

МОНОЛИТНЫЙ СПЕКТРОГРАФ С ПРОПУСКАЮЩЕЙ ГОЛОГРАММНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ

© 2014 г. Э. Р. Муслимов, аспирант

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

E-mail: e0123@mail.ru

Предлагается оптическая схема монолитного спектрографа с пропускающей голограммной дифракционной решеткой. Все элементы такой схемы располагаются на поверхности единого блока прозрачного материала. Такой подход позволяет сделать конструкцию прибора простой и надежной, увеличить его апертуру и ввести дополнительную коррекцию aberrаций. Использование в подобной схеме пропускающей голограммной решетки позволит уменьшить габариты схемы, повысить устойчивость к внешним воздействиям, реализовать сопряжение с другими оптическими системами, достичь высокой дифракционной эффективности. Методика расчета оптической схемы заключается в определении ее исходной конфигурации из условий коррекции основных aberrаций решетки на плоскости и последующей численной оптимизации. В качестве примера приведена схема спектрографа для диапазона 450–900 нм. Показано достигаемое качество изображения, и представлены пути реализации предложенного решения.

Ключевые слова: монолитный спектрограф, плоское поле, пропускающая голограммная дифракционная решетка, коррекция aberrаций.

Коды OCIS: 300.6190, 230.1950, 090.2890.

Поступила в редакцию 21.05.2013.

Общей тенденцией развития современных спектральных приборов является уменьшение их габаритов при сохранении высоких функциональных характеристик. При этом для ряда приложений особое значение имеет надежность работы прибора, его конструктивная простота и устойчивость к внешним воздействиям. В качестве примеров можно привести задачи дистанционного зондирования, полевых исследований воды, спектрометрических измерений на технологических линиях, задачи преобразования сигналов в волоконно-оптических системах. В таких случаях для измерений, как правило, используются приборы, построенные по схеме спектрографа. При этом все чаще в таких приборах используется монолитная конструкция [1–3].

В монолитной конструкции все элементы оптической схемы прибора располагаются на поверхности единого блока из оптически прозрачного материала. В первую очередь такой подход позволяет сделать схему более компактной и упростить конструкцию прибора за счет

исключения механических узлов крепления. Кроме того, такая конструкция значительно повышает устойчивость прибора к воздействиям внешней среды, увеличивает надежность его работы. Кроме того, использование монолитной конструкции позволяет увеличить апертуру прибора и открывает дополнительные возможности коррекции aberrаций оптической системы [4].

Данный подход был успешно реализован в ряде приборов. Чаще всего монолитные спектральные приборы строятся либо по схеме спектрографа с плоским полем на основе вогнутой неклассической отражательной дифракционной решетки, либо по схеме Оффнера с выпуклой отражательной решеткой. Однако, как было показано недавно, схема спектрографа с плоским полем может быть реализована также и на основе пропускающей вогнутой неклассической, в частности голограммной, решетки [5]. Такой спектрограф работает с мнимой входной щелью и отличается простотой конструкции, компактностью и возможностью сопряжения

с другими оптическими системами. Использование подобной схемы при построении монолитного спектрографа позволит уменьшить общие габариты прибора и улучшить его функциональные характеристики. Кроме того, в такой схеме может быть использована объемно-фазовая решетка с повышенной дифракционной эффективностью и высокой устойчивостью к внешним воздействиям.

Разработка оптической схемы монолитного спектрографа с пропускающей голограммной решеткой требует некоторой модификации существующей методики расчета. В модифицированной методике должны быть учтены свойства материала моноблока. Кроме того, она должна обеспечивать коррекцию остаточного астигматизма по спектру, что является типичным требованием для приборов данного класса. Соответственно, алгоритм расчета разбит на два этапа.

На первом этапе из аналитических соотношений определяются параметры исходной конфигурации оптической схемы. Полагаем, что оптическая схема включает пропускающую вогнутую голограммную дифракционную решетку (ПВГДР), плоское зеркало и фотоприемник, расположенные на поверхности монолитного блока. Общий вид такой схемы представлен на рис. 1.

