

УДК 520.627

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СТОКС-ПОЛЯРИМЕТРА С РАЗЛИЧНЫМИ АНАЛИЗАТОРАМИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

© 2019 Д. Е. Кукушкин^{1*}, В. Д. Бычков²,
Д. А. Сазоненко¹, А. В. Бахолдин^{1**}, В. Н. Васильев¹

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 30 апреля 2019 года; после доработки 20 мая 2019 года; принята к публикации 20 мая 2019 года

В настоящее время поляриметрические исследования в астрономии приобрели огромное значение. С их помощью изучаются магнитные поля звезд, определяется ориентация орбит экзопланет, эффекты отражения в атмосферах звезд и аккреционных дисках и многое другое. В статье представлен расчет оптических схем стокс-поляриметров с различными поляризационными анализаторами. Приведена сравнительная оценка пропускания поляриметров с призмой Волластона и с модифицированной призмой Фостера в качестве поляризационных анализаторов. Оценка пропускания производилась для разных форм прямоугольных выходных щелей и расстояний между ними в двух спектральных диапазонах. Приведены рекомендации по условиям использования призм Волластона и Фостера в стокс-поляриметрах, предназначенных для астрофизических исследований.

Ключевые слова: *инструменты: поляриметры*

1. ВВЕДЕНИЕ

Все современные стокс-поляриметры, с помощью которых проводят поляризационные исследования различных небесных тел, оснащены поляризационными анализаторами [1]. Такие анализаторы позволяют измерять состояние поляризации входящего излучения посредством его пространственного разделения на два линейно поляризованных в ортогональных (базисных) направлениях пучка. В том случае, если анализируется линейно поляризованный свет, такая методика позволяет произвести непосредственный анализ его геометрии. Если же анализируется круговая поляризация, то перед разложением по базисным направлениям этот свет преобразуется с помощью фазовых пластин в линейно поляризованный, и далее задача сводится к анализу линейно поляризованного света.

Принципиальная схема устройства стокс-поляриметра в составе спектрополяриметра представлена на Рис. 1. Свет от телескопа через входную щель 1 падает на коллиматор 2. Далее в параллельном пучке лучей располагаются поляризационные элементы. Фазовые пластины 3 и 4 предшествуют поляризационному анализатору 5, разделяющему световой поток на два

канала: обыкновенный и необыкновенный лучи. Деполяризатор 6 применяется при необходимости деполяризовать излучение после разделения на каналы для увеличения точности измерений. В стокс-поляриметре может присутствовать устройство для калибровки по длинам волн 7. Проекционный объектив 8 формирует изображения входной щели 9, в которой устанавливаются диафрагмы для дальнейшей передачи света на щель спектрометра.

В подавляющем большинстве поляризационных исследований в различных отраслях используются двулучепреломляющие кристаллы. Они также чаще всего применяются и в астрономических инструментах. Современные материалы, клеящие вещества и покрытия позволяют применять такие кристаллы в широком спектральном диапазоне — от ультрафиолета до инфракрасного [1]. В астрономических приборах в качестве поляризационного анализатора наряду с поляроидами на основе поляризационных пленок [2, 3] и поляризационных кубов [4, 5] применяются главным образом призма Волластона и призма Фостера (включая ее модифицированную версию) [6–18]. Однако стоит отметить, что в последнее время актуальным становится использование в стокс-поляриметрах в качестве анализатора поляризационной дифракционной решетки [19–21]. Разработчиками этой инновационной методики являются специалисты из

*E-mail: dekukushkin@itmo.ru

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

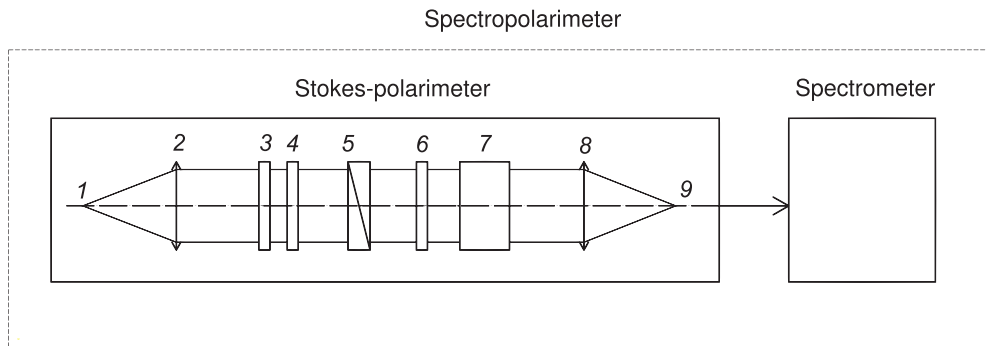


Рис. 1. Принципиальная схема стокс-поляриметра: 1 — входная щель, 2 — коллимирующий объектив, 3, 4 — фазовые пластины $\lambda/2$ и $\lambda/4$, 5 — поляризационный анализатор, 6 — деполаризатор, 7 — устройства для калибровки, 9 — плоскость изображения входной щели.

