

## Дослідження обертання площини поляризації світла.

**Мета роботи:** вивчення явища обертання площини поляризації; використання цієї властивості для визначення концентрації цукрових розчинів за допомогою поляриметра (цукрометра).

### Теоретичний вступ

В біжучій електромагнітній хвилі вектори напруженості електричного  $E$  і магнітного  $H$  полів в кожній точці простору в даний момент часу є взаємно перпендикулярними і перпендикулярні до напрямку поширення хвилі (рис.1).

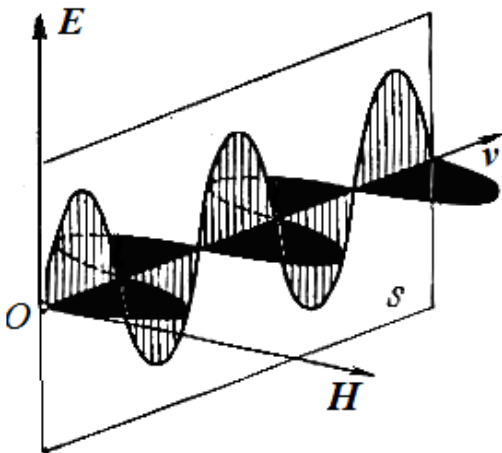


Рис. 1.

Поляризацію світла пов'язують з напрямком електричного вектора  $E$ . Якщо вектор  $E$  (а з ним і  $H$ ) в даній точці при проходженні хвилі здійснює коливання уздовж однієї прямої лінії в одній і тій же площині, хвилю називають *лінійно поляризованою або плоско поляризованою* (рис. 1). Площина, в якій коливається світловий вектор у плоскополяризованій хвилі, називається *площиною поляризації*. ( $S$  на рис.1)

Деякі речовини при проходженні через них плоско-поляризованого світла обертають площину поляризації; такі речовини називають *оптично активними*.

До їхнього числа належать як тверді тіла (кристалічний кварц, пластмаси, цукор), так і рідкі (скипидар, розчин цукру у воді).

Кут  $\varphi$  повороту площини поляризації, наприклад, в розчині цукру для монохроматичного світла буде тим більше, чим більше число активних молекул цукру зустрінеться на його шляху, тобто чим вище концентрація  $C$  розчину і чим довше шлях  $l$ , який проходить світло в активній речовині. Отже, кут повороту площини поляризації дорівнює

$$\varphi = \alpha_0 C l \quad (1)$$

де  $\alpha_0$  – так звана *питома стала обертання*, тобто кут повороту площини поляризації в розчині при концентрації  $C = 1 \text{ г/см}^3$  і товщині шару розчину 1 дм. (Тут довжину шляху променя в речовині прийнято виражати в дециметрах).

Якщо концентрацію розчину  $C$  виражати в % (кількість грамів активної речовини в  $100 \text{ см}^3$  розчину), то формула (1) набуває вигляду

$$\varphi = \alpha_0 (C/100) l \quad (2)$$

Прилади, за допомогою яких визначається кут повороту площини поляризації, називаються *поляриметрами*.

В так званих *полутіньових поляриметрах* визначення куту повороту площини поляризації є найбільш точним.

На рис. 2 наведена оптична схема напівтіньового поляриметра. Тут :  $S$ - джерело світла,  $P$  - поляризатор (ніколь, що поляризує світло від джерела),  $T$  - камера для трубок з розчином цукру,  $K$  - кварцовий компенсатор,  $A$  - аналізатор (ніколь, або поляроїдна плівка ).  $Ok$  – окуляр .

