

Міністерство освіти і науки  
Українська академія друкарства

# ОПТИКА

Методичні вказівки та завдання до практичних занять і  
самостійної роботи з фізики  
(для студентів інженерних спеціальностей)

Львів - 2019

Уклали:

Семотюк О.В., к. фіз.-мат. наук, ст. викладач

Пушак А.С., к. фіз.-мат. наук, доцент

# Зміст

Передмова	5
<b>1 Теоретичні основи оптики</b>	<b>7</b>
1.1 Геометрична оптика . . . . .	7
1.2 Хвильова оптика . . . . .	14
1.3 Квантова оптика . . . . .	22
<b>2 Приклади розв'язання задач</b>	<b>29</b>
<b>3 Задачі для самостійного розв'язування</b>	<b>39</b>
3.1 Геометрична оптика . . . . .	39
3.2 Хвильова оптика . . . . .	42
3.3 Квантова оптика . . . . .	48
<b>4 Література</b>	<b>55</b>
Додатки	57



# Передмова

У повсякденному житті ми зустрічаємося з найрізноманітнішими випромінюваннями: Сонячне світло, теплове випромінювання, радіохвилі або рентгенівські промені при всіх своїх відмінностях глибоко єдині за природою - усі вони представляють собою електромагнітне випромінювання. Різниця між ними пов'язана з їх різним положенням у електромагнітному спектрі, яке характеризується довжиною хвилі або частотою (табл. 1). Швидкість поширення їх у вакуумі, яка, як правило, називається швидкістю світла у вакуумі, однакова для всіх видів електромагнітного випромінювання; для всіх них ми маємо справу з однаковими законами відбивання, заломлення, дифракції, інтерференції та поляризації.

Наприкінці XVII ст. на основі багатовікового досвіду і розвитку представлень про природу світла виникли дві теорії: корпускулярна (І. Ньютон) і хвильова (Р. Гук та Х. Гюйгенс). Згідно з квантовою (корпускулярною) теорією світла, створеною на початку XIX сторіччя, і випромінювання світла, і його поширення відбувається у вигляді потоку світлових квантів-фотонів. Квантові представлення про світло добре узгоджується з законами випромінювання і поглинання світла, законами взаємодії світла з речовиною. Однак як з допомогою цих представлень пояснити такі добре вивчені явища, як інтерференція, дифракція та поляризація світла? Їх легко пояснити на основі хвильових представлень. Уся різноманітність вивчених властивостей і законів поширення світла, його взаємодії з речовиною підтверджують, що світло має складну природу. Світло представляє собою єдність протилежних видів руху - корпускулярного (квантового) і хвильового (електромагнітного). Довгий шлях розвитку уявлень про світло призвів до сучасних представлень про двояку - корпускулярно-хвильову - природу світла. При цьому маса ( $m$ ) і енергія фотона ( $E$ ) як корпускули зв'язані з його частотою коливань ( $\nu$ ) або довжиною хвилі у вакуумі ( $\lambda$ ) співвідношенням:

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{\lambda \cdot c},$$

$$E = h \cdot \nu,$$

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot c} = \frac{h}{p},$$

де  $c$  - швидкість поширення світла (електромагнітного випромінювання) у вакуумі;  $h$  - стала Планка;  $p = m \cdot c$  - імпульс фотона. Таким чином, світло представляє собою єдність дискретності і неперервності. Більше того, французький учений Луї де Бройль, усвідомлюючи існуючу в природі симетрію про двояку корпускулярно-хвильову природу світла, висунув 1923 році гіпотезу про універсальність корпускулярно-хвильового дуалізму. Де Бройль стверджував (і це підтвердилося експериментально), що не тільки фотони, а й електрони, будь-які інші частинки матерії нарівні з корпускулярними володіють також і хвильовими властивостями.

Таблиця 1.

Області спектра		Довжина хвилі
Низькочастотні коливання	інфразвукові звукові	$> 18000$ км (18000-18) км
Радіохвилі	довгі середні проміжні короткі ультракороткі мікрохвилі	(18000-2000) м (2000-200) м (200-50) м (50-10) м 10 м до 1 см 1 см до 0,75 мм
Інфрачервоне випромінювання	довгохвильове середньохвильове короткохвильове	(750-10) мкм (10-1,5) мкм (1,5-0,75) мкм
Видиме випромінювання	червоне оранжеве жовте зелене блакитне синє фіолетове	(0,75-0,62) мкм (0,62-0,59) мкм (0,59-0,56) мкм (0,56-0,50) мкм (0,50-0,48) мкм (0,48-0,45) мкм (0,45-0,40) мкм
Ультрафіолетове випромінювання		(0,40-0,01) мкм
Ренгенівське випромінювання		10 нм - 4 нм
Гамма-випромінювання		4 нм і менше

# Розділ 1

## Теоретичні основи оптики

### 1.1 Геометрична оптика

При переході променя з одного середовища в інше має місце закон заломлення світла:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} = \frac{v_1}{v_2},$$

де  $\alpha$  - кут падіння;  $\beta$  - кут заломлення;  $n_{21}$  - відносний показник заломлення другого середовища відносно першого (рис. 1.1);  $n_2 = \frac{c}{v_2}$  та  $n_1 = \frac{c}{v_1}$  абсолютні показники заломлення, відповідно, другого і першого середовищ;  $v_2$  та  $v_1$  - швидкості світла у другому та першому середовищах;  $c$  - швидкість поширення світла у вакуумі ( $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с). Слід зауважити, що абсолютний показник заломлення - це показник заломлення середовища відносно вакууму, для якого показник заломлення рівний одиниці. Зазвичай, слово «абсолютний» опускають.

Формула тонкої лінзи:

$$(n - 1) \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} = D,$$

де  $n$  - відносний показник заломлення матеріалу лінзи (стосовно показника заломлення навколишнього середовища);  $R_1$  і  $R_2$  - радіуси кривизни поверхонь лінзи;  $a$  та  $b$  - відстані від лінзи до предмета та його зображення відповідно;  $f$  - фокусна відстань лінзи;  $D$  - оптична діоптрія сила лінзи: одиниця  $D$  - діоптрія - оптична сила лінзи з фокусною відстанню  $f = 1$  м:  $1 \text{ дптр} = 1/\text{м}$ . Радіус кривизни опуклої поверхні лінзи вважається додатним, вгнутої - від'ємним. Для розсічуючої лінзи відстані  $f$  та  $b$  слід вважати від'ємними.

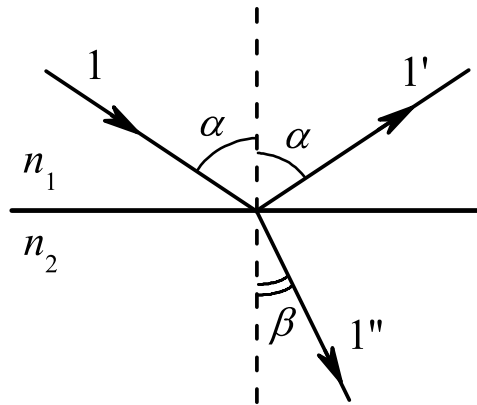


Рис. 1.1: Відбивання і заломлення світла.

Для сферичного дзеркала оптична сила  $D$  визначається формулою:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{2}{R} = \frac{1}{f} = D,$$

де  $a$  та  $b$  - відстані від дзеркала до предмета та його зображення, відповідно;  $R$  - радіус кривизни дзеркала  $f$  - його фокусна відстань. Відстані від дзеркала у напрямку променя вважаються додатними, а проти променя - від'ємними. Оптична сила двох лінз, складених разом,

$$D = D_1 + D_2,$$

де  $D_1$  і  $D_2$  - оптичні сили лінз.

Поперечне лінійне збільшення в лінзах і дзеркалах визначається формулою:

$$k = \frac{y_2}{y_1} = \frac{b}{a},$$

де  $y_1$  - висота предмета;  $y_2$  - висота зображення.

Збільшення лупи:

$$k = \frac{L}{f},$$

де  $L$  - відстань найкращого зору;  $f$  - фокусна відстань лупи.

Збільшення телескопа:

$$k = \frac{f_1}{f_2},$$

де  $f_1$  та  $f_2$ , - фокусні відстані об'єктива та окуляра.



Збільшення мікроскопа:

$$k = L \cdot d \cdot D_1 \cdot D_2,$$

де  $L$  - відстань найкращого зору;  $d$  - відстань між фокусами об'єктива і окуляра;  $D_1$  і  $D_2$  - оптичні сили об'єктива і окуляра. При малих значеннях кута падіння променя на бічну грань призми та заломлюючого кута призми ( $\alpha$ ) кут відхилення ( $\varphi$ ) променя призмою від його початкового напрямку задається виразом:

$$\varphi = \alpha \cdot (n - 1),$$

де  $n$  - показник заломлення матеріалу призми.

**Променистою енергією**  $W$  називається енергія випромінювання всіх світлових видимих, та променів. Залежно від спектрального складу променистої енергії  $W$  і спектральної чутливості приймача випромінювання  $W$  можна виміряти у двох системах одиниць: енергетичній та світлотехнічній (табл. 2).

Таблиця 2.

Енергетичні та світлотехнічні одиниці вимірювання			
Енергетичні		Світлотехнічні	
Найменування	Одиниця	Найменування	Одиниця
Промениста енергія ( $W$ )	$Вт \cdot с$	Світлова енергія $W = F \dot{t}$	$лм \cdot с$
Променистий потік ( $\Phi$ )	$Вт$	Свіловий потік ( $F$ ) $dF = I \cdot d\Omega$	$лм, (кд \cdot ср)$
Сила випромінювання ( $I$ ) (Енергетична сила світла)	$Вт/ср$	Сила світла ( $I$ ) $I = \frac{dF}{d\Omega}$	$кд, (лм/ср)$
Густина випромінювання Енергетична світимість	$Вт/м^2$	Світимість ( $R$ ) $I = \frac{dF}{dS}$	$лм/м^2$
Променистість ( $B_\alpha$ ) (Енергетична яскравість)	$Вт/м^2 \cdot ср$	Яскравість ( $B_\alpha$ ) $B_\alpha = \frac{I_\alpha}{dS \cos \alpha}$	$кд/м^2$
Опроміненість ( $E$ )	$Вт/м^2$	Освітленість ( $E$ ) $E = \frac{dF}{dS} = \frac{I \cdot \alpha}{r^2}$	$лк (лм/м^2)$
Опромінення	$Вт \cdot с/м^2$	Освітлення $H = E \cdot t$	$лк \cdot с$ $\frac{лм \cdot с}{м^2}$

В ультрафіолетовій та інфрачервоній областях спектра користуються енергетичною системою одиниць. Світлотехнічна система використовується тільки у видимій області спектра  $(0,4 \div 0,75) \mu м$ , оскільки вона базується головним чином на світлових відчуттях людського ока.

