

М.М. Асанов, ассистент
Е. В. Кожохина, ассистент
А. В. Скрипец, канд. техн. наук, проф.
В. Д. Тронько, д-р физ.-мат. наук, проф.

ФОТОПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Национальный авиационный университет

Данная работа посвящена разработке и описанию метода определения компонент вектора Стокса оптического излучения. В основе метода лежит измерение угла эллиптичности и азимута эллипса поляризации оптического излучения фотополяриметрическим способом. Предложены меры по увеличению точности измерений

Использование поляризационных методов при исследовании различного рода растворов, веществ, поверхности объектов дает широкое представление об их свойствах и строении. Эти методы нашли применение в частности в медицине [1, 2], исследовании поверхности материалов [3], а также аэрокосмическом дистанционном зондировании [4 – 6]. Известны работы по поляриметрическим исследованиям комет [4], астероидов [5], спутников планет [5, 6]. В ходе поляриметрических исследований выводы о свойствах анализируемого объекта делают на основании состояния поляризации его излучения или излучения, которое с ним провзаимодействовало.

В настоящее время существует большое количество различных стокс-поляриметров, измеряющих все четыре компонента вектора Стокса I , M , C , S [7 – 10]. По мнению ряда авторов, существует два основных типа схем [7, 10]: включающие в себя преобразователи поляризации с механически управляемыми параметрами (поляризаторы, фазовые пластинки и др.) и электрически управляемыми параметрами (магнитооптические, электрооптические, акустооптические ячейки и др.). Работа таких стокс-поляриметров заключается в том, что относительно четырех компонент вектора Стокса формируется система уравнений. Для этого измеряется интенсивность излучения, прошедшего стокс-поляриметр, при различных азимутах его составных элементов.

Некоторые авторы [8, 9] выделяют еще и третий тип стокс-поляриметров, где для измерения параметров Стокса применяется вращающаяся с определенной частотой фазовая пластинка. При регистрации интенсивности излучения, прошедшего через вращающуюся фазовую пластинку и неподвижно установленный перед фотоприемником анализатор, фотоэлектрический сигнал модулирован с частотами, кратными частоте вращения фазовой пластинки. Этот сигнал несет в себе информацию о поляризационных характеристиках излучения.

Недостатками первых двух типов стокс-поляриметров является необходимость проведения четырех измерений, изменяя при этом азимуты составных элементов поляриметра, оптимальные значения которых рассчитывают для минимизации погрешностей, что увеличивает время проведения исследования и, следовательно, ограничивает возможности применения данных типов стокс-поляриметров. Недостатками многоканальных стокс-поляриметров является наличие большого числа составных элементов, каждый из которых необходимо сориентировать с максимальной точностью по определенному азимуту, заранее рассчитанному для минимизации погрешностей.

В третьем типе стокс-поляриметров одним из основных источников погрешностей является неточность в установке его составных элементов на заранее рассчитанные

оптимальные азимуты. Кроме того, несмотря на уменьшение продолжительности измерений данными стокс-поляриметрами, полученные результаты требуют значительного времени на обработку для вычисления компонент вектора Стокса. Следует также отметить, что в состав стокс-поляриметров третьего типа входит вращающаяся фазовая пластинка, что может уменьшить надежность данных схем при проведении длительных экспериментов.

Но главное, во всех типах стокс-поляриметров для нахождения компонент вектора Стокса измеряется интенсивность, точность определения которой обычно не превышает 1%.

В данной работе предложен фотополяриметрический метод измерения компонент вектора Стокса, который позволит значительно повысить точность определения их относительных значений.

Для определения параметров поляризованного излучения предложен фотополяриметрический метод, основой которого является определение относительных значений компонент вектора Стокса через измерение угла эллиптичности ω и азимута эллипса поляризации λ оптического излучения. Предлагаемый метод измерения компонент вектора Стокса может быть реализован, к примеру, с использованием двух модуляторов (см. рис. 1), на которые поочередно подают управляющие сигналы. В качестве модулятора предлагается использовать магнитооптическую ячейку Фарадея с кристаллом иттрий феррита-граната. Данные кристаллы при магнитных полях до 80 А/м позволяют получить углы раскочки плоскости поляризации до 100° , что дает возможность работать с оптическими каналами низкого качества [11].