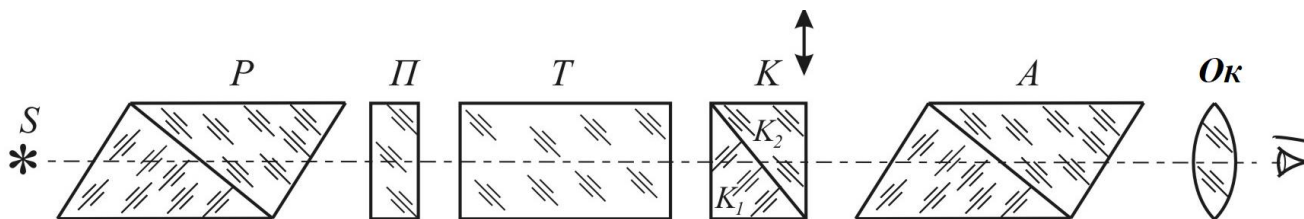


Рис. 2.

**Полутіньовий поляриметр** (див схему на рис. 2) складається з **двох поляризуючих призм**: нерухомої – поляризатора і такої, що обертається – аналізатора і **трубки** з досліджуванним розчином.

**Поляризатор** ( $P$  на рис. 2) служить для перетворення природного світла на поляризоване, а **аналізатор** ( $A$  на рис. 2) дає можливість визначити, на який кут повернулася площина поляризації під впливом досліджуваного розчину речовини. Між поляризатором й аналізатором розміщують трубку із розчином ( $T$  на рис. 2), який досліджується.

Кут повороту можна визначити, користуючись здібністю людського ока до оцінки рівності освітленостей двох суміжних полів зору.

Бікварцева пластинка  $\Pi$  (рис. 2) складається з двох склеєних по діаметру напівкруглих пластин право- і ліво - обертаючого кварцу. Площина коливань світла, який виходить з поляризатора  $P$  повертається однією частиною бікварцу в

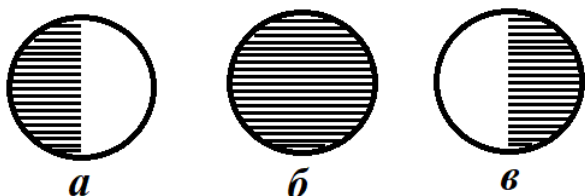


Рис. 3.

ліву сторону, іншою на такий самий кут в праву сторону. У відсутності трубок з розчином обидві половини поля зору будуть освітлені однаково (рис. 3, б).

Наявність трубки з активним розчином викликає поворот площин коливань, що виходять з бікварцу, рівномірна освітленість поля зору порушується. Обидві половини поля зору будуть освітлені не-

однаково (рис. 3, а, в) .

Для відновлення рівності освітленості **аналізатор треба повернути** на кут  $\varphi$ , рівний куту повороту площини поляризації активною речовиною.

Замість обертання аналізатора освітленість зрівнюють клиноподібним **кварцовим компенсатором**  $K$  (рис. 2). Кварц є оптично активною речовиною, яка обертає площину поляризації світла, що проходить через нього, в протилежному, ніж розчин цукру, напрямку. Зміщуючи кварцовий клин з допомогою мікрометричного гвинта перпендикулярно променю, тобто. змінюючи товщину його робочої частини, можна компенсувати поворот площини поляризації розчином цукру і відновити рівну освітленість полів зору.

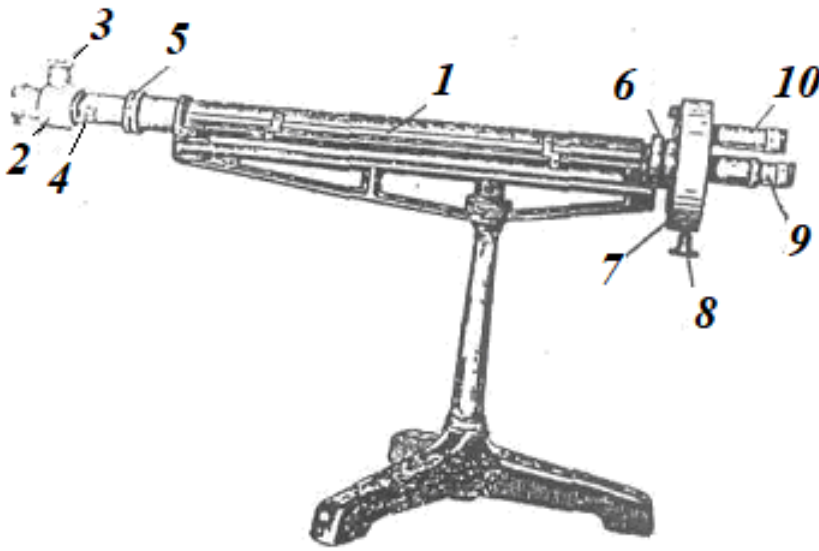


Рис. 4.

