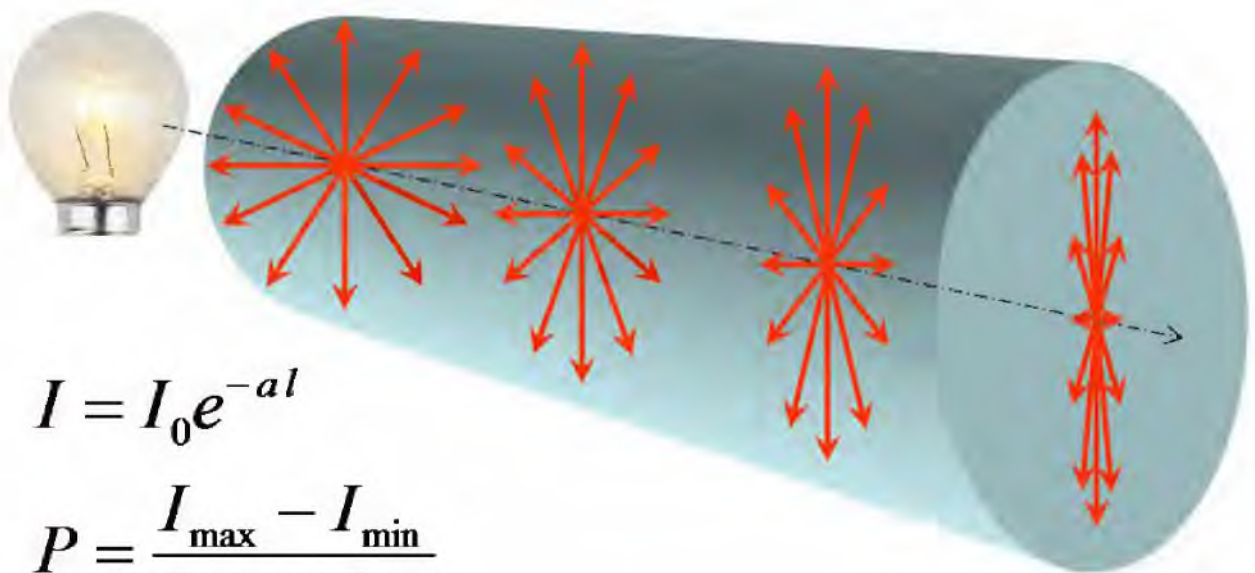


А.К.Дорош, Р.М.Мельник

## ПОЛЯРИЗАЦІЯ СВІТЛА

Зміна поляризації світла зумовлена  
анізотропним поглинанням середовища.  
Плеохроїзм і поляроїди



$$I = I_0 e^{-al}$$

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

## 1.1 Частково поляризоване світло у середовищах з анізотропним поглинанням

### 1.1.1 Закон Бугера-Ламберта

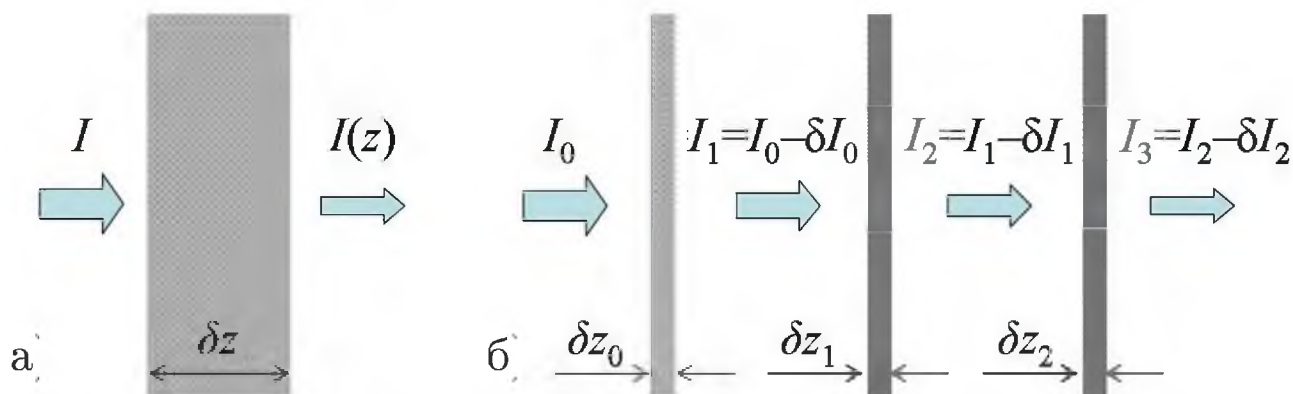
Різноманітним процесам у природі властива *експонентна* поведінка, описується *показниковою* функцією. До таких відносяться універсальний закон радіоактивного розпаду, критична поведінка фазових переходів, барометрична формула зміни тиску і густини повітря з висотою над поверхнею землі, зростання чисельності популяцій, ентропійний характер біологічних, хімічних процесів. Експонентну поведінку має еволюційна діяльність людини, в соціальних, ринково-економічних, технократичних процесах.

Зміна інтенсивності  $I$  світлового потоку у однорідному фотодсорбційному (світлопоглинаючому) середовищі має показникову залежність від товщини  $z$  матеріалу

$$I(z) \sim \exp(-a z), \quad (1.1)$$

має назву *закон Бугера-Ламберта*.  $a$  — показник поглинання світла матеріалом. Інтенсивність світла  $I$  — кількість енергії або кількість квантів, що проходить через одиницю площі в одиницю часу (один квант світла несе в собі енергію одного акта випромінювання, вивчається природа випромінювання і поглинання у фізиці атома).

