

Лабораторна робота № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЇ СВІТЛА

Мета роботи:

- 1) вивчити явище поляризації світла;
- 2) експериментально перевірити закон Малюса;
- 3) дослідити двопроменезаломлення;
- 4) провести спостереження інтерференції поляризованих променів (хроматичної поляризації);
- 5) одержати навики складання поляризаційних систем.

Завдання

1. Ознайомитись з теорією поляризації світла, законом Малюса, явищем двопроменезаломлення, інтерференцією поляризованих променів.
2. Ознайомитись з комплектом і призначенням вузлів та деталей лабораторної установки.
3. Експериментально дослідити залежність коефіцієнта пропускання T аналізатора (закон Малюса) від кута α між площинами поляризатора та аналізатора.
4. Побудувати графік залежності $T(\alpha)$.
5. Дослідити двопроменезаломлення в кристалі ісландського шпату, визначити напрям його головної осі.
6. Провести спостереження і аналіз інтерференції поляризованих променів.

Загальні положення

В світловій (електромагнітній) хвилі в кожний момент часу електричний вектор \vec{E} та магнітний вектор \vec{H} перпендикулярні вектору швидкості поширення хвилі \vec{V} і складають з ним праву тройку взаємно-перпендикулярних векторів (рис.6.1). Обидва вектори синфазно коливаються в поперечному по відношенню до вектора \vec{V} напрямку у взаємно-перпендикулярних площин (рис. 6.2).

Основним носієм світлових властивостей в електромагнітній хвилі є електричний вектор \vec{E} , який називають світловим вектором і з ним пов'язують всі характеристики поляризації. Скалярне рівняння світлої монохроматичної плоскої хвилі, яка поширюється вздовж осі ox , можна представити у вигляді

$$E = E_0 \sin(\omega t - kx + \phi_0), \quad (6.1)$$

де: E_0 - амплітуда світлового вектора,

$\omega = 2\pi\nu$ - кругова частота коливань світлового вектора,

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - хвильове число,

λ - довжина світлої хвилі,

$v = \frac{c}{n}$ - фазова швидкість поширення світлої хвилі в середовищі з показником заломлення n ,

$T = 1/v$ - період світлої хвилі,

ν - частота коливань світлої хвилі,

$c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с - швидкість світла у вакуумі.

Вираз (6.1) являється ідеальною математичною моделлю світлої хвилі. В реальності таких ідеальних монохроматичних хвиль не існує. Природні джерела світла складаються з великої сукупності елементарних випромінювачів (атомів, електронів), кожний з яких випромінює незалежно від інших на протязі короткого часу уривки монохроматичних хвиль, які називаються цугами. Кожний цуг, який випромінюється атомом за один акт, зберігає площину коливань вектора в просторі незмінною ($\phi = \text{const}$, рис.6.3). Послідовні цуги мають випадкові, не зв'язані з попередніми цугами, початкові фази і орієнтацію площини коливань вектора \vec{E} .

Через це природне або неполяризоване світло можна уявити сукупністю випромінювання великої кількості атомів, тобто у вигляді потоку великої кількості цугів світлових хвиль з випадковим розподілом орієнтації площин коливань вектора \vec{E} в

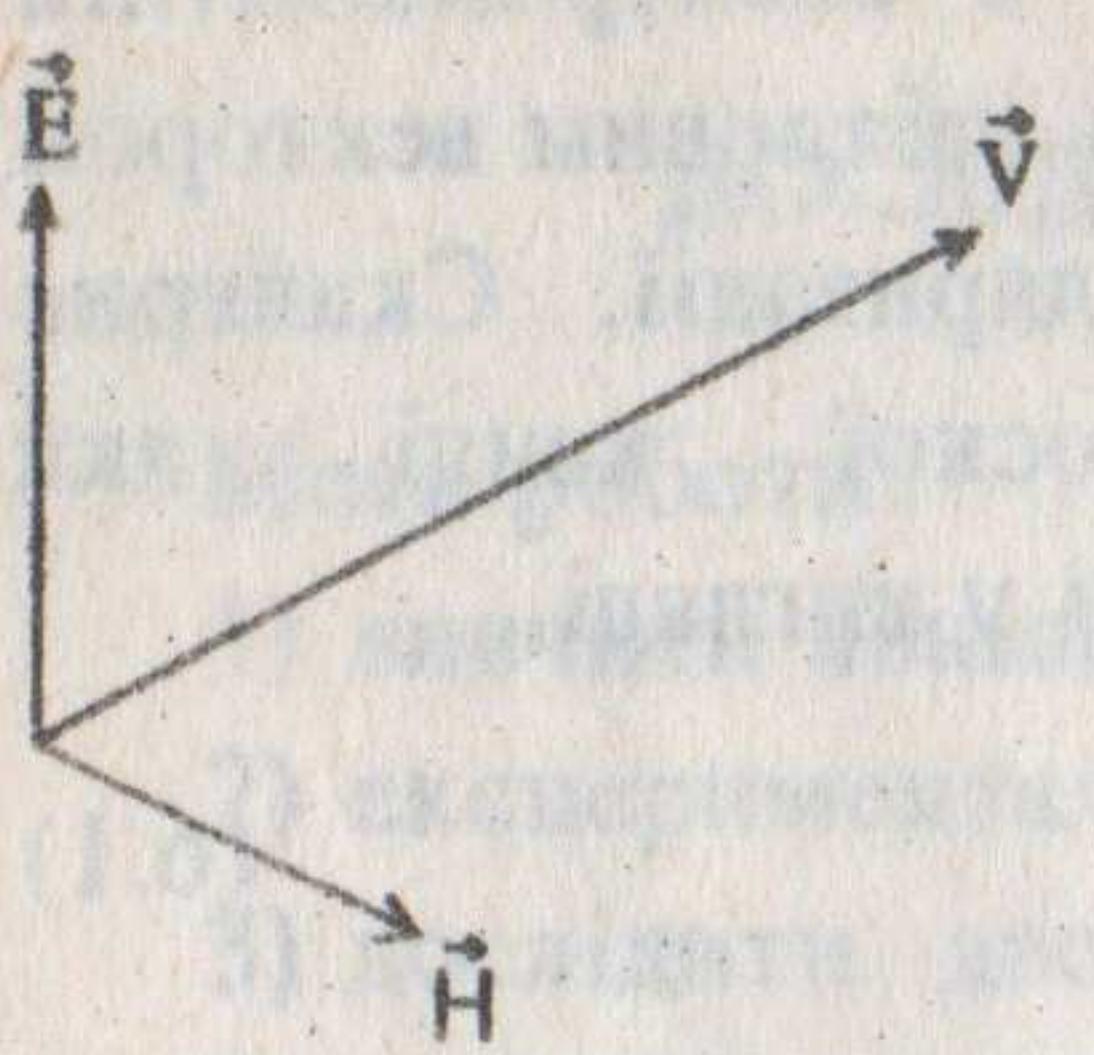


Рис.6.1

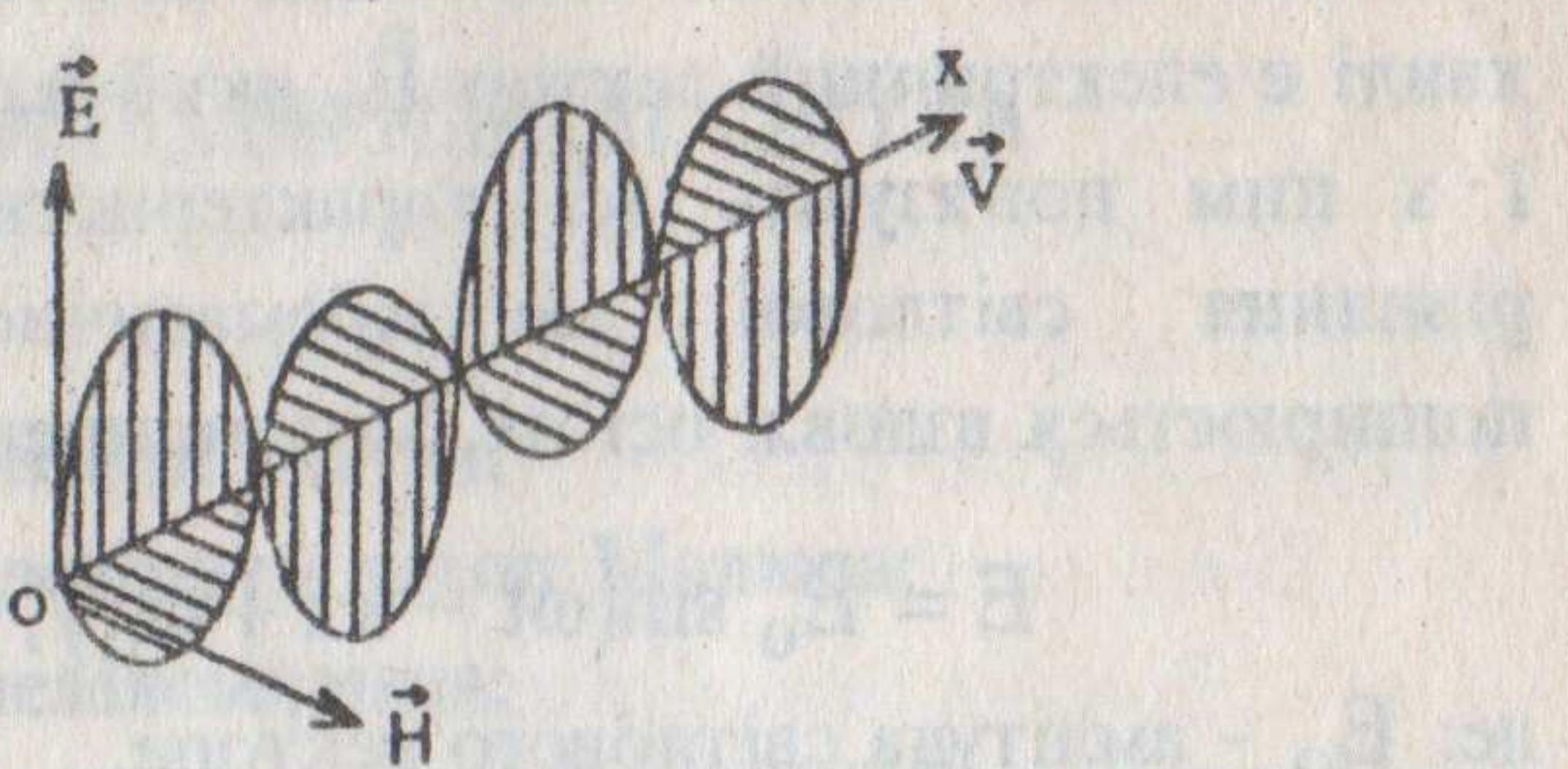


Рис.6.2

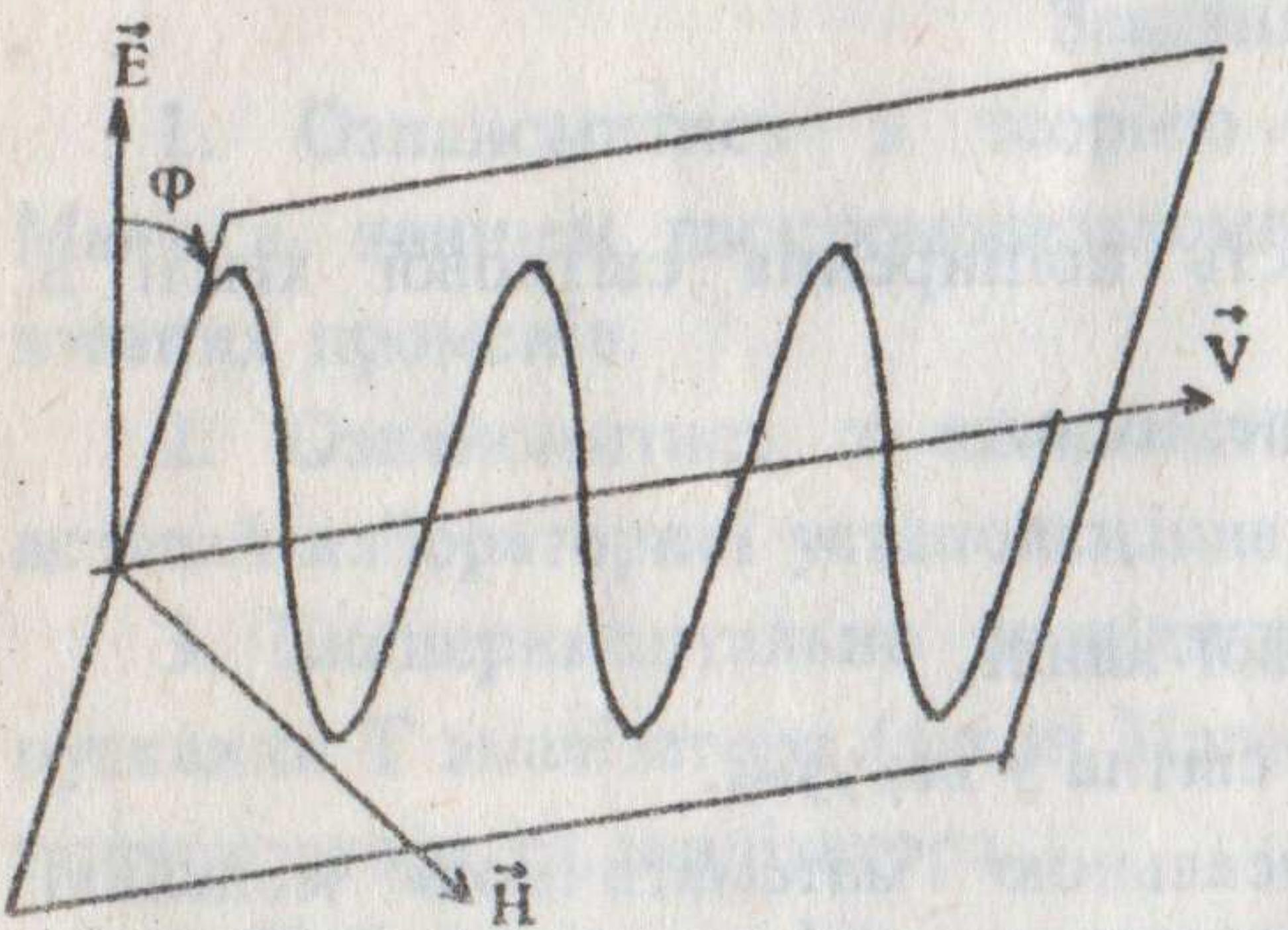


Рис.6.3

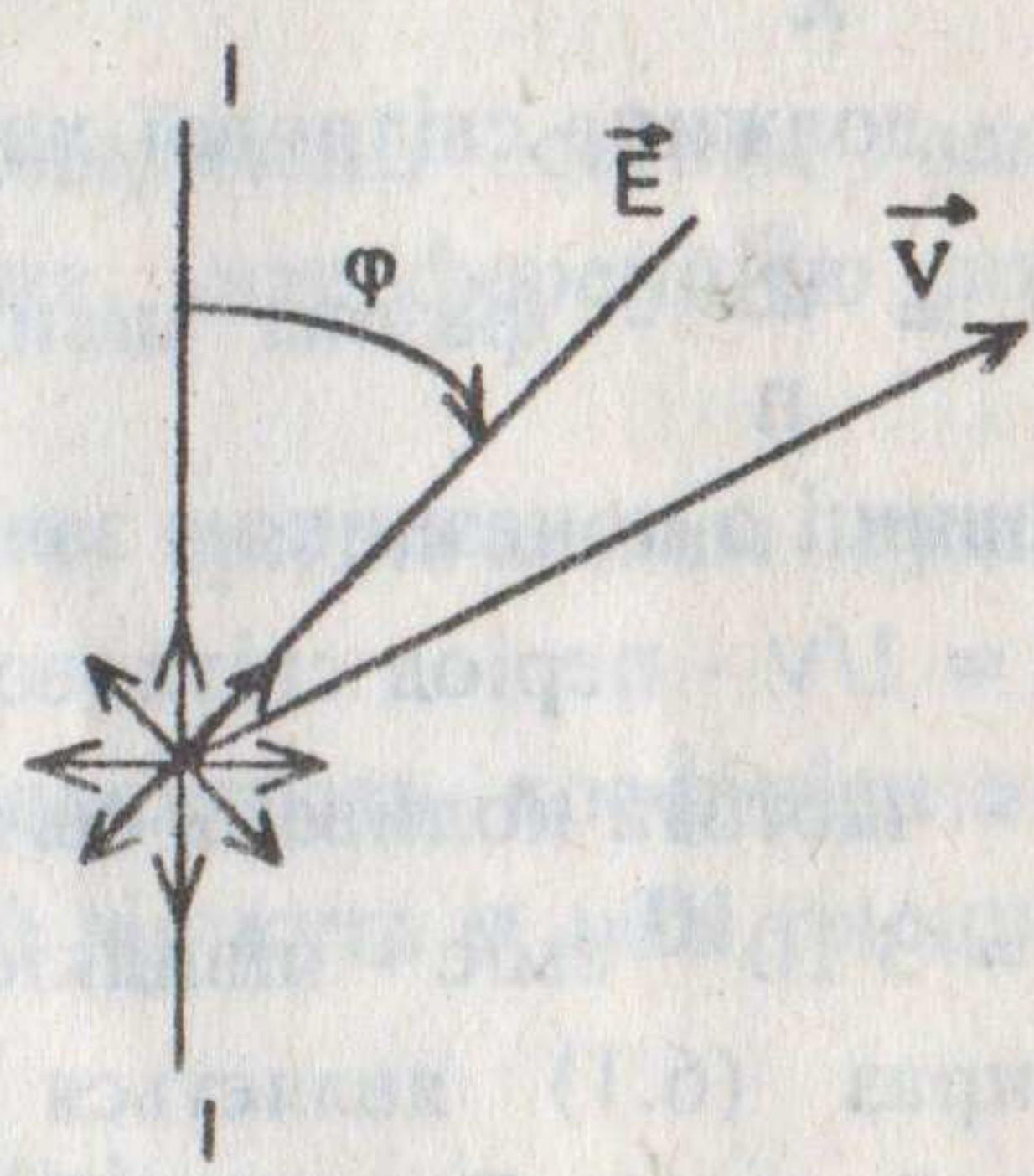


Рис.6.4

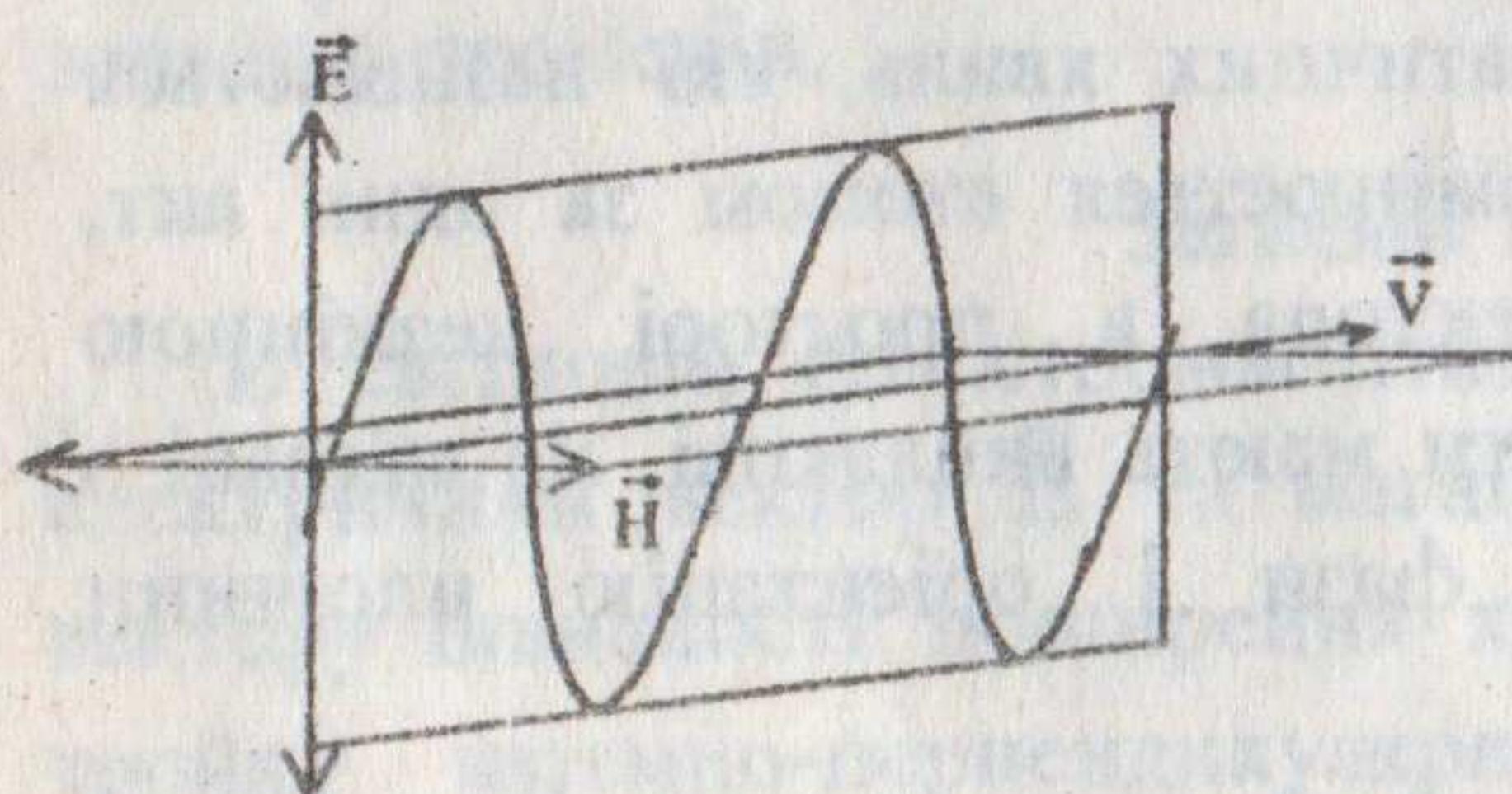


Рис.6.5

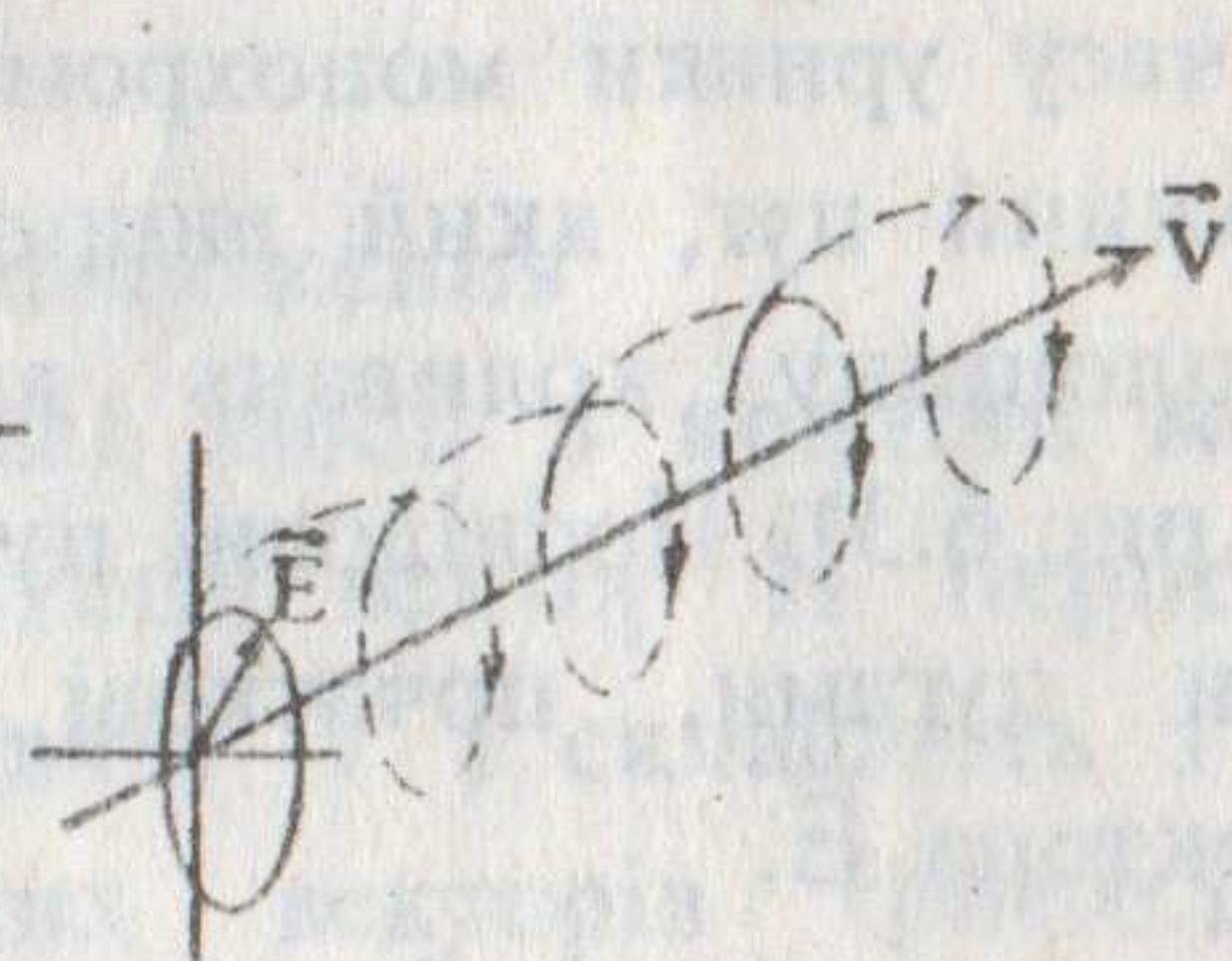


Рис.6.6

кожному з них (рис.6.4). Кут орієнтації площини коливань вектора \vec{E} цутів відносно заданого (наприклад, вертикального) напряму $| - |$ в просторі являється випадковою величиною, розподіленої рівномірно на інтервалі $(0 < \phi < 2\pi)$. При цьому амплітуди світлових векторів \vec{E} цутів для всіх напрямів Φ середньостатистично однакові. Таким чином, під природним світлом розуміють світло з усіма можливими напрямами площини коливань світлового вектора \vec{E} , яке симетричне відносно напряму поширення (вектора швидкості \vec{v}).

