

**Київський національний університет
імені Тараса Шевченка
фізичний факультет**

О.В. Макаренко

ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ МЕТОДИ ОПТИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Лабораторний практикум

Рекомендовано до друку Вченою Радою фізичного факультету
(протокол №__ від __ червня 2025 року)

Рецензенти

доктор фіз.-мат. наук, професор О.А.Єщенко
кандидат фіз.-мат. наук, доцент І.В.Плющай

Макаренко О.В.

Поляризаційні методи оптичних вимірювань: Лабораторний практикум

В семи лабораторних роботах продемонстровано застосування поляризованого світла для дослідження оптичних властивостей металів, напівпровідників та анізотропних кристалів. Описується вимірювання ступеня поляризації частково поляризованого світла і оптичної активності середовища. Розглядаються різні методи аналізу еліптично поляризованого світла, які використовуються в науково-дослідницьких лабораторіях.

Рекомендовано для студентів кафедри оптики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Вступ

Поляризаційні методи оптичних вимірювань вже давно стали невід'ємною частиною сучасної оптики. Швидкість, точність та неруйнівний характер досліджень зумовлюють широке використання цих методів в різноманітних галузях науки та в промисловості. Необхідною умовою поглибленого розуміння студентами студентами-оптиками основних поляризаційних явищ є самостійне виконання лабораторних досліджень.

В семи лабораторних роботах продемонстровано застосування поляризованого світла для дослідження оптичних властивостей металів, напівпровідників та анізотропних кристалів. Описується вимірювання ступеня поляризації частково поляризованого світла і оптичної активності середовища. Розглядаються різні методи аналізу еліптично поляризованого світла, які використовуються в науково-дослідницьких лабораторіях.

Робота 1.
Вимірювання оптичних сталих металів та напівпровідників за допомогою компенсатора Бабіне

Прилади: джерело світла, монохроматор, поляризаційний гоніометр з компенсатором Бабіне, досліджуваний зразок у вигляді плоского дзеркала.

Теоретичні відомості

Вимірювання оптичних сталих металів та напівпровідників має важливе значення для з'ясування особливостей їх електронної будови. Найточніше оптичні сталі можна визначити методами аналізу поляризованого світла, яке відбите від дзеркальної поверхні досліджуваного матеріалу.

Відомо, що лінійно поляризоване світло, яке падає на межу поділу діелектрик - провідне середовище, після відбиття перетворюється на еліптично поляризоване, крім того випадку, коли напрям коливань електричного вектора лежить в площині падіння або в перпендикулярній площині. Вимірюючи параметри еліптично поляризованого світла, а саме; зсув фаз Δ між p - та s - складовими електричного вектора відбитої хвилі, азимут відновленої поляризації ψ , а також кут падіння світлової хвилі на площину дзеркала φ , можна обчислити оптичні сталі n і k з співвідношень

$$\begin{aligned} n &= \sin \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi \frac{\cos 2\psi}{1 + \sin 2\psi \cos \Delta} \\ \kappa &= \sin \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi \frac{\sin 2\psi \sin \Delta}{1 + \sin 2\psi \cos \Delta} \end{aligned} \quad (1.1)$$

формули (1) знайдено для випадку, коли електричний вектор падаючої хвилі орієнтовано під кутом 45° до p - та s -напрямів. Нагадаємо, що p - напрям складової електричного вектора, яка лежить у площині падіння, а s - у перпендикулярній площині.

Якщо еліптично поляризоване світло, відбите від дзеркала, відновити до лінійно поляризованого, вводячи додатковий зсув фаз Δ' , то електричний вектор коливатиметься під деяким кутом ψ до s -напрямку, причому $\psi < 45^\circ$. Кут ψ називається азимутом відновленої лінійної поляризації. Як впливає з формул (1.1) найбільша точність визначення оптичних сталих n і k досягається при головному куті падіння. Головним кутом падіння називається кут $\bar{\varphi}$, для якого зсув фаз $\Delta = 90^\circ$. Формули (1.1) при головному куті падіння спрощуються і набувають вигляду

$$n = \sin \bar{\varphi} \cdot \operatorname{tg} \bar{\varphi} \cdot \cos 2\bar{\psi} \quad \kappa = \sin \bar{\varphi} \cdot \operatorname{tg} \bar{\varphi} \cdot \sin 2\bar{\psi} \quad (1.2)$$

де $\bar{\psi}$ - азимут відновленої поляризації при головному куті падіння; $\bar{\varphi}$ - головний кут.

Для видимої ділянки спектра головний кут у більшості металів лежить в інтервалі $65-80^\circ$. В інфрачервоній ділянці спектра він наближається до 90° .

Експериментальна частина

Схема установки

Оптична схема установки наведена на рис.1.1. Світлові промені від вихідної щілини монохроматора. S_p спрямовуються лінзою \mathcal{L}_1 на вхідну щілину коліматора S , розташовану у фокальній площині об'єктива коліматора O_1 . Паралельні пучки променів проходять крізь поляризатор P , дзеркальний зразок M , компенсатор Бабіне K , аналізатор A і потрапляють у зорову трубу, яка складається з об'єктива O_2 та окуляра O_k . Коліматор разом з поляризатором закріплені на одному з рухомих стояків гоніометра, а компенсатор, аналізатор і зорова труба - на іншому. Досліджуваний зразок M встановлюється на столику гоніометра.

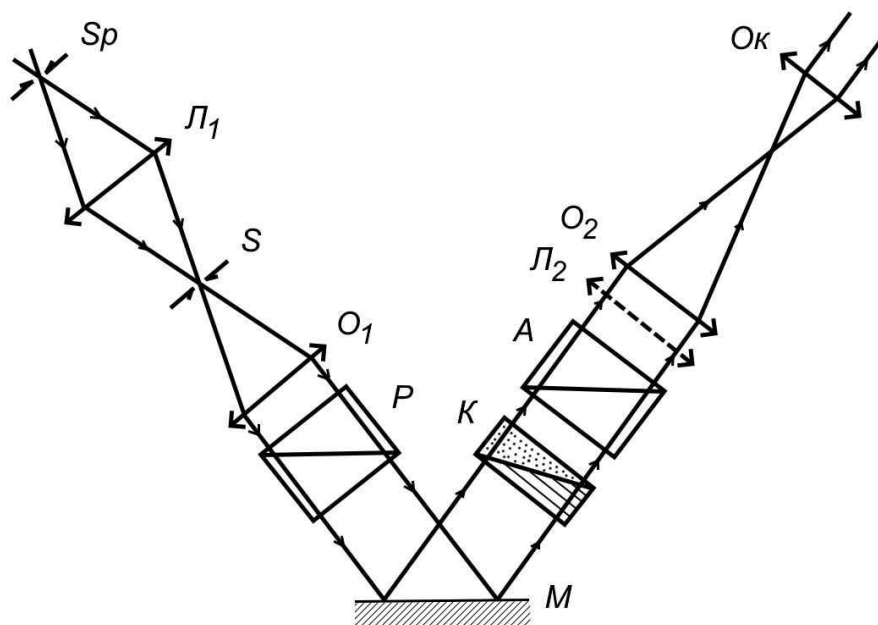


Рис.1.1 Схема експериментальної установки

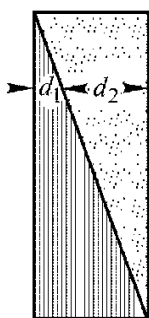


Рис.1.2
Компенсатор
Бабіне

Компенсатор Бабіне рис.1.2 складається з двох кварцових клинів. Оптична вісь одного з них паралельна заломлюючому ребру клина, а іншого - перпендикулярна. Перший клин пересувається відносно другого за допомогою мікрометричного гвинта, так що загальна товщина плоско-паралельної пластинки змінюється. При цьому змінюється різниця фаз між двома взаємно перпендикулярними лінійно-поляризованими хвилями, які проходять у певному місці. Різниця фаз визначається за формулою

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o)(d_1 - d_2)$$

де n_o та n_e - показники заломлення звичайного та незвичайного променів; d_1 та d_2 - товщина першого і другого клинів у даному місці компенсатора.

Оскільки товщина клинів змінюється лінійно, зсув фаз вздовж компенсатора також змінюється лінійно. Якщо на компенсатор падає лінійно поляризоване світло і електричний вектор коливається під деяким кутом ψ до однієї з осей компенсатора (осьми компенсатора називаються напрямки, вздовж яких коливаються вектори в звичайній та незвичайній хвилі.),

то в місцях, де $\Delta=2\pi k$, виходитиме лінійно поляризоване світло незмінної орієнтації, а в місцях, де $\Delta=(2k+1)\pi$ – лінійно поляризоване світло з напрямом коливань, повернутим на кут 2ψ рис.1.3.

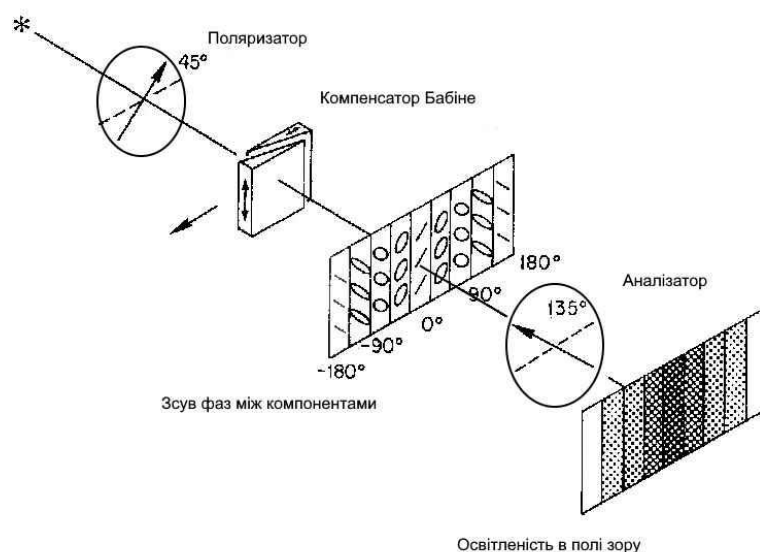
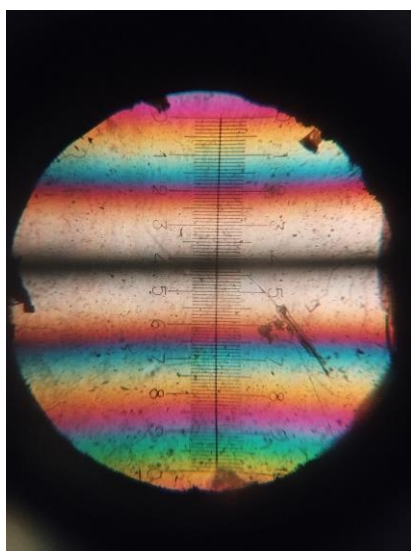
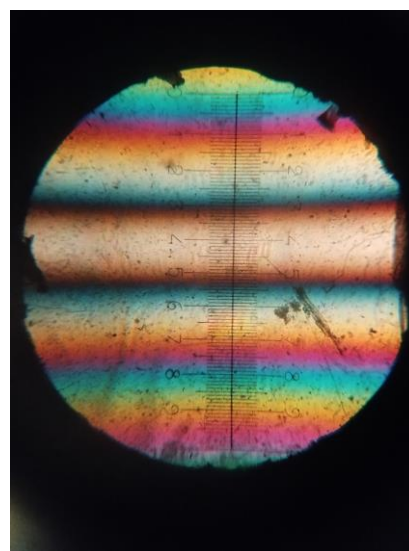


Рис.1.3 Схема експериментальної установки

Якщо площина коливань в аналізаторі перпендикулярна до площини коливань у поляризаторі, то в місцях, де $\Delta=2\pi k$, у монохроматичному світлі помітні темні смуги рис.1.4(а). Якщо аналізатор повернути на кут 2ψ , темні смуги спостерігатимуться в місцях, де $\Delta=(2k+1)\pi$. Ця система смуг лежить посередині між попередніми смугами рис.1.4(б).



