

А. П. Відьмаченко, Ю. С. Іванов, І. І. Синявський

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

## РОЗРОБКА ПОЛЯРИЗАТОРА ЗОБРАЖУВАЛЬНОГО ПОЛЯРИМЕТРА НА ОСНОВІ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ПЛІВОК

*Проводяться роботи зі створення спектрометра-поляриметра ПМ-СП, який заплановано як один з п'яти приладів, що входять до складу наукової апаратури російсько-українського космічного експерименту «Планетний моніторинг». Прилади призначено для формування у фокальній площині планетного телескопа (ПТ-600) зображення небесних об'єктів та реєстрації спектральної і поляриметричної інформації про газиво-аерозольні складові атмосфер планет та фізико-хімічні характеристики поверхневих шарів безатмосферних астрономічних тіл. Розроблено макет поляризатора на основі поляризаційних плівок, що може використовуватися у спектрометрі-поляриметрі. Також приведено результати дослідження вказаного елемента у спектральному діапазоні 420...850 нм.*

**Ключові слова:** зображувальний поляриметр, спектрометр-поляриметр, поляризатор, поляризаційні плівки, астрономічні спостереження.

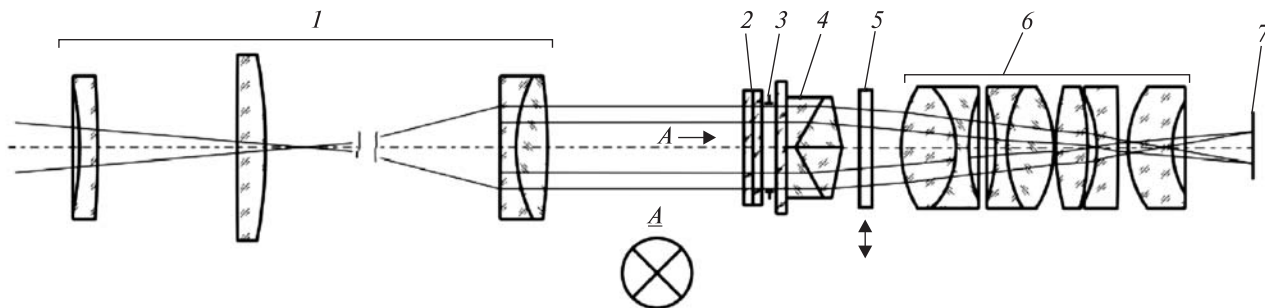
### ВСТУП

Поляриметричні спостереження є актуальними для астрофізики і дозволяють визначати просторову структуру речовини, магнітних полів, космічного пилу. Зазначені вимірювання також дають можливість визначати значення комплексного показника заломлення аерозольних часток, розподіл їх за розмірами, відносний вміст аерозолі, а також вивчати механізми, що забезпечують кореляцію змін властивостей планетних атмосфер з сонячною активністю [6]. Поляризацію світлової хвилі можна повністю описати чотирма параметрами, відомими як компоненти вектора Стокса [11]. Авторами у роботах [1, 2] запропоновано концепцію побудови астрономічного спектрополяриметра, згідно з якою був розроблений прилад, що використовується в Головній астрономічній обсерваторії (ГАО) НАН України. Поляризація аналізується модуляційним методом

за допомогою фазової пластинки, що обертається. Однак при спостереженнях швидкоплинних процесів необхідно провадити вимірювання одночасно при великому куті зору. Це стосується і випадків, де можливість використання рухомих частин у приладі дуже обмежена, наприклад у приладах для космічних експериментів. Такі завдання можуть вирішувати зображувальні поляриметри. У ГАО НАН України розробляється зображувальний спектрополяриметр для малого телескопа «Celestron», що дозволяє вимірювати три параметри вектора Стокса одночасно. Нижче описано результати розробки поляризаційного елемента для вказаного приладу.

### ВАРІАНТИ ПОБУДОВИ ЗОБРАЖУВАЛЬНИХ ПОЛЯРИМЕТРІВ

Є декілька варіантів побудови астрономічних поляриметрів, які можна розділити за методом отримання інформації на: 1) поляриметри, основані на поділі падаючого випромінювання на вхід приладу по амплітуді, із застосуванням



**Рис. 1.** Оптична схема зображувального поляриметра: 1 — коліматор, 2 — поляризатор, 3 — площина вихідної зіниці, 4 — система клинів для розведення зображень, 5 — змінні фільтри або дифракційна решітка, 6 — камерний об’єктив, 7 — приймач. А — вид на зіницю до встановлених по секторах чотирьох поляроїдних плівок

обертового поляризаційного елементу; 2) поляриметри, основані на поділі падаючого випромінювання на вхід приладу по амплітуді без обертових елементів; 3) поляризатори, основані на просторовому розділенні падаючого випромінювання на вхід приладу по апертурі.