Ламберт припустив, що при проходженні світлового пучка поперечного перерізу  $S$  через світлопоглинаючий матеріал, кількість поглинутого світла  $\delta I_0$  пропорційна кількості центрів поглинання  $N$ . Кількість центрів поглинання в малому об'ємі  $\delta V_0 = \delta z_0 S$  товщини  $\delta z_0$  пропорційна пройденій світлом товщини  $\delta z_0$ ; у більшому об'ємі більше центрів поглинання — більше актів поглинання квантів світла. Також поглинання має бути пропорційне інтенсивності  $I_0$  падаючого світла. При більшій інтенсивності, щільнішому потоці квантів світла, будуть частіше відбуватися акти поглинання. Від'ємний приріст інтенсивності



**Рис. 1.1.** Поглинання світла у середовищі товщини  $z$  можна умовно розділити на прошарки  $\delta z$ , кожен поглинає певну частину випромінювання.

$\delta I_0 = I_1 - I_0 = -a \delta z_0 I_0$ . Параметр  $a$  поглинаючої здатності середовища — його характерний параметр, є індивідуальною властивістю матеріалу. Кожен фотоадсорбційний матеріал має свій показник адсорбції (поглинання). Коефіцієнт поглинання  $a$  має розмірність обернених метрів.

При проходженні товщини  $\delta z_0$  матеріалу світловий потік стане деяким  $I_1$  меншим від  $I_0$  на  $|\delta I_0| = a \delta z_0 I_0$ . На кожному наступному шарі малої товщини  $\delta z$  відбувається зменшення світлового потоку, Рис. 1.1. На скільки менший світловий потік, на стільки меншим є поглинання кожного наступного шару. Ламберт припустив, що  $\frac{\delta I_n}{I_n} = \frac{\delta I_{n+1}}{I_{n+1}} = \text{const}$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$  для однакових приростів товщини  $\delta z = \delta z_n$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ , виконується диференціальна рівність

$$\frac{\delta I}{I} = -a \delta z. \quad (1.1')$$

Сума (інтеграл) лівої частини рівності

$$\sum_{n=0}^{N-1} \frac{\delta I_n}{I_n} = \sum_{n=0}^{N-1} \delta \ln(I_n) = \ln(I_N) - \ln(I_0) = \ln \frac{I_N}{I_0} = \ln \frac{I(z)}{I_0};$$

правої — 
$$\sum_{n=0}^{N-1} (-a \delta z_n) = -a (z_N - z_0) = -a z.$$

Тут позначені  $I_0$  — інтенсивність падаючого на матеріал світла,  $I(z) = I_N$  — інтенсивність не поглинутого світла, яке пройшло через фотоадсорбційний зразок,  $z = z_N - z_0$  — його товщина. Піднесенням до експоненти закон Бугера-Ламберта

$$I(z) = I_0 e^{-az}. \quad (1.1'')$$

Французький вчений П. Бугер встановив експериментально виконання експонентного поглинання світла (1729 р.). Пізніше (1760 р.) Й. Ламберт теоретично обґрунтував цей закон, надав форми застосовної для хімічного аналізу середовищ. Ламберт зробив передумову, що поглинаючі центри мають достатньо швидко віддавати поглинуту енергію для приймання наступної "порції". Справді є відхилення від закону при надмірних потоках світла, наявності нелінійних явищ поглинання зумовлених квантовими ефектами для певних матеріалів.

Закон Бугера-Ламберта є основою широкого кола спектрофотометричних дослідів знаходження концентрацій розчинів, перевірки забруднення середовищ, встановлення якості харчових продуктів, ступенів очистки речовин, якості отримуваних у лабораторіях хімічних реагентів тощо.

### 1.1.2 Дослід: перевірка закону Бугера-Ламберта

На оптичній лаві знаходиться: джерело світла, слайдотримач з пазами для слайдів. Фоторезистор під'єднаний до підсилювача з шкалою фотоструму на фотоприймачі. Джерело світла під'єднується до блоку живлення ИП-1, поворотом ручки на передній панелі регулюється потужність світлового потоку. Блок живлення і фотореєструючий прилад приєднують до мережі з напругою 220 В. Вмикають прилади перемикачами "мережа" на задніх панелях.

Всі оптичні елементи закріплені на відповідних штативах, штативи — в рейтерах. Рейтери переміщуються вздовж оптичної лави, фіксуються непорушно на лаві бічними гвинтами в основі рейтера. Штативи з елементами переміщуються вертикально в

рейтерах, кріпляться верхнім гвинтом на рейтері. Оптичні елементи мають бути центровані вздовж однієї осі; центр світлового потоку направлений вздовж лави посередині вікон слайдотримачів і попадає на фотоприймач повернутий до джерела світла.

У підставці для слайдів обов'язково знаходиться одна рамка слайда без плівки, підвищує точність отриманих значень фотоструму. Рамка без плівки відтинає частину фонового освітлення, яке може попадати на фоторезистор.

Значення фотоструму пропорційне інтенсивності падаючого на фоторезистор світла; відношення фотострумів рівне відношенню інтенсивностей світла,  $\frac{i}{i_0} = \frac{I}{I_0}$ .