университета Северной Каролины (North Carolina State University (NCSU) [21]. Основным отличием такого анализатора поляризации от классических поляризационных делителей светового пучка, таких как призмы Волластона или Фостера, является использование иного физического принципа деления светового пучка. В то время как классические элементы делят пучок света на два ортогонально поляризованных благодаря эффекту двулучепреломления, поляризационная дифракционная решетка использует эффект Панчаратнама—Берри, чтобы вызвать задержку фазы в падающем излучении [20], одновременно разделяя поток на разные порядки спектра. Между тем, несмотря на инновационность дифракционного подхода, применение классических двулучепреломляющих призм еще долго будет оставаться доминирующим в астрономических поляриметрических исследованиях.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время методика построения спектрополяриметров на основе призм Волластона и Фостера хорошо отработана и широко применяется [1]. Использование той или иной призмы зависит от нескольких факторов: рабочего спектрального диапазона прибора, спектрального разрешения спектрометра, габаритов системы, согласования числовых апертур телескопа с инструментом, размера входной щели спектрометра. Соответственно, в каждом конкретном случае приходится решать многофакторную задачу выбора той или иной призмы. Перечислим недостатки и преимущества использования призмы Волластона и призмы Фостера в астрономических исследованиях.

Основным недостатком призмы Волластона является остаточный хроматизм, который может привести к энергетическим потерям при переносе излучения в спектрометр. Преимущество призмы Волластона заключается в сравнительно малой толщине призмы, что позволяет уменьшить потери

света при прохождении его через призму. Благодаря тому, что обыкновенный и необыкновенный лучи после призмы Волластона расходятся симметрично под известным углом $\varphi_{eo} = 2(n_e - n_o) \times \text{tg } \Omega$, где $(n_e - n_o)$ — двулучепреломление кристалла, Ω — угол при вершине составных призм [22], при достаточно большом заднем отрезке оптической системы поляриметра возможно развести два изображения на необходимое расстояние, минимизируя толщину призмы. Также использование призмы Волластона позволяет проще переконфигурировать спектрограф для работы в классическом режиме без анализатора поляризации, задействуя два канала, в одном из которых строится изображение объекта, в другом — фона.

Призма Фостера свободна от хроматических aberrаций и может применяться в спектральном диапазоне, ширина которого определяется поглощением излучения в материале призмы. Как правило, для симметричного разведения входящего пучка на обыкновенный и необыкновенный лучи на одну из выходных граней призмы приклеивается равнобедренная призма из стекла ВК7, которая позволяет получить на выходе два параллельных ортогонально поляризованных пучка лучей [23]. Такое решение упрощает разработку оптической системы для второго канала и позволяет свести изображения в обоих каналах в одну плоскость с минимальным расстоянием между ними. Особенностью использования модифицированной призмы Фостера является необходимость создания второго оптического канала после призмы для одного из выходящих лучей. В этом, а также в заниженной по сравнению с призмой Волластона пропускной способности при больших апертурах пучка, видится недостаток использования призмы Фостера. Между тем в целом ряде поляризационных исследований эти недостатки не являются существенными (в частности, в солнечных исследованиях). Это послужило основанием для проведения специального исследования, результаты которого изложены

в настоящей статье. Целью данной работы является сравнительная оценка пропускания оптических систем поляриметров с использованием в качестве поляризационного анализатора призмы Волластона и модифицированной призмы Фостера.

3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ СТОКС-ПОЛЯРИМЕТРОВ НА БАЗЕ ПРИЗМ ВОЛЛАСТОНА И ФОСТЕРА

Для оценки пропускания систем рассчитаем единую зеркальную оптическую систему стокс-поляриметра для обоих решений. Примем, что входная числовая апертура поляриметра $A = 0.075$ ($F/6.66$), диаметр коллимированного пучка $D_c = 10$ мм, следовательно, фокусное расстояние коллиматора $f'_{coll} = 66.66$ мм. Увеличение оптической системы стокс-поляриметра $\beta = -1^x$, тогда фокусное расстояние проекционного объектива $f'_{obj} = 66.66$ мм. Расчеты производились в двух спектральных диапазонах: $\lambda_1 = 390-750$ нм, $\lambda_2 = 390-1200$ нм. В расчетах используются прямоугольные входные щели с фиксированной шириной $w = 0.1$ мм. Все размеры входных щелей превышают размеры нормальной щели [24].

Системы построены таким образом, чтобы создавать единую входную щель для спектрометра. Данное условие накладывает дополнительные ограничения на построение оптических систем. Добавление в ход лучей перед поляризационным анализатором фазосдвигающих $\lambda/2$ - и $\lambda/4$ -пластин позволяет организовать измерение всех параметров Стокса. Внесение фазовых пластин в ход лучей существенно не отразится на качестве изображений, но уменьшит пропускание приборов. Для деполяризации излучения после поляризационных призм в ход лучей может вводиться деполяризатор.

В режиме прямого соединения поляриметра со спектрометром необходимо построить ортогонально поляризованные изображения входной щели, находящиеся на одной оси. Данное условие необходимо для реализации спектрополяриметрических наблюдений. Если изображения входной щели поляриметра располагаются друг над другом (две параллельные линии), после разложения этих изображений по спектру в спектрометре на приемнике произойдет наложение монохроматических изображений. Как правило, направление дисперсии в спектрометре совпадает с короткой стороной щели.

