

УДК 520.353:520.85

СПЕКТРОГРАФ ВЫСОКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ С ОПТОВОЛОКОННЫМ ВХОДОМ ДЛЯ 6-М ТЕЛЕСКОПА САО РАН. ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ МОДУЛЬ

© 2016 Д. Е. Кукушкин^{1*}, Д. А. Сазоненко¹,
А. В. Бахолдин^{1**}, М. В. Юшкин², В. Д. Бычков²

¹Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, 197101 Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 24 апреля 2015; принята в печать 2 марта 2016

В статье представлен расчет поляризационного модуля для оптической схемы спектрографа высокого спектрального разрешения с оптоволоконным входом для 6-м российского телескопа. Обсуждается вариант его интегрирования в конструкцию конверсионной оптики на входе в оптоволоконный тракт инструмента. Приведена оценка эффективности всей предоптоволоконной оптической системы. Световая эффективность сборки составляет 80% в режиме поляризационных измерений и 90% в режиме обычной спектроскопии. Оценен нижний предел искажающих инструментальных эффектов поляризационного модуля.

Ключевые слова: *инструменты: поляриметры — инструменты: спектрографы*

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является продолжением исследований по проекту создания высокоточного эшелле-спектрографа с оптоволоконным входом для российского телескопа БТА Специальной астрофизической обсерватории¹ (САО РАН). Наличие такого инструмента приведёт к значительному расширению возможностей российских ученых в астрофизических исследованиях. Список и обоснование этих возможностей, а также технические детали проекта изложены в работе [1]. Кроме того, по мере реализации проекта будет разработан и применён целый ряд технологий, которые могут быть рассмотрены в качестве новых научно-технических заделов для оптической промышленности в области спектроскопии и создания крупногабаритной оптики. Сотрудниками САО РАН предложена базовая версия спектрографа [1, 2] с полным самосогласованным расчетом всех ее оптических элементов. Идеи, заложенные в принципиальной оптической схеме прибора, являются развитием концепции, реализованной в [3]. В настоящей статье представлен расчет поляризационного модуля для обеспечения режима спек-

трополяризметрических наблюдений [1, 4, 5]. Модуль интегрирован в блок конверсионной оптики, которая согласует апертуру телескопа с входной апертурой оптоволоконного тракта спектрографа. В работе также дается оценка эффективности всей предоптоволоконной части спектрографа. В разделе 1 мы коротко описываем уже существующую концепцию спектрографа, отмечаем достоинства и недостатки его оптической схемы. В разделе 2 обсуждаем оптическую схему той части спектрографа (далее «навесная часть»), которая планируется к размещению в первичном фокусе (ПФ) БТА. Вариант поляризационного модуля для обеспечения спектрополяризметрического режима работы спектрографа и аргументы в пользу этого варианта мы приводим в разделах 3 и 4. В заключении обсуждаются достоинства и недостатки всей оптической схемы навесной части и дается оценка ее эффективности.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Спектрограф состоит из транспортабельной навесной части, оптоволоконного тракта и собственного эшелле-спектрографа, стационарно размещенного в специальном помещении на фундаменте телескопа. Навесная часть размещается в первичном фокусе (ПФ) БТА. Эта часть обеспечивает

*E-mail: intenso.dk@gmail.com

**E-mail: bakholdin@aco.ifmo.ru

¹<http://www.sao.ru>

формирование пучков и организует все необходимые режимы работы инструмента. Оптоволоконный канал представляет собой собранный в защитном кожухе жгут оптоволокон длиной 53 м. Канал предназначен для переноса света, собранного главным зеркалом телескопа, к щели спектрографа, где этот свет разлагается в спектр и регистрируется широкоформатным ПЗС-приемником. В отличие от щелевых схем спектральной аппаратуры, традиционно размещаемой непосредственно при штатных фокусах телескопов, такая концепция спектрографа обеспечивает ему наивысшую температурную и механическую стабильность. Более подробно описание узлов и режимов работы спектрографа приведены в [1, 2]. Согласно требованиям, рассмотренным в [1], конструкция навесной части спектрографа должна обеспечивать основные режимы спектральных и спектрополяриметрических наблюдений. Последний режим предполагает использование поляризационной оптики, которая в традиционной концепции [4, 5] раскладывает свет от исследуемых объектов на два ортогонально поляризованных луча, формирующих два независимых канала в спектрографе: каналы обыкновенного и необыкновенного лучей. Это накладывает целый ряд специальных требований к согласующей оптике навесной части. Одним из них является необходимость [5] организации отрезка с параллельным ходом лучей до входа в оптоволоконно для размещения там поляризационного узла. Кроме того, наличие согласующей оптики перед входом в оптоволоконно необходимо для преобразования пучка с числовой апертурой $A = 0.125$ (соответствует относительному отверстию $D = F/4$) к менее светосильному — $A' = 0.018$ ($D = F/30$). Обоснование этого преобразования см. в [1], где концептуально разработан и представлен вариант согласующей оптики. Задачей, решаемой в рамках этой статьи, является оптимизация описываемой схемы для работы с поляризационным модулем (далее анализатором, или анализатором поляризации). Выбор и оптимизация схемы анализатора также являются предметом исследования.