У процесі вимірювання слідкують за тим, щоб показання фотоструму не виходили за межі встановленого діапазону. Якщо світиться світлодіод "перегруз" у нижньому лівому кутку передньої панелі, поряд з індикатором фотоструму, то збільшують ширину діапазону вимірювання фотоструму поворотом вправо ручки діапазонів на передній панелі підсилювача.

Щоб канал фотоприймача знаходився на прямій робочого світлового променя, фотоприймач юстують: повертають злегка вліво-вправо до положення максимуму показань фотоструму.

Досліди проводяться з різною кількістю сірих плівок нормальних падаючому світловому пучку. Сірий колір свідчить про наближено однакове поглинання світла різних довжин хвиль матеріалом. Товщина  $z$  світлопоглинаючого матеріалу задається кількістю  $n$  плівок  $z = n \delta z$ ,  $\delta z = 0,19$  мм — товщина однієї плівки вказана на слайдотримачі або потрібно поміряти товщину штангельциркулем. Для більшої точності вимірюється товщина стопи плівок з діленням на їх кількість.

Закон Бугера-Ламберта справедливий у монохроматичному світлі. Для видимого світла, спектральний діапазон 400-700 нм, залежність поглинання від товщини матеріалу наближене до експонентного закону. Також присутнє невелике по значенню відбивання світла на поверхнях плівок, що вносить відхилення у значення коефіцієнта поглинання  $a$ . У випадку прицевійних вимірювань потрібно враховувати поправку значення  $a$ .

1. В підставку для слайдів встановлюють одну рамку без плівки, вимірюють фотострум  $i_0 = i_{z=0}$ .
2. В слайдотримач встановлюють по одному слайду з плівкою, кожного разу знімаються показання фотоструму  $i(z)$  для світла, що пройшло через матеріал плівки товщини  $z = n \delta z$ . Використовують 6-7 плівок. Отримані дані заносять у Табл. 1.1.

Табл. 1.1.

Кількість плівок $n$	Товщина матеріалу $z = n \delta z$	Фотострум $i(z)$ , мм	$\ln \frac{i(z)}{i_0}$
0			
1			
...			

3. Будуєть графіки  $i(z)/i_0$  та  $\ln \frac{i(z)}{i_0}$  від товщини матеріалу  $z$ . Виконують апроксимацію експериментальних точок для першого графіка експонентну, для другого лінійну. За кутовим коефіцієнтом лінійної апроксимації останнього графіка визначають коефіцієнт поглинання  $a$ . Роблять висновок про експонентний характер залежності пропускання світла від товщини плівки.

### 1.1.3 Означення поляризації

Від др.-гр. *πόλος* походить лат. *polus*, фр. *polarisation*, укр. "полюс", "поляризація". Слово "полюс" означає вісь, здебільшого мають на увазі вісь у просторі або розділення на дві частини (ліва-права, верхня-нижня) відносно осі чи площини. У сучасному застосуванні слово "полюс" може означати особливу точку, вершину, проекцію осі на площину. Північний і південний полюси — це точки перетину вісі обертання Землі з її поверхнею.

Під *поляризацією* розуміють деяку характеристичну вісь (напрямок). Людина стоїть вздовж полюса-осі, що проходить через центр мас Землі. Поляризація людини — це виділений напрямок у просторі, зумовлений тяжінням Землі. Вся природа поляризована (осеорієнтована) тяжінням Землі — напрямок росту рослинного світу, положення риб у воді, поверхня води нормальна до напрямку осі земного тяжіння. Тобто поляризація може бути синонімом таких слів як "орієнтація", "напрямок".

У оптиці під *поляризацією* світла мають на увазі характер поперечних коливань світлових хвиль, просторову орієнтацію амплітуди коливань вектора електричної напруженості вихрового поля (світлова хвиля має вихрову електромагнітну природу). Особливістю електромагнітних хвиль є те, що вони мають коливання більше ніж в одному напрямку, має два ступені вільності колвиного руху! Світлова хвиля тривимірний об'єкт, Рис. 1.2.

Слово "поляризація" означає поперечність коливань хвилі; зміну у симетрії двох коливальних ступенів вільності; способи, методи, засоби зміни поляризації світлових хвиль. У загальному випадку слово "поляризація" охоплює собою все, що пов'язано із поперечними коливаннями оптичних хвиль і їх зміною у просторі. Якщо врахувати, що світловий пучок — це потік багатьох хвиль і кожна має свою орієнтацію коливань поперек руху пучка, то очевидно, що світло є складним фізичним об'єктом.

