

УДК 535.361 (045)

**А. В. Скрипец**, канд. техн. наук,  
**В. Д. Тронько**, д-р физ.-мат. наук,  
**М. М. Асанов**, асп.

## ДВУХЛУЧЕВОЙ ФОТОПОЛЯРИМЕТР ИЗМЕРЕНИЯ УГЛА ПОВОРОТА ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ В МУТНЫХ СРЕДАХ

Институт электроники и систем управления: e-mail: marlen\_as@mail.ru

*Разработан и проанализован фотополариметр на основе двухлучевого способа измерения угла поворота плоскости поляризации в мутных деполаризующих средах.*

**Ключевые слова:** фотополариметр, поляризация, мутные среды, поворот плоскости поляризации.

**Введение.** Фотоэлектрические однолучевые способы измерения угла поворота плоскости поляризации света обладают большой чувствительностью благодаря модуляции угла плоскости поляризации светового луча и потенциальной точностью измерения порядка  $5 \cdot 10^{-4}$  град [1], следовательно позволяет измерять концентрацию исследуемого вещества в малых объемах, что резко снижает деполаризацию луча, проходящего в мутной среде. При высокой потенциальной точности однолучевые фотополариметры обладают рядом недостатков. Главным из них является присутствие фарадеевского модулятора для раскачки плоскости поляризации света. Существующие модуляторы ограничивают или ширину спектрального диапазона исследуемого света, или амплитуду угла поворота плоскости поляризации света [2; 3].

Несмотря на высокую чувствительность и точность однолучевого фотополариметра, его не всегда можно использовать при измерениях в мутных деполаризующих средах, где требуются большие углы раскачки плоскости поляризации. Поэтому была предложена идея двухлучевого метода регистрации угла поворота плоскости поляризации без использования фарадеевского модулятора угла поворота плоскости поляризации.

**Постановка задачи.** В этой работе проведен общий анализ потенциальной чувствительности и точности двухлучевого метода измерения угла поворота плоскости поляризации в мутных средах, а также описан фотополариметр, реализующий данный метод.

**Описание метода.** Структурная схема устройства, реализующего двухлучевой способ регистрации угла поворота плоскости поляризации показана на рис. 1 [4; 5]. Эта схема содержит монохроматический источник света 1, кювету 3 с исследуемым раствором, которая установлена в рабочем пучке между поляризатором 2 и полупрозрачной пластинкой 4, которая расщепляет луч света на два с интенсивностями  $I_1$  и  $I_2$  с взаимортогональными плоскостями поляризации. Пластинка 4 расщепляет лучи, ориентированные по азимуту под углами  $\pm 45^\circ$  относительно плоскости наибольшего пропускания полупрозрачной пластинки, пройдя которую один из лучей сразу попадает на анализатор 7, а второй, отбившись от непрозрачного зеркала 5, попадает на анализатор 6. Оба анализатора развернуты по азимуту на определенный угол  $\pm \alpha$ , такой, чтобы отношение сигнал / шум системы было максимальным. Этот угол  $\alpha$ , как будет показано ниже, определяется только степенью поляризации луча в исследуемом веществе  $p$ . Это позволяет чувствительность двухлучевого фотополариметра поднять до уровня однолучевого фотополариметра и точность при этом значительно увеличится (хотя и не достигнет точности однолучевого фотополариметра). Далее по ходу лучей установлены одинаковые фотоприемники 8, 9, на которые падают лучи соответственно первого и второго каналов. К фотоприемникам 8 и 9 присоединены отдельно

усилители электрических сигналов  $U_I$  и  $U_{II}$ , которые создаются лучами первого и второго каналов. Усилители находятся в электронном блоке 10, который соединен с индикатором 11.

