

УДК 535.5 + 621.658.011:620.1

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ МОДУЛЯЦИИ ПРИ КОНТРОЛЕ ОПТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

А. Г. СТАРОВОЙТОВ, А. В. ХОМЧЕНКО

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDC 535.5 + 621.658.011:620.1

FEATURES OF APPLICATION OF POLARIZATION MODULATION IN CONTROL OF THE OPTICAL ACTIVITY OF MATERIALS

A. G. STAROVOYTOV, A. V. KHOMCHENKO

Аннотация. Рассмотрены особенности применения поляризационной модуляции при измерении угла поворота плоскости поляризации зондирующего излучения оптически активным веществом. Выполнен анализ поляризации света на основе формализма матриц Джонса. Получена оценка чувствительности метода при исследовании свойств оптически активных материалов.

Ключевые слова: поляризационная модуляция, оптическая активность, полутеневая пластинка.

Abstract. The features of using polarization modulation when measuring the angle of rotation of the plane of polarization of the incident light by an optically active material are considered. The analysis of light polarization is carried out on the basis of the Jones matrix formalism. An estimate of the sensitivity of the method is obtained when studying the properties of optically active materials.

Key words: polarization modulation, optical activity, half-wave plate.

Введение. Наличие оптической активности ряда кристаллов (например, кварца, киновари) и жидкостей (скипидара, раствора сахара в воде) контролируется методом оптической поляриметрии [1–4]. Измерение интенсивности поляризованного света, прошедшего через исследуемый образец и «скрещенные» поляризаторы, позволяет оценить угол поворота плоскости поляризации падающего света и определить концентрацию оптически активного вещества [3, 4]. В методах измерения углов вращения плоскости поляризации оптически активным веществом, получивших название нулевых методов гашения [1, 2], величина азимутального угла определяется с помощью различного вида компенсаторов [5–7]. При этом азимутальный угол компенсатора измеряется при условии, когда интенсивность падающего на приемник светового потока равна нулю или минимальна. Существенным преимуществом такой схемы измерения является полная независимость измеряемых параметров поляризации от изменений мощности источника оптического излучения и чувствительности приемника, а следовательно, такой способ измерения является более точным и достоверным. Однако проведение измерений такими методами в

широкой области спектра вызывает затруднения, т. к. большинство компенсаторов работают лишь в узкой спектральной области, либо даже на одной фиксированной длине волны. Поэтому в настоящее время при измерении угла поворота плоскости поляризации широко применяются полутеневые устройства [4]. Существуют различные типы таких устройств, в некоторых из них после поляризатора по ходу распространения излучения устанавливается поляризационная призма, частично перекрывающая световой пучок. Плоскость колебаний выходящего излучения из призмы составляет некоторый полутеневой угол с плоскостью колебаний, выходящих из поляризатора. В качестве полутеневой пластинки часто используют полуволновую пластинку. Главное направление $\lambda/2$ -пластинки составляет с направлением пропускания поляризатора малый угол (несколько градусов), который обозначим как $\varphi/2$. Пластинка $\lambda/2$ поворачивает плоскость колебаний проходящего через него линейно поляризованного света на угол φ . Таким образом, направление колебаний линейно поляризованного света после $\lambda/2$ -пластинки составляет угол φ с плоскостью колебаний линейно поляризованного света, проходящего мимо пластинки. Угол вращения оптически активного вещества равен разности отсчетов, полученных при уравнивании полей полутеневого устройства с испытанным образцом и без него с точностью до $0,01^\circ$ при визуальном контроле. Погрешность ориентации анализатора в этих устройствах в основном определяется порогом чувствительности глаза, который определяется отношением наименьшей, но еще различимой, разности яркости двух полей к величине самой яркости. Порог чувствительности глаза зависит от яркости и угловых размеров полей сравнения, рассеяния света, его индивидуальных свойств и др. Указанных недостатков лишена модуляционная поляриметрия [8]. При этом техника регистрации изменения интенсивности поляризованного света, прошедшего через образец, упрощается: не требуется опорный пучок, к источнику и приемнику не предъявляются особые требования, весь оптический тракт менее сложен, хотя в измерительную установку и вводится модулятор поляризации зондирующего излучения.

В работе рассмотрены особенности применения поляризационной модуляции в поляриметрии при измерении концентрации оптически активных веществ.