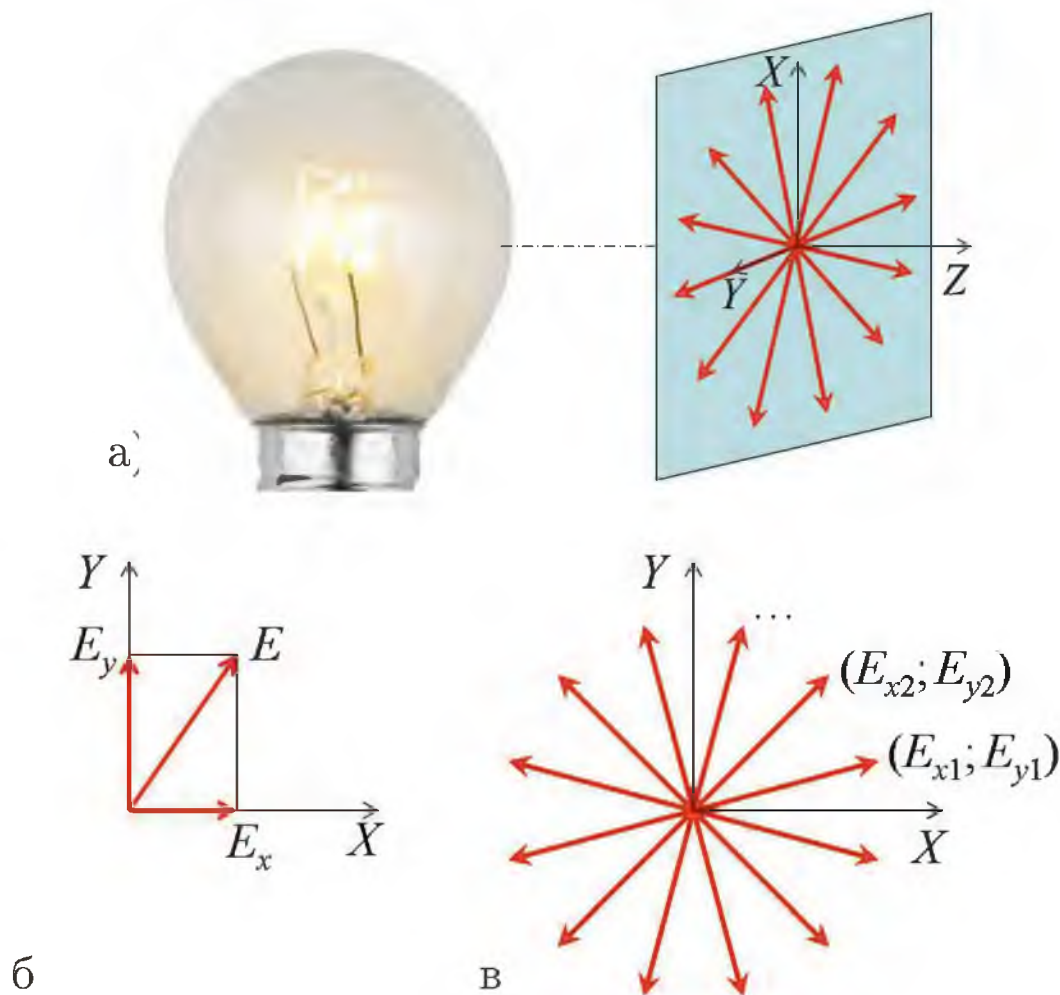


Рис. 1.2.

а) Світлова хвиля поперечна. У виділеному напрямку  $Oz$  поширення світла від джерела природного випромінювання поширюється світловий потік великої кількості хвиль. Кожна хвиля має коливання вектора напруженості електричного вихрового поля не залежні від коливань інших хвиль і перпендикулярні до напрямку поширення у площині перпендикулярній осі  $Oz$ . Схематично амплітуди хвиль тут зображені червоними стрілками у площині  $Oxy$  перпендикулярній до променя світла.

б) Амплітуда однієї хвилі — напруженість електричного поля  $\vec{E}$  — векторна величина. Вектор розкладається на взаємно перпендикулярні компоненти довільно вибраної прямокутної системи координат  $\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y$ .

в) Для електромагнітних полів світлових хвиль властивий принцип суперпозиції — амплітуди хвиль сумуються. Суми проєкцій на кожен з координатних осей площини  $Oxy$   $E_x = \sum E_{i,x}$ ,  $E_y = \sum E_{i,y}$ . Для природного світла  $E_x = E_y$ .



### 1.1.4 Природно поляризоване світло

У повсякденному житті нас оточують природні джерела світла — Сонце, вогонь, електричний розряд (блискавка), нічне зоряне небо. Подібні до природних є штучні джерела — галогенні лампочки, нитки розжарення, дуговий розряд.

Окрема хвиля природного джерела має виділений напрямок — поляризацію, але не можна виділити переважаючого напрямку коливань у хаотичному світловому потоці природного світла. Навіть у вузькому світловому пучку велика кількість хвиль, і всі поперечні до руху хвилі напрямки коливань статистично рівномірні, Рис. 1.2.

