм, 24°19'4"); (120,776 мм, 12°35'5")	(199,998 мм, 36°19'32"); (210,149 мм, 24°10'44")	(393,805 мм, 42°17'57"); (499,998 мм, 34°12'1")	(78,543 мм, 25°35'32"); (66,810 мм, 11°3'13")
	Угол падения	4°	4°	4°	4°48'
Зеркало	Радиус кривизны	210,96 мм	236,13 мм	мерид. 287,624 мм сагитт. 263,011 мм	784,81 мм
	Угол падения	20°54'	21°42'	25°15'	23°20'
Расстояния	Щель – решётка	58 мм	58 мм	58 мм	58 мм
	Решётка – зеркало	57,74 мм	62 мм	62 мм	39,55 мм
	Зеркало – спектр	44,74 мм	52,63 мм	55,1 мм	34,53 мм

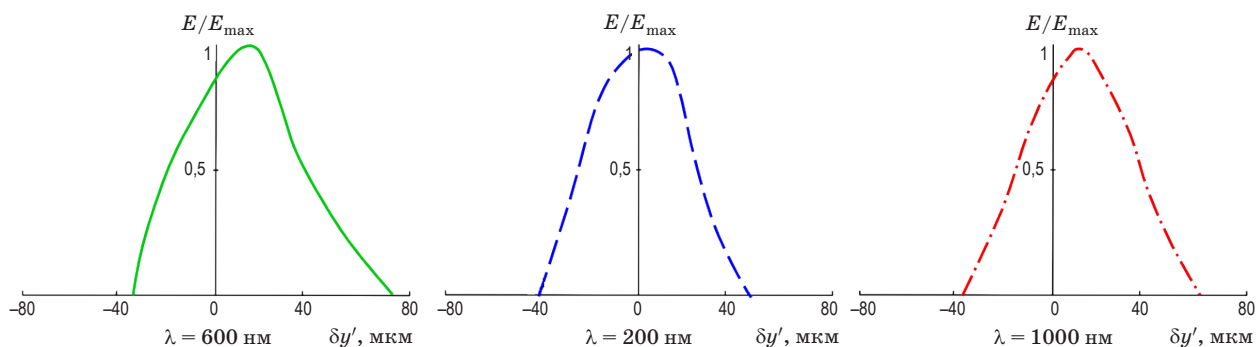


Рис. 2. Аппаратные функции спектрографа.

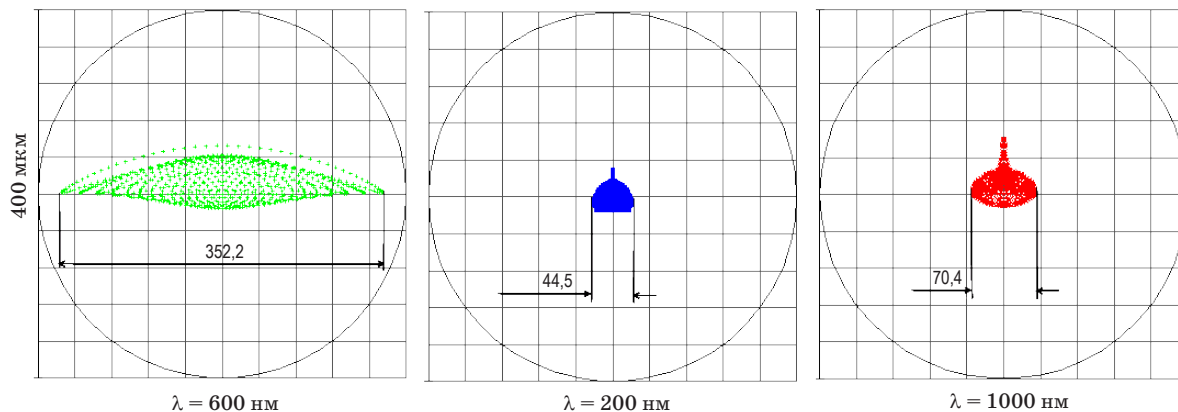


Рис. 3. Точечные диаграммы спектрографа.

