

Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 120, № 3, 18–21 (2024)

УДК 520.3

## Панорамный поляриметр для 2.6-метрового телескопа им. акад. Г.А. Шайна. Концепция и предварительная спецификация

*Д.Н. Шаховской, Р.В. Садыков*

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым  
*d.shakhovskoy@gmail.com*

Поступила в редакцию 23 июля 2024 г.

**Аннотация.** Широкополосная поляриметрия является существенной частью программ наблюдений на 2.6-метровом телескопе им. акад. Г.А. Шайна в Крымской астрофизической обсерватории, что позволило получить ряд значимых результатов. В настоящее время эту задачу на телескопе выполняет многоканальный поляриметр НЕОРОЛ с быстрой модуляцией. Однако ограничения его конструкции, связанные с использованием ФЭУ в качестве детекторов света, оставляют многие потенциально интересные объекты и явления недоступными для исследования. В данной статье мы представляем пример разработки нового прибора для поляриметрии изображений и рассматриваем некоторые принципиальные соображения, касающиеся его конструкции и технических характеристик. В качестве оптимального решения мы предлагаем специализированный прибор (в отличие от универсального фотометра-спектрографа-поляриметра) для получения изображений в первичном фокусе, основанный на существующей ПЗС-камере GE ELSE 2K × 2K.

**Ключевые слова:** телескопы, инструменты, поляриметрия

## 1 Введение

Оптическая широкополосная поляриметрия является важной и несколько недооцененной методикой, позволяющей во многих случаях анализировать детали и параметры, неразрешимые другими методами для многих типов астрофизических объектов с существенной ролью рассеяния, отражения и поляризационно-зависимого поглощения света, включая, например, тесные двойные системы, протопланетные диски, межзвездную среду и объекты Солнечной системы. Поляриметрические методы можно представить в виде спектра возможностей, от наиболее эффективных с точки зрения быстрого достижения приемлемого отношения сигнал/шум, даже для слабых объектов, до наиболее точных с точки зрения достижения исключительно низких ошибок измерений в ситуации, когда фотонный шум не является ограничением, т. е. для относительно ярких объектов. Причиной такого положения дел являются противоречивые требования для обеспечения максимальной эффективности и максимальной точности. Наивысшая точность достигается с помощью методов быстрой модуляции (Hough et al., 2003), в то время как максимальная эффективность требует использования малозумящих ПЗС-детекторов с низкой частотой считывания. Еще одним фактором, ограничивающим точность для многих инструментов на основе ПЗС, является трудность точной калибровки плоского поля.

Инструмент НЕОРОЛ<sup>1</sup>, в настоящее время работающий на 2.6-метровом телескопе им. акад. Г.А. Шайна (ЗТШ), является инструментом с высокой точностью и низкой эффективностью в этом спектре возможностей. Использование одноканальных ФЭУ в качестве детекторов требует отдельных измерений объекта и фона неба через относительно большую “физическую” апертуру, что делает

<sup>1</sup> [https://www.craocrimea.ru/images/ckp/circular\\_ZTSh.pdf](https://www.craocrimea.ru/images/ckp/circular_ZTSh.pdf)

наблюдения объектов с низким контрастом объекта и неба довольно неэффективны. Практическая предельная звездная величина для этого инструмента составляет около  $17^m$ . Другим очевидным недостатком является отсутствие какого-либо пространственного разрешения, что ограничивает выбор объектов в основном точечными источниками. Чтобы устранить этот дисбаланс поляриметрических возможностей, мы предлагаем разработать специализированный высокоэффективный панорамный поляриметр на основе ПЗС и рассматриваем доступные варианты его конструкции и спецификаций.

Основные требования к новому инструменту:

1. Взаимодополняемость с существующим инструментом НЕОРОЛ. Новый прибор должен обеспечивать поляриметрическую точность около 0.1% (здесь и далее мы имеем в виду измерение степени линейной поляризации, полностью поляризованное состояние принимается за 100%) в ситуациях, когда ошибки не ограничены фотонным шумом. Он должен обладать высокой эффективностью для слабых объектов, обеспечивая ошибки 0.5% при реалистичном времени интегрирования около часа для объектов с  $R \sim 19^m$ .
2. Простота конструкции, максимальное использование недорогих коммерчески доступных оптических компонентов.
3. Возможность получения изображений с независимым измерением параметров поляризации в каждом пикселе для протяженных объектов (комет, отражательных туманностей) в пределах поля зрения  $\sim 2'$ , используя одну экспозицию для измерения каждого из параметров Стокса.
4. Освещаемая с обратной стороны, охлаждаемая ПЗС-матрица научного класса, оптимально камера GE ELSE 2K  $\times$  2K с пикселем  $13.5\mu$ .

## 2 Выбор конструкции

Новый инструмент может быть установлен либо в первичном фокусе (1:3.8), либо в фокусе Кассегрена (1:16) телескопа. Первичный фокус является очевидным выбором с точки зрения эффективности, единственным ограничением является предел внешнего диаметра инструмента 0.5 м.

Существует в основном два типа поляриметров для получения изображений:

1. Конструкции на основе пластины Савара в качестве поляризатора, вводящей относительный линейный сдвиг выходных лучей О и Е. Она может быть установлена перед фокальной плоскостью без необходимости использования других оптических элементов, создавая “двойное” изображение в фокальной плоскости. Преимуществом этой схемы является ее простота. Однако линейный сдвиг изображений О и Е ограничен толщиной пластины Савара и на практике не превышает 2 мм, что составляет всего  $40''$  в первичном фокусе ЗТШ. Это ограничение либо сужает возможности инструмента только до точечных источников с ухудшением контраста объекта и неба в два раза, либо требует использования маски (масок) в фокальной плоскости и перебрасывающей линзы для формирования “нарезанного” изображения. Последняя схема теряет половину изображения на маске и требует как минимум двух экспозиций для формирования одного полного изображения.
2. Схема типа фокальный редуктор с постфокальным коллиматором, призмой Волластона, помещенной в коллимированный пучок, и камерным объективом, создающим два неперекрывающихся изображения на детекторе.