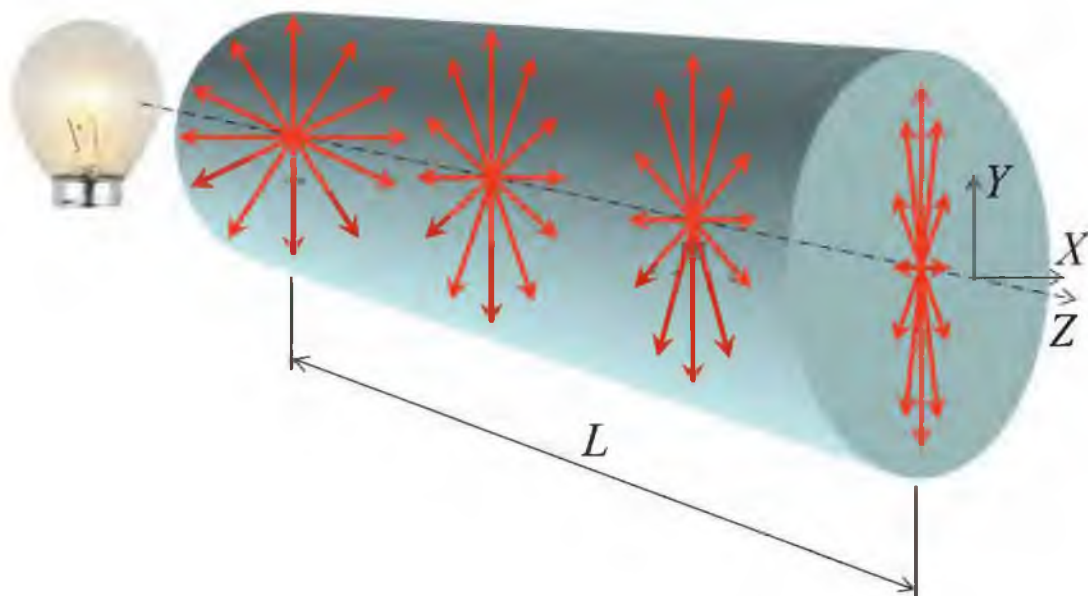
Напруженість електричного поля є величиною векторною, кожному хвилі амплітуди  $E_i$ , що рухається вздовж напрямку  $Oz$ , можна розкласти на довільно вибрані ортогональні компоненти  $E_{i,x}$  і  $E_{i,y}$ , Рис. 1.2,б. Суперпозиція проєкцій амплітуд на осі  $Ox$ ,  $Oy$  відповідно  $E_X = \sum E_{i,x}$ ,  $E_Y = \sum E_{i,y}$ . Для природного світла  $E_X = E_Y$  не залежно від вибору напрямку осей  $Ox \perp Oz$ ,  $Oy \perp Oz$ .

Природне світло вважають *неполяризованим* або *природно поляризованим*, маючи на увазі, що нема одного виділеного напрямку коливань хвиль, всі напрямки коливань є рівномірними, Рис. 1.2.

Природне світло ще називають *спонтанним*, маючи на увазі, що окремі хвилі утворені незалежними, мимовільними актами випромінювання. Довільні дві хвилі спонтанного випромінювання ніяк не пов'язані між собою ні моментом випромінювання в часі, ні поляризацією, ні фазою. Вживають термін "спонтанності" на противагу когерентному (узгодженому) світлу.

### 1.1.5 Частково поляризоване світло. Поляріоди

Поглинання світла оптичним матеріалом середовища може бути не однаковим для хвиль різних напрямків коливань, Рис. 1.3. Результатом є зміна природної поляризації, появляється переважаючий напрямок коливань потоку хвиль. В одному



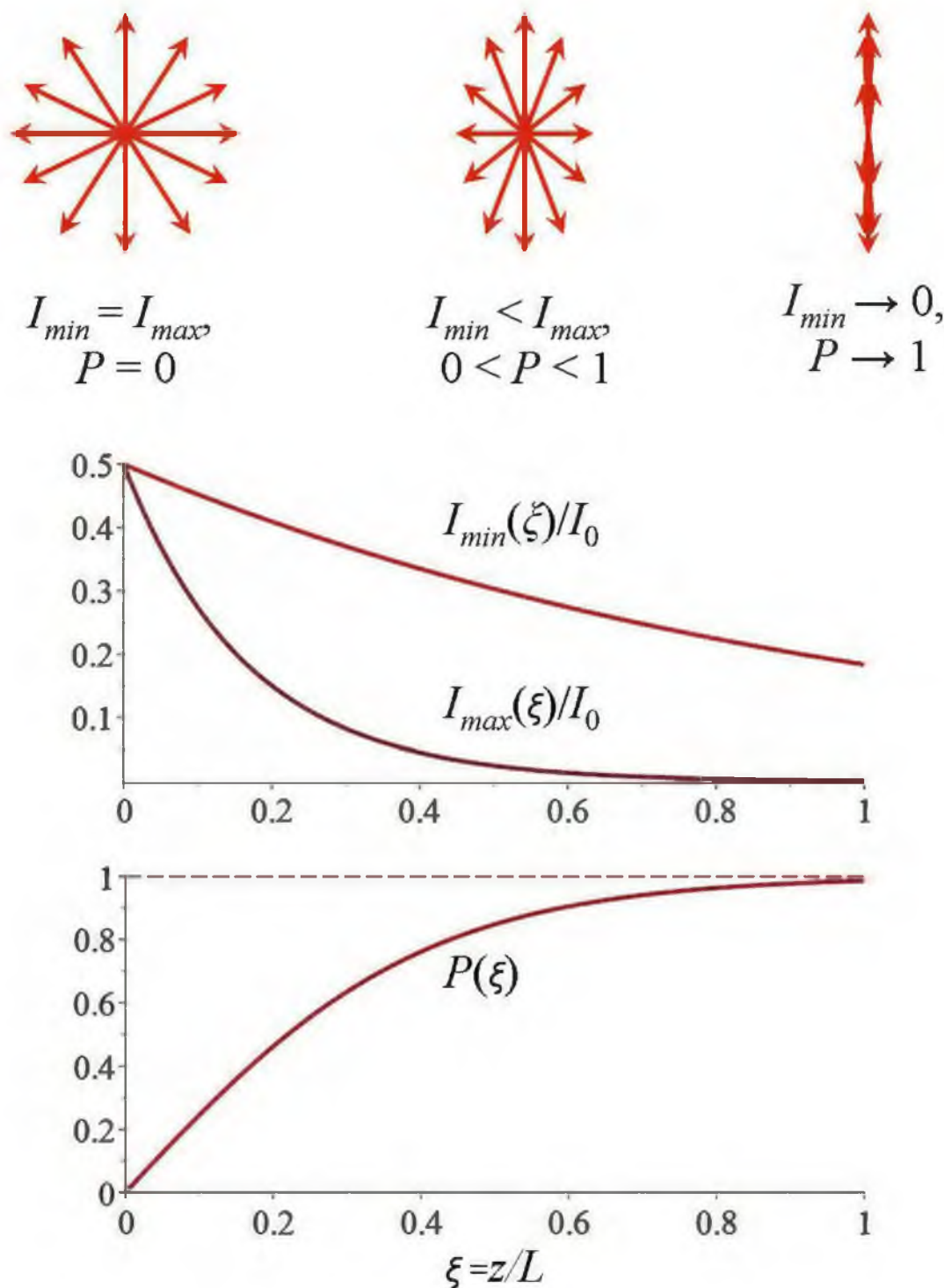
**Рис. 1.3.** Природне світло поширюється у напрямку  $Oz$ , падає нормально на плоскопаралельну пластину турмаліну товщини  $L$ . Компоненти хвилі з коливаннями вздовж напрямку  $Oy$  поглинаються менше ніж для коливань вздовж напрямку  $Ox$ . Схематично показано зміну поляризації для різних перерізів  $Oxy$  вздовж осі  $Oz$ .