Класична схема поляриметра першого типу — фазова пластинка, що обертається і аналізатор (як правило, двопроменевий елемент — призма Волластона, що розводить випромінювання на два пучки з ортогональними складовими). Особливості поляриметрів, заснованих на такому методі, добре описані в роботах [5, 10]. Аналіз поляризації у таких поляриметрах виконується модуляційним методом. У роботі [8] описано схему побудови фотополяриметра, що дозволяє вимірювати чотири параметри вектора Стокса одночасно. Це досягається шляхом розділення вхідного випромінювання світлоподілювачем зі спеціальним покриттям, розташованим до призми Волластона, що дозволяє розділяти випромінювання на компоненти лінійної та кругової поляризації. За таким принципом будуються поляриметри другого типу. У національному університеті Ірландії розроблено високошвидкісний зображувальний Стокс-поляриметр — GASP (Galway Astronomical Stokes Polarimeter) для дослідження швидких ( $10^{-6}$  с) варіацій в астрономічних об’єктах [4]. Поляриметр не має рухомих частин, всі параметри вектора Стокса можуть бути виміряні за одну експозицію. Проте зазначений поляриметр за принципом побудови оптичної схеми не може мати велику світлосилу, має мале поле зору і придатний для спосте-

реження поодиноких небесних об’єктів. Третій тип поляриметрів заснований на поділі апертюри. Схеми побудови таких поляриметрів наведені в роботах [7, 12]. Автори, на наш погляд, не дали чіткої відмінності між варіантами побудови поляриметрів зазначеного типу. Під діленням апертюри ми будемо розуміти просторовий (як правило — секторний) поділ вихідної зіниці оптичної системи, поблизу якого встановлюються елементи, що аналізують характеристики випромінювання.

#### ОПТИЧНА СХЕМА ЗОБРАЖУВАЛЬНОГО ПОЛЯРИМЕТРА

Авторами в роботі [3] запропоновано концепцію побудови оптичної системи зображувального поляриметра, що дозволяє проводити вимірювання трьох компонентів вектора Стокса одночасно, в широкому полі і без обмежень по відносному отвору системи. Запропонована схема також дозволяє вимірювати всі компоненти вектора шляхом введення в сектори зіниці фазових пластин  $\lambda/2$  і  $\lambda/4$ , але за специфікою поставлених задач реєстрація четвертого компонента вектора Стокса в запропонованому приладі не проводиться. Оптична система приладу складається з коліматора, поляризаційного елемента, системи розведення зображень, камерного об’єктива і приймача зображень, а також змінних фільтрів або дифракційної решітки.

На рис. 1 показано схему по двох каналах (верхньому і нижньому).

**Поляризатор.** Для аналізу лінійної поляризації необхідно виконати чотири вимірювання інтен-

сивності випромінювання, що пройшло через лінійні поляризатори:

$$\begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{-45} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де  $I_0, I_{90}, I_{45}, I_{-45}$  — інтенсивності випромінювання відповідно з горизонтальною та вертикальною поляризаціями та з поляризацією під кутом  $45^\circ$  і  $-45^\circ$ .

В описуваному приладі запропоновано використовувати складовий поляризатор, що складається з чотирьох плівкових поляризаторів з позиційними кутами  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ . Схему такого складового поляризатора, встановленого поблизу зіниці телескопа, представлено на рис. 2.

У загальному випадку можливі різні варіанти реалізації таких модуляторів. Перший з них — застосування пари двопробневих поляризаційних призм [4], оптичні осі яких розвернуті під кутом  $45^\circ$  і заповнюють сектори 1—2 і 3—4 відповідно, і мають ефективність, близьку до 100 %. Така призма (Wedge double Wollaston) була запропонована в роботі [9]. Однак власна дисперсія призм вимагає введення додаткових компенсаційних клинів і все ж не може дати якісне зображення у великому полі зору і широкому спектральному діапазоні. Крім того, дисперсія призм різна для двох ортогональних напрямків поширення світла, що призводить до неідентичності зображень. В іншому варіанті такого поляризатора використовуються тонкі поляризаційні плівки. Порівняно з призмами плівки програють у пропусканні, але в широкому полі зору, при врахуванні віньетування косих променів на межі сполучення призм, плівки, маючи меншу товщину, виграють порівняно з двопробневими призмами.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯРИЗАТОРА

В лабораторії астрокосмічного приладобудування ГАО НАН України було розроблено складений поляриметр на основі комерційних поляризаційних плівок компанії Edmund Optics (<http://edmundoptics.com>). Вказані плівки були орієнтовані з потрібними з позиційними кутами  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ , а потім заклеєні між двома захисними вікнами.