Поляризацією світла називається порушення осьової симетрії відносно напряму поширення, яке виражається в тому, що амплітуди світлового вектора \vec{E} в різних площинах (для різних кутів ϕ) неоднакові.

Розрізняють кілька видів поляризації світла.

Лінійно (або плоско) поляризованим світлом називається світло, в якому коливання світлового вектора \vec{E} здійснюються в одній незмінній площині (рис.6.5), яку ми будем називати площиною поляризації. Лінійно-поляризоване світло можна одержати з природного, шляхом пропускання останнього через поляризатор, або при відбитті на межі двох діелектриків, коли кут падіння дорівнює куту Брюстера.

Еліптично поляризованим світлом називається світло, в якому світловий вектор коливається так, що кінець його в проекції на площину, перпендикулярну напряму поширення, описує еліпс (рис.6.6). В залежності від напряму обертання вектора \vec{E} розрізняють еліптичну поляризацію правого і лівого обертання. На рис.6.6 показано еліптичну поляризацію правого обертання. Еліптичну поляризацію світла можна одержати при складанні двох когерентних взаємноперпендикулярних поляризованих світлових хвиль:

$$E_1 = E_{01} \cos \omega t$$

$$E_2 = E_{02} \cos(\omega t + \delta)$$

Орієнтація еліпса залежить від значень амплітуд E_01 , E_02 і різниці фаз δ хвиль, які складаються, а напрям обертання - від знаку δ . При $\delta = m\pi$ еліптично поляризоване світло перетворюється в лінійно поляризоване, а при $E_01 = E_02$ і $\delta = (2m+1)\pi$ - в циркулярно поляризоване, тобто таке, в якому світовий вектор коливається так, що кінець його в проекції на площину, перпендикулярну напряму поширення, описує коло. Еліптично поляризоване світло можна одержати з природного шляхом пропускання його через поляризатор Π і фазову пластинку $\Phi\Pi$, що вирізана з одноосного двозаломного кристалу паралельно його оптичній осі. Взаємно-перпендикулярні поляризовані хвилі E_H і E_S з різницею фаз δ , які виходять з фазової пластинки, складаючись, створюють еліптично поляризовану хвиллю (рис.6.7).

Частково поляризованим світлом називається світло, в якому один з напрямів коливань являється переважним, але не винятковим (Рис.6.8). Частково поляризоване світло можна розглядати як суму лінійно поляризованого та природного світла. Воно утворюється, наприклад, при заломленні природного світла на межі двох діелектриків, коли кут падіння дорівнює куту Брюстера.

Поляризаторами називаються оптичні елементи, які вільно пропускають коливання світових хвиль тільки в одній площині, що називається площиною поляризатора (П-П на рис.6.7). Як поляризатори, застосовують кристалічні поляризаційні призми різної конструкції, або поляроїди. Поляризатор, який застосовують для аналізу поляризованого світла, називається **аналізатором**.

Розглянемо проходження природного світла через поляризатор Π і аналізатор A (рис.6.9). З поляризатора виходить плоско поляризоване світло з інтенсивністю I_Π і коливаннями світового вектора в площині П-П. Після аналізатора, площаина якого А-А складає з площеиною поляризатора П-П кут α .

виходить також плоско поляризоване світло з площеиною коливань світового вектора, яка обернена на кут α , та інтенсивністю I_A .

Закон Малюса встановлює залежність між інтенсивностями лінійно поляризованого світла на виході I_A та на вході I_Π аналізатора [1,2].

$$I_A = I_\Pi \cos^2 \alpha \quad (6.2)$$

Якщо аналізатор не повністю прозорий, то

$$I_A = T_A I_\Pi \cos^2 \alpha, \quad (6.3)$$

де T_A - коефіцієнт пропускання аналізатора, обумовлений поглинанням світла. Якщо на поляризатор падає неполяризоване (природне) світло інтенсивністю $I_{\text{прир}}$, то

$$I_\Pi = \frac{1}{2} I_{\text{прир}}, \quad (6.4)$$

або, при не повністю прозорому поляризаторі,

$$I_\Pi = \frac{1}{2} T_\Pi I_{\text{прир}}, \quad (6.5)$$

де - T_Π коефіцієнт пропускання поляризатора, обумовлений поглинанням світла.

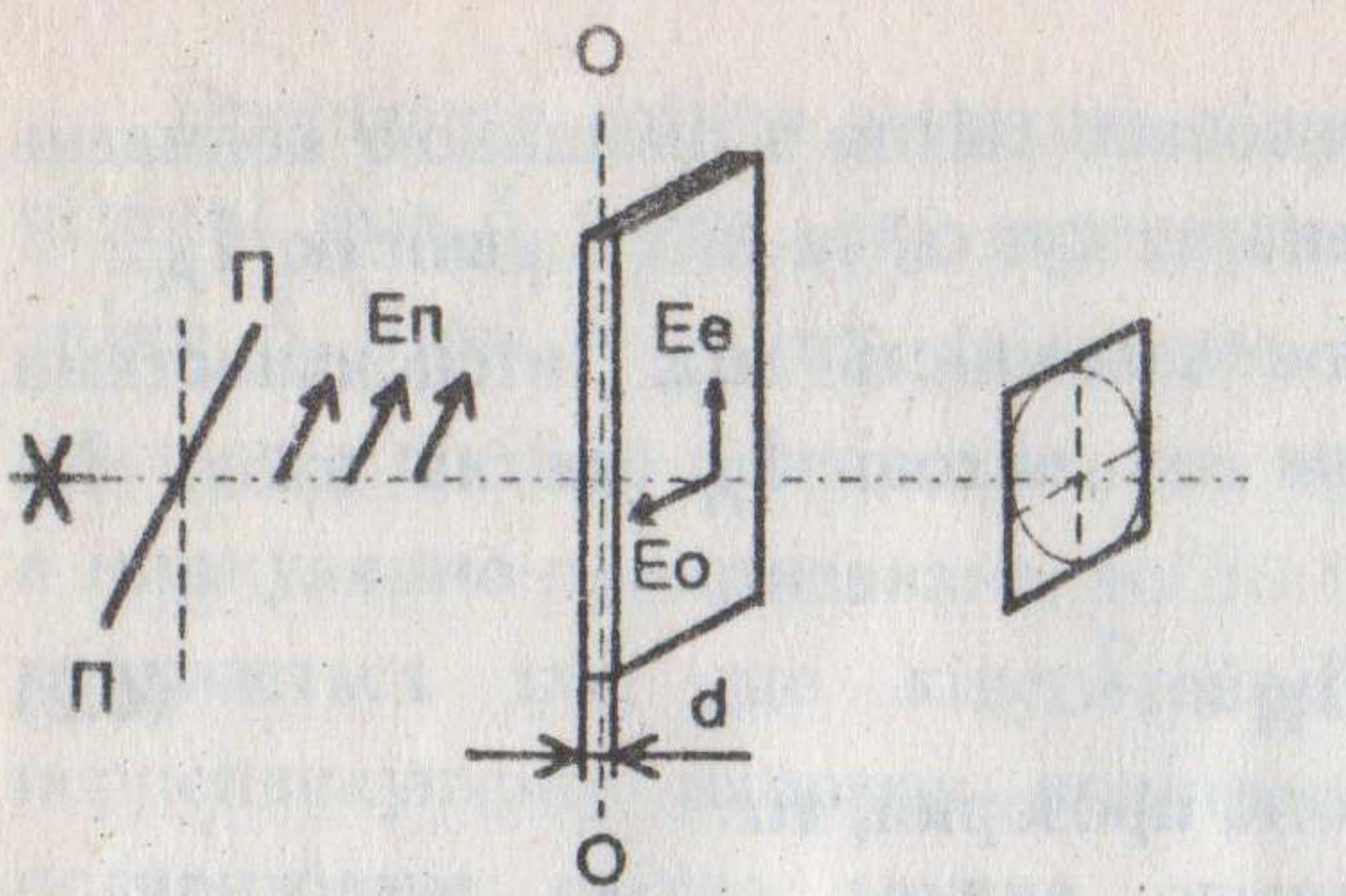
З формул (6.3) і (6.5) витікає співвідношення для всієї схеми рис.6.9

$$I_A = \frac{1}{2} T_\Pi T_A \cos^2 \alpha I_{\text{прир}}. \quad (6.6)$$

З формули закону Малюса (6.3) витікає, що загальний коефіцієнт пропускання аналізатором лінійно поляризованого світла залежить від кута α