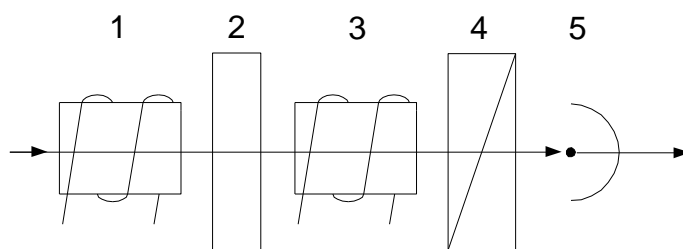


Рис. 1. Блок-схема стокс-поляриметра:

1 – модулятор; 2 – четвертьволновая фазосдвигающая пластинка; 3 – модулятор; 4 – анализатор; 5 – фотоприемник

Для определения параметров λ и ω необходимо произвести два измерения. В первом случае, ориентируем азимут плоскости наибольшей скорости фазовой пластинки α относительно азимута плоскости наибольшего пропускания анализатора β на угол 90° . При этом, управляющие сигналы будем подавать только на модулятор 1, модулятор 3 не подключается (см. рис. 1). Интенсивность на выходе анализатора при этом имеет вид:

$$I_{\text{ВЫХ}} = \frac{I}{2} \left[1 - \frac{I'}{I} p' \cos 2\omega \cos 2(\alpha - \lambda + \theta + \theta_-) \right],$$

где $I = I' + I''$ – полная интенсивность падающего луча; I', I'' – соответственно полностью поляризованная и полностью деполаризованная компоненты интенсивности падающего луча; p' – степень поляризации образца; θ_- – дополнительный угол поворота плоскости поляризации света, связанный с геометрическими дефектами, остаточной намагниченностью феррита; θ – угловая амплитуда колебаний плоскости поляризации, изменяющаяся по периодическому закону: $\theta = \theta_0 \Phi(t)$, где $\Phi(t)$ – произвольная периодическая функция, изменяющаяся во времени с частотой Ω .

Впоследствии настраивая фотополяриметр на минимум сигнала на выходе, измеряя азимут пластинки, можно определить параметр λ не зная при этом значение угла эллиптичности ω :

$$\lambda = \alpha_{\min} + \Delta + \theta_-,$$

где α_{\min} – азимут плоскости наибольшей скорости фазовой пластинки, при котором интенсивность на выходе минимальна; Δ – погрешность измерений.

Интенсивность на выходе анализатора при этом имеет вид:

$$I_{BbIX \min} = \frac{I}{2} [1 - P \cos 2\theta + 2\Delta P \sin 2\theta],$$

где $P = pp'p_{\ominus} = \frac{I'}{I} p' \cos 2\omega$; p – степень поляризации света в среде.

Для определения угла эллиптичности ω установим азимут плоскости наибольшей скорости фазосдвигающей пластинки по направлению большой (или малой) оси эллипса поляризации светового потока при этом предыдущее условие не сохраняется, а управляющие сигналы будем подавать на модулятор 3 (см. рис. 1). В этом случае, выражение интенсивности света на выходе анализатора преобразуется к виду:

$$I_{BbIX} = \frac{I}{2} \left[1 + \frac{I'}{I} p' \cos 2(\omega - \beta + \lambda + \theta + \theta_{\ominus}) \right].$$

Как и при определении параметра λ , будем измерять ω , настраивая фотополариметр на минимум интенсивности на выходе исходя из условия:

$$\omega - \beta_{\min} + \lambda + \theta_{\ominus} = \frac{\pi}{2},$$

где β_{\min} – азимут плоскости наибольшего пропускания анализатора, при котором интенсивность на выходе минимальна.

Интенсивность на выходе анализатора при этом равна:

$$I_{BbIX \min} = \frac{I}{2} [1 - pp' \cos 2\theta + 2\Delta pp' \sin 2\theta].$$

Таким образом:

$$\omega = \frac{\pi}{2} + \beta_{\min} - \lambda + \Delta + \theta_{\ominus}.$$

Для нахождения абсолютных величин всех компонент вектора Стокса необходимо найти степень поляризации исследуемого потока p и его интенсивность I . Для этого установим фазосдвигающую пластинку на нулевой азимут ($\alpha=0$), а ее фазовый сдвиг $\delta=0$ (или можно убрать фазосдвигающую пластинку из схемы). Интенсивность на выходе анализатора в этом случае будет иметь вид:

$$I_{BbIX} = \frac{I}{2} \left[1 + \frac{I'}{I} \cos 2\omega \cos 2(\beta - \lambda) \right] = \frac{I}{2} [1 + p \cos 2\omega \cos 2(\beta - \lambda)].$$

