

## 8.1.6. Поляризація світла

Природне  
світло

Звичайні джерела світла випромінюють електромагнітні хвилі з хаотичним напрямком коливань електричного вектора  $\vec{E}$ . Таке світло має назву *неполяризованого* або *природного*.

Це пояснюється механізмом випромінювання хвиль кожним елементарним випромінювачем (атомом, молекулою). Кожна така хвиля є поляризованою. Але наявність у джерел світла великої кількості випромінювачів приводить до хаотичної просторової орієнтації електричного вектора (рис.8.10, а).

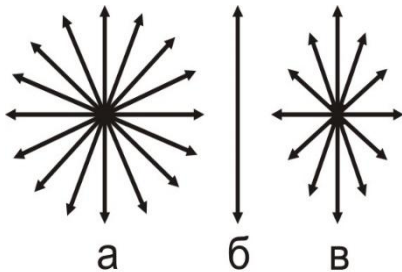


Рис.8.10

Результуюча напруженість  $\vec{E}$  здійснює в кожній точці коливання, напрямки яких швидко і неупорядковано змінюється у площині, перпендикулярній до променя.

просторово-  
електричного та

Лінійно  
поляризоване  
світло

Поляризація світла характеризується  
часовою упорядкованістю орієнтації  
магнітного векторів.

Світло, у якого напрям коливання електричного вектора залишається незмінним називається *лінійно поляризованим* (рис.8.10, б).

Площина  
поляризації

Площина, що проходить через електричний вектор і напрямок поширення електромагнітної хвилі, називається *площиною поляризації*.

Еліптично  
поляризоване  
світло

*Еліптично поляризованим* називається світло, у якого електричний вектор обертається так, що його кінець описує еліпс (рис.8.10, в).

Світло,  
поляризоване  
по колу

Світло, в якого електричний вектор в будь-якій точці простору рівномірно обертається так, що його кінець описує коло, називається

поляризованим по колу або циркулярно поляризованим.

**Частково поляризоване світло**

Світло називається *частково поляризованим*, якщо у нього спостерігається переважний напрямок коливань вектора  $\vec{E}$ . Частково поляризоване світло можна розглядати як сукупність (суміш) природного і поляризованого світла, що одночасно поширюються в одному напрямку.

Лінійна, циркулярна та еліптична поляризація – різновиди повної поляризації світла.

**Методи поляризації**

Для здійснення поляризації світло необхідно пропустити крізь прозоре середовище(кристал), параметри якого по різних напрямкам неоднакові – анізотропне середовище. Прикладом анізотропії може бути різні значення оптичної густини  $\nu$ , по осям  $Y$  і  $Z$ , або різний коефіцієнт поглинання  $k$ (див. явище поглинання світла у § 8.1.7). У останньому випадку, якщо  $K_y > K_z$ , циркулярно поляризоване світло за рахунок більшого поглинання по осі  $Y$  стане еліптично(або частково) поляризованим з більшою амплітудою по осі  $Z$ .

У цілому пристрої, що перетворюють природне світло у поляризоване називаються поляризаторами. Для аналізу ступені поляризації світла використовуються присторії, які називаються аналізаторами.

**Закон Малюса**

Якщо на аналізатор падає лінійно поляризоване світло  $I_0$ , то амплітуда світла  $I$ , що пройшло крізь аналізатор пропорційна  $I_0$  і залежить від кута між головними площинами аналізатора і поляризатора  $\varphi$  (рис.8.11).

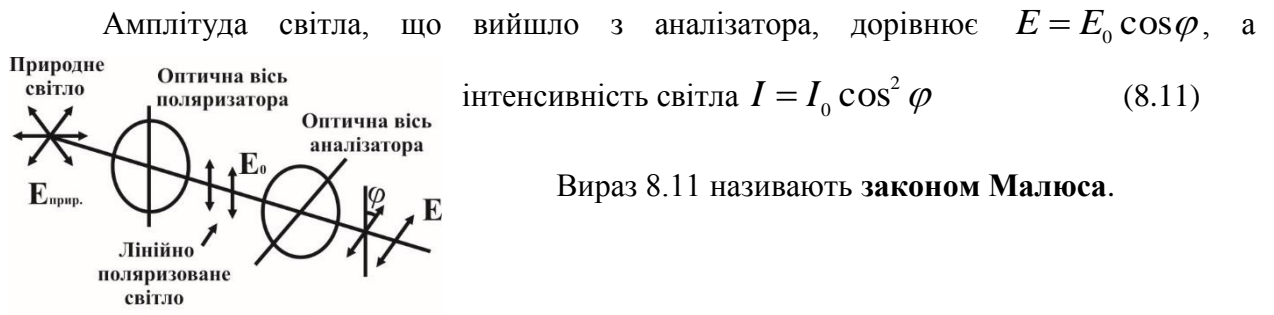


Рис.8.11

Вираз 8.11 називають **законом Малюса**.