З таблиці отримаємо зв'язок між енергетичні і світлотехнічні одиниці:

$$\frac{F(\lambda M)}{\Phi(Bm)} = V_\lambda - \text{коефіцієнт відносності.}$$

$$\frac{V_\lambda}{V_{max}} = K_\lambda - \text{коефіцієнт відносної відносності.}$$

$$V_{max} = 683(\lambda M/Bm) - \text{максимальне значення коефіцієнта відносності.}$$

$$M = \frac{I}{V_{max}} = 0,00146 - \text{механічний еквівалент світла.}$$

$$F(\lambda M) = K_\lambda \cdot V_{max} \left(\frac{\lambda M}{Bm}\right) \cdot \Phi(Bm) = K_\lambda \cdot 683 \left(\frac{Bm}{\lambda M}\right) \cdot \Phi(Bm)$$

$$\Phi(Bm) = \frac{F(\lambda M)}{K_\lambda} \cdot \frac{1}{V_{max}} = \frac{F(\lambda M)}{K_\lambda} \cdot M \left(\frac{Bm}{\lambda M}\right) = \frac{I}{K_\lambda} \cdot 0,00146 \left(\frac{Bm}{\lambda M}\right) \cdot F(\lambda M).$$

**Променистий потік  $\Phi$**  визначається променистою енергією, яка переноситься електромагнітними хвилями за одиницю часу:

$$\Phi = \frac{dW}{dt}.$$

**Сила випромінювання  $I$**  чисельно рівна відношенню елементарного променистого потоку  $d\Phi$ , що випромінюється всередині елементарного тілесного кута  $d\Omega$ , до величини цього кута:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}.$$

**Елементарний тілесний кут  $\Omega$**  рівний відношенню площі елементарної поверхні  $dS$  вирізаної на сфері конусом з вершиною в центрі сфери, до квадрату радіуса  $r$  сфери:

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2}$$

**Густина випромінювання  $R$**  - це променистий потік з одиниці площі випромінюючої поверхні, зосереджений усередині тілесного кута  $2\pi$ :

$$R = \frac{d\Phi}{dS}.$$

**Променистість поверхні випромінювача  $B_\alpha$**  у напрямку  $\alpha$  визначається відношенням сили випромінювання  $I_\alpha$  в даному напрямі (рис.1.2) елемента поверхні випромінювача площею  $dS$  до площі ортогональної проекції цього елемента  $dS_\alpha$  на площину, перпендикулярну до заданого напрямку:

$$B_\alpha = \frac{I_\alpha}{dS'_\alpha} = \frac{I_\alpha}{dS'_\alpha \cdot \cos \alpha},$$

де  $\alpha$  - кут між нормаллю  $\vec{n}$  до елемента випромінюючої поверхні і напрямом випромінювання (рис. 1.2).

Точкове джерело  $O$  (рис. 1.3) силою випромінювання  $I$  створює на елементарній площадці площею  $dS$ , розташованій на відстані  $r$  від нього, опроміненість  $E$  (енергетичну освітленість):

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I \cdot d\Omega}{dS} = \frac{I \cdot \alpha}{r^2},$$

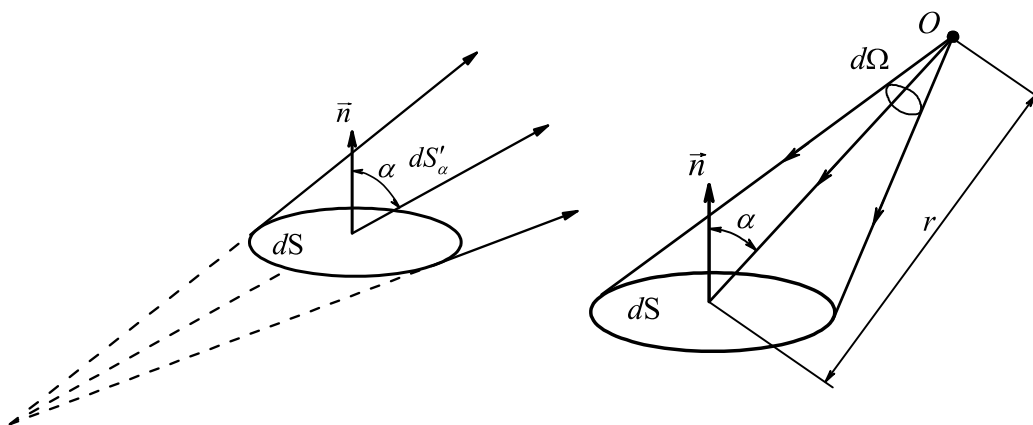


Рис. 1.2: Сила випромінювання  $I_\alpha$  в даному напрямі.

Рис. 1.3: Точкове джерело  $O$  силою випромінювання  $I$  створює на елементарній площадці площею.

де  $\alpha$  - кут падіння променистого потоку на цю площадку (рис. 1.3). Кількість опромінення  $H$  поверхні протягом певного часу  $t$  визначається виразом:

$$H = E \cdot t,$$

де  $E$  - опроміненість поверхні;  $t$  - час експозиції. Поняття величини  $H$  часто використовується в різних фотохімічних процесах, зокрема — в фотографії, де реакція світлочутливої емульсії залежить від величини її опроміненості (освітленості, табл. 2)  $E$  та часу експозиції  $t$ .

Якщо променистість у всіх напрямках однакова ( $B_\alpha = B = const$ ), то в цьому випадку виконується закон Ламберта:

$$I_\alpha = I_0 \cdot \cos \alpha,$$

де  $I_0$  сила випромінювання (рис. 1.4) в напрямі, перпендикулярному елементові випромінюючої поверхні площею  $dS$ ;  $\alpha$  - кут між напрямом випромінювання і перпендикуляром до випромінюючої поверхні;  $I_\alpha$  - сила

випромінювання в напрямі, який задається кутом  $\alpha$ . Крива розподілу сили випромінювання  $I_\alpha$  (рис. 1.4) представляє собою коло, що дотикається до випромінюючої поверхні.

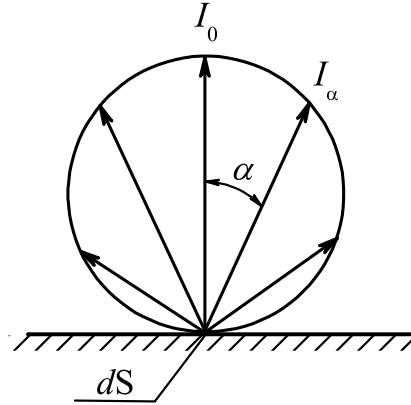


Рис. 1.4: Сила випромінювання в напрямі.

Закон Ламберта строго виконується тільки для абсолютно чорного тіла й ідеально розсіюючих або ідеально матових поверхонь. Для випромінюючих поверхонь, які підлягають закону Ламберта, густина випромінювання поверхні рівна її променистості, помноженій на  $\pi$ :

$$R = \pi \cdot B,$$

$$I_0 = B \cdot dS = \frac{R}{\pi} dS.$$

Співвідношення між  $R$  і  $B$  легко вивести (див. приклад 1), враховуючи зв'язок між тілесним кутом  $\Omega$  та плоским кутом  $\alpha$  (рис.1.5):

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha).$$

Співвідношення між енергетичними і світлотехнічними одиницями електромагнітного випромінювання (табл. 2) задаються коефіцієнтом видності:

$$V_\lambda = \frac{F(\text{лм})}{\Phi(\text{Вт})},$$

де  $\Phi$  - променистий потік у ватах;  $F$  - світловий потік у люменах. Величина  $V_\lambda$  прямує до нуля на границях видимої ділянки спектра і досягає максимуму ( $V_{max}$ ) при довжині хвилі  $\lambda = 0,555 \text{ мкм}$ , ( $\nu = 5.40 \cdot 10^{10} \text{ Гц}$ ).

Коефіцієнт відносної видності задається співвідношенням:

$$K_\lambda = \frac{V_\lambda}{V_{max}},$$

де  $V_{max}$  - максимальне значення коефіцієнта відності.

Зручним способом зображення факторів відності людського ока є побудова кривої відносної відності, для чого по осі ординат відкладають значення  $K_\lambda$ , а по осі абсцис -  $\lambda$  (рис. 1.6).

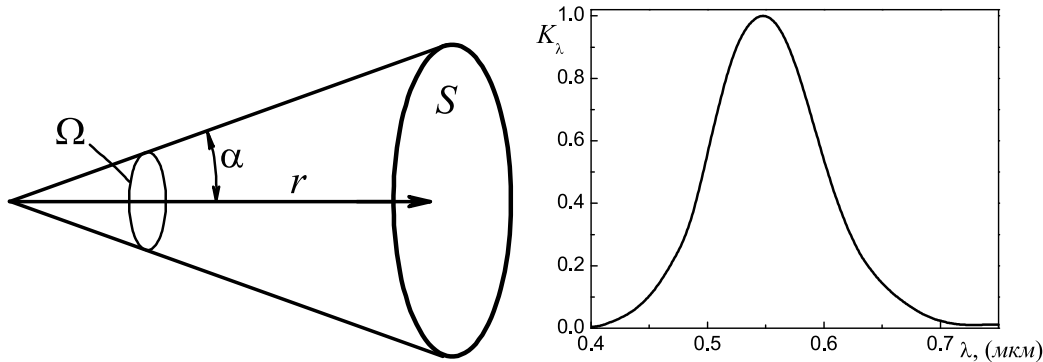


Рис. 1.5: Зв'язок між тілесним кутом  $\Omega$  та плоским кутом  $\alpha$ .

Рис. 1.6: Залежність коефіцієнта відносної відності від довжини хвилі.

Величина, обернена до  $V_{max}$ , називається механічним еквівалентом світла:

$$M = \frac{1}{V_{max}}.$$

Механічний еквівалент світла ( $M$ ) визначає потужність (у ватах), необхідну для створення світлового потоку в  $1\text{лм}$  в максимумі ( $\lambda = 0,555\text{мкм}$ ) кривої відносної відності:

$$M = 0,00146(\text{Вт/лм}) = 1/683(\text{Вт/лм}) = \frac{I}{V_{max}}.$$

Останнє співвідношення є основою для встановлення основної світлотехнічної одиниці системи СІ: **кандела** ( $\text{кд}$ ) — сила світла у заданому напрямі джерела, яке випромінює монохроматичне електромагнітне випромінювання частотою  $5,40 \cdot 10^{14} \text{Гц}$  сила випромінювання якого в цьому напрямі становить  $1/683(\text{Вт/ср})$ . Величини  $F$ ,  $\Phi$ ,  $K_\lambda$ ,  $V_\lambda$ ,  $V_{max}$  зв'язані між собою співвідношенням:

$$F = V_\lambda \cdot \Phi = K_\lambda \cdot V_{max} \cdot \Phi = K_\lambda \cdot \frac{1}{M} \cdot \Phi;$$

$$V_{max} = \frac{1}{M} = 683 \frac{\text{лМ}}{\text{Вт}}.$$

## 1.2 Хвильова оптика

При накладанні двох (або кількох) когерентних світлових хвиль має місце просторовий перерозподіл світлового потоку, результатів чого в одних місцях виникають максимуми інтенсивності світла, а в інших - мінімуми. Це явище називається інтерференцією світла. Світлові хвилі (як і інші) називаються когерентними, якщо різниця їх фаз сталаю в часі. Оптична довжина шляху променя визначається за формулою:

$$L = n \cdot l,$$

де  $n$  - показник заломлення (абсолютний) середовища;  $l$  - геометрична довжина шляху променя в середовищі.