3. СОГЛАСУЮЩАЯ И ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ОПТИКА СПЕКТРОГРАФА

Конструкция и режимы работы согласующей и поляризационной оптики навесной части схематично представлены в [1]. Конструкция обеспечивает три основных режима работы: режим традиционной спектроскопии с возможностью одновременного получения спектров объекта и фона, режим высокоточной спектроскопии и спектрополяриметрический режим. Все три режима требуют организации в навесной части двух независимых световых

каналов. В случае обычной спектроскопии каналы организуются с использованием на входе двух диафрагм. При этом одна из диафрагм формирует канал со светом от изображения объекта, а другая — либо канал фона неба в непосредственной близости от объекта, либо канал искусственного источника света от эталона для прецизионной калибровки по длинам волн (далее по тексту «эталон»). В случае спектрополяриметрических наблюдений световые каналы формируются поляризационной оптикой, которая, как указано выше, требует наличия параллельного хода лучей между оптическими элементами конверсионной оптики.

Согласующая оптика (рис. 1) состоит из входного объектива 1, который коллимирует пучок от телескопа ($D = F/4$), и объектива 5, который преобразует пучок к $D = F/30$ для дальнейшего согласования его с апертурой входа в оптоволоконно (детали см. в [1]). С этим относительным отверстием оптическая система фокусирует парные комбинации изображений (объект—фон, объект—эталон, обыкновенный—необыкновенный поляризованные лучи), обеспечивающие полный набор режимов работы спектрографа. В этом исследовании мы рассчитываем блок согласующей оптики с добавлением в него набора поляризационной оптики, состоящего из призмы Волластона и последовательно вводимых перед ней фазовых пластин [6] (см. рис. 1 и следующий раздел, в котором даны детали работы поляризационного узла). Все расчеты проводились с использованием стандартного пакета программы Zemax.

Реализованная в результате расчетов оптическая система имеет следующие характеристики: фокусное расстояние первого компонента составляет 81.36 мм, второго — 551.3 мм. Конструктивные параметры оптических элементов схемы представлены в таблице 1. При угловом поле в 1'5 (размер диафрагмы) входная числовая апертура репродукционной системы составляет $A = 0.125$, выходная числовая апертура составляет $A' = 0.018$; диаметр коллимированного светового пучка составляет 21 мм. Призма Волластона состоит из двух пластин исландского шпата с размером основания 2 мм и высотой 30 мм. Суммарная толщина поляризатора составляет 4 мм, что позволяет минимизировать потери света в нем.

Пропускание всей системы при длине волны $\lambda = 380$ нм с учетом потерь на границе сред без антиотражающего покрытия и с однослойным антиотражающим покрытием на основе MgF_2 представлены в таблице 2. Покрытие оптимизировано на длину волны 380 нм (коротковолновая граница рабочего диапазона). Эта длина волны выбрана для иллюстрации нижнего предела пропускания. На этом пределе полное пропускание просветленной