$$T^*(\alpha) = \frac{I_A}{I_\Pi} = T_A \cos^2 \alpha \quad (6.7)$$

α	$T^*(\alpha)$	I_A
0	T_A	$T_A I_\Pi$
90	0	0



$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) d$$

Рис.6.7

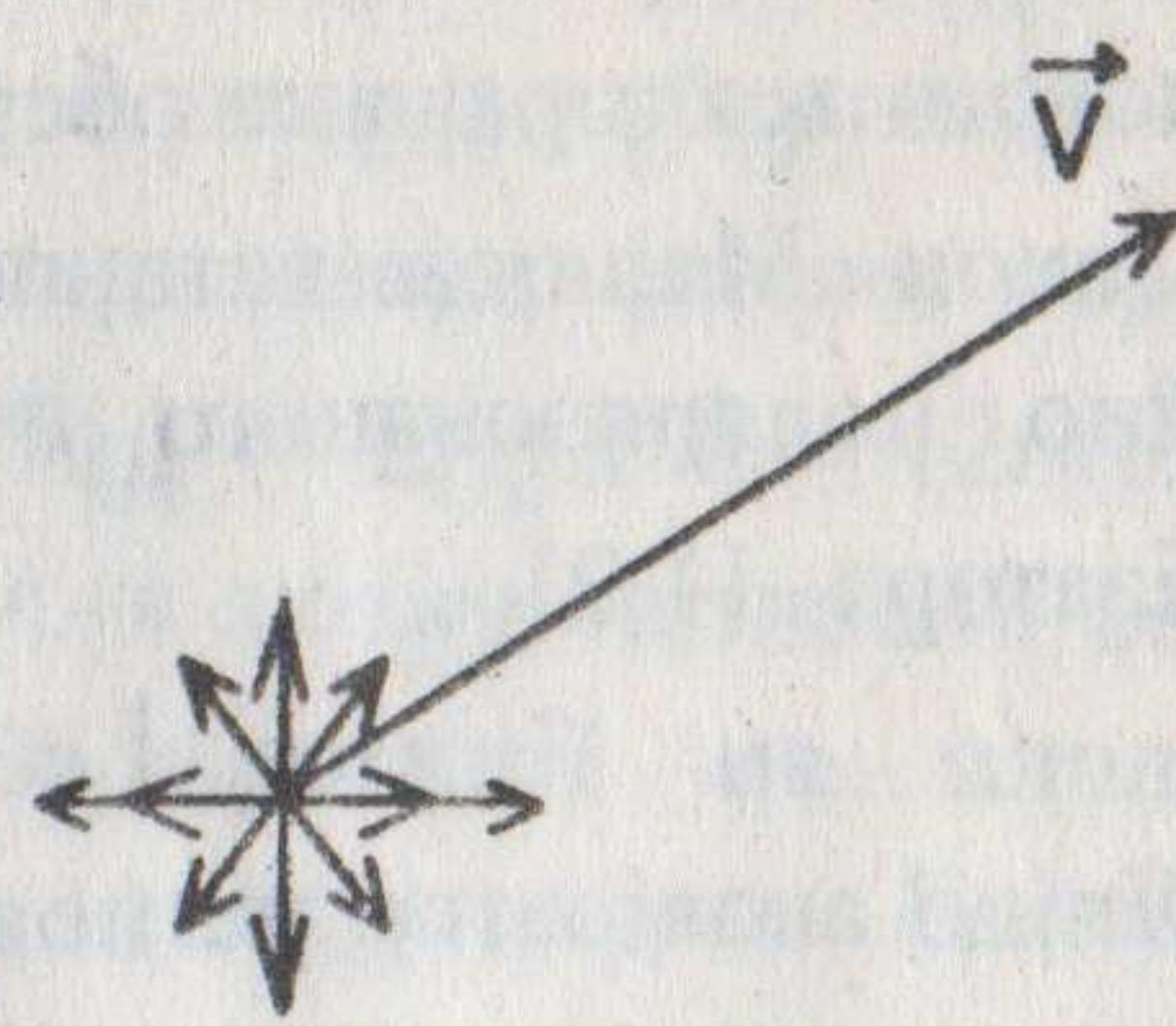


Рис.6.8

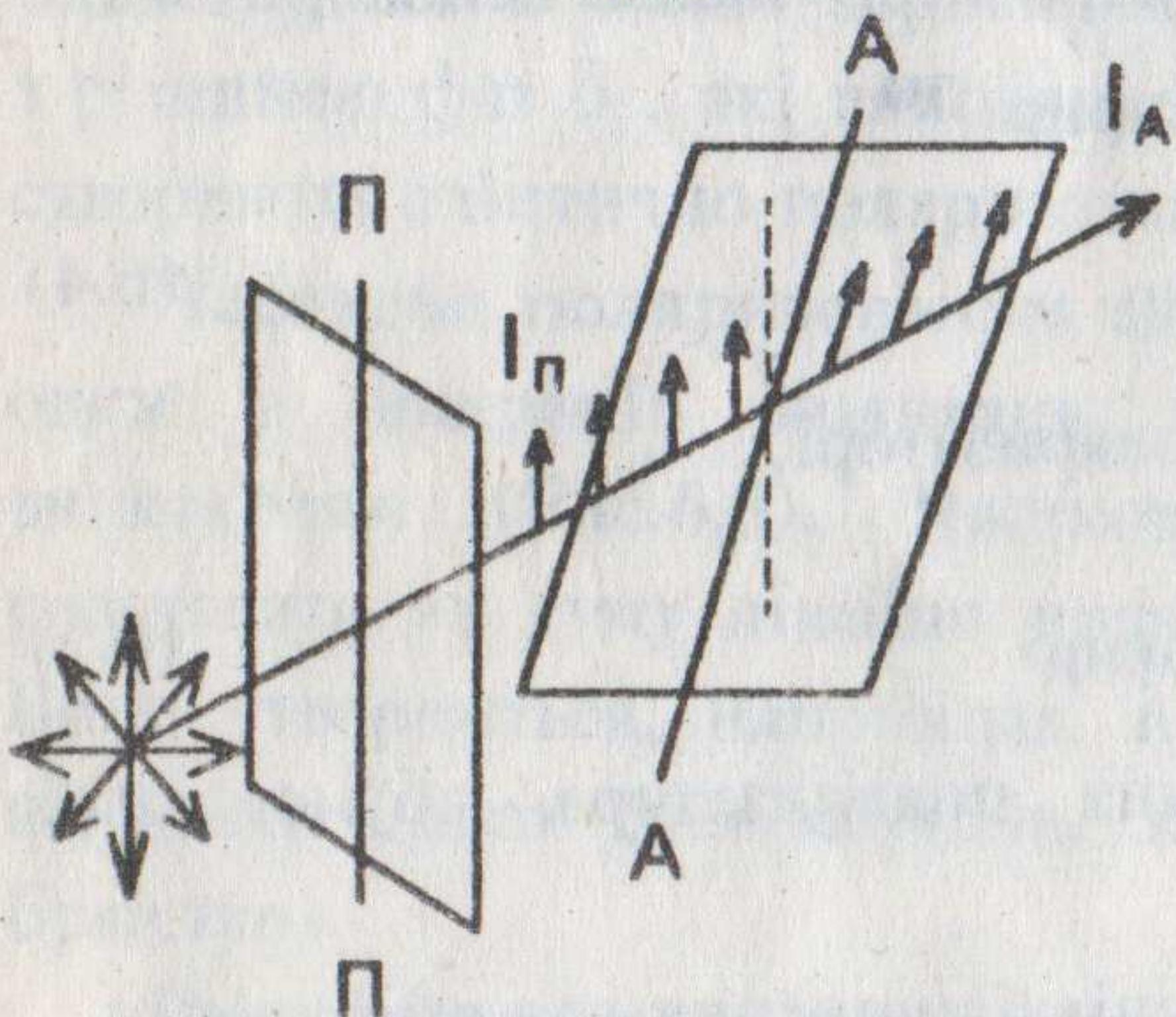


Рис.6.9

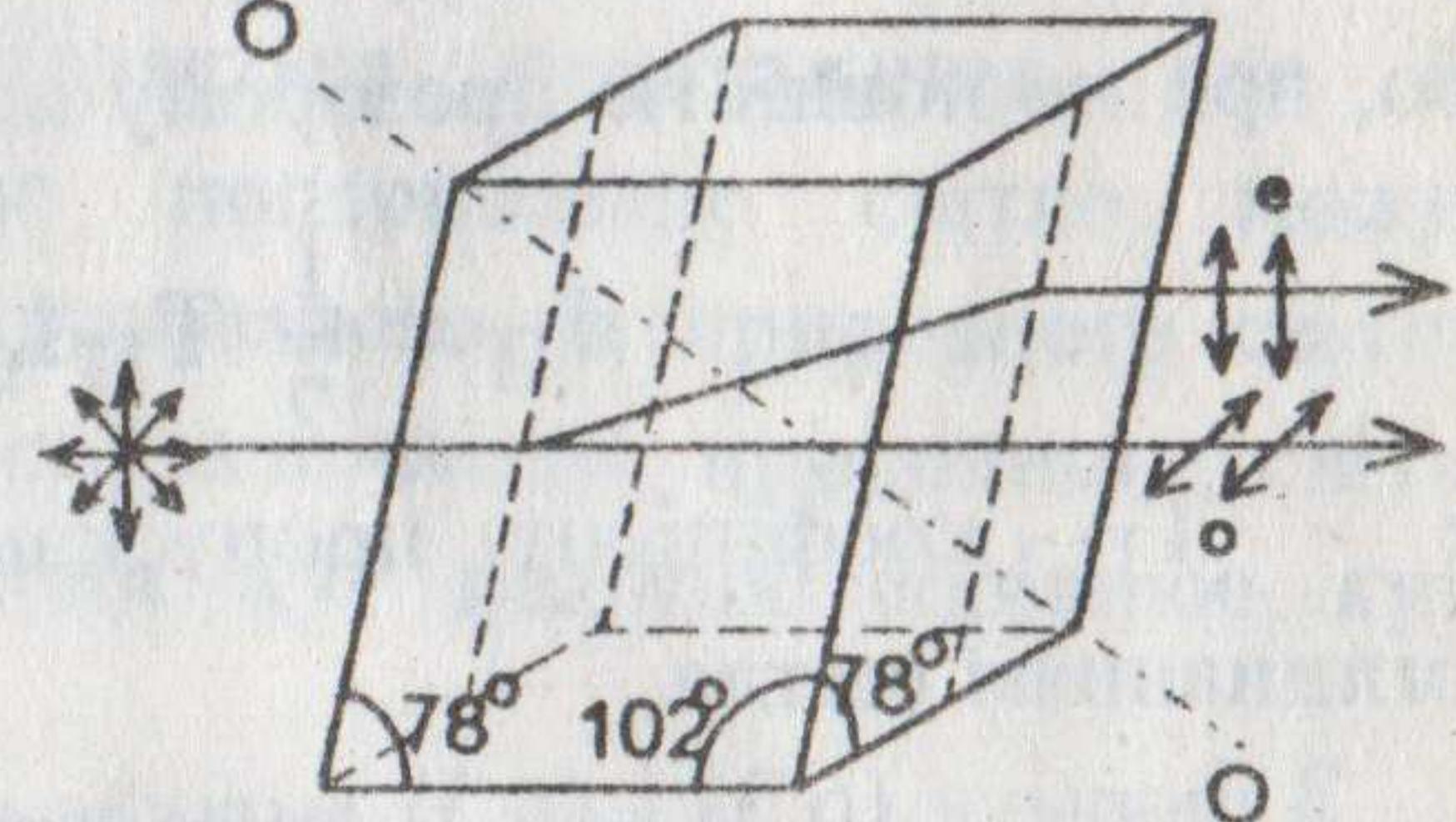


Рис.6.10

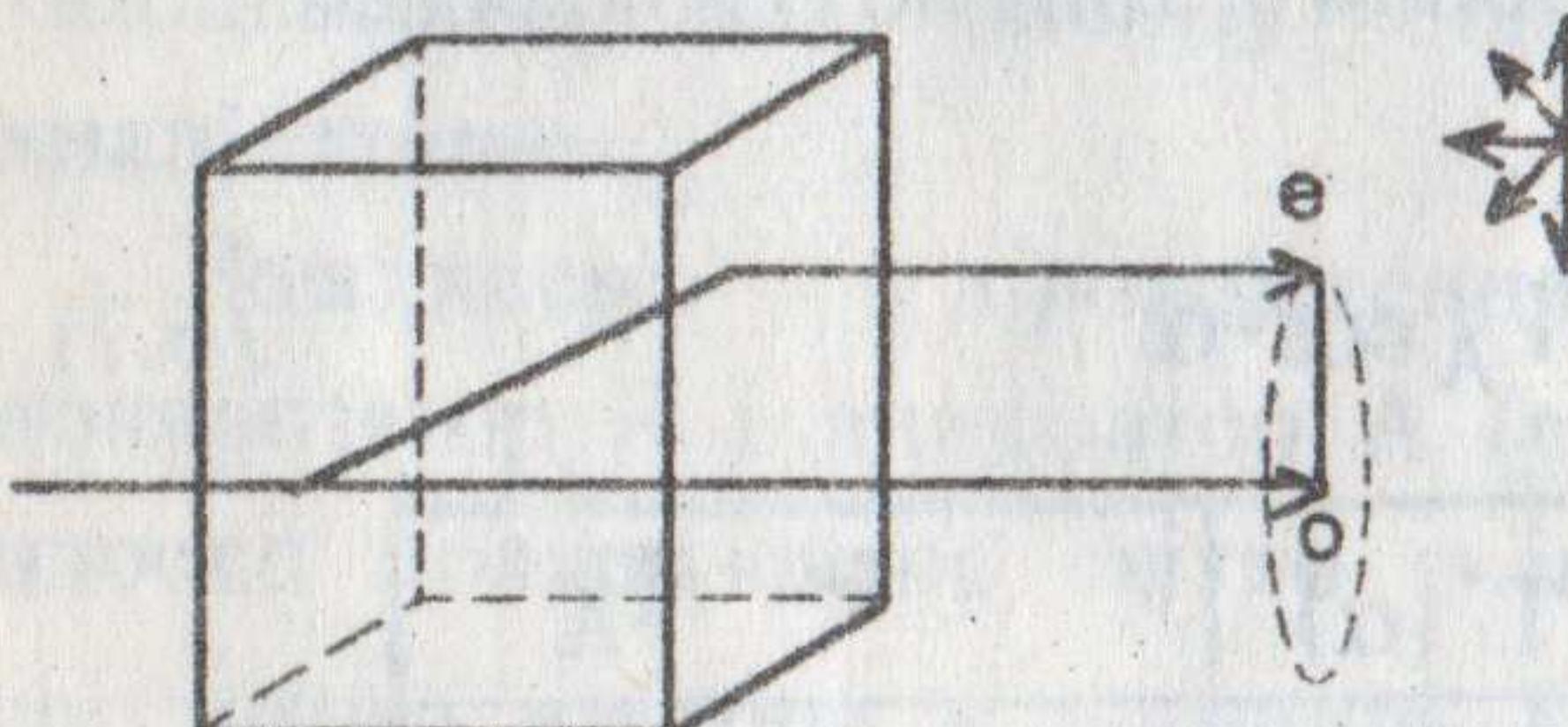
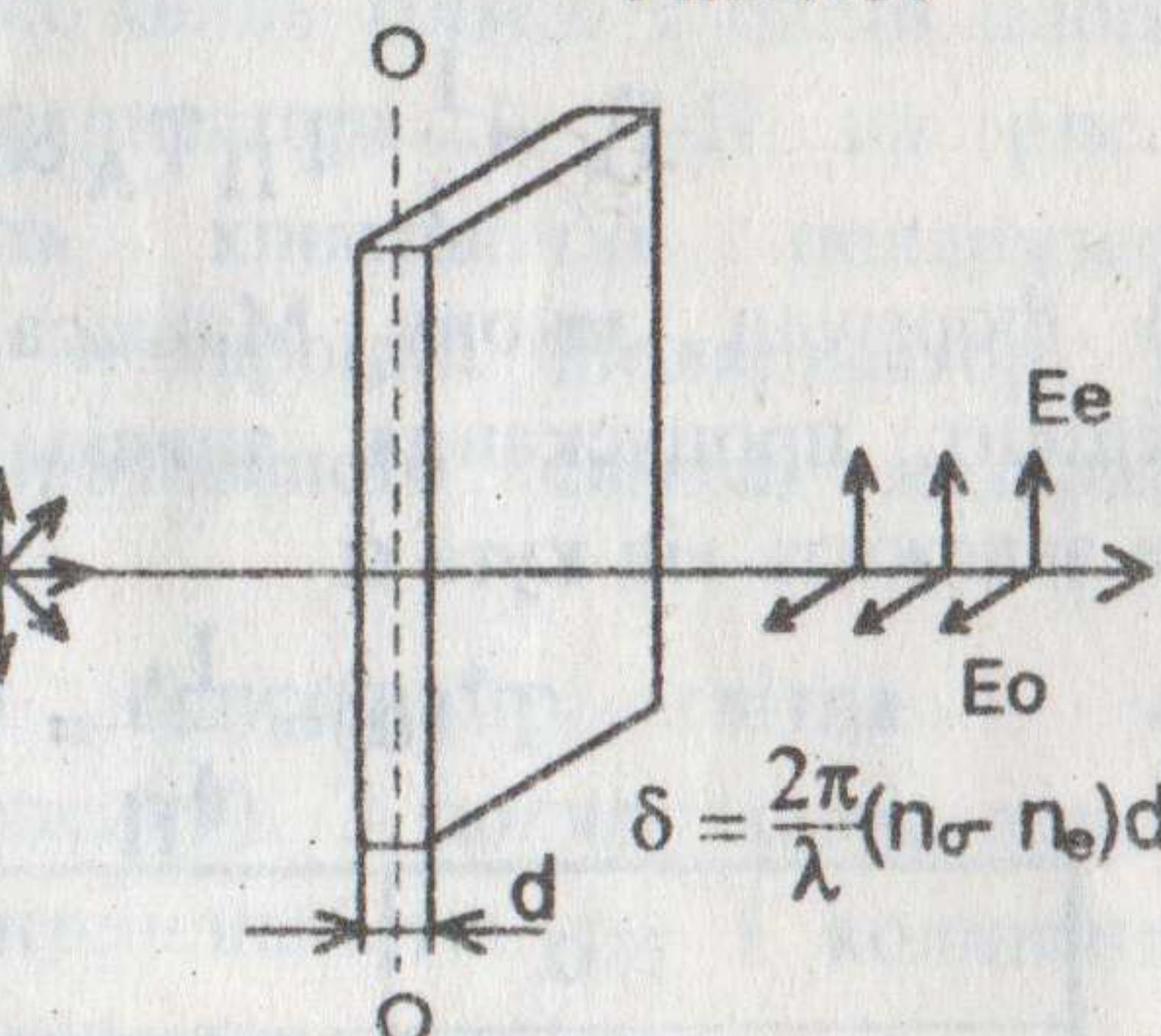


Рис.6.11



10

Рис.6.12

Вимірювання інтенсивності світла на виході аналізатора здійснюється з допомогою фотоелемента і гальванометра. Як відомо, фотострум пропорційний інтенсивності світла, тоді експериментальна залежність $T_e(\alpha)$ визначається виразом

$$T_e(\alpha) = \frac{I_A(\alpha)}{I_A(0)}, \quad (6.8)$$

де $I_A(\alpha)$ - фотострум при довільному значенні кута α , $I_A(0)$ - максимальний фотострум при $\alpha = 0^\circ$.

Явище двопроменезаломлення спостерігається при проходженні природного світла через кристали. Найбільше воно в кристалах ісландського шпату (кальциту). Промінь природного світла в кристалі ісландського шпату поділяється на два промені: звичайний (ordinary) і незвичайний (extraordinary). Всередині кристалу обидва промені поширяються з різними швидкостями. На виході з кристалу промені йдуть паралельно один одному в попередньому напрямі (рис.6.10).

В одноосних кристалах, до яких відноситься ісландський шпат, є один напрям О-О, вздовж якого звичайний "о" і незвичайний "е" промені поширяються не розділяючись з однією швидкістю. Він називається оптичною віссю кристалу. Будь яка пряма, паралельна цьому напряму, являється оптичною віссю кристалу. Будь-яка площа, яка проходить через оптичну вісь, називається головною площею. Площа, яка проходить через напрям поширення променя, і оптичну вісь називається головним розрізом одновісного кристалу.

Звичайний і незвичайний промені крім вказаних вище мають наступні властивості.

1. Звичайний промінь "о" підкоряється закону заломлення Снеліуса на межі "повітря-кристал"; лежить у площині падіння; має постійне значення показника заломлення n_o і постійну

швидкість $v_o = c/n_o$ незалежно від напряму поширення (кута падіння). Для ісландського шпату $n_o = 1.658$ при $\lambda = 589,3$ нм.

2. Незвичайний промінь "e" закону Снеліуса не підкоряється; не лежить в площині падіння; його показник заломлення n_e і швидкість $v_e = c/n_e$ залежать від напряму поширення світла в кристалі. В ісландському шпаті при $\lambda = 589,3$ нм показник заломлення n_e змінюється в межах від 1.486, коли напрям променя перпендикулярний оптичній осі O-O, до 1.658, коли напрям променя співпадає з оптичною віссю.

3. Звичайний і незвичайний промені плоскополяризовані у взаємоперпендикулярних площинах ($\bar{E}_o \perp \bar{E}_e$). У звичайному промені світовий вектор \bar{E}_o коливається в площині, перпендикулярній площині головного розрізу (оптичній осі), в незвичайному \bar{E}_e коливається в площині, паралельній головному розрізу (оптичній осі).

4. Інтенсивності обох променів практично однакові $I_o = I_e = I_{\text{прир.}}$

При обертанні кристалу навколо напряму променя, що падає, незвичайний промінь обертається навколо звичайного (Рис.6.11).

З ісландського шпату виготовляють різні поляризаційні призми - поляризатори, в яких обидва промені розводяться найбільше і один з них штучно закривається. Промінь, який залишається, є, звичайно, лінійно поляризованим [1, 2].

Вирізані з кристалу ісландського шпату пластинки з робочою гранню, паралельною оптичній осі O-O, називаються фазовими пластинками (Рис.6.12). При нормальному падінні природного світла на таку пластинку звичайний і незвичайний промені не розділяються, йдуть разом з різними швидкостями і мають найбільшу різницю фаз:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d(n_o - n_e), \quad (6.9)$$

де $n_o - n_e = \Delta n$ - найбільша різниця показників заломлення, яка служить мірою двозаломлення кристалу (для ісландського шпату $\Delta n = 1.658 - 1.486 = 0.172$).

Двозаломні дихроїчні кристали, тобто ті, які неоднаково поглинають звичайний і незвичайний промені, використовуються для створення поляроїдів. Пластинка турмаліну товщиною 1 мм повністю поглинає звичайний промінь, практично не послаблюючи незвичайний ($T_o = 0, T_e \approx 1$). Плівка смульсії з кристалами герапатиту товщиною 0,1 мм повністю поглинає звичайний промінь ($T_o = 0$) і частково незвичайний ($T_e < 1$). Поляроїд перетворює пучок природного світла в лінійно поляризований трохи ослаблений незвичайний пучок, площа коливань вектора \bar{E}_e в якому, паралельна оптичній осі кристалу (Рис. 6.13).

Інтерференцією поляризованих променів називаються інтерференційні явища, одержані з допомогою поляризатора, фазової пластинки і аналізатора (Рис.6.14). Ці явища при спостереженні в білому світлі називаються частіше хроматичною поляризацією.

Поляризатор П перетворює природне світло в лінійно поляризоване з площею коливань світового вектора, яка складає кут β з вертикальлю (Рис.6.14). Фазова пластинка (оптична вісь співпадає з вертикальлю) в результаті двозаломлення пропускає дві взаємно перпендикулярно поляризовані складові: незвичайну E_e (в площині O-O) і звичайну E_o (в площині, перпендикулярній O-O). Обидві складові E_e і E_o когерентні і мають для конкретної довжини хвилі постійну різницю фаз δ (6.9), яка створена фазовою пластинкою.

Аналізатор А, орієнтований відносно поляризатора П під кутом α , пропускає проекції на свою площину A-A незвичайної та звичайної складових. Таким чином, на виході аналізатора утворюються дві когерентні світові хвилі з різницею фаз δ і

паралельними площинами коливань світлових векторів, які інтерферують між собою.

Амплітуди складових E_{Ae} і E_{Ao} можна одержати користуючись схемою на рис.6.15а:

$$\begin{aligned} E_{Ae} &= E_{\Pi} \cos \beta \cos (\beta - \alpha) \\ E_{Ao} &= E_{\Pi} \sin \beta \sin (\beta - \alpha), \end{aligned} \quad (6.10)$$

де $E_{\Pi} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{\text{прир}}$ - амплітуда світлового вектора після поляризатора, $E_{\text{прир}}$ - амплітуда світлового вектора природного світла, β - кут між площинами поляризатора $\Pi-\Pi$ і оптичною віссю фазової пластинки $O-O$, α - кут між площинами поляризатора $\Pi-\Pi$ і аналізатора $A-A$.

Інтенсивність світла після аналізатора, одержувана в результаті інтерференції хвиль E_{Ae} і E_{Ao} , визначається виразом [2]:

$$I_A = I_{\Pi} [\cos^2 \alpha - \sin^2 \beta \sin^2(\beta - \alpha) \sin^2 \frac{\delta}{2}], \quad (6.11)$$

де $I_{\Pi} = \frac{1}{2} I_{\text{прир}}$ - інтенсивність світла після поляризатора. Другий член у формулі (6.11) обумовлений присутністю кристалічної пластинки. У випадку відсутності пластинки ($\delta = 0$) має місце закон Малюса $I_A = I_{\Pi} \cos^2 \alpha$. На практиці частіше зустрічаються випадки, коли $\beta = 45^\circ$, а аналізатор паралельний поляризатору або перпендикулярний йому. В цьому випадку амплітуди хвиль, які інтерферують, E_{Ae} і E_{Ao} рівні. Для паралельних аналізатора і поляризатора (при $\beta = 45^\circ$, $\alpha = 0$, рис.6.15,б) з формули (6.11) витікає

$$I_{||} = I_{\Pi} \cos^2 \frac{\delta}{2}, \quad (6.12)$$

а для перпендикулярних (при $\beta = 45^\circ$, $\alpha = 90^\circ$, рис.6.15,в),

$$I_{\perp} = I_{\Pi} \sin^2 \frac{\delta}{2}, \quad (6.13)$$

де δ - різниця фаз, яка створюється фазовою пластинкою.

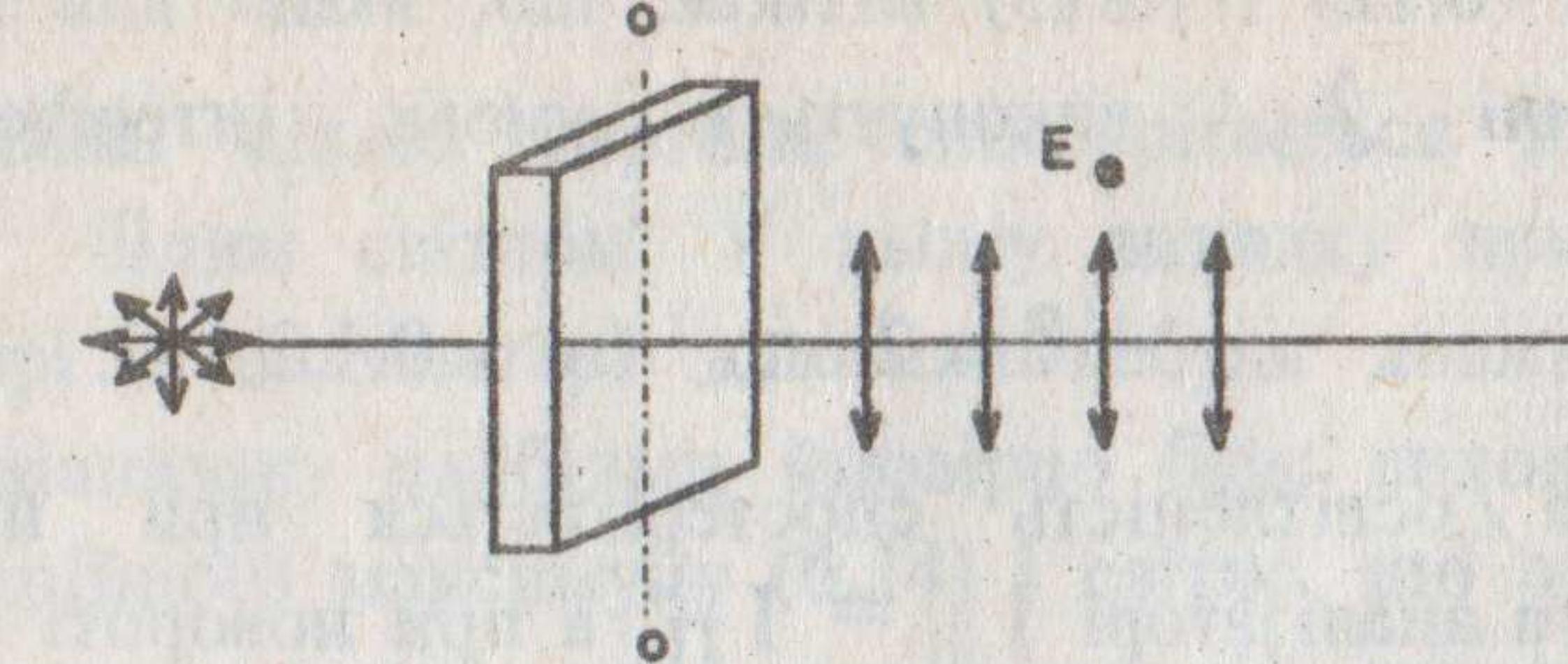


Рис.6.13

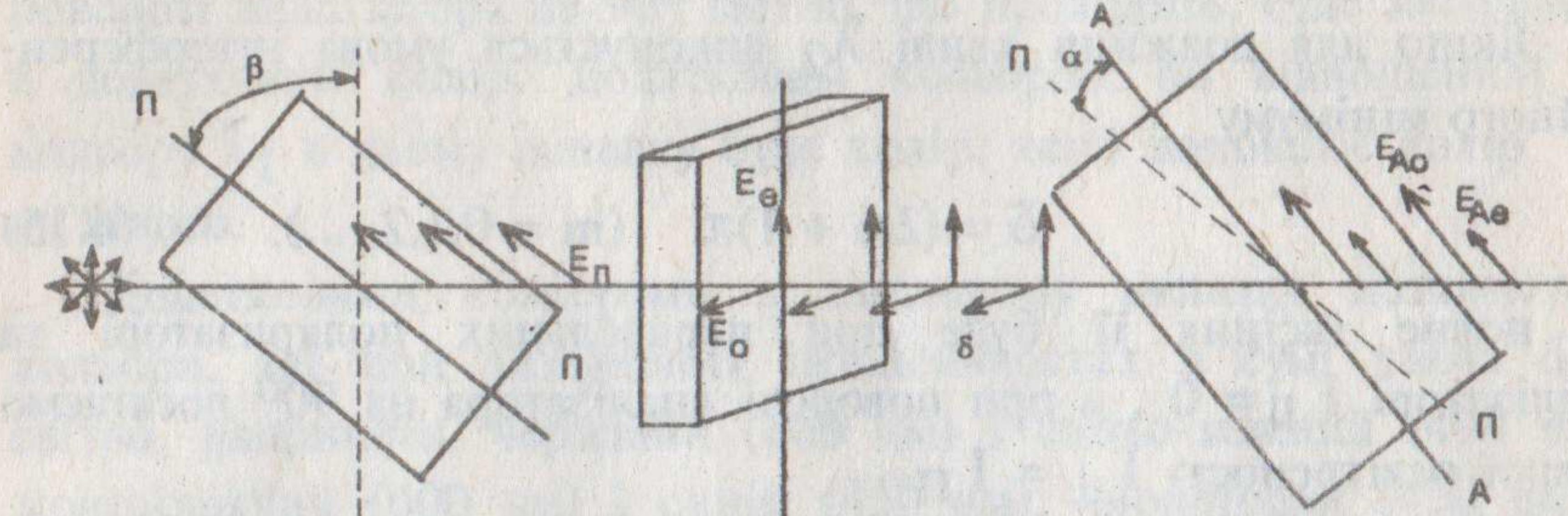


Рис.6.14

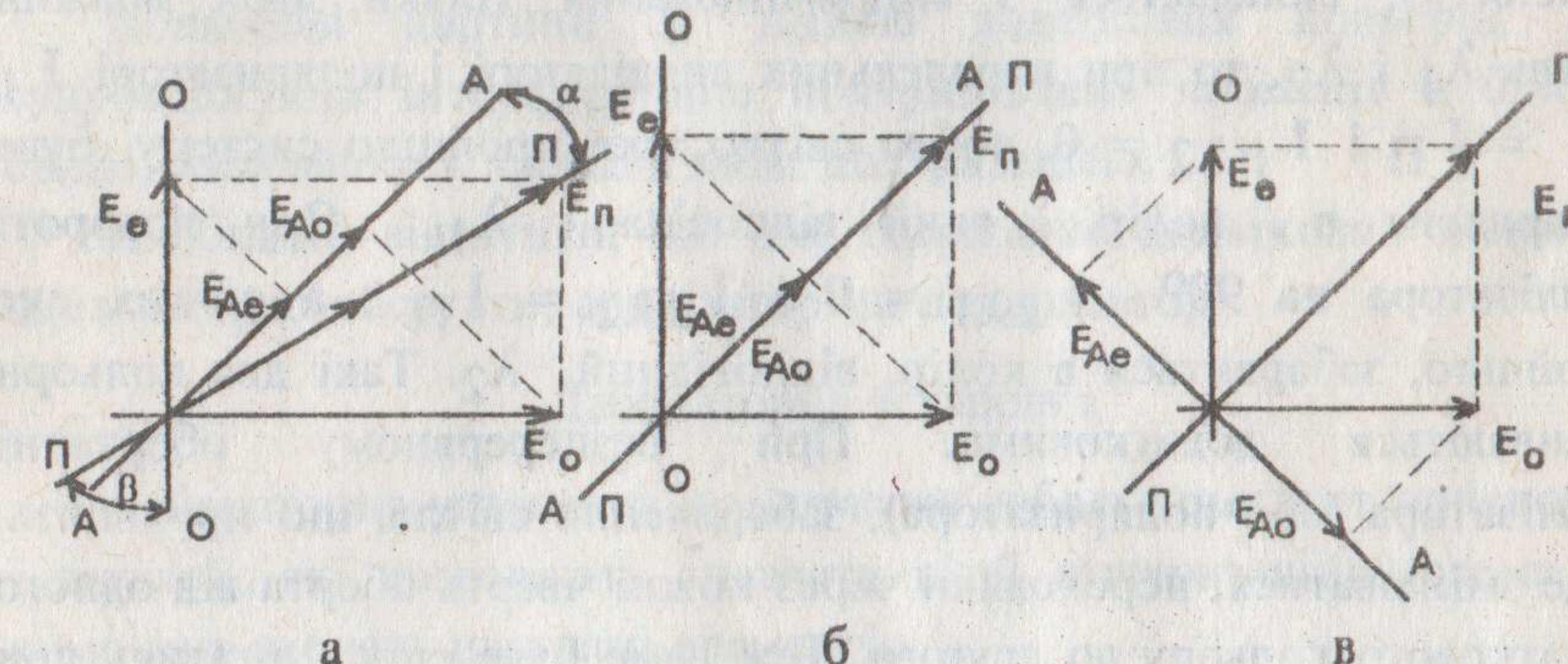


Рис.6.15

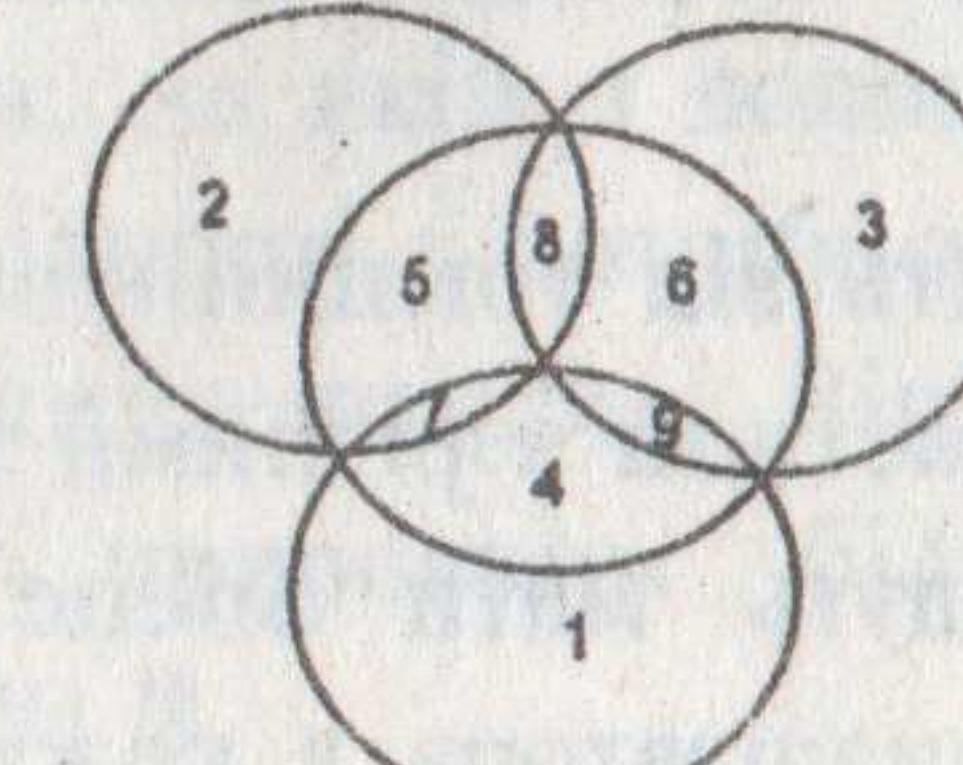


Рис.6.16

З формул (6.12) і (6.13) витікає, що, якщо для якої-небудь довжини хвилі λ_1 , виконується умова інтерференційного максимуму

$$\delta = 2m\pi \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (6.14)$$

то найбільша освітленість спостерігається при паралельних поляризаторі та аналізаторі $I_{||} = I_P$, а при повороті аналізатора на 90° виникає повне гасіння $I_{\perp} = 0$.