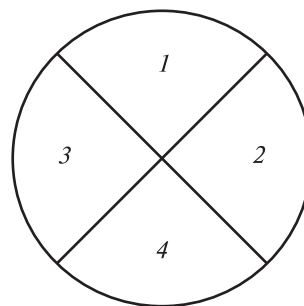


Рис. 2. Секторний поляризатор зображувального поляриметра. Орієнтації поляризаційних елементів: 1 —  $0^\circ$ , 2 —  $90^\circ$ , 3 —  $45^\circ$ , 4 —  $135^\circ$

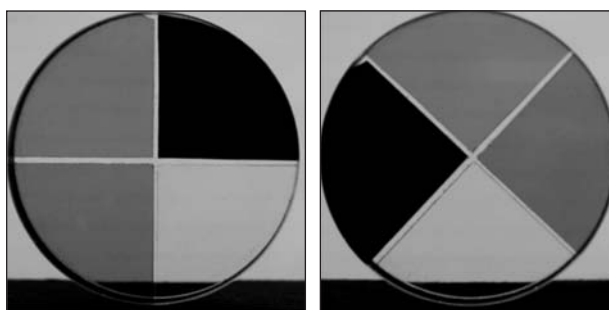
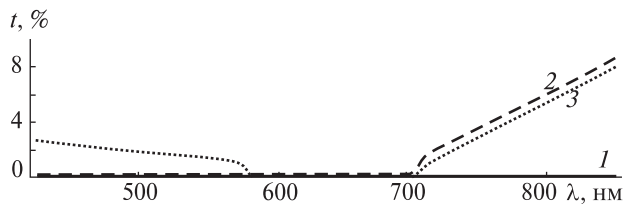


Рис. 3. Зображення складового поляроїда на основі поляризаційних плівок

На рис. 3 представлено зображення вказаного складеного поляризатора. Ступінь затемнення того чи іншого сектора ілюструє роботу поляризаційного елемента. Повне затемнення у секторі — вектор електромагнітного поля випромінювання та поляризаційна вісь поляроїда взаємно перпендикулярні, світлий сектор — вектор електромагнітного поля випромінювання та поляризаційна вісь поляроїда взаємно паралельні.

Для дослідження властивостей складового поляризатора був використаний стенд, що складався з таких елементів (за ходом променя в оптичній системі): 1) джерело випромінювання, 2) модулятор світла, 3) монохроматор, 4) поляризаційна призма Глана, 5) поляризатор, що досліджується, 6) приймач випромінювання, 7) аналізатор сигналу. Було проведено аналіз поляризаційних характеристик плівок у спектральному діапазоні  $420 \dots 850$  нм, а саме — спектральна залежність остаточного пропускання при схрещеному по-



**Рис. 4.** Характеристики спектральної залежності коефіцієнта пропускання двох лінійних поляризаторів при розташуванні їхніх оптичних осей під кутом  $90^\circ$ : 1 — дві призми Глана, досліджені на стенді, 2 — дві поляризаційні плівки (за даними виробника), 3 — сектор виготовленого в ГАО НАН України складеного поляризатора та призма Глана

ложенні поляризаційної призми Глана (що була прийнята за еталон) та досліджуваного поляризатора. Перед початком досліджень поляризатора в хід променів була встановлена додаткова призма Глана для перевірки достовірності даних, одержаних за допомогою стенду. Як показано на діаграмі, в схрещених призмах Глана коефіцієнт пропускання становить менше 0.1 %.

Також результати досліджень показали, що заявлені характеристики виробником поляризаційних плівок дещо відрізняються від результатів, одержаних під час вимірювань. Головним чином це стосується короткохвильової частини спектру (рис. 4).

#### ВИСНОВКИ

Розроблено поляризатор на основі поляроїдних плівок, що може використовуватися в зображувальних поляриметрах з великими полями зору та в широкому спектральному діапазоні. Однак при дослідженні його характеристик виявлено значні відхилення реальних параметрів поляроїдних плівок від анонсованих виробником. Дані відхилення мають бути аналізовані для усунення або компенсації до прийнятних величин. Для цього розроблений випробувальний стенд має бути дороблений з метою збільшення його чутливості.