ПВГДР представляет собой зарегистрированную на светочувствительном материале интерференционную картину, полученную от двух точечных когерентных источников излу-

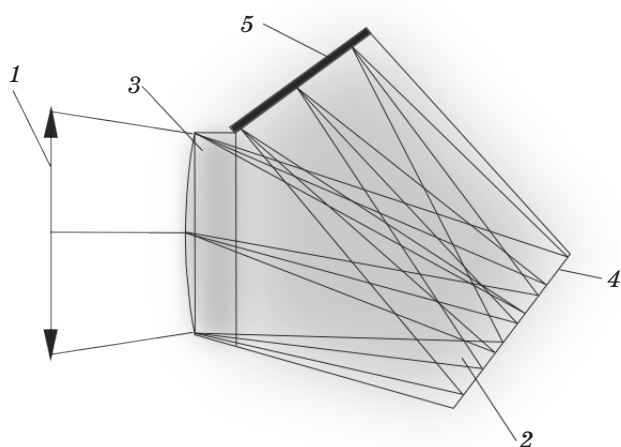


Рис. 1. Общий вид исходной конфигурации оптической схемы монолитного спектрографа. 1 – входной объектив, 2 – моноблок из прозрачного материала, 3 – ПВГДР, 4 – зеркало, 5 – фотоприемник.

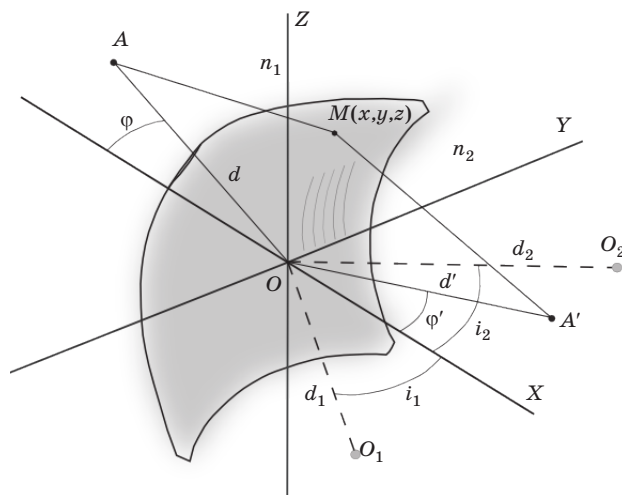


Рис. 2. Схема записи и работы пропускающей вогнутой голограммной дифракционной решетки. Пояснения в тексте.

чения. Обобщенная схема записи и работы такой решетки приведена на рис. 2.

На схеме обозначены: $A(d, \varphi)$ – центр входной щели, $A'(d', \varphi')$ – его изображение, $O(0,0)$ – вершина решетки, $M(x,y,z)$ – произвольная точка на поверхности решетки, $O_1(d_1, i_1)$ и $O_2(d_2, i_2)$ – точечные источники записи, n_1 и n_2 – показатели преломления перед решеткой и за ней. Аберрационные и фокусирующие свойства ПВГДР описываются ее характеристической (абберационной) функцией, представляющей собой разложение в ряд функции оптического пути луча, исходящего из центра щели A и дифрагированного в точке M на поверхности решетки:

$$V = n_1(AM) + n_2(MA') - k\lambda m(y,z) = -yF_0 + \frac{y^2}{2R}F_1 + \frac{z^2}{2R}F_2 + \frac{y^3}{2R^2}F_3 + \frac{yz^2}{2R^2}F_4 + \frac{y^4}{8R^3}F_5 + \frac{y^2z^2}{4R^3}F_6 + \frac{z^4}{8R^3}F_7 + \dots, \quad (1)$$

где k – порядок дифракции, λ – длина волны, $m(y,z)$ – количество штрихов на поверхности решетки между точками O и M . Обозначим также: N – частота штрихов решетки в её вершине, R – радиус поверхности решетки, λ_0 – длина волны записи.

Условие $F_0 = 0$ дает основное уравнение пропускающей голограммной дифракционной решетки. Каждый из коэффициентов в выражении (1) характеризует определенную aberrацию: F_1 характеризует фокусировку в меридиональной плоскости, F_2 – фокусировку в сагит-

тальной плоскости, F_3 – меридиональную кому, F_4 – сагиттальную кому, F_5, F_6, F_7 – аберрации третьих порядков [6].