Таблица 2. Аберрации S-образного спектрографа

m	M	$\lambda_1 = 600 \text{ нм}$ $y' = 0$		$\lambda_2 = 200 \text{ нм}$ $y' = -12,53 \text{ мм}$		$\lambda_3 = 1000 \text{ нм}$ $y' = 13,08 \text{ мм}$	
		$\Delta y'$	$\Delta z'$	$\Delta y'$	$\Delta z'$	$\Delta y'$	$\Delta z'$
12	0	47,3	0	41,4	0	58,6	0
-8,4	0	-2,2	0	1,8	0	7,3	0
8,4	0	38,7	0	3,4	0	11,7	0
12	0	29,8	0	-29,2	0	-15,5	0
0	8,4	-0,6	-100,7	-4,4	9,8	1,1	28,8
0	12	1,0	-180,0	-7,4	-21,8	5,2	4,2

Также в табл. 2 приведены аберрации рассчитанной схемы спектрографа (значения указаны в микрометрах).

Из приведенных выше данных следует, что в разработанной схеме достигается достаточно высокое качество изображения.

Исследование разработанной схемы показало, что она обладает рядом практически значимых особенностей. В первую очередь, благодаря большому количеству независимых конструктивных параметров, подобные схемы оказываются чрезвычайно гибкими. Данная особенность позволяет вводить дополнительные граничные условия, продиктованные конструктивными или технологическими соображениями без ущерба для функциональных характеристик схемы. Далее, из анализа рассчитанной схемы следует, что она обеспечивает достаточно высокое спектральное разрешение при большой апертуре и имеет потенциал к его дальнейшему повышению. Наконец, в рассмотренной схеме хорошо скорректирован астигматизм, что позволяет использовать ее в качестве основы для схемы спектрографа с повышенным пространственным разрешением.

Ниже мы подробно рассматриваем различные варианты схем S-образных спектрографов, реализующие указанные преимущества.

Оптимизация схемы записи голограммной решётки

В качестве иллюстрации расчета S-образной схемы при наличии дополнительных граничных условий рассмотрим следующий пример. В рассмотренной выше схеме источники записи решетки удалены от ее вершины на небольшое расстояние, вследствие чего числовая апертура записывающих пучков сравнительно велика – 0,195 и 0,211. При записи голограммных решё-

ток для формирования записывающих пучков используют, как правило, микрообъективы и точечные диафрагмы. Часто стандартные микрообъективы не позволяют получить волновой фронт требуемого качества в пределах такой апертуры. Следовательно, возникает ограничение на минимальное расстояние до источников записи, продиктованное технологией записи.

Ограничив расстояние до каждого из источников записи значением 200 мм и внеся соответствующие изменения в оценочную функцию, повторяем процедуру численной оптимизации. Конструктивные параметры, полученные с учетом данного ограничения, даны в табл. 1. Отметим, что при пересчете схемы ее линейная дисперсия и аберрации остаются неизменными, а апертура записывающих пучков снижается до значений 0,114–0,119, которые могут быть выдержаны при использовании стандартных микрообъективов. В качестве демонстрации сохранения качества изображения приведем аберрации модифицированной схемы (табл. 3).

Из сопоставления таблиц 2 и 3 следует, что при повторной оптимизации имеет место незначительное перераспределение аберраций и основные функциональные характеристики схемы сохраняются.

Приведенный пример не является единственным вариантом использования возможностей схемы. В частности, можно построить S-образную схему на базе голограммной решётки, заимствуемой из другого прибора, зафиксировав при оптимизации ее параметры и исключив из оценочной функции астигматизм [7]. Кроме того, можно ввести дополнительные условия, облегчающие конструктивную реализацию схемы, например, сделать параллельными плоскость входной щели и плоскость регистрации спектра.

