

УДК 520.36

**ПАНОРАМНЫЙ СТОКС-ПОЛЯРИМЕТР***Синявский И. И.<sup>1</sup>, Иванов Ю. С.<sup>2</sup>, Видьмаченко А. П.<sup>3</sup>, Карпов Н. В.<sup>4</sup>*

## PANORAMIC STOKES-POLARIMETER

Syniavskiy I. I., Ivanov Yu. S., Vidmachenko A. P., Karpov N. V.

This article proposes optical layout of the imaging polarimeter based on the polarization films to measure the linear polarization of point and extended celestial objects. The spectral range of device is 420–850 nm, field of view  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ . The device is designed to equip the telescope with a diameter of primary mirror about 400 mm and aperture  $f/12$ .

Keywords: polarization, Imaging Stokes-polarimeter

**Введение**

Поляриметрические наблюдения являются актуальными для астрофизики и позволяют определять пространственную структуру вещества, магнитных полей, космической пыли, значения комплексного показателя преломления аэрозольных частиц, распределение их по размерам, относительное содержания аэрозоля [1]. Поляризацию световой волны можно полностью описать четырьмя параметрами, известными как компоненты вектора Стокса. В [2, 3] предложена концепция построения астрономического спектрополяриметра, согласно которой был разработан прибор, используемый в Главной астрономической обсерватории (ГАО) НАНУ. Поляризация анализируется модуляционным методом, заключающемся в преобразовании её вращающейся фазовой пластиной в интенсивности лучей ортогональной поляризации. Но при ряде наблюдений космических объектов необходимо проводить измерения одновременно на большом поле зрения. Такие задачи могут решать изображающие поляриметры. В ГАО НАНУ разрабатывается изображающий поляриметр для малого телескопа Celestron, позволяющий измерять

три параметра вектора Стокса одновременно.

**1. Варианты построения Стокс-поляриметров**

Существует несколько вариантов построения астрономических поляриметров, которые можно разделить по методу получения информации на: 1) поляриметры, основанные на делении падающего излучения на вход прибора по амплитуде, с применением вращающегося поляризационного элемента; 2) поляриметры, основанные на делении падающего излучения на вход прибора по амплитуде без вращающихся элементов; 3) поляриметры, основанные на пространственном разделении падающего излучения на вход прибора по апертуре.

Классическая схема поляриметра первого типа — вращающаяся фазовая пластинка и поляризатор (как правило, двулучерасщепляющий элемент — призма Волластона, разводящая излучение на два пучка с ортогональными составляющими). Особенности поляриметров, основанных на таком методе, хорошо описаны в работах [4, 5].

Анализ поляризации в таких поляриметрах производится модуляционным методом,

<sup>1</sup>Синявский Иван Иванович, к.т.н., заведующий лабораторией астрокосмического приборостроения Главной астрономической обсерватории НАН Украины; e-mail: syn@mao.kiev.ua.

<sup>2</sup>Иванов Юрий Стратонович, старший научный сотрудник Главной астрономической обсерватории НАН Украины; e-mail: iva@mao.kiev.ua.

<sup>3</sup>Видьмаченко Анатолий Петрович, д-р физ.-мат. наук, заведующий отделом планетных систем Главной астрономической обсерватории НАН Украины; e-mail: vida@mao.kiev.ua.

<sup>4</sup>Карпов Николай Владимирович, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией Международного центра астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины, e-mail: karvov@mao.kiev.ua.