**Ступінь поляризації світла**

*Ступенем поляризації світла  $P$*  називають вираз

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (4.3)$$

де  $I_{\max}$  і  $I_{\min}$  – максимальна і мінімальна інтенсивності світла, що відповідають двом взаємоперпендикулярним компонентам вектора  $\vec{E}$ .

Для плоскополяризованого світла  $I_{\min} = 0, P=1$ .

Для природного світла  $I_{\max} = I_{\min}, P=0$ .

Поляризація знаходить широке застосування в науці і техніці. Наприклад, в оптоволоконних лініях зв'язку у якості світлових затворів використовується «ячейка Керра» - кристал, у якого головна площина поляризації керується з допомогою магнітного поля. При виключеному магнітному полі ця площина співпадає з площиною поляризації світла, що подається в оптоволокно, і світло проходить. При виключенні магнітного поля площина кристала повертається і світло не проходить.

### 8.1.7. Розповсюдження світла у речовині

Попередні три явища хвильової оптики – інтерференція, дифракція і поляризація не пов'язані з проходженням світла у середовищі, де, як відомо, фазова швидкість світла зменшується у порівнянні з вакуумом у  $n$  раз:

$$v = \frac{c}{n} \quad (8.13),$$

де  $n$  - оптична густина речовини,  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$

**Дисперсія  
світла**

*Дисперсією світла називається залежність фазової швидкості  $v$  світла в середовищі від його частоти  $\nu$ .*

Зважаючи на те, що  $v = c/n$  ( $c$  – швидкість світла в вакуумі,  $n$  – показник заломлення середовища) виявляється, що показник заломлення середовища залежить від частоти (довжини хвилі  $\lambda$ ). Ця залежність спостерігалась ще Ньютоном при проходженні пучка білого світла крізь призму з прозорого матеріалу.

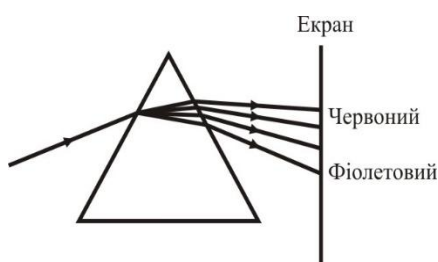


Рис.8.12

На екрані за призмою спостерігається

райдужна смуга (рис.8.12), яка називається *призматичним* або *дисперсійним спектром*. Таким чином, призма може грати роль *спектрального приладу*.

**Нормальна та аномальна дисперсія**

Залежність показника заломлення  $n$  від довжини хвилі  $\lambda$  (частоти  $\nu$ ) нелінійна та немонотонна (рис.8.13).

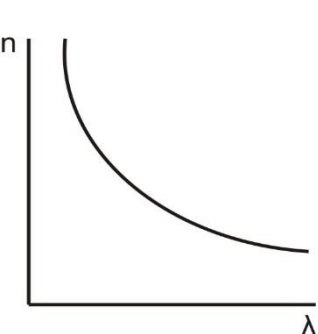


Рис.8.13

Зі збільшенням довжини хвилі показник заломлення зменшується (збільшується при збільшенні частоти  $\nu$ ). Така залежність  $n$  від  $\lambda$  називається *нормальною дисперсією*. Тобто для нормальної дисперсії  $\frac{dn}{d\lambda} < 0$  (або  $\frac{dn}{d\nu} > 0$ ).

Якщо  $\frac{dn}{d\lambda} > 0$  (або  $\frac{dn}{d\nu} < 0$ ), тобто  $n$  зменшується зі збільшенням  $\nu$  (зменшенням

$\lambda$ ), то дисперсія світла має назву *аномальної*. Вона спостерігається поблизу смуг поглинання. Наприклад у звичайного скла ці смуги знаходяться в ультрафіолетовій і інфрачервоній частинах спектра.