Оптична різниця ходу двох світлових хвиль:

$$\Delta = L_1 - L_2 = n_1 l_1 - n_2 l_2,$$

де  $l_1$  та  $l_2$  - геометричні довжини шляху світлових хвиль у першому і другому середовищах;  $n_1$  та  $n_2$  - відповідно, показники заломлення цих середовищ. Залежність різниці фаз  $\alpha$  коливань у певній точці простору від оптичної різниці ходу світлових хвиль, які збуджують ці коливання, задається виразом:

$$\alpha = \Delta \cdot \frac{2\pi}{\lambda},$$

де  $\lambda$  - довжина світлової хвилі у вакуумі. Умова **максимуму** інтенсивності світла при інтерференції:

$$\Delta = \pm 2k \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots).$$

Умова **мінімуму** інтенсивності світла при інтерференції (умова інтерференційного мінімуму):

$$\Delta = \pm(2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots),$$

де  $k$  - порядок інтерференційного максимуму або мінімуму відповідно.

Відстань між двома сусідніми інтерференційними максимумами (або мінімумами) на екрані, розташованому паралельного до двох когерентних джерел світла:

$$\Delta x = \frac{L}{d} \cdot \lambda,$$

де  $\lambda$  - довжина хвилі світла;  $L$  - відстань від екрана до джерел світла, розташованих один від одного на відстані  $d$  (при цьому  $L \gg d$ ). Результат інтерференції світла у **плоскопаралельних пластинах (у проходячому світлі)** визначається за формулами: - умова інтерференційного максимуму:

$$2 \cdot d \cdot n \cdot \cos \beta = 2k \cdot \frac{\lambda}{2} \quad \text{або} \quad 2 \cdot d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 i} \cdot \cos \beta = 2k \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots),$$

де  $\lambda$  - довжина хвилі світла у вакуумі;  $n$  - показник заломлення матеріалу пластинки;  $d$  - товщина пластинки,  $\alpha$  та  $\beta$  - відповідно, кути падіння та заломлення. У **відбитому** світлі умова підсилення і ослаблення інтенсивності світла **обернена** до умов у **проходячому** світлі.

Для усунення відбитого світла від оптичних деталей (так званого про-світлення оптики) на поверхні останніх наносять тонку плівку матеріалу з показником заломлення:

$$n = \sqrt{n_d},$$

де  $n_d$  - показник заломлення матеріалу лінзи. Ця формула є умовою рівності амплітуд, відбитих від лінзи та плівки променів (рис.1.7).

Умовою мінімуму інтерференції цих відбитих променів при  $\alpha = 0$  є рівність:

$$2 \cdot d \cdot n = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2},$$

яка при  $k = 0$  має вигляд:

$$d \cdot n = \frac{\lambda}{4},$$

де  $d$  - товщина просвітлюючої плівки;  $\lambda$  - довжина хвилі світла у вакуумі.

Радіуси **світлих** кілець Ньютона (у проходячому світлі) визначаються за формулою:

$$r_k = \sqrt{k \cdot R \cdot \lambda} \quad (k = 1, 2, 3, \dots),$$

а радіуси **темних** кілець Ньютона -

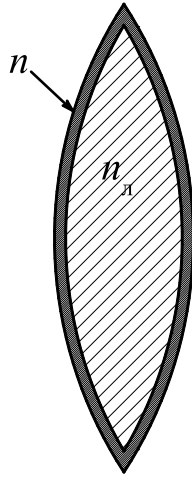


Рис. 1.7: Просвітлення оптики.

$$r_k = \sqrt{(2k - 1) \cdot R \cdot \frac{\lambda}{2}} \quad k = 1, 2, 3, \dots,$$

де  $R$  - радіус кривизни лінзи. У **відбитому** світлі розташування **світлих і темних** кілець Ньютона оберене їх розташуванню в проходячому світлі.

**Дифракцією** світла називається будь-яке відхилення розповсюдження світлових хвиль поблизу перешкод від законів геометричної оптики. Явище дифракції пояснюється за допомогою принципу Гюйгенса, згідно з яким кожна точка, до якої доходить хвиля, є джерелом вторинних хвиль, а огинаюча цих хвиль дає положення хвиля, є джерелом вторинних хвиль, а огинаюча цих хвиль дає положення хвильового фронту в наступний момент часу.

Френель вклав у принцип Гюйгенса фізичний зміст, доповнивши його ідеєю про інтерференцію вторинних хвиль. Згідно з принципом Гюйгенса-Френеля, кожна точка хвильової поверхні може розглядатися як джерелом вторинної хвилі.

Положення дифракційних максимумів (максимумів освітленості) і мінімумів (повна темнота) при дифракції на одній щілині, на нормально падає пучок паралельних променів (дифракція Фраунгофера), визначається умовами:

- для мінімумів  $a \cdot \sin \varphi = \pm 2k \cdot \frac{\lambda}{2}$ ; ( $k = 1, 2, 3, \dots$ );
- для максимумів  $a \cdot \sin \varphi = \pm (2k + 1) \cdot \frac{\lambda + 1}{2}$ ; ( $k = 1, 2, 3, \dots$ );

де  $a$  - ширина щілини;  $\varphi$  кут дифракції;  $\lambda$  - довжина хвилі падаючого світла;  $k$  - порядок дифракційного спектра.

Результат дифракції Фраунгофера паралельних світлових променів



на одновірній дифракційній ґратці (при умові, що світло падає на ґратку нормально) визначається за формулами: умова головних максимумів

$$d \cdot \sin \varphi = \pm 2k \cdot \frac{\lambda}{2}; (k = 1, 2, 3, \dots);$$

умова головних мінімумів  $a \cdot \sin \varphi = \pm 2k \cdot \frac{\lambda+1}{2}; (k = 1, 2, 3, \dots);$  де  $a$  - ширина щілини дифракційної ґратки;  $d$  - період дифракційної ґратки (відстань між щілинами);  $k$  - порядок дифракційного спектра;  $\varphi$  - кут дифракції;  $\lambda$  - довжина хвилі падаючого світла.

Якщо дифракційна ґратка складається з  $N$  щілин, то між двома головними максимумами розташовуються  $(N - 1)$  додаткових мінімумів, розділених вторинними (додатковими) максимумами, які створюють надзвичайно слабкий фон. Чим більше число щілин  $N$ , тим більша кількість світлової енергії пройде через ґратку, тим більше додаткових мінімумів утвориться між сусідніми головними максимумами, тим, очевидно, інтенсивнішими і гострішими будуть головні максимуми.

**Роздільна здатність** дифракційної ґратки визначається за формулою:

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = k \cdot N,$$

де  $N$  - загальна кількість щілин ґратки;  $k$  - порядок спектра;  $\lambda$  і  $\lambda + \Delta\lambda$  - довжини хвиль двох близьких спектральних ліній, які ще розділяються дифракційною ґраткою.

**Кутова дисперсія** дифракційної ґратки:

$$D_{\varphi} = \frac{d\varphi}{d\lambda}.$$

**Лінійна дисперсія** дифракційної ґратки:

$$D_{л} = F \cdot \frac{d\varphi}{d\lambda},$$

де  $F$  - фокусна відстань лінзи, яка проектує спектр на екран.

При дифракції рентгенівських променів має місце рівняння

Дифракція рентгенівських променів описує формула Вульфа-Бреггів:

$$\Delta = 2d \cdot \sin \Theta = k \cdot \lambda \quad (k = 1, 2, 3, \dots),$$

де  $d$  - стала ґратки кристала (відстань між кристалографічними площинами кристала);  $\Theta$  - кут між напрямком падаючих променів і кристалографічною площиною (рис. 1.8). Таким чином, при різниці ходу ( $\Delta$ ) між двома променями, відбитими від сусідніх кристалографічних площин,

кратній цілому числу довжин хвиль  $\lambda$ , спостерігається дифракційний максимум.

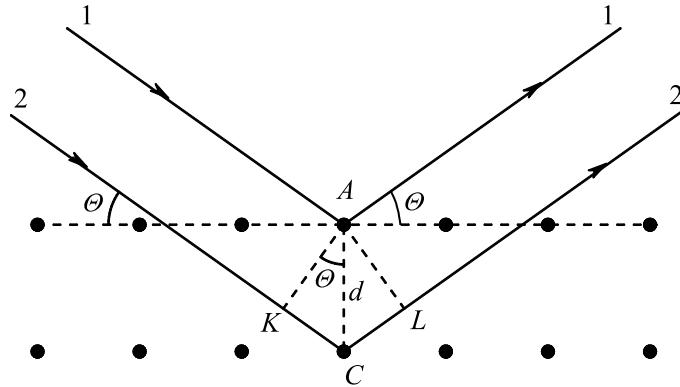


Рис. 1.8: Взаємодія світла з кристалом.

При відбиванні природного світла від діелектричного дзеркала мають місце формули Френеля:

$$I_1 = 0,5 \cdot I_0 \cdot \left( \frac{\sin(i - \beta)}{\sin(i + \beta)} \right)^2; \quad I_2 = 0,5 \cdot I_0 \cdot \left( \frac{\operatorname{tg}(i - \beta)}{\operatorname{tg}(i + \beta)} \right)^2,$$

де  $I_1$  - інтенсивність світлових коливань у відбитому промені, які відбиваються в напрямку, перпендикулярному до площин падіння світла;  $I_2$  - інтенсивність світлових коливань у відбитому промені, які відбиваються в напрямі, паралельному до площини падіння світла;  $I_0$  - інтенсивність падаючого природного світла  $i$  - кут падіння;  $\beta$  - кут заломлення. Звичайно, за напрям світлових коливань приймають напрям коливань світлового вектора - вектора напруженості  $\vec{E}$  електричного поля світлової хвилі. Останнє зумовлене тим, що при дії світла на речовину основне значення має електрична складова поля хвилі, яка діє на електрони в атомах речовин.

Якщо  $\alpha + \beta = 90^\circ$ , то  $I_2 = 0$  (тобто відбитий промінь повністю поляризований), а відбитий і заломлений промені утворюють прямий кут. У цьому випадку кут падіння  $\alpha_B$  і показник заломлення  $n$  діелектричного дзеркала зв'язані співвідношенням (**закон Брюстера**):

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n.$$

Інтенсивність світла, яке проходить через поляризатор і аналізатор, описується **законом Малюса**:

$$I = I_1 \cdot \cos^2 \varphi,$$

де  $\varphi$  - кут між оптичними осями поляризатора і аналізатора;  $I_1$  - інтенсивність світла, яке пройшло через поляризатор (тобто світла, що падає на аналізатор - рис. 1.9).

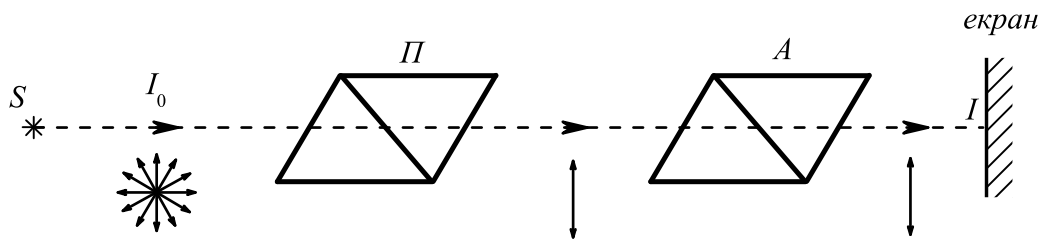


Рис. 1.9: Закон Малюса.