На рис. 2 представлена оптическая система поляриметра с призмой Волластона. В качестве коллиматора и проекционного объектива используются внеосевые области параболических зеркал, оси которых совпадают и проходят через центр входной щели. Благодаря использованию двух идентичных

внеосевых параболоидов данная система зеркал обладает близким к дифракционному качеством изображения. Аберрацией, ограничивающей качество изображения в подобной системе, является дисторсия, вызванная наклоном входной щели [25].

Конструктивные параметры призмы Волластона приведены в таблицах 1 и 2. Толщина призмы по оптической оси составляет 4 мм, световой диаметр — 12 мм.

Конструктивные параметры модифицированной призмы Фостера для всех режимов работы одинаковы и приведены на рис. 3. При увеличении светового диаметра более 12 мм пропускание модифицированной призмы Фостера значительно уменьшается из-за увеличения толщины кристалла. У призмы Волластона подобные недостатки отсутствуют.

На рис. 4 представлена оптическая система поляриметра с модифицированной призмой Фостера. Два ортогонально поляризованных пучка сводятся вместе при помощи системы из плоских наклонных зеркал для организации двойной входной щели спектрометра. Изображения располагаются друг над другом, расстояние между изображениями в данной схеме регулируется положением плоских зеркал. Для реализации такого решения вместо плоских зеркал 8 и 9 можно использовать призму. Призма с наружными отражающими гранями существенно упростит сборку такой оптической схемы. От взаимного положения отражающих поверхностей 8 и 9 зависит разведение двух изображений, что требует аккуратного конструкторского решения.

Для оценки пропускания систем использовался непоследовательный режим задания оптических систем в OpticStudio. Результаты моделирования приведены на рис. 5 и 6. Моделирование выполнялось с различными значениями длины входных щелей $L_1 = 0.25$ мм, $L_2 = 0.5$ мм, $L_3 = 1$ мм и изменяемым расстоянием h между изображениями входных щелей, а также для различных значений длины L входной щели при фиксированном значении h в двух рабочих спектральных диапазонах, без учета фазовых пластин и деполяризатора. Для системы с призмой Волластона положение выходных щелей оптимально по суммарной интенсивности сигнала. Пропускание системы с модифицированной призмой Фостера приведено без учета наклонных зеркал (рис. 4, позиции 6–9), так как конструктивная реализация сведения изображений на требуемое расстояние между ними может быть осуществлена разными способами. Целью же этой работы является оценка пропускания двух оптических систем с разными поляризационными анализаторами в равных условиях.

Таблица 1. Конструктивные параметры призмы Волластона

Расстояние между изображениями входной щели h , мкм	Угол при вершине призмы Волластона, град. (спектральный диапазон $\lambda = 390-1200$ нм)		
	Длина входной щели $L_1 = 0.25$ мм	Длина входной щели $L_2 = 0.5$ мм	Длина входной щели $L_3 = 1$ мм
100	0.85	1.50	2.70
200	1.10	1.75	3.00
300	1.35	2.00	3.25
400	1.60	2.25	3.45
500	1.85	2.50	3.70
600	2.10	2.70	3.95