**Дисперсія показника заломлення**

Кількісною характеристикою дисперсії світла являється *дисперсія показника заломлення*  $D$ , яка дорівнює

$$D_{\lambda} = \frac{dn}{d\lambda} \left( \text{або } D_{\nu} = \frac{dn}{d\nu} \right)$$

**Відмінність дифракційного і дисперсійного спектрів**

Сpektри, які одержані за допомогою дифракційної решітки і призми суттєво різні:

- дифракційна решітка розкладає світло безпосередньо за довжинами хвиль, а призма – за значеннями показника заломлення;
- кольори в обох спектрах розташовані по-різному: червоні промені мають більшу довжину хвилі, ніж фіолетові, тому відхиляються дифракційною решіткою сильніше ( $d \sin \varphi = \pm m\lambda$ ;  $m = 0,1,2\dots$ ), а призмою менше, тому що для них показник заломлення менше (рис.8.13);
- кольори в дифракційному спектрі розташовані більш-менш рівномірно, тоді як у дисперсійному спектрі синьо-фіолетова частина розтягнута, а червона стиснута, що пов'язано з різкою зміною залежності показника заломлення від довжини хвилі у

короткохвильовій області спектра і дуже повільною його зміною в довгохвильовій (рис.8.13)

**Поглинання  
світла**

***Поглинання (абсорбція) світла – явище зменшення енергії світлової хвилі при її поширенні в речовині внаслідок перетворення енергії хвилі в інші види енергії.***

Енергія хвилі може перетворюватись у внутрішню енергію речовини, в енергію вторинного випромінювання, яке має інший спектральний склад і інший напрям розповсюдження. Поглинання світла може супроводжуватись нагріванням речовини, збудженням і іонізацією атомів або молекул, фотохімічними реакціями і таке інше.

**Закон  
Бугера-Ламберта**

Поглинання світла описується **законом Бугера-Ламберта**

$$I = I_0 e^{-kx},$$

***за яким інтенсивність плоскої хвилі монохроматичного світла змінюється при проходженні крізь поглинаючу речовину за експоненціальним законом.***

Тут  $I_0$  і  $I$  значення інтенсивності світла при вході і виході з шару середовища товщиною  $x$ ,  $k$  – монохроматичний натуральний показник поглинання, який залежить від хімічної природи, стану поглинаючого середовища і від довжини хвилі  $\lambda$ .

$k$  – показник (коефіцієнт) поглинання – величина, обернена відстані, на якій інтенсивність плоскої монохроматичної хвилі зменшується в  $e = 2,718$  раз.

**Спектри  
поглинання**

Залежність коефіцієнта поглинання  $k$  від довжини хвилі  $\lambda$  називається **спектром поглинання**.

Спектр поглинання ізольованих атомів – **лінійчатий спектр** – має вигляд вузьких ліній ( $\sim 10^{-12} \div 10^{-11}$  м), що відповідають резонансним частотам коливань електронів у атомах.

**Молекулярний спектр поглинання** має вигляд **смуг поглинання** і визначається коливаннями атомів в молекулах. Коефіцієнт поглинання відмінний від нуля для більш широких інтервалів довжин хвиль ( $\sim 10^{-10} \div 10^{-7}$  м).

**Розсіяння  
світла**

***Розсіянням світла називається явище відхилення світла від початкового напрямку внаслідок дифракції на неоднорідностях середовища.***

**Розсіяння в  
мутних  
середовищах**

Розсіяння світла в середовищі пов'язане з його оптичною неоднорідністю, коли показник заломлення середовища не є сталою величиною, а змінюється від точки до точки. Такими середовищами є *оптично мутні середовища*, в яких спостерігаються неоднорідності, зумовлені наявністю сторонніх речовин, таких як частинки пилу, колоїдні частинки, емульсії, аерозолі (хмари, дим, туман) і т.п.

Якщо відстань між малими неоднорідностями значно більше довжини хвилі світла, то проходячи крізь мутне середовище, світло дифрагує на хаотично розташованих мікронеоднорідностях – незалежних вторинних джерел, що обумовлює розсіяння світла у всіх напрямках.

Розсіяння світла на частинках мутного середовища, малих в порівнянні з довжиною хвилі світла, вперше спостерігалось Дж. Тіндалем у 1869 р. і одержало назву *ефекту Тіндала*. Теорія цього явища була досліджена Дж. Релеєм (1871 р.).

