

УДК 681.785.555

# Спектрографы для ультрафиолетовой и вакуумной ультрафиолетовой областей спектра со скрещенной дисперсией. Методика юстировки

© 2017 г. Ю. М. ГОЛУБОВСКИЙ, КАНД. ТЕХН. НАУК; Г. Г. ГОРБУНОВ, ДОКТОР ТЕХН. НАУК; Г. М. ЕРМОЛАЕВА, КАНД. ФИЗ.-МАТ. НАУК; Б. Е. КРЫЛОВ, КАНД. ФИЗ.-МАТ. НАУК; И. Н. МЯКИШЕВА, А. С. КУЛАГИНА, КАНД. ФИЗ.-МАТ. НАУК; А. В. САВУШКИН, КАНД. ТЕХН. НАУК; О. К. ТАГАНОВ, КАНД. ФИЗ.-МАТ. НАУК; В. А. ТЯПКОВ, В. Ю. ХРАМОВ, Г. Н. ФОМИН; В. Б. ШИЛОВ, ДОКТОР ТЕХН. НАУК

АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург

E-mail: shilov@npgoi.ru

Поступила в редакцию 06.12.2016

Представлена методика юстировки и градуировки спектрографов со скрещенной дисперсией ультрафиолетового и вакуумного ультрафиолетового (ВУФ-УФ) диапазонов с использованием дополнительной голограммной дифракционной решётки, работающей в видимой области спектра. Голограммная дифракционная решётка обеспечивает пространственную позицию дифрагированного излучения на выбранной длине волны в видимом диапазоне, совпадающую с позицией дифрагированного ВУФ-УФ излучения при установке в схему рабочей нарезной решётки. Эффективность методики продемонстрирована на примере юстировки и градуировки двух ВУФ-УФ каналов наземного имитатора трёхканального космического спектрографа, разрабатываемого по проекту «Спектр — УФ» (World Space Observatory).

**Ключевые слова:** спектрограф со скрещенной дисперсией, голограммная дифракционная решётка, ВУФ-УФ спектры.

**Коды OClS:** 120.6200, 230.1950, 090.2890, 220.1000.

В оптических астрофизических исследованиях в УФ и в ВУФ областях спектра при необходимости проводить измерения в широком спектральном диапазоне с высоким спектральным разрешением (0,03 Å) обычно используются спектрографы со скрещенной дисперсией. Эти приборы дают возможность построить растр регистрируемого спектра на матричном приёмнике без сканирования оптическими элементами. Юстировка таких спектрографов — сложная задача. Она может быть решена за счёт применения шестиосевой координатно-измерительной машины (типа КИА-750) при контроле точного позиционирования оптических элементов спектрографов в пространстве. Использование такого метода рационально при серийном или мелкосерийном производстве.

При создании единичных уникальных приборов со скрещенной дисперсией, в которых в качестве разделителя порядков спектра служит вогнутая дифракционная решётка, сборку и юстировку можно выполнить по предлагаемой здесь методике с использованием допол-

нительной технологической голограммной дифракционной решётки. Это позволит провести точную юстировку при использовании лазера видимого диапазона.

Суть методики заключается в следующем. Параметры голограммной решётки рассчитываются таким образом, что она обеспечивает пространственную позицию дифрагированного пучка на выбранной длине волны в видимом диапазоне (лазер либо лампа с линейчатым спектром, например, ртутная), совпадающую с позицией дифрагированного ВУФ-УФ излучения при установке в схему рабочей нарезной решётки. В соответствии с основным уравнением дифракционной решётки (1)

$$k\lambda = \sigma(\sin\alpha + \sin\beta), \quad (1)$$

где  $k$  — порядок спектра,  $\lambda$  — длина волны излучения,  $\sigma$  — постоянная решётки,  $\alpha$  — угол падения,  $\beta$  — угол дифракции, имеем