Первые четыре коэффициента имеют вид:

$$\begin{aligned} F_0 &= -n_1 \sin \varphi + n_2 \sin \varphi' - k\lambda/\lambda_0 (\sin i_1 - \sin i_2), \\ F_1 &= n_1 (-R \cos^2 \varphi / d + \cos \varphi) + \\ &+ n_2 (R \cos^2 \varphi' / d' - \cos \varphi') - H_1 k\lambda / \lambda_0, \\ F_2 &= n_1 (-R/d + \cos \varphi) + n_2 (R/d' - \cos \varphi') - H_2 k\lambda / \lambda_0, \\ F_3 &= -n_1 R^2 \sin \varphi / d (-\cos^2 \varphi / d + \cos \varphi / R) - \\ &- n_2 R^2 \sin \varphi' / d' (\cos^2 \varphi' / d' - \cos \varphi' / R) - H_3 k\lambda / \lambda_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь H_i – коэффициенты голографирования, идентичные используемым в [6].

Как и в исходной методике, на первом этапе расчета определяются параметры записи решетки и положение спектра, обеспечивающие минимизацию на плоскости дефокусировки, астигматизма и меридиональной комы. Отметим, что в данном случае, с учетом требований к качеству изображения, дефокусировка и астигматизм корректируются по всему спектру, а меридиональная кома – для его центра. При этом принимается, что положение входной щели, радиус решетки и частота штрихов в ее центре заданы, а плоскость спектра перпендикулярна лучу средней длины волны, дифрагированному в вершине, т.е. выполняется условие

$$d' = \frac{d'_{av}}{\cos(\varphi'_{av} - \varphi)}, \quad (3)$$

где величины с индексом “av” относятся к средней длине волны рабочего диапазона. Однако при интегрировании выражений для F_i по спектру не удается использовать дисперсионную формулу материала, заполняющего пространство после решетки. В связи с этим, в отличие от исходной методики, интегралы приходится заменить дискретными суммами для p длин волн. В результате условия коррекции аберраций на плоскости записываются в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial d'_{av}} \left[\sum_{j=1}^p (F_1(\lambda_j))^2 \right] &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial H_1} \left[\sum_{j=1}^p (F_1(\lambda_j))^2 \right] &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial H_2} \left[\sum_{j=1}^p (F_2(\lambda_j))^2 \right] &= 0, \\ F_3(\lambda_{av}) &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

При этом учитываются известные соотношения

$$\begin{aligned} (n_1 \sin \varphi - n_2 \sin \varphi') / (\sin i_1 - \sin i_2) &= k\lambda / \lambda_0, \\ \sin i_1 - \sin i_2 &= N\lambda_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Выражения (4) сводятся к линейной системе первых двух уравнений и двум независимым уравнениям относительно H_2 и H_3 . Из них последовательно определяются положение спектра и коэффициенты голографирования H_i . Далее по найденным значениям определяются координаты источников записи решетки. Угол разворота плоского зеркала выбирается таким образом, чтобы габариты схемы были минимальны.

На втором этапе расчета проводится дополнительная численная оптимизация оптической системы. При этом свободными коррекционными параметрами являются радиус ПВГДР, радиусы кривизны зеркала в меридиональной и сагиттальной плоскостях, координаты вершины зеркала, положение спектра и координаты источников записи ПВГДР. Целевая функция пропорциональна размерам пятен рассеяния на контрольных длинах волн, а также включает граничные условия, обеспечивающие свободное прохождение рабочих пучков лучей, сохранение габаритов и линейной дисперсии. Такой режим численной оптимизации легко реализуется с помощью современных программ автоматизированного проектирования оптических систем.

В качестве примера рассмотрим спектрограф для видимого и ближнего ИК диапазона 450–900 нм в монолитном исполнении. Радиус кривизны решетки и удаление мнимой входной щели от ее поверхности равны 50 мм. Угол падения лучей на ПВГДР равен 0°. Диаметр апертурной диафрагмы определяется диаметром ПВГДР и составляет 17 мм. Обратная линейная дисперсия равна 45 нм/мм. Соответствующая частота штрихов решетки в вершине составляет 650 штр/мм. В качестве материала оптического блока выбираем стекло ЛКЗ. Из уравнений (4) и (5) определяем координаты середины спектра (51,693 мм; 17°11'13") и значения коэффициентов голографирования $H_1 = -0,082525$; $H_2 = 0,017471$; $H_3 = 0,022261$. При записи на длине волны 488 нм (аргоновый лазер) соответствующие координаты записывающих точечных источников равны (51,216 мм; 18°39'59") и (49,437 мм; 9'49").