Таблица 3. Аберрации схемы S-образного спектрографа, оптимизированной с учетом технологических ограничений

m	M	$\lambda_1 = 600 \text{ нм}$ $y' = 0$		$\lambda_2 = 200 \text{ нм}$ $y' = -12,53 \text{ мм}$		$\lambda_3 = 1000 \text{ нм}$ $y' = 13,62 \text{ мм}$	
		$\Delta y'$	$\Delta z'$	$\Delta y'$	$\Delta z'$	$\Delta y'$	$\Delta z'$
12	0	32,1	0	25,3	0	35,5	0
-8,4	0	-12,2	0	-9,8	0	-8,4	0
8,4	0	26,5	0	-3,0	0	5,8	0
12	0	-1,6	0	-51,1	0	-38,1	0
0	8,4	-4,9	-56,7	-7,7	59,7	-4,2	42,7
0	12	-7,6	-123,5	-14,0	43,2	-5,4	17,5

Схема спектрографа с повышенным пространственным разрешением

Высокое пространственное разрешение (разрешение в плоскости, содержащей входную щель спектрографа) является распространенным требованием к современным дифракционным спектральным приборам [8]. Коррекция аберраций по высоте входной щели необходима, в частности, в многоканальных устройствах – в демультимплексорах в волоконно-оптических линиях связи [9, 10] и спектрометрах, работающих с распределенной сетью датчиков [11, 12].

При выборе исходных данных для расчета оптической схемы прибора с повышенным пространственным разрешением будем ориентироваться на параметры прибора Carl Zeiss MMS 1 [2]. Тогда исходные данные имеют вид: рабочий спектральный диапазон – 200–1100 нм, длина схемы – не более 60 мм, эквивалентное относительное отверстие 1:2,4, длина спектра на приемнике – не менее 26,5 мм, спектральное разрешение – не менее 7 нм, пространственное разрешение – 10–14 лин/мм.

В процессе поиска варианта оптической схемы, обеспечивающей заданные параметры качества, было проведено несколько серий численной оптимизации. В каждой из них использовались различные сочетания форм поверхностей дифракционной решетки и зеркала, а также несколько вариантов оценочной функции. Рассматривались сочетания сферических, тороидальных и асферических поверхностей и различные соотношения весовых коэффициентов для аберраций лучей в меридиональной и сагиттальной плоскостях. При сравнении результатов оптимизации в качестве основных критериев качества изображения использова-

лись следующие значения: спектральное разрешение, определяемое по АФ, пространственное разрешение, определяемое из функции передачи модуляции (ФПМ), а также интегральный критерий – значение диаметра пятна рассеяния по уровню 0,9 от дифракционного предела.

В результате описанной процедуры было определено, что наилучших показателей качества изображения удастся достичь при использовании сочетания тороидального зеркала и ВНДР, нанесенной на асферической поверхности второго порядка. При этом весовой коэффициент для аберраций лучей в сагиттальной плоскости принимается равным 0,7, в меридиональной – 1, поскольку требования к спектральному разрешению, как правило, выше, чем к пространственному [8].

Параметры рассчитанной оптической схемы с наилучшими показателями спектрального и пространственного разрешения представлены в табл. 1.

На рис. 4 приведены графики АФ спектрографа для щели шириной 100 мкм. Поскольку обратная линейная дисперсия в схеме равна 33,96 нм/мм, спектральное разрешение постоянно по рабочему диапазону спектра и составляет 1,74–1,79 нм.

Для демонстрации достигаемого в схеме пространственного разрешения приведем графики ФПМ для центра входной щели спектрографа (рис. 5). Пространственное разрешение, определяемое по уровню 0,5 ФПМ, составляет 9,2, 10,2 и 12,0 лин/мм для средней и крайних длин волн рабочего диапазона. Здесь следует отметить, что пространственное разрешение достаточно быстро снижается по полю зрения. Так, для точки на краю входной щели высотой 3 мм разрешение не превышает 3,8 лин/мм.