$$\frac{\lambda_{\text{оп}}}{\lambda_{\text{vis}}} = \frac{\sigma_{\text{оп}}}{\sigma_{\text{hol}}}; \quad \sigma_{\text{hol}} = \sigma_{\text{оп}} \frac{\lambda_{\text{vis}}}{\lambda_{\text{оп}}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\text{hol}}$  — постоянная голограммной решётки,  $\sigma_{\text{op}}$  — постоянная рабочей решётки,  $\lambda_{\text{vis}}$  — длина волны лазера или спектральные линии излучения лампы в видимом диапазоне,  $\lambda_{\text{op}}$  — длина волны линейчатого источника спектра в ВУФ-УФ области спектра.

Выражение (2) получено делением уравнения (1) для рабочей решётки на то же уравнение для голограммной решётки. Для обеих решёток порядок спектра  $k = 1$  и углы падения и дифракции идентичны

Фокальные свойства такой вогнутой голограммной решётки будут идентичны свойствам рабочей, т.к. радиусы кривизны заготовок решёток одинаковы, углы падения и дифракции равны между собой, соответственно.

Представленная здесь методика разработана и использована при юстировке и градуировке лабораторного имитатора трёхканального космического спектрографа, создаваемого в рамках международного проекта «Всемирная космическая обсерватория» (WSO) — «Спектр-УФ» [1]. Три канала космического спектрографа (рис. 1) позволяют регистрировать спектры в диапазоне УФ-ВУФ — 310–174 нм и ВУФ — 174–115 нм с разрешающей силой 50000, а также интегральный канал 310–115 нм с разрешением 1000. Спектрограф работает совместно с оптическим телескопом с диаметром зеркала 1,7 м и фокусным расстоянием 17 м.

Первые два канала построены по схеме со скрещенной дисперсией. Оптическая схема ВУФ и УФ каналов, разработанная в САО РАН [2], представлена на рис. 2.

Для отработки методик сборки, юстировки и градуировки спектральных каналов космического спектрографа в АО «ГОИ им. С.И. Вавилова» разработан и изготовлен лабораторный имитатор оптико-механического блока спектрографа (ОМБ БС).

На рис. 3 представлен имитатор ОМБ БС, установленный на юстировочном стенде, предназначенном для обеспечения работ по сборке, юстировке и градуировке штатного образца. Разработанный в АО «ГОИ им. С.И. Вавилова» стенд позволяет вводить как ла-



Рис. 1. Модель космического спектрографа «Спектр-УФ» в формате 3D [2].

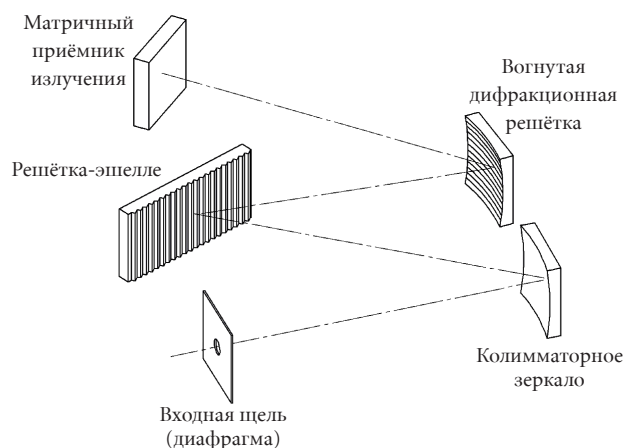


Рис. 2. Оптическая схема ВУФ и УФ каналов космического спектрографа в 3D формате.



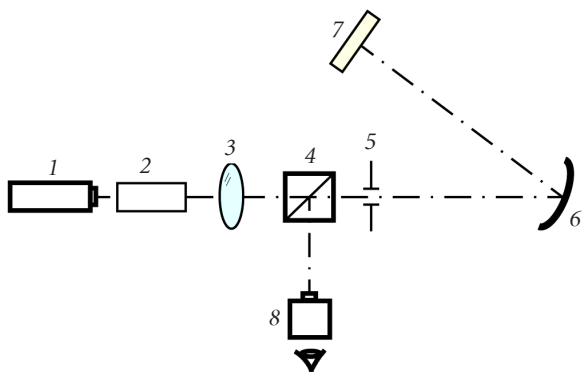
Рис. 3. Имитатор ОМБ БС, установленный на юстировочном стенде.