Якщо для довжини хвилі λ_2 виконується умова інтерференційного мінімуму

$$\delta = (2m + 1)\pi \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (6.15)$$

то повне гасіння її буде при паралельних поляризаторі та аналізаторі $I_{||} = 0$, а при повороті аналізатора на 90° досягаємо повної освітленості $I_{\perp} = I_P$.

Таким чином, якщо природне світло, яке падає на поляризатор (Рис.6.14), складається з випромінювання тільки двох довжин хвиль λ_1 і λ_2 , то при паралельних аналізаторі і поляризаторі $I_{||\lambda_1} = I_P$ і $I_{||\lambda_2} = 0$, тобто світло, яке пройшло систему, буде забарвлене в колір, який відповідає λ_1 . При повороті аналізатора на 90° $I_{\perp\lambda_1} = 0$ і $I_{\perp\lambda_2} = I_P$, а світло, яке пройшло, забарвиться в колір, відповідний λ_2 . Такі два кольори називаються додатковими. При безперервному обертанні аналізатора (або поляризатора), забарвлення світла, що проходить, буде змінюватися, переходячи через кожні чверть оберта від одного додаткового кольору до другого. Теж саме буде спостерігатись при кутах β , відмінних від 0° або 90° , тільки кольори будуть менш насиченими.

Різниця фаз δ залежить від товщини пластинки d . Через це, якщо пластинка має дві частини з різними товщиною d_1 і d_2 , то дляожної частини будуть мати місце свої два додаткових кольори. При обертанні аналізатора в кожній частині пластинки буде спостерігатись зміна своїх додаткових кольорів.

Ще більш цікава картина спостерігається при освітленні установки білим світлом. У цьому випадку при паралельних поляризаторі і аналізаторі для якої-небудь довжини хвилі λ_1 видимого діапазону найбільш ймовірно буде виконуватись умова інтерференційного максимуму (6.14) і світло, що проходить, буде забарвлюватись в колір, який відповідає цій довжині хвилі. При повороті аналізатора на 90° світло, що проходить, буде забарвлене в додатковий колір. Додатковим кольором по відношенню до кольору λ_1 в цьому випадку буде колір, який доповнює колір λ_1 до білого.

Додатковими кольорами в загальному випадку називаються кольори, які при визначених інтенсивностях в сумі дають біле світло, наприклад, червоний (660 нм) і синьо-зелений (490 нм); жовтогарячий (600 нм) і синій (450 нм); фіолетовий (430 нм) і зелено-жовтий (563 нм) і інш.

Кольорові картини зі зміною додаткових кольорів, які супроводжують інтерференцію поляризованих променів в білому світлі, називаються хроматичною поляризацією.

Необхідно відмітити, що для одержання додаткових кольорів однаково що обертати, аналізатор чи поляризатор.

Лабораторна установка

Лабораторна установка представляє собою комплект приспособ і деталей, які дозволяють складати різні поляризаційні схеми. В комплект входять наступні елементи.

1. Оптична лава з рейтерами. Оптична лава є основою лабораторної установки, на якій з допомогою рейтерів кріпляться оптичні деталі у відповідності з потрібною схемою.

2. Освітлювач з конденсором. Він служить для освітлення поляризаційних схем природним білим світлом. Освітлювач живиться від мережі 220 В.

3. Фотоелемент з гальванометром (або люксметр), які служать для вимірювання інтенсивності світла (світлового потоку).

4. Два поляроїди, які використовуються як поляризатор і аналізатор. Вони закріплені в оправах, що обертаються. На оправах нанесена шкала в градусах.

5. Кристал ісландського шпату в оправі. Він слугує для дослідження двозаломлення.

6. Фазова пластинка змінної товщини (рис.6.16), служить для спостереження інтерференції поляризованих променів.

7. Об'єктив слугує для фокусування зображення діафрагми або фазової пластинки на фотоелементі або екрані спостереження.

8. Екран спостереження.

Порядок виконання роботи

I. Дослідження залежності коефіцієнта пропускання аналізатором лінійно поляризованого світла від кута α між площинами поляризатора та аналізатора (закон Малюса).

1) Скласти установку (рис.6.17), яка містить: освітлювач ОС з конденсором, поляризатор П, аналізатор А, об'єктив О і фотоелемент Ф. При установці рейтерів на оптичну лаву перевірити соосність центрів елементів по висоті і в боковому напрямі.

2) Встановити аналізатор А по шкалі оправи на нуль.

3) Підключити провідники фотоелемента до клем "+" і "-" гальванометра і зняти кришку-екран з фотоелемента. Поворотом поляризатора встановити максимальний фотострум. Після цього поляризатор більше не обертати!

4) Послідовно, повертуючи аналізатор кожний раз на 10° , вимірюти значення фотоструму в діапазоні $0^\circ - 180^\circ$ і записати їх в таблицю 6.1.

5) Обчислити значення коефіцієнта $T_e(\alpha)$ по формулі (6.8) і записати їх в таблицю 6.1.

6) Побудувати графіки експериментальної $T_e(\alpha)$ і теоретичної $T(\alpha) = \cos^2\alpha$ залежностей і порівняти їх.

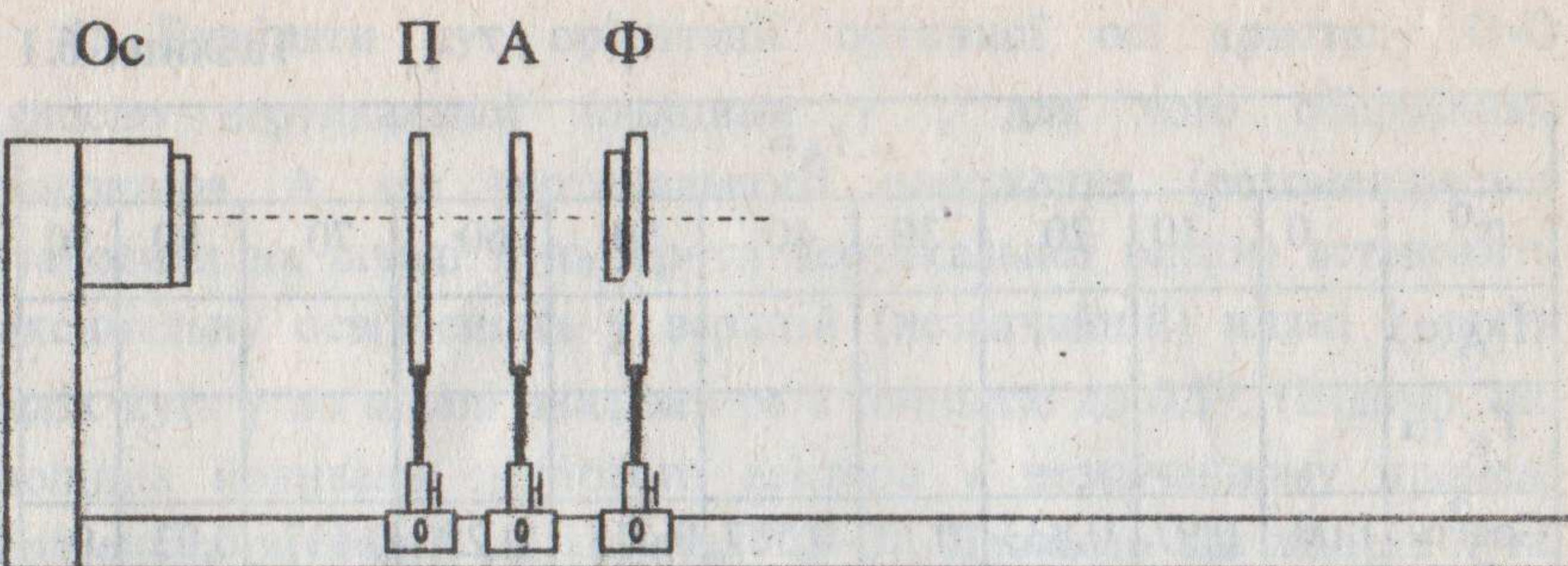


Рис.6.17

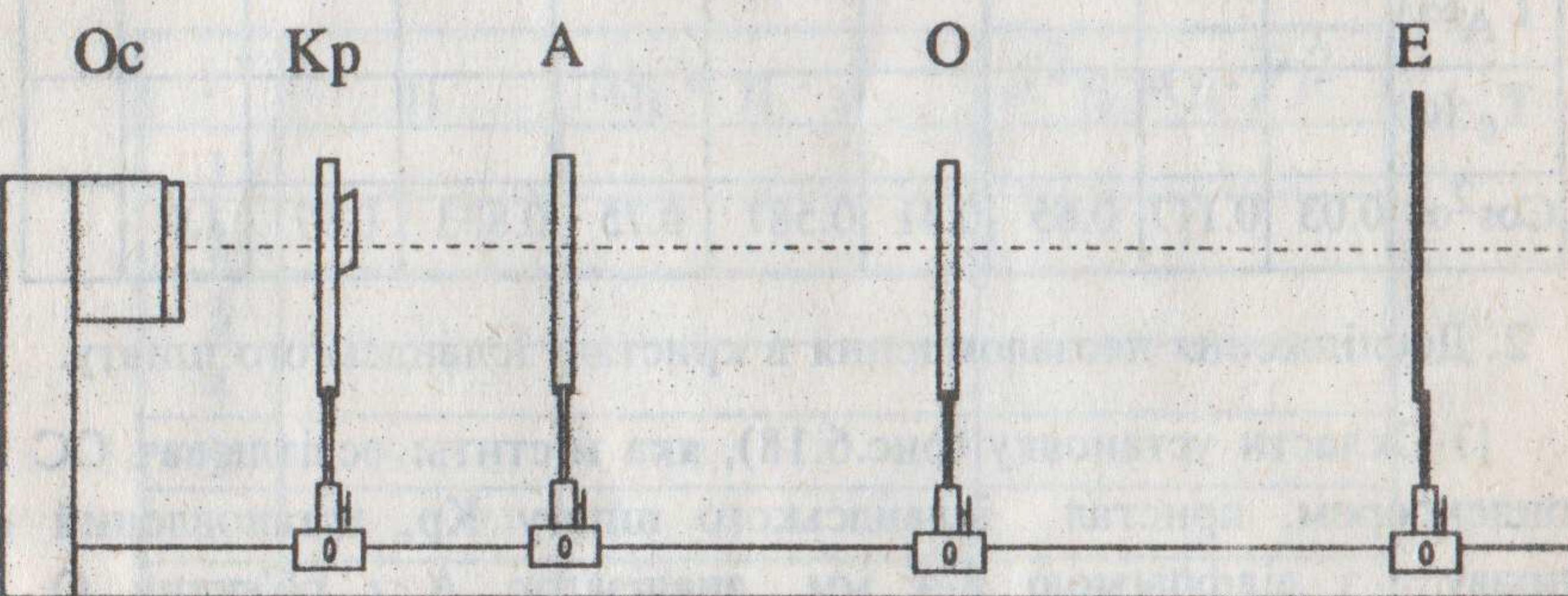


Рис.6.18

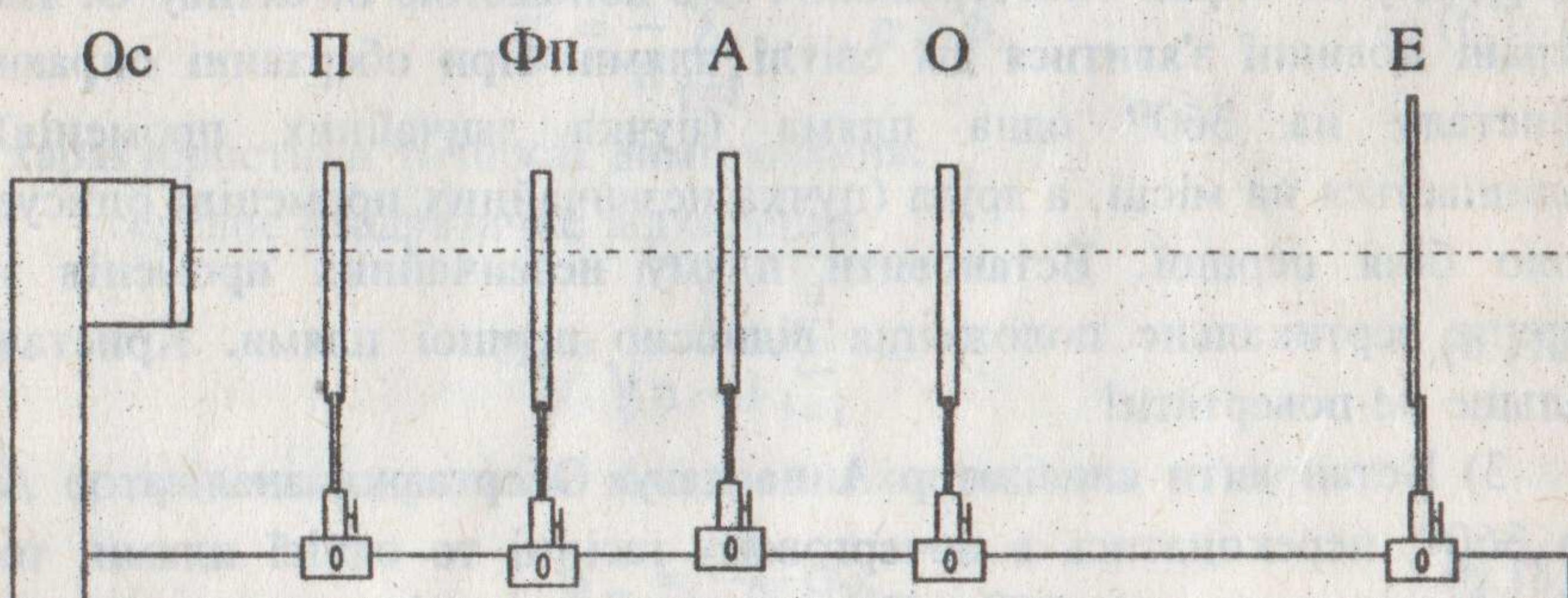


Рис.6.19

Таблиця 6.1

α^o	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$I_A(\alpha)$										
$T_e(\alpha)$										
$\cos^2 \alpha$	1.00	0.97	0.833	0.73	0.587	0.413	0.25	0.117	0.03	0
α^o	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
$I_A(\alpha)$										
$T_e(\alpha)$										
$\cos^2 \alpha$	0.03	0.117	0.85	0.41	0.587	0.75	0.833	0.97	1.0	

2. Дослідження двозаломлення в кристалі ісландського шпату.

1) Скласти установку (рис.6.18), яка містить: освітлювач ОС з конденсором, кристал ісландського шпату Кр, встановлений в оправу з діафрагмою 3-4 мм, аналізатор А, об'єктив О і екран Е.

2) Зняти аналізатор А з оптичної лави і спроектувати діафрагму на екран спостереження Е з допомогою об'єктиву О. На екрані повинні з'явитися дві світлі плями. При обертанні оправи кристалу на 360^o одна пляма (пучка звичайних променів) залишається на місці, а друга (пучка незвичайних променів) описує коло біля першої. Встановити пляму незвичайних променів у верхнє вертикальне положення відносно першої плями. Кристал більше не повертати!

3) Встановити аналізатор А на лаву. Обертаючи аналізатор А на 360^o , переконатись в почерговому гасінні то однієї плями, то другої через кожні 90^o . Це підтверджує факт поляризації звичайного і незвичайного променів у взаємно перпендикулярних площинах.

4) Виміряти кут орієнтації оптичної осі кристалу О-О відносно вертикальної площини γ , для чого обертанням аналізатора А від вертикального положення (рекомендується встановити на шкалі нуль проти вертикальної риски) встановити максимальну освітленість у верхній (незвичайній) плямі і зняти відлік кута γ по шкалі аналізатора з точністю до 0.5^o . (Відомо, що площа коливань світлового вектора у незвичайному промені паралельна оптичній осі кристалу О-О). Провести сім замірів кута. Результати записати в таблицю 6.2.

Таблиця 6.2.

i	γ_i	$\Delta\gamma_i = \gamma_i - \bar{\gamma}$	$\Delta^2\gamma_i = (\gamma_i - \bar{\gamma})^2$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
Σ	$\Sigma \gamma_i$	$\Sigma \Delta\gamma_i$	$\Sigma \Delta^2\gamma_i$

5) Обчислити середнє значення кута

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_i, n = 6, \quad (6.16)$$

і характеристики точності вимірювання:

- середнє квадратичне відхилення

$$\sigma_\gamma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta^2\gamma_i} \quad (6.17)$$

- середнє квадратичне відхилення оцінки

$$\sigma_{\bar{\gamma}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sigma_\gamma, \quad (6.18)$$

- довірчий інтервал, всередині якого, з довірчою ймовірністю $\beta = 0.8$, знаходиться дійсне значення кута γ

$$\bar{\gamma} - \epsilon_{\beta} < \gamma < \bar{\gamma} + \epsilon_{\beta}, \quad (6.19)$$

де абсолютна похибка або напівширина довірчого інтервалу

$$\epsilon_{\beta} = t_{\beta} \sigma_{\bar{\gamma}}. \quad (6.20)$$

Відносна напівширина довірчого інтервалу t_{β} визначається по значенням $\beta = 0.8$ і $n-1 = 6$ з таблиці Додатку.

3. Спостереження інтерференції поляризованих променів

1) Скласти установку (рис.6.19), яка містить: освітлювач ОС з конденсором, поляризатор П, фазові пластинки ФП в оправі, аналізатор А, об'єктив О і екран Е.

2) Пересуваючи об'єктив О вздовж оптичної лави, добитися чіткого зображення на екрані Е рисунка пластинок (рис.6.16).

3) Встановити поляризатор і аналізатор в паралельне положення. Зафіксувати кольори дев'яти зон на фазових пластинах. Повернути аналізатор на 90° і зафіксувати додаткові кольори в тих же зонах.

Повертаючи аналізатор на 360° , провести спостереження забарвлення зон фазових пластинок. Пояснити хроматичну поляризацію, яка спостерігається.

Зміст звіту

У звіті повинні бути приведені:

- мета і завдання роботи;
- схеми установки для трьох завдань;
- таблиця 6.1 і графіки $T_e(\alpha)$ і $T(\alpha)$;
- таблиця 6.2, розрахункові формулі і результати розрахунку похибок;
- схеми фазових пластинок з переліком кольорів зон при паралельних ($\alpha = 0^{\circ}$) і перпендикулярних ($\alpha = 90^{\circ}$) аналізаторі і поляризаторі.

Література

1. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976.
2. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. М.: Наука, 1971. - с.376.

Хроматический номер?

Лабораторна робота № 7

ДОСЛІДЖЕННЯ ВНУТРІШНІХ НАПРУГ ПРОЗОРИХ ОБ'ЄКТИВІВ З ДОПОМОГОЮ ПОЛЯРИМЕТРА

Мета роботи:

- 1) вивчити явище двопроменезаломлення в анізотропних тілах;
- 2) ознайомитись з інтерференцією променів лінійно орто-гонально поляризованих;
- 3) дослідити анізотропію показника заломлення, викликану деформаціями в прозорих ізотропних тілах;
- 4) навчитись працювати з полярископом-поляриметром ПКС-250.

Завдання

1. Ознайомитись з теорією двопроменезаломлення в анізотропних тілах і явищем інтерференції променів при взаємно перпендикулярних напрямах лінійної поляризації.
2. Вивчити будову полярископа-поляриметра ПКС-250, ознайомитись з порядком роботи на ньому.
3. Визначити різницю шляху між звичайним та незвичайним променями і двопроменезаломлення в зразках по кольору інтерференційної картини, використовуючи ПКС-250 як полярископ.
4. Визначити різницю шляху між звичайним і незвичайним променями і двопроменезаломлення в зразках при роботі ПКС-250 в режимі поляриметра.
5. Порівняти проведені вимірювання різниці шляху між звичайним і незвичайним променями для одних і тих же зразків і визначити похибку вимірювання в режимі спектроскопії, прийнявши вимірювання в режимі поляриметрії за еталонне. Знайти категорію скла зразків по двопроменезаломленню і різницю шляху між звичайним і незвичайним променями зразків фазових пластин.

Загальні положення

В сучасному оптичному приладобудуванні широко використовуються деталі не тільки з різних видів оптичного скла, але і з кристалічних матеріалів, як природних, так і штучних (див., зокрема, додаткову літературу до цієї роботи).

[Середовища, оптичні властивості яких залежать від напряму світла, що проходить через них, називаються оптично анізотропними.] Це деякі кристали, матеріали, в яких є внутрішні напруги, а також деякі речовини, які зазнають впливу електричного або магнітного полів.

При проходженні світла через анізотропні кристали, наприклад, ісландський шпат, спостерігається явище, яке називається двопроменезаломленням (double refraction). Промінь світла, падаючи на поверхню, зазнає на ній заломлення, в результаті якого в кристалі поширюються два промені з різними швидкостями (рис.7.1).