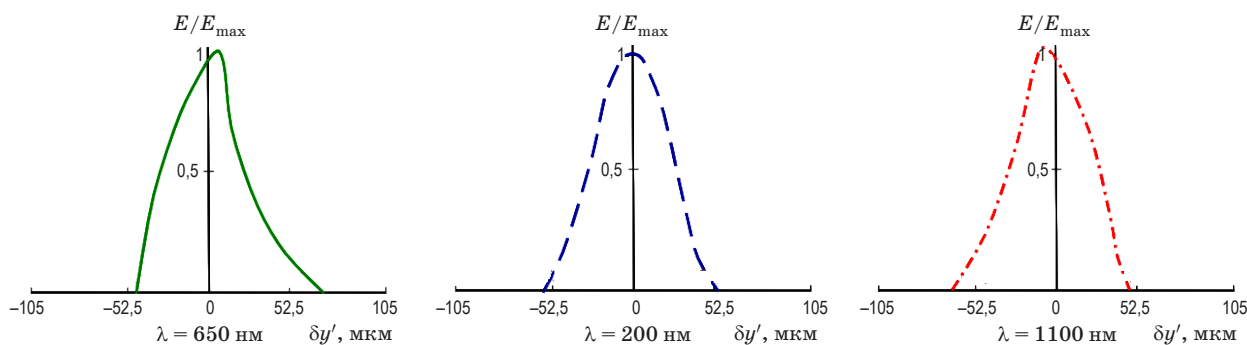


Рис. 4. Аппаратные функции спектрографа с повышенным пространственным разрешением.

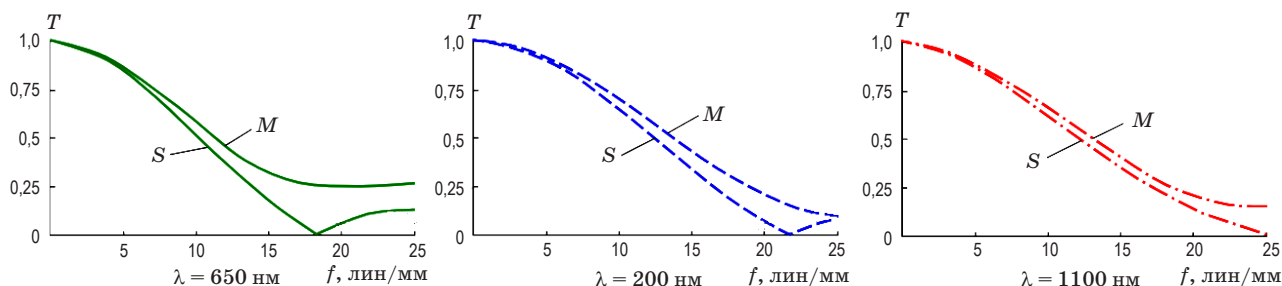


Рис. 5. Функции передачи модуляции спектрографа для центра входной щели.

Таким образом, разработанная оптическая схема имеет повышенное пространственное и спектральное разрешение в широком диапазоне длин волн, обладает достаточно высокой апертурой и отличается простотой и минимальными габаритами. Она может быть использована, например, для построения многоканального спектрального прибора с 10 и более пространственно разделенными каналами. Подобные приборы востребованы для решения задач технологического контроля, медицинской диагностики, научных исследований, и могут заменять несколько одноканальных приборов.

Схема светосильного спектрографа

В заключение рассмотрим возможность построения светосильного спектрографа на основе схемы с ВНР и проекционным зеркалом. Отметим, что при решении ряда задач апертура спектрального прибора является критической характеристикой для его оптической схемы. К таким задачам можно отнести дистанционное зондирование [13], измерение спектров Рамановского рассеяния [14] и ряд других приложений, связанных с измерением слабых оптических сигналов. Эквивалентное относительное отверстие спектральных приборов, использу-

емых в указанных областях, может достигать 1:1,4–1:1,8.