зерное излучение, так и излучение спектральных ламп в направлениях, определяемых оптической схемой спектрографа, а также устанавливать внутри и вне имитатора ОМБ БС дополнительные оптические элементы (плоское зеркало, светофильтры, клин, кубик светоделительный) и приборы (зрительная труба, микроскоп, лазеры).

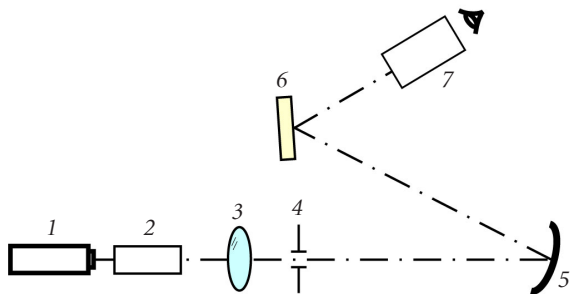
Юстировка ВУФ и УФ канала спектрографа начинается с юстировки коллиматорных зеркал (объективов)

и состоит из двух последовательных операций. Задача первой заключается в выставлении зеркального объектива в расчетное положение и под заданным углом падения относительно оптической оси телескопа. Эта задача решена с помощью двух шаблонов и He-Ne лазера с соответствующими подвижками. Таким образом, обеспечивается расчётное положение оси входящего в спектрограф пучка под заданным углом.

Вторая операция должна обеспечить выставление плоскости входной диафрагмы с отверстием (плоскости входной щели) в фокальную плоскость объектива. Эту задачу можно решить двумя способами, а именно: с помощью вспомогательного плоского зеркала, установленного за зеркальным объективом по ходу лучей и возвращающего излучение источника сплошного спектра назад во входную диафрагму, светоделительного кубика, расположенного перед входной диафрагмой и микроскопом (рис. 4). Рассматривая в окуляр микроскопа края входной диафрагмы и её изображение, сформированное объективом, перемещая вдоль оптической оси входную диафрагму, получаем одновременно резкое изображение как самой диафрагмы, так и её изображения от коллиматорного зеркала. Это означает, что входная диафрагма находится в фокусе объектива.



**Рис. 4.** Первый способ установки входной щели в фокальной плоскости коллиматорного объектива. 1 — He-Ne лазер; 2 — расширитель пучка; 3 — линза; 4 — светоделительный кубик; 5 — диафрагма со щелью; 6 — объектив коллиматора; 7 — плоское зеркало; 8 — микроскоп.



**Рис. 5.** Второй способ установки входной щели в фокальной плоскости коллиматорного объектива. 1 — He-Ne лазер; 2 — расширитель пучка; 3 — линза; 4 — диафрагма со щелью; 5 — объектив коллиматора; 6 — плоское зеркало; 7 — зрительная труба.

Второй способ состоит в использовании зрительной трубы или теодолита, настроенных на бесконечность (рис. 5). Пучок, отражённый от плоского зеркала, попадает в объектив зрительной трубы (теодолита). Наблюдая в окуляр зрительной трубы (теодолита) изображение отверстия входной диафрагмы и перемещая диафрагму вдоль оптической оси, добиваемся её резкого изображения. Таким образом, входная диафрагма находится в фокальной плоскости объектива.

Работа по фокусировке показала большее удобство использования зрительной трубы (теодолита) по сравнению с микроскопом. Выявлено преимущество теодолита, которое состоит в увеличенном, по сравнению со зрительной трубой, полем зрения, что облегчает его выставление.