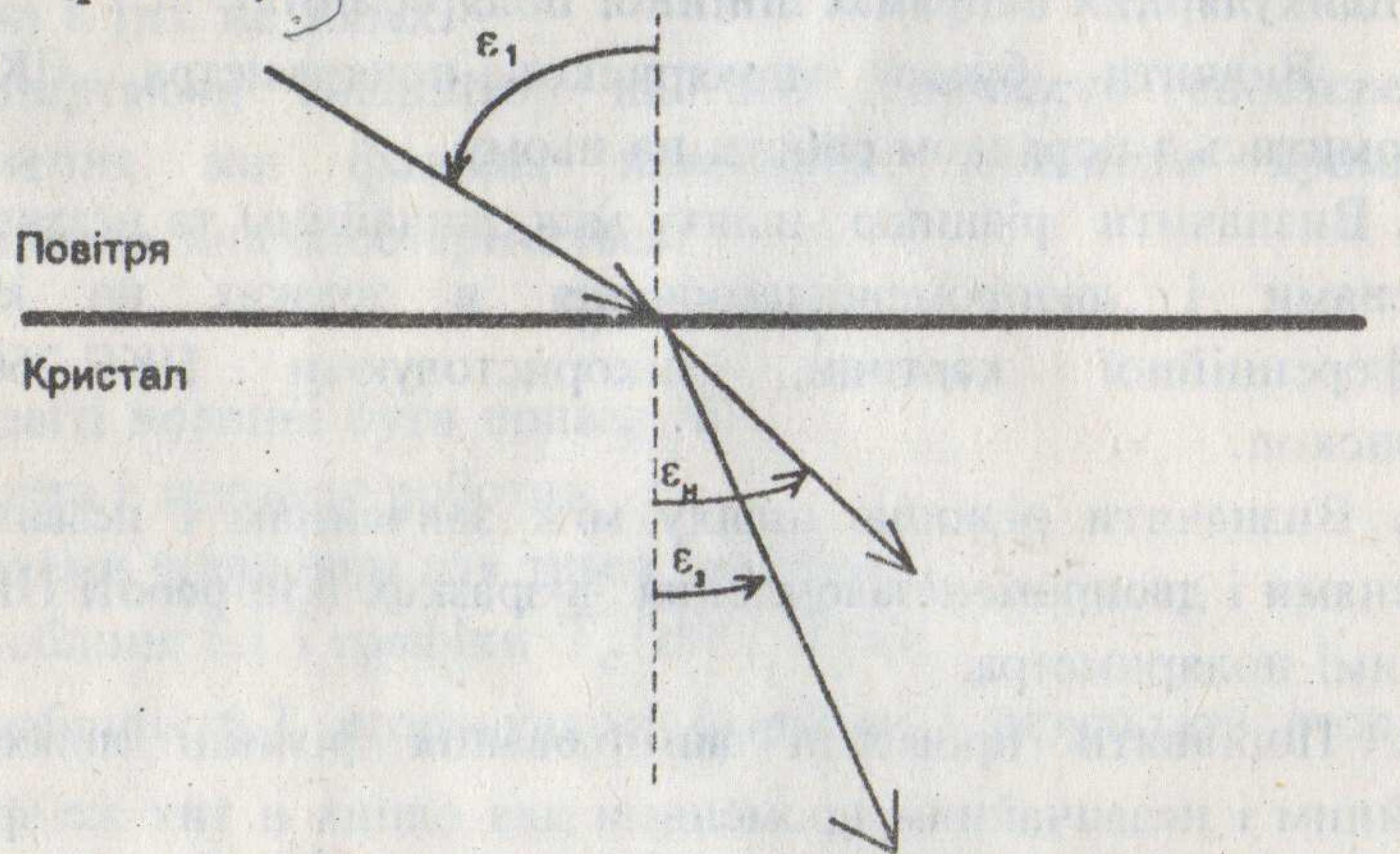


Рис.7.1

Ці промені лінійно поляризовані і напрями коливань в них взаємно перпендикулярні. Для одного з променів - звичайного (ordinary, позначається буквою з або o), швидкість поширення однаакова у всіх напрямах. Цей промінь лежить в одній площині з падаючим променем і перпендикуляром у точці падіння.

Швидкість поширення другого променя - незвичайного (extraordinary, позначається буквою и або e.), залежить від напрямку його поширення в кристалі. Він не завжди лежить в одній площині з падаючим променем і перпендикуляром в точці падіння.

В одноосних кристалах є напрям, вздовж якого промінь поширюється не роздвоюючись, з однією швидкістю, як в однородному (ізотропному) середовищі. Цей напрям (оптична вісь) складає визначені кути з гранями природного кристалу. Площа, яка проходить через оптичну вісь і падаючий промінь, називається головним розрізом або головною площею кристалу. У звичайному промені коливання відбуваються у напрямку, перпендикулярному до головного розрізу, а у незвичайному промені - в головному розрізі.] Є, крім того, двовісні кристали, які мають два напрями, вздовж яких не виникає двопроменезаломлення (слюда, гіпс і др.).

Якщо якесь точочне джерело розмістити всередині одноосного кристалу, то відповідно припущенням Гюйгенса, поширення світла проходить так, що хвильовий фронт як би поділяється на дві поверхні. Одна з них - сфера - відповідає фронту хвилі звичайних променів, друга - еліпсоїд обертання - фронту хвилі незвичайних променів. Вісь обертання еліпсоїда - вісь симетрії хвильових поверхонь - співпадає з оптичною віссю кристала. Обидві поверхні торкаються одна одної тільки в двох точках на осі.

Кристали, в яких швидкість поширення звичайних променів більше, ніж у незвичайних, називаються позитивними (кварц), в яких менше - негативними (ісландський шпат)](рис.7.2). Напрям коливань у світовій хвилі, яка поширюється в кристалах з більшою швидкістю, звичайно називають швидким напрямом, а перпендикулярний до нього - повільним. Напрями, в яких у кристалі відбуваються коливання у звичайному та незвичайному променях, називаються головними напрямами.



Рис 7.2 Поверхні хвильових фронтів в xz площині для :
а) двовісних кристалів; б) одновісних позитивних кристалів;
в) одновісних негативних кристалів

З двозаломних кристалів вирізають плоскопаралельні тонкі пластинки з робочою гранню, паралельною оптичній осі. Такі пластинки називаються фазовими. При нормальному падінні природного світла на таку пластинку звичайний і незвичайний промені не розділяються, йдуть разом з різними швидкостями і мають найбільшу різницю фаз.

Є два визначення фазової пластинки, які характеризують її властивості. Фазова пластинка - це оптичний елемент, який не змінюючи інтенсивності і ступеня поляризації монохроматичного поляризованого пучка світла, розділяє його на два компоненти, зсуває фазу одного з них відносно другого, а потім знову з'єднує компоненти в один пучок. Друге еквівалентне визначення : фазова пластинка - це оптичний елемент, який змінює будь-яку форму поляризації пучків світла, за виключенням двох визначених форм. Дві форми поляризації, які не зазнають змін, визначаються власними векторами фазової пластинки. В залежності від того, якими є ці форми - лінійними, циркулярними або еліптичними, фазові пластинки також називаються відповідно лінійними, циркулярними або еліптичними. Власний вектор, який відповідає найменшому показнику заломлення (найбільшій швидкості поширення), називають власним вектором найбільшої швидкості. Другий власний вектор називають вектором найменшої

швидкості. Два власних вектори в ідеальній фазовій пластинці, звичайно, ортогональні. В даній роботі мають справу з лінійними фазовими пластинками, тобто з тими, які виготовлені з одновісних двозаломних кристалів. Пластинка, яка створює різницю ходу між променями, рівну $\lambda/4$, називається чверть-хвильовою, рівну $\lambda/2$ - напівхвильовою, рівну λ - хвильовою.

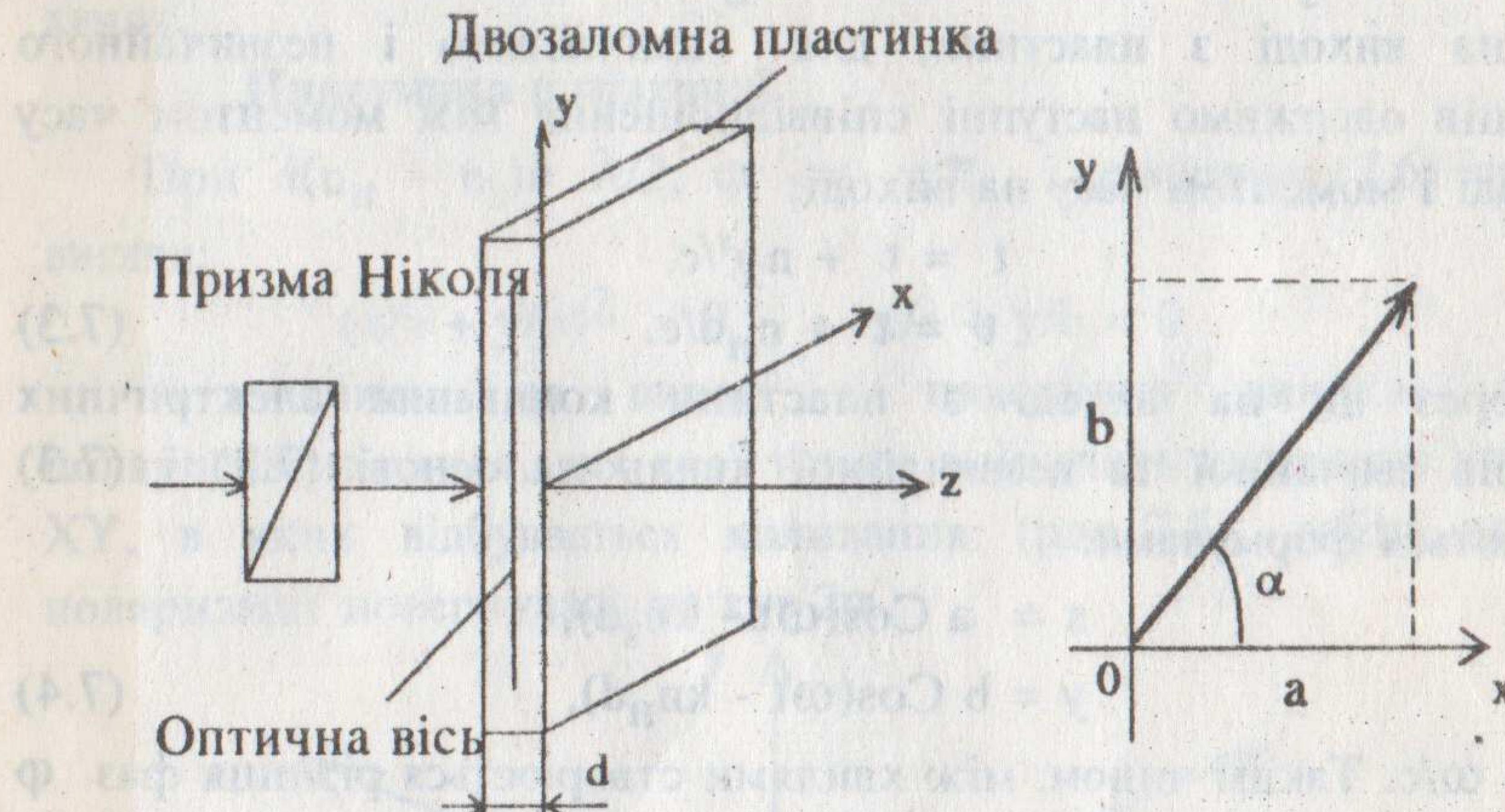


Рис.7.3

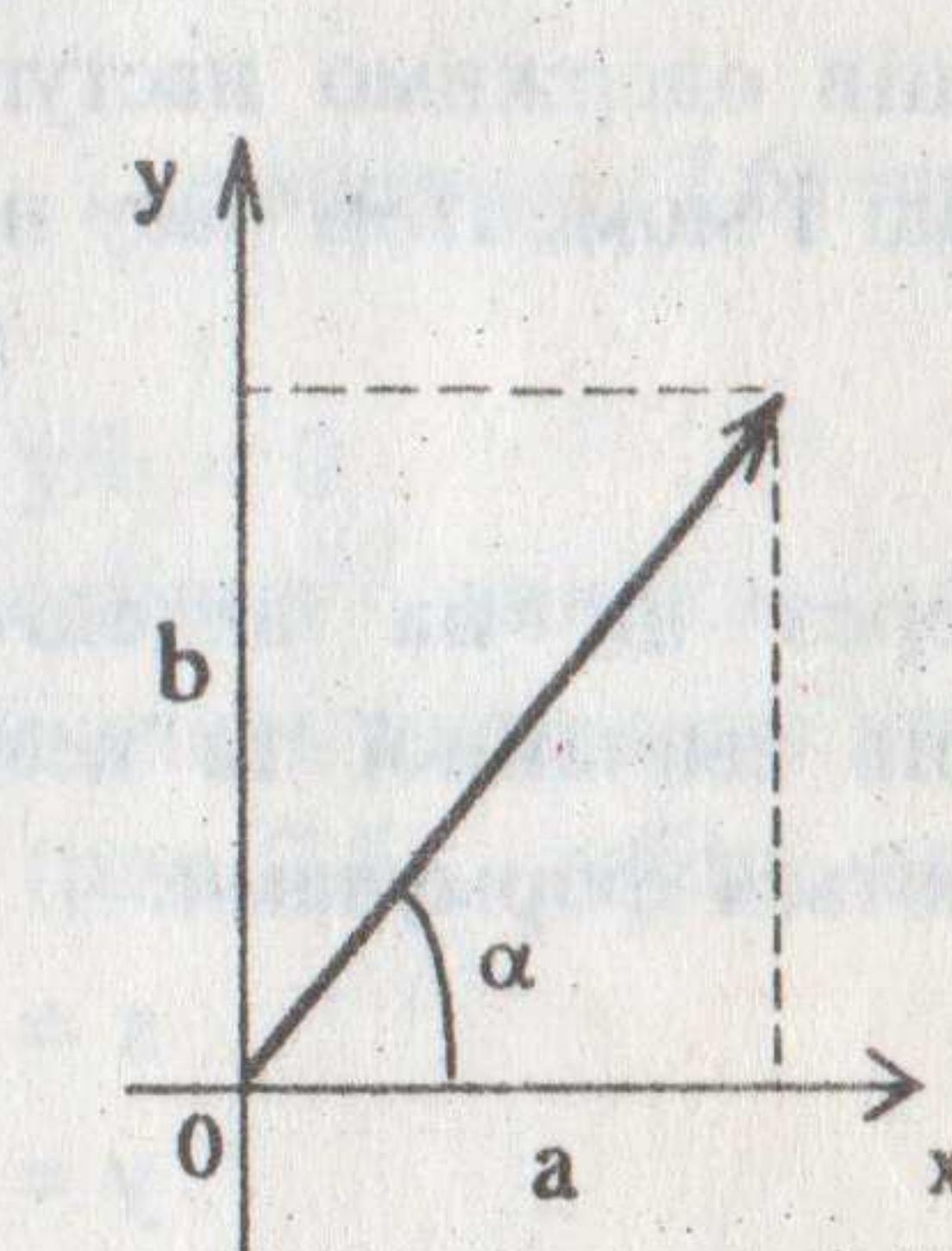


Рис.7.4

Розглянемо процес проходження світла через схему, представлена на рис.7.3. Лінійно поляризоване світло падає на кристалічну (фазову) пластинку, де розкладається на звичайний та незвичайний промені.

Для амплітуд цих променів на основі закону Малюса маємо (рис.7.4):

$$a = A \cos \alpha, \\ b = A \sin \alpha, \quad (7.1)$$

де A - амплітуда падаючого променя, α - кут між площину поляризації світла і швидким напрямом двозаломної пластинки.

Представимо коливання електричних векторів звичайної

(вздовж осі X) і незвичайної хвиль на вході в пластинку у вигляді:

$$\begin{aligned}x &= a \cos \omega t, \\y &= b \cos \omega t,\end{aligned}\quad (7.2)$$

де t - момент часу на вході світла в пластинку.

Звичайний промінь на проходження пластини, товщиною d , затратить час $n_3 d/c$, а незвичайний - $n_H d/c$. Позначаючи t - момент часу на виході з пластини, для звичайного і незвичайного променів одержимо наступні співвідношення між моментом часу на вході і моментом часу на виході:

$$\begin{aligned}t &= t + n_3 d/c, \\t &= t + n_H d/c.\end{aligned}\quad (7.3)$$

Через це на виході з пластини коливання електричних векторів звичайної та незвичайної хвиль на основі (7.2) і (7.3) описуються формулами:

$$\begin{aligned}x &= a \cos(\omega t - kn_3 d), \\y &= b \cos(\omega t - kn_H d),\end{aligned}\quad (7.4)$$

де $k = \omega/c$. Таким чином, між хвильами створюється різниця фаз $\Phi = kd(n_H - n_3)$. Вирази (7.4) можна представити у вигляді

$$\begin{aligned}x &= a \cos \xi, \\y &= b \cos (\xi - \varphi),\end{aligned}\quad (7.5)$$

де $\xi = \omega t - kn_3 d$. Рівності (7.5) можуть розглядатися як параметричне зображення еліпса, рівняння якого має вигляд

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{2xy}{ab} \cos \varphi = \sin^2 \varphi \quad (7.6)$$

Форма і орієнтація еліпса залежить від α і φ . Проаналізуємо цей вираз для кількох випадків.

Пластинка в чверть хвилі

При $d(n_H - n_3) = \lambda/4$, $\varphi = \pm\pi/2$ рівняння (7.6) приймає вигляд:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (7.7)$$

Це означає, що головні осі еліпса співпадають з головними осями кристала. При $a = b$, тобто при $\alpha = \pi/4$, рівняння (7.7) перетворюється в рівняння кола

$$x^2 + y^2 = a^2, \quad (7.8)$$

тобто на виході з пластинки виникає циркулярно поляризована хвиля.

Пластинка в півхвилі

При $d(n_H - n_3) = \lambda/2$, $\varphi = \pm\pi$ і рівняння (7.6) приймає вигляд:

$$(x/a + y/b)^2 = 0, \quad x/a + y/b = 0 \quad (7.9)$$

А значить, на виході з пластинки виникає лінійно поляризована хвиля, для якої тільки змінились квадранти площини XY, в яких відбувається коливання (рис.7.5), тобто площа поляризації повернулась на кут 2α .

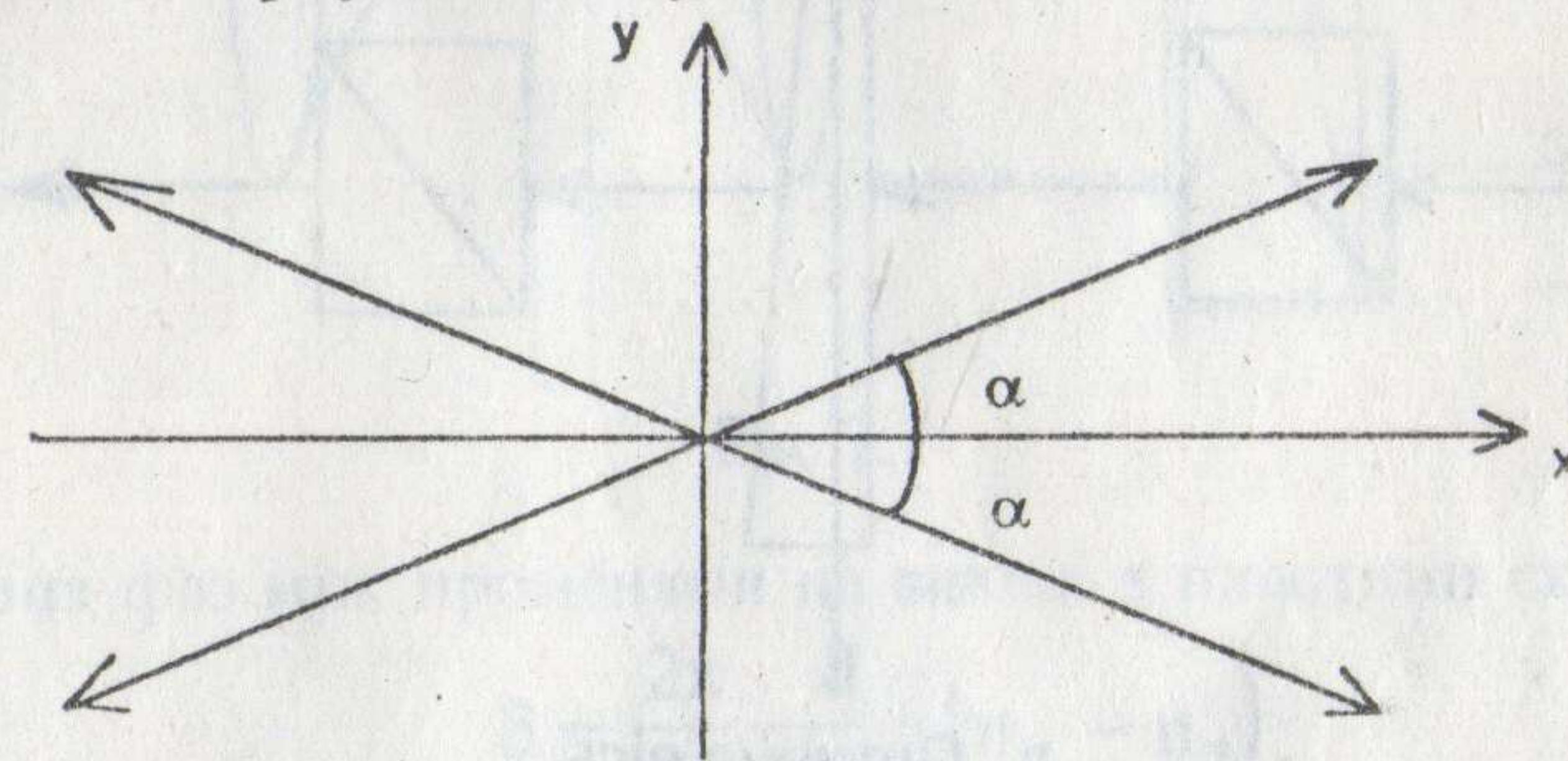


Рис.7.5

Пластинка в цілу хвилю

При $d(n_H - n_3) = m\lambda$, $\varphi = 2m\pi$ рівняння (7.6) приймає вигляд:

$$(x/a - y/b) = 0, \quad x/a - y/b = 0 \quad (7.10)$$

Значить, на виході буде лінійно поляризована хвиля з тією ж площею коливань вектора \vec{E} , що і на вході.