Далее проводим численную оптимизацию оптической системы в описанном выше режиме.

В итоговом варианте оптической схемы радиус кривизны решетки равен 48,87 мм, а зеркало имеет тороидальную форму с радиусами 215,56 и 299,82 мм в меридиональном и сагиттальном сечениях соответственно. Частота штрихов решетки в ее вершине – 583 штр/мм, координаты записывающих источников – (65,06 мм; 23°51'0'') и (51,99 мм; 6°52'47''). Оптическая схема спектрографа приведена на рис. 3. Следует отметить, что габариты схемы не превышают 31×26,5×17 мм, а диафрагменное число равно 1,93.

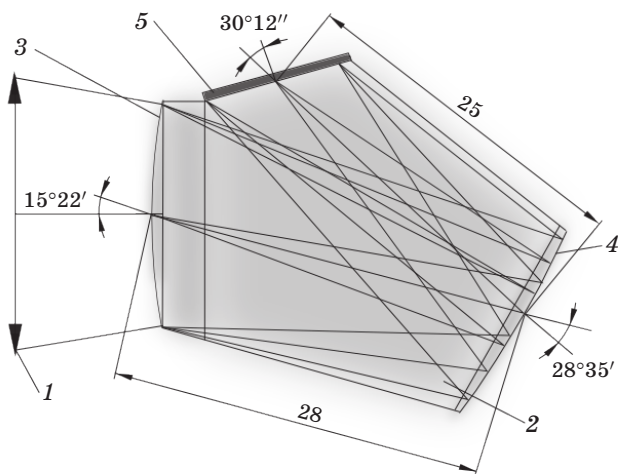


Рис. 3. Итоговая конфигурация оптической схемы спектрографа для диапазона 450–900 мм. 1 – входной объектив, 2 – моноблок из стекла ЛКЗ, 3 – ПВГДР, 4 – вогнутое тороидальное зеркало, 5 – фотоприемник.

Анализ качества изображения демонстрирует коррекцию aberrаций, достигаемую в схеме. Аппаратные функции (АФ) спектрографа представлены на рис. 4. Из графиков видно, что предел разрешения спектрографа, определяемый как ширина АФ по уровню 0,5 от максимума, составляет 20,0; 15,3 и 15,1 мкм для центра и краев рабочего спектрального диапазона соответственно. Спектральное разрешение при этом составляет 0,90; 0,69 и 0,68 нм.

Как показывают точечные диаграммы (рис. 5), астигматизм в разработанной оптической схеме хорошо скорректирован по всему спектру. Поперечный размер пятен рассеяния для центра спектра и его краев не превосходит 29, 32 и 36 мкм соответственно. Такие результаты позволяют говорить о возможности построения многоканального или изображающего прибора на базе данной схемы.

Рассмотрим некоторые аспекты практической реализации разработанной схемы. В первую очередь был проведен анализ допусков на параметры оптической схемы. В качестве основного критерия при расчете принималось 5%-ное увеличение размеров точечных диаграмм. Результаты анализа представлены в таблице. В таблице также указаны соответствующие допуски на радиусы выпуклых поверхностей, выраженные в интерференционных полосах, допуски на линейные размеры моноблока по ГОСТ 25346-89 и на параметры его материала по ГОСТ 3514-94. Можно заключить, что, несмотря на достаточно жесткие требования к изготовлению элементов спектрогра-