После завершения юстировки коллиматорных объективов проводится установка и юстировка дифракционных решёток. Решётка эшелле стоит в параллельном пучке (рис. 2) и требования к её положению не критичны. Угол автоколлимации равен углу блеска эшелле. Угол блеска реальной эшелле может отличаться от заданного на несколько десятых долей градуса, поэтому угол автоколлимации выставляется в плоскости дисперсии по максимуму светового потока, падающего на вогнутую дифракционную решётку — разделитель порядков спектра. Это относится как к ВУФ, так и к УФ каналам.

Штатные вогнутые нарезанные дифракционные решётки являются классическими, то есть с равноотстоящими и прямолинейными (в проекции на плоскость, касательную к вогнутой решётке в её вершине) штрихами. Этим решёткам соответствуют вогнутые голограммные дифракционные решётки, записанные в параллельных пучках, симметричных относительно нормали к поверхности касательной к вершине решётки (решётки 1-го типа по классификации фирмы Jobin Yvon). Угол записи зависит от постоянной решётки и длины волны записи.

Постоянные голограммных решёток для ВУФ и УФ каналов определены из формулы (2), где в качестве видимой длины волны выбрана линия ртути 541,6 нм, изготовленной в АО «ГОИ им. С.И. Вавилова» ртутной лампы ЛГР-1. В качестве рабочей длины волны для УФ канала выбрана линия ртути 253,7 нм той же лампы, а для ВУФ канала в качестве рабочей длины волны — линия 147,0 нм ксеноновой лампы КсРМ-2 [3] или CDL-1050 [4].

Для юстировки использованы голограммные решётки (изготовленные в АО «НПО ГИПО») с плотностью штрихов  $N = 135,5 \text{ мм}^{-1}$  и  $N = 159,3 \text{ мм}^{-1}$  для УФ и ВУФ каналов, соответственно.

Для юстировки, позиционирования спектральных растров, градуировки по длинам волн каналов и оценки разрешающей способности использованы дейтериевая лампа со сплошным спектром ДНМ-15 [3] и разработанная в АО «ГОИ им. С.И. Вавилова» спектральная лампа тлеющего разряда с платиновым полым катодом ЛПК-30. Фрагмент спектра лампы ЛПК-30 представлен на рис. 6.

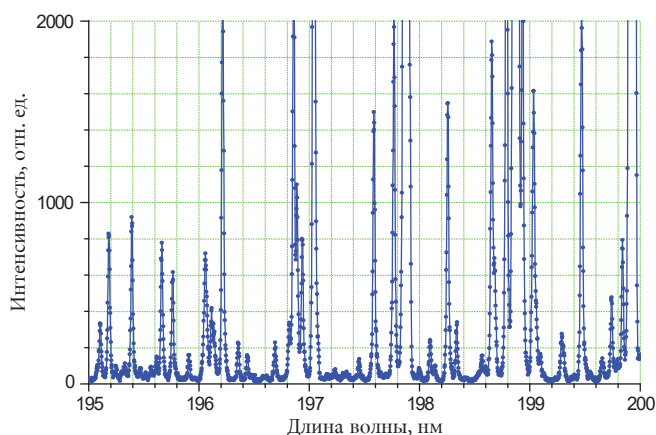


Рис. 6. Фрагмент спектра лампы с полым катодом ЛПК-30.

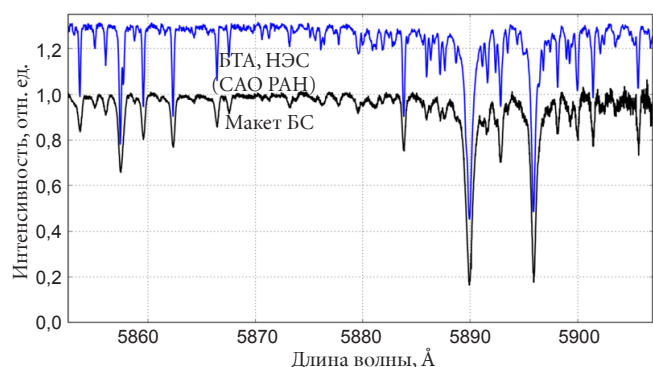


Рис. 7. Спектры Солнца, зарегистрированные на БТА в CAO РАН и на имитаторе ОМБ БС.