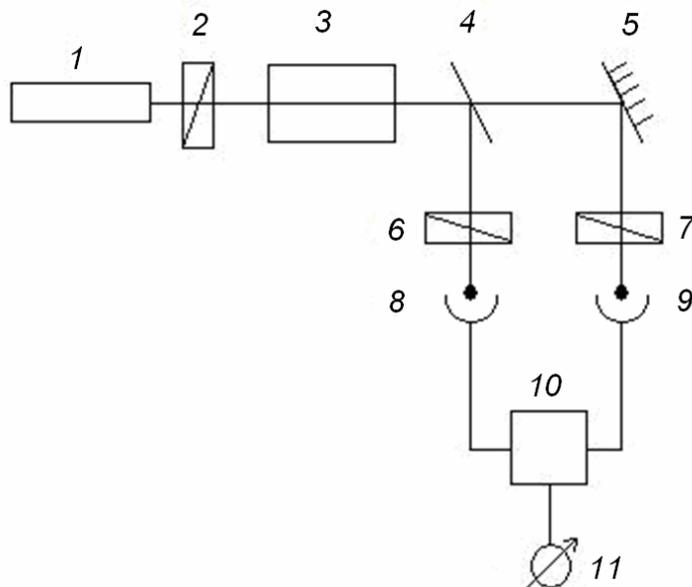


Рис. 1. Двухлучевой фотополяриметр

Также блок 10 содержит переключатель полярности, который преобразует напряжение в переменный электрический сигнал.

Расчет параметров будем производить с помощью метода вектора Стокса и матриц Мюллера [6]. Для прошедшего через каждый из каналов поляриметра луча света вектор Стокса равен

$$\begin{aligned} (Ve)_{\text{прI}} &= [P_a][P_{\text{обр}}][P_{\text{пI}}](V_i); \\ (Ve)_{\text{прII}} &= [P_a][P_{\text{обр}}][P_{\text{пII}}](V_i), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $(V_i) = (I_0 \ 0 \ 0 \ 0)$  – вектор Стокса падающего луча;  $I_0$  – интенсивность светового потока на входе системы;  $[P_a]$ ,  $[P_{\text{пI}}]$ ,  $[P_{\text{пII}}]$ ,  $[P_{\text{обр}}]$  – соответственно матрицы, описывающие свойства анализатора, поляризаторов первого и второго каналов [6] и мутного образца [5].

Из выражения (1) по аналогии с работой [2] определяем величины напряжений на выходе фотоприемников 8, 9 (первая компонента вектора Стокса):

$$\begin{aligned} U_I &= U_0' \{1 - p \cos 2[\alpha - (\beta - \theta)]\}; \\ U_{II} &= U_0'' \{1 - p \cos 2[\alpha + (\beta - \theta)]\}, \end{aligned}$$

где  $\beta$  – поворот плоскости поляризации света в образце;  $\theta$  – азимут плоскости наибольшего пропускания поляризатора 2.

Сумма и разница напряжений соответственно равны:

$$\begin{aligned} U^+ &= U_I + U_{II} = [(U_0' + U_0'') - (U_0' + U_0'') p \cos 2\alpha \cos 2(\beta - \theta) - \\ &\quad - (U_0' - U_0'') p \sin 2\alpha \sin 2(\beta - \theta)] ; \\ U^- &= U_I - U_{II} = [(U_0' - U_0'') - (U_0' - U_0'') p \cos 2\alpha \cos 2(\beta - \theta) + \\ &\quad + (U_0' + U_0'') p \sin 2\alpha \sin 2(\beta - \theta)] . \end{aligned} \quad (2)$$

Добиваемся равенства амплитуд  $U'_0 = U''_0 = U_0$ . При этом условии выражение (2) упростится:

$$\begin{aligned} U^+ &= 2U_0 [1 - p \cos 2\alpha \cos 2(\beta - \theta)]; \\ U^- &= 2U_0 p \sin 2\alpha \sin 2(\beta - \theta). \end{aligned}$$

Значение отношения напряжений  $Q$  при этом равно:

$$Q = \frac{U^-}{U^+} = \frac{p \sin \alpha \sin 2(\beta - \theta)}{1 - p \cos 2\alpha \cos 2(\beta - \theta)}.$$