При відсутності поглинання поляризатором інтенсивність світла  $I_1$ , яке пройшло через поляризатор, рівна

$$I_1 = \frac{1}{2} \cdot I_0,$$

де  $I_0$  - інтенсивність природного світла, яке падає на поляризатор.

Усі прозорі кристали (крім кристалів кубічної системи, які ізотропними) мають здатність подвійного променезаломлення, тобто роздвоювання кожного падаючого на них світлового променя. Останнє явище пояснюється особливостями розповсюдження світла в анізотропних середовищах і безпосередньо впливає із рівнянь Максвелла.

Якщо на товстий кристал (наприклад, ісландського шпату) спрямувати вузький промінь світла, то із нього вийдуть два просторово розділені промені, паралельні один до одного і до падаючого променя. Навіть у тому випадку, коли первинний промінь падає на кристал нормально, заломлений промінь розділяється на два, причому один із них є продовженням первинного, а інший відхиляється (рис. 1.10). Другий із цих променів одержав назву незвичайного (н), а перший звичайного (з). Звичайний і незвичайний промені поляризовані у взаємно перпендикулярних площинах. Напрямок в оптично анізотропному кристалі, при розповсюдженні вздовж якого променя світла подвійне променезаломлення відсутнє, називається оптичною віссю (рис. 1.10, напрямком  $OO'$ ).

Звичайні промені розповсюджуються в усіх напрямках з однаковою швидкістю  $\nu_z = c/n_z$ , а незвичайні - з різними швидкостями  $\nu_n = c/n_n$  (залежно від кута між вектором  $E$  і оптичною віссю, рис. 1.10, а, б).

Деякі двоякозаломлюючі кристали (турмалін, герпатит) мають властивість дихроїзму, тобто різного поглинання світла залежно від орієнтації електричного вектора  $E$  світлової хвилі по відношенню до їх оптичної осі.

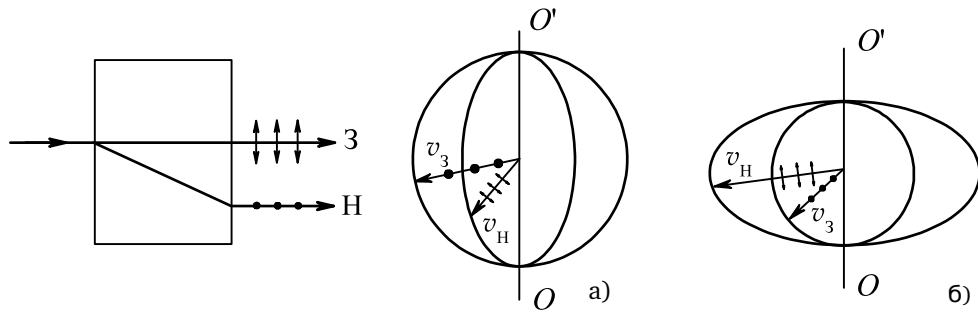


Рис. 1.10: Незвичайний (н) і звичайний (з) промені  $OO'$ . Оптичні осі кристалів а) додатній б) від'ємний.

Між звичайним і незвичайним променями при проходженні останніми кристалічної пластинки, вирізаної паралельно оптичній осі, виникає у випадку нормального падіння світла різниця ходу:

$$\Delta = (n_z - n_n) \cdot d,$$

або різниця фаз

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} (n_z - n_n) \cdot d,$$

де  $n_z$ , та  $n_n$  показники заломлення звичайного та незвичайного променів відповідно;  $d$  - довжина пластинки;  $\lambda$  - довжина світлової (електромагнітної) хвилі у вакуумі.

Вирізана паралельно до оптичної осі пластинка товщиною  $d$ , для якої оптична різниця ходу:

$$\Delta = (n_z - n_n) \cdot d = \pm(m + \frac{1}{4})\lambda; \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

називається пластинкою у чвертьхвилі. Знак «+» відповідає від'ємним кристалом (рис. 1.10,б), а «-» додатним (рис. 1.10,а). Пластинка, для якої:

$$\Delta = (n_z - n_n) \cdot d = \pm(m + \frac{1}{2})\lambda; \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

називається пластинкою в півхвилі і т.д. Згадані пластинки використовуються для одержання і аналізу різного виду (лінійно-, еліптично-, циркулярно - тощо) поляризованого світла.

Оптичні ізотропні речовини стають оптично анізотропними (штучна оптична анізотропія) під дією: 1 - одноосного стиску або розтягу (кристали кубічної системи, стекла тощо); 2 - електричного поля (рідини, аморфні тіла, гази); 3 - магнітного поля (рідини, стекла, колоїди). У зазначених випадках речовина набуває властивості одноосного кристала, оптична вісь якого співпадає з напрямком деформації, електричного або магнітного полів.

Мірою виникаючої штучної оптичної анізотропії є різниця показників заломлення звичайного ( $n_3$ ) і незвичайного ( $n_n$ ) променів світла у напрямку, перпендикулярному до оптичної осі:

$$n_3 - n_n = k_1 \sigma \text{ (у випадку деформації);}$$

$$n_3 - n_n = k_2 E^2 \text{ (у випадку електричного поля, ефект Керра);}$$

$$n_3 - n_n = k_3 H^2 \text{ (у випадку магнітного поля, ефект Коттона-Муттона),}$$

де  $k_1, k_2, k_3$  - сталі, що характеризують речовину;  $\sigma$  - нормальне напруження;  $E$  і  $H$ , відповідно, напруженість електричного і магнітного полів. Зокрема, при ефекті Керра між звичайним і незвичайним променями виникає на шляху  $d$  різниця ходу:

$$\Delta = (n_3 - n_n) \cdot d = k_2 \cdot d \cdot E^2,$$

або відповідна різниця фаз при довжині хвилі  $\lambda$

$$\rho = \frac{2\pi}{\lambda} = 2\pi B \cdot d \cdot E^2,$$

де  $B = k_2/\lambda$  - стала Керра.

Ефект Керра - практично безінерційне явище (постійна часу  $\approx 10^{10}$ с і менше), тому так звані комірки Керра є, по суті, ідеальними оптичними затворами (модуляторами) при проведенні швидкісних фото- і кінозйомок, оптичної локації, оптичної телефонії.

Кут повороту площини поляризації для оптично активних кристалів і чистих рідин визначається за формулою:

$$\varphi = \varphi_0 \cdot d;$$

для оптично активних розчинів:

$$\varphi = |\varphi_0| \cdot c \cdot d,$$

де  $d$  - відстань, пройдена світлом в оптично активній речовині;  $\varphi_0$ , ( $\varphi_0$  - т.зв. питома обертання;  $c$  - масова концентрація оптично активної речовини ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ). Якщо заряджена частинка рухається у речовині з «надсвітловою» швидкістю  $v$ , то виникає свічення **Вавілова-Черенкова** за умови:

$$c > c_{\Phi} = \frac{c}{n},$$

де  $c$  - швидкість світла у вакуумі;  $n$  - показник заломлення речовини;  $v_{\Phi}$  - фазова швидкість світла. Випромінювання Вавілова-Черенкова поширюється лише у напрямках, які утворюють гострий кут  $\Theta$  (рис.1.5) з траєкторією частинки, тобто вздовж утворюючих конуса, вісь якого співпадає з напрямом швидкості частинки. Кут  $\Theta$  задається виразом

$$\cos \Theta = \frac{v_p}{v} = \frac{c}{n \cdot v}.$$

### 1.3 Квантова оптика

Енергія фотона (кванта світла) визначається за формулою:

$$E = h \cdot \Theta,$$

де  $h = 6,626176 \cdot 10^{-34} \text{Дж} \cdot \text{с}$  - стала Планка;  $\Theta$  - частота фотона ( $\text{Гц}$ ).

Маса фотона  $m$  вираховується із закону взаємозв'язку маси і енергії:

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h \cdot \nu}{c^2},$$

де  $c = 2,997924 \cdot 10^8 \text{м}/\text{с}$  - швидкість поширення світла у вакуумі.

Оскільки фотон - елементарна частинка, яка завжди рухається зі швидкістю світла і має масу спокою, що рівна нулю, його імпульс визначається одним із виразів:

$$p = m \cdot c = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda} = \hbar \cdot k,$$

де  $\lambda$  - довжина хвилі фотона у вакуумі;  $\hbar = h/2\pi$ ;  $k = 2\pi/\lambda$  -хвильове число.

Тиск  $P$ , створюваний світлом при нормальному падінні його на поверхню

$$P = \frac{N \cdot h\nu}{c}(1 + \rho) = \frac{E}{c}(1 + \rho) = \omega(1 + \rho),$$

де  $N$  - число фотонів, які падають на одиницю поверхні (нормально до неї) в одиницю часу;  $E = N \cdot h\nu$  - енергія, яка падає на одиницю поверхні в одиницю часу (опроміненість поверхні; див. табл. 2);  $\rho$  - коефіцієнт відбивання світла від поверхні;  $\omega = E/c$  - об'ємна густина енергії випромінювання.

Зв'язок між енергією фотона, що викликає зовнішній фотоефект, і максимальною кінетичною енергією вилітаючих при цьому з речовини електронів дається рівнянням Ейнштейна для **зовнішнього фотоефекту**:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2},$$

де  $A$  - робота виходу електрона із речовини;  $m$  - маса спокою електрона;  $v_{max}$  - максимальна швидкість вилітаючих із речовини електронів. Таким чином, енергія падаючого фотона витрачається на виконання роботи виходу електрона  $A$  із речовини (виривання із речовини фотоелектрона) а на надання цьому електрону кінетичної енергії  $\frac{mv^2}{2}$ . Якщо  $v_{max} = 0$ , то

$$\nu_0 = \frac{A}{h},$$

де  $\nu_0$  - частота світла, яка відповідає «червоній границі», тобто при  $\nu < \nu_0$  зовнішній фотоефект відсутній.

Зв'язок між довжиною хвилі фотона (у мікронах,  $мкм$ ) та його енергією (у електронвольтах  $eB$ ) задається співвідношенням

$$\lambda = \frac{1,24}{E(eB)} (мкм),$$

де  $1eB = 1,6 \cdot 10^{-19} Кл \cdot 1B = 1,6 \cdot 10^{19} Дж$ ;  $e = 1,6 \cdot 10^{19} Кл$  - елементарний заряд.

Поглинання світла у речовині описується **законом Бугера**:

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

де  $I_0$  та  $I$  - відповідно, інтенсивності монохроматичного світла на вході і виході шару поглинаючої речовини товщиною  $x$ ;  $k$  - коефіцієнт поглинання, який залежить від довжини хвилі світла ( $k = k(\lambda)$ ). При  $x = 1/k$  інтенсивність світла  $I$  порівняно з  $I_0$  зменшується в  $e$  разів. Зміна довжини хвилі монохроматичного рентгенівського випромінювання при **комptonівському розсіянні** визначається за формулою:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda(1 - \cos\varphi) = 2\lambda_c \cdot \sin^2 \frac{\varphi}{2},$$

де  $\lambda$  - довжина хвилі розсіяного випромінювання;  $\lambda_c$  - довжина хвилі падаючого випромінювання  $\lambda_c = \frac{h}{mc} = 2,42 \text{ нм}$  - комптонівська довжина хвилі;  $m$  - маса спокою електрона;  $c$  - швидкість поширення світла у вакуумі;  $\varphi$  - кут розсіювання. Усі тіла, нагріті до температури вище  $0\text{К}$ , випромінюють променисту (електромагнітну) енергію. Випромінювання тілами променистої енергії, що обумовлене їх нагріванням, називається **тепловим випромінюванням**. **Теплове випромінювання** - єдиний вид випромінювання, що може бути рівноважним.