Настраивая фотополариметр на максимум и минимум пропускания света, найдем соответственно максимальную $I_{BbIX \max}$ и минимальную $I_{BbIX \min}$ интенсивность на выходе анализатора. Выражения для нахождения компонент вектора Стокса имеют вид:

$$I = I_{BbIX \max} + I_{BbIX \min};$$

$$M = p \cos 2\omega \cos 2\lambda = \frac{I_{BbIX \max} - I_{BbIX \min}}{I} \cos 2(\alpha_{\min} + \Delta + \theta_{\ominus});$$

$$C = p \cos 2\omega \sin 2\lambda = \frac{I_{BbIX \max} - I_{BbIX \min}}{I} \sin 2(\alpha_{\min} + \Delta + \theta_{\ominus});$$

$$S = p \sin 2\omega = \frac{I_{BbIX \max} - I_{BbIX \min}}{I \cos 2\left(\frac{\pi}{2} + \beta_{\min} - \lambda + \Delta\right)} \sin 2\left(\frac{\pi}{2} + \beta_{\min} - \lambda + \Delta + \theta_{\ominus}\right).$$

Выводы:

1. Предложенный метод позволяет с фотополариметрической точностью, достигающей угловых секунд, определять относительные значения компонент M , C и S

вектора Стокса падающего излучения.

2. Для нахождения абсолютных значений всех компонент вектора Стокса необходимо определить полностью поляризованную I' и полностью деполаризованную I'' компоненты интенсивности падающего луча, что ограничивает точность измерений до 1%.

3. Использование модулятора на иттрий-феррите гранате позволит увеличить точность измерения угла эллиптичности и азимута эллипса поляризации, а, следовательно, и относительных значений компонент M , C и S вектора Стокса падающего излучения за счет дополнительной раскочки плоскости поляризации оптического излучения.

4. Если поляризация падающего светового луча круговая или близка к таковой, предлагаемый метод использовать нельзя, что является его недостатком.

Список литературы:

1. Застосування оптимізованого класичного поляриметра для визначення вмісту оптично активних речовин в прозорих та темних розчинах / С. Г. Гарасевич, П. І. Коренюк, Ю. О. Мягченко, С. І. Осипов, О. В. Слободянюк // Вісник Київського університету, серія: фізико-математичні науки. – 1999. - № 1. – С. 311 – 321.

2. *Рогаткин Д. А.* Об особенностях в определении оптических свойств мутных биологических тканей и сред в расчетных задачах медицинской неинвазивной спектрофотометрии / *Д. А. Рогаткин* // Медицинская техника. – 2007. - № 2. – С. 10 – 16.

3. Исследование поляриметрических характеристик оптических дисковых носителей / [*В. В. Петров, А. А. Крючин, С. Н. Савенков* и др.] // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2009. – Т. 11. – №2. С. 3 – 11.

4. Поляриметрические исследования комет в Крымской астрофизической обсерватории / [*Н. Н. Киселев, В. К. Розенбуш, Н. М. Шаховской* и др.] // Известия Крымской астрофизической обсерватории. – 2007. – Т. 103. – №. 4. – С. 216 – 230.

5. Исследование поляризации излучения избранных высокоальбедных объектов вблизи оппозиции / [*В. К. Розенбуш, Н. Н. Киселев, Н. М. Шаховской* и др.] // Известия Крымской астрофизической обсерватории. – 2007. – Т. 103. – №. 4. – С. 279 – 289.

6. Аврамчук В. В. Фотометрические исследования больших спутников Урана / *В. В. Аврамчук, В. К. Розенбуш, Т. П. Бульба* // Астрономический вестник. – 2007. – Т. 41. – С. 204 – 222.

7. *Шутов А. М.* Оптические схемы устройств измерения параметров поляризованного излучения / *А. М. Шутов* // Оптико-механическая промышленность. – 1985. – № 11. – С. 52 – 56.

8. *Длугунович В. А.* Анализ метода измерения поляризационных характеристик стокс-поляриметром с вращающейся фазовой пластинкой / *В. А. Длугунович, В. Н. Снопко, О. В. Царюк* // Оптический журнал. – 2001. – Т. 68. – № 4. – С. 37 – 42.

9. *Савенков С. Н.* Погрешность определения элементов матрицы Мюллера и ее влияние на решение обратной задачи поляриметрии / *С. Н. Савенков, А. С. Климов, Е. А. Оберемок* // Журнал прикладной спектроскопии. – 2009. – Т. 76. – № 5. – С. 784 – 792.

10. *Савенков С. М.* Стокс-поляриметр на рідкокристалічних комірках: аналіз похибок / *С. М. Савенков, О. С. Клімов, Є. А. Оберемок* // Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки. – 2009. – № 1. – С. 215 – 222.

11. Регистрация угла плоскости колебания линейно поляризованного инфракрасного излучения / *А. И. Ванюрихин, Ю. А. Кузнецов, В. Ф. Майстренко, В. Д. Тронько* // Оптико-механическая промышленность. – 1970. – Вып. 8. – С. 30 – 33.