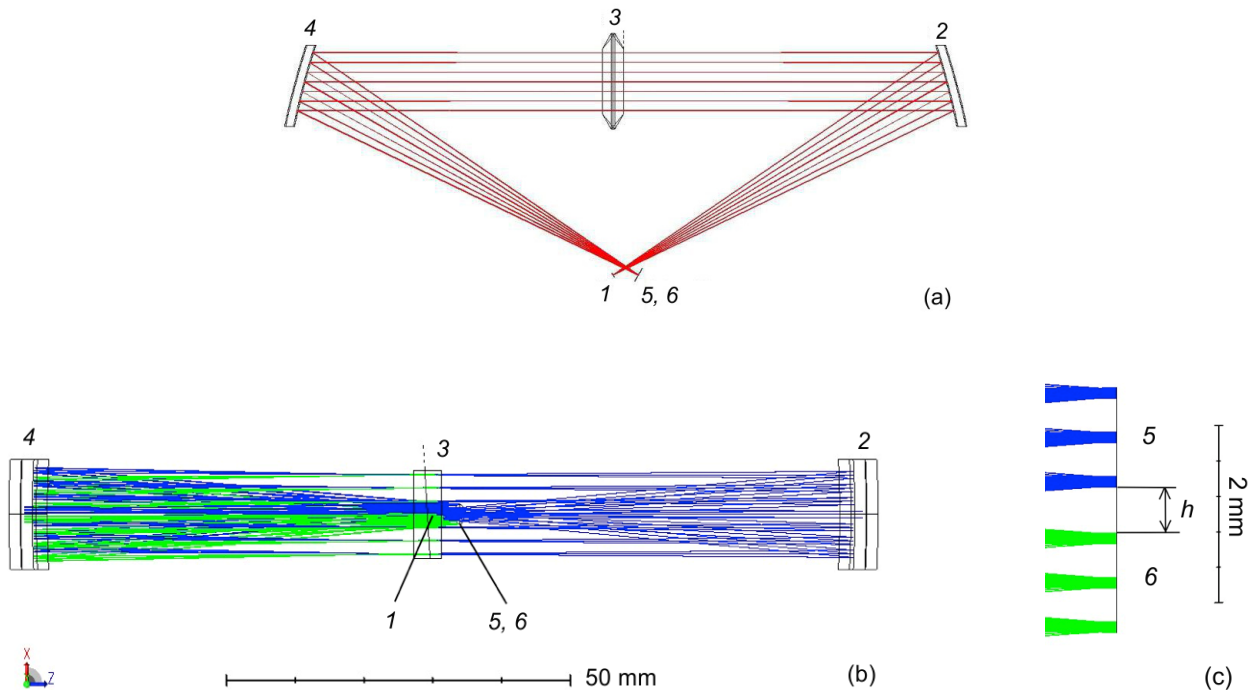


Рис. 2. Оптическая система поляриметра с призмой Волластона: (а) — сечение OYZ , (б) — сечение OXZ , 1 — входная щель, 2 — коллиматор, 3 — призма Волластона, 4 — проекционный объектив, 5, 6 — плоскости изображения входной щели для двух ортогонально поляризованных пучков.

Модифицированная призма Фостера в силу отсутствия хроматизма не чувствительна к поворотам относительно оптической оси. Пропускание рассчитанной системы с модифицированной призмой Фостера не изменяется при различных размерах входной щели и расстояниях h между изображениями входной щели и одинаково в двух спектральных диапазонах. Пропускание составляет 38.22% для необыкновенного луча и 34.08% для обыкновенного луча. Разница в пропускании между обыкновенным и необыкновенным лучами

для модифицированной призмы Фостера обуславливается разным ходом лучей: обыкновенный луч дополнительно проходит через призму из ВК7. Вследствие использования оптических компонентов для организации выходной щели интенсивность в обоих каналах снижается. Для всех зеркал использовалось покрытие из алюминия толщиной $0.04\lambda_0$ ($\lambda_0 = 546.7$ нм). Поляризационные призмы смоделированы без просветляющего покрытия.

На рис. 5 и 6 видно, что пропускание поляриметра с призмой Волластона очень чувствительно

Таблица 2. Конструктивные параметры призмы Волластона при неизменном параметре $h = 200$ мкм

Длина входной щели поляриметра L , мкм	Угол при вершине призмы Ω , град. (спектральный диапазон $\lambda = 390\text{--}1200$ нм)
100	0.75
200	1.00
300	1.25
400	1.50
500	1.75
600	1.95
700	2.20
800	2.45
1000	2.95
1200	3.50
1400	3.95
1600	4.40

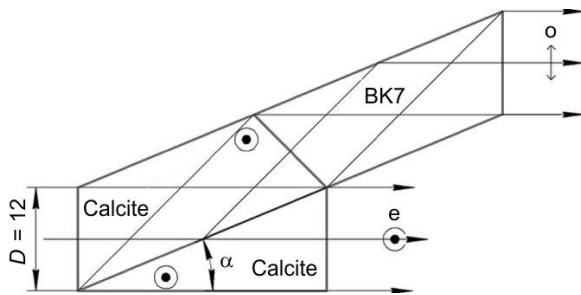


Рис. 3. Модифицированная призма Фостера, $\alpha = 22^\circ 5'$.

к ошибкам юстировки. Призма Волластона из-за хроматизма обладает направленностью дисперсии в выходящих пучках, совпадающей с направлением рефракции в призме. По этой причине при использовании в поляриметре призмы Волластона необходимо учитывать форму входной щели. Если используется прямоугольная входная щель, оптимальной формой является та, при которой длинная сторона щели совпадает с направлением дисперсии в призме.

В оптической системе поляриметра с призмой Волластона направление дисперсии в выходящих пучках совпадает с длинной стороной щели, однако хроматизм оказывает влияние на пропускание системы. Пропускание для обоих пучков в исследуемом диапазоне размеров входной щели не опускается ниже 30% (рис. 5). При работе в расши-

ренном спектральном диапазоне $\lambda_2 = 390\text{--}1200$ нм пропускание увеличивается в среднем на 0.7–1% для обоих пучков. Видно, что при увеличении длины щели пропускание системы поляриметра становится более равномерным и нечувствительным к расстоянию между изображениями входной щели. Для малых размеров входной щели поляриметра (менее 0.25×0.1 мм) пропускание системы сильно зависит от расстояния h между изображениями входной щели и стремительно возрастает при уменьшении данного параметра. Увеличение пропускания связано с большим влиянием хроматизма призмы Волластона при уменьшении размеров входной щели: размер пятна рассеяния точечного объекта становится сопоставимым с размерами входной щели.