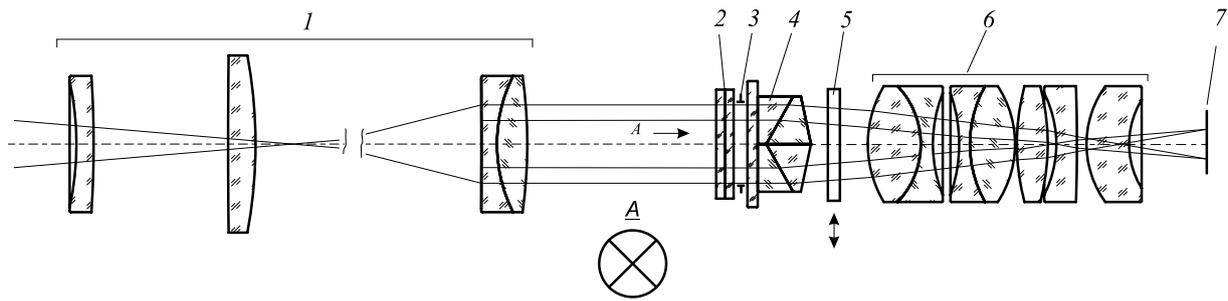


Рис. 1. Оптическая схема Стокс-поляриметра: 1 — коллиматор, 2 — набор поляризаторов, а также фильтры или дифракционная решётка, 3 — плоскость выходного зрачка, 4 — система клиньев для разведения изображений, 5 — камерный объектив, 6 — приёмник изображения, А — вид на зрачок с установленными по секторам четырьмя поляроидными плёнками

который заключается в преобразовании её вращающейся фазовой пластинкой и поляризатором в интенсивности лучей ортогональной поляризации. Величина и фаза изменений интенсивностей несет информацию о компонентах вектора Стокса.

В [6] описана схема построения фотополяриметра, позволяющего измерять четыре параметра вектора Стокса одновременно. Это достигается путем разделения входящего излучения светоделителем со специальным покрытием, расположенным до призмы Волластона, что позволяет разделять излучение на компоненты линейной и круговой поляризации. По такому принципу строятся поляриметры второго типа.

В национальном университете Ирландии разработан высокоскоростной изображающий Стокс-поляриметр (*Galway Astronomical Stokes Polarimeter — GASP*) для исследования быстрых ( $10^{-6}$  с) вариаций в астрономических объектах [7]. Поляриметр не имеет перемещающихся и вращающихся частей, все параметры вектора Стокса могут быть измерены за одну экспозицию. Однако указанный поляриметр по принципу построения оптической схемы не может обладать большой светосилой, имеет малое поле зрения и пригоден для наблюдения одиночных небесных объектов.

Третий тип поляриметров основан на делении апертуры. Схемы построения таких поляриметров приведены в работах [8,9]. Авторы, на наш взгляд, не дали чёткого различия между вариантами построения поляриметров указанного типа.

Под делением апертуры мы будем понимать пространственное (как правило — секторное) деление выходного зрачка оптической системы, вблизи которого устанавлива-

ются элементы, анализирующие характеристики излучения.

## 2. Оптическая система панорамного Стокс-поляриметра

В настоящей статье предложен вариант построения оптической системы Стокс-поляриметра, позволяющего проводить измерения трех компонент вектора Стокса одновременно, в широком поле и без ограничений по относительному отверстию системы. Предлагаемая схема также позволяет измерять все компоненты вектора путём введения в секторы зрачка пластин  $\lambda/2$  и  $\lambda/4$ , но по специфике поставленных задач регистрация четвертого компонента вектора Стокса не проводится.

Оптическая система прибора состоит из коллиматора, составного поляризационного элемента, системы разведения изображений, камерного объектива и приёмника изображений, а также сменных фильтров или дифракционной решётки.

На рис. 1. показано сечение схемы по двум каналам (верхнему и нижнему).

### 2.1. Коллиматор

Коллиматор прибора рассчитан таким образом, что, помимо выполнения своей основной функции, он строит исправленное изображение входного зрачка, а также исправляет полевые аберрации телескопа. Поскольку операции в выходном зрачке идентичны операциям во входном зрачке (т.е. на главном зеркале телескопа), такой приём чётко разделяет по функциям зрачки и люки системы. Оперирование полученными разделёнными переменными позволяет упростить систему и облегчить её расчёт.