Анализ процесса численной оптимизации S-образной схемы спектрографа показывает, что большинство свободных коррекционных параметров мало изменяются либо не используются вообще после первой итерации. В результате при увеличении апертуры спектрографа конструктивные параметры схемы принимают предельно допустимые значения, а качество изображения быстро снижается. Соответственно, одним из путей поиска светосильных вариантов оптической схемы является временное устранение ряда граничных условий и проведение численной оптимизации. Далее необходимо ввести граничные условия, обеспечивающие физическую реализуемость схемы, учитывая изменения конфигурации схемы. Такой прием позволит избежать попадания оценочной функции в область однажды найденного локального минимума.

Рассмотрим расчет оптической схемы спектрографа со следующими исходными данными: рабочий спектральный диапазон – 200–1000 нм, длина схемы – не более 60 мм, эквивалентное относительное отверстие – не менее 1:1,6, длина спектра на приёмнике – не менее 30 мм. С представленными исходными данными мы получаем новую конфигурацию оптической схемы, отличающуюся компактностью, боль-

Таблица 4. Аберрации светосильного спектрографа

m	M	$\lambda_1 = 600 \text{ нм}$ $y' = 0$		$\lambda_2 = 200 \text{ нм}$ $y' = -12,53 \text{ мм}$		$\lambda_3 = 1000 \text{ нм}$ $y' = 13,62 \text{ мм}$	
		$\Delta y'$	$\Delta z'$	$\Delta y'$	$\Delta z'$	$\Delta y'$	$\Delta z'$
18,4	0	2,6	0	-13,4	0	23,1	0
-11	0	-2,0	0	-8,2	0	10,2	0
11	0	12,2	0	-3,6	0	6,4	0
18,4	0	6,4	0	-49,6	0	9,1	0
0	11	-10,8	-32,5	-8,8	-24,5	-7,7	35,4
0	18,4	-28,4	-61,9	-23,6	-44,7	-18,8	46,0

шим относительным отверстием и высоким качеством изображения. На первом этапе расчёта численная оптимизация схемы проводится без учёта граничных условий, описывающих зазоры между компонентами. Кроме того, отсутствует ограничение на максимальную длину изображения спектра. На втором этапе вводятся граничные условия, задающие зазоры между компонентами и определяющие свободное прохождение пучков лучей в системе, и оптимизация повторяется. В результате подобной процедуры была получена оптическая схема спектрографа с эквивалентным относительным отверстием 1:1,53 и с обратной линейной дисперсией 18,74 нм/мм. Значения конструктивных параметров схемы указаны в табл. 1.

При этом в процессе оптимизации знак угла разворота проекционного зеркала изменился. В результате была получена новая конфигурация оптической схемы, отличающаяся компактностью, высоким относительным отверстием и большой дисперсией (рис. 6).

Для оценки качества изображения, достигнутого в схеме, приведем значения аберрации спектрографа (табл. 4).

Из таблицы следует, что в схеме достигается хорошая коррекция аберраций как в мери-

диональной, так и в сагиттальной плоскости. Следует отметить, что меридиональная кома, не контролировавшаяся непосредственно при оптимизации, возрастает, особенно на коротковолновом крае рабочей области. Сагиттальная кома также имеет большое значение и будет влиять на итоговое разрешение (что характерно для светосильных схем). Наконец, астигматизм в схеме хорошо скорректирован, что важно с точки зрения концентрации энергии в изо-

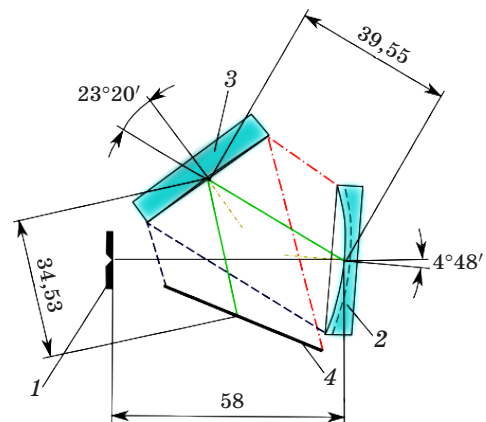


Рис. 6. Оптическая схема светосильного спектрографа: 1 – входная щель, 2 – голограммная дифракционная решётка, 3 – проекционное зеркало, 4 – плоскость фотоприемника.