Фундаментальним поняттям при розгляді теплового випромінювання є поняття про **абсолютно чорне тіло (АЧТ)** - тіло, яке поглинає все падаюче на нього випромінювання всіх довжин хвиль.

Спектральний розподіл випромінювання АЧТ описується законом **(формулою) Планка**:

$$r_0(\lambda, T) = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1},$$

де  $r_0(\lambda, T)$  - спектральна густина випромінювання АЧТ, де  $r_0(\lambda, T)$  виражається в  $\text{Вт} \cdot \text{м}^2$ .

Таким чином, за формулою Планка можна визначити спектральну густина випромінювання АЧТ  $r_0(\lambda, T)$  на одиничний інтервал довжин хвиль спектра випромінювання при заданій певній довжині хвилі  $\lambda$  і температурі  $T$ . Розрахунки за цією формулою співпадають із експериментальними даними для всіх довжин хвиль і температур. **Із закону Планка випливають усі інші закони і наближення, що характеризують випромінювання АЧТ:**

для довгохвильової області спектра випромінювання АЧТ ( $h\theta \ll kT$ , тобто) справеливий закон Релея-Джінса  $\lambda T \gg hc/k$ :

$$r_0(\lambda, T) = \frac{2\pi c}{\lambda^4} \cdot kT,$$

??? За збільшення температури АЧТ спектральної густини випромінювання АЧТ можна спектральної випромінювання зсування у короткохвильової області .....

для короткохвильової області спектра випромінювання АЧТ ( $h\nu \gg kT$ , тобто  $\lambda T \ll hc/k$ ) справедливе так зване **наближення Віна**: ??????

$$r_0(\lambda, T) = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{hc}{\lambda kT}},$$

у максимумі спектральної густини випромінювання АЧТ ( $\frac{\partial r_0(\lambda, T)}{\partial \lambda}$ ) а справедливий **закон зміщення Віна (перший закон Віна)**:



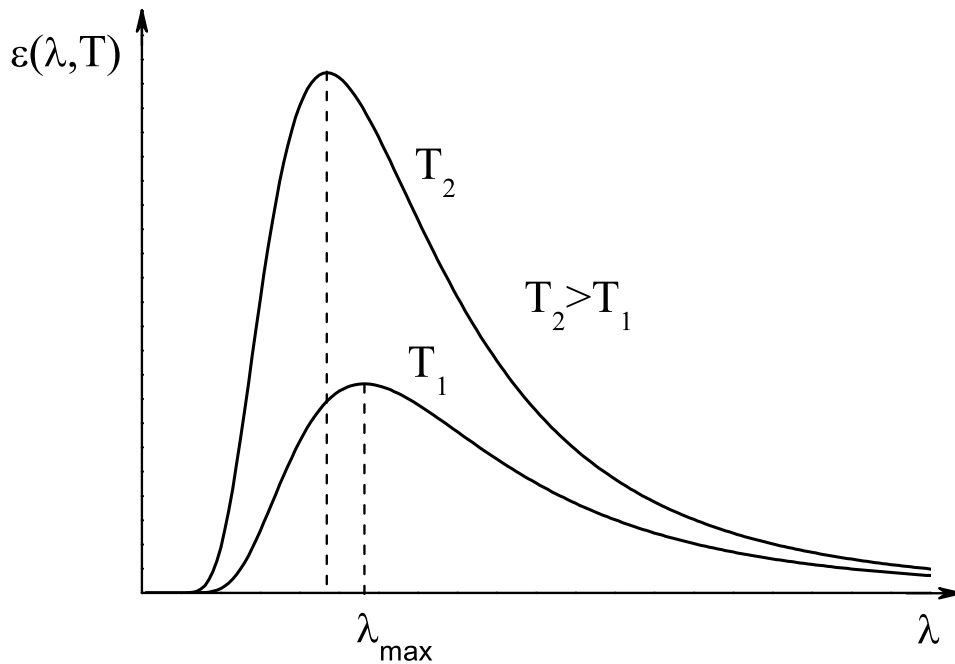


Рис. 1.11: Залежність.....

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T},$$

де  $b = 2,9 \cdot 10^3 \text{ м} \cdot \text{К}$  - константа - стала Віна,  
- а **другий закон Віна**

$$r_0(\lambda, T) = B \cdot T^5,$$

де  $\lambda_{max}$  - довжина хвилі на яку припадає максимуму функції  $r_0(\lambda, T)$ ;  
 $B = 1,29 \cdot 10^5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^{-1}$  константа - густина випромінювання (енергетична  
світимість) АЧТ визначається **законом Стефана-Больцмана**:

$$R = \int_0^{\infty} r_0(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4;$$

де  $\sigma = \frac{2\pi^5}{15c^2h^3} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{ К}^{-4}$ .

Перехід від представлення спектральної густини випромінювання АЧТ як функції довжини хвилі  $r_0(\lambda, T)$  до представлення як функції частоти ( $r_0(\nu, T)$ ), і навпаки, виконується згідно з очевидним співвідношенням:

$$d\lambda = d\left(\frac{c}{\nu}\right) = -\frac{c}{\nu^2} d\nu.$$

Для реального непрозорого тіла спектральна густина його теплового випромінювання  $r(\lambda, T)$  має вигляд:

$$r(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot r_0(\lambda, T),$$

де  $\varepsilon(\lambda, T)$  - спектральна випромінювальна здатність даного тіла;  $r_0(\lambda, T)$  - спектральна густина випромінювання АЧТ.

Згідно із **законом Кірхгофа** відношення спектральних густин випромінювання  $r$  і  $r_i(\lambda, T)$  до спектральних поглинальних здатностей  $a_i(\lambda, T)$  не залежить від природи тіл; це відношення є універсальною функцією довжини хвилі і температури:

$$\frac{r_1(\lambda, T)}{a_1(\lambda, T)} = \frac{r_2(\lambda, T)}{a_2(\lambda, T)} = \dots = \frac{r_0(\lambda, T)}{a_0(\lambda, T)} = r_0(\lambda, T).$$

Із останнього співвідношення випливає, що якщо тіло не поглинає електромагнітне випромінювання, то воно його і не випромінює; крім того, для АЧТ поглинальна здатність  $a_{\text{АЧТ}} = 1$ . Із останніх двох виразів випливає також, що

$$\varepsilon_1(\lambda, T) = a_1(\lambda, T); \quad \varepsilon_2(\lambda, T) = a_2(\lambda, T).$$

Співвідношення між спектральною випромінювальною здатністю  $\varepsilon(\lambda, T)$ , спектральним коефіцієнтом відбивання  $\rho(\lambda, T)$  та спектральним коефіцієнтом пропускання  $\tau(\lambda, T)$  тіл має вигляд:

$$1 = \varepsilon(\lambda, T) + \rho(\lambda, T) + \tau(\lambda, T),$$

для непрозорих тіл ( $\varepsilon(\lambda, T) = 0$ ) останнє співвідношення має вигляд:

$$1 = \rho(\lambda, T) + \tau(\lambda, T).$$

**Закон Планка і всі закони та наближення, які впливають з нього, є теоретичним обґрунтуванням методів пірометрії**, тобто безконтактних методів вимірювання температури тіл (об'єктів) за їх тепловим випромінюванням.

Оскільки теплове випромінювання реальних тіл відрізняється від теплового випромінювання АЧТ, то пірометри вимірюють так звану умовну температуру - АЧТ, теплове випромінювання якого в даній області спектра аналогічне випромінюванню реального тіла при його дійсній температурі  $T$ .

Існують три основних типи пірометрів: радіаційний (закон Стефана-Больцмана), яскравісні (область Віна) і колірні пірометри (пірометри спектрального відношення).

Зв'язок між радіаційною ( $T_p$ ) та дійсною ( $T$ ) температурами задається виразом:

$$T = T_p \cdot \varepsilon^{-\frac{1}{4}},$$

де  $\varepsilon$  - випромінювальна здатність тіла.

Дійсна температура  $T$  і яскравісна температура  $T_J$  зв'язані співвідношенням

$$T = \frac{\left(\frac{hc}{k}\right) \cdot T_J}{\left(\frac{hc}{k} + \lambda \ln \varepsilon(\lambda)\right) \cdot T_J},$$

де  $\varepsilon(\lambda)$  - спектральна випромінювальна здатність тіла;  $\lambda$  - робоча довжина хвилі яскравісного пірометра.

За допомогою колірні пірометрів вимірюється колірна температура тіла  $T_k$ , яка зв'язана з його дійсною температурою  $T$  співвідношенням, де  $\varepsilon(\lambda_1)$  і  $\varepsilon(\lambda_2)$  - спектральні випромінювальні здатності тіла на робочих довжинах хвиль  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  пірометра.

Для АЧТ, як видно із останніх виразів, дійсні температури співпадають з відповідними умовними температурами.



## Розділ 2

### Приклади розв'язання задач

**Задача 1.** Показати, що для випромінюючих поверхонь, які підлягають закону Ламберта, густина випромінювання  $R$  поверхні рівна її променистості  $B$ , помноженій на  $\pi$ , тобто  $R = \pi \cdot B$ .

**Розв'язання.**

Променистість  $B_\alpha$  випромінюючої поверхні в кута  $\alpha$ , згідно з її означенням, задається виразом:

$$B_\alpha = \frac{I_\alpha}{dS \cdot \cos \alpha}, \quad (2.1)$$

де  $I_\alpha$  - сила випромінювання у даному напрямі елемента поверні випромінювача площею  $dS$ ;  $\alpha$  - кут між нормаллю до елемента випромінюючої поверхні ( $dS$ ) і напрямком випромінювання.

Згідно із законом Ламберта

$$I_\alpha = I_0 \cdot \cos \alpha, \quad (2.2)$$

де  $I_0$  - сила випромінювання в напрямі, перпендикулярному елементу випромінюючої поверхні  $dS$ .

Підставивши (2.2) у (2.1), одержимо

$$B_\alpha = \frac{I_0}{dS} = \text{const} = B. \quad (2.3)$$

Із останнього виразу випливає, що випромінюючі поверхні, які підлягають закону Ламберта, рівнопроеменні (рівнояскраві). Густина випромінювання  $R$  у напрямі зв'язана з елементарним променистим потоком  $d\Phi$  в напрямі  $\alpha$  співвідношенням

$$R_\alpha = \frac{d\Phi_\alpha}{dS}. \quad (2.4)$$

Врахувавши, що:

$$I_\alpha = \frac{d\Phi}{d\Omega},$$

де  $d\Omega$  - елементарний тілесний кут, та вирази (2.2) і (2.3), одержимо:

$$R_\alpha = \frac{d\Phi_\alpha}{ds} = \frac{I_\alpha \cdot d\Omega}{dS} = \frac{I_0 \cdot \cos \alpha \cdot \Omega}{dS} = B \cdot \cos \alpha \cdot d\Omega.$$

Враховуючи співвідношення між  $d\Omega$  і  $\alpha$ , отримаємо:

$$R_\alpha = B \cdot \cos \alpha \cdot 2\pi \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha.$$

Після інтегрування по  $\alpha$  останнього виразу одержимо:

$$R = \int_0^{\pi/2} B \cos \alpha \cdot 2\pi \sin \alpha \cdot d\alpha = \pi B. \quad (2.5)$$

**Відповідь:**  $R = \pi B$ .

Зауваження. Із виразів (2.3) і (2.5) легко встановити співвідношення між  $I_0$ ,  $B$  та  $R$ :

$$I_0 = B \cdot dS = \frac{R}{\pi} dS,$$

які виконуються, зрозуміло, для випромінювачів, що підлягають закону Ламберта.