На рис. 6 показано, что максимальное пропускание оптической системы поляриметра с призмой Волластона достигается при длине входной щели $L = 0.6$ мм и расстоянии между изображениями $h = 0.2$ мм. Однако при увеличении длины щели и, соответственно, угла при вершине призмы Ω пропускание системы существенно не изменяется.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

При построении оптической системы стокс-поляриметра для работы в связке с астрономическим спектрометром в первую очередь необходимо учитывать пропускание инструмента. Это важно для высокоточных спектрополяриметрических исследований магнитных звезд разных типов [26–29] и в особенности для астрофизических исследований слабых звезд, таких как белые карлики с поверхностными магнитными полями высокой напряженности [30–34]. Это обстоятельство определяет выбор типа поляризационного анализатора, который, в свою очередь, зависит от способа соединения поляриметра со спектрометром и от параметров его входной щели. Оптимально подобранный поляризационный анализатор в заданном спектральном диапазоне инструмента позволят избежать дополнительных потерь света.

Исходя из результатов настоящей работы, стокс-поляриметр с призмой Волластона при работе в режиме прямого соединения со спектрометром эффективнее всего использовать при малых длинах входной щели поляриметра (менее 0.5 мм) и расстоянии между изображениями входной щели не более 0.3 мм. Если расстояние между изображениями меньше или равно размеру изображения входной щели, вследствие аберраций происходит существенное падение эффективности поляриметра. К достоинствам призмы Волластона следует отнести равномерное распределение освещенности в каналах обыкновенного и необыкновенного лучей, возможность применения при

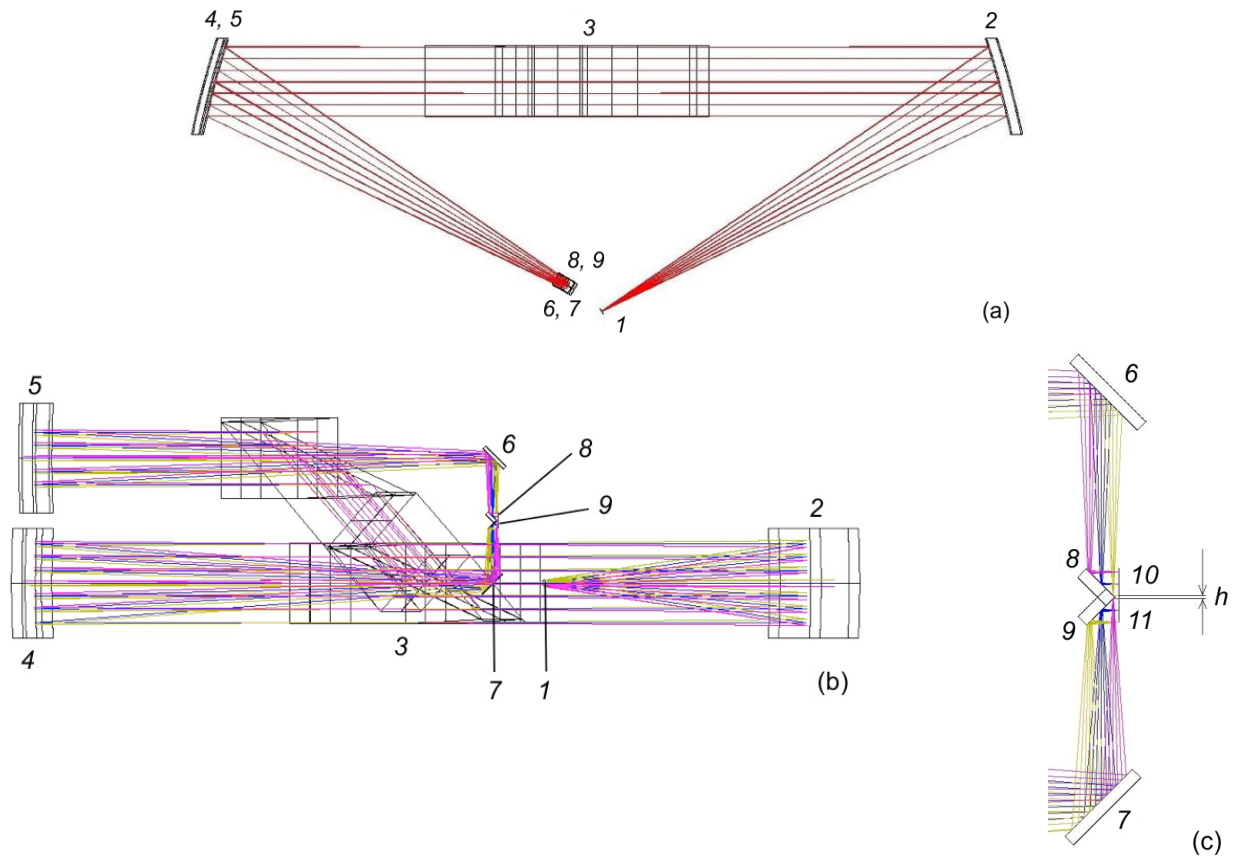


Рис. 4. Оптическая система поляриметра с модифицированной призмой Фостера: (а) — сечение OYZ , (б) — сечение OXZ , 1 — входная щель, 2 — коллиматор, 3 — модифицированная призма Фостера, 4 — проекционный объектив для необыкновенного луча, 5 — проекционный объектив для обыкновенного луча, 6, 7, 8, 9 — плоские зеркала для формирования выходной щели (располагаются под углом 45° к оптической оси), 10, 11 — плоскости изображения входной щели для обыкновенного и необыкновенного лучей.