а



б

Рис.1.4 Картина в полі зору, що спостерігається при зсуві фаз $\Delta=0^\circ$ (а) та $\Delta=180^\circ$ (б)

При падінні на компенсатор світла, відбитого від дзеркала, система темних смуг зміщується на деяку відстань l відносно попередньої системи, коли на компенсатор падає лінійно поляризоване світло. Зсув фаз Δ у падаючому еліптично поляризованому світлі пропорційний l , тобто $\Delta=cl$. Тут c - коефіцієнт пропорційності ($c=2\pi/L$, де L відстань між сусідніми темними смугами). Треба зауважити, що в білому світлі смуги забарвлені, але центральна смуга, де $\Delta=0$, тобто $d_1=d_2$, темна. Тут для всіх довжин хвиль зсув фаз $\Delta=0$.

Виконання роботи

1. Градування компенсатора. Для вимірювання зсуву фаз Δ необхідно спочатку визначити сталу компенсатора. Для цього коліматор і зорову трубу разом з компенсатором та аналізатором встановлюють так, щоб їх оптичні осі збігались. При цьому зразка на столику немає. Зорову трубу настроюють на площину компенсатора за допомогою додаткової лінзи L_2 (рис.1.1). Компенсатор розташований у фокальній площині лінзи L_2 . В поле зору потрапляє різке зображення смуг на компенсаторі і шкала окулярного мікрометра. Обрану реперну поділку встановлюють на центральну темну смугу. Це краще робити в білому світлі, коли всі смуги, крім центральної, забарвлені. За допомогою шкали окулярного мікрометра в монохроматичному світлі вимірюють відстань між смугами l і обчислюють сталу компенсатора c для різних довжин хвиль.

2. Вимірювання кута падіння ϕ . Дзеркальний зразок необхідно встановити на столик гоніометра перпендикулярно до його площини. Вхідний коліматор та зорова труба повинні бути налаштовані на нескінченність. Виймають лінзу L_2 і повертають столик гоніометра на зорову трубу, досягаючи збігу вхідної щілини коліматора з перехрестям ниток окуляра зорової труби. Потім за допомогою ноніусів визначають кут між коліматором і зоровою трубою, який дорівнюватиме 2ϕ . Кут ϕ має наближатися до головного кута.

3. Вимірювання зсуву фаз.

Після вимірювання кута падіння треба зняти компенсатор Бабіне, а лінзу L_2 поставити на своє місце. Обертаючи поляризатор і аналізатор, досягають повного гашення у присутності зразка. Це можливо лише тоді, коли напрями коливань електричного вектора в площинах поляризатора і аналізатора збігаються з p - та s - напрямками зразка.

Після цього встановлюють компенсатор і обертають його навколо променя, добиваючись повного гашення і зникнення смуг. В цьому випадку осі компенсатора збігаються з p - та s - напрямками.

Поляризатор повертають на 45° , а аналізатор так, щоб виникло чітке зображення смуг максимальної контрастності. Поляризатор та аналізатор необхідно повертати в один бік. Зразок вносить деякий зсув фаз, і система смуг змінюється відносно репера. Вимірявши по окулярному мікрометру зсув смуг l , легко обчислити зсув фаз за формулою $\Delta = cl$.

4. Вимірювання азимута відновленої лінійної поляризації. Аналізатор повертають від чіткого зображення на компенсаторі Бабіне однієї системи смуг A_1 до чіткого зображення іншої системи смуг A_2 , зміщених відносно попередніх на півперіоду. Кут повороту аналізатора дорівнює 2ψ , або $180^\circ - 2\psi$. Азимут відновленої лінійної поляризації

$$\psi = \arctg \frac{|R_p|}{|R_s|},$$
 де $|R_p|$ та $|R_s|$ - амплітуди p - та s - складових у відбитій хвилі. Оскільки завжди $|R_p| < |R_s|$, то $\psi < 45^\circ$. Якщо $\psi > 90^\circ$, то виміряно не кут ψ а доповняльний до 180° .

Результати вимірювань пп.3,4 занести до таблиці:

| Довжина хвилі, нм | Кут падіння ϕ , град | Зсув смуг l , поділки шкали | Положення аналізатора A_1 , град | Положення аналізатора A_2 , град |
|-------------------|---------------------------|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

5. Обчислення оптичних сталей і побудова дисперсійних кривих $n(\lambda)$ та $\kappa(\lambda)$. Необхідно виміряти n і κ для ряду довжин хвиль λ видимого діапазону (400-700 нм) через 20-30 нм. За формулами (1.1) обчислюють оптичні сталі і будують графіки залежності $n(\lambda)$ та $\kappa(\lambda)$ із зазначенням точності вимірювань.

6. Вимірювання оптичних сталей при головному куті падіння. Для вимірювання оптичних сталей при головному куті падіння необхідно для даної довжини хвилі λ змістити

репер на компенсаторі на l від центральної темної смуги при спостереженні смуг без зразка, а потім встановити зразок і орієнтувати компенсатор відносно p - і s - напрямів, як описано в п.3. Змінюючи кут падіння, добитися збігу репера з центральною темною смугою. Після цього виміряти головний азимут $\bar{\psi}$ та головний кут падіння $\bar{\varphi}$. Оптичні сталі обчислити за формулами (1.2) і порівняти їх з даними, знайденими для цієї довжини хвилі при неголовному куті падіння.

Контрольні питання

1. Пояснити причину перетворення лінійно поляризованого світла в еліптично поляризоване при відбиванні від металу.
2. Вивести формулу для зсуву фаз що вносить компенсатор Бабіне.
3. Пояснити утворення кольорових смуг в полі зору компенсатора Бабіне.
4. За якої умови поле зору компенсатора буде освітлене рівномірно?
5. Які дії треба виконати для спостереження чіткого зображення шкали компенсатора?

Література

1. R.M.A. Azzam, N.M. Bashara. Ellipsometry and Polarized Light, North Holland; 1988
2. Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics, Cambridge University Press, 2020
3. Л.В. Поперенко та ін., Діагностика поверхні поляризованим світлом; Київський національний ун-т ім. Тараса Шевченка. - К. : ВПЦ "Київський ун-т", 2007
4. Борбат А.М. и др. Оптические измерения. К., "Техніка", 1967.
5. Serge Huard. Polarization of Light, Wiley & Sons, 1997

Робота 2.

Вимірювання оптичних сталих металів та напівпровідників фотоелектричним методом Бітті

Прилади: джерело світла, монохроматор, поляризаційний гоніометр, досліджуваний зразок у вигляді плоского дзеркала, фотоелектрична приставка, яка складається з фотоелемента або фотопомножувача, підсилювача постійного струму, блока живлення та реєструючого приладу (гальванометра, мікроамперметра або електронного потенціометра)

Теоретичні відомості

Методи вимірювання оптичних сталих металів та напівпровідників на відміну від фотографічних та візуальних забезпечують більшу точність вимірювань, а також дозволяють працювати в широкому оптичному діапазоні і автоматизувати процес вимірювань. Одним з поширених фотоелектричних методів є метод Бітті, який дає досить точні результати. Як і у візуальних методах, оптичні сталі - показник заломлення n і показник поглинання κ визначають за формулами

$$\begin{aligned} n &= \sin \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi \frac{\cos 2\psi}{1 + \sin 2\psi \cos \Delta} \\ \kappa &= \sin \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi \frac{\sin 2\psi \sin \Delta}{1 + \sin 2\psi \cos \Delta} \end{aligned} \quad (2.1)$$

де φ - кут падіння світлових променів на дзеркальний зразок; Δ — зсув фаз між p - та s - компонентами електричного вектора у відбитій хвилі; ψ - азимут відновленої лінійної поляризації.

Для визначення Δ і ψ треба виміряти два відношення інтенсивностей. Якщо поляризатор утворює з площиною падіння кут β , а аналізатор - кут α , то електричний вектор після проходження світлом поляризатора, відбиття від зразка та проходження через аналізатор складатиметься з двох проекцій p - та s —компонент, зсунутих по фазі одна відносно іншої.

Проекції p - та s - компонент на площину аналізатора визначають з формул:

$$\begin{aligned} R_p &= A_0 r_p e^{i\delta_p} \cos \beta \cos \alpha \\ R_s &= A_0 r_s e^{i\delta_s} \cos \beta \sin \alpha \end{aligned} \quad (2.2)$$

де α – кут між площиною коливань в аналізаторі і p - площиною, A_0 - амплітуда коливань, пропущених поляризатором; r_p, r_s - амплітудні коефіцієнти відбиття для p - та s - компонент; δ_p, δ_s - зсув фаз компонент при відбитті.

Інтенсивність світла після аналізатора описується як:

$$\begin{aligned} |R|^2 &= |R_p|^2 + |R_s|^2 + 2|R_p||R_s|\cos \Delta = \\ &= A_0^2 r_s^2 (\eta^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta + \sin^2 \alpha \sin^2 \beta + 2\eta \sin \alpha \cos \alpha \sin \beta \cos \beta \cos \Delta) \end{aligned} \quad (2.3)$$

де β – кут між площиною коливань в поляризаторі і p - площиною, $\Delta = \delta_p - \delta_s$ – різниця фаз між p - та s - компонентами; $\eta = \operatorname{tg} \psi = r_p / r_s$ – відношення амплітудних коефіцієнтів відбиття.

У вираз (2.3) входять кути α і β , один з них можна зафіксувати, а другому надавати кілька значень і вимірювати інтенсивність. Наприклад, нехай $\beta = 45^\circ$, тоді

$$I(\alpha) = \frac{1}{2} A_0^2 r_s^2 (\eta^2 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha + 2\eta \cos \alpha \sin \alpha \cos \Delta)$$

Вимірюючи інтенсивність $I(\alpha)$ для трьох кутів $0, 45^\circ$ і 90° : $I(0)=I_p$, $I(45)=I_{45}$, $I(90)=I_s$ визначають ψ і Δ :

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \psi &= \sqrt{\frac{I_p}{I_s}} \\ \cos \Delta &= \left[\frac{I_{45}}{I_p} - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{I_s}{I_p} \right) \right] \sqrt{\frac{I_p}{I_s}} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Для лінійної фотоелектричної системи відповідні відношення інтенсивностей можна замінити відношенням підсилених фотострумів.