**Задача 2.** Спіраль електричної лампочки з силою світла  $1000\text{кд}$  поміщена у матову колбу діаметром  $20\text{см}$ . Знайти світловий потік  $\Phi$ , випромінюваний цим джерелом, світимість  $R$  і яскравість  $B$  джерела світла, а також освітленість  $E_e$ , світимість  $R_e$  і яскравість  $B_e$  екрана, на який падає  $1\%$  світлового потоку, випромінюваного джерелом світла. Коефіцієнт відбивання світла поверхневого екрана  $\rho = 0,8$ . Площа екрана рівна  $0,01\text{м}^2$ . Вважати, що поверхня екрана розсіює світло за законом Ламберта.

**Дано:**

$$I = 1000\text{кд}; r = d/2 = 0,1\text{м}; \rho = 0,8; S = 0,01\text{м}^2;$$

$$\Phi - ?; R - ?; E_e - ?; R_e - ? B_e - ?$$

**Розв'язання.**

Світловий потік  $\Phi$ , випромінюваний на всі боки точковим джерелом світла, зв'язаний із силою світла  $I$  цього джерела співвідношенням

$$\Phi = 4\pi I.$$

За умовою задачі  $I = 10^3\text{кд}$ , тому  $\Phi = 1,26 \cdot 10^4\text{лм}$ .

Світлимість джерела світла

$$R = \frac{\Phi}{S} = \frac{4\pi I}{4\pi R^2} = \frac{I}{r^2},$$

де  $r$  - радіус колби. Підставляючи числові значення (див. табл. 2), визначимо

$$R = \frac{10^3 \text{кд} \cdot \text{ср}}{(0,1)^2 \text{м}^2} = 10^5 \text{лм/м}^2.$$

Яскравість джерела світла

$$B = \frac{I}{S'},$$

де  $S'$  - видима площадка світлої поверхні. За умовою задачі  $S' = \pi r^2$ , де  $r$  - радіус колби, тоді

$$B = \frac{I}{\pi r^2} = \frac{10^3 \text{кд}}{\pi \cdot (0,1)^2 \text{м}^2} = 3,18 \cdot 10^4 \text{кд/м}^2.$$

За умовою задачі на екран падає світловий потік

$$\Phi_e = 0,01\Phi = 1,26 \cdot 10^2 \Phi (\text{лм}).$$

У даному випадку освітленість екрана:

$$E_e = \frac{\Phi_e}{S_e} = \frac{1,26 \cdot 10^2 \text{лм}}{0,01^2 \text{м}^2} = 1,26 \cdot 10^4 \text{лм/м}^2.$$

Яскравість екрана, згідно із законом Ламберта,

$$B_e = \frac{R_e}{\pi} = \frac{1,01 \cdot 10^4 \text{кд}}{3,14 \text{м}^2} = 3,22 \cdot 10^3 \text{кд/м}^2.$$

**Відповідь:**  $\Phi = 1,26 \cdot 10^4 \text{лм}$ ,  $R = 10^5 \text{лм/м}^2$ ,  $B = 3,18 \cdot 10^4 \text{кд/м}^2$ ,  
 $E_e = 1,26 \cdot 10^4 \text{лк}$ ,  $R = 1,01 \cdot 10^4 \text{лм/м}^2$ ,  $B_e = 1,01 \cdot 10^4 \text{лм/м}^2$ .

**Задача 3.** Розрахувати опроміненість  $E$ , створювану абсолютно чорним тілом (АЧТ) з температурою  $100^\circ\text{C}$  і випромінюючим створом діаметром  $5\text{мм}$  на площині, розташованій перпендикулярно до напрямку випромінювання АЧТ, яке знаходиться від нього на відстані  $2\text{м}$ . Температура навколишнього середовища  $20^\circ\text{C}$ .

**Дано:**  $T_\alpha = 373\text{K}$ ;  $d = 5 \cdot 10^{-3}\text{м}$ ;  $\alpha = 0$ ;  $r = 2\text{м}$ ;  $T_0 = 293\text{K}$ ;

$E - ?$

**Розв'язання.**

При розв'язуванні даного типу задач слід мати на увазі, що при температурах АЧТ ( $T_\alpha$ ), сумірних з температурою навколишнього середовища ( $T_0$ ), необхідно ввести поправку на теплове випромінювання навколишнього середовища (при цьому вважають, що середовище, яке оточує АЧТ, теж має властивості АЧТ). З урахуванням останніх зауважень вираз для опроміненості (енергетична освітленість, табл.2) згідно з Стефана-Больцмана матиме вигляд (див. задачу 1):

$$E = \frac{I_0 \cos \alpha}{r^2} = \frac{D \cdot S \cdot \cos \alpha}{r^2} = \frac{R \cdot S \cdot \cos \alpha}{\pi \cdot r^2}, \quad (2.6)$$

де  $S$  - площа випромінюючого отвору АЧТ;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  - стала Стефана-Больцмана;  $\alpha$  - кут падіння променистого потоку (за умовою задачі  $\alpha = 0$ ). Підставивши у вираз (2.6) числові значення вилечин (у системі СІ), одержимо

$$E = \frac{5,67 \cdot 10^8 (373^4 - 293^4) \cdot \pi \cdot (5 \cdot 10^3)^2 \cdot \cos 0^\circ \text{ Вт}}{4\pi \cdot 2^2 \text{ м}^2}.$$

**Відповідь:**  $E = 1,1 \cdot 10^3 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

**Задача 4.** Визначити, у скільки разів зменшиться інтенсивність природного світла, що пройшло через два ніколі осі яких утворюють кут  $45^\circ$ . Кожний ніколь поглинає 10%.

**Дано:**  $\alpha = 45^\circ$ ;  $k = 0,1$ ;  $I_0/I_2$ ?

**Розв'язання.**

Інтенсивність світла  $I_1$ , що пройшло через поляризатор, як відомо (див. розділ 2), рівна

$$I_1 = 0,5 \cdot I_0 \cdot (1 - k), \quad (2.7)$$

де  $I_0$  - інтенсивність природного світла, яке падає на поляризатор;  $k$  - коефіцієнт поглинання поляризатора.

Поляризоване світло інтенсивності  $I_1$ , що ввійшло у другий ніколь (аналізатор), знову частково поглинається й інтенсивність його зменшується на величину  $k \cdot I_1$ ; крім того, інтенсивність поляризованого світла  $I_2$  на виході аналізатора згідно із законом Малюса задається виразом:

$$I_2 = (I_1 - k \cdot I_1) \cdot \cos^2 \alpha = I_1(1 - k) \cdot \cos^2 \alpha, \quad (2.8)$$

де  $\alpha$  - кут між оптичними вісями поляризатора (першого ніколя) і аналізатора (другого ніколя). Підставивши у вираз (2.8) вираз для  $I_1$  (2.7), одержим:

$$I_2 = 0,5 \cdot I_0(1 - k) \cdot \cos^2 \alpha. \quad (2.9)$$



Із співвідношення (2.9) випливає, що

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{1}{0,5(1-k)^2 \cdot \cos^2 \alpha}. \quad (2.10)$$

Підставляючи у вираз (2.10) числові значення, одержимо

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{1}{0,5(1-k)^2 \cdot \cos^2 45^\circ} = 5.$$

Відповідь:  $\frac{I_0}{I_2} = 4$ .

**Задача 5.** У черенковському лічильнику із кам'яної солі релятивістські протони випромінюють у фіолетовій ділянці спектра в конусі з розхилом  $98^\circ 80'$ . Визначити кінетичну енергію протонів. Коефіцієнт заломлення для цієї ділянки спектра  $n = 1,54$ .

**Дано:**  $\Theta = 49^\circ 40'$ ;  $n = 1,54$ ;  $m_p = 1,67 \cdot 10^{27}$  кг; ( $m_p$ —маса спокою протона);  $E_k$ ?

**Розв'язання.**

Якщо заряджена частинка рухається у речовині з «надсвітловою» швидкістю  $v$ , то виникає свічення Вавілова-Черенкова за умови

$$V > v = \frac{c}{n},$$

де  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с - швидкість світла вауумі;  $n$  - показник заломлення речовини;  $v$  - фазова швидкість світла.

Світло, що виникає на кожній малій ділянці траєкторії зарядженої частинки, поширюється вздовж твірних конуса, вершина якого 0 (рис.1.5) розташована на цій ділянці, вісь співпадає з траєкторією частинки, а твірні утворюють з віссю кут

$$\Theta = \arccos \frac{c}{nv}. \quad (2.11)$$

Оскільки випромінюють релятивістські протони, їх кінетична енергія задається виразом:

$$E_k = E_0 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right), \quad (2.12)$$

де  $E_0 = m_p \cdot c^2$  - енергія спокою протона;  $m_p$  - маса спокою протона. Величину  $v/c$  знайдемо із співвідношення (2.11):

$$\frac{v}{c} = \frac{1}{n \cdot \cos \Theta} = \frac{1}{1,54 \cdot \cos 49^\circ 40'} = 0,998.$$

Використовуючи формулу (2.12), визначимо кінетичну енергію протонів:

$$E_k = 1,67 \cdot 10^{27} \text{ кг} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 / c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - 0,998^2}} - 1 \right) = 2,23 \cdot 10^9 \text{ Дж} = 14 \text{ Гев}.$$

Енергія в (eV) одержана на основі співвідношення:

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{19} \text{ Дж}.$$

**Відповідь:**  $E_k = 2,23 \cdot 10^9 \text{ Дж} = 14 \text{ Гев}$ .

**Задача 6.** На блискучу поверхню нормально падає монохричне світло з довжиною хвилі  $0,65 \text{ мкм}$ , створюючи тиск  $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Визначати концентрацію фотонів поблизу поверхні та число фотонів, які падають на поверхню площиною  $1 \text{ м}^2$  за  $1 \text{ с}$ .

**Дано:**  $\lambda = 0,65 \cdot 10^6 \text{ м}$ ;  $P = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;  $\rho = 1$ ;  $S = 1 \text{ м}^2$ ;  $t = 1 \text{ с}$ ;  
 $n?N?$

**Розв'язання.**

Тиск світла при його нормальному падінні на поверхню з коефіцієнтом відбивання  $\rho$  задається формулою

$$P = \Omega(1 - \rho) \quad \text{або} \quad P = \frac{E}{c}(1 + \rho), \quad (2.13)$$

де  $\Omega$  - об'ємна густина енергії,  $E$  - опроміненість поверхні (енергетична освітненість);  $c$  - швидкість світла у вакуумі;  $\rho$  - коефіцієнт відбивання опромінюваної поверхні (у нашому випадку  $\rho=1$ ).