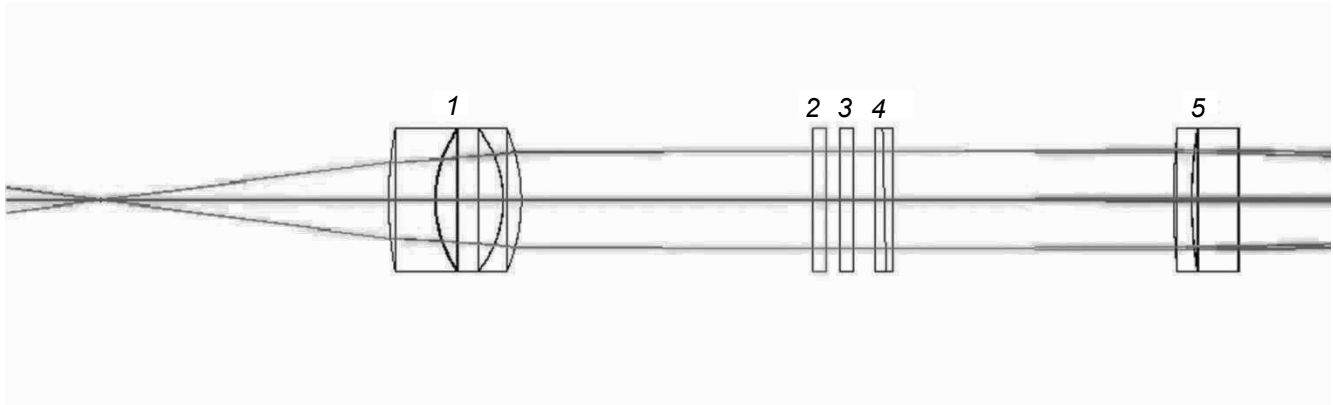


Рис. 1. Оптическая схема предоптоволоконной части: (1, 5) — согласующая оптика, (2) — поляризационная пластинка $\lambda/2$, (3) — поляризационная пластинка $\lambda/4$, (4) — поляризационный расщепитель — призма Волластона.

Таблица 1. Конструктивные параметры согласующей оптики

Элемент схемы, рис. 1	Радиус кривизны, мм	Толщина по оси, мм	Марка стекла по каталогу ЛЗОС	Световой диаметр, мм
1	76.910	10	К8	17.152
	25	0.3		18.138
	25	15	ОК4	18.336
	-22.910	4	СТК12	19.738
Воздух	-35.810	145.5		20.864
5	138.680	4	СТК12	21.342
	89.540	10	ОК4	21.112
	914.100	600		20.894

оптики (см. таблицу 2) оценивается нами около 70% в поляризационном режиме и 83% в обычном спектроскопическом режиме. С увеличением длины волны и применением многослойного покрытия MgF_2 пропускание системы увеличивается, достигая значений 82% в поляризационном режиме и 93% в режиме традиционной спектроскопии. Эти светопотери не учитывают абберационные искажения пучка фокальной плоскости, что влечет за собой потери на входе в оптоволокно. Для того чтобы их оценить, рассмотрим более детально поляризационный модуль.

4. ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ МОДУЛЬ

Согласно общим принципам организации магнитометрических и спектрополяризационных наблюдений [5], поляризационный модуль состоит из полуволновой 2 и четвертьволновой 3 пластин (рис. 1) и поляризационного расщепителя 4. Расщепитель делит пучок на обыкновенный и необыкновенный ортогонально поляризованные пучки и разносит их в пространстве. Комбинация «полуволновая пластина–расщепитель» соответствует режиму наблюдений линейно поляризованного света. Комбинация «четвертьволновая пластина–расщепитель» обеспечивает наблюдения круговой поляризации. Подробно о теории и методике поляризационных наблюдений см. в [5]. Наша задача заключалась в разработке такой оптической схемы, которая будет обеспечивать оптимальное деление светового потока на обыкновенный и необыкновенный лучи для дальнейшего ввода их в оптоволокно заданной конфигурации [1].

После рассмотрения нескольких вариантов композиции поляризационного модуля было отдано предпочтение варианту, в котором в качестве поляризационного компонента используется призма Волластона с преломляющим углом $1^\circ 5'$ (рис. 1) и углом разведения лучей $\phi = 31' 1''$ ($\lambda = 587.56$ нм) [7]. Данная схема позволяет использовать большой рабочий отрезок для разведения поляризованных пучков на необходимое расстояние (в данном случае 4 мм — расстояние между торцами оптоволоконных входов каждого из световодных каналов). Такая компоновка обеспечивает одну оптическую схему для работы во всех режимах, а также минимизирует потери света и удешевляет изготовление всего поляризационного блока.