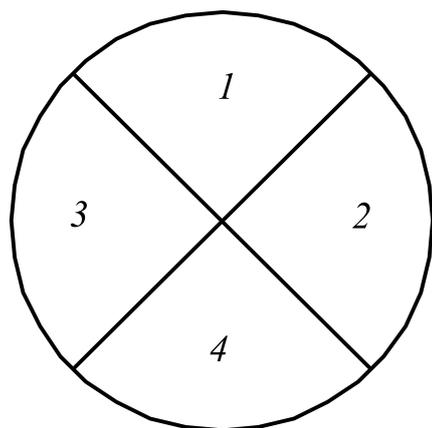


Рис. 2. Анализатор Стокс-поляриметра. Ориентация поляризационного элемента: 1 —  $0^\circ$ , 2 —  $90^\circ$ , 3 —  $45^\circ$ , 4 —  $135^\circ$

## 2.2. Поляризатор

Для анализа линейной поляризации необходимо выполнить три измерения интенсивностей излучения, прошедшего через линейные поляризаторы. Для более полного использования площади ПЗС-матрицы, а также для повышения точности измерений в описываемом приборе установлены четыре плёночных поляризатора с позиционными углами  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ . Схема такого мозаичного поляризатора, установленного вблизи зрачка телескопа, представлена на рис. 2.

В общем случае, возможны различные варианты реализации таких модуляторов. Первый из них — применение пары двулучевых поляризационных призм, оптические оси которых развернуты под углом  $45^\circ$  и заполняющих секторы 1–2 и 3–4 соответственно, и имеющих эффективность близкую к 100%. Такая призма (Wedge double Wollaston) была предложена в работе [10]. Однако собственная дисперсия призм требует введения дополнительных компенсационных клиньев и всё-таки не может дать качественное изображение в большом поле зрения и широком спектральном диапазоне. Следует отметить, что дисперсия призмы различна для двух ортогональных направлений распространения света, что приводит к неидентичности изображений.

В другом варианте такого поляризатора используются тонкие поляризационные плёнки. По сравнению с призмами плёнки проигрывают в прозрачности (коэффициент

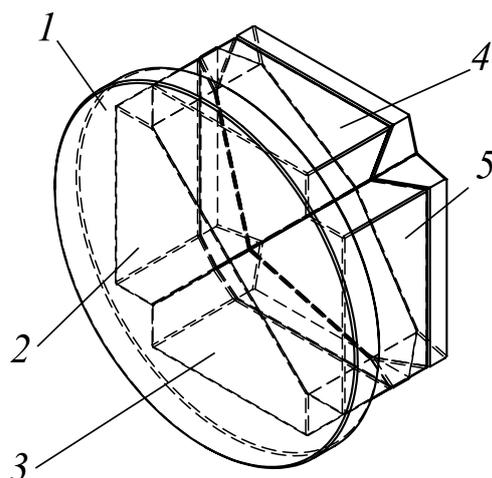


Рис. 3. Система разведения изображений: 1-подложка, 2-4 пары ахроматических клиньев для каждого из четырёх каналов

пропускания — до 47% в диапазоне 420–800 нм).

Но при широком поле зрения, при учёте виньетирования косых полевых лучей на границе соприкосновения призм, плёнки, в связи с меньшей толщиной, выигрывают по сравнению с двулучепреломляющими призмами.

Таким образом, падающий поток разделяется на 4 составляющих (канала), которые необходимо развести в пространстве.

## 2.3. Система разведения изображений

Для разведения четырёх изображений наблюдаемых объектов можно использовать четыре пары зеркал, установленных под определенными углами. Такая система не вносит хроматических аберраций, но громоздка, требует весьма тщательной юстировки и более пригодна для крупных телескопов. В описываемом приборе используется система отклоняющих призм, ахроматизированная для диапазона 420–850 нм. Система состоит из двух склеенных клиньев из стёкол ОФ3 и БК10 в каждом канале (рис. 1, 3).

## 2.4. Камерный объектив

Семилинзовый камерный объектив строит изображения исследуемого объекта одновременно в четырёх каналах (рис. 4). В диапазоне 420–850 нм для каждой точки в пределах поля зрения  $15' \times 15'$  диаметр пятна, в котором концентрируется  $> 95\%$  энергии, не превышает 32 мкм, что соответствует 2 пикселям матрицы. Максимальное зна-