**Закон  
Релея**

*Інтенсивність розсіяного світла обернено пропорційна четвертій степені довжини хвилі падаючого світла*

$$I \sim \lambda^{-4}.$$

**Молекулярне  
розсіяння  
світла**

В чистих однорідних середовищах без сторонніх домішок оптична неоднорідність може спричинятись флуктуаціями густини, які виникають під час хаотичного теплового руху молекул середовища.

*Розсіяння світла в чистому середовищі обумовлене флуктуаціями густини, анізотропії або концентрації, називають молекулярним.* Воно також підкорюється закону Релея.

Інтенсивність молекулярного розсіяння, пов'язаного зі флуктуаціями, які залежать від температури, також залежатиме від температури: збільшується при підвищенні температури.

Молекулярним розсіянням пояснюється блакитний колір неба, бо за законом Релея найбільш інтенсивно розсіюються короткі хвилі.

В повністю оптично однорідному середовищі розсіяння не буде. В цьому випадку вторинні хвилі, які випромінюються збудженими атомами, інтерферуючи, повністю гасять одна одну у всіх напрямках, крім напрямку поширення первинної хвилі і розсіяння відсутне.

## **8.2. Квантова оптика**

### **8.2.1. Теплове випромінювання. Закон Кірхгофа**

## Теплове випромінювання

Теплове (або інфрачервоне) випромінювання – ділянка електромагнітного спектру в діапазоні довжин хвиль  $\lambda = (0,75 \dots 10^3) \text{ мкм}$ .

Природа теплового випромінювання пов'язана з електромагнітним випромінюванням атомів і молекул речовин, викликаним їх тепловим хаотичним рухом.

Оскільки мірою теплового руху є температура, то можна зробити висновок, що джерелом теплового випромінювання є усі тіла з температурою  $T > 0^0\text{К}$ .

## Енергетична світність

Енергетичною характеристикою теплового випромінювання є енергетична світність тіла  $M$ .

При цьому розрізняють інтегральну енергетичну світність  $M_T$  та спектральну  $M_{T,\lambda}$ .

**Інтегральна енергетична світність** – енергія, що випромінює тіло з одиниці площі поверхні за одиницю часу

$$M_T = \frac{W}{S \cdot t} . \quad (8.13)$$

Ця величина є аналогом вектора Умова – Пойтінга (див. розділ 7).

Властивості  $M_T$  - залежність від температури  $T$ ;

$$-[M_T] = \text{Вт/м}^2$$

**Спектральна енергетична світність** – енергія, що випромінює тіло на даній довжині хвилі  $\lambda$ .

$$M_{T,\lambda} = \frac{\partial M_T}{\partial \lambda} . \quad (8.14)$$

Властивості  $M_{T,\lambda}$  : - залежність від температури і довжини хвилі;

$$-[M_{T,\lambda}] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$$

З (8.14) випливає зв'язок між  $M_T$  і  $M_{T,\lambda}$  ;

$$M_T = \int_0^{\infty} M_{T,\lambda} * d\lambda . \quad (8.15)$$

## Поглиналина здатність

Другою енергетичною характеристикою теплового випромінювання є поглиналина здатність  $\varepsilon$ . Розрізняють інтегральну поглиналину здатність  $\varepsilon_T$  і спектральну  $\varepsilon_{T,\lambda}$ .

**Інтегральна поглиналина здатність**  $\varepsilon_T$  показує, яку частину енергії, що падає на тіло, воно поглинає:

$$\varepsilon_T = \frac{W^{\text{погл}}}{W^{\text{пад}}}, \quad (8.16)$$

Де  $W^{\text{погл}}$ - поглинута енергія;  $W^{\text{пад}}$ - енергія, що падає на тіло

Властивості  $\varepsilon_T$ : - як видно з (8.16) чисельні значення

$\varepsilon_T$  можливі у межах  $\varepsilon_T = 0 \dots 1$ ;

-  $\varepsilon_T$  залежить від температури тіла  $T$ .

**Спектральна поглиналина здатність**  $\varepsilon_{T,\lambda}$  – частинна енергії, що поглинає тіло, на даній довжині хвилі:

$$\varepsilon_{T,\lambda} = \frac{W_{\lambda}^{\text{погл}}}{W_{\lambda}^{\text{пад}}}. \quad (8.17)$$

Властивості  $\varepsilon_{T,\lambda}$ : - значення у межах  $0 \dots 1$

- залежність від температури  $T$  і довжини хвилі  $\lambda$ .