Таблица 2. Параметры пропускания системы

Марка стекла	Толщина по оси, мм	Пропускание (для прошедшего света) без антиотражающего покрытия (NULL) и с антиотражающим покрытием на основе MgF_2 (MgF_2)		Длина волны, нм
Граница сред воздух–К8		MgF_2	0.988	380
		NULL	0.956	
К8	10	0.975		380
Граница сред К8–воздух		MgF_2	0.988	380
		NULL	0.956	
Граница сред воздух–ОК4		MgF_2	0.982	380
		NULL	0.965	
ОК4	15	0.994		380
Склейка		0.998		380
СТК12	4	0.961		380
Граница сред СТК12–воздух		MgF_2	0.997	380
		NULL	0.93	
Граница сред воздух–кварц (кварцевое защитное стекло фазосдвигающей пластины)		MgF_2	0.983	380
		NULL	0.963	380
Фазовая пластина (суперахромат-5)	5	0.92		380
		Данные взяты из [6]		
Граница сред кварц–воздух		MgF_2	0.983	380
		NULL	0.963	
Граница сред воздух–кристалл		MgF_2	0.996	380
		NULL	0.934	

Таблица 2. (Продолжение)

Марка стекла	Толщина по оси, мм	Пропускание (для прошедшего света) без антиотражающего покрытия (NULL) и с антиотражающим покрытием на основе MgF_2 (MgF_2)	Длина волны, нм
исландского шпата			
Исландский шпат (Calcite)	4	0.922 (обыкновенный луч) 0.948 (необыкновенный луч) 0.935 (средний)	380
Граница сред кристалл исландского шпата—воздух		MgF_2 0.996 NULL 0.934	380
Граница сред воздух—СТК12		MgF_2 0.997 NULL 0.93	
СТК12	4	0.961	380
Склейка		0.998	
ОК4	10	0.996	380
Граница сред ОК4—воздух		MgF_2 0.982 NULL 0.965	380
Общее пропускание вместе с поляризационной оптикой		MgF_2 0.69 NULL 0.45	380
Общее пропускание без поляризационной оптики		MgF_2 0.83 NULL 0.65	380

Анализ пятен рассеяния каждого из поляризованных пучков для конечного варианта системы (рис. 2) показал, что оптическая схема в целом соответствует требованиям, предъявляемым к качеству изображения, и может быть использована в базовой схеме инструмента.

К достоинствам выбранной системы можно от-

нести ее относительно высокую прозрачность в рабочем диапазоне длин волн (таблица 2). Преимуществами являются также простота изготовления, невысокая цена и отсутствие необходимости значительного усложнения конструкции для улучшения ее характеристик. Возможна и модернизация

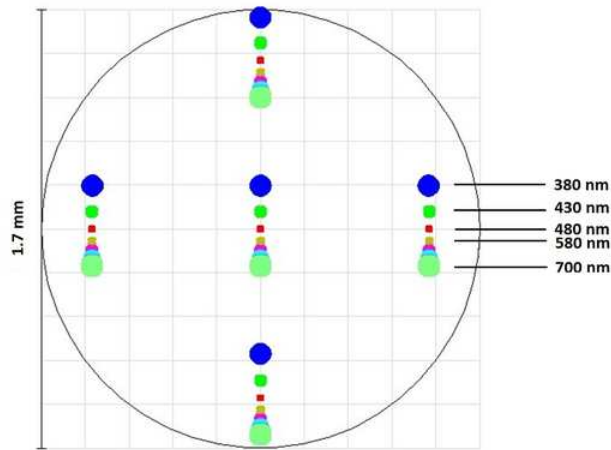


Рис. 2. Пятна рассеяния одного из двух поляризованных пучков для выделенных длин волн рабочего диапазона. Результаты для другого пучка идентичны.

системы для работы в ближней инфракрасной области спектра.

На рис. 3 представлено качество изображения в спектроскопическом режиме работы (без анализатора поляризации). Пятна рассеяния точки для разных длин волн диапазона полностью соответствуют требованиям [1].