*Роботу виконано за фінансової підтримки в рамках Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012—2016 рр.*

1. Відьмаченко А. П., Іванов Ю. С., Мороженко А. В. *и др.* Спектрополяриметр наземного супроводження космічного експеримента «Планетний моніторинг» // *Космічна наука і технологія*. — 2007. — **13**, № 1. — С. 63—70.
2. Іванов Ю. С., Сіявський І. І., Сосонкин М. Г. Астро-спектрополяриметри для слабких об'єктів // *Оптич. журн.* — 2006. — **73**, № 12. — С. 63—67.
3. Сіявський І. І., Іванов Ю. С., Відьмаченко А. П. Концепція побудови оптичної схеми панорамного Стокс-поляриметра для малих телескопів // *Оптич. журн.* — 2013. — **80**, № 9. — С. 27—32.
4. Collins P., Redfern R. M., Sheeha B. Design. Construction and calibration of the Galway Astronomical Stokes Polarimeter (GASP) // *AIP Conf. Proc.* — 2008. — **984**. — P. 241—246.
5. Gandorfer A. M., Steiner P., Povel H. P., et al. Solar polarimetry in the near UV with the Zurich Imaging Polarimeter ZIMPOL II // *Astron. and Astrophys.* — 2004. — **422**, N 2. — P. 703—708.
6. Hough J. H. New opportunities for astronomical polarimetry // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* — 2007. — **106**, N 1—3. — P. 122—132.
7. Meriaudeau F., Ferraton M., Stolz C., et al. Polarization imaging for industrial inspection // *Proc. SPIE.* — 2008. — **6813**. — P. 681308-1 — 681308-10.
8. Mudge J., Virgen M., Dean P. Near-infrared simultaneous Stokes imaging polarimeter // *Proc. SPIE.* — 2009. — **7461**. — P. 74610L-1 — 74610L-6.
9. Oliva E. Wedged double Wollaston, a device for single shot polarimetric measurements // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* — 1997. — **123**, N 3. — P. 589—592.
10. Ramaprakash A. N., Gupta R., Sen A. K., Tandon S. N. An imaging polarimeter (IMPOL) for multi-wavelength observations // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* — 1998. — **128**, N 3. — P. 369—375.
11. Stokes G. G. On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources // *Trans. Cambridge Philos. Soc.* — 1852. — **9**. — P. 399—416.
12. Tyo J. S., Goldstein D. L., Chenault D. B., Shaw J. A. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications // *Appl. Opt.* — 2006. — **45**, N 22. — P. 5453—5469.

*Стаття надійшла до редакції 17.12.14*

*А. П. Видьмаченко, Ю. С. Иванов, И. И. Синявский*

Главная астрономическая обсерватория  
Национальной академии наук Украины, Киев

**РАЗРАБОТКА ПОЛЯРИЗАТОРА  
ИЗОБРАЖАЮЩЕГО ПОЛЯРИМЕТРА  
НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПЛЕНОК**

Проведена работа по созданию спектрометра-поляриметра ПМ-СП, который запланирован как один из пяти приборов, входящих в состав научной аппаратуры российско-украинского космического эксперимента «Планетный мониторинг». Приборы предназначены для формирования в фокальной плоскости планетного телескопа (ПТ-600) изображения небесных объектов и регистрации спектральной и поляриметрической информации о газовой-аэрозольных составляющих атмосфер планет и физико-химических характеристиках поверхностных слоев безатмосферных астрономических тел. Разработан макет поляризатора на основе поляризационных пленок, который может использоваться в спектрометрах-поляриметрах. Также приведены результаты исследования указанного элемента в спектральном диапазоне 420...850 нм.

**Ключевые слова:** изображающий поляриметр, спектрометр-поляриметр, поляризатор, поляризационные пленки, астрономические наблюдения.

*A. P. Vidmachenko, Yu. S. Ivanov, I. I. Syniavskiy*

Main Astronomical Observatory  
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

**THE DEVELOPMENT  
OF THE IMAGING POLARIMETER'S POLARIZER  
ON THE BASIS OF THE POLARIZING FILM**

Development of the "Spectrometer polarimeter" scientific instrument has started, which is planned to be the one of five devices in the Russian-Ukrainian "Planetary Monitoring" space experiment. The devices are designed to form images of celestial objects in the focal plane of a planetary telescope (PT-600) and to register spectral and polarimetric information on gaseous and aerosol components of the planetary atmospheres as well as physical and chemical properties of the surface layers of atmosphereless astronomical bodies. A mockup of a polarizer that is based on the polarizing films has been designed. This model can be used in the spectrometer-polarimeter. The results of the investigation of the polarizer in the spectral range 420—850 nm are given.

**Key words:** imaging polarimeter, spectrometer-polarimeter, polarizer, polarizing film, astronomical observations.