Інтерференція лінійно ортогонально поляризованих променів

Візьмемо кристалічну пластинку змінної товщини, оптична вісь якої направлена перпендикулярно променю, який через неї проходить (рис.7.6). Ніколь N_1 пропускає тільки коливання \tilde{E} , паралельні його головному напряму. На виході з пластинки K (через змінну товщину) виникає еліптично поляризоване світло з різною орієнтацією еліпсів. Аналізатор N_2 залишає від кожного коливання тільки проекцію вектора \tilde{E} на напрям, в якому він пропускає коливання. В результаті, при спостереженні через аналізатор N_2 пластинки K , яка освітлюється монохроматичним світлом, остання буде здаватись нерівномірно освітленою. При освітленні білим світлом виникає кольорове забарвлення поверхні кристалічної пластинки

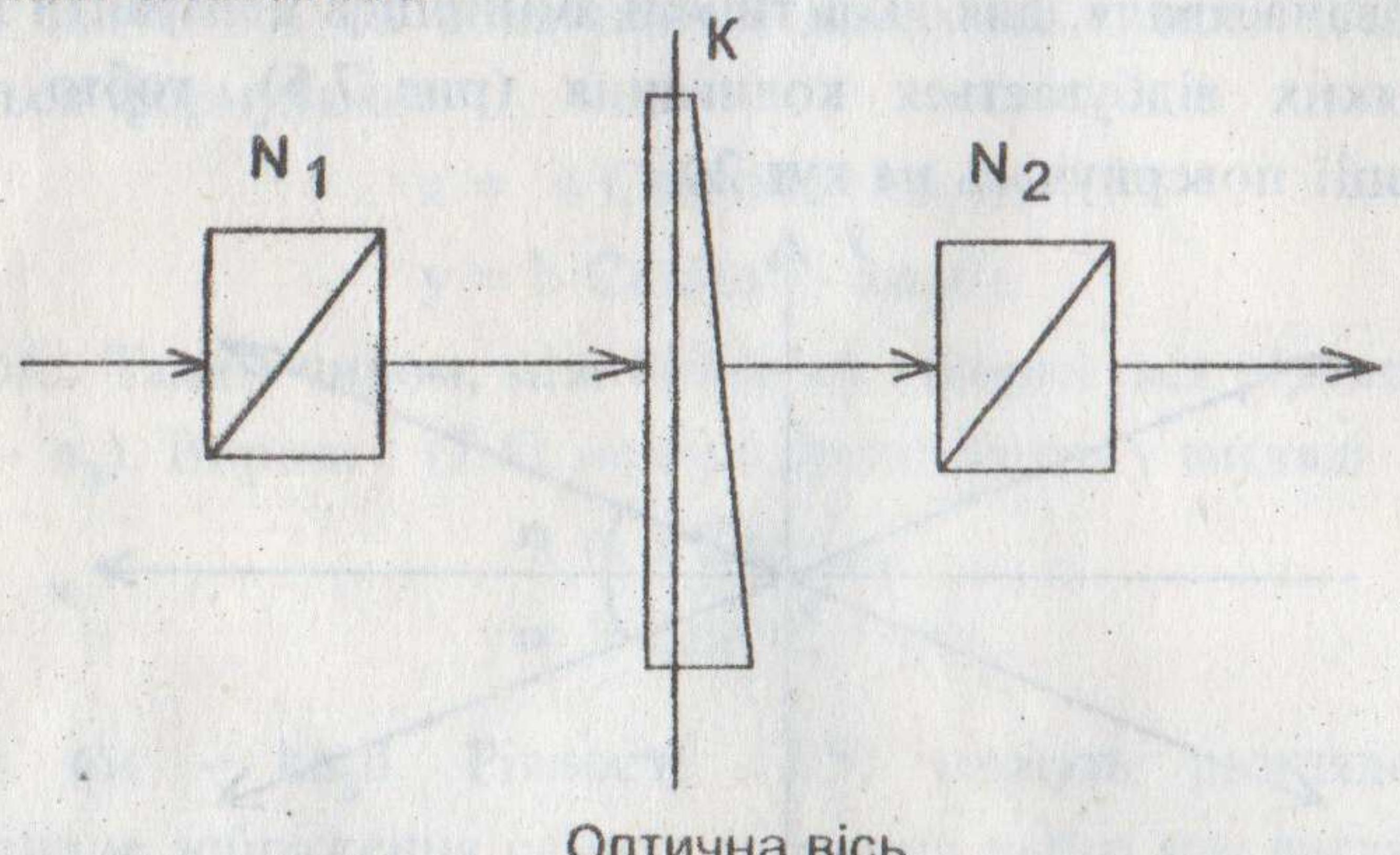


Рис.7.6

Інтерференція в променях, які сходяться.

На рис. 7.7 зображене хід променів в площині рисунка. Кристалічна пластина вирізана перпендикулярно оптичній осі. З рис.7.7 ясно, що картина проходження променів через кристалічну пластину має осьову симетрію. Напрям коливань електричного вектора незвичайної хвилі лежить в площині рисунка (зображені стрілками), а звичайної - перпендикулярно

(зображені точкою). Довжина шляху променя в пластині $h = d/\cos\psi$, де ψ - кут між променем і віссю. Різниця ходу між променями, які мають даний напрям, дорівнює

$$\Delta = \frac{d}{\cos\psi} (n_h - n_z) \quad (7.11)$$

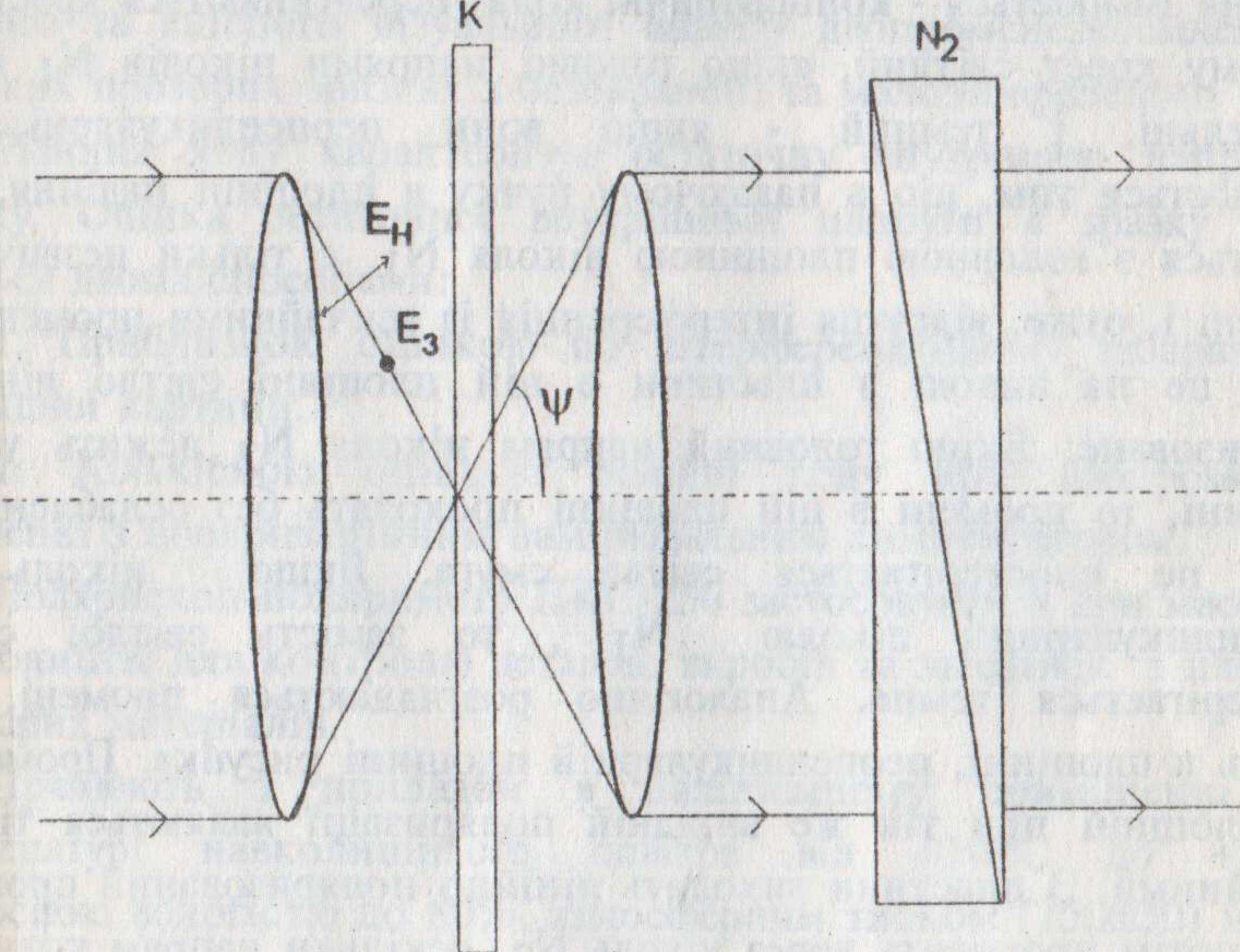


Рис.7.7

Різниця фаз між променями на виході з пластини складає

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d}{\cos\psi} (n_h - n_z), \quad (7.12)$$

тобто різна для різних кутів. Крім того, формула (7.12) показує, що картина симетрична відносно осі. Отже, під різними кутами до осі, на виході з пластини поширяються еліптично поляризовані промені з різними орієнтаціями еліпсів.

Якщо випромінювання монохроматичне і на шляху променів, які вийшли з пластини стоять ніколь N_2 , то спостерігаються темні і світлі кільця, які чергуються і, які відповідають проекціям електричного вектора на головний напрям

ніколя N₂. При повороті ніколя на $\pi/2$ свіtlі кільця стають темними, і навпаки. При освітленні білим свіtlом спостерігається сукупність забарвлених концентричних кіл. Якщо на шляху пучка променів, що падає на пластину, поставити ніколь N₁, то наглядна картина змінюється - концентричні кола перетинаються хрестом, причому хрест свіtlий, якщо головні напрями ніколів N₁ і N₂ паралельні, і темний - якщо вони перпендикулярні. Це пояснюється тим, що в падаючому пучку в площині падіння, яка збігається з головною площину ніколя N₁, є тільки незвичайні промені i, отже, відсутня інтерференція із звичайними променями. Через це на виході з пластини в цій площині свіtlо лінійно поляризоване. Якщо головний напрям ніколя N₂ лежить у цій площині, то промені в цій площині проходять без ослаблення і через це спостерігається свіtlа смуга. Якщо ніколь N₂ перпендикулярний ніколю N₁, то замість свіtlої смуги спостерігається темна. Analogічно розглядаються промені, які лежать в площині, перпендикулярній площині рисунка. Промені в цій площині при тій же вихідній поляризації являються тільки звичайними. З пластини виходить лінійно поляризований промінь, який потім проходить через ніколь N₂, оскільки напрям коливань його вектора E такий же, як і у незвичайного променя, що лежить в перпендикулярній площині. В результаті виникає свіtlа смуга, перпендикулярна свіtlій смузі від незвичайного променя. Сукупністю цих двох свіtlих смуг утворюється хрест, який перетинає концентричні забарвлени кола.

Вимірювання різниці шляху між двома взаємно перпендикулярно поляризованими променями використовується при різних дослідженнях в кристало-оптиці, металооптиці, при вивченні залишкових напруг в прозорих зразках, технологічному контролі оптичних деталей [6] і т.і. Одним з приладів, призначених для цієї мети, являється полярископ-поляриметр ПКС-250.

Лабораторна установка

Лабораторна работа проводиться на полярископі-поляриметрі ПКС-250.

Полярископ-поляриметр ПКС-250 призначається для кількісного та якісного візуального аналізу двопроменезаломлення в плоских прозорих зразках з безбарвного та малозабарвленого скла.

Різниця ходу характеризує остаточну внутрішню напругу в зразку. Оцінка остаточної внутрішньої напруги в зразку виконується двома способами:

1. Приближеною оцінкою по інтерференційному забарвленню наглядної картини.

2. Кількісною оцінкою різниці ходу при двопроменезаломленні з поляризаційним вимірювальним компенсатором.

Полярископ-поляриметр ПКС-250 застосовується при масовому виробництві для контролю деталей, виробів та заготовок з плоских прозорих матеріалів.

Працюють з приладом в напівтемному приміщенні при температурі навколошнього повітря від +10°C до +35°C, відносною вологістю до 80%, атмосферним тиском (750±30) мм рт. ст.

Технічні дані

Межа вимірювань різниці ходу при двопроменезаломленні з чвертьхвильовою фазовою пластинкою, нм	540
Похибка вимірювання різниці ходу при двопроменезаломленні з компенсатором Сенармона, нм	±10
Ціна поділки шкали лімба вимірювальної головки	1°
Ціна поділки відлікового пристрою	0,1°
Свіtlовий діаметр матового екрану, мм	300
Розмір поля спостереження, мм	250
Кут обертання лімба вимірювальної головки	360°
Максимальна відстань вимірювальної головки з аналізатором від матового екрану, мм, не менше ніж	480

Джерело світла - лампа прожекторна ПЖ 220, Вт	500
Напруга живлення, В	220
Частота, Гц	50
Споживана потужність, Вт, не більше ніж	650
Габаритні розміри, мм, не більше	
довжина	600
ширина	680
висота	900
Висота столу від підлоги, мм, не більше ніж	675
Вага приладу, кг, не більше	43

Полярископ-поляриметр ПКС-250 складається з слідуючих головних частин: освітлювача 4, вимірюальної головки з аналізатором 1, столика 3, підйомного механізму 2 та основи 5 (рис. 7.8)

Оптична схема (рис. 7.9)

Світло від джерела 1 проходить через конденсорну систему 2,3, лінійний поляризатор 5, однохвильову фазову пластинку 6 та матове скло 7, на якому розташований дослідний зразок, в якому випромінювання зазнає двопроменезаломлення.

Аналізатор 8 (11 в режимі поляриметра, 12 - світлофільтр) приводить коливання звичайного та незвичайного променів в одну площину, внаслідок чого відбувається інтерференція світла. Складання коливань приводить до збільшення інтенсивності світла для одних довжин хвиль та до ослаблення для других довжин хвиль, внаслідок чого виникає забарвлення поля зору. Колір інтерференційної картини залежить від величини різниці ходу, придбаної променями в даному зразку.

Однохвильова фазова пластинка 6 (9 в режимі поляриметра) вносить різницю ходу променів 572 нм і встановлена таким чином, що головний напрям швидкого поширення пластинки складає кут 45° з площею поляризації лінійного поляризатора (рис.7.10).

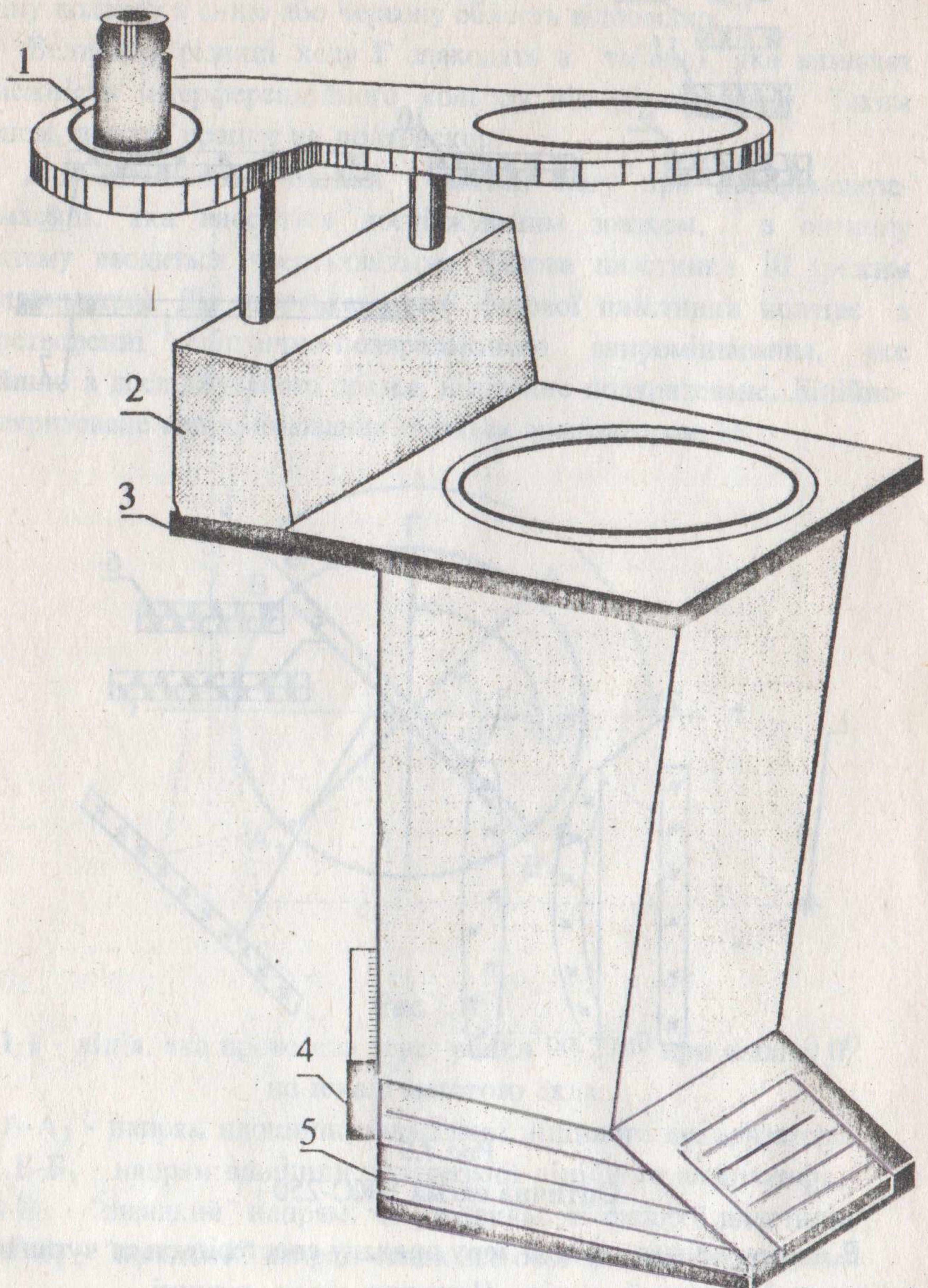


Рис.7.8

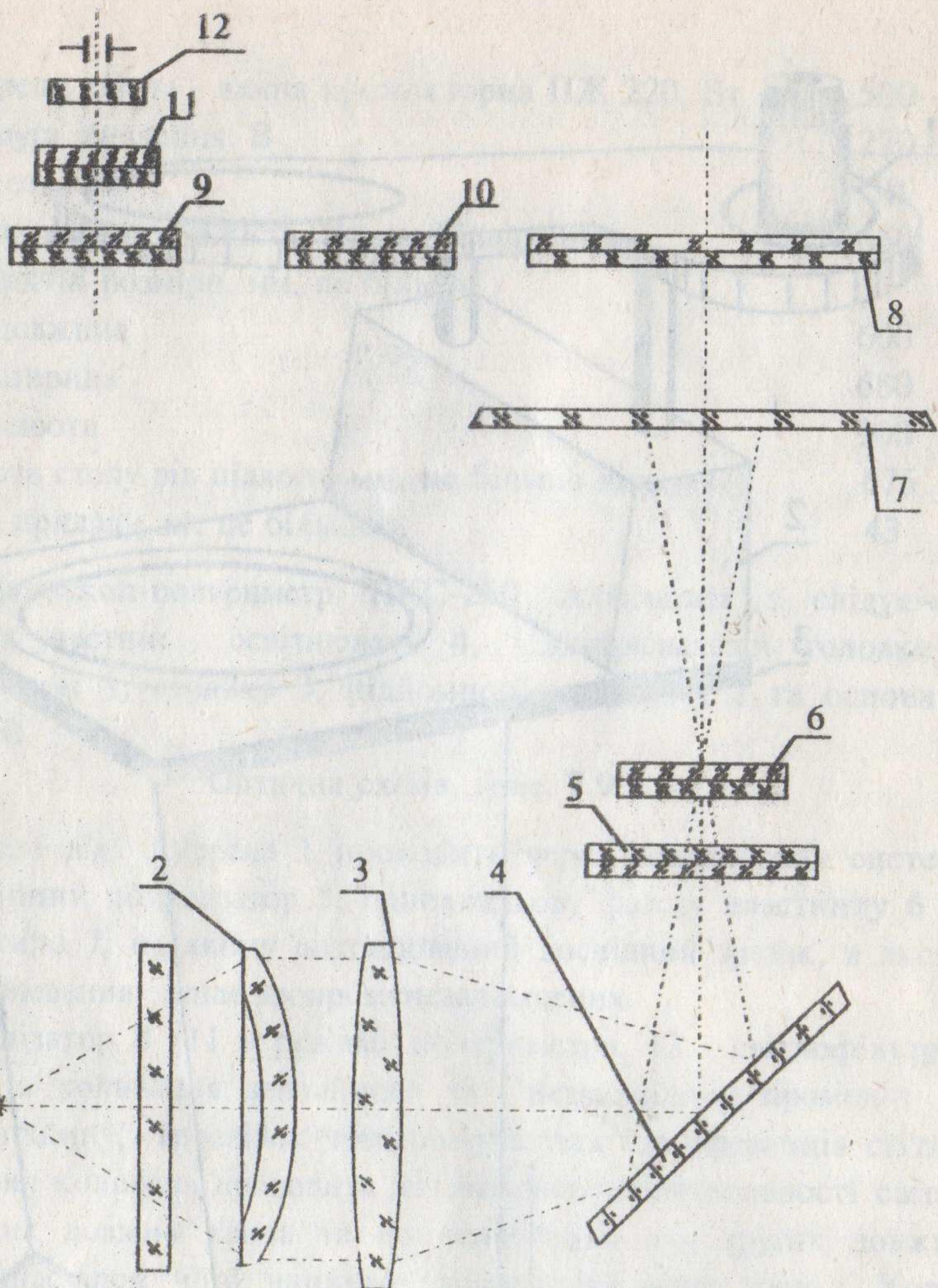


Рис.7.9
Оптична схема ПКС-250

В цьому випадку в полі зору приладу спостерігається чутливий пурпурно-фіолетовий колір. Незначна зміна різниці

ходу (на 12-15 нм) в більшу або меншу сторону викликає різку зміну кольору в синю або червону область відповідно.

Величину різниці ходу Γ знаходить з таблиці, яка визначає залежність інтерференційного кольору від різниці ходу. Таким чином, прилад працює як полярископ.

Для кількісної оцінки різниці ходу при двопроменезаломленні, яка вноситься досліджуваним зразком, в оптичну систему вводиться чвертьхвильова фазова пластинка 10 (режим поляриметра). Дія чвертьхвильової фазової пластинки полягає в перетворенні еліптично-поляризованого випромінювання, яке вийшло з досліджуваного зразка, в лінійно-поляризоване. Лінійно-поляризоване випромінювання гаситься аналізатором 11.