Методика эксперимента. Введение дополнительной модуляции поляризации зондирующего излучения в оптическую схему поляриметра, состоящего из скрещенных анализатора и поляризатора, обусловлена присутствием в схеме деполяризованного (или эллиптически поляризованного света). Деполяризованный свет возникает в результате рассеивания при распространении света через испытуемый образец и оптические детали поляриметра, сторонней засветки, а также при двойном лучепреломлении в образце и оптических деталях, расположенными между поляризатором и

анализатором. Присутствие деполаризации ограничивает чувствительность классических поляризационно-оптических методов, увеличивает погрешность установки анализатора при равенстве полей полутеневого устройства. В случае же модуляции поляризации излучения происходит периодическое изменение ее состояния при неизменной интенсивности излучения. В результате регистрируется переменная составляющая на выходе фотоприемника, связанная с изменением углов поворота плоскости поляризации зондирующего излучения, которую можно селективно усилить. Принципиальная схема установки, используемой для измерений, приведена на рис. 1.

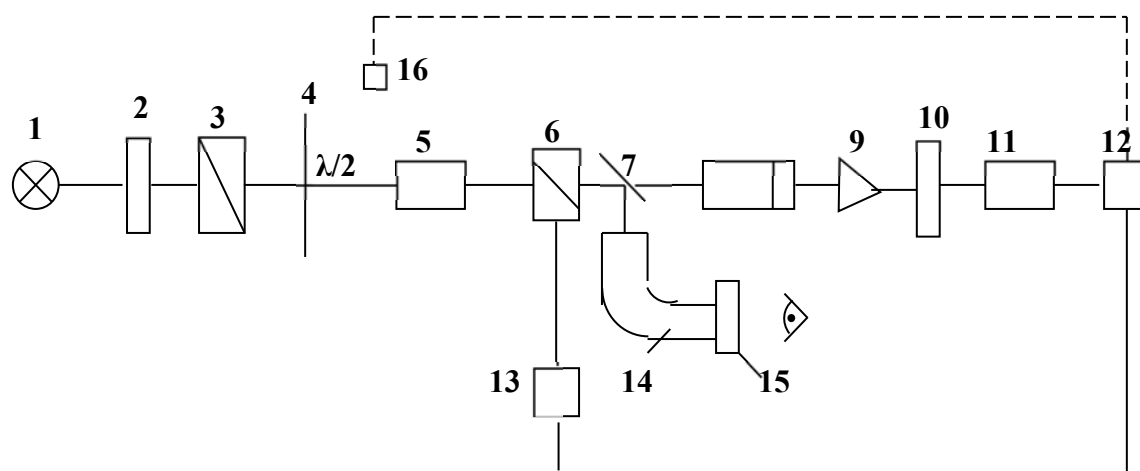


Рис. 1. Схема измерительной установки: 1 – источник; 2 – светофильтр; 3 – поляризатор; 4 – полуволновая пластинка; 5 – образец; 6 – делительная пластина; 7 – делительная пластина; 8 – световод с фотоприемниками; 9 – селективный усилитель; 10 – аналого-цифровой преобразователь; 11 – интерфейс компьютера; 12 – компьютер; 13, 16 – шаговые двигатели; 14 – световод; 15 – окуляр

В качестве источника света использована лампа накаливания с фильтром на длину волны 590 нм. Полуволновая пластинка перекрывает среднюю часть лучей, выходящих из поляризатора, при этом ее главное направление составляет с направлением пропускания поляризатора угол $\varphi/2$, как уже отмечалось $\lambda/2$ -пластинка поворачивает плоскость поляризации проходящего через нее линейного поляризованного света на угол φ . Анализатор устанавливается на равное минимальное освещение полей при отсутствии вращающего вещества, а затем при его наличии. При этом плоскость колебаний светового вектора в пучках, освещающих обе половины поля зрения, повернется на угол φ , на этот же угол повернется и анализатор. Модулятор поляризации представляет собой вращающуюся пластинку полуволны, установленную за поляризатором в направлении распространения света. В результате вращения модулятора вокруг экваториальной плоскости со скоростью ω возникает вращающаяся фигура. Работа модулятора в роли элемента, управляющего состоянием

поляризации, рассмотрена в [8], где показано, что сигнал фотодетектора, оперируемый эллиптическим поляризованным в общем случае излучением, содержит линейную и циркуляционную составляющие, которые формируют переменные сигналы фотодетектора на частоте модулятора и удвоенной частоте соответственно.