Однако мы не измеряем  $Q$ , а добиваемся исчезновения  $U^- = 0$ . Это возможно тогда, когда поляризатор 2 довернули в обратную сторону:  $\beta - \theta = 0$ . Но абсолютно точно это условие выполнить нельзя из-за шумов:  $\beta - \theta = \Delta$ . По аналогии с [2] вычислим погрешность  $\Delta$ , исходя из условия отношение сигнал/шум равно единице:

$$\frac{S}{N} = \frac{U_c^2}{U_t^2 + U_{др}^2} = A \frac{p^2 \sin^2 2\alpha \Delta^2}{1 - p \cos 2\alpha} = 1, \quad (3)$$

где  $U_c = U^-$  – полезный сигнал;  $U_{др}$ ,  $U_t$  – соответственно напряжение, создаваемое дробовыми и тепловыми шумами, причем  $U_{др}^2 \gg U_t^2$ , так как из-за деполяризации в мутной среде на фотокатод попадает большая паразитивная световая интенсивность;  $A$  – постоянная, зависящая от параметров фотоприемников [7].

Из выражения (3) определяем  $\Delta$ :

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{A}} \frac{\sqrt{1 - p \cos 2\alpha}}{p \sin 2\alpha}. \quad (4)$$

Проанализировав функцию (4), можно доказать, что  $\alpha$ , при котором  $\frac{\sqrt{1 - p \cos 2\alpha}}{p \sin 2\alpha}$  минимально, будет выполняться при условии:

$$\cos 2\alpha = \frac{1}{p} (1 - \sqrt{1 - p^2}). \quad (5)$$

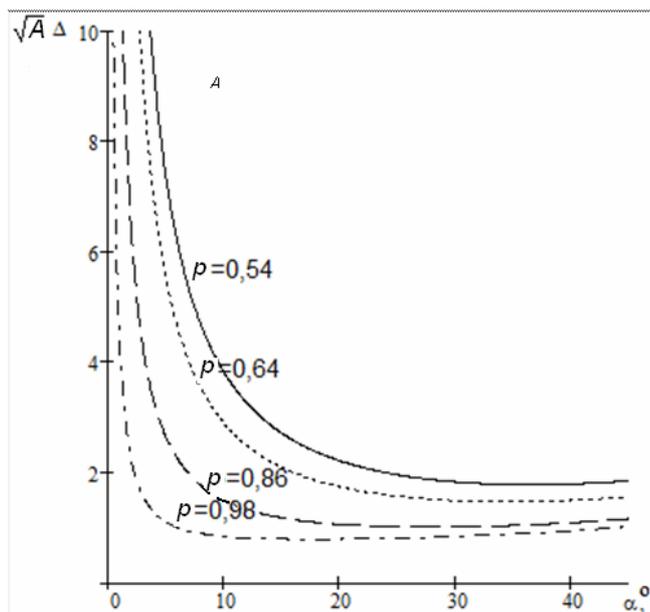
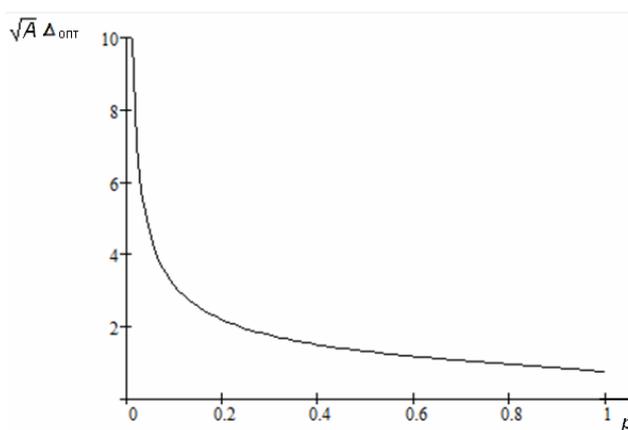
Подставляя выражение (5) в уравнение (4), получим оптимальное значение  $\Delta$ :

$$\Delta_{\text{опт}} = \frac{1}{\sqrt{A}} \frac{\sqrt[4]{1 - p^2}}{\sqrt{p^2 - (1 - \sqrt{1 - p^2})^2}} = \frac{1}{\sqrt{A}} \frac{\sqrt[4]{1 - p^2}}{\sqrt{2\sqrt{1 - p^2}(1 - \sqrt{1 - p^2})}} = \frac{1}{\sqrt{2A}} \frac{1}{\sqrt{1 - \sqrt{1 - p^2}}}.$$