В спектрополяриметрическом режиме работы система обладает хроматизмом в силу расхождении поляризованных пучков разных длин волн. Хроматическая aberrация растягивает в сагитальной плоскости изображение полуторасекундной диафрагмы от 1.305 мм до 1.7 мм. При прохождении пучков света через оптоволокно большой длины (десятки метров) хроматизм нейтрализуется, однако на входе в оптоволокно это «растяжение» приведет к дополнительным потерям света (примерно 5–7%) при согласовании оптоволокна для работы с полуторасекундной диафрагмой. Во избежание этих потерь придется соответственно увеличивать диаметр сердцевины волокна. Это, в свою очередь, приведет к незначительной потере спектрального разрешения на выходе, что при всех остальных преимуществах позволяет нам рекомендовать схему для производства. В будущем, в зависимости от структуры оптоволоконного входа, можно пробовать компенсировать хроматизм введением оптических клиньев непосредственно перед входом в каждый из каналов. К настоящему моменту структура входов (апертуры волокон и типы входных микролинз) еще не определена, поэтому вопрос исправления хроматизма мы опускаем до будущего специального исследования. Темой отдельного исследования будет и полный анализ всех поляризационных эффектов на всех узлах инструмента. Его предполагается провести

тогда, когда будет окончательно выбрана схема поляриметра и сконструирован прототип (опытный образец). В настоящий момент уже определен производитель фазосдвигающих пластин [6], и мы можем оценить эффекты деполяризации и «накачки» ненулевой инструментальной поляризации при взаимодействии с фазосдвигающими пластинами — так называемый кросstalk-эффект (от англ. «crosstalk»).

5. ОЦЕНКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ЭФФЕКТОВ ФАЗОСДВИГАЮЩИХ ПЛАСТИН В ИЗМЕРЕНИЯХ ПАРАМЕТРОВ СТОКСА

Не рассматривая на данном этапе призму Волластона, оценим величину кросstalk-эффекта и деполяризации из-за хроматизма поляризационных свойств фазосдвигающих пластин анализатора, который является одной из основных причин инструментальных искажений в поляризационном модуле. В строгом изложении теория вопроса представлена в [5].

Полагая все прочие параметры анализатора поляризации идеальными, мы можем оценить эффекты «накачки» ненулевой инструментальной круговой поляризации при прохождении линейно поляризованного света через четвертьволновую пластину (кроссток $F(V)$) и инструментальной линейной поляризации при прохождении через полуволновую пластину света круговой поляризации (кроссток $F(Q, U)$) в долях от интенсивности входящего света. Например, при анализе круговой поляризации, если на анализатор с четвертьволновой пластиной на входе подается 100% линейно поляризованный свет, из-за неидеальности реализации

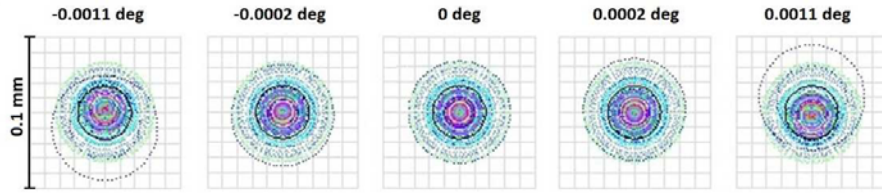


Рис. 3. Пятна рассеяния неполяризованного пучка.