Таблица 3. Средние значения разности пропускания для оптических систем стокс-поляриметров

$\Delta T = T_{\text{foster}} - T_{\text{wollastone}}, \%$		$\Delta T = T_{\text{foster}} - T_{\text{wollastone}}, \%$	
Спектральный диапазон 390–750 нм		Спектральный диапазон 390–1200 нм	
Обыкновенный луч	Необыкновенный луч	Обыкновенный луч	Необыкновенный луч
5.046	1.702	4.307	0.928

больших световых диаметрах (до 150 мм) и угловом поле до 20° [35]. Энергетические потери излучения обусловлены диафрагмированием пучка лучей в плоскости изображения на выходных щелях. Построение оптической системы стокс-поляриметра с призмой Волластона позволяет организовать единый для обыкновенного и необыкновенного лучей оптический канал. При отсутствии жестких габаритных ограничений для оптической системы поляриметра и сравнительно большом заднем отрезке системы добиться разведения ортогонально поляризованных пучков на достаточное расстояние можно, используя меньший угол Ω при вершине

призмы. Уменьшение угла при вершине призмы приведет к уменьшению хроматизма, и, следовательно, к уменьшению диаметра пятна рассеяния обоих пучков. Призма Волластона вносит дисперсию в выходящие пучки лучей. Для минимизации этого явления необходимо уменьшать фокусное расстояние проекционного объектива. В данном исследовании использовалась оптическая система с качеством изображения близким к дифракционному.

Оптическая система стокс-поляриметра с модифицированной призмой Фостера обладает сравнительно большим пропусканием во всем исследу-

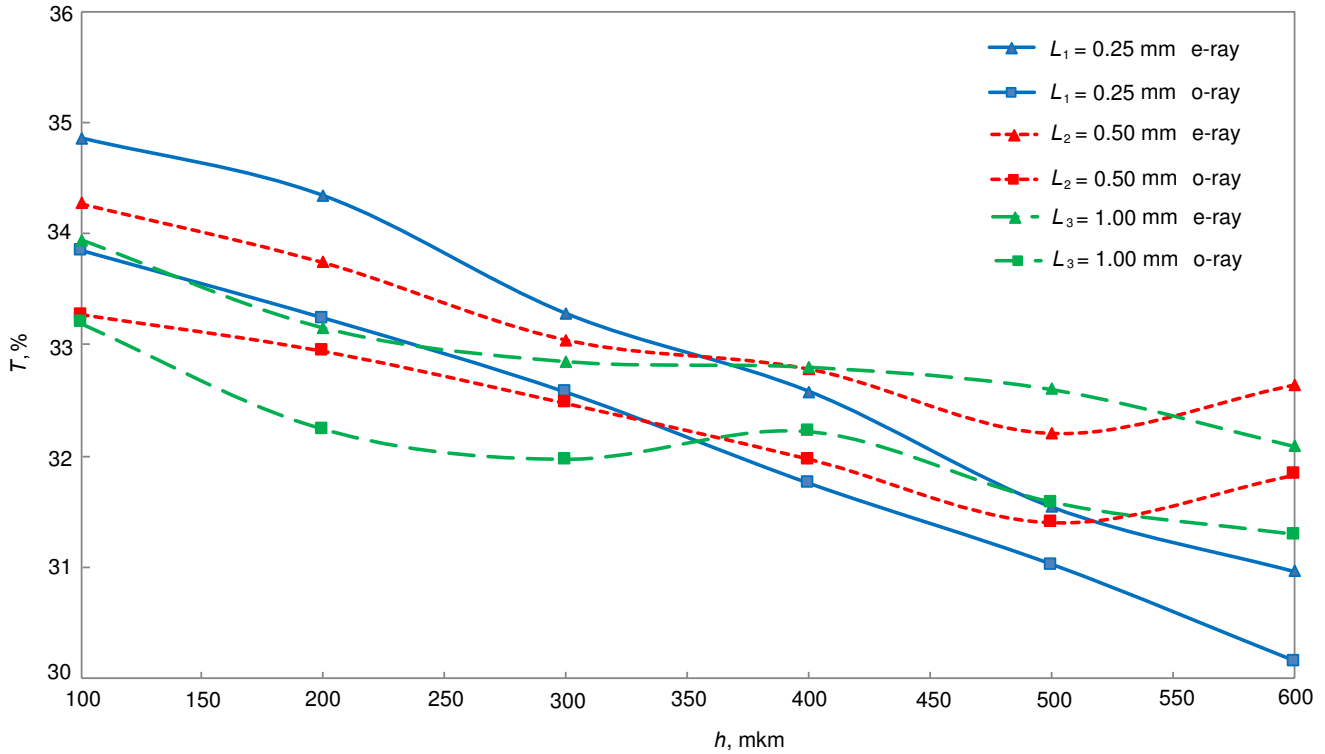


Рис. 5. График пропускания стокс-поляриметра с призмой Волластона в спектральном диапазоне 390–750 нм при различных расстояниях h между изображениями входной щели.