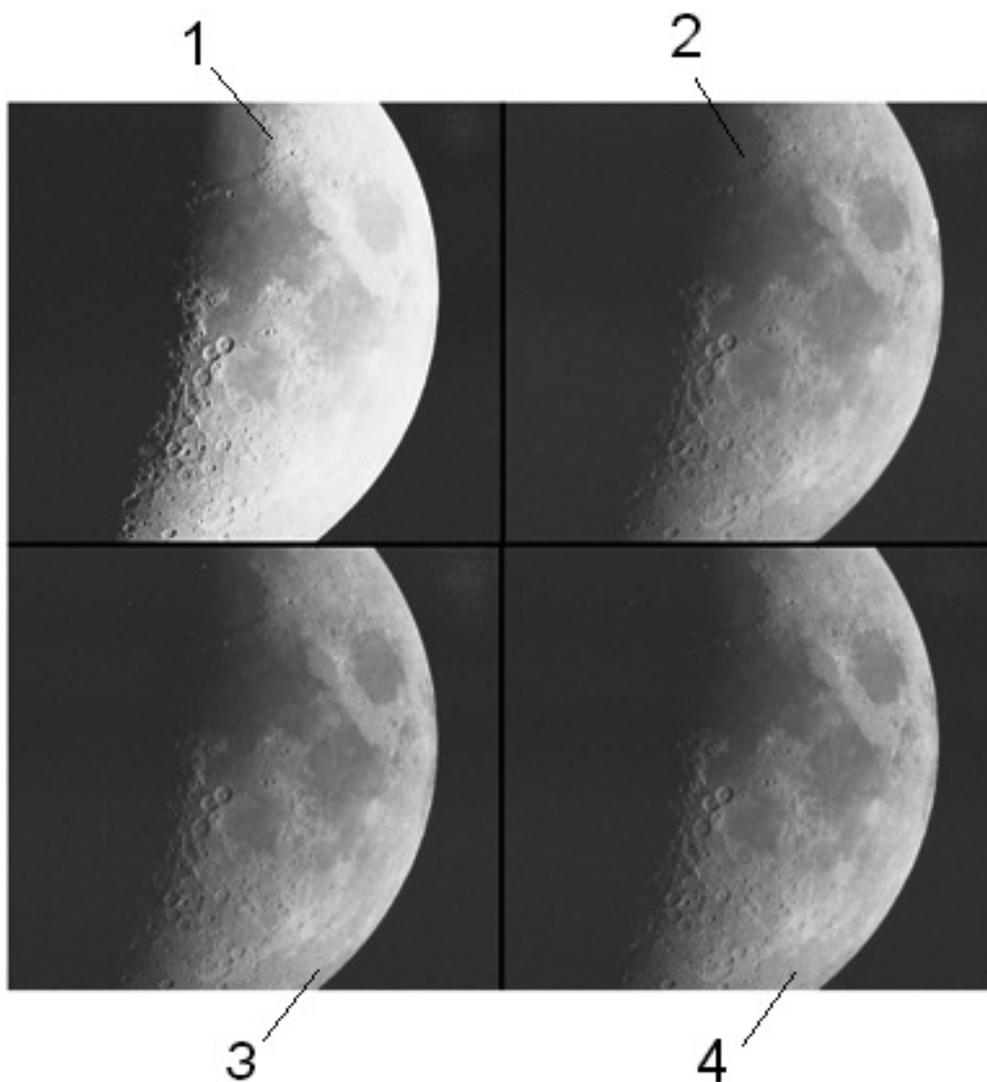


Рис. 4. Укладка четырёх изображений на приёмнике излучения при ориентации поляризационного элемента: 1 —  $0^\circ$ , 2 —  $90^\circ$ , 3 —  $45^\circ$ , 4 —  $135^\circ$

чение дисторсии оптической системы Стокс-поляриметра составляет 0,65%.

Расчет системы предусматривает возможность использования сменных фильтров, а также дифракционной решётки с частотой до 100 штрихов/мм, работающую на пропускание. Частота обусловлена возможным наложением спектров соседних каналов на приёмнике излучения.

Расчеты показывают, что при проведении наблюдений с максимально допустимым полем зрения в фокальной плоскости телескопа необходимо устанавливать диафрагму, препятствующую переналожению периферийных частей изображений соседних каналов, а для спектрополяриметрических наблюдений протяженных объектов — следует использовать узкую щель.

Основные параметры прибора представлены в таблице.

### Заключение

1) Приведен обзор существующих схемных реализаций Стокс-поляриметров и предложена концепция панорамного изображающего Стокс-поляриметра, который может быть использован для поляриметрических наблюдений астрономических объектов с быстропротекающими процессами в широком поле и без ограничений по относительному отверстию системы.