ляризатор; 6- напівтінювий аналізатор; 7- компенсатор; 8- гвинт компенсатора; 9- окуляр для спостереження поля зору; 10-окуляр для спостереження відлікової шкали.

## **Порядок виконання роботи**

### **1. Визначення нульової точки приладу.**

З цією метою помістіть в поляриметр скляну трубку, яку заповнено дистильованою водою, і закрийте його кришкою. Включіть освітлювач. Налаштуйте окуляр так, щоб вийшло різке зображення границі поділу полів зору. Обертаючи лупу 9 (рис. 4), отримайте різке зображення відлікової шкали. Повертаючи гвинт 8 компенсатора добийтеся рівної освітленості полів зору поблизу повного затемнення. Зніміть відлік  $\varphi_0$  по шкалі з ноніусом. Виконайте такі виміри 5 разів, щораз заново відшукуючи положення з рівною освітленістю. Знайдіть  $\langle \varphi_0 \rangle$  і прийміть його за нульову точку приладу.

### **2. Градування поляриметра**

Замініть в камері трубку з дистильованою водою трубкою з відомою концентрацією цукру у воді (у трубці не повинно бути пухирців повітря). При цьому рівна освітленість полів зору пропаде. Гвинтом 8 знову добийтеся рівної освітленості полів зору і зробіть відлік  $\varphi_i$  по шкалі з ноніусом. Виконайте 3-5 таких незалежних вимірів кута  $\varphi_i$  і визначте з них середнє  $\langle \varphi_s \rangle$ .

З отриманого середнього значення відніміть поправку на зсув нуля  $\langle \varphi_0 \rangle$ . Кут повороту площини поляризації буде

$$\varphi = \langle \varphi_i \rangle - \langle \varphi_0 \rangle .$$

Аналогічні виміри повторіть для інших трубок з відомою концентрацією. Всі виміряні величини занесіть у таблицю.

Лінійне переміщення клина пропорційно куту повороту площини поляризації, тому прилад проградуєований у так званих градусах цукрової шкали.

## **Опис установки**

На рис. 4 .вказаний загальний вигляд поляриметра. Тут : 1- камера для трубок з досліджуваним розчином; 2- освітлювач трубки з розчином; 3- освітлювач шкали; 4- світлофільтр; 5- по-

3. За отриманими даними побудуйте графік залежності кута повороту площини поляризації в поділках шкали від концентрації  $C$  цукру в розчині

$$\varphi = f(C).$$

4. У такий же спосіб виміряйте кути  $\varphi_i$  повороту площини поляризації цукровими розчинами з невідомою концентрацією і за графіком визначте їх концентрації.

5. За формулою (2) обчисліть питому сталу обертання цукру при всіх значеннях концентрації. Знайдіть  $\langle \alpha_0 \rangle$ .

Таблиця 1

Розчин	$\varphi_0$	$\langle \varphi_0 \rangle$	$\varphi_i$	$\langle \varphi_i \rangle$	$\varphi$	$l$	$C$	$\alpha_{0i}$	$\langle \alpha_0 \rangle$	$S_{\langle \alpha_0 \rangle}$	$\Delta \langle \alpha_0 \rangle$	$E\%$
Відомі концен трації												
Невідомі концентр												

Остаточний результат запишіть у вигляді

$$\alpha_0 = \langle \alpha_0 \rangle \pm \Delta \langle \alpha_0 \rangle$$

### Контрольні питання

1. Яке світло називається плоско-поляризованим?
2. Які речовини називаються оптично активними?
3. Як пояснює теорія Френеля поворот площини поляризації оптично активними речовинами?
4. Що називається питомою сталою обертання розчину? Від чого вона залежить?
5. Опишіть принцип устрою і роботи поляриметра?
6. Яке призначення напівтіньової пластинки, що поміщається на шляху світлового пучка? Чи можна використати поляриметр без неї?