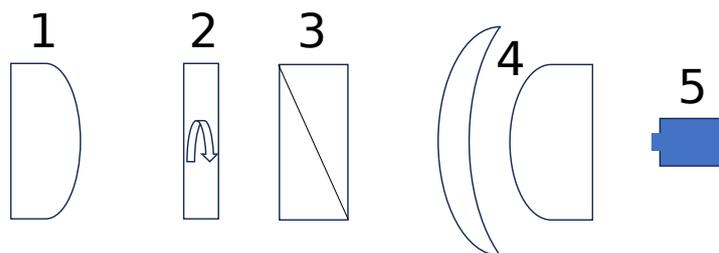
Вторая схема, очевидно, является оптимальным выбором для наших требований. Эта схема очень популярна для универсальных инструментов спектрограф-фотометр, например, SCORPIO (Afanasiev, Moiseev, 2011), которые часто имеют поляриметрический режим. Инструмент такого типа также может быть полезен на ЗТШ, но режим спектроскопии значительно ужесточает требования к коллиматору и камере. Он также вводит по меньшей мере два дополнительных механических привода для диспергирующих элементов и щелей, а также довольно сложный предфокальный узел с набором точных устройств гидирования и калибровки.

Если спектральное разрешение режима спектроскопии не ограничивать до минимума, он также требует большего диаметра коллимированного пучка, чем необходимо для нашего сравнительно узкопольного, по меркам панорамных фотометров, прибора. Таким образом, концепция универсального фокального редуктора “все-в-одном” противоречит нашим требованиям относительно использования недорогих доступных компонентов. Поляризационные оптические компоненты (такие как

призма Волластона) имеют очень резкий скачок стоимости для размеров более 20 мм, и этот диаметр коллимированного пучка может не обеспечить достаточно высокого спектрального разрешения для универсального инструмента “все-в-одном”.

### 3 Заключение

Таким образом, оптимальной конструкцией для наших требований является фокальный редуктор в первичном фокусе с диаметром коллимированного пучка около 20 мм и призмой Волластона в качестве поляризационного анализатора.



**Рис. 1.** Схема предлагаемой оптической системы: 1 – коллиматор, 2 – волновая пластинка (сменная), 3 – призма Волластона, 4 – камерный объектив, 5 – ПЗС

Предлагаемая спецификация:

- Установка в первичном фокусе (1:3.8).
- Схема типа фокальный редуктор с коллимированным пучком (рис. 1).
- Диаметр коллиматора 20 мм.
- Поле зрения (неперекрывающееся двойное изображение) 1–3′ в зависимости от выбора угла разделения призмы Волластона.
- Дистанционно сменные, вращающиеся суперхроматические фазовые пластинки  $\lambda/4$  и  $\lambda/2$ .
- Кальцитовая призма Волластона со световым диаметром 20–25 мм.
- ПЗС-камера Greateyes ELSE 2K × 2K 13.5 $\mu$ .
- Подвижные части: привод вращения волновой пластинки, линейный привод смены волновой пластинки, колесо фильтров (не показано на схеме).

Наименее очевидным параметром конструкции для этой схемы являются характеристики призмы Волластона. Главным выбором для дальнейшего проектирования является компромисс между полезным полем зрения (чем больше угол разделения призмы, тем большее двойное изображение может быть размещено на детекторе без перекрытия) и степенью хроматических aberrаций, вносимых призмой, которая также зависит от угла разделения. В некоторой степени хроматические aberrации могут быть скомпенсированы за счет aberrаций камерного объектива, как это было сделано в инструменте NEOPOL, но это означает, что объектив должен быть разработан специально для этой цели и стандартные готовые объективы не могут быть использованы для этого компонента. Еще одним соображением является ухудшение поляризационного контраста из-за наклонного падения на призму Волластона, но расчетный угол падения составляет менее 10° для поля зрения 3′, что позволяет пренебречь данным эффектом.

### Литература

- Afanasiev V.L., Moiseev A.V., 2011. *Baltic Astronomy*, vol. 20, pp. 363–370.
- Hough J.H., Lucas P.W., Bailey J.A., Tamura M., 2003. In S. Fineschi (Ed.), *Polarimetry in Astronomy*. SPIE, vol. 4843, pp. 517–523, doi:10.1117/12.458222.

## Imaging polarimeter for the 2.6 m Shajn telescope. Technical considerations and draft specifications

*D.N. Shakhovskoy, R.V. Sadykov*

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409  
*d.shakhovskoy@gmail.com*

**Abstract.** Broadband polarimetry has been a substantial part of observing programs at the CrAO's 2.6 m Shajn telescope, resulting in a number of impactful results. Currently, the instrument filling this role on the telescope is the multichannel fast modulation polarimeter NEOPOL. The constraints of its design, namely the use of photomultiplier tubes as light detectors, leaves many potentially interesting objects and phenomena beyond reach. In this paper, we present a case for the development of the new instrument for imaging polarimetry and consider some principal considerations concerning its design and specifications. As an optimal solution, we propose a specialized imaging device (as opposed to a versatile imager-spectrograph-polarimeter instrument) in the primary focus, based on the existing GE ELSE 2K × 2K CCD camera.

**Key words:** telescopes, instruments, polarimetry