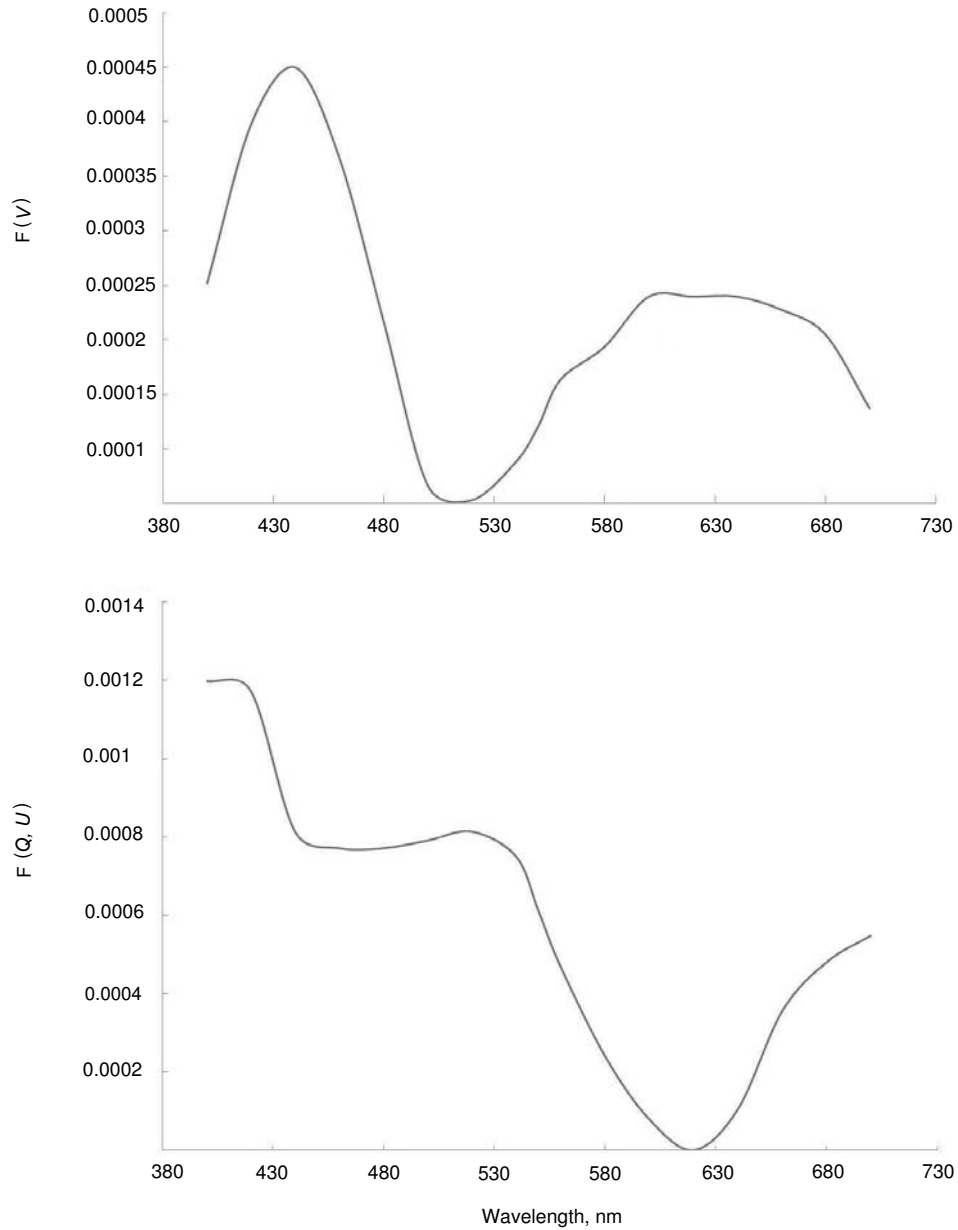


Рис. 4. Крестолк в результате хроматизма поляризационных свойств пластин $\lambda/4$ ($F(V)$ верхняя панель) и $\lambda/2$ ($F(Q, U)$ нижняя панель) в зависимости от длины волны.

четвертьволнового фазового сдвига на выходе из пластины будет не 100% круговая поляризация, а эллиптическая. Это, в свою очередь, приведет к тому, что призма Волластона с ориентацией осей $0^\circ/90^\circ$, соответствующих каноническому режиму измерения круговой поляризации (детали см. в [5]), пропустит по своим осям свет не в равных долях. Из этого будет следовать вывод о ненулевой круговой поляризации на входе, несмотря на то, что туда подавался 100% линейно поляризованный свет. Крестолк $F(V)$ в данном случае оценивается как доля прошедшего через систему света, преобразованного в круговую поляризацию от линейно поляризованного света, поданного на вход. Аналогично можно оценить и величину «накачки» при определении параметров Стокса Q и U в режиме измерения линейной поляризации.

На рис. 4 приведены оценка величины «накачки» в режиме измерения круговой поляризации, $F(V)$ и верхняя оценка крестолк-эффекта для параметров Стокса Q и U ($F(Q, U)$). Как можно видеть, характерные значения для $F(V)$ варьируются на уровне $2e-4$ и не превышают $4e-4$, а для $F(Q, U)$ — в диапазоне $(2-8)e-4$. Величины коэффициентов деполяризации при таких значениях будут практически равны единице, и ими можно пренебречь в большинстве поляризационных исследований. Этот результат иллюстрирует тот факт, что при создании реально работающего прототипа инструмента выбранные фазосдвигающие элементы способны обеспечить инструментальные характеристики, сравнимые с лучшим, на наш взгляд, из существующих поляриметров этого класса [5].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен вариант оснащения оптоволоконного спектрографа высокого спектрального разрешения БТА поляризационной оптикой. Предлагаемая схема позволяет проводить последовательные наблюдения всех параметров Стокса (подробнее см., например, [5, 9]). Представленное решение является классическим и в то же время оптимальным как по цене, так и по качеству. Все другие рассмотренные нами схемы являются либо громоздкими (например, основанные на использовании пластины Савара), либо не вписываются в требования универсальности использования конверсионной оптики для обеспечения всех требуемых режимов наблюдений. Последнее обстоятельство заставило нас отказаться от решения, представленного в [5], несмотря на его инновационность, связанную с отсутствием значительных хроматических аберраций на выходе. Фактически, в представленной системе присутствие нескомпенсированного хроматизма является единственным недостатком. По