## ДОДАТОК 1

### Методика обробки експерименту

1. Проводять  $n$  незалежних дослідів та визначають  $n$  значень шуканої величини  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ .

2. Розраховують середнє арифметичне значення шуканої величини:

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

3. Розраховують відхилення кожного результату від середнього значення:

$$\Delta x_i = x_i - \langle x \rangle.$$

4. Визначають стандартне відхилення середнього

$$S_{\langle x \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 + \dots}{n(n-1)}}.$$

5. Задають довірчу ймовірність  $\alpha$ . Зазвичай довірчу ймовірність вважають рівною 0,90; 0,95; 0,98; 0,99. За вибраним значенням довірчої ймовірності  $\alpha$  і для виконаної кількості вимірювань  $n$  за таблицею визначають коефіцієнт Стьюдента  $t_{\alpha,n}$  (Таблиця є в кожній лабораторії).

6. Обчислюють півширину довірчого інтервалу (**абсолютну похибку середнього**)

$$\Delta\langle x \rangle = t_{\alpha,n} S_{\langle x \rangle}.$$

7. Визначають відносну похибку

$$E = \frac{\Delta\langle x \rangle}{\langle x \rangle} \cdot 100\%.$$

8. Остаточний результат вимірювання записують у вигляді:

$$x = (\langle x \rangle \pm \Delta\langle x \rangle) \text{ одиниць виміру, при } \alpha = \dots$$

## ДОДАТОК 2.

### Поняття про теорію О.Френеля обертання площини коливань оптично активними речовинами (див. [1], стор 182)

Для пояснення обертання площини поляризації О. Френель припустив, що в оптично активних речовинах світлові хвилі, поляризовані по колу вправо і вліво, поширюються з неоднаковою швидкістю. Для правообертальних речовин

$$v_{np} > v_l, \quad n_{np} < n_l,$$

а для лівообертальних речовин \

$$v_{np} < v_l, \quad n_{np} > n_l$$

де  $v_{np}$  і  $v_{лів}$  - швидкості поширення світла з правою та лівою поляризацією, а  $n_{np}$  та  $n_{лів}$  - відповідні показники заломлення.

З погляду сучасних уявлень розходження у швидкості поширення світла з різними напрямками кругової поляризації обумовлено асиметрією молекул або ж асиметричним розміщенням атомів у кристалі.

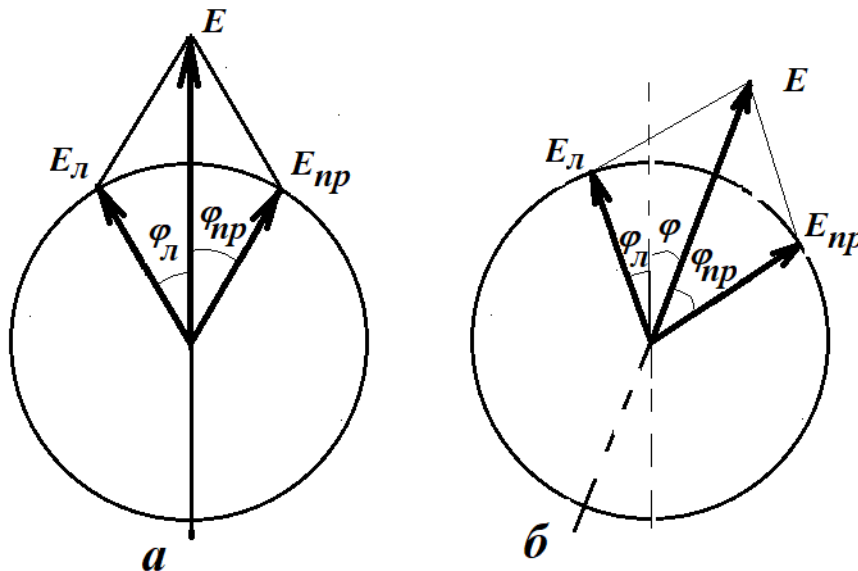


Рис. 5.