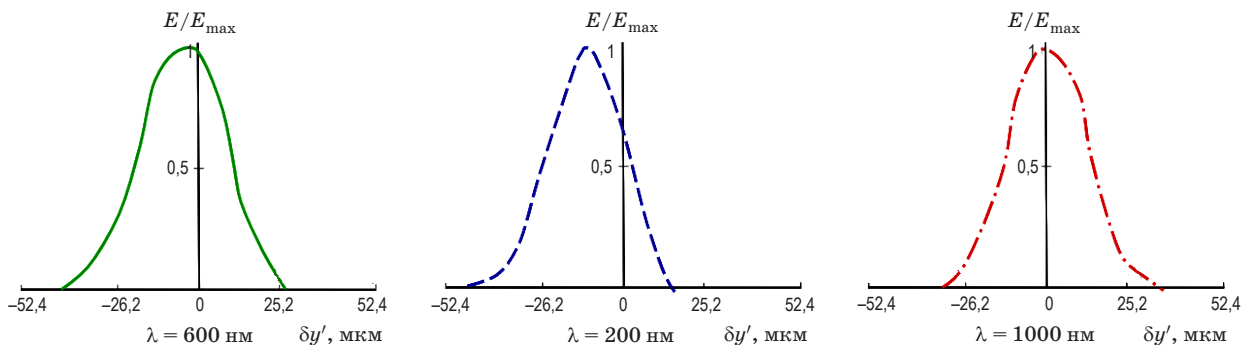


Рис. 7. Аппаратные функции светосильного спектрографа.

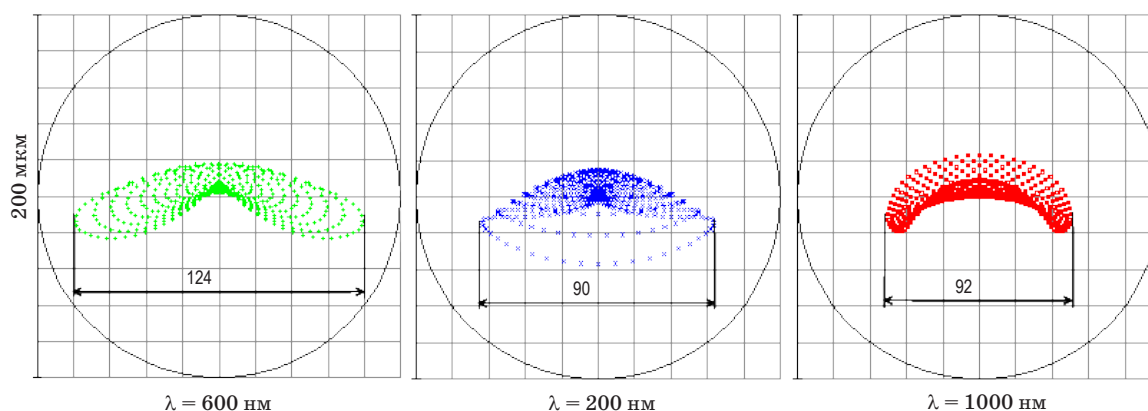


Рис. 8. Точечные диаграммы светосильного спектрографа.

бражениях входной щели при работе со слабым входным сигналом.

Для демонстрации спектрального разрешения приведем графики АФ спектрографа (рис. 7). Ширина щели при расчетах принималась равной 25 мкм. Спектральное разрешение, определяемое по АФ, достигает 0,54, 0,49 и 0,51 нм для центра и краев спектрального диапазона, соответственно.