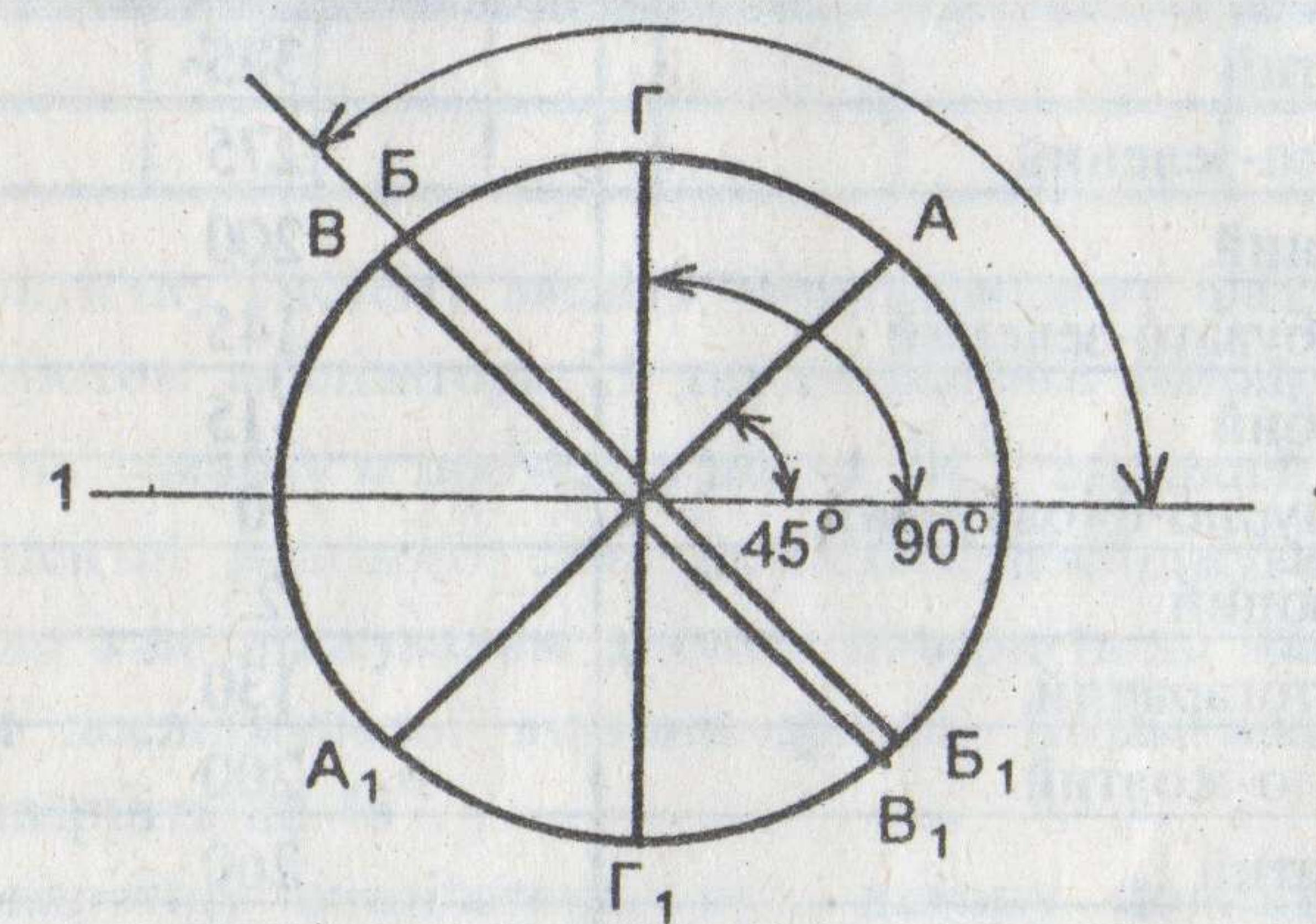


Рис.7.10

1-1 - лінія, яка проведена через риски 90-270 0 при відліку 0 0
по шкалі матового скла,

А-А₁ - напрям площини полярізації лінійного поляризатора,

Б-Б₁ - напрям площини полярізації лінійного аналізатора,

В-В₁ - "швидкий" напрям чвертьхвильової фазової пластинки,

Г-Г₁ - "швидкий" напрям однохвильової фазової пластинки.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Визначте різницю ходу між звичайним і незвичайним променями в зразках по кольору інтерференційної картини, використовуючи ПКС-250 як полярископ. Для цього:

1. Ввімкніть лампу освітлювача в мережу змінного струму 220В. В робочу позицію введіть аналізатор 250 мм і однохвильову фазову пластину (ручку, яка знаходиться зліва на столику 3 (рис.6.8) встановіть проти напису НАБЛЮДЕНИЕ)

Таблиця 7.1.

Інтерференційні кольори в досліджуваному зразку
в залежності від різниці ходу

Кольори	Різниця ходу Γ , нм
Жовтий	325
Жовто-зелений	275
Зелений	200
Голубувато-зелений	145
Голубий	115
Пурпурно-фіолетовий	0
Червоний	25
Жовтогарячий	130
Світло-жовтий	200
Жовтий	260
Білий	310

2. Помістіть досліджуваний зразок на середину матового скла. Спостерігайте через аналізатор і повертайте матове скло з досліджуваним зразком до одержання кольору, відповідного найбільшій різниці ходу, користуючись таблицею 7.1.

3. Використовуючи табл. 7.1, визначте по кольору інтерференційної картини різницю ходу Γ в досліджуваних зразках і запишіть в табл.7.2.

Визначте різницю ходу між звичайними і незвичайними променями при роботі ПКС-250 в режимі ПОЛЯРИМЕТРІЙ.

Для цього:

1. Введіть вимірювальну головку в робоче положення. Ручку, яка знаходитьсь зліва на столику 3 (рис.6.8) встановіть проти напису ИЗМЕРЕНИЕ . Це відповідає виведенню однохвильової фазової пластинки 6 з ходу променів.

Таблиця 7.2

Номер вимірюв.	Γ_i , нм	Γ_{ei} , нм	$\Delta\Gamma_i$, нм	d_i , $\mu\text{м}$	$(n_H - n_3)$, нм/см	Категорія скла
1	275				0,05	
2	200				0,9	
3	275	273	2		0,3	
4	310				0,6	
5	260				0,9	

2. В оптичну систему введіть чвертьхвильову фазову пластинку 10. Поворотом аналізатора 11 вимірювальної головки поле зору встановіть на темноту и проведіть відлік Θ_1^o по шкалі.

3. В центрі матового скла помістіть досліджуваний зразок. Матове скло з досліджуваним зразком поверніть до максимального затемнення досліджуваної ділянки зразка. Потім матове скло з зразком поверніть на 45^o .

4. Поворотом аналізатора, при даному положенні зразка, добийтесь максимального затемнення просвітлених ділянок. Потім проведіть відлік по шкалі аналізатора вимірювальної головки. Різниця між відліками Θ_2 і Θ_1 дає кут Θ повороту аналізатора вимірювальної головки.

5. Різницю ходу в досліджуваних зразках визначте по формулі $\Gamma_{ei} = 3\Theta_i$ і запишіть в табл. 7.2.

6. Визначте похибки $\Delta\Gamma_i$ вимірювання різниці ходу зразків в режимі спектроскопії, прийнявши вимірювання в режимі поляриметрії за еталонне і запишіть в табл. 7.2.

7. Знаючи різницю ходу зразка Ге і його товщину в сантиметрах, визначте різницю значень показників заломлення середовища для звичайного і незвичайного променів по формулі:

$$(n_3 - n_H) = \Gamma_{ei}/d_i$$

По різниці $(n_3 - n_H)$ визначте категорію скла зразка по двопроменезаломленню. Результат запишіть в табл. 7.2. Для визначення категорії скла використовуйте табл. 7.3 - 7.4.

Зміст звіту

В звіті повинні бути приведені:

- оптична схема приладу ПКС-250;
- в векторному уявленні пояснений механізм проходження лінійно поляризованого світла через оптичні елементи приладу (фазову пластинку, аналізатор);
- робочі формули з теоретичної частини;
- таблиця з експериментальними значеннями;
- розрахункові формули і результати розрахунку похибок..

Таблиця 7.3

Двопроменезаломлення для безбарвого і кольорового скла

Категорія скла	Найбільша різниця ходу на 1 см в нанометрах
1	2
2	6
3	10
4	20
5	50

Таблиця 7.4

Двопроменезаломлення скла кварцевого оптичного

Категорія скла	Різниця ходу, нм/см, не більше
I	30
II	50
III	70
Для скла марки КИ	100

Література

1. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976.
2. Калитесвский Н.И. Волновая оптика. М.: Наука, 1971.
- Гл.3.
3. Гвоздева Н.П., Кульянова В.І., Леушина Т.М., Физическая оптика. М.:Машиностроение, 1991.

Додаткова література

4. ГОСТ 9411-75. Стекло оптическое цветное.
5. ГОСТ 13659-78. Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические характеристики. Основные параметры.
6. ГОСТ 3519-80. ГОСТ 23136-78.
7. Воронкова Е.М., Гречушкин Б.Н. Дистлер Г.И., Петров И.П. Оптические материалы для ИК-техники. М.: Наука, 1965.
8. Шаскольская М.П. Кристаллография. М.:Высшая школа, 1976.

Лабораторна робота № 8

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВОРОТУ ПЛОШИНІ ПОЛЯРИЗАЦІЇ В ОПТИЧНО АКТИВНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Мета роботи:

- 1) закріпити лекційний матеріал по розділу "Феноменологічна теорія повороту площини поляризації світла";
- 2) експериментально дослідити поворот площини поляризації в оптично активних матеріалах;
- 3) навчитись проводити вимірювання на сахариметрі СУ-3.

Завдання

1. Ознайомитись з основними положеннями елементарної теорії повороту площини поляризації.
2. Вивчити будову сахариметра СУ-3.
3. Провести спостереження явища повороту площини поляризації в право- і лівоповоротних оптично активних матеріалах.

4. Дослідити залежність кута повороту площини поляризації світла у водному розчині цукру від концентрації цукру.

5. Зробити обробку результатів вимірювань, побудувати графік залежності кута повороту площини поляризації світла від концентрації розчину.

6. Аproxимувати математичну залежність, вказану в п.5.

Загальні положення

При проходженні лінійно поляризованого світла через деякі оптичні середовища виникає явище повороту площини поляризації.

На рис. 8.1 показано положення електричного вектора \vec{E} на вході електромагнітної хвилі в оптичне середовище і на виході з нього. З рисунка видно, що вектор \vec{E} по мірі проходження світла через середовище повернувся на деякий кут ϕ . Це і є поворот площини поляризації.

Явище повороту площини поляризації вперше було виявлено Араго в 1811 році при вивченні двозаломлення в кварці.

Здатність речовини повернати площину поляризації світла при поширенні його через неї називається (природною) оптичною активністю.

Існує багато кристалів, аморфних тіл, рідин, які мають оптичну активність. Як приклад, можна привести скіпидар, камфору, нікотин, розчин цукру, біологічні молекули, рідкі кристали.

На основі експериментальних досліджень було встановлено, що існує два види оптично активних речовин: право- та лівоповоротні. Прикладом є дві модифікації кварцю, одна з яких є лівоповоротною, друга - правоповоротною.

Досліди з кварцевими пластинками різної товщини показали, що для даної довжини хвилі величина кута повороту площини поляризації прямо пропорціональна довжині шляху в оптично

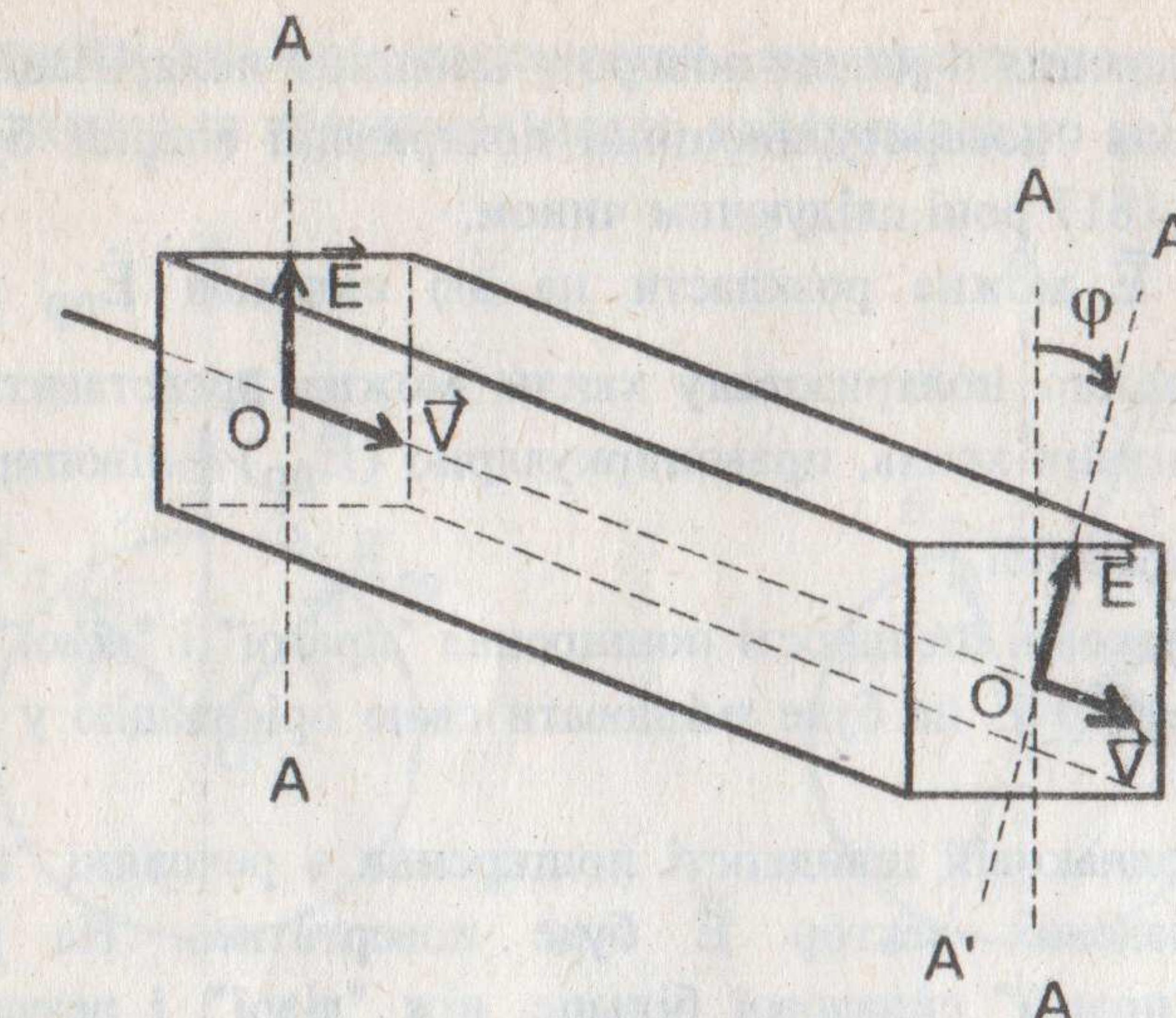


Рис.8.1

активному середовищі

$$\phi = \alpha d, \quad (8.1)$$

де α - коефіцієнт пропорціональності, який називається "постійною повороту" і залежить від роду речовини, температури і довжини хвилі світла, яке пройшло через неї; d - довжина шляху променя в оптично активному середовищі - товщина пластинки.

На основі дослідів, проведених Біо з розчинами в 1931 році, встановлено вираз для кута повороту площини поляризації в розчинах оптично активних речовин в неактивних розчинниках:

$$\phi = [\alpha] d c, \quad (8.2)$$

де $[\alpha]$ - питома постійна повороту, d - шлях поляризованого світла в розчині, c - концентрація розчину.

Біо встановив також приблизну залежність між $[\alpha]$ і довжиною хвилі λ :

$$[\alpha] \approx \frac{1}{\lambda^2}, \quad (8.3)$$

яка характеризує так звану поворотну дисперсію.

Пояснення Френеля повороту площини поляризації.

Пояснення повороту площини поляризації вперше було дано Френелем у 1817 році слідуючим чином.

Вектор \vec{E} можна розкласти на дві складові $\vec{E}_{\text{пр}}$ і $\vec{E}_{\text{л}}$, а точніше, лінійно поляризовану хвилю можна представити сумою двох когерентних хвиль, правоциркулярно ($\vec{E}_{\text{пр}}$) і лівоциркулярно ($\vec{E}_{\text{л}}$) поляризованої.

При однаковій швидкості поширення "правої" і "лівої" хвиль у речовині, вектор \vec{E} не буде змінювати свою орієнтацію у просторі (рис.8.2,а).

При неоднаковій швидкості поширення в речовині "правої" і "лівої" складових вектор \vec{E} буде повертатись. На рис.8.2,б швидкість "правої" складової більше, ніж "лівої", і результируючий вектор \vec{E} при цьому повертається вправо.

Таким чином, основна причина повороту площини поляризації світлової хвилі - властивість речовини, яка полягає в тому, що воно з неоднаковою швидкістю пропускає через себе циркулярно поляризовані електромагнітні хвилі з правим і лівим обертанням, тобто показники заломлення правоциркулярно і лівоциркулярно поляризованих хвиль неоднакові: $n_{\text{пр}} \neq n_{\text{л}}$.

Теорія Френеля пояснює поворот площини поляризації в оптично активному середовищі. Однак, у цій теорії нічого не сказано про механізм, який лежить в основі цього повороту. Явище повороту площини поляризації пояснюють взаємодією електромагнітної хвилі з молекулами середовища. При цьому приймаються до уваги протяжність самої молекули і її структура, хоча її розмір приблизно в тисячу разів менше довжини хвилі світла у видимому діапазоні [1].

Встановлено, що явище повороту площини поляризації пояснюється не тільки неоднаковою швидкістю поширення в середовищі електромагнітних хвиль з правою і лівою циркулярною поляризацією. Це явище може також спостерігатися

і при рівності вказаних швидкостей, але при різному поглинанні лівоциркулярно та правоциркулярно поляризованого світла.

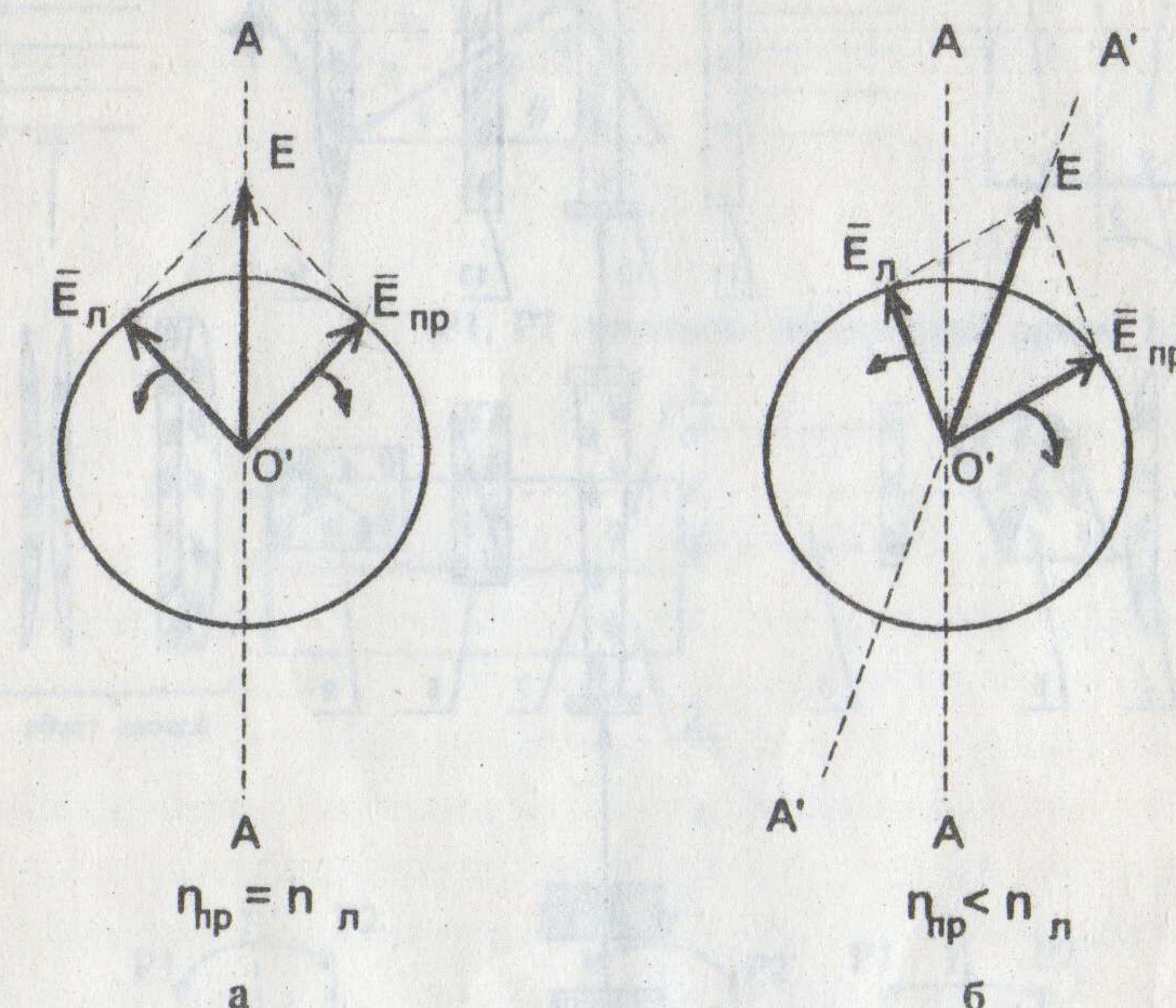


Рис.8.2

Дійсно, якщо при поглинанні світла в середовищі довжина вектора $\vec{E}_{\text{пр}}$ на рис.8.2,а буде зменшуватися швидше, ніж довжина вектора $\vec{E}_{\text{л}}$, то навіть при однаковій кутовій швидкості їх повороту, сумарний вектор \vec{E} буде повертатися по годинниківій стрілці, тобто буде спостерігатися поворот площини поляризації.

Лабораторна установка.

Лабораторна установка зібрана на базі приладу СУ-3 - універсального сахариметру.

Цей прилад дозволяє з високою точністю вимірювати кут, на який повертається площа поляризації електромагнітної світлової хвилі в оптично активному середовищі.

Оптична система сахариметру показана на рис.8.3.