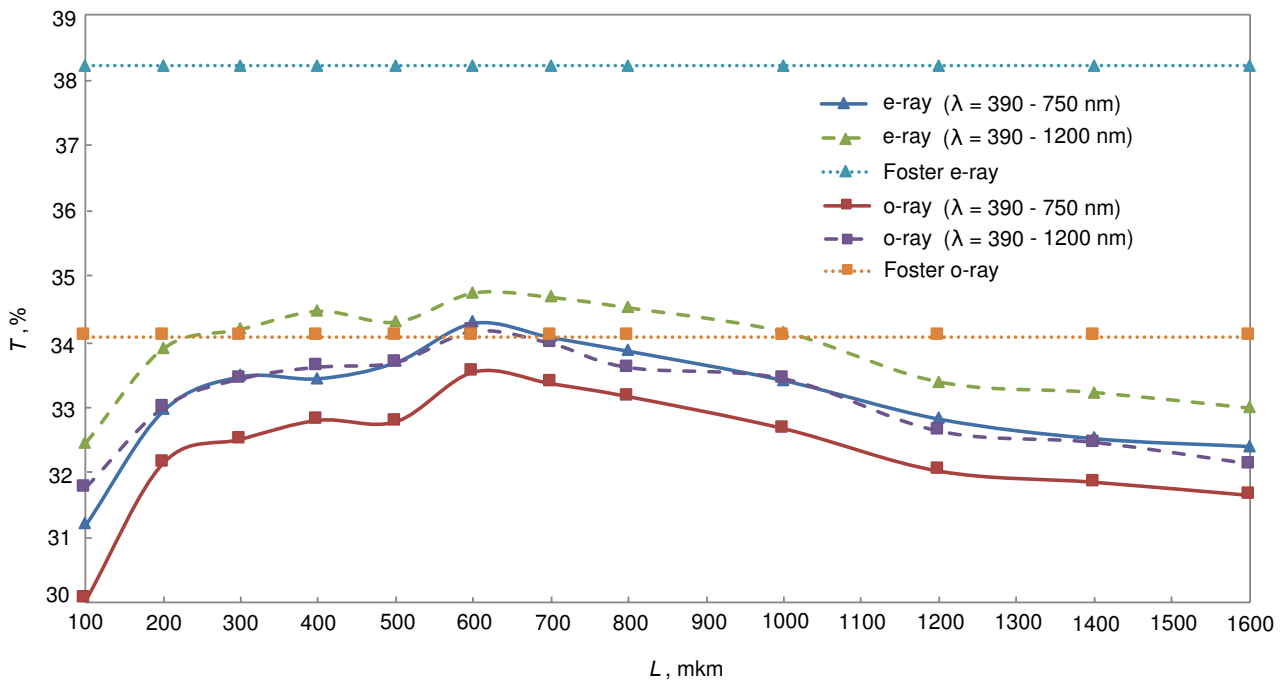


Рис. 6. График пропускания стокс-поляриметра с призмами Волластона и Фостера в спектральных диапазонах 390–750 нм и 390–1200 нм при различных длинах L входной щели с фиксированным расстоянием $h = 0.2$ мм между изображениями входной щели.

емом диапазоне характеристик входной щели и ее изображений. Пропускание такой системы не зависит от параметров входной щели поляриметра и рабочего спектрального диапазона. Благодаря отсутствию хроматизма призма Фостера не чувствительна к фокусному расстоянию проекционного объектива и к заднему отрезку оптической системы. Применение модифицированной призмы Фостера более эффективно при использовании ее в системах поляриметров с диаметром коллимированного пучка менее 14 мм. Еще одним преимуществом ее использования является то, что не требуется учитывать увеличение и остаточные хроматические aberrации оптической системы поляриметра.

Основным недостатком модифицированной призмы Фостера является разная интенсивность излучения в оптических каналах, что может негативно сказаться на точности поляриметрических исследований, и сравнительно небольшое рабочее угловое поле до 6° [35]. При работе с призмой Фостера следует также учитывать необходимость создания дополнительной оптической системы для организации входной щели спектрометра, которая усилит потери света. Недостатком также является резкое увеличение поглощения излучения в материале призмы при световых диаметрах более 14 мм. Оптическая система с призмой Фостера требует более сложной конструкции поляриметра при работе в режиме прямого соединения со спектрометром.

В таблице 3 приведены усредненные значения разности интенсивностей в обеих системах.