Експериментальна частина

Схема установки

Схема установки наведена на рис.2.1. Промені від вихідної щілини монохроматора S_p проходять крізь лінзу L , яка проектує зображення вихідної щілини на вхідну щілину коліматора S . Після коліматора O_1 паралельні пучки світла проходять крізь поляризатор P , відбиваються від зразка M , проходять крізь аналізатор A і лінзою O_2 збираються на фотоприймач Φ . Фотоелектрична приставка складається з фотоприймача Φ , підсилювача, блока живлення і реєструючого приладу

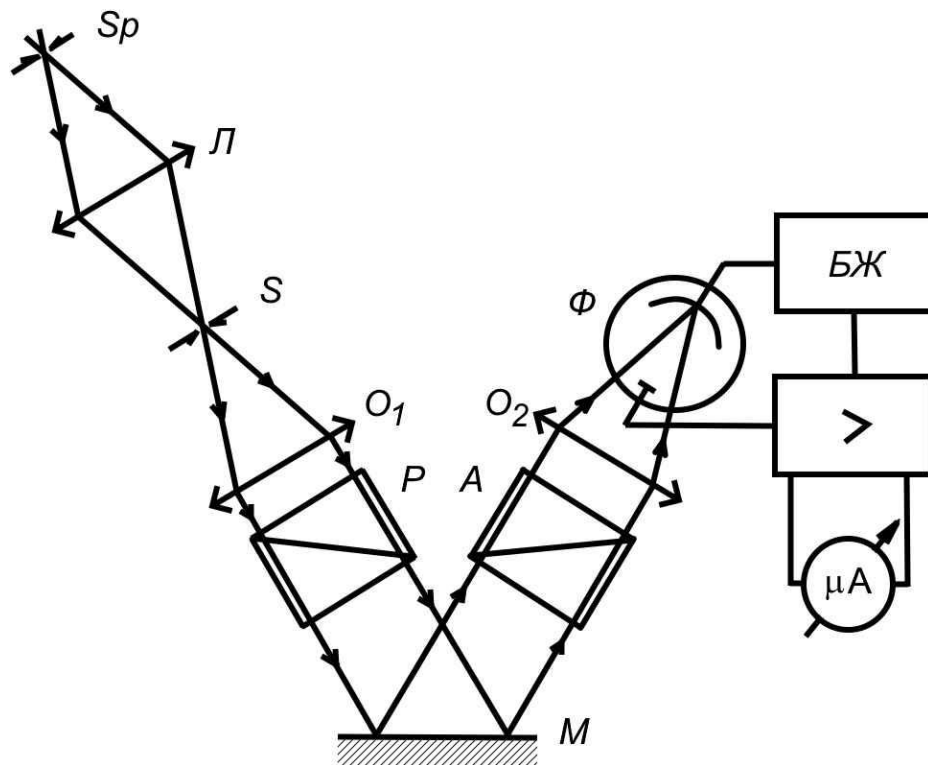


Рис 2.1 Схема експериментальної установки

Для вимірювання кута падіння ϕ в установку замість фотоприймача вставляють окуляр з перехрестям ниток, який разом з об'єктивом O_2 утворює зорову трубу. Слід враховувати, що монохроматор вносить значну поляризацію, тому виникають додаткові похибки. В схемі

на рис.2.1 монохроматор стоїть на вході, тому для усунення похибок, пов'язаних з поляризацією світла, треба залишати нерухомим поляризатор Р, а інтенсивність вимірювати, повертаючи аналізатор разом з фотоприймачем Ф. Якщо оптична схема зібрана так, що монохроматор стоїть на виході, нерухомим залишають аналізатор. В цьому випадку треба переконатися, що джерело дає неполяризоване світло.

Виконання роботи

Вимірювання кута падіння ϕ у вихідну трубу замість фотоприймача вставляють окуляр, зразок, встановлюють на столик гоніометра і обертанням його та вихідної зорової труби добиваються збігу зображення вхідної щілини коліматора з перехрестям . ниток окуляра. Вхідний коліматор і зорову трубу спочатку слід налаштувати на нескінченність. Кут падіння дорівнює половині кута між вхідною та вихідною трубами, який відлічується на гоніометрі. Для підвищення точності кут падіння має наближатись до головного кута падіння, який у видимій та ультрафіолетовій, ділянках спектра лежить в межах $65-75^\circ$.

2. Орієнтація поляризатора і аналізатора відносно p - та s - напрямів. Для орієнтації поляризатора і аналізатора окуляр замінюють фотоприймачем Ф. Обертаючи поляризатор і аналізатор, досягають повного гашення, тобто відсутності сигналу. Для цього треба, щоб площини коливань електричного вектора в поляризаторі і аналізаторі збігалися з p - та s - напрямками. Ці положення позначають на лімбах поляризатора та аналізатора. Поляризатор повертають на 45° , аналізатор на 90° і порівнюють сигнали до і після повертання аналізатора на 90° . Більший сигнал відповідає випадку, коли площина коливань аналізатора збігається з s - площиною, а менший – з p - площиною.

3. Вимірювання відношення інтенсивностей і обчислення оптичних сталей. Для кожної довжини хвилі повертають аналізатор так, щоб його площина пропускання збігалась з p - площиною, була орієнтована під кутом 45° до p - площини, збігалась з s - площиною. Орієнтація під кутом 45° відповідає тому випадку, коли поляризатор і аналізатор відхиляються від положення повного гашення на 45° , але в протилежних напрямках.

При трьох положеннях аналізатора реєструючий прилад, видає три сигнали I_s , I_p , I_{45} .
Результати вимірювань занести до таблиці:

| Довжина хвилі, нм | Кут падіння ϕ , град | I_s , мкА | I_p , мкА | I_{45} , мкА |
|-------------------|---------------------------|-------------|-------------|----------------|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Підставляючи величини фотострумів у формули (2.4) дістають значення зсуву фаз Δ та азимута відновленої поляризації ψ для даної довжини хвилі. За формулами (2.1) обчислюють оптичні сталі n і ϵ .

Контрольні питання

1. В чому полягають переваги фотоелектричного метода Бітті?
2. Пояснити відмінності в реєструючих схемах при розташуванні монохроматора на вході та на виході.
3. Як досягнути того щоб площини пропускання поляризатора та аналізатора збігалися з p - та s - напрямками?
4. Що називають азимуту відновленої поляризації ψ ?
5. Як оптичні сталі n і ϵ пов'язані з діелектричною проникністю?

Література

1. R.M.A. Azzam, N.M. Bashara. Ellipsometry and Polarized Light, North Holland; 1988
2. Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics, Cambridge University Press, 2020
3. Л.В. Поперенко та ін., Діагностика поверхні поляризованим світлом; Київський національний ун-т ім. Тараса Шевченка. - К. : ВПЦ "Київський ун-т", 2007
4. Борбат А.М. и др. Оптические измерения. К., "Техніка", 1967.
5. Russell A. Chipman, Garam Young, Wai Sze Tiffany Lam. Polarized Light and Optical Systems, Taylor & Francis INC International Concepts, 2018

Робота 3.

Визначення залежності ступеня поляризації стопи від кута падіння та числа пластин за допомогою поляриметра Корню.

Прилади: джерело світла, скляна стопа, гоніометр, поляриметр Корню.

Теоретичні відомості

При падінні неполяризованого світла на межу поділу двох діелектриків відбувається часткова поляризація як відбитого, так і світла, що проходить. Ступінь поляризації залежить від кута падіння на межу поділу і відносного показника заломлення. Для відбитого світла можна дістати лінійну поляризацію, якщо кут падіння дорівнює куту Брюстера. Для світла, що проходить, значної поляризації при одноразовому проходженні досягти неможливо, тому звичайно використовують стопу - набір з кількох пластин.

Ступінь поляризації частково поляризованого світла визначається за формулою

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{1 - \frac{I_{\min}}{I_{\max}}}{1 + \frac{I_{\min}}{I_{\max}}} \quad (3.1)$$

де I_{\max} і I_{\min} - максимальна та мінімальна інтенсивності світла, що проходить через поляризатор при обертанні його навколо осі пучка. Залежність ступеня поляризації стопи від кількості пластин, кута падіння і матеріалу пластин вивчало багато дослідників. Зокрема, формула для ступеня поляризації стопи з урахуванням багаторазових відбивань та інтерференції була знайдена М.П. Лисицею. Вона має вигляд:

$$P_m = \frac{m(n^2 - 1)^2 \sin^2 \varphi}{m(n^2 + 1) \left[2n^2 - (n^2 + 1) \sin^2 \varphi \right] - 4(m - 1)n^2 \cos \varphi \sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi}} \quad (3.2)$$

да m - кількість пластин у стопі; φ - кут падіння; n - показник заломлення пластини.

Формула (3.2) не враховує поглинання в пластинах, але для прозорих матеріалів її можна застосовувати при визначенні залежності ступеня поляризації від кількості пластин і кута падіння. Поляризаційні стопи використовують найчастіше при роботі в інфрачервоній ділянці спектра, де немає кращих поляризаторів. Виготовляють їх з селену або германію, які забезпечують майже повну поляризацію світла вже при 3-5 пластинах. У видимій ділянці спектра існує багато інших типів поляризаторів, і поляризаційні стопи майже не вживаються.

Експериментальна частина

Схема установка наведена на рис.3.1. Світло від джерела S проходить крізь стопу С, яка встановлена на столику гоніометра, і потрапляє на вхідний отвір d_1 поляриметра Корню. Поляриметр Корню складається з вхідного отвору d_1 , призми Волластона W, аналізатора A і вихідного отвору d_2 . Вхідний і вихідний отвори розташовані на відстані 25 см. Аналізатор обертається відносно призми W, кут його повороту можна визначати по лімбу.