Наконец, приведем точечные диаграммы спектрографа на основных длинах волн, наглядно иллюстрирующие достигаемую в схеме коррекцию астигматизма (рис. 8).

Заключение

Таким образом, представленные оптические схемы отличаются высоким качеством изображения при большой апертуре и минимальных

габаритах. Введение дополнительного оптического элемента позволяет повысить спектральное и пространственное разрешение, увеличить эквивалентное относительное отверстие схемы и сократить ее размеры. При этом сохраняются такие преимущества спектрографов с вогнутыми голограммными решетками как конструктивная простота, надежность функционирования и технологичность в изготовлении. Разработанные оптические схемы могут быть использованы при создании новых спектральных приборов с улучшенными функциональными характеристиками широкого назначения.

Работа выполнялась при поддержке фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (государственный контракт № 11717р/17263 от 05 апреля 2013 г.).

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлычева Н.К. Спектральные приборы с неклассическими дифракционными решетками / Под ред. Павлычевой Н.К. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003. 198 с.
2. Compendium Spectrometer module. Carl Zeiss MicroImaging GmbH. Jena: Carl Zeiss, 2009. 66 p.
3. Palmer C. Diffraction grating handbook / Ed. by Palmer C. and Loewen E. Rochester: Newport Corp., 2005. 271 p.
4. Gibson G.M., Dienerowitz M., Kelleher P.A., Harvey A.R., Padgett M.J. A multi-object spectral imaging instrument // Journal of Optics. V. 15. № 8. P. 085302-1-6.
5. Qian Zhou, Jinchao Pang, Xinghui Li, Kai Ni, Rui Tian. Concave grating miniature spectrometer with an expanded spectral band by using two entrance slits // Chin. Opt. Lett. 2015. V. 13. № 11. P. 110501-1-5.
6. Capel-Cuevas S., López-Ruiz N., Martínez-Olmos A., Cuéllar M.P., del Carmen Pegalajar M., Palma A.J., de Orbe-Payá I., Capitán-Vallvey L.F. A compact optical instrument with artificial neural network for pH determination // Sensors. 2012. V. 12. № 5. P. 6746-6763.
7. Муслимов Э.Р. Компактный спектрометр для видимого и ближнего ИК диапазонов // Сборник трудов XI Международной конференции “Прикладная оптика-2014”. 21-24 октября 2014 г. г. Санкт-Петербург. Т. 1. С. 105-108.

8. *Хасан М.* Оптические схемы малогабаритных спектрографов на основе вогнутых отражательных голограммных дифракционных решёток для исследования наноматериалов // Автореф. канд. дис. Казань: КНИТУ-КАИ, 2012. 22 с.
9. *Haupt M.* Optical design of a low-loss demultiplexer for optical communications systems in the visible range // Proc. SPIE. Optical Systems Design. 2012. V. 8550. P. 85500J-1-8.
10. *Bazhanov Yu.V.* Demultiplexers based on diffraction gratings and their limiting characteristics // J. Opt. Technol. 2006. V. 73. № 7. P. 445-448.
11. *Pawluczyk O.* Applications of multichannel imaging spectrometer // Proc. SPIE. 2004. V. 5578. P. 227-238.
12. *Barducci A., Guzzi D., Lastrì C., Nardino V., Pippi I., Raimondi V.* Compressive sensing for hyperspectral Earth observation from space // Proc. of ICSO. International Conference on Space Optics. Tenerife, Canary Islands, Spain. 7-10 October 2014. P. 29-36.
13. *Mouroulis P.* Compact infrared spectrometers // Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XXXV. 2009. V. 7298. P. 7298-03-09.
14. *Schulmerich M.V., Cole J.H., Dooley K.A., Morris M.D., Kreider J.M., Goldstein S.A.* Optical clearing in transcutaneous raman spectroscopy of murine cortical bone tissue // J. Biomed. Opt. 2008. V. 13. № 2. P. 021108-1-7.