напрямку осі  $Oy$  суперпозиція коливань більшої інтенсивності (амплітуди) ніж у напрямку осі  $Ox$ . Відбувається *часткова поляризація світла*. Напрямок  $Oy$  називають *поляризаційною віссю матеріалу* або *віссю поляризатора*, площину  $Oxz$  — його *поляризаційною площиною*.

Часткова поляризація відбувається в кристалах турмаліну, гепариту. Різне поглинання для коливань вздовж осі кристалу названої *оптичною віссю* і для коливань поперек осі. Просторова будова кристалу не однакова, приводить до не однакових оптичних властивостей, проходження світла через кристали. Вивченням оптичних властивостей перевіряють кристалічну будову матеріалів, Рис. 1.4.

У кристалі *турмаліна* вже на товщині в 1 мм практично повністю поглинається одна компонента поляризації  $I_X = I_{min} = 0$ ,  $I_Y = I_{max} > 0$ . Інтенсивність світла пропорційна квадрату амплітуди коливань  $I_X \sim E_X^2$ ,  $I_Y \sim E_Y^2$ . У *гепариті* те ж саме відбувається вже на товщині в 0,1 мм.

При менших товщинах зразків відбувається часткова поляризація світла  $I_X = I_{min} > 0$ ,  $I_Y = I_{max} > 0$ , але при цьому



**Рис. 1.4.** Схематичне зображення поляризації світла з різним ступенем поляризації у поляроїді: природне світло до падіння на кристал,  $z = 0$ ; частково поляризоване світло всередині кристала,  $z < L$ ; лінійно поляризоване світла на виході з кристала,  $z = L$ . Нижче приведені залежності експонентного зменшення відносної інтенсивності поляризаційних компонент  $I_Y(\xi)/I_0 = I_{max}(\xi)/I_0$ ,  $I_X(\xi)/I_0 = I_{min}(\xi)/I_0$ ,  $\xi = z/L$  та ступеня поляризації  $P(\xi)$ .

$I_X \neq I_Y$ . Застосовують параметр міри поляризованості світлового пучка — ступінь поляризації

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (1.2)$$

$I_{max}$ ,  $I_{min}$  — максимальна і мінімальна по інтенсивності поляризації світла.

Природне світло інтенсивності  $I_0$  має однакові компоненти виділених поляризацій  $E_X = E_Y$ ,

$$I_X = const \cdot E_X^2 = const \cdot E_Y^2 = I_Y = I_0/2, \quad I_X + I_Y = I_0,$$

$I_{max} = I_{min}$ , ступінь поляризації рівний нулю  $P = 0$ .

Ступінь поляризації може приймати значення від  $P = 0$ ,  $I_{max} = I_{min}$ , для природно поляризованого світлового потоку, до  $P = 1$ ,  $I_{min} = 0$  лінійно поляризованого світла. Елемент, що перетворює світло в лінійно поляризоване, називають *лінійним поляризаційним фільтром* або *лінійним поляризатором*. Лінійно поляризоване світло має застосування у поляризаційних приладах, поляризаційному аналізі оптичних матеріалів.

У випадках із ступенем поляризації  $0 < P < 1$  світло називають *частково поляризованим*, Рис. 1.4. *Часткова поляризація світла* зумовлена анізотропним поглинанням світла різних напрямків коливань. *Анізотропія* від грец. *ἀνισος* — нерівний, неоднаковий та грец. *τροπή* — напрямок.

**Плеохроїзм оптичних середовищ** Найпростіші поляризатори часткової або лінійної поляризації виготовляють з плеохроїчного (дихроїчного) матеріалу. *Плеохроїзм* — анізотропія поглинання світла взаємоперпендикулярних поляризацій на різних довжинах хвиль. Найперше його спостерігали в кристалах. Світло з площиною коливань амплітуди вздовж осі кристала має інший коефіцієнт поглинання ніж світло з площиною коливань перпендикулярною до кристалічної осі, Рис. 1.5.