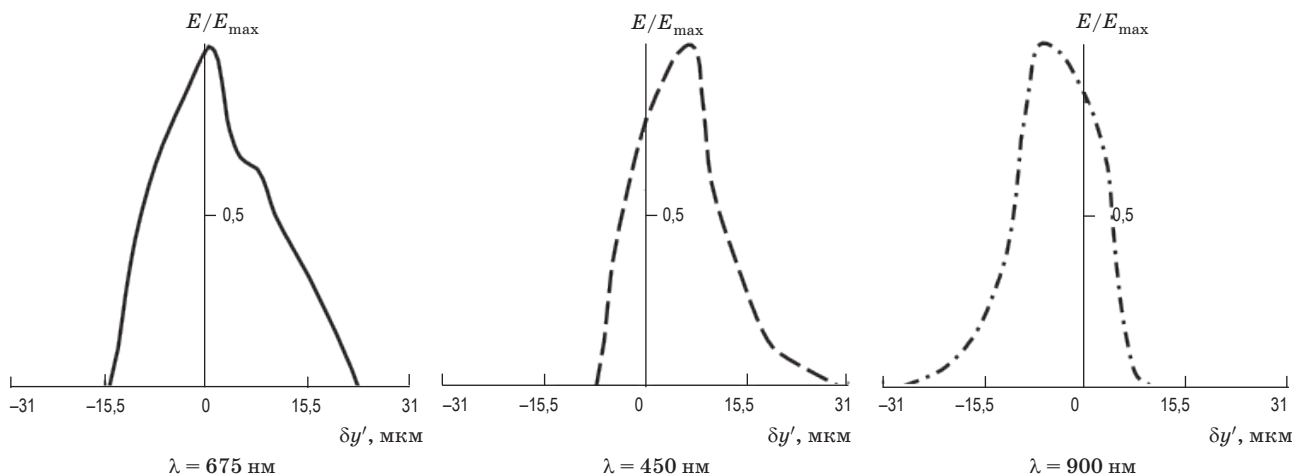


Рис. 4. Аппаратные функции спектрографа для длин волн 675, 450 и 900 нм.

Допустимые отклонения основных параметров оптической схемы монолитного спектрографа

Параметр	Допустимое отклонение	Соответствующий допуск по ГОСТ
Радиус кривизны поверхности ПВДР	0,014 мм	$N = 0,7$ полосы
Меридиональный радиус вогнутого зеркала	0,270 мм	$N = 0,7$ полосы
Сагиттальный радиус вогнутого зеркала	0,637 мм	$N = 0,9$ полосы
Расстояние от ПВДР до зеркала	0,013 мм	js7
Расстояние от зеркала до фотоприемника	0,010 мм	js7
Угол поворота зеркала	14,5'	–
Угол поворота приемника	13'	–
Линейная координата фокуса 1-го записывающего пучка	0,017 мм	–
Угловая координата фокуса 1-го записывающего пучка	1,7'	–
Линейная координата фокуса 2-го записывающего пучка	0,023 мм	–
Угловая координата фокуса 2-го записывающего пучка	1,5'	–
Показатель преломления материала моноблока $n_{675 \text{ нм}}$	0,042	5 Г
Средняя дисперсия материала моноблока $n_{900 \text{ нм}} - n_{450 \text{ нм}}$	0,016	5 Г

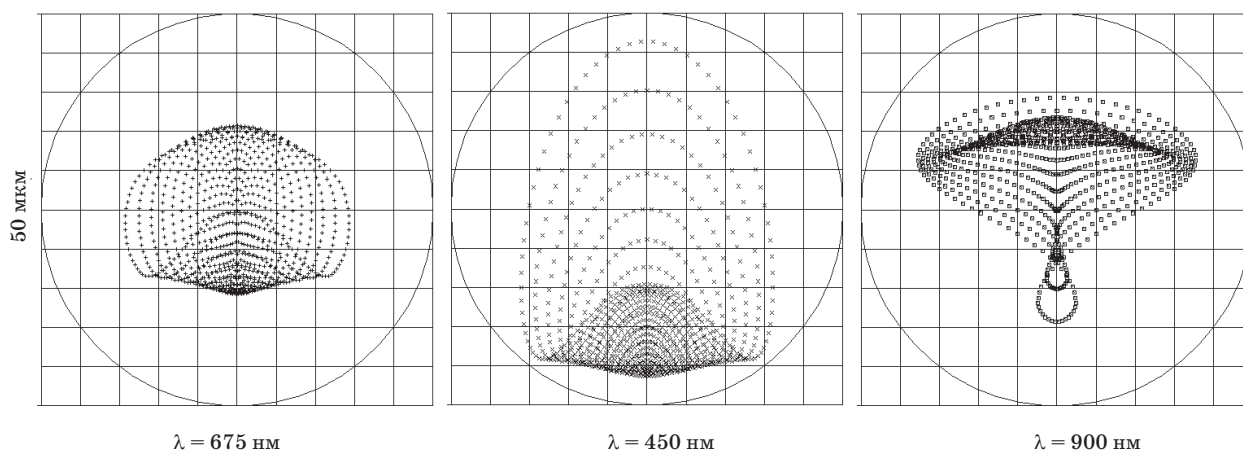


Рис. 5. Точечные диаграммы спектрографа для длин волн 675, 450 и 900 нм.