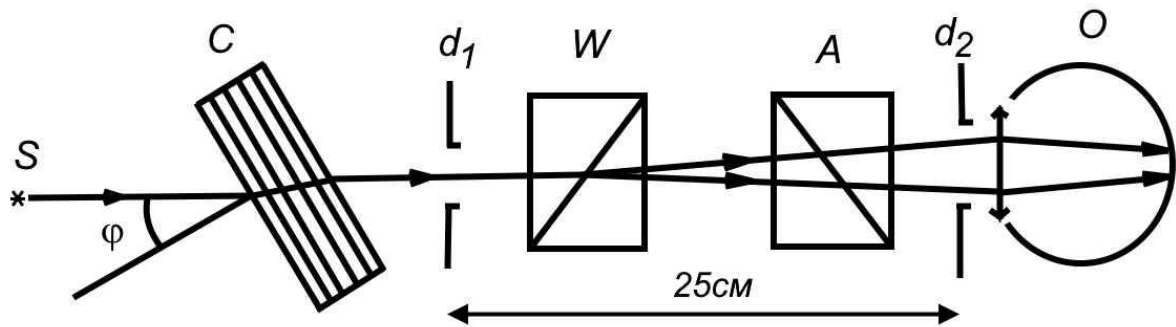


Рис 3.1 Схема експериментальної установки

Оскільки кожний промінь поділяється призмою W на два промені з взаємно перпендикулярною поляризацією, око, поставлене за вихідним отвором d_2 , бачитиме не один вхідний отвір d_1 , а два, відстань між якими змінюється зміщенням отвору d_1 таким чином, щоб два зображення отвору d_1 торкалися одне одного, але не перетиналися. В залежності від положення аналізатора інтенсивності зображень змінюються. Так, якщо площина коливань аналізатора збігається з напрямом однієї з осей призми W, то одне зображення гаситься, а інше стає максимально інтенсивним. Якщо на поляриметр падає неполяризоване світло, а площина коливань аналізатора повернута під кутом 45° до осей призми, то обидва зображення матимуть однакову інтенсивність.

Виконання роботи

Встановити аналізатор в поляриметрі під кутом 45° до осей призми. Для цього на вхідний отвір треба направити природне, тобто неполяризоване світло, наприклад світло, розсіяне екраном з окису магнію, і повернути аналізатор так, щоб обидва зображення мали однакову інтенсивність. Позначити це положення A_{45} на лімбі аналізатора.

Встановити стопу на столик гоніометра під певним кутом падіння так, щоб промені потрапляли на вхідний отвір поляриметра вже лінійно поляризованими.

Орієнтувати призму W поляриметра Корню, щоб її осі збігалися з p - та s - напрямками стопи. Для цього обертати призму Волластона W разом з аналізатором, поки не зрівняються інтенсивності обох зображень. Це досягається тоді, коли осі призми W орієнтовані під кутом 45° до p - та s - напрямків стопи. Обертаючи призму разом з аналізатором на 45° досягаємо того, що її осі збігатимуться з p - та s - напрямками стопи.

Повертаючи аналізатор у положення A_a , добитися однакової інтенсивності обох зображень у полі зору. Кут α повороту аналізатора від положення 45° щодо p - та s - напрямків до положення, при якому інтенсивності полів однакові: $\alpha = A_a - A_{45}$. Ступінь поляризації скляної стопи необхідно визначити для різної кількості пластин і різних кутів падіння від 0° до 90° через $3-9^\circ$.

Результати вимірювань занести до таблиці:

| Кількість пластин в стопі m , шт | Кут падіння φ , град | A_a , град |
|------------------------------------|------------------------------|--------------|
| | | |
| | | |
| | | |

Ступінь поляризації визначають за формулою:

$$p = |\sin 2\alpha| \quad (3.3)$$

Використовуючи здобуті результати, побудувати графіки залежності ступеня поляризації від кута падіння. Зіставити експериментальні результати з теоретичними кривими, розрахованими за формулою (3.2).

Контрольні питання

1. Пояснити за допомогою формул Френеля часткову поляризацію природньо поляризованого світла при проходженні через межу поділу діелектричних середовищ.
2. Які Ви знаєте схеми розташувань пластин в оптичній стопі? Чим викликана необхідність таких розташувань?
3. Що називають оптичною віссю кристала?
4. Пояснити принцип роботи призми Воластона.
5. Чому при орієнтації осей призми Воластона під кутом 45° до p - та s - напрямів стопи яскравості обох зображень однакові?

Література

1. William A. Shurcliff. Polarized Light: Production and Use, Harvard University Press, 1962
2. Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics, Cambridge University Press, 2020
3. Шишловский А.А. Прикладная физическая оптика. М., Физматгиз, 1961
4. Борбат А.М. и др. Оптические измерения. К., "Техніка", 1967.
5. Serge Huard. Polarization of Light, Wiley & Sons, 1997

Робота 4.

Дослідження залежності зсуву фаз від кута падіння при повному відбитті за допомогою компенсатора Сенармона.

Прилади: джерело світла, монохроматор, поляризаційний гоніометр з компенсатором Сенармона (пластинка $\lambda/4$), призма повного внутрішнього відбиття.

Теоретичні відомості

Світло, що відбивається від межі поділу двох середовищ з різною оптичною густиною, проходить у середовище з меншої густиною лише при кутах падіння, менших деякого граничного кута, який можна знайти за формулою

$$\varphi_{\text{гр}} = \arcsin n \quad (4.1)$$

де n - показник заломлення другого середовища відносно першого. При куті падіння $\varphi_{\text{гр}}$ кут заломлення у другому середовищі дорівнює 90° . При куті падіння, більшому за $\varphi_{\text{гр}}$, світло не проходить у друге середовище і коефіцієнти відбиття p - та s - компонент дорівнюють одиниці. Це явище називається повним внутрішнім відбиттям.

Як випливає з формули Френеля для амплітудних коефіцієнтів відбиття, при повному внутрішньому відбитті виникає зсув фаз Δ між p - та s - компонентами, який залежить від кута падіння та відносного показника заломлення,

$$\Delta = 2 \arctg \left(\frac{\operatorname{ctg} \varphi}{\sin \varphi} \sqrt{\sin^2 \varphi - n^2} \right) \quad (4.2)$$

де φ - кут падіння; n - відносний показник заломлення.

Оскільки між p - та s - компонентами вноситься зсув фаз, лінійно поляризоване світло після повного внутрішнього відбиття перетвориться на еліптично поляризоване, зсув фаз якого змінюється з кутом падіння, а азимут відновленої поляризації залишається незмінним. Відомо, що до положення повного внутрішнього відбиття азимут відновленої поляризації змінюється із зміною кута падіння, а зсув фаз постійний (0° або 180°), тому лінійно поляризоване світло після відбиття залишається лінійно поляризованим (амплітуда і площина коливань можуть змінюватися).

Експериментальна частина

Установка для вимірювання зсуву фаз та азимута відновленої поляризації наведена на рис. 4. Вихідна щілина монохроматора S_p проектується лінзою L на вхідну щілину коліматора S . З об'єктива коліматора O_1 паралельні пучки променів проходять крізь поляризатор P і потрапляють на призму повного внутрішнього відбиття Π , закріплену на столику гоніометра. Після відбиття світло проходить крізь пластинку $\lambda/4$, аналізатор A і потрапляє в зорову трубу, яка складається з об'єктива O_2 та окуляра O_k . Для визначення різниці фаз Δ та азимута відновленої лінійної поляризації ψ спочатку визначають параметри еліптичного світла після повного внутрішнього відбиття. За допомогою компенсатора (пластинки $\lambda/4$) вимірюють відношення осей еліпса

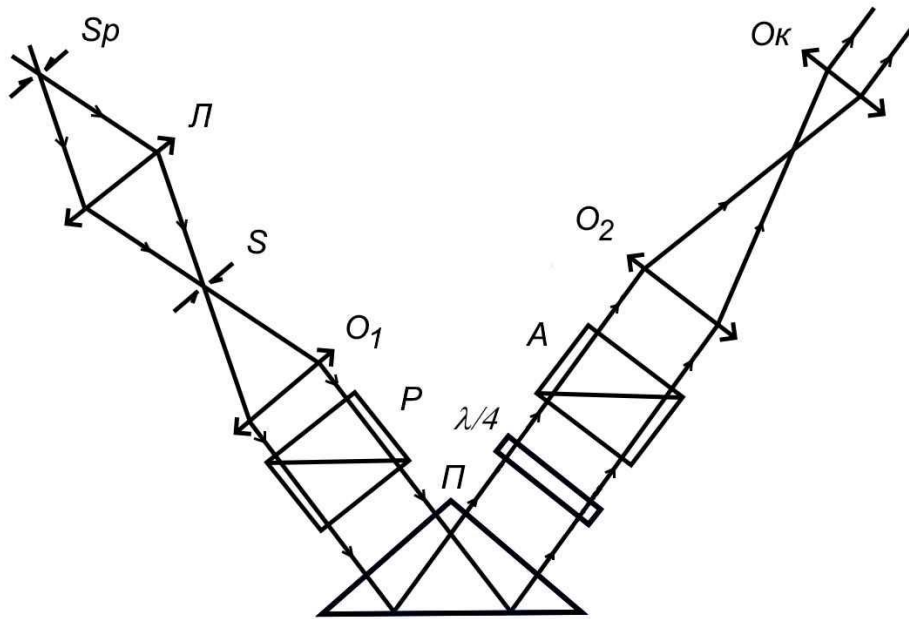


Рис 4.1. Схема експериментальної установки

коливань b/a та кут η між p - напрямом і великою віссю еліпса a (рис.4.2). Зсув фаз Δ та азимут відновленої лінійної поляризації ψ обчислюють із співвідношень:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \Delta &= \pm \frac{\operatorname{tg} 2\gamma}{\sin 2\eta} \\ \cos 2\psi &= \pm \cos 2\eta \cos 2\gamma \end{aligned} \quad (4.3)$$

де $\operatorname{tg} \gamma = b/a$

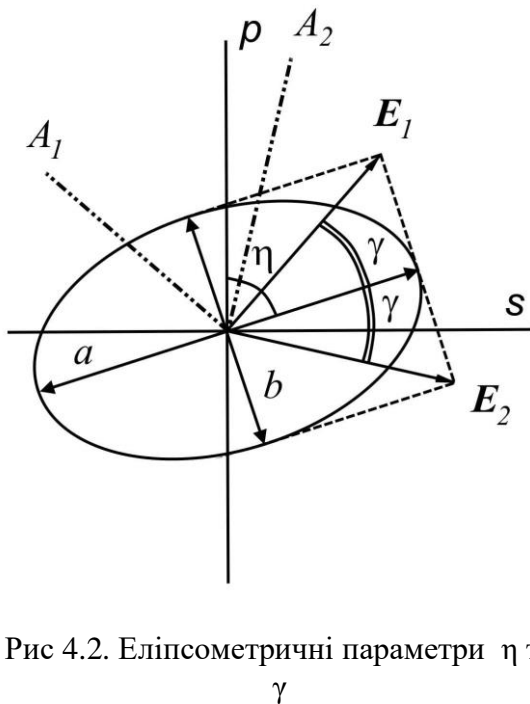


Рис 4.2. Еліпсометричні параметри η та γ

Визначення η та γ за допомогою пластинки $\lambda/4$ засновано на тому, що вона перетворює лінійно поляризоване світло в еліптично поляризоване, причому осі еліпса збігаються з осями пластинки.