Оптимально подобранный поляризационный анализатор способен повысить общую эффективность спектрометра до 5%. На основании результатов данной работы можно утверждать, что применение призмы Волластона более эффективно для создания малых размеров входных щелей спектрометра и расстояний между ними при работе в режиме прямого соединения. Применение модифицированной призмы Фостера более эффективно при больших требуемых размерах изображений входной щели поляриметра и соединения со спектрометром при помощи оптоволоконного канала.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Госзадания (тема № 3.2506.2017/4.6).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L. Kolokolova, J. Hough, and A.-C. Levasseur-Regourd, *Polarimetry of stars and planetary systems* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2015).
2. M. I. Mishchenko, V. K. Rosenbush, N. N. Kiselev, et al., *Polarimetric Remote Sensing of Solar System Objects* (Akademperiodyka, Kyiv, 2010).
3. I. A. Steele, S. D. Bates, D. Carter, et al., SPIE Conf. Proc. **6269**, id. 62695M (2006).
4. R. Roelfsema, H. M. Schmid, J. Pragt, et al., SPIE Conf. Proc. **7735**, id. 77354B (2010).
5. M. Rodenhuis, H. Canovas, S. V. Jeffers, et al., SPIE Conf. Proc. **8446**, id. 84469I (2012).
6. G. G. Valyavin, V. D. Bychkov, M. V. Yushkin, et al., *Astrophysical Bulletin* **69**, 224 (2014).
7. D. E. Kukushkin, D. A. Sazonenko, A. V. Bakhholdin, et al., *Astrophysical Bulletin* **71**, 249 (2016).
8. V. L. Afanasiev and V. R. Amirkhanyan, *Astrophysical Bulletin* **67**, 438 (2012).
9. K. G. Strassmeier, I. Ilyin, A. Jarvinen, et al., *Astronomische Nachrichten* **336**, 324 (2015).
10. C. Packham, C. M. Telesco, J. H. Hough, et al., *Revista Mexicana Astronom. Astrofis. Conf. Ser.* **24**, 7 (2005).
11. R. Goodrich and M. Cohen, SPIE Conf. Proc. **4843**, 146 (2003).
12. N. Kashikawa, K. Aoki, R. Asai, et al., *PASJ* **54**, 819 (2002).
13. S. Covino, E. Molinari, P. Bruno, et al., *Astronomische Nachrichten* **335**, 117 (2014).
14. I. Saviane, V. Pirola, S. Bagnulo, et al., *Messenger* **129**, 14 (2007).
15. A. Moorwood, J.-G. Cuby, and C. Lidman, *Messenger* **91**, 9 (1998).
16. J.-F. Donati, C. Catala, J. D. Landstreet, and P. Petit, *ASP Conf. Ser.* **358**, 362 (2006).
17. F. Snik, O. Kochukhov, N. Piskunov, et al., *ASP Conf. Ser.* **437**, 237 (2011).
18. V. N. Vasilyev, D. A. Sazonenko, D. E. Kukushkin, et al., *Optical Review* **23**, 878 (2016).
19. M. Lockhart, N. Piskunov, E. Stempels, et al., SPIE Conf. Proc. **9147**, 91478P-1 (2014).
20. M. Millar-Blanchaer, D.-S. Moon, J. R. Graham, et al., SPIE Conf. Proc. **9151**, 91514I-1 (2014).
21. C. Packham, M. Escuti, J. Ginn, et al., *PASP* **122**, 1471 (2010).
22. W. A. Shurkliff, *Polarized Light. Production and Use* (Harvard Univ. Press, Cambridge, 1962).
23. I. Ilyin, K. G. Strassmeier, M. Woche, et al., *Astronomische Nachrichten* **332**, 753 (2011).
24. В. В. Лебедева, *Техника оптической спектроскопии*, 2-е изд. (Изд-во МГУ, Москва, 1986) [in Russian].
25. Н. Н. Михельсон, *Оптические телескопы. Теория и конструкция* (Наука, Москва, 1976) [in Russian].
26. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **73**, 437 (2018).
27. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **72**, 286 (2017).

28. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **71**, 314 (2016).
29. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **70**, 191 (2015).
30. G. G. Valyavin, D. Shulyak, G. Wade, et al., *Nature* **515**, 88 (2014).
31. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, and G. G. Valyavin, *Contr. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **48**, 284 (2018).
32. S. Bagnulo, J. D. Landstreet, A. J. Martin, and G. G. Valyavin, *Contr. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **48**, 236 (2018).
33. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, G. G. Valyavin, and A. F. Valeev, *Astron. and Astrophys.* **607**, 92 (2017).
34. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, A. Martin, and G. G. Valyavin, *Astron. and Astrophys.* **591**, 80 (2016).
35. *Planets, Stars and Stellar Systems*, Ed. by T. D. Oswalt, Vol. 2: *Astronomical Techniques, Software, and Data*, Ed. by H. E. Bond (Springer Reference, Dordrecht, Heidelberg, New York, London, 2013).

Assessing the Efficiency of a Stokes Polarimeter with Different Polarization Analyzers

D. E. Kukushkin, V. D. Bychkov, D. A. Sazonenko, A. V. Bakholdin, and V. N. Vasiliev

Polarimetric studies in astronomy have currently acquired great importance. They are used to study magnetic fields of stars, determine the orientation of orbits of exoplanets, reflection effects in stellar atmospheres and accretion disks, and many other things. This paper presents a computation of optical arrangements of Stokes polarimeters with different polarization analyzers. A preliminary estimate of the transmission of polarimeters with a Wollstone prism and with a modified Foster prism as polarization analyzers is reported. Transmission estimates were performed for different shapes of rectangular output slits and separations between them in two spectral ranges. Recommendations are provided concerning the use of Wollstone and Foster prisms in Stokes polarimeters designed for astrophysical studies.

Keywords: *instrumentation: polarimeters*