Об'ємна густина енергії рівна добутку концентрації фотонів  $n$  на енергію одного фотона:

$$\Omega = n \cdot h\nu = n \cdot h \cdot \frac{c}{\lambda}. \quad (2.14)$$

На основі виразів (2.13) і (2.14) одержимо:

$$n = \frac{\Omega \cdot \lambda}{h \cdot c} = \frac{\rho \cdot \lambda}{(1 + \rho)h \cdot c}. \quad (2.15)$$

Число фотонів, які падають на площу  $1 \text{ м}^2$  за  $1 \text{ с}$ , чисельно рівна добутку концентрації фотонів ( $n$ ) на швидкість світла у вакуумі ( $c$ ). У разі з використання співвідношення (2.15) одержимо:

$$N = n \cdot c = \frac{P \cdot \lambda}{(1 + \rho) \cdot h}. \quad (2.16)$$

Підставляючи чисельні значення (у системі СІ) у вирази (2.15) і (2.16), одержимо:

$$n = \frac{2 \cdot 10^{-5} \text{Па} \cdot 0,65 \cdot 10^{-6} \text{м}}{(1+1) \cdot 6,62 \cdot 10^{-34} \text{Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{м/с}} = 3,27 \cdot 10^{13} \text{м}^{-3},$$

$$N = 3,27 \cdot 10^{13} \text{м}^{-3} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{м/с} = 9,81 \cdot 10^{21} \text{м}^{-2} \text{с}^{-1}.$$

**Відповідь:**  $n = 3,27 \cdot 10^{13} \text{м}^{-3}$ ;  $N = 9,81 \cdot 10^{21} \text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$ .

**Задача 7.** Визначити відстань між атомними площинами у кристалі кам'яної солі, якщо дифракційний максимум першого порядку спостерігається при падінні рентгенівських променів з довжиною хвилі  $\lambda = 0,147 \text{нм}$  під кутом  $\Theta = 15^\circ 12'$  до поверхні кристала.

**Дано:**  $\lambda = 1,47 \cdot 10^{10} \text{м}$ ;  $\Theta = 15^\circ 12'$ ;  $k = 1$ ;  $d$ ?

**Розв'язання.**

Дифракція рентгенівський променів на кристалах - це результат інтерференція рентгенівського випромінювання, дзеркально відбитого від системи паралельних площин, які проходять через вузли - атоми, іони кристалічної ґрадки (рис.1.8). Ці площини називають атомними. Відбивання спостерігається лише у тих напрямках, які відповідають дифракційним максимумам. У свою чергу, мовою виникнення дифракційних максимумів є співвідношення, відоме під назвою формули Вульфа-Броггів:

$$\Delta = |DC| + |DL| = 2d \sin \Theta \cdot k\lambda \quad (2.17)$$

де (рис.1.8)  $d$  - відстань між сусідніми атомними площинами;  $\Theta$  - кут ковзання, тобто кут між падаючим променем і атомною площиною кристала;  $\lambda$  - довжина хвилі рентгенівського випромінювання. Згідно з умовою задачі  $k = 1$ , тому на основі формули (2.17) одержимо:

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \Theta} = \frac{1,47 \cdot 10^{10} \text{м}}{2 \sin 15^\circ 12'} = 0,282 \text{нм}.$$

**Відповідь:**  $d = 0,282 \text{нм}$ .

**Задача 8.** У скільки разів збільшиться потужність випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ), якщо максимум спектральної густини випромінювання зміститься від червоної границі видимого спектра ( $\lambda_r = 0,76 \cdot 10^{-6} \text{м}$ ) до його фіолетової границі ( $\lambda_f = 0,38 \text{мкм}$ )?

**Дано:**  $\lambda_r = 0,76 \cdot 10^{-6} \text{м}$ ;  $\lambda_f = 0,38 \cdot 10^{-6} \text{м}$ ;

$N_f/N_r$  - ?

**Розв'язання.**

Довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної густини випромінювання АЧТ, визначається законом зміщення Віна (паршим законом Віна):

$$\lambda_m = \frac{b}{T}, \quad (2.18)$$

де  $b = 2,9 \cdot 10^3 \text{ м} \cdot \text{К}$  - стала Віна;  $T$  - термодинамічна температура АЧТ.

Згідно з формулою (2.18) визначимо температури, які відповідають червоній і фіолетовій границям видимого спектра:

$$\lambda_\phi = \frac{b}{T_\phi} \quad \lambda_r = \frac{b}{T_r}. \quad (2.19)$$

Потужність випромінювання АЧТ:

$$N = R \cdot S, \quad (2.20)$$

де  $R$  - густина випромінювання (енергетична світимість, табл.2) АЧТ;  $S$  - площа поверхні. Відповідно до закону Стефана-Больцмана:

$$R = \sigma \cdot T_4, \quad (2.21)$$

де  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  - стала Стефана-Больцмана.

На основі співвідношення (2.20) одержимо з урахуванням виразів (2.19) та (2.21) після перетворень:

$$N_\phi = R_\phi \cdot S = \sigma \cdot T_\phi^4 = \sigma \left( \frac{C_3}{\lambda_\phi} \right)^4 \cdot S, \quad (2.22)$$

$$N_r = R_r \cdot S = \sigma \cdot T_r^4 = \sigma \left( \frac{C_3}{\lambda_r} \right)^4 \cdot S. \quad (2.23)$$

Із формул (2.22)-(2.23) випливає, що

$$\frac{N_\phi}{N_r} = \left( \frac{\lambda_r}{\lambda_\phi} \right)^4. \quad (2.24)$$

Підставляючи дані у вираз (2.24), одержимо:

$$\frac{N_\phi}{N_r} = \left( \frac{0,76 \cdot 10^{-6}}{0,38 \cdot 10^{-6}} \right)^4 = 16.$$

**Відповідь:** потужність випромінювання АЧТ збільшиться в 16 разів.

**Задача 9.** Стала дифракційної ґратки  $d = 2,0 \text{ мкм}$ . Знайти кутову дисперсію  $d\varphi/d\lambda$  для  $\lambda = 589 \text{ нм}$  в спектрі другого порядку.

**Дано:**  $d = 2,0 \text{ мкм} = 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ;  $\lambda = 589 \text{ нм} = 5,89 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ ;  $k = 2$ ;  $(d\varphi/d\lambda)$ -?

**Розв'язання.** У дифракційній ґратці максимум світла спостерігається в напрямках, які складають з нормаллю до ґратки кут  $\varphi$ , що задовольняє умову (при умові, що паралельний пучок світла падає на ґратку нормально, тобто так звана дифракція Фраунгофера):

$$d \sin \varphi = k\lambda; \quad (k = 1, 2, 3...), \quad (2.25)$$

де  $d$  - стала ґратки;  $\lambda$  - довжина хвилі падаючого світла;  $k$  - порядок спектра. Кутову дисперсію  $d\varphi/d\lambda$  визначимо, диференціюючи вираз (2.25) за  $\lambda$  і  $\varphi$ :

$$d \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi = k \cdot d\lambda; \quad (k = 1, 2, 3...), \quad (2.26)$$

звідки

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{k}{d \cos \varphi} = \frac{k}{d \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \varphi}}. \quad (2.27)$$

Визначивши із виразу (2.25)  $\sin \varphi$  і підставивши у вираз (2.26), одержимо:

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{k}{d \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{k\lambda}{d}\right)^2}}.$$

Підставивши в останній (2.27) вираз числові значення, одержимо:

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{2}{2,0 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{2,5,89 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{2,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}}\right)^2}} = 1,24 \cdot 10^6 \text{ рад/м}.$$

**Задача 10.** Плоскополяризований монохроматичний пучок світла падає на поляризатор і повністю ним гаситься. Коли на шляху пучка помістити кварцеву пластинку, то інтенсивність ( $I$ ) пучка світла після поляроїда стає рівною половині інтенсивності пучка ( $I_0$ ), який падає на поляроїд. Визначити мінімальну товщину кварцової пластинки. Поглинанням і відбиванням світла поляроїдом знехтувати; питома обертання  $\varphi_0$  кварцу прийняти рівним  $48 \text{ град/мм}$ .

**Дано:**  $\frac{I}{I_0} = 0,5$ ;  $\varphi_0 = 48 \text{ град/мм}$ ;  $d = ?$

**Розв'язання.** Повне гасіння світла поляроїдом означає, що оптична вісь поляроїда (штрихована лінія  $OO'$  на рис. 2.1) перпендикулярна напрямку коливань (I-I) плоскополяризованого світла, яке падає на нього. Введення кварцевої пластинки призводить до повороту площини поляризації (площина, яка проходить через напрям коливань світлового вектора  $\vec{E}$ ) на кут:

$$\varphi = \varphi_0 \cdot d, \quad (2.28)$$

де  $d$  - товщина оптично активної речовини (у нашому випадку - кварцу).

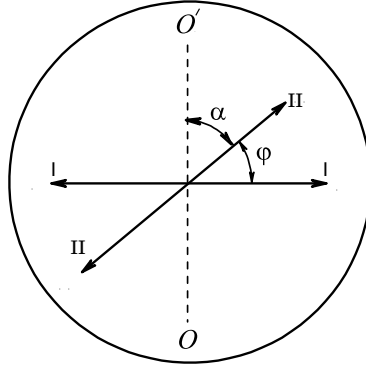


Рис. 2.1:  $O - O'$  - оптична вісь поляроїда.

Знаючи, скільки разів зменшиться інтенсивність світла при проходженні його через поляроїд, визначимо кут  $\alpha$ , який встановиться між оптичною віссю  $OO'$  поляроїда і новий напрямом (II-II) коливань падачого на поляроїд плоскополяризованого світла. Для цього використаємо закон Малюса:

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \alpha.$$

Зауваживши, що (рис. 2.1)  $\alpha = \pi/2 - \varphi$ , одержимо

$$I = I_0 \cdot \cos^2(\pi/2 - \varphi) = I_0 \cdot \sin^2 \varphi. \quad (2.29)$$

На основі рівнянь (2.28) і (2.29) одержимо

$$d = \frac{\arcsin \sqrt{\frac{I}{I_0}}}{\varphi_0}. \quad (2.30)$$

Проведемо обчислення, згідно з останнім (2.30) виразом,

$$d = \frac{\arcsin \sqrt{0,5}}{48,9} = 0,92 \text{ мм}.$$

**Відповідь:**  $d=0,92 \text{ мм}$ .

## Розділ 3

# Задачі для самостійного розв'язування

### 3.1 Геометрична оптика.

- 1.1. Необхідно виготовити плоско-опуклу лінзу з оптичною силою  $5\text{дптр}$ . Визначити радіус кривизни опуклої поверхні лінзи, якщо показник заломлення матеріалу лінзи  $n = 1,65$ .
- 1.2. Радіус кривизни поверхонь двояко опуклої лінзи  $R_1 = R_2 = 60\text{см}$ . Показник заломлення матеріалу лінзи  $n = 1,6$ . Знайти оптичну силу  $D$  лінзи.
- 1.3. Знайти фокусну відстань  $F_1$  кварцевої лінзи для ультрафіолетової лінії спектра ртуті ( $\lambda = 259\text{нм}$ ), якщо фокусна відстань для жовтої лінії натрію ( $\lambda = 589\text{нм}$ )  $F_2 = 15\text{см}$ . Показники заломлення кварцу для цих довжин хвиль, відповідно,  $n_1 = 1,50$ ,  $n_2 = 1,46$ .
- 1.4. Скільки довжин хвиль  $N$  монохроматичного світла із частотою  $\nu = 5 \cdot 10^{14}\text{Гц}$  укладеться на шляху довжиною  $l = 1,2\text{мм}$ : 1) у вакуумі; 2) у склі ( $n = 1,5$ )?
- 1.5. Із двох стекол із показником заломлення  $n_1 = 1,5$  і  $n_2 = 1,7$  виготовлено однакові двояко випуклі лінзи. Знайти відношення  $F_1/F_2$  їх фокусних відстаней. Яку дію кожна з цих лінз спричинить на промінь, паралельний оптичній осі, якщо лінзи занурити в прозору рідину з показником заломлення  $n = 1,6$ ?
- 1.6. Радіуси кривизни поверхонь двояковипуклої лінзи рівні  $0,4\text{м}$ . Показник заломлення матеріалу лінзи  $1,6$ . Знайти оптичну силу лінзи.