Якщо на пластинку $\lambda/4$ падає еліптично поляризоване світло, вона перетворює його в лінійно поляризоване лише тоді, коли осі еліпса збігаються з осями пластинки. Напрямок коливань електричного вектора E_1 або E_2 залежить від знаку параметра Δ . При всіх інших орієнтаціях еліпса коливань відносно пластинки $\lambda/4$ з неї виходитиме еліптично поляризоване світло, яке неможливо повністю погасити аналізатором. Повне гашення світла свідчить про те, що осі пластинки $\lambda/4$ збігаються з осями еліпса коливань.

Виконання роботи

1 Визначення граничного кута повного внутрішнього відбиття. На столику гоніометра встановлюють призму повного внутрішнього відбиття і знаходять кут падіння на неї променів, при якому зникає хвиля, що проходить крізь гіпотенузу призми. Після цього зорову трубу повертають і вимірюють кут між променем, що падає на призму, і відбитим від неї. Кут $2\varphi^*$ визначають на гоніометрі при збігу зображення щілини коліматора з перехрестям ниток окуляра. Слід зазначити, що кут між падаючим та відбитим променями не дорівнює куту падіння на межу поділу скло - повітря (рис.4.3).

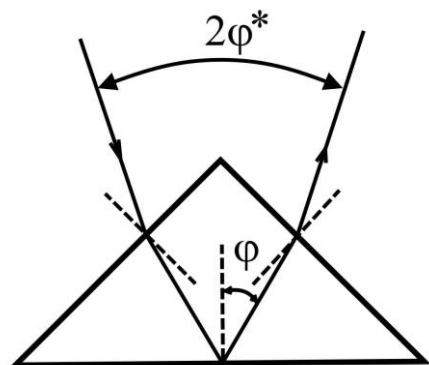


Рис 4.3. Еліпсометричні параметри η та γ

Дійсний кут падіння φ обчислюють за формулою:

$$\varphi = 45^\circ + \arcsin\left(\frac{\sin(45^\circ - \varphi^*)}{n_{СК}}\right) \quad (4.4)$$

де φ - кут падіння світла у склі; φ^* - те ж саме у повітрі; $n_{СК}$ показник заломлення скла відносно повітря.

З формули (4.4) видно, що для визначення дійсного кута падіння необхідно знати показник заломлення $n_{СК}$. Для легкого крону, з якого зроблена призма, $n_{СК}=1,52$.

2. Орієнтація поляризатора, аналізатора і компенсатора Сенармона відносно р- та s- напрямків призми. Для орієнтації поляризатора та аналізатора відносно p - та s - напрямків призми необхідно зняти компенсатор Сенармона і в присутності призми для кута $\varphi > \varphi_{гр}$ добитися повного гашення. У цьому випадку поляризатор і аналізатор орієнтовані так, що їх площини пропускання збігаються з p - та s - площинами. Ці положення позначаються на лімбах поляризатора і аналізатора. Для визначення площини, в якій орієнтовано поляризатор, необхідно повернути призму на столику гоніометра так, щоб промені, падаючи на призму з повітря, відбивалися від її гіпотенузи. Знявши поляризатор чи аналізатор, добиваються повного гашення, змінюючи кут падіння на призму і обертаючи поляризатор. При куті Брюстера у відбитому світлі залишається тільки s - компонента, і світло може бути погашене поляризатором чи аналізатором. Після орієнтації поляризатора і аналізатора в p - та s - площинах їх залишають в положенні повного гашення, ставлять компенсатор Сенармона і обертають його навколо променя до повного гашення. Останнє можливо тоді, коли осі компенсатора x та y збігаються з p - та s - напрямками призми і з площинами коливань електричного вектора в поляризаторі й аналізаторі. Це положення компенсатора K_{ps} відмічають по його лімбу.

3. Вимірювання відношення осей еліпса b/a та кута повороту η еліпса відносно р- напрямку. Поляризатор повертають на кут 45° по лімбу відносно p - або s - площини. Аналізатор і компенсатор повертають до повного гашення. Це означає, що осі компенсатора x та y збігаються в осями еліпса, після компенсатора світло лінійно поляризоване в напрямі E_1 (рис.4.2) і може бути повністю погашене, якщо площина коливань електричного вектора в аналізаторі A_1 перпендикулярна до вектора E_1 . Кут повороту компенсатора K_1 і аналізатора A_1 зазначають по їх лімбах. Після цього компенсатор повертають на 90° так, щоб осі x та y компенсатора знову збігалися з осями еліпса. Світло, яке проходить крізь компенсатор, знову-таки лінійно поляризоване з вектором E_2 , але E_2 повернуто відносно E_1 на кут 2γ . Щоб досягти повного гашення, необхідно аналізатор повернути в положення A_2 . Кут повороту еліпса $\eta = K_1 - K_{ps}$ визначають по повороту компенсатора, а кут $2\gamma = A_2 - A_1$ - по повороту аналізатора від положення гашення в першому випадку до положення гашення в другому випадку. Результати вимірювань занести до таблиці:

| Кут падіння φ , град | Положення поляризатора K_1 , град | Положення аналізатора A_1 , град | Положення поляризатора $K_1 \pm 90^\circ$, град | Положення аналізатора A_2 , град |
|------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--|------------------------------------|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

4. Обробка результатів і побудова залежностей $\Delta(\varphi)$, $\psi(\varphi)$. Кути η та γ вимірюють при значеннях кута φ^* від 0 до 135° через $3-5^\circ$. Знаючи η та γ , за формулами (4.3) визначають Δ та ψ , а за формулою (4.4) - відповідні кути падіння φ у склі. Слід зазначити, що знайдені таким чином значення Δ відповідають дійсному зсуву фаз при відбитті, а значення ψ відрізняються від дійсних значень ψ_g тому, що відношення R_p/R_s змінюється при заломленні на гранях призми. Для визначення ψ_g застосовують формулу

$$\psi_g = \arctg \left[\operatorname{tg} \psi \cos^2 (\varphi^* - \varphi) \right] \quad (4.5)$$

де ψ_g дійсне значення азимута відновленої лінійної поляризації; ψ - значення азимута відновленої поляризації, здобуте за формулами (4.3); φ^* - кут падіння світла у повітрі; φ - те ж саме у склі.

За одержаними даними будують графіки залежностей $\Delta(\varphi)$ та $\psi(\varphi)$. Результати порівнюють з теоретичними кривими, здобутими з формули (4.2).

Контрольні питання

1. Вивести формулу для зсуву фаз Δ між p - та s - компонентами при повному внутрішньому відбитті.
2. Які зміни вносить в поляризацію світла компенсатор Сенармона?
3. Які матеріали використовуються для виготовлення пластинок $\lambda/4$?
4. Вивести формули, які пов'язують еліпсометричні параметри η та γ з Δ та ψ .
5. Чому повне гашення світла аналізатором можливе лише при співпадінні осей компенсатора Сенармона з осями еліпса поляризації?

Література

1. Ashim Kumar Bain. Crystal Optics: Properties and Applications, Wiley-VCH Verlag, 2019
2. Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics, Cambridge University Press, 2020
3. Л.В. Поперенко та ін., Діагностика поверхні поляризованим світлом; Київський національний ун-т ім. Тараса Шевченка. - К. : ВПЦ "Київський ун-т", 2007
4. Борбат А.М. и др. Оптические измерения. К., "Техніка", 1967.
5. Serge Huard. Polarization of Light, Wiley & Sons, 1997

Робота 5.

Вимірювання напруг при механічних деформаціях поляризаційним методом

Прилади: джерело світла, набір світлофільтрів, поляризатор, аналізатор, досліджувані зразки, пристрій для механічної деформації зразків.

Теоретичні відомості

Крім природної оптичної анізотропії, в багатьох речовинах спостерігається штучна анізотропія, викликана дією електричного, магнітного полів або механічними деформаціями. Механічні деформації анізотропної речовини викликають додаткову анізотропію, а деформації ізотропних речовин - оптичну анізотропію. Останнє явище використовують при вивченні розподілу напруг у різних деталях. При плоскому напруженому стані всередині зразка можна обрати площадку, де дотичні напруги дорівнюють нулю, а нормальні досягають найбільшого значення. Такі напруги називають головними нормальними напругами. Під дією головних нормальних напруг у матеріалі зразка виникають деформації, що викликають оптичну анізотропію. Внаслідок різниці деформації в обох головних напрямках промені, поляризовані в різних напрямках, поширюються з різною швидкістю. Кожний елемент поводить себе подібно до кристала з подвійним променезаломленням, в якого осі найбільшої і найменшої швидкості збігаються з осями головних нормальних напруг σ_1 та σ_2 . Різницю фаз Δ , що виникає між двома взаємно перпендикулярними лінійно поляризованими хвилями, визначають за формулою

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} cd (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (5.1)$$

де λ - довжина хвилі; σ_1, σ_2 - головні нормальні напруги; d - товщина деталі; c - стала фотопружності, яка залежить від матеріалу деталі.

Таким чином, при постійній товщині зразка лінії однакового зсуву фаз відповідають лініям однакових різниць нормальних напруг або лініям рівних максимальних дотичних напруг, оскільки максимальна дотична напруга τ_{\max} пов'язана з головними нормальними напругами співвідношенням

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (5.2)$$

Звичайно досліджувані деталі виготовляють з прозорих матеріалів, наприклад целулоїду, бакеліту, епоксидної смоли та ін., які мають значну константу фотопружності. Якщо деталь з такого матеріалу в напруженому стані помістити між схрещеними поляризатором та аналізатором, в полі зору буде видно інтерференційну картину, причому інтенсивність I світла в кожній точці визначається за формулою

$$I = I_0 \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\Delta}{2} \quad (5.3)$$

де I_0 - інтенсивність світла, що проходить через паралельні поляризатор та аналізатор при нульовій нарузі; α - кут між напрямом однієї з головних нормальних напруг у цій точці та площиною пропускання поляризатора або аналізатора; Δ - зсув фаз у цій точці.

При спостереженні в монохроматичному світлі темні смуги будуть в тих точках, де $\Delta=2\pi k$, а також там, де $\alpha=0^\circ$. Смуги, для яких Δ є сталою величиною, називаються ізохроматами; смуги, у яких напрями головних напруг та площини пропускання поляризатора та аналізатора збігаються, називається ізоклінами.