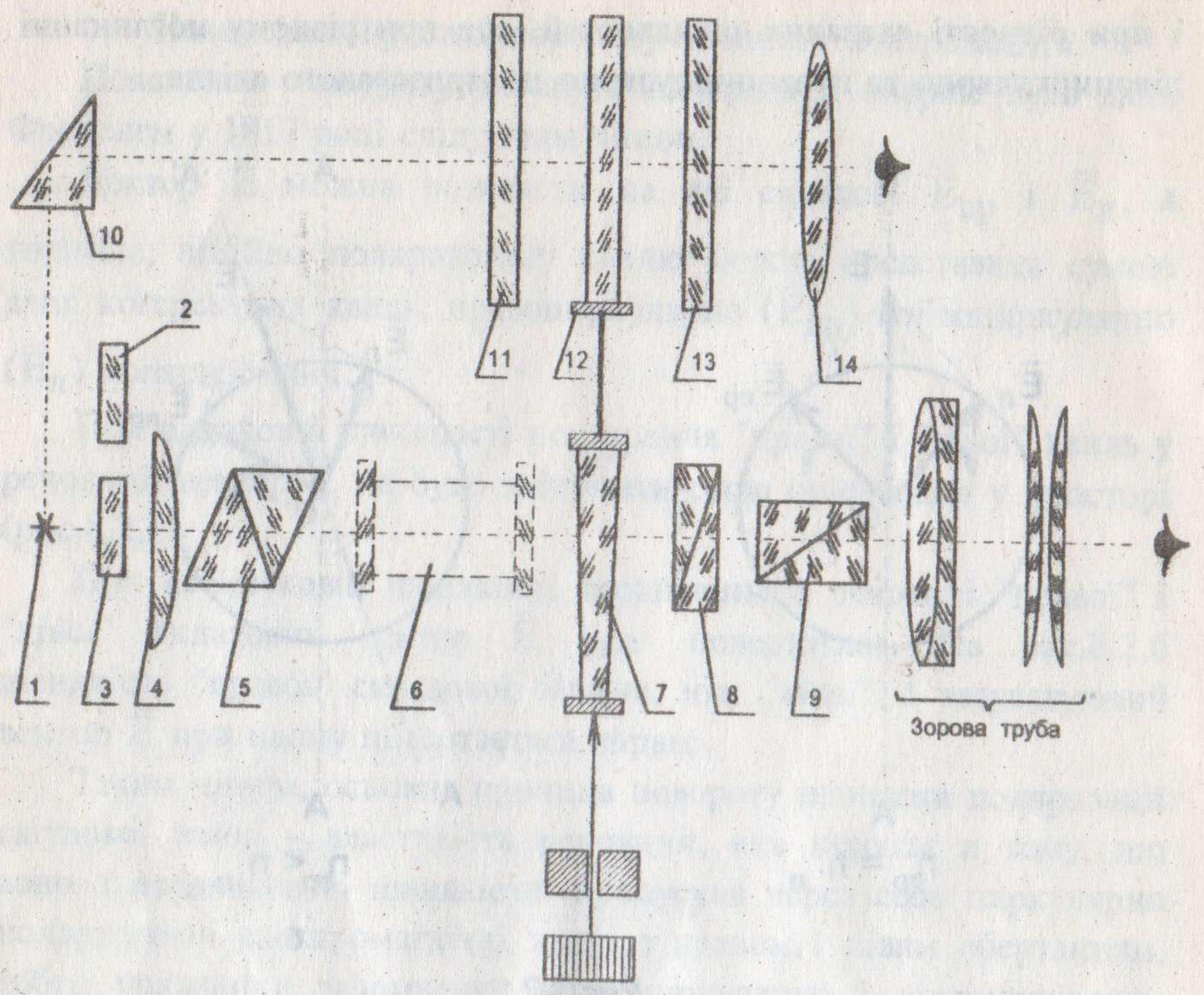
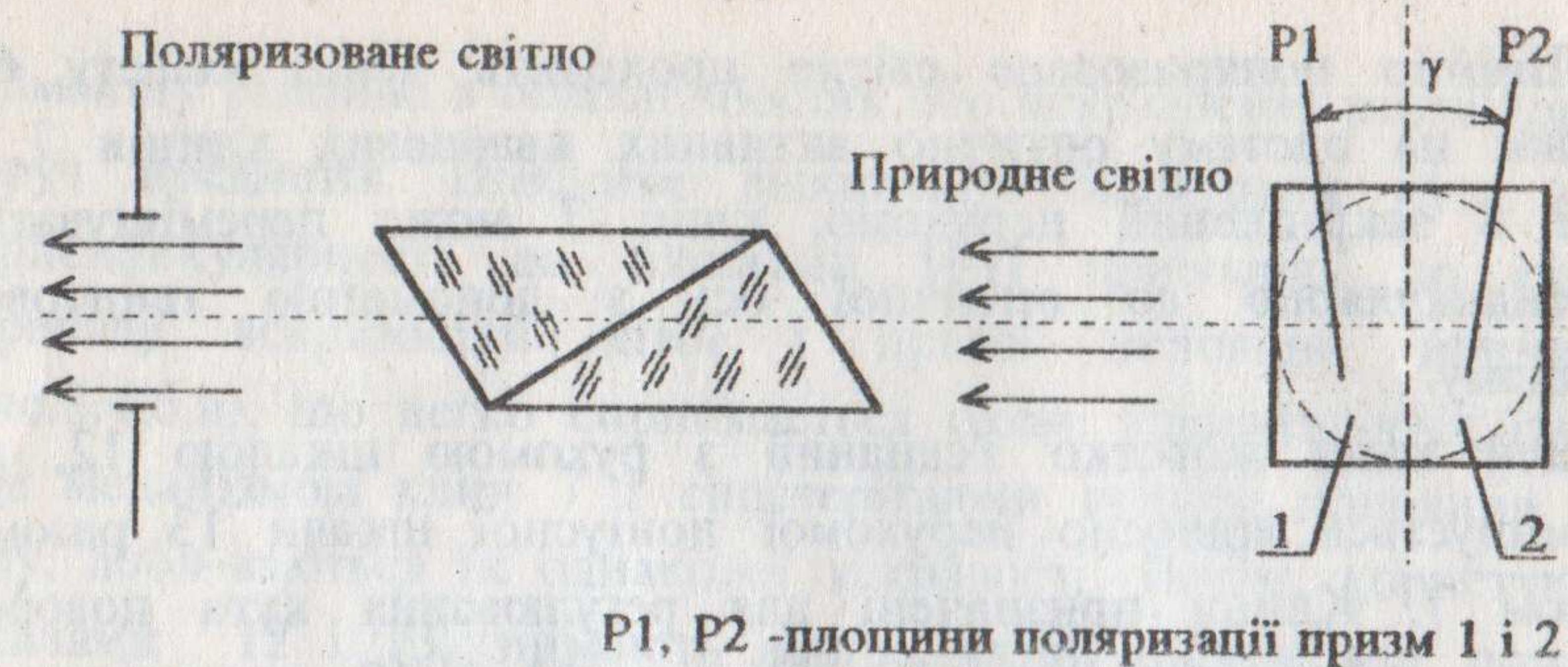
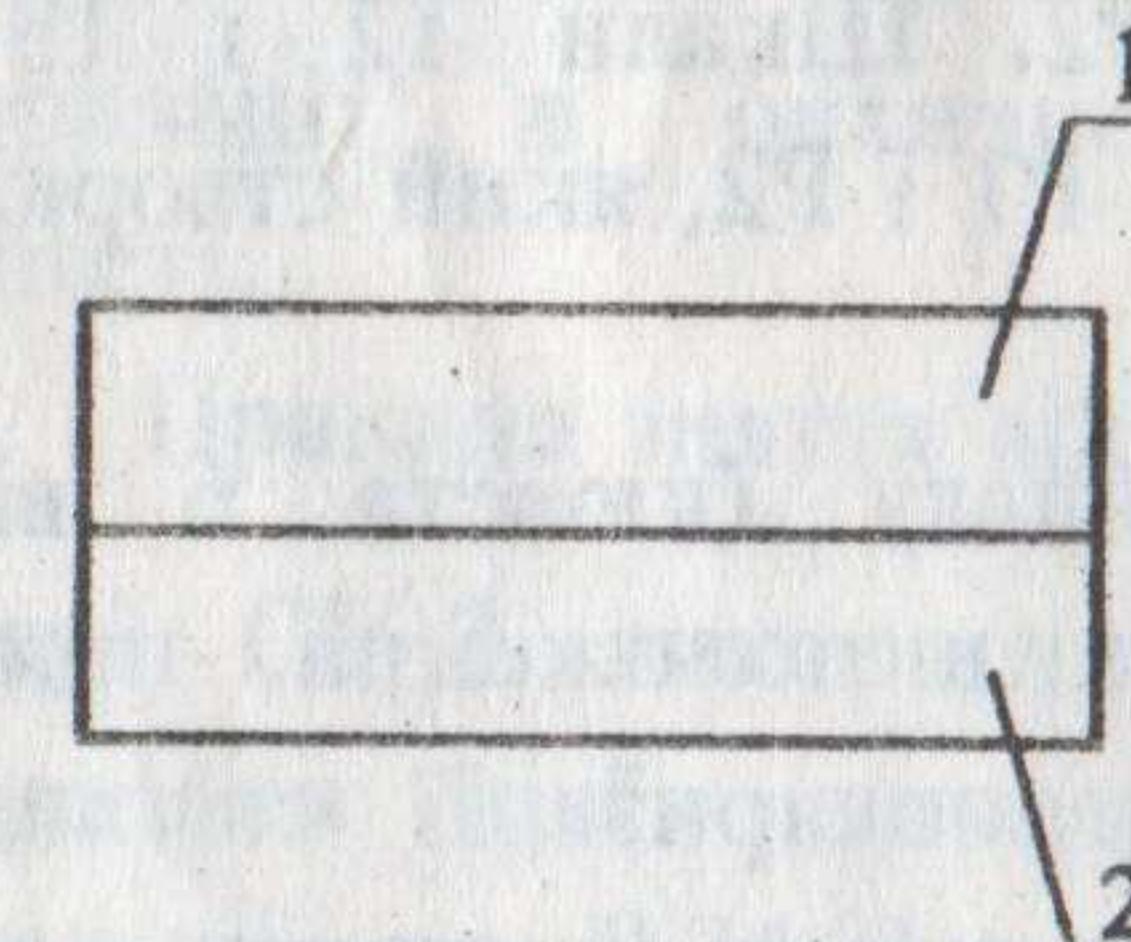


Рис.8.3

Принцип дії сахариметра складає наступне. Світловий потік від лампи 1 проходить світлофільтр 3 (або, при необхідності, матове скло 2) і перетворюється конденсором 4 в пучок паралельних променів, які направляються в поляризаційну призму 5. Поляризаційна призма 5 складається з двох ідентичних поляризаційних призм 1 і 2 (рис.8.4,а), кожна з яких являє собою "склейку", показану на рис. 8.4,а в розрізі. Обидві призми перетворюють природне світло, яке на них падає, в лінійно поляризоване. Площини поляризації цих призм Р1 і Р2 (на рис.8.4,а вони показані стрілками) нахилені одне до одного на малий кут $\gamma = 2\ldots 30^\circ$.



P1, P2 - площини поляризації призм 1 і 2



а

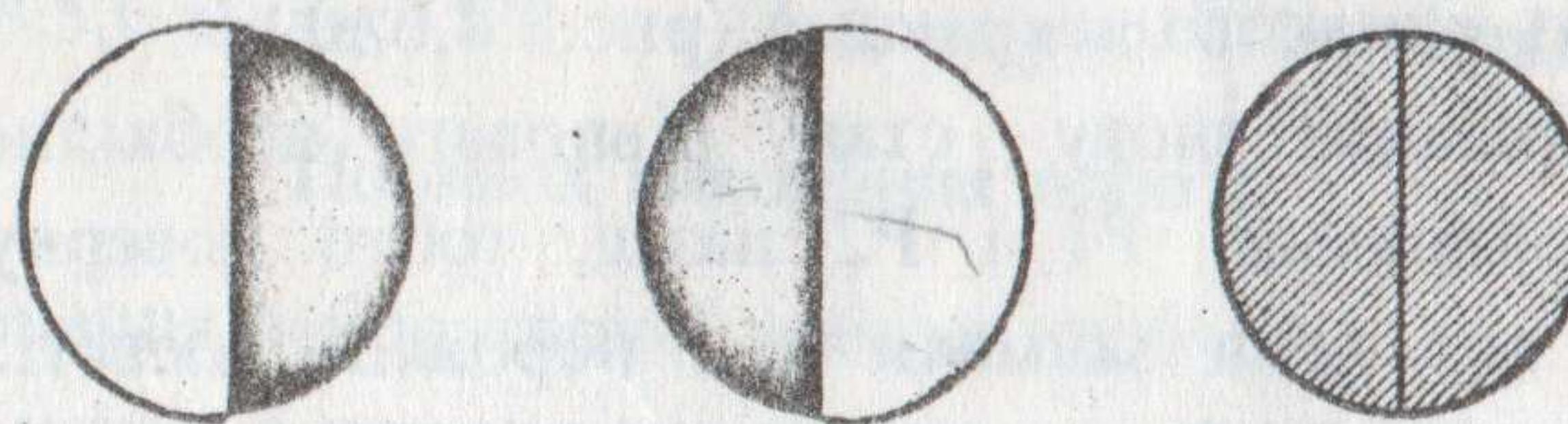
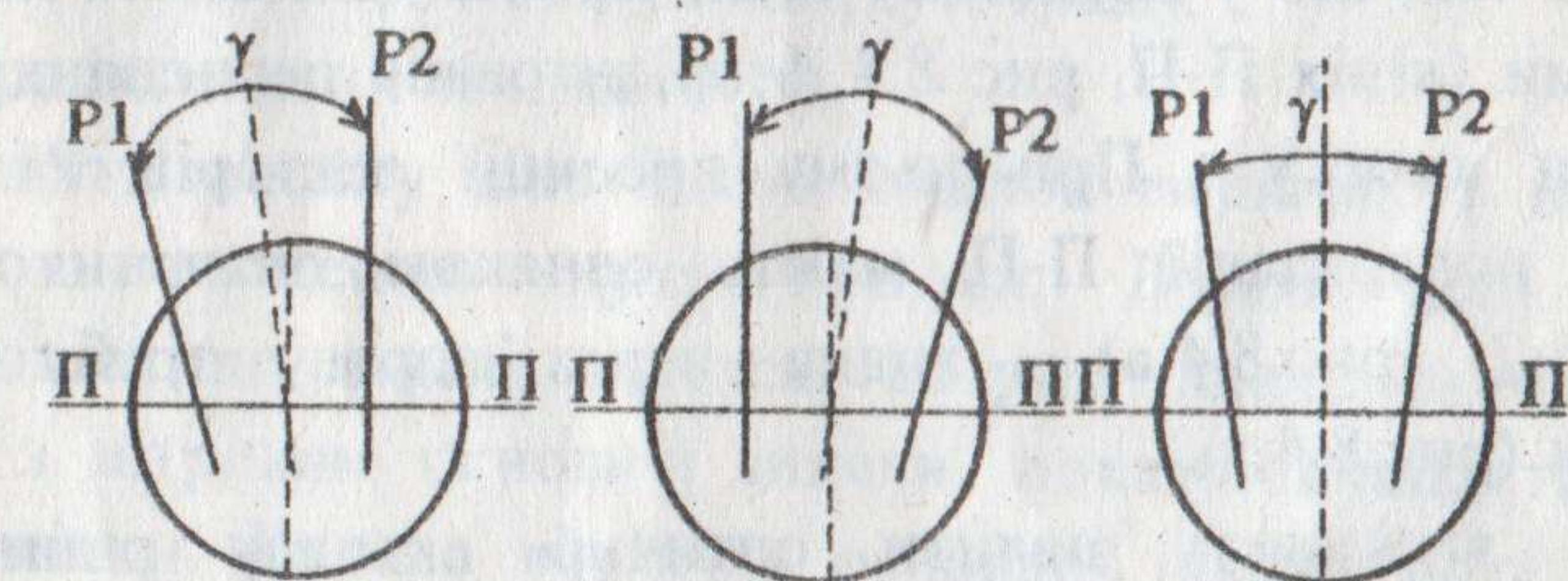


Рис.8.4

Лінійно поляризоване світло проходить через кювету 6 і попадає на систему оптично активних кварцевих клинів 7, 8. Клин 8 закріплений нерухомо, клин 7 може переміщуватись перпендикулярно до оптичної осі з допомогою гвинтового механізму.

Цей клин жорстко з'єднаний з рухомою шкалою 12, яка переміщується відносно нерухомої ноніусної шкали 13 разом з кlinом 7. Кlinи призначені для регулювання кута повороту площин поляризації P1 і P2. Шкали 12 і 13 показують кут повороту площин поляризації P1 і P2, який створюється klinами 7 і 8.

У вихідному стані приладу (кювета 6 відсутня або не заповнена) klin 7 приводять в положення, при якому система klinів не повертає площину поляризації світла, яке проходить через нього. Шкала 12 показує при цьому нуль.

Поляризаційна призма 9, яка виконує роль аналізатора, розміщена так, що у вихідному стані приладу площа поляризації цієї призми (лінія П-П, рис 8.4,г) орієнтована перпендикулярно до бісектриси кута γ . При цьому проекції векторів P1 і P2 на площину поляризації П-П мають однакові значення і обидві призми 1,2 (рис.8.4,а) видно через зорову трубу однаково яскравими (рис.8.4,г).

Якщо в кювету налити оптично активну рідину, то у відповідності з виразом (8.2) вона поверне площини поляризації P1 і P2 на деякий кут Φ . При цьому ліва і права половини призми 5 уже не будуть однаково яскравими (рис.8.4,б,в).

Для одержання знову стану рівноваги необхідно повернути площини поляризації P1 і P2 назад, тобто повернути їх в те положення, яке вони займали при порожній кюветі. Цю задачу виконують klinи 7 і 8.

Точна установка кварцевого klinу 7, при якому бісектриса кута γ займає положення, перпендикулярне до площини П-П (рис.8.4,г), забезпечується здатністю людського ока сприймати

найменшу різницю в освітленостях або яскравостях розташованих поруч предметів. Невелике відхилення бісектриси кута γ від перпендикулярності до площини П-П приводить до різкого перепаду яскравостей лівої і правої половини призми 5 (рис.8.4,б,в), що легко сприймається оком. Переміщуючи гвинтовим механізмом klin 7 і спостерігаючи вказані половини поля зору, добиваються їх однакової яскравості. Потім, користуючись шкалами 12 і 13, знімають відлік, який показує кут повороту площини поляризації в оптично активній речовині, яка знаходиться в кюветі.

Правила зняття відліку з шкали

В сахариметрі СУ-3 використовується міжнародна цукрова шкала. Одна поділка цієї шкали відповідає куту поворота площини поляризації на 0,3462 . Таким чином, кут повороту площини поляризації можна визначити по формулі

$$\Phi = 0,3462 {}^{\circ}S \text{ [кут. град.],}$$

де - ${}^{\circ}S$ відлік, знятий зі шкали 12.

При знятті відліку ціле число поділок визначають на нижній шкалі по положенню нуля ноніуса. Десяті долі поділки відраховуються по шкалі ноніуса. Штрих шкали ноніуса, який співпадає з штрихом основної шкали, показує кількість десятих частин поділки. Вправо від нуля основної шкали йдуть поділки позитивного кута повороту площини поляризації, вліво - негативного.

На рис. 8.5,б відлік $S^0 = +11,8$, на рис. 8.5,в відлік ${}^{\circ}S = -8,3$.

Порядок виконання роботи

Для виконання лабораторної роботи необхідно:

- ознайомитись з принципом дії сахариметра;
- знайти розташування оптичних елементів приладу, зокрема, окуляра зорової труби, окуляра відлікового пристрою, мікрометричного гвинта переміщення klinа 7;
- навчитись знімати відлік показань приладу.



Рис.8.5

1. Спостереження повороту площини поляризації в кварцевих пластинах.

На двох даних викладачем зразках оптично активних кварцевих пластин визначити, яка з них є право-, а яка лівоповоротною, а також виміряти кути повороту площини поляризації в кожній пластині Φ_L і Φ_P . Результати записати в таблиці 8.1 і 8.2.

Таблиця 8.1

i	Φ_{Li}	$\Delta\Phi_{Li} = \Phi_{Li} - \bar{\Phi}_L$	$\Delta^2\Phi_{Li} = (\Phi_{Li} - \bar{\Phi}_L)^2$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
Σ	$\Sigma \Phi_{Li}$	$\Sigma \Delta\Phi_{Li}$	$\Sigma \Delta^2\Phi_{Li}$
$\beta=0.8$	$\bar{\Phi}_L =$		$\sigma\bar{\Phi}_L =$
	$\Phi_L =$		

50

Обчислити середнє значення кута

$$\bar{\Phi}_L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Phi_{Li}, n = 7,$$

і характеристики точності вимірювання:

- середнє квадратичне відхилення (оцінка точності вимірювань)

$$\sigma_{\Phi_L} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta^2\Phi_{Li}}$$

- середнє квадратичне відхилення середнього значення кута (оцінка точності наближення середнього значення кута до істинного)

$$\sigma_{\bar{\Phi}_L} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sigma_{\Phi_L},$$

- довірчий інтервал, всередині якого з довірчою ймовірністю $\beta = 0.8$ знаходиться дійсне значення кута Φ

$$\bar{\Phi}_L - \epsilon_{\beta} < \Phi_L < \bar{\Phi}_L + \epsilon_{\beta},$$

де абсолютна похибка або напівширина довірчого інтервалу

$$\epsilon_{\beta} = t_{\beta} \sigma_{\bar{\Phi}_L}.$$

Таблиця 8.2

i	Φ_{Pi}	$\Delta\Phi_{Pi} = \Phi_{Pi} - \bar{\Phi}_P$	$\Delta^2\Phi_{Pi} = (\Phi_{Pi} - \bar{\Phi}_P)^2$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
Σ	$\Sigma \Phi_{Pi}$	$\Sigma \Delta\Phi_{Pi}$	$\Sigma \Delta^2\Phi_{Pi}$
$\beta=0.8$	$\bar{\Phi}_P =$		$\sigma\bar{\Phi}_P =$
	$\Phi_P =$		

51

Відносна напівширина довірчого інтервалу t_{β} визначається по значенням $\beta = 0.8$ і $n-1 = 6$ з Додатку. Записати в таблицю 8.2 всі знайдені величини. Теж саме зробити для правоповоротного кварцю.

Спостереження повороту площини поляризації в розчині цукру

В результаті дослідження повороту площини поляризації в розчині цукру (або іншого досліджуваного розчину чи рідини) необхідно:

- 1) встановити, до якого типу активних речовин відноситься розчин - лівоповоротного чи правоповоротного;
- 2) виміряти кути повороту площини поляризації у розчинах з різною концентрацією цукру і записати результати в таблицю, подібну табл. 8.1 чи 8.2;
- 3) знайти залежність між кутом повороту площини поляризації і концентрацією розчину цукру;
- 4) апроксимувати знайдену залежність і знайти питому поворотну властивість цукру. (Довжина кювети 13 см).

Зміст звіту

У звіті повинні бути приведені:

- мета і завдання роботи;
- таблиці вимірювань кута повороту площини поляризації у право- і лівоповоротних кварцевих пластинах, середні арифметичні і середні квадратичні відхилення результатів вимірювання кутів Φ_L і Φ_P в кварцевих пластинах;
- таблиці вимірювань кута повороту площини поляризації в розчині цукру;
- вираз, який апроксимує залежність кута Φ від концентрації цукру c ;

Література

1. Калітєевский Н.И. Волновая оптика. М.: Наука, 1971. - с.376., § 3.4.

Таблиця $t_{\beta}(\beta, n-1)$ розподілу Ст'юдента

$n-1 \setminus \beta$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
1	0.158	0.325	0.510	0.727	1.000	1.376
2	0.142	0.289	0.445	0.617	0.816	1.061
3	0.137	0.277	0.424	0.584	0.765	0.978
4	0.134	0.271	0.414	0.569	0.741	0.941
5	0.132	0.267	0.408	0.559	0.727	0.920
6	0.131	0.265	0.404	0.553	0.718	0.906
7	0.130	0.263	0.402	0.549	0.711	0.896
8	0.130	0.262	0.399	0.546	0.706	0.889
9	0.129	0.261	0.398	0.543	0.703	0.883
10	0.129	0.260	0.397	0.542	0.700	0.879
11	0.129	0.260	0.396	0.540	0.697	0.876
12	0.128	0.259	0.395	0.539	0.695	0.873
13	0.128	0.259	0.394	0.538	0.694	0.870
14	0.128	0.258	0.393	0.537	0.692	0.868
15	0.128	0.258	0.393	0.536	0.691	0.866

Продовження таблиці розподілу Ст'юдента

$n-1 \setminus \beta$	0.7	0.8	0.9	0.95	0.99	0.999
1	1.963	3.08	6.31	12.71	63.7	636.6
2	1.336	1.886	2.92	4.30	9.92	31.6
3	1.250	1.638	2.35	3.18	5.84	12.94
4	1.190	1.533	2.13	2.77	4.60	8.61
5	1.156	1.476	2.02	2.57	4.03	6.86
6	1.134	1.440	1.943	2.45	3.71	5.96
7	1.119	1.415	1.895	2.36	3.50	5.40
8	1.108	1.397	1.860	2.31	3.36	5.04
9	1.100	1.383	1.833	2.26	3.25	4.78
10	1.093	1.372	1.812	2.23	3.17	4.59
11	1.088	1.363	1.796	2.20	3.11	4.49
12	1.083	1.356	1.782	2.18	3.06	4.32
13	1.079	1.350	1.771	2.16	3.01	4.22
14	1.076	1.345	1.761	2.14	2.98	4.14
15	1.074	1.341	1.753	2.13	2.95	4.07

Зміст

Лабораторна робота №6. "Дослідження поляризації світла".

стор.

4

Лабораторна робота №7. "Дослідження внутрішніх напруг прозорих об'єктів з допомогою поляриметра".

23

Лабораторна робота №8. "Дослідження повороту площини поляризації в оптично активних середовищах".

41

Додаток. Таблиця $t_{\beta}(\beta, n - 1)$ розподілу Ст'юдента

53