Из уравнений видно, что если подстраивать  $\alpha$  до значений по формуле (5), предварительно измерив  $p$ , то можно значительно увеличить чувствительность и точность.

Зависимость чувствительности от угла  $\alpha$  для различных  $p$  изображена на рис. 2. Из графика видно, что с увеличением значений  $p$ , т. е. с улучшением поляризационных характеристик среды, чувствительность увеличивается, а кривая зависимости смещается в область малых значений угла  $\alpha$ .

Зависимость оптимальной чувствительности от  $p$  показана на рис. 3. Из графика видно, что при малых значениях  $p$  наблюдается резкая зависимость чувствительности от значений степени поляризации луча в исследуемом веществе.

Рис. 2. Зависимость  $\sqrt{A} \Delta$  от угла  $\alpha$ Рис. 3. Зависимость  $\sqrt{A} \Delta_{\text{опт}}$  от  $p$ 

### Выводы

1. Преимуществом рассмотренной схемы является отсутствие модулятора Фарадея, что значительно уменьшает стоимость установки, а также снимается ограничение на работу с определенной длиной волны (инфракрасный диапазон при работе с модулятором Фарадея).

2. Имеется одноканальная, но, в то же время двухлучевая схема, что позволяет использовать компенсационный метод измерения с минимальными потерями мощности сигнала. Производится измерение угла поворота плоскости поляризации оптически активным веществом с большой точностью, что позволяет с большей достоверностью получить информацию о концентрации вещества в растворе.

3. Учитывается при вычислениях значение степени деполяризации мутной среды, что повышает точность измерения концентрации.

### Список литературы

1. Кудрявцев В. И. Автоматический сахариметр // Сахарная промышленность / В. И. Кудрявцев. – 1953. – № 11. – С. 14 – 16.

2. Дерюгин И. А. Фотоэлектрический поляриметр инфракрасного диапазона // Оптика и спектроскопия / И. А. Дерюгин, Ю. А. Кузнецов, В. Д., Тронько В. Д. – 1970. – Т. 28. – № 2. – С. 415 – 418.
3. Ванюрихин А. И. Регистрация угла плоскости колебаний линейно поляризованного инфракрасного излучения // Оптико-механическая промышленность / А. И. Ванюрихин, Ю. А. Кузнецов, В. Ф. Майстренко, В. Д. Тронько – 1970. – № 8. – С. 30 – 33.
4. *Optical rotary power property measuring apparatus* // Pat. Japan – № 61083924, Okazaki, Nobuo, 1986.
5. Пат. № 2325630 Россия. Способ измерения концентрации оптически активных веществ в мутных растворах и устройство для его осуществления / Пеньковский А. И, 2006.
6. Шерклиф У. Поляризованный свет / У. Шерклиф – М.: Мир, 1965. – 264 с.
7. Павлов А. В. Приемники излучения оптико-электронных приборов / А. В. Павлов, А. И. Черников – М.: Энергия, 1972. – 240 с.

А. В. Скрипец, В. Д. Тронько, М. М. Асанов

**Двопроменевий фотополариметр вимірювання кута повороту площини поляризації в каламутних середовищах**

Розроблено і проаналізовано фотополариметр на основі двопроменевого способу вимірювання кута повороту площини поляризації в каламутних деполаризувальних середовищах.

A. V. Skrypets, V. D. Tronko, M. M. Asanov

**Double-beam photopolarimeter for polarization plane rotation angle registration in turbid media**

This work is devoted to development and analysis of photopolarimeter based on the double-beam method of polarization plane rotation angle registration in turbid media.