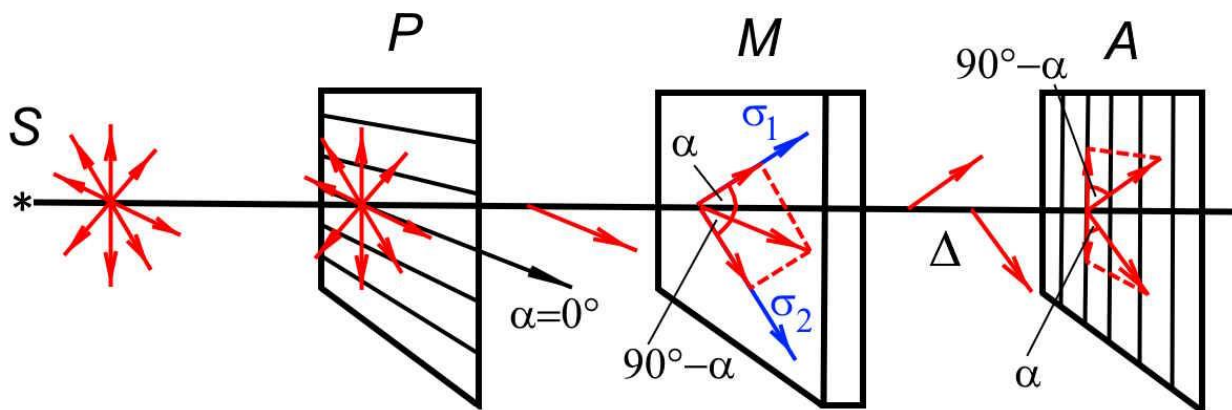


Рис 5.1. Утворення ізохромат

S – джерело світла (випромінює монохроматичне природньо поляризоване випромінювання);
 P – поляризатор (пропускає плоску хвилю в горизонтальній площині $\alpha=0^\circ$); M – деталь (відбувається розклад на дві хвилі паралельно напрямкам головних напруг σ_1 та σ_2 , які розповсюджуються в деталі з різними швидкостями пропорційними σ_1 та σ_2 ; позаду деталі розповсюджуються дві ортогональні плоскі хвилі, які зсунуті по фазі Δ пропорційній різниці $\sigma_1 - \sigma_2$); A – аналізатор (пропускає від двох ортогональних хвиль лише вертикальні компоненти; після аналізатора ці дві когерентні компоненти з однаковими амплітудами та зсувом фаз Δ інтерферують)

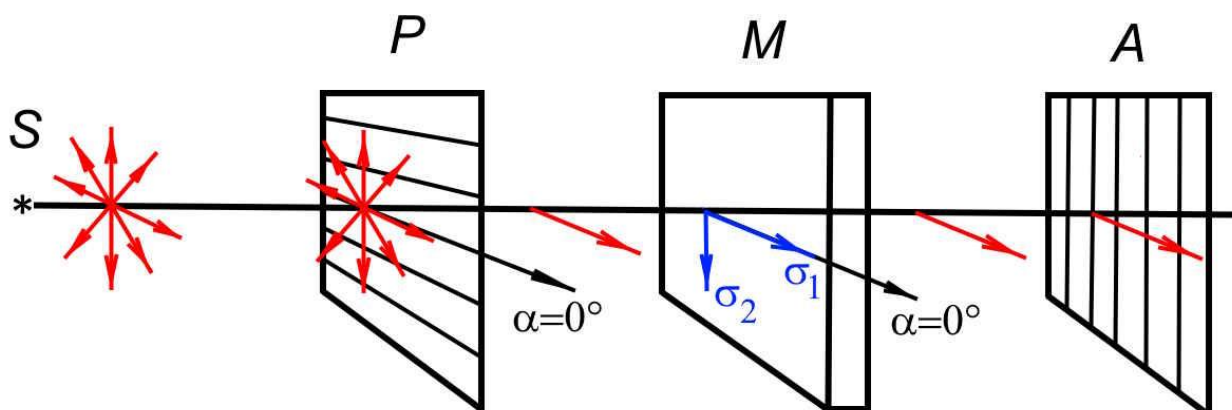


Рис 5.2. Утворення ізоклін

S – джерело світла (випромінює монохроматичне природньо поляризоване випромінювання);
 P – поляризатор (пропускає плоску хвилю в горизонтальній площині $\alpha=0^\circ$); M – деталь (розклад хвилі не відбувається, оскільки немає компоненти в напрямку σ_2 ; після проходження деталі хвиля не змінюється); A – аналізатор (компоненти в напрямку пропускання аналізатора відсутні; повне поглинання; темна лінія незалежно від величини напруг)

На інтерференційній картині видно ізохромати, що відрізняються значеннями k , та ізокліну одного параметра, яка відповідає одній орієнтації поляризатора та аналізатора відносно деталі. Щоб дістати ізокліну другого параметра, необхідно повернути поляризатор та аналізатор відносно зразка, картина ізохромат при цьому не змінюється. В білому світлі ізохромати забарвлені, окрім ізохромати, для якої $\Delta=0$, а ізокліни завжди тільки темні. Для визначення напруг поляризаційним методом з фотопружного матеріалу виготовляють модель

необхідної деталі. Вимірюють зсув фаз в різних точках деталі в напруженому стані. Зсув фаз оцінюють по порядку k ізохромати, що проходить в цій точці, точніше – за допомогою компенсаторів Бабіне та Солейля. Повертаючи деталь відносно поляризатора і аналізатора визначають напрям головних нормальних напруг у різних точках деталі, тобто визначають ізокліни різних параметрів, і будують картину ізоостат. Ізоостата – це крива, дотична до якої збігається з напрямком головної нормальної напруги.

Експериментальна частина

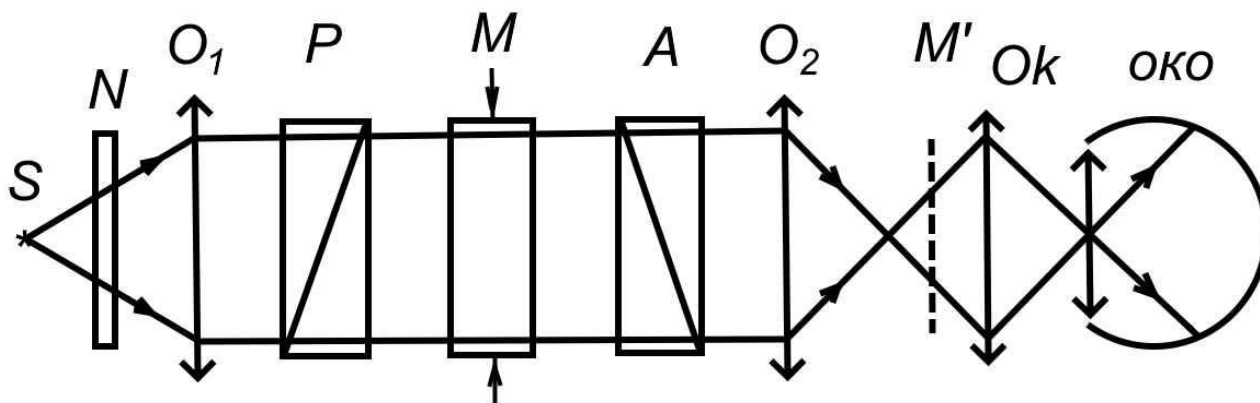


Рис 5.3. Схема експериментальної установки

Схема установки наведена на рис.5.3. Джерело світла S розміщене у фокальній площині лінзи O_1 . Світло від джерела проходить крізь світлофільтр N , лінзу O_1 , поляризатор P і потрапляє на досліджувану деталь M . Далі світло проходить крізь аналізатор A , і інтерференційну картину на поверхні зразка спостерігають за допомогою зорової труби або фотографують фотоапаратом. Можна розглядати деталь через аналізатор без зорової труби, тоді перед поляризатором необхідно поставити матове скло. Поляризатор і аналізатор закріплюють в оправах з лімбами.

Виконання роботи

Схрестити аналізатор і поляризатор.

Побудувати картину ізохромат для даного навантаження. Для цього закріплюють досліджувану деталь і, поступово збільшуючи деформуючу силу, спостерігають зміну інтерференційної картини.

Визначити порядок кожної ізохромати. Підрахувати кількість темних смуг, що пройдуть крізь задане місце деталі при збільшенні навантаження від нуля до заданої величини. Порядок ізохромати k можна також визначити, якщо на картині є нульова темна смуга, яка залишається темною в білому світлі. Тоді порядок k є номером смуги, відрахованим від нульової. В місцях, де є замкнуті ізохромати, тобто там, де є стоки та джерела смуг, останній метод може привести до помилки.

Побудувати картину розподілу максимальних дотичних напруг у деякому перерізі деталі. Для цього позначити прямолінійний або круговий переріз деталі і, знаючи порядок смуги у кожній точці перерізу, визначити τ_{\max} в точках перерізу за формулами (5.1) та (5.2). Сталу c взяти з таблиць. Побудувати картину розподілу τ_{\max} по осі y або r , а координати точок перерізу – по осі x або φ .

Побудувати картину ізоклін для даної форми деталі і для даних точок прикладення навантаження. Для цього при схрещених поляризаторі та аналізаторі і довільному навантаженні креслять ізокліну і позначають проекції площин пропускання поляризатора і аналізатора. Потім деталь повертають відносно поляризатора та аналізатора на $3 - 5^\circ$ і знову

креслять ізокліну. Таким чином дістають картину ізоклін різних параметрів від 0 до 90° на одному кресленні.

Побудувати картину ізостат для даної деталі. Для цього використовують картину ізоклін та відому орієнтацію поляризатора та аналізатора відносно зразка при одержанні першої ізокліни.

Контрольні питання

1. Які напруги називають головними нормальними, а які дотичними?
2. Яке практичне використання явища фотопружності?
3. Чому виникають ізохромати? Яка причина зумовлює їхнє забарвлення?
4. Чим вирізняються точки ізокліни?
5. Як побудувати ізостати?

Література

1. Max M. Frocht, M. M. Leven. Photoelasticity: The Selected Scientific Papers of M.M. Frocht, Pergamon, 2013
2. Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics, Cambridge University Press, 2020
3. Борбат А.М. и др. Оптические измерения. К., "Техніка", 1967.
4. Serge Huard. Polarization of Light, Wiley & Sons, 1997

Робота 6. **Визначення концентрації цукру за допомогою цукрометра**

Прилади: цукрометр, набір розчинів цукру відомої концентрації, розчин невідомої концентрації.

Теоретичні відомості

Існують речовини, при проходженні крізь які пучок лінійно поляризованого світла залишається лінійно поляризованим але його площина коливань обертається на деякий кут, величина якого пропорційна пройденому в речовині шляху. Таку властивість мають деякі кристали, наприклад кварц, а також рідини та пари, наприклад масла, скипидар, розчин цукрів. Такі речовини називають оптично активними.

Явище оптичної активності можна пояснити, якщо припустити, що в оптично активних речовинах лінійно поляризоване світло поділяється на дві циркулярні хвилі, які поширюються в речовині без зміни поляризації, але з різною швидкістю. Якщо зсув фаз між право- і лівоциркулярними хвилями дорівнює Δ , то з речовини вийде лінійно поляризоване світло, повернуте на кут φ , що дорівнює $\Delta/2$. Кут повороту φ пропорційний відстані, пройденій світлом в речовині, і різниці показників заломлення для двох циркулярних компонент. Для розчинів кут повороту φ пропорційний концентрації і товщині шару

$$\varphi = [\varphi]cd \quad (6.1)$$

де $[\varphi]$ - стала оптичної активності, різна для різних речовин, яка залежить від довжини хвилі і температури; c , - концентрація речовини; d - довжина кювети з розчином.