2) Коллиматор образует систему параллельных лучей, в которых могут быть установлены элементы, работающие только в слабосходящихся пучках (узкополосные ин-

## Характеристики Стокс-поляриметра

Телескоп	Celestron 91037- <i>XLT</i> ( $D=360$ мм, $f=4000$ мм)
Поле зрения Угловое / линейное на матрице	$0,25^\circ \times 0,25^\circ / 17 \times 21$ мм, ( $1.6''$ /пиксель)
Эффективное фокусное расстояние системы	1200 мм
Относительное отверстие $F\#$	11
Диаметр выходного зрачка телескопа	24 мм
ПЗС-приёмник	<i>SBIG STL 1301E</i>
Размер пикселя матрицы	$16 \times 16$ мкм
Размер матрицы	$16,5 \times 20,4$ мм
Спектральный диапазон	420–850 нм
Фильтры	положения для 4-х сменных фильтров
Дифракционная решётка	прозрачная, до 100 штрих/мм
Длина прибора	760 мм

терференционные фильтры, дифрешётки и т.п.). В секторы разделённого зрачка может быть вставлена любая комбинация фильтров, фазовых пластин и дифрешёток. Например, описываемый панорамный поляриметр может быть оперативно (поворотом колеса со сменными элементами) преобразован в спектрополяриметр низкого разрешения.

3) Расчеты показывают, что при значительных полях зрения и широком спектральном диапазоне призмы Волластона не могут быть использованы как анализаторы без дополнительных коррекционных элементов. Таким условиям наиболее соответствуют поляризационные плёнки.

## Литература

1. *Tinbergen J.* Astronomical polarimetry New York: N.Y.: Cambridge University Press, 1996. 158 p.
2. *Иванов Ю.С., Синявский И.И., Сосонкин М.Г.* Астроспектрополяриметры для слабых объектов // Оптический журнал. 2006. Т. 73. №12. С. 63–67.
3. *Видмаченко А.П., Иванов Ю.С., Морозенко А.В., Неводовский Е.П., Синявский И.И., Сосонкин М.Г.* Спектрополяриметр наземного сопровождения космического эксперимента «Планетный мониторинг» // Космічна наука і технологія. 2007. Т. 13. №1. С. 63–70.
4. *Ramaprakash A.N., Gupta R., Sen A.K., Tandon S.N.* An imaging polarimeter (IMPOL) for multi-wavelength observations // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 1998. Vol. 128. No. 3. P. 369–375.
5. *Gandorfer A. M., Steiner P., Povel H. P., Aebersold F., Egger U., Feller A., Gisler D., Hagenbuch S., Sten?o, J. O.* Solar polarimetry in the near UV with the Zurich Imaging Polarimeter ZIMPOL II // Astronomy and Astrophysics. 2004. Vol. 422. №2. P. 703–708.
6. *Mudge J., Virgen M., Dean P.* Near-infrared simultaneous Stokes imaging polarimeter // Proc. SPIE. 2009. Vol. 7461. P. 74610L-1–74610L-6.
7. *Collins P., Redfern R. M., Sheeha B.* Design, Construction and Calibration of The Galway Astronomical Stokes Polarimeter (GASP) // AIP Conference Proceedings. 2008. Vol. 984. P. 241–246.
8. *Tyo J. S., Goldstein D. L., Chenault D.B., Shaw J. A.* Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications // Applied Optics. 2006 Vol. 45. №22. P.5453–5469.
9. *Meriaudeau F., Ferraton M., Stolz C., Morel O., Bique L.* Polarization imaging for industrial inspection Proc. SPIE 6813. 2008. P. 681308-1–681308-10.
10. *Oliva E.* Wedged double Wollaston, a device for single shot polarimetric measurements // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 1997. Vol. 123. No. 3. P. 589–592.

Ключевые слова: поляризация, изображающий Стокс-поляриметр.

Статья поступила 7 ноября 2013 г.

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, г. Киев

Международный центр астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины, г. Киев

© Синявский И. И., Иванов Ю. С., Видмаченко А. П., Карпов Н. В., 2013