Анализ поляризации света на основе формализма матриц Джонса. При описании интенсивности света, прошедшего через оптическую схему, учтем, что поляризатор и анализатор ориентированы под углом 0° и α относительно оси ОХ. Матрица оптически активной среды представляет собой матрицу поворота и без учета поглощения излучения имеет вид [9]:

$$M = \begin{vmatrix} \cos \varphi \cdot \sin \varphi \\ -\sin \varphi \cdot \cos \varphi \end{vmatrix}.$$

Влияние вращающейся полуволновой пластинки опишем матрицей Джонса:

$$\begin{vmatrix} \cos\left(\delta_m \cdot \sin \omega t + \frac{\varphi_0}{2}\right) - \sin\left(\delta_m \sin \omega t + \frac{\varphi_0}{2}\right) \\ \sin\left(\delta_m \cdot \sin \omega t + \frac{\varphi_0}{2}\right) \cos\left(\delta_m \cdot \sin \omega t + \frac{\varphi_0}{2}\right) \end{vmatrix},$$

где δ_m – амплитуда модуляции азимута поляризованного света, вносимая $\lambda/2$ -пластинкой; ω – круговая частота модуляции светового потока; $\varphi/2$ – начальная фаза, вносимая $\lambda/2$ -пластинкой.

Вектор Максвелла для пучка зондирующего излучения на выходе из системы определим с помощью выражения [9]

$$E = J_A \cdot J_0 \cdot J_m \cdot J_p E_0,$$

где E_0 – вектор Максвелла для исходного состояния поляризации зондирующего излучения; J_0, J_m, J_A – матрицы Джонса, моделирующие оптически активное вещество, полуволновую пластинку и анализатор соответственно. После соответствующей подстановки и преобразований вектор Максвелла будет иметь вид:

$$E = \begin{vmatrix} \cos(\alpha + \delta_m) \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\varphi_0}{2} - \varphi\right) \\ \cos(\alpha + \delta_m) \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\varphi_0}{2}\right) - \varphi \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{vmatrix}.$$

Тогда интенсивность света, прошедшего через анализатор, определяется выражением

$$I = kI_0 \cos^2 \left(\delta_m \sin \omega t - \left(\varphi + \alpha - \frac{\varphi_0}{2} \right) \right),$$

где I_0 – интенсивность падающего света, k – коэффициент, учитывающий потери света на поглощение и рассеяние в элементах оптической схемы, расположенных до фотоприемника.

Интенсивность полей полутеневого устройства при $\alpha = 90^\circ$ и $\omega = 0$ одинакова и равна

$$I = kI_0 \sin^2(\varphi_0/2); \quad I = 0 \text{ при } \varphi = 0.$$

Предположим, что в результате погрешности выравнивания освещенности полей, ошибки установки анализатора равны $\Delta\alpha$, тогда интенсивность полей

$$I_1 = kI_0 \sin^2(\varphi_0/2 + \Delta\alpha); \quad I_2 = kI_0 \sin^2(\varphi_0/2 - \Delta\alpha),$$

а их разность

$$\Delta I = I_1 - I_2 = 2kI_0 \cdot \sin(\varphi_0/2) \cos(\varphi_0/2) \ln 2\Delta\alpha; \quad \frac{\Delta I}{I} = 2 \operatorname{ctg}(\varphi_0/2) \ln 2\Delta\alpha.$$

Результаты и их обсуждение. Интенсивность светового потока пропорциональна яркости, поэтому левую часть последнего равенства можем рассматривать как отношение разности освещенности полей к величине яркости, что соответствует порогу чувствительности фотоприемника. Последнее равенство определяет полутеновой угол φ_0 при заданной величине $\Delta\alpha$ погрешности ориентации анализатора. Так, для малых углов $\Delta\alpha$ и φ_0 и пороге контрастности 2 % будем иметь: при $\varphi_0 = 1^\circ$ погрешность $\Delta\alpha = 0,0025^\circ$, при $\varphi_0 = 2^\circ$ и $\varphi_0 = 8^\circ$ величина $\Delta\alpha$ составляет 0,005 и $0,02^\circ$ соответственно.