Для проверки работоспособности спектрографа с установленной в нём вогнутой голограммной решёткой зарегистрирован спектр излучения Солнца с линиями Фраунгофера в УФ канале. Зарегистрированный спектр представлен на рис. 7. Спектр обработан в Институте астрономии Академии наук (ИНАСАН) и сопоставлен с аналогичными данными, полученными на БТА (большой телескоп азимутальный) Специальной астрофизической обсерватории Академии

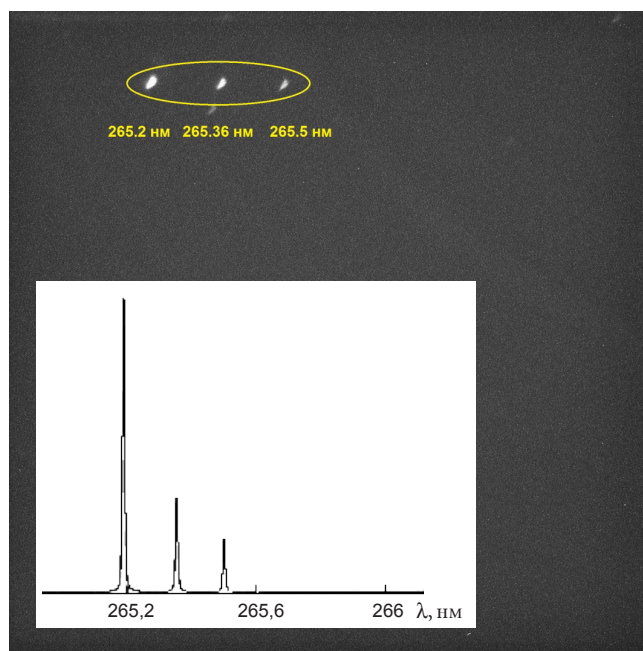


Рис. 8. Линии ртути вблизи 265 нм, выделенные при помощи интерференционного УФ светофильтра.

наук (CAO РАН) в Зеленчуке. Из рисунка видно полное совпадение положения спектральных линий поглощения, полученных на имитаторе ОМБ БС и на стационарном спектрографе БТА.

Для перехода в рабочую УФ область спектра вогнутая голограммная решётка была заменена на нарезную, аналогичную штатной. При установке полосового интерференционного УФ фильтра на входе имитатора спектрографа на матричном приёмнике были зарегистрированы три линии ртути вблизи 265 нм (рис. 8).

Таким образом, на примере юстировки и градуировки ультрафиолетового спектрографа (имитатора космического ВУФ-УФ спектрографа) показана возможность использования дополнительной специально рассчитанной технологической вогнутой голограммной решётки, работающей в видимой области спектра, для настройки ВУФ-УФ каналов спектрографа со скрепленной дисперсией.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шустов Б.М., Сачков М.Е., Боярчук А.А., Мошнев А.А., Гомес де Кастро А.И. Космические перспективы изучения ультрафиолетовой Вселенной: проект «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 4–15.
2. Саванов И.С., Шустов Б.М., Сачков М.Е., Шугаров А.С., Насонов Д.С., Панчук В.Е., Юшкин М.В., Фатхуллин Т.А., Самойлов С.Ю. Блок спектрографов проекта «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 74–80.
3. Невяжская И.А., Тяпков В.А., Шилина Н.В., Шилов В.Б. Разработка и изготовление источников УФ и ВУФ излучения в ГОИ им. С.И. Вавилова // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 8. С. 108–111.
4. Будович В.Л., Будович Д.В., Полотнюк Е.Б. Новые лампы вакуумного ультрафиолета для газоаналитической техники // Журнал технической физики. 2006. Т. 76. Вып. 4. С. 140–142.