мере реализации проекта планируется его минимизировать, введя в расчет компенсирующие клинья. Отметим, что, даже с учетом обозначенной проблемы, представленная схема является рабочей и может быть использована в спектрополяриметрических и магнитометрических наблюдениях, проводимых на БТА САО РАН. Более подробно о последних результатах таких исследований см. в [10–14]. Методические принципы, использованные в данной работе (см., например, [15, 16]), являются частью школы Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00043).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. G. Valyavin, V. D. Bychkov, M. V. Yushkin, et al., *Astrophysical Bulletin* **69**, 224 (2014).
2. G. G. Valyavin, V. D. Bychkov, M. V. Yushkin, et al., *ASP Conf. Ser.* **494**, 305 (2015).
3. H. Dekker, S. D’Odorico, A. Kaufer, et al., *Proc. SPIE*, **4008**, 534D (2000).
4. V. D. Bychkov, *Astrophysical Bulletin* **63**, 83 (2008).
5. K. G. Strassmeier, A. Hofmann, and M. F. Woche, *Astronomische Nachrichten* **323**, 510 (2002).
6. A. V. Samoylov, V. S. Samoylov, A. P. Vidmachenko, and A. V. Perekhod, *JQRST*, **88**, 319 (2004).
7. У. Шерклифф, *Поляризованный свет. Получение и использование* (Москва, Мир, 1965).
8. М. А. Окатов, Э. А. Антонов, А. Байгожин и др., *Справочник технолога-оптика*, под ред. М. А. Окатова, 2-е изд. (Санкт-Петербург, Политехника, 2004).
9. I. D. Naidenov, G. G. Valyavin, S. N. Fabrika, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **53**, 124 (2002).
10. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, and I. A. Yakunin, *ASP Conf. Ser.*, **494**, 15 (2015).
11. G. Valyavin, D. Shulyak, G. A. Wade, et al., *Nature* **515**, 88 (2014).
12. E. A. Semenko, I. I. Romanyuk, D. O. Kudryavtsev, and I. A. Yakunin, *ASP Conf. Ser.*, **494**, 51 (2015).
13. I. A. Yakunin, E. A. Semenko, I. I. Romanyuk, and M. E. Sachkov, *ASP Conf. Ser.*, **494**, 86 (2015).
14. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **70**, 191 (2015).
15. А. В. Бахолдин, Г. Э. Романова, Г. И. Цуканова, *Теория и методы проектирования оптических систем* (Санкт-Петербург, НИУ ИТМО, 2011), Ч. 1.
16. Г. И. Цуканова, *Специальные разделы прикладной оптики*, под ред. А. А. Шехонина, А. В. Бахолдина (Санкт-Петербург, СПбГУ ИТМО, 2008).

High-Resolution Fibre-Fed Spectrograph for the 6-m Telescope. Polarimetric Unit

D. E. Kukushkin, D. A. Sazonenko, A. V. Bakholdin, M. V. Yushkin, and V. D. Bychkov

We report the computation of the design of a polarimetric unit for the optical scheme of the fiber-fed high-resolution spectrograph for the 6-m Russian telescope. We discuss a variant of its integration into the design of conversion optics at the input of the fiber path of the instrument and estimate the efficiency of the entire pre-fiber optical system. The luminous efficiency of the assembly is equal to 80% and 90% when operated in the polarimetry and normal spectroscopic modes, respectively. We estimate the lower limit for the distorting instrumental effects of the polarimetric unit.

Keywords: *radio continuum: galaxies—gamma-ray burst:general— cosmic background radiation—methods:data analysis*