Прилад для вимірювання концентрації цукру по куту повороту лінійно поляризованого світла називається цукрометром.

Експериментальна частина

Найчастіше у візуальних методах використовуються півтіньові цукрометри. Схема цукрометра з півтіньовим пристроєм у вигляді пластинки Лорана наведена на рис.6.1. Світло від джерела крізь світлофільтр N падає на лінзу O_1 , паралельним пучком проходить крізь поляризатор P , пластинку Лорана L , кювету з розчином K , аналізатор A і потрапляє в зорову трубу, настроєну на чітке зображення пластинки Лорана.

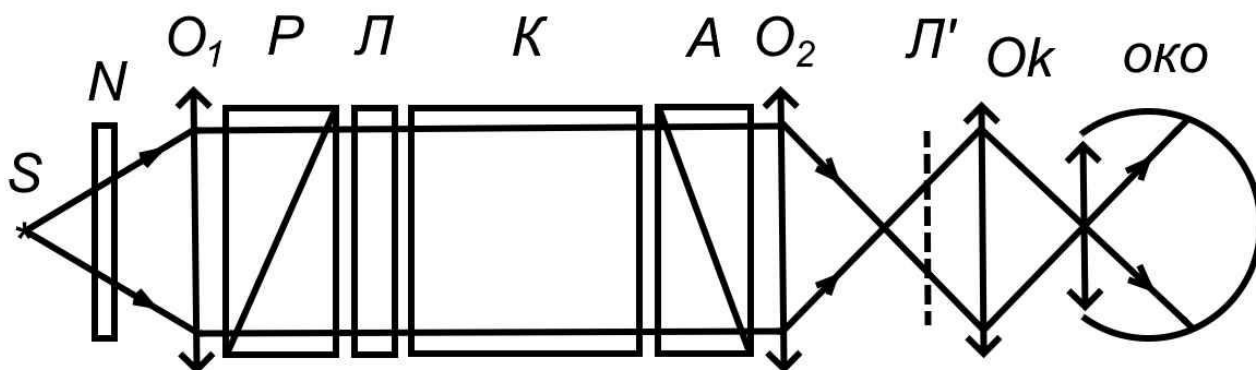


Рис. 6.1. Схема експериментальної установки

Півтіньовий метод полягає в тому, що пристрій поділяє поле зору цукрометра на дві частини. Інтенсивності світла в них однакові, а площини коливань не паралельні і

утворюють малий кут 2α , який називається півтіньовим кутом. Якщо площина пропускання аналізатора перпендикулярна до бісектриси кута 2α , то яскравість полів однакова, а поворот аналізатора на кут α приводить до того, що одна половина поля зору став зовсім темною. Таким чином, поворот аналізатора на малий кут викликає великі зміни у відносній яскравості полів зору, тому при вимірюванні можна досягти великої точності. При використанні півтіньового методу існує деяке оптимальне значення кута 2α , яке залежить від інтенсивності джерела світла, прозорості розчину і довжини хвилі.

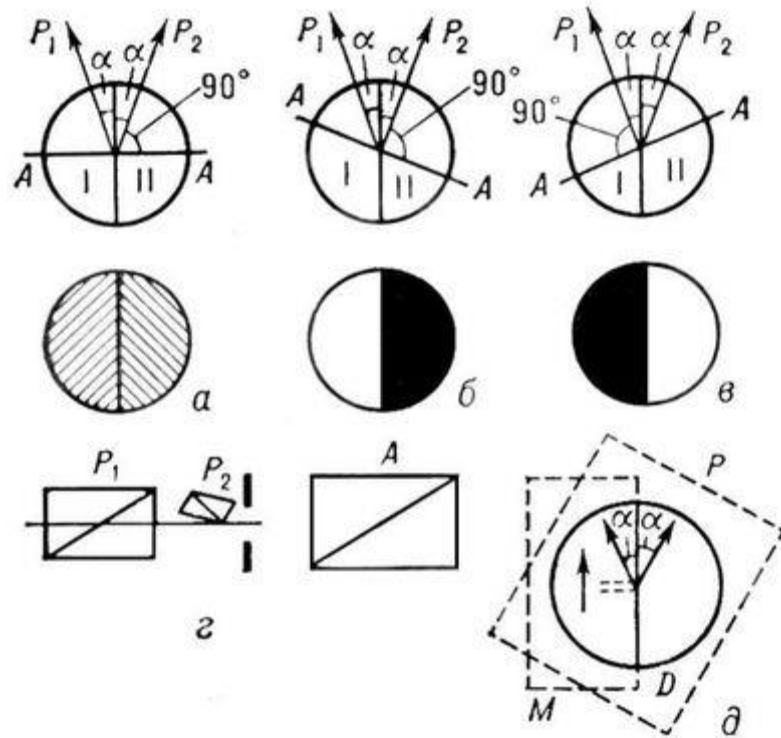


Рис. 6.2. Пояснення принципу дії півтіньових пристроїв

Площини поляризації двох половин P_1 і P_2 становлять між собою малий кут 2α . Тому, якщо площина поляризації аналізатора AA перпендикулярна до бісектриси 2α (а), обидві половини I і II поля зору мають однакову освітленість, тобто будуть погашені не повністю (півтінь, звідки назва). За найменшого повороту аналізатора відносна освітленість I і II різко змінюється (б і в). Приклади конструкцій напівтіньових поляризаторів: г - схема Ліппіха; P_1 і P_2 - дві поляризаційні призми, одна з яких закриває половину поля зору, А - аналізатор; д - схема Лорана; за поляризаційною призмою Р встановлюють фазову пластинку М на $1/2$ довжини хвилі, головна площина якої складає кут α з площиною поляризації Р; D - діафрагма, що обмежує поле зору.

Якщо за півтіньовим пристроєм стоїть кювета з оптично активною речовиною, то площини коливань в обох полях зору повернуться і рівність яскравостей полів порушиться. Для відновлення її необхідно знов повернути аналізатор. Кут повороту площини коливань електричного вектора в оптично активній речовині дорівнює куту повороту аналізатора.

Пластинка Лорана являє собою кварцову пластинку, вирізану паралельно оптичній осі. Вона повинна мати таку товщину, щоб різниця ходу, яка вноситься нею, дорівнювала $(2k+1)\lambda/2$. Якщо електричний вектор світла, яке виходить з поляризатора, утворює з віссю пластинки кут α , то після пластинки поширюватиметься лінійно поляризоване світло, а електричний вектор утворюватиме з цією віссю кут $180 - \alpha$. Таким чином, якщо одну половину поля зору закрити пластинкою із скла, а другу - пластинкою Лорана, то в обох половинах світло буде лінійно поляризоване і кут між площинами коливань дорівнюватиме 2α .

Виконання роботи

Встановити аналізатор в нульове положення. Для цього налити в кювету дистильованої води і досягти рівності полів за яскравістю. Слід зазначити, що ця рівність може бути одержана не лише тоді, коли площина коливань аналізатора перпендикулярна до бісектриси півтіньового кута, а й тоді, коли площина коливань паралельна бісектрисі, в цьому випадку спостерігатимемо рівність полів значної яскравості. При цьому точність вимірювань буде мала, оскільки зміна відносної яскравості полів зі зміною кута повороту аналізатора дуже незначна. Отже, вимірювання слід виконувати при рівній і малій яскравості полів.

Побудувати графік залежності кута повороту від концентрації. В кювету наливають по черзі розчини відомої концентрації і вимірюють кут повороту аналізатора від нульового положення.

Виміряти невідому концентрацію, для цього в кювету наливають розчин невідомої концентрації, вимірюють кут повороту аналізатора і за графіком визначають концентрацію цукру.

Визначити сталу оптичної активності $[\varphi]$ за формулою (6.1) за відомими концентраціями цукру.

Визначати похибку вимірювань невідомої концентрації і сталої оптичної активності.

Контрольні питання

1. Який вигляд має тензор діелектричної проникності для прозорої оптично активної речовини?
2. Експериментальне підтвердження теорії Френеля щодо подвійного циркулярного променезаломлення.
3. Який принцип роботи пластинки $\lambda/2$?
4. Які оптично активні речовини Ви знаєте?
5. Чому півтіньовий кут обирають малим?

Література

1. William A. Shurcliff. Polarized Light: Production and Use, Harvard University Press, 1962
2. Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics, Cambridge University Press, 2020
3. Шишловский А. А. Прикладная физическая оптика. М., Физматгиз, 1961.
4. Борбат А.М. и др. Оптические измерения. К., "Техніка", 1967.
5. R.M.A. Azzam, N.M. Bashara. Ellipsometry and Polarized Light, North Holland; 1988

Робота 7.

Дослідження анізотропних кристалів під поляризаційним мікроскопом.

Прилади: поляризаційний мікроскоп, клин або компенсатор Берека, набір шліфів і пластинок з одновісних та двовісних кристалів, вирізаних під різними кутами до оптичної осі.

Теоретичні відомості

Пластинки, вирізані з анізотропних кристалів, можна досліджувати в паралельних променях і в променях, що сходяться. При цьому поляризаційно-інтерференційні картини, які спостерігаються, поділяються на ортоскопічні та коноскопичні.

При ортоскопічному спостереженні, тобто в паралельних променях, досліджувана анізотропна плоско-паралельна пластинка вносить однаковий зсув фаз Δ по всьому полю. Якщо пластинку розмістити між схрещеними поляризатором та аналізатором, то в усьому полі зору освітленість буде рівномірною, інтенсивність світла I , яке проходить через таку систему, залежить від зсуву фаз у пластинці і орієнтації її відносно поляризатора або аналізатора

$$I = I_0 \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta}{2}$$
$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_1 - n_2) d$$
(7.1)

де θ – кут між віссю пластинки та поляризатором чи аналізатором; Δ - зсув фаз у пластинці; λ - довжина хвилі; n_1, n_2 - показники заломлення двох перпендикулярно поляризованих променів, що проходять крізь пластинку; d - товщина пластинки.

Із формули (7.1) випливає, що інтенсивність світла, яке проходить крізь таку систему, дорівнює нулю тоді, коли осі пластинки збігаються з площинами пропускання аналізатора і поляризатора (θ дорівнює 0 або 90°), а також у випадку, коли зсув фаз Δ дорівнює 2π . Зсув фаз Δ залежить від довжини хвилі, тому пластинка зазвичай буде забарвлена. Незабарвлена вона тоді, коли різниця ходу в пластинці дорівнює нулю, зсув фаз для всіх довжин хвиль також дорівнює нулю, і пластинка буде темною. Якщо різниця ходу надто велика, зсув фаз дуже швидко змінюється для різних довжин хвиль, і світло, яке проходить, справляє враження білого. Різниця, яку вносить пластинка, залежить від її товщини, матеріалу зразка та орієнтації оптичної осі відносно зрізу.