Через різне поглинання різних поляризацій і різних довжин хвиль у плеохроїчних матеріалах є перепади забарвленості для



**Рис. 1.5.** Приклади кристалів з виявом плеохроїзму. Зверху вниз і з права вліво: кристал апатиту з вираженим дихроїзмом, плеохроїзм в кристалі апатиту; сапфір одним боком на просвіт і іншим боком після повороту на дев'яносто градусів навколо вертикальної осі; олександрит освітлений штучним джерелом світла і денним світлом, у штучному світлі олександрит може міняти колір від вишневого до фіолетового. Світлини підібрані з інтернет-сторінок загального доступу, без дотримання масштабних співвідношень між розмірами зображень.

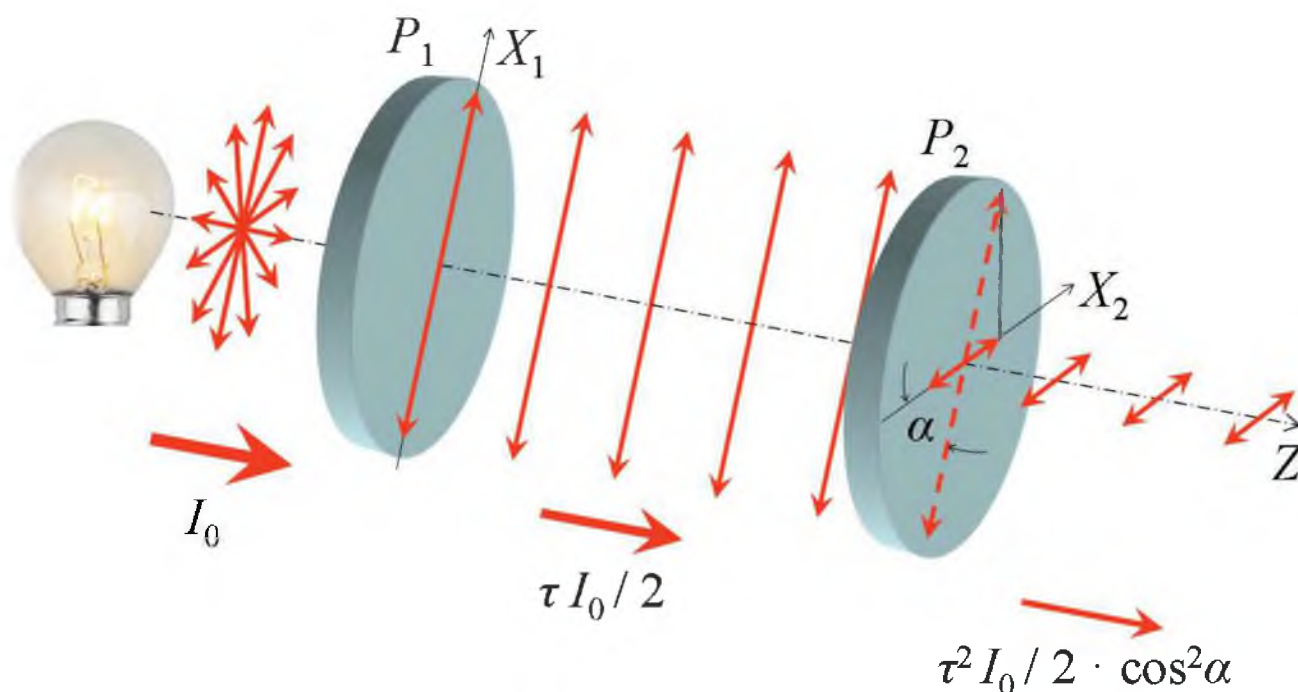
різних напрямків поширення світла в них. Сапфір має різний колір у світлі, що проходить через нього при повороті мінералу. Апатит може мати жовтий колір на просвіт вздовж оптичної осі і зелений у світлі поперек осі. Звідси ще одна назва — *дихроїзм* — ”двоколірність”, проявляється в багатьох кристалічних матеріалах.

*Дихроїзм* — частіше вживана назва *плеохроїзму* (др.-гр. *πλέον* — більше і *χρόα* — колір) — властивості двопроменезаломних мінералів виявляти різний колір при падінні світла на кристал під різними кутами або при розгляді кристала під різними кутами до кристалічної осі. Інколи відносять дихроїзм до часткового випадку плеохроїзму.

Лінійний поляризатор виготовлений на основі плеохроїчних матеріалів називають *поляроїдом*. Найчастіше це полімерна плівка з вкрапленнями мікрокристаліків. Співнаправлення осей кристаліків досягається прикладенням зовнішнього електричного поля під час виготовлення. Для механічного захисту і захисту від вологи поляроїдну плівку заклеюють між плівок іншого матеріалу чи між скляних пластинок.

Турмалін поглинає світло практично всього видимого діапазону, тому має сіруватий колір, іноді зеленуватий відтінок. Негативним є невисоке пропускання лінійно поляризованої компоненти; при ступені поляризації 99,8%, пропускання поляризованого світла може бути меншим 30%. Позитивним у застосуванні матеріалу є пропускання широких пучків світла без зміни напрямку напрямку поширення, низька собівартість. Виготовляють також поляроїди без кристалів, витягуванням полімерних плівок, дихроїзм зумовлений орієнтацією макромолекул. Слово ”поляроїд” набуло популярності, його вставляють в назви приладів, фірм, оптичної техніки, окулярів.

Поляроїд є одним з різновидів поляризаторів. *Поляризатором* називають довільний елемент, який міняє поляризаційні властивості світла, міняється діаграма (симетрія) розподілу інтенсивності коливань хвиль у площині перпендикулярній напрямку поширення світла.