Лінійно-но поляризоване світло можна представити як суперпозицію двох поляризованих по колу хвиль, з правим і лівим напрямками обертання з однаковими частотами і амплітудами. На основі таких уявлень лінійно поляризоване світло при вході в активну речовину можна вважати як суму право- і лівоциркулярних хвиль (рис. 5, а)

На рис. 5 а  $E_{л}$  – світловий вектор лівої складової,  $E_{пр}$  – правої, а  $E$  сумарний вектор. Якщо швидкості обох хвиль не рівні, то в міру проходження через речовину один з векторів, наприклад  $E_{л}$ , буде відставати у своєму обертанні від вектора  $E_{пр}$  (рис. 5 б), тобто результуючий вектор  $E$  буде повертатися убік більш “швидкого” вектора  $E_{пр}$ .

Внаслідок цього площина, відносно якої електричні вектори обох хвиль розміщені симетрично, повертається праворуч на кут  $\varphi$  відносно площини коливань падаючої хвилі (рис. 5, б). Кут визначається з умови  $\varphi_{пр} - \varphi = \varphi_{л} + \varphi$ , звідки випливає

$$\varphi = \frac{1}{2}(\varphi_{пр} - \varphi_{л}). \quad (1)$$

Кути повороту електричного вектора правої і лівої хвиль можна виразити через час  $t$  та довжину шляху  $l$  хвиль у оптично активному середовищі:

$$\varphi_{пр} = \omega(t - l/v_{пр}); \quad \varphi_{л} = \omega(t - l/v_{л}).$$

Тоді

$$\varphi = \frac{\omega l}{2} \left( \frac{1}{v_{л}} - \frac{1}{v_{пр}} \right) \quad (2)$$

Виразимо фазові швидкості поширення лівої і правої хвиль через коефіцієнти заломлення:

$$v_{л} = c/n_{л}, \quad v_{пр} = c/n_{пр} \quad (3)$$

де  $c$  - швидкість світла в вакуумі.

Підставивши (3) у формулу (2), одержимо

$$\varphi = \frac{2\pi l}{2cT} (n_{л} - n_{пр}) = \frac{\pi l}{\lambda_0} (n_{л} - n_{пр}) \quad (4)$$

де  $\lambda_0 = cT$  – довжина світлової хвилі в вакуумі.

З виразу (4) випливає, що при  $n_{л} > n_{пр}$  ( $v_{л} < v_{пр}$ ) площина коливань повертається праворуч, а при  $n_{л} < n_{пр}$  ( $v_{л} > v_{пр}$ ) – ліворуч.

Окремо було встановлено, що різниця показників заломлення пропорційна концентрації  $C$  активної речовини в розчині

$$n_{пр} - n_{л} = b C, \quad (5)$$

де  $b$  - коефіцієнт, що залежить від природи оптично активної речовини.

З (4) і (5) одержуємо

$$\varphi = \frac{\pi b}{\lambda_0} C l = \alpha_0 C l \quad (6)$$

Таким чином, у розчинах оптично активних речовин кут повороту  $\varphi$  площини поляризації прямо пропорційний товщині  $l$  шару розчину і концентрації  $C$  активної речовини в розчині.

### **Рекомендована література**

1. Кучерук І. М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики. У 3 т. Т.3: Оптика. Квантова фізика. Навчальний посібник для студентів вищих технічних та педагогічних закладів освіти – К.; "Техніка", 2006, -520 с
2. Курс фізики (під редакцією Лопатинського І.Є).. – Львів. – "Бескід Біт". – 2002.
3. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Фізика. Навчальний посібник у 7 частинах. Ч. 5. - Хвильова оптика. - Д. НТУ «Дніпровська політехніка», 2020. - 58 с. -

Склали Гаркуша І.П., Лютий О.І.