При коноскопичному спостереженні картини складніші і також залежать від матеріалу, товщини зразка і орієнтації оптичних осей відносно зрізу. Промені світла падають на зразок під різними кутами, і кожний вносить певний зсув фаз. Інтерференційна картина локалізована на нескінченності і може спостерігатися у фокальній площині лінзи. Зсув фаз, який відбувається при проходженні через пластинку, визначається формулами

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2) d$$
$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{n_1 - n_2}{\cos \theta_{12}} \right) d$$
(7.2)

де θ_1 та θ_2 - кути заломлення променів; n_1 та n_2 - показники заломлення променів; $\cos \theta_{12}$ - середнє між $\cos \theta_1$ та $\cos \theta_2$.

Співвідношення (7.2) показують, що зсув фаз відбувається внаслідок різниці показників заломлення і довжини шляху, який світло різної поляризації проходить у пластинці. Друга формула співвідношень (7.2) більш зручна, але нею можна користуватися лише тоді, коли подвійне променезаломлення, тобто різниця n_1 та n_2 невелике.

А. Коноскопичні фігури для одновісних кристалів На інтерференційній картині спостерігаються два типи ліній: ізохромати та ізогіри. Форма і розміщення ізохромат залежать від напрямку оптичної осі відносно зрізу, товщини зразка і довжини хвилі. Форма і розміщення ізогір залежать від орієнтації осі відносно зрізу і взаємного положення поляризатора та аналізатора. Для пластинки, вирізаної перпендикулярно до оптичної осі, ізохромати матимуть вигляд кілець, а ізогіри - вигляд хреста (світлого при паралельних поляризаторі і аналізаторі, темного - при схрещених). При зміні нахилу оптичної осі центр кілець виходить з поля зору і при куті оптичної осі до площини зрізу 45° у полі зору спостерігаються майже прямі лінії. Якщо оптична вісь паралельна площині зрізу, ізохромати мають вигляд гіпербол. У цьому випадку інтерференційну картину можна спостерігати лише в монохроматичному світлі.

Б. Коноскопичні фігури для двовісних кристалів Вигляд інтерференційної картини залежить від орієнтації зрізу відносно оптичних осей кристалу, матеріалу і товщини пластинки, довжини хвилі. Залежність від довжини хвилі ускладнюється тим, що в кристалах триклинної, моноклінної та ромбічної систем спостерігається дисперсія оптичних осей, тобто залежність напрямку оптичних осей від довжини хвилі.

Експериментальна частина

Оптична схема поляризаційного мікроскопа наведена на рис.7.1.

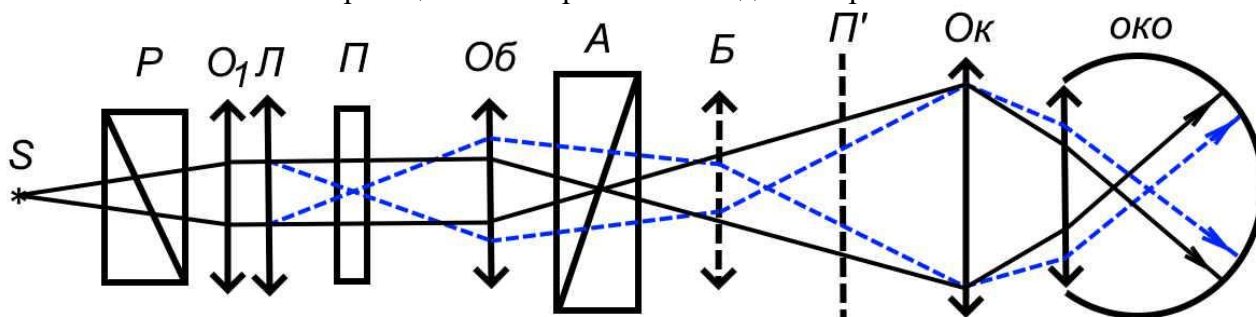


Рис. 7.1 Схема поляризаційного мікроскопа

Вона складається з звичайного мікроскопа, до якого входять конденсор O_1 , об'єктив Об, окуляр Ок, і додаткових деталей: поляризатора Р, аналізатора А, лінзи Лазо Л та лінзи Бертрана Б (дві останні можуть виводитись з оптичної схеми). В тубусі за об'єктивом є виріз, в який можна вставляти компенсаційні пристрої: кварцовий клин, компенсатор Берека, гіпсову пластинку та ін.

При ортоскопічному спостереженні лінза Лазо і лінза Бертрана виводяться з оптичної схеми і мікроскоп працює як звичайний, з тією лише різницею, що в схемі є поляризатор і аналізатор, Об'єкт у вигляді плоско-паралельної пластинки П (шліфа) розміщують на столику, який може обертатися навколо оптичної осі мікроскопа.

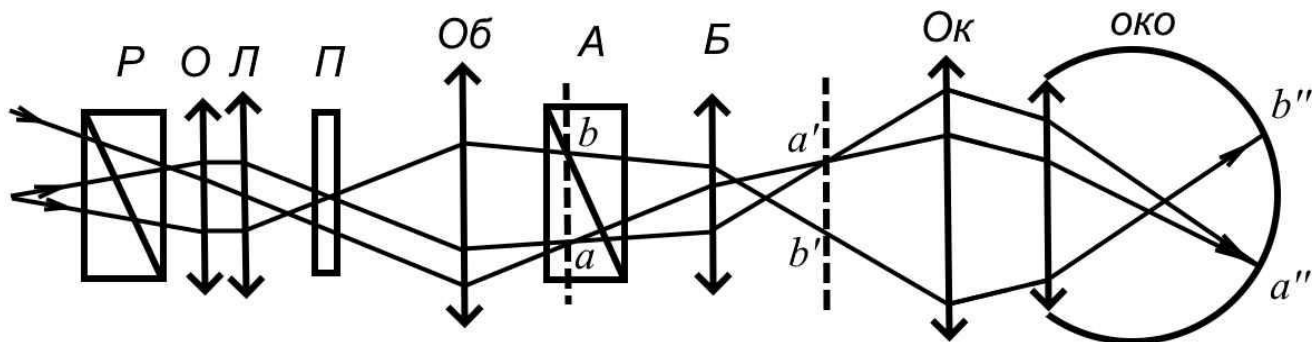


Рис. 7.2 Схема поляризаційного мікроскопа при коноскопічному спостереженні

При коноскопічному спостереженні в оптичну схему вводять лінзу Лазо і лінзу Бертрана (рис.7.2). Лінза Лазо Л збирає промені від джерела на об'єкті. Інтерференційна картина у фокальній площині об'єктива (ab) зображується лінзою Бертрана Б в площині ($a'b'$) і розглядається через окуляр Ок. Якщо при коноскопічному спостереженні використовується об'єктив невеликого збільшення, лінзу Лазо слід вивести.

Виконання роботи

1. Ортоскопічні спостереження. З оптичної схеми виводять лінзи Лазо і Бертрана, схрещують поляризатор і аналізатор, встановлюють на столик мікроскопа досліджуваний зразок і обертаючи столик навколо осі, спостерігають зміну інтенсивності. Якщо об'єкт ізотропний, поле заливається темним У випадку оптично активного об'єкта поле просвітлюється але при обертанні столика не змінюється. При анізотропному об'єкті спостерігається чотири повних гашення за один оберт столика на 360° . Повне гашення відповідає такому положення об'єкта, коли головні напрями пластинки збігаються з напрямками коливань електричного вектора в поляризаторі і аналізаторі. В інших положеннях забарвлення рівномірне. Якщо анізотропна пластинка вирізана перпендикулярно до оптичної осі, при ортоскопічному спостереженні буде повне гашення, але цей випадок легко відрізнити від випадку ізотропної пластинки. Необхідно нахилити пластинку на столику, промені проходять під кутом до оптичної осі, і виникне забарвлення.

Для анізотропного об'єкта, знаючи його товщину, можна знайти величину подвійного променезаломлення ($n_1 - n_2$). Це можна зробити напівкількісно, скориставшись таблицями інтерференційного забарвлення або використовуючи компенсатор. Для цього в проріз тубуса мікроскопа вводять компенсатор (наприклад, клин) і орієнтують головні напрями об'єкта паралельно головним напрямкам компенсатора. Це легко зробити, повернувши столик з об'єктом від положення повного гашення без компенсатора на 45° . Далі вводять компенсатор до повного гашення. Якщо цього не буде, треба повернути столик на 90° і знову вводити клин. За величиною введення клину визначають зсув фаз Δ , а за формулою (20) обчислюють ($n_1 - n_2$).

2. Коноскопічні спостереження. Вводять лінзи Лазо і Бертрана і дістають чітке зображення коноскопічної картини, з її вигляду визначають кількість оптичних осей і орієнтацію їх відносно зрізу,

3 Дослідження на столику Федорова. Орієнтацію оптичних осей можна визначити точніше за допомогою столика Федорова, який кріпиться на столику мікроскопа і має кілька осей обертання. При ортоскопічному спостереженні і схрещених поляризаторі і аналізаторі зразок орієнтують таким чином, щоб світло йшло вздовж оптичної осі (подвійне променезаломлення відсутнє). По лімбах столика Федорова визначають орієнтацію осей.

Контрольні питання

1. Пояснити утворення та форму ізохромат.

2. Пояснити утворення та колір ізогір.
3. Яка роль лінз Лазо і Бертрана в оптичній схемі поляризаційного мікроскопа?
4. Які анізотропні кристали Ви знаєте?
5. Для вирішення яких практичних задач використовується поляризаційна мікроскопія?

Література

1. Lucy B. Mccrone, John G. Delly, Walter C. Mccrone. Polarized Light Microscopy, Butterworth-Heinemann, 1979
2. Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics, Cambridge University Press, 2020
3. Rinne-Berek. Anleitung zur allgemeinen und Polarisations-Mikroskopie der Festkörper im Durchlicht, Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung Stuttgart, 1973.
4. Борбат А.М. и др. Оптические измерения. К., "Техніка", 1967.
5. R.M.A. Azzam, N.M. Bashara. Ellipsometry and Polarized Light, North Holland; 1988

Зміст

| | |
|---|----|
| Вступ | 3 |
| Робота 1. Вимірювання оптичних сталих металів та напівпровідників за допомогою компенсатора Бабіне | 4 |
| Робота 2. Вимірювання оптичних сталих металів та напівпровідників фотоелектричним методом Бітті | 9 |
| Робота 3. Визначення залежності ступеня поляризації стопи від кута падіння та числа пластин за допомогою поляриметра Корню | 13 |
| Робота 4. Дослідження залежності зсуву фаз від кута падіння при повному відбитті за допомогою компенсатора Сенармона | 16 |
| Робота 5. Вимірювання напруг при механічних деформаціях поляризаційним методом | 20 |
| Робота 6. Визначення концентрації цукру за допомогою цукрометра | 24 |
| Робота 7. Дослідження анізотропних кристалів під поляризаційним мікроскопом | 27 |