## Абсолютно чорне тіло

Крім позначених вище величин, тепловому випромінюванню характерні поняття: абсолютне чорне тіло (АЧТ) і сіре тіло.

**АЧТ** – тіло, що поглинає усе випромінювання, що падає на нього на усіх довжинах хвиль, тобто  $\varepsilon_{T,\lambda} = 1$  (8.18)

Моделлю АЧТ може слугувати невеликий отвір  $O$  в порожнині (рис. 8.14). Серед природних тіл найближче усього до АЧТ є Сонце, але з деяким допущенням до АЧТ можна віднести відчинені вікна у будівлях, відчинений рот людини і т.і.

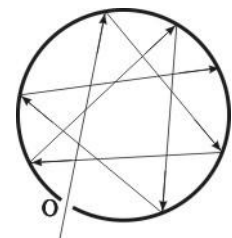


Рис.8.14



## Сіре тіло

**Сіре тіло** – тіло, що поглинає на усіх довжинах хвиль однаково, тобто  $\varepsilon_{T,\lambda} \neq f(\lambda)$ . При цьому  $\varepsilon_{T,\lambda} < 1$ .

Більшість тіл, що нас оточують можна віднести до сірих, у тому числі і шкірну поверхню людини:  $\varepsilon_{T,\lambda} = 0,7$ .

## Закон Кірхгофа

**Відношенню спектральних енергетичної світності та поглинальної здатності при заданих температурі та довжині хвилі для всіх тіл однаково:**  $\frac{M_{T,\lambda}}{\varepsilon_{T,\lambda}} = f(\lambda, T), \dots(8.19)$

Де  $f(\lambda, T)$  – універсальна функція Кірхгофа (функція довжини хвилі і температури).

Вид  $f(\lambda, T)$  Кірхгофа отримав експериментально – графік наведено на рис. 8.15. Вплив температури ілюструють дві криві: при підвищенні температури ( $T_2 > T_1$ ) крива зміщується в сторону менших довжин і підіймається вгору, так, що криві не перетинаються.

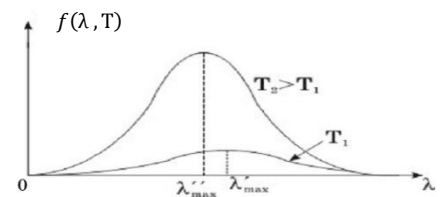


Рис.8.15

Фізичний зміст  $f(\lambda, T)$  стає зрозумілим, якщо записати закон Кірхгофа для АЧТ – підставити у (8.19)

$$\varepsilon_{T,\lambda} = 1; \quad f(\lambda, T) = M_{T,\lambda}^{\text{АЧТ}}$$

Таким чином *функція Кірхгофа – це спектральна енергетична світність АЧТ.*

З цього випливає, що графік на рис. 8.15 уявляє собою розподіл енергії випромінювання АЧТ по довжинам хвиль, тобто **спектр випромінювання АЧТ.**

## Наслідки з закону Кірхгофа

Аналіз формули (8.19) дозволяє отримати такі наслідки:

1. Якщо тіло на даній довжині хвилі не випромінює, то й воно на цій довжині хвилі і не поглинає.

Дійсно, з (8.19) при  $\varepsilon_{T,\lambda} = 0$  отримаємо:

$$M_{T,\lambda} = \varepsilon_{T,\lambda} * f(\lambda, T) = 0$$

2. Сіре тіло на кожній довжині хвилі випромінює менше ніж АЧТ.

Це вірно з (8.19), якщо замість  $f(\lambda, T)$  підставити  $M_{T,\lambda}^{\text{АЧТ}}$ :

$$M_{T,\lambda} = \varepsilon_{T,\lambda} * M_{T,\lambda}^{\text{АЧТ}}$$

Звідси витікає , що при  $\varepsilon_{T,\lambda} < 1$  (для сірого тіла)  $M_{T,\lambda} < M_{T,\lambda}^{AЧГ}$ .

Останній факт є основою для іншого змісту  $\varepsilon_{T,\lambda}$  – **це випромінювальна здатність** тіла. При цьому для АЧГ  $\varepsilon_{T,\lambda}^{AЧГ} = 1$  , а для сірого тіла  $\varepsilon_{T,\lambda} < 1$  на всіх довжинах хвиль.