В случае вращения полуволновой пластинки при скрещенных поляризаторе и анализаторе ($\alpha = 90^\circ$) на входе фотоприемника регистрируется минимальная постоянная составляющая сигнала [2]

$$I = 0,5kI_0 \left[1 - J_0(2\delta_m) \cos 2\varphi \right] + T_1,$$

где T_1 – пропускание скрещенных поляризатора и анализатора.

При этом амплитуда первой гармоники сигнала максимальна:

$$I_1 = kI_0 J_1(2\delta_m) \cdot \sin(2\varphi - 2\varphi),$$

где $J_0(2\delta_m)$, $J_1(2\delta_m)$ – функция Бесселя нулевого и первого порядков от $2\delta_m$.

Так как величина сигнала пропорциональна $\ln 2\varphi$, то диапазон измерения углов φ ограничен пределами от -45° до $+45^\circ$. Для оценки чувствительности измерительной установки отметим, что для фотоприемника минимальная обнаруживаемая мощность излучения составляет [8, 10]

$$\delta W_{\min} = \left(\frac{4h\nu}{\gamma} BW \right)^{\frac{1}{2}},$$

где γ – квантовая эффективность фотодетектора; h – постоянная Планка; ν – оптическая частота; W – оптическая мощность; B – полоса частот.

Тогда при условии, что изменение интенсивности сигнала описывается выражением $I_1 = I_0 \cdot J_1(2\delta_m) \ln 2\Delta\varphi$, подавление сигнала происходит путем поворота анализатора до такого положения, когда сигнал на выходе равен нулю, а отсчет показаний осуществляется по углу поворота анализатора, можно получить при $W = 20 \cdot 10^{-6}$ Вт (соответствует предельной мощности облучения глаза человека), $B = 30$ Гц, $\gamma = 1$ и $\nu = 5 \cdot 10^{14}$ Гц, минимально обнаруживаемый поворот азимута поляризации $\Delta\varphi$ составляет величину $\Delta\varphi \sim 2 \cdot 10^{-6}$ рад.

Заключение. Представленная схема поляриметра позволяет работать со световыми пучками достаточно большого диаметра и обладает более высоким разрешением. При этом измерение угла поворота плоскости поляризации, вносимой оптически активным веществом, сводится к компенсации первой гармоники в спектре сигнала детектора, что позволяет автоматизировать процесс измерения, повысить чувствительность измеряемой установки, для которой минимальный регистрируемый угол поворота плоскости поляризации составил $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ рад.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азам, Р. Эллипсометрия и поляризованный свет / Р. Азам, Н. Башара. – Москва: Мир, 1981. – 583 с.
2. Панкова, Э. Д. Поляризационные угломеры / Э. Д. Панкова, В. В. Коротаев. – Москва: Недра, 1992. – 240 с.
3. Попечитеков, Е. П. Электрофизиологическая и фотометрическая медицинская техника / Е. П. Попечитеков, Н. А. Короневский. – Москва: Высшая школа, 2002. – 470 с.
4. Запаский, В. С. Методы высокочувствительных поляриметрических измерений / В. С. Запаский // ЖПС. – 1982. – Т. 37, вып. 2. – С. 181.

5. **Вишняков, Г. Н.** Измерение разности фаз при линейном двулучепреломлении в дифференциальном фазовом поляриметре с вращающимся анализатором / Г. Н. Вишняков, Г. Г. Левин, А. Г. Ломакин // Оптический журнал. – 2011. – Т. 78, № 9. – С. 76–81.

6. **Helen, S. S.** Achromatic phase shifting by a rotating polarizer / S. S Helen M. P. Kothiyal, R. S. Sirohy // Optics Communications. – Vol. 154, № 5–6. – P. 249–254.

7. **Yu Lung Lo.** Full-field heterodyne polariscope with an image signal processing method for principal axis and retardation measurements / Yu Lung Lo // Applied Optics. – 2006. – Vol. 45, № 31. – P. 8006–8012.

8. Модуляционная поляриметрия термоупругости, индуцированной тепловым излучением в стекле / И. Е. Митяш [и др.] // ФТТ. – 2014. – Т. 56, вып. 7. – С. 1439–1445.

9. **Джеррард, А.** Введение в матричную оптику / А. Джеррард, Дж. М. Берч. – Москва: Мир, 1978. – 336 с.

10. **Снопко, В. Н.** Поляризационные характеристики оптического излучения и методы их измерения / В. Н. Снопко. – Минск: Навука і тэхніка, 1992. – 124 с.

E-mail: avkh@bru.by.