- 1.7. Знайти фокусну відстань  $F$ , лінзи, зануреної у воду ( $n_0 = 1,33$ ), якщо її фокусна відстань у повітрі  $F_1 = 25\text{см}$ . Показник заломлення матеріалу лінзи  $n = 1,6$ .
- 1.8. Мікроскоп складається із об'єктива з фокусною відстанню  $F_1 = 2\text{мм}$  і окуляра з фокусною відстанню  $F_2 = 40\text{мм}$ . Відстані між фокусами об'єктива і окуляра  $L = 15\text{см}$ . Знайти збільшення  $k$ , яке має мікроскоп.
- 1.9. Горизонтальний промінь світла падає на вертикально розміщене дзеркало. Дзеркало повертається на кут  $\alpha$  навколо вертикальної осі. На який кут  $\varphi$  повернеться відбитий промінь?
- 1.10. Радіус кривизни вгнутого дзеркала  $R = 30\text{см}$ . На відстані  $a_1 = 40\text{см}$  від дзеркала знаходиться предмет висотою  $y_1 = 1,5\text{см}$ . Знайти положення і висоту зображення. Зробити креслення.
- 1.11. Опукле дзеркало має радіус кривизни  $R = 50\text{см}$ . На відстані  $a = 10\text{см}$  від дзеркала поставлено предмет висотою  $y = 3\text{см}$ . Знайти положення і висоту зображення. Зробити креслення.
- 1.12. Де буде знаходитись і який розмір  $y_2$  матиме зображення Сонця, одержане в рефлекторі, радіус кривизни якого  $R = 20\text{м}$ ? (Кутовий розмір Сонця на Землі  $\alpha = 32'$ ).
- 1.13. На плоскопаралельну скляну пластинку ( $n = 1,5$ ) товщиною  $6\text{см}$  падає під кутом  $30^\circ$  промінь світла. Визначити бокове зміщення променя, який пройшов крізь цю пластинку.
- 1.14. Визначити, яку довжину шляху  $S_1$  пройде фронт монохроматичного світла у вакуумі за той же час, за який він пройде шлях  $S_2 = 2,5\text{мм}$  у склі з показником заломлення  $n = 1,6$ .
- 1.15. Промінь світла падає під кутом  $i$  на тіло з показником заломлення  $n$ . Як повинні бути пов'язані між собою  $i$  та  $n$ , щоб відбитий промінь був перпендикулярним до заломленого?
- 1.16. Який шлях пройде фронт хвилі монохроматичного світла у вакуумі за той самий час, за який він проходить шлях  $l = 2\text{м}$  у воді?
- 1.17. Промінь світла падає під кутом  $\alpha = 30^\circ$  на плоскопаралельну пластину з показником заломлення  $n = 1,5$  і виходить паралельно падаючому променю,  $\Delta x = 1,95\text{см}$ . Знайти товщину пластини.



- 1.18. Оптична різниця ходу двох інтерферуючих хвиль монохроматичного світла дорівнює  $\Delta = 0,4\lambda$ . Визначити різницю фаз цих хвиль  $\Delta\varphi$ .
- 1.19. Визначити граничні кути повного внутрішнього відбивання світла для поверхонь поділу: 1) скло – повітря; 2) вода – повітря; 3) скло – вода. Показник заломлення скла дорівнює  $n = 1,52$ .
- 1.20. Показник заломлення скла  $n = 1,55$ . Знайти граничний кут повного внутрішнього відбиття  $\beta$  для поверхні розділу: 1) скло - повітря; 2) вода - повітря; 3) скло - вода.
- 1.21. Визначити, на яку висоту необхідні повісити лампочку потужність  $500\text{Вт}$ , щоб освітленість під нею була рівна  $70\text{лк}$ . Нахил дошки становить  $45^\circ$ , а світлова віддача лампочки рівна  $15\text{ лм/Вт}$ . Вважати, що лампочка випромінює як точкове джерело світло.
- 1.22. Велике креслення фотографують спочатку повністю, а потім окремі його деталі у натуральну величину. У скільки разів треба збільшити час експозиції при фотографуванні деталей?
- 1.23. У центрі квадратної кімнати площею  $S = 25\text{м}^2$  висить лампочка. На якій висоті  $h$  від підлоги повинна знаходитися лампочка, щоб освітленість у кутах кімнати була максимальною?
- 1.24. Предмет при фотографуванні, розташованою електричною лампочкою, розташованою від нього на відстані  $r_1 = 1,5\text{м}$ . У скільки разів треба збільшити час експозиції, якщо цю лампочку віддалити на відстань  $r_2 = 3\text{м}$  від предмета?
- 1.25. Предмет при фотографуванні освітлюється електричною лампою розташованою від нього на відстані  $1\text{м}$ . У скільки разів необхідно збільшити час експозиції, якщо лампу віддалити на відстань  $2\text{м}$ .
- 1.26. Електрична лампочка силою світла  $I = 200\text{кд}$  посилає ізотропно на всі боки в одиницю часу  $W = 250\text{Дж}$  /хв світлової енергії. Знайти механічний еквівалент світла  $K$  та к.к.д. світлової віддачі, якщо лампочка споживає потужність  $N = 200\text{Вт}$ .
- 1.27. Листок паперу площею  $S = 10 \times 2\text{см}^2$  освітлюється лампою з силою світла  $I = 150\text{кд}$ , причому на нього падає  $0,5\%$  світла, яке випромінює лампа. Знайти освітленість  $E$  цього листа паперу.

## 3.2 Хвильова оптика

- 2.1. У досліді Юнга отвори освітлювались монохроматичним світлом ( $\lambda = 65\text{нм}$ ). Відстань між отворами  $d = 1,3\text{мм}$ , відстань від отворів до екрана  $L = 4\text{м}$ . Знайти положення трьох перших світлових смуг.
- 2.2. У скільки разів збільшиться відстань між сусідніми інтерференційними смугами на екрані в досліді Юнга, якщо синій світлофільтр ( $\lambda = 440\text{нм}$ ) замінити червоним ( $\lambda = 660\text{нм}$ )?
- 2.3. В досліді Юнга отвори освітлюються монохроматичним світлом ( $700\text{нм}$ ). Відстань між отворами  $1\text{мм}$ , відстань до екрана  $4\text{м}$ . Знайти положення трьох перших світлих смуг.
- 2.4. У досліді Юнга отвори освітлювались монохроматичним світлом з довжиною хвилі  $500\text{нм}$ , відстань між отворами  $1\text{мм}$  і відстань від отворів до екрана  $2\text{м}$ . Знайти положення перших трьох світлових смуг.
- 2.5. У скільки раз збільшиться відстань між сусідніми інтерференційними смугами на екрані в досліді Юнга, якщо зелений світлофільтр ( $0,5\text{мкм}$ ) поміняти на червоний ( $0,7\text{мкм}$ ).
- 2.6. У досліді з дзеркалами Френеля між уявними зображеннями джерела світла  $d = 0,5\text{мм}$  відстань до екрана  $L = 5\text{м}$ . У зеленому світлі одержано інтерференційні смуги, розташовані на відстані  $l = 5\text{мм}$  одна від одної. Знайти довжину хвилі  $\lambda$  зеленого світла.
- 2.7. У досліді з інтерферометром Майкельсона для зміщення інтерференційної картини на 450 смуг дзеркало довелося перемістити на відстань  $0,135\text{мм}$ . Визначити довжину хвилі падаючого світла.
- 2.8. На шляху одного з променів інтерференційного рефрактометра помістили відкачану трубку довжиною  $l = 10\text{см}$ . При заповненні трубки хлором інтерференційна картина змінилась на 131 смугу. Визначити показник заломлення хлору, якщо спостереження ведеться з монохроматичним світлом довжиною хвилі  $\lambda = 0,59\text{мкм}$ .
- 2.9. На мильну плівку падає біле світло під кутом падіння  $i = 30^\circ$ . При якій найменшій товщині плівки відбиті промені будуть забарвлені в жовтий колір ( $\lambda = 600\text{нм}$ )? Показник заломлення мильної води  $n = 1,33$ .

- 2.10. Пучок білого світла падає по нормалі до паверхні плоскопаралельної скляної пластинки товщиною  $d = 0,4 \text{ мкм}$ . Показник заломлення скла  $n = 1,5$ . Які довжини хвиль, що лежать у межах видимого спектра (від 400 до 750 нм), підсилюються у відбитому світлі?
- 2.11. На лінзу з показником заломлення 1,55 нормально падає монохроматичне світло з довжиною хвилі  $0,55 \text{ мкм}$ . Для усунення втрат відбитого світла на лінзу наноситься тонка прозора плівка. Визначити: 1) оптимальний показник заломлення плівки; 2) товщину плівки.
- 2.12. На паверхню скляного об'єктива ( $n_1 = 1,5$ ) нанесено тонку прозору плівку («просвітлююча» плівка), показник заломлення якої  $n_2 = 1,22$ . При якій найменшій товщині цієї плівки відбудеться максимальне послаблення відбитого світла в середній частині видимого спектра?
- 2.13. Плоска світлова хвиля з довжиною хвилі  $\lambda = 0,6 \text{ мкм}$  падає нормально на діафрагму з круглим отвором діаметром  $1 \text{ см}$ . Визначити відстань від точки спостереження до отвору, якщо отвір відкриває: 1) дві зони Френеля; 2) три зони Френеля.
- 2.14. Радіус четвертої зони Френеля для плоского хвильового фронту дорівнює  $r_4 = 3 \text{ мм}$ . Визначити радіус  $r_6$  шостої зони Френеля.
- 2.15. Визначити радіус першої зони Френеля, якщо відстань від точкового джерела світла ( $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$ ) до зонної пластинки та від пластинки до точки спостереження дорівнює  $a = b = 1 \text{ м}$ .
- 2.16. Пучок білого світла падає нормально на скляну пластинку товщиною  $0,4 \text{ мкм}$ . Показник заломлення скла 1,5. Які довжини хвиль, що лежать у межах видимого спектра від 0,4 до  $0,7 \text{ мкм}$  підсилюються у відбитому пучку?
- 2.17. Дифракційна картина спостерігається на відстані  $1 \text{ м}$  від точкового джерела монохроматичного світла ( $\lambda = 6,5 \text{ мкм}$ ). Посередині між джерелом світла і екраном знаходиться діафