

# Исследование поляризационной зависимости пропускания бесщелевого спектрографа

Д. М. Ахметов<sup>1,2</sup>, А. Н. Мельников<sup>2</sup>, Э. Р. Муслимов<sup>1</sup>, Д. Ю. Харитонов<sup>1,2</sup>, Э. Г. Ибатуллин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия

<sup>2</sup> АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

Состояние поляризации излучения несет важную информацию о его источнике. Например, в астрономии поляриметрические и спектрополяриметрические измерения являются практически единственным способом исследования магнитных полей звезд и потому имеют большое значение для звездной астрофизики. При проведении подобных измерений важно обеспечить точную калибровку используемого оптико-электронного прибора и определить инструментальные поляризационные эффекты. Значительная часть астрономических спектральных приборов строится на базе объемно-фазовых голограммных дифракционных решеток. Они отличаются высокой максимальной дифракционной эффективностью, низким уровнем рассеяния света, возможностью коррекции аберраций и задания геометрии с нулевым отклонением пучка. С другой стороны, известно, что дифракционная эффективность таких решеток может сильно зависеть от состояния поляризации излучения, особенно при повышении пространственной частоты. Этот эффект должен быть точно охарактеризован для фотометрической калибровки астрономического спектрографа или реализации в нем спектрополяриметрического режима. В настоящей работе мы демонстрируем измерение поляризационной зависимости коэффициента пропускания на примере бесщелевого спектрографа с гризмой. Гризма работает в сходящемся пучке  $f/6,8$  в спектральном диапазоне 450–950 нм и обеспечивает формирование спектра на приемнике  $36,8 \times 36,8 \text{ мм}^2$  ( $4096 \times 4096$  пикселей) с расчетной спектральной разрешающей способностью до R1067.

*Ключевые слова:* Поляризация, Голограммная дифракционная решетка, Композитный голограммный элемент, Дифракционная эффективность.

*Цитирование:* Ахметов, Д. М. Исследование поляризационной зависимости пропускания бесщелевого спектрографа / Д. М. Ахметов, А. Н. Мельников, Э. Р. Муслимов, Д. Ю. Харитонов, Э. Г. Ибатуллин // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 52–58.

## Введение

Поляризация излучения космических источников дает информацию об их физических характеристиках: величине и геометрии магнитных полей, химическом составе, форме, размерах, концентрации и ориентации рассеивающих излучение частиц, степени однородности поверхностной яркости астрономического объекта. Поляризация может возникать или в самом источнике, или (и) в среде между источником и наблюдателем. В случае точечных источников поляризация излучения может оказаться единственным поставщиком информации о внутренней (пространственно неразрешенной) структуре объекта. Исследование поляризации является важнейшим тестом для определения

механизма генерации излучения в космических условиях: рассеяние на мелких частицах (от электронов до пылинок), синхротронное излучение релятивистских электронов в магнитных полях.

Магнитные поля управляют движением вещества в Галактике. Величина космических магнитных полей изменяется в широких пределах: от  $10^{-6}$  Гс в межзвездной среде до  $10^{12}$  Гс и более в магнитосферах пульсаров. Магнитные поля в межгалактической среде напряженностью  $10^{-9}$  Гс влияют на поведение вещества вблизи галактик не меньше, чем поля нейтронных звезд напряженностью  $10^{12}$  Гс на движение окружающей плазмы.

При измерениях круговой и линейной поляризации в спектрах звезд могут быть обнаружены разнообразные проявления магнитных полей, присутствующих в среде, где формируются основные свойства регистрируемого излучения, т.е. в звездной атмосфере и околозвездной оболочке. Из вышесказанного следует, что аппаратура, ориентированная на исследования поляризации астрофизических объектов, должна обладать широким диапазоном чувствительности и спектрального разрешения.

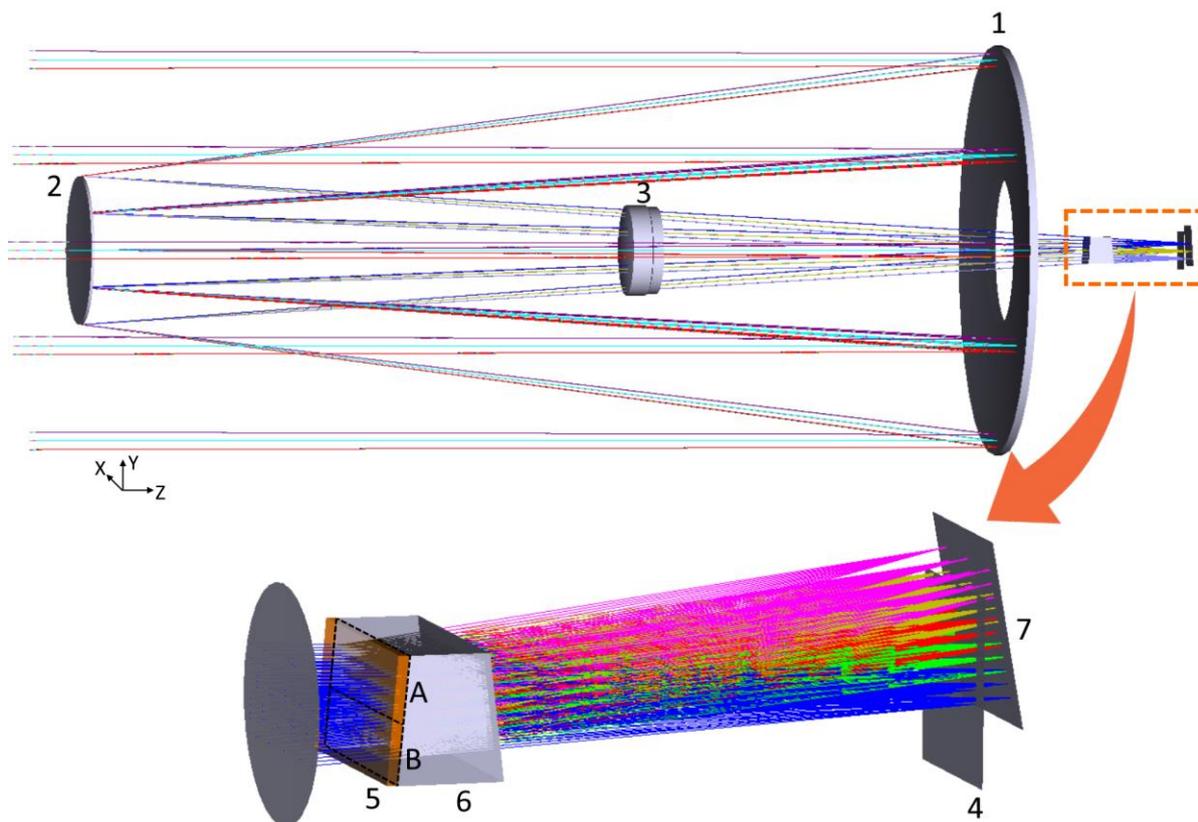
Например, во многих исследовательских программах на телескопах Специальной Астрофизической Обсерватории РАН важное место занимают поляриметрические и спектрополяриметрические наблюдения. По мере смены поколений светоприемников совершенствуется и техника анализа поляризационных свойств излучения. Разработка эффективных спектрографов позволяет предусмотреть новые варианты спектрополяриметрических наблюдений. Именно таким путем идет разработка приборов и методов спектрополяриметрии во всем мире [1].

В настоящей работе мы исследуем поляризационную зависимость коэффициента пропускания, разрабатываемого примере бесщелевого спектрографа с композитной призмой. Задачами исследования является теоретическая оценка инструментальной поляризации, вносимой подобным элементом, и разработка экспериментального способа ее проверки.

### **Описание оптической схемы спектрографа**

Рассматривается оптическая схема бесщелевого спектрографа, представленного на Рисунке 1, основанного на использовании призмы - склейки объемно-фазовой пропускающей решетки и призмы [2], которая используется в сходящемся пучке  $f/6,8$  в спектральном диапазоне 450–950 нм и обеспечивает формирование спектра на приемнике  $36,8 \times 36,8$  мм<sup>2</sup>.

Спектрограф используется совместно с телескопом, построенным по схеме Далла-Киркхэма, и состоящим из первичного зеркала 1 диаметром 500мм, вторичного зеркала 2 и линзового корректора 3. Как показывают расчеты, абберации и неравномерность пропускания в такой схеме телескопа достаточно малы и дальнейшем не рассматриваются. Дифракционная решетка 5 устанавливается в сходящемся пучка и работает с широким полем зрения. Призма 6 изготавливается из оптического стекла ТФ8, обладающего большим показателем преломления и сравнительно малой дисперсией.



**Рис.1.** Общий вид оптической схемы бесщелевого спектрографа, соединенного с телескопом Далла–Киркхэма : 1 – основное зеркало, 2 – вторичное зеркало, 3 – линзовый корректор, 4 - положение фокальной плоскости в режиме отображения, 5 – составная голографическая решетка, разбитая на две зоны А и Б, 6 – призма, 7 – положение плоскости спектрального изображения.

Она служит для уменьшения угла отклонения рабочих пучков и при этом мало влияет на дисперсию и аберрации. Изображение спектра 7 регистрируется номинальной камерой телескопа SBIG STX-1680, установленной в смещенном положении. При расчетах положение компонентов определяются относительно номинальной плоскости изображения телескопа 4. Подробнее схема спектрографа описана в [3].

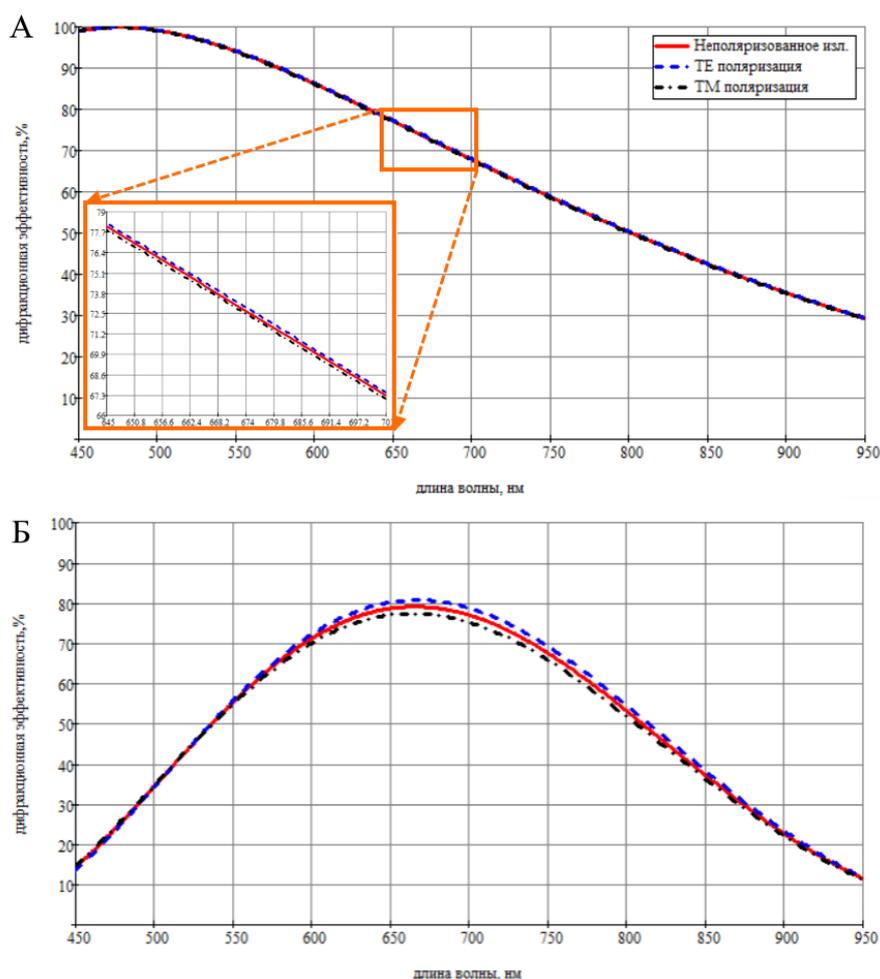
Дифракционная решетка 5 представляет собой объемно-фазовую голограмму и разбивается на две зоны, для которых независимо изменяются аберрации записывающих волновых фронтов и время экспозиции, определяющее глубину модуляции показателя преломления. Такой элемент называется композитным и позволяет внести дополнительную коррекцию аберраций, а также скомпенсировать неравномерность дифракционной эффективности по полю зрения и апертуре.

### **Моделирование поляризационных характеристик**

Известно, что объемно-фазовые голограммные решетки могут обладать высокой максимальной дифракционной эффективностью (ДЭ), широкими возможностями по коррекции аберраций и характеризуются отсутствием паразитных изображений и низким уровнем рассеянного света. При этом среди их недостатков, наряду с выраженной

спектральной и угловой селективностью, можно указать заметную поляризационную зависимость дифракционной эффективности [4].

Для оценки дифракционной эффективности такой решетки можно использовать теорию связанных волн Когельника [5]. На Рисунке 2 показаны спектральные зависимости ДЭ для неполяризованного излучения, ТЕ и ТМ поляризации, вычисленные с помощью данной скалярной теории.



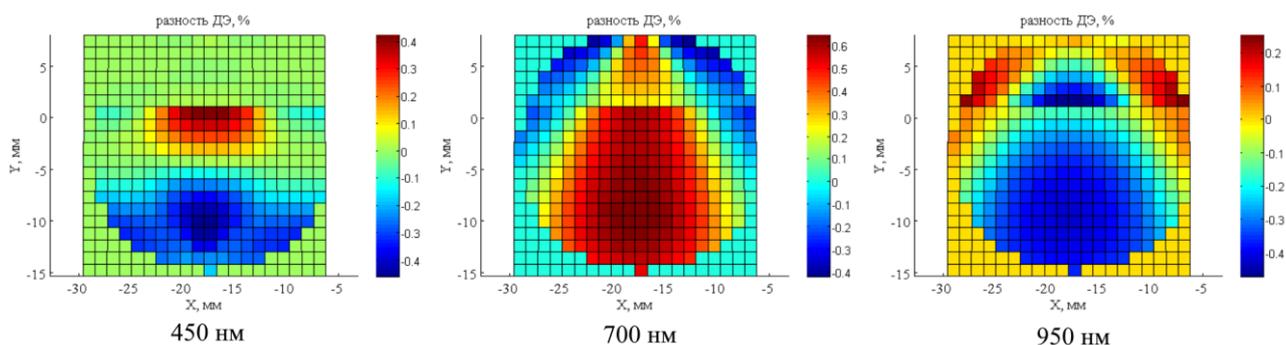
**Рис. 2.** Спектральная зависимость ДЭ, вычисленная в рамках скалярной теории дифракции: А – для решетки с пространственной частотой 327 мм<sup>-1</sup>, Б – для решетки с пространственной частотой 600 мм<sup>-1</sup>.

Используются данные, принятые в [3] в качестве исходных для оптимизации структуры голограммы: рассматривается центр поля зрения и середины зрачка, глубина модуляции составляет 0,012, толщина структуры 20 мкм. На Рисунке 2, А приведены кривые, полученные для номинальной пространственной частоты решетки 327 мм<sup>-1</sup>. Видно, что разность ДЭ для двух состояний поляризации не превосходит 0,4%. Для сравнения на Рисунке 2, Б дана аналогичная кривая для случая пространственной частоты 600 мм<sup>-1</sup>. В этом случае разность ДЭ становится заметной и достигает 3,4%.

Однако в рассматриваемой схеме условия работы голограммы значительно варьируются по полю зрения и апертуре. В данном случае результаты расчета по соотношениям теории связанных волн могут быть неточны, в первую очередь из-за эффекта конической дифракции. Соответственно, используется точный численный метод строгого анализа связанных волн (RCWA), реализованный в программе *reticolo* [6]. В данном случае используются точные данные трассировки лучей в схемах записи и работы гризмы. Для параметров структуры голограммы использованы оптимизированные значения из [3]: толщина структуры 20 мкм для всей решетки, глубина модуляции 0,019 в зоне А и 0,022 в зоне В (см. Рис.1).

Результаты расчета пространственного распределения ДЭ на трех контрольных длинах волн показаны на диаграммах на Рисунке 3. Значения представляют собой разность между ДЭ, вычисленной для ТЕ и ТМ поляризации. Изменение ДЭ по полю зрения значительно меньше изменения по апертуре, поскольку падающий пучок близок к телецентрическому. По этой причине на диаграммах представлены данные только для центра поля зрения.

Максимальное значение разности ДЭ составляет 0,89; 1,07 и 0,73% для длин волн 450,700 и 950 нм, соответственно.



**Рис.3.** Пространственное распределение разности ДЭ для ТЕ и ТМ поляризации.

Полученные значения превосходят первоначальную оценку, полученную по аналитическим формулам. Однако абсолютные значения остаются достаточно малыми и поляризационная зависимость ДЭ не должна оказывать влияния на результаты наблюдений и измерений.

### **Установка для измерения поляризации и алгоритм проведения эксперимента и**

Схема установки для экспериментального определения фотометрических характеристик гризмы, включая поляризационную зависимость ДЭ показана на Рисунке 4. Алгоритм измерений состоит из следующих этапов:

1. Устанавливается источник широкополосного спектра 1, монохроматор 2 и приемник излучения 6 (например, фотодиод BPW34). Щель монохроматора ограничивается по высоте до 1-2 мм.

2. Пара объективов 4 Индустар-51 ( $f'=210\text{мм}$ , 1:4.5) юстируется при линейном увеличении  $-1\times$  и относительном отверстии выходного пучка 1:7. Для ограничения поперечного сечения

светового пучка и достижения требуемой апертуры между двумя объективами устанавливается ирисовая диафрагма.

3. Проводится несколько измерений освещенности в плоскости изображения с использованием набора нейтральных фильтров. По отсчетам, снимаемым с выхода микроконтроллера 7, строится калибровочная таблица.

4. В плоскости 3 устанавливается поляризатор. Измерения по п. 3 повторяются для двух положений с разворотом плоскости поляризации на  $90^\circ$ .

5. Проводится серия измерений по спектру для 6-7 длин волн, покрывающих диапазон 450-950 нм.

6. В сходящийся пучок на расстоянии 160 мм перед изображением устанавливается призма 5. Измерения пп.4-5 повторяются.

7. Определяется разность измеренных значений для двух состояний поляризации с учетом статистики измерений.

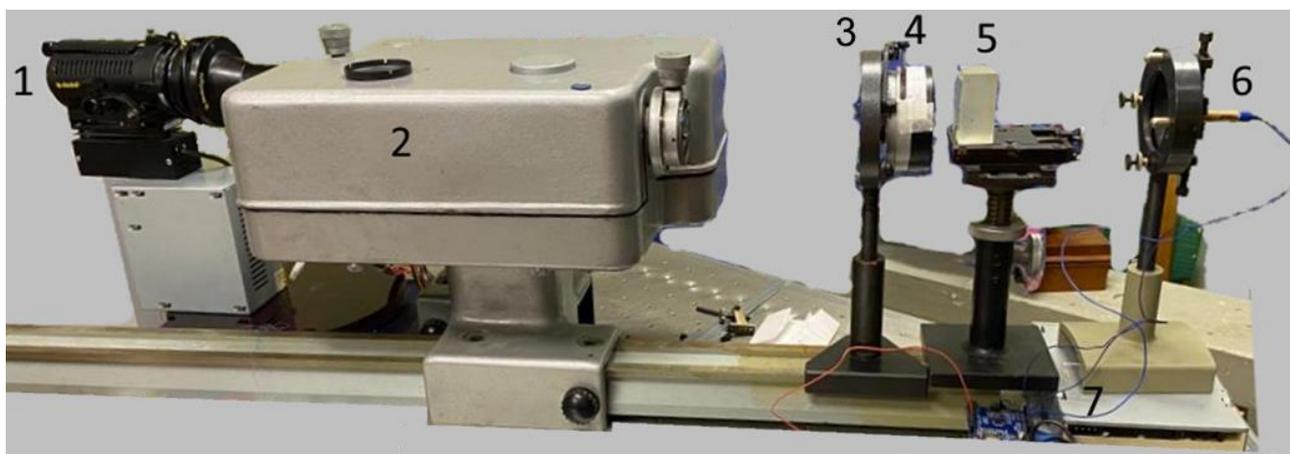


Рис. 4. Схема экспериментальной установки.

### Заключение

В настоящей работе рассмотрена поляризационная зависимость коэффициента пропускания композитной призмы, работающей в схеме бесщелевого спектрографа. С помощью моделирования показано, что поляризационная зависимость дифракционной эффективности объемно-фазовой голограммной решетки, определяющей коэффициент пропускания, несколько увеличивается при введении в модель изменения углов падения в схеме работы и записи. Однако даже при этом максимальное изменение ДЭ в зависимости от состояния поляризации составляет около 1%. Такое изменение не должно оказывать влияния на фотометрические характеристики прибора, а в перспективе низкая инструментальная поляризация делает возможным использование подобных компонентов для спектрополяриметрических измерений в научных исследованиях. Для экспериментального исследования поляризационной зависимости коэффициента пропускания призмы разработана и собрана лабораторная установка.

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 21-79-00082.

## Список источников

- [1] Клочкова В. Г. и др. Поляриметрия и спектрополяриметрия звезд. Приборы и методы // Астрофизический бюллетень. – 2005. – №. 58. – С. 132-144.
- [2] Diffraction gratings handbook /C. Palmer, E. Loewen. – Rochester: Newport corporation, 2014. – 271 p.
- [3] Muslimov E. et al. Optical Design of a Slitless Astronomical Spectrograph with a Composite Holographic Grism //Photonics. – MDPI, 2023. – Т. 10. – №. 4. – С. 385.
- [4] Handbook of optical holography / H. J. Caulfield. – NY:Academic Press, 1979—654 p.
- [5] Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings // Bell System Technical Journal. – 1969. – Т. 48. – №. 9. – С. 2909-2947.
- [6] Chateau N., Hugonin J. P. Algorithm for the rigorous coupled-wave analysis of grating diffraction // JOSA A. – 1994. – Т. 11. – №. 4. – С. 1321-1331.

## Investigation of the transmission polarization dependence of a slitless spectrograph

*D. Akhmetov<sup>1, 2</sup>, A. N. Melnikov<sup>2</sup>, E. Muslimov<sup>1</sup>, D. Kharitonov<sup>1, 2</sup>, E. G. Ibatullin<sup>1</sup>, E. R. Muslimov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI, Kazan, Russia

<sup>2</sup> JSC «Scientific-Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan, Russia

The radiation polarization state brings important information about its source. For example, in astronomy, polarimetric and spectropolarimetric measurements are practically the only way to study the magnetic fields of stars and, therefore, are of great importance for stellar astrophysics. When carrying out such measurements, it is important to ensure accurate calibration of the optical and electronic instrument and to determine the instrumental polarization effects. A significant part of astronomical spectral instruments is built on the basis of volume-phase holographic diffraction gratings. They are notable for the high peak diffraction efficiency, low scattered light, a possibility to introduce an aberration correction and zero-deviation geometry. On the other hand, it is known that the diffraction efficiency of such gratings depends strongly on the radiation polarization state, especially with increasing of the spatial frequency. This effect must be accurately characterized for the photometric calibration of an astronomical spectrograph or for the implementation of spectropolarimetric mode in it. In this paper, we demonstrate the measurement of the transmission polarization dependence on the example of a slitless spectrograph with a grism. The grism operates in a converging  $f/6,8$  beam in the spectral range of 450–950 nm and forms a spectral image on a  $36,8 \times 36,8$  mm<sup>2</sup> detector (4096×4096 pixels) with a computed spectral resolving power up to R1067.

*Keywords:* Polarization, Holographic diffraction grating, Composite holographic element, Diffraction efficiency.