фа и их сборке, предложенная схема реализуема на базе существующих технологий.

Конструктивно разработанная схема может быть реализована в виде склеенного блока, включающего призму, два плосковыпуклых элемента и приемник излучения. Однако реализация расчетной схемы записи решетки вызывает определенные трудности. Запись решетки в сходящихся пучках невозможна ввиду близости записывающих пучков. Запись расходящимися пучками требует компенсации ис-

кажений, вносимых подложкой решетки. Если при малых углах падения достаточно использовать в качестве компенсатора единственную децентрированную линзу, то для больших углов требуется использовать сложные компенсаторы либо специально изготавливаемые дифракционные элементы. В данном случае считаем целесообразным использовать схему записи, в которой первый записывающий пучок является сходящимся и падает на подложку слева, а второй, расходящийся, пучок падает справа и

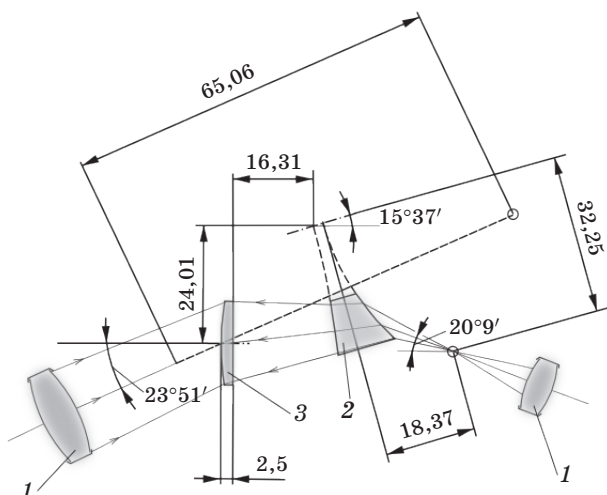


Рис. 6. Схема записи пропускающей голограммной решетки для монолитного спектрографа. 1 – формирующие объективы, 2 – линза-компенсатор, 3 – подложка записываемой решетки.

проходит через линзовый компенсатор. Схема записи приведена на рис. 6. Линза-компенсатор изготовлена из стекла К8, радиусы кривизны ее поверхностей равны 49,566 и 163,262 мм, толщина по оси 2 мм, поперечное смещение 24,01 мм, наклон $15^{\circ}37'$.

Таким образом, разработанная оптическая схема характеризуется высоким качеством изображения при минимальных габаритах и сравнительно большой апертуре. При этом конструкция спектрографа максимально проста и устойчива к воздействиям внешней среды. Кроме того, такой спектрограф отличается простотой сопряжения с другими оптическими системами за счет использования мнимой входной щели. В случае использования в схеме объемно-фазовой решетки, можно достичь высокой дифракционной эффективности и повысить устойчивость к воздействиям внешней среды.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Warren C. P., Even D., Pfister W., Nakanishi K., Velasco A., Breitwieser D., Yee S., Naungayan J. Miniaturized visible near-infrared hyperspectral imager for remote-sensing applications name of the paper // *Optical Engineering*. 2012. V.51. №11. P. 111720 1–7.
2. Pons S., Aymerich I.F., Torrecilla E., Piera J. Monolithic spectrometer for environmental monitoring applications // *OCEANS 2007 Europe Conf. Proc. Aberdeen (UK)*, 2007. P. 1–3.
3. Kuusk J.M. Dark signal temperature dependence correction method for miniature spectrometer modules // *Journal of Sensors*. 2011. V.2011. P. 1–9.
4. Бажанов Ю.В. Спектрограф // Патент России № 2329476. 2006.
5. Павлычева, Н.К., Муслимов Э.Р. Спектрограф с плоским полем на основе вогнутой пропускающей голограммной дифракционной решетки // *Вестник КГТУ им. Туполева*. 2010. № 4. С. 61–67.
6. Павлычева Н.К. Спектральные приборы с неклассическими дифракционными решетками / Казань: Изд-во Казан. гос.техн. ун-та, 2003.198 с.