**Рис. 1.6.** Зміна поляризації та інтенсивності світла при проходженні через поляроїди  $P_1$ ,  $P_2$ .  $X_1$ ,  $X_2$  — площини поляризацій відповідних поляроїдів. Поляризація світлового потоку вказана схематично подвійними стрілками.  $\alpha$  — кут між площинами поляризації  $Ox_1z$ ,  $Ox_2z$  обох поляроїдів.

### 1.1.6 Закон Малюса

Поляроїд  $P_1$  пропускає лінійно поляризоване світло. Амплітуда  $E_1$  коливань поляризованого світла знаходиться у площині поляризації, площина  $Ox_1z$  на Рис. 1.6. Поляроїд  $P_2$  "пропустить" проекцію амплітуди  $E_1$  на площину поляризації  $Ox_2z$ ,  $E_2 = E_1 \cos \alpha$ . Інтенсивність світла пропорційна квадрату амплітуди коливань хвилі. Після проходження поляризатора  $P_2$  інтенсивність світла

$$I = \text{const } I_0 \cos^2 \alpha, \quad (1.3)$$

$I_0$  — інтенсивність світла падаючого на поляроїд  $P_1$ . Виконується *закон Малюса* — пропорційність інтенсивності світла, що пройшло через поляроїди, квадрату косинуса кута між поляризаційними площинами поляроїдів. Цей закон встановлений французьким інженером Е.Л.Малюсом у 1810 році.

### 1.1.7 Дослід: перевірка закону Малюса

На оптичній лаві знаходиться: джерело світла з напрямком світлового потоку вздовж лави, два поляроїди, фоторезистор. Центри всіх оптичних елементів знаходяться на одній уявній прямій, що проходить по центру випромінювача, поляризаторів і попадають на фотоприймач.

Показання фотоприймача не повинні виходити за максимум шкали вимірювання, на що вказує індикатор "перегруз" фотореєструючого блоку. У такому разі поворотом ручки вправо на панелі блоку переключають прилад на шкалу ширшого діапазону вимірювань.

Дальший поляризатор  $P_2$  називають *аналізатором*, використовується для аналізу інтенсивності світла, що проходить через поляроїди при різних кутах між їх поляризаційними площинами за показаннями фотоприймача.

Значення показань фотоструму пропорційне інтенсивності світла, яке пройшло через поляроїди,  $i = \text{const } I$ . Тому всі відносні показання фотоструму будуть рівними відносним значенням інтенсивності світла.

1. Вмикають джерело живлення ИП-1 джерела світла, блок керування і вимірювання фотоструму  $i$  на фоторезисторі.
2. Аналізатор  $P_2$  встановлюють в положення  $-90^\circ$  по лімбу поляроїда. Поляризатор  $P_1$  повертають до мінімуму показань фотоструму  $i_{min}$ , у положення перпендикулярних площин поляризації, кута  $\alpha = -90^\circ$  між поляроїдами. Схрещені поляризатори не пропускають світло. Мале не нульове значення фотоструму може бути зумовлене фоновим світлом, не ідеальністю поляроїдів.
3. Повертають аналізатор в межах від  $-90^\circ$  до  $90^\circ$ , через кожні  $10^\circ$  відмічають показники фотоструму, дані заносять у Табл. 1.2. Серед отриманих даних фотоструму будуть максимальне значення  $i_{max}$ , напевне при  $\alpha = 0^\circ$ , паралельні поляризаційні площини елементів  $P_1$  і  $P_2$ ; мінімальні зна-



чення  $i_{min}$  при  $\alpha = -90^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ$ . Значення кутів  $\alpha$  переводять у радіани  $\alpha(\text{рад}) = \alpha^\circ \frac{\pi}{180^\circ}$ .

Табл. 1.2.

$\alpha, ^\circ$	$\alpha, \text{рад}$	$i, \text{мкА}$	$x = \cos^2 \alpha$	$y = \frac{i - i_{min}}{i_{max} - i_{min}}$
-90				
-80				
...				
90				

- Обчислюють значення  $x = \cos^2 \alpha$ ,  $0 \leq x \leq 1$ ; нормують відносно значення інтенсивності світла  $y = \frac{i - i_{min}}{i_{max} - i_{min}}$ ,  $0 \leq y \leq 1$ . Будують точковий графік  $y(x)$  за даними Табл. 1.2 і суцільну лінію  $y = x$  на одній координатній площині картезіанської (прямокутної) системи координат. Роблять висновки про виконання закону Малюса.
- За даними Табл. 1.2 заповнюють Табл. 1.3 для виведення даних у полярній системі координат. Будують на одній координатній площині суцільною лінією  $\eta_1(\xi_1)$  — пелюсткова діаграма  $x(\alpha)$  і точкову  $\eta_2(\xi_2) = y(\alpha)$ . Виконується візуалізація якісного співпадання діаграм  $x(\alpha)$  і  $y(\alpha)$  для якісного порівняння якості полярійдів. Чим краща їх якість, тим точніше накладання  $\eta_2(\xi_2)$  на  $\eta_1(\xi_1)$ .

Табл. 1.3.

$\alpha, \text{рад}$	$\xi_1 = x \cos \alpha$	$\eta_1 = x \sin \alpha$	$\xi_2 = y \cos \alpha$	$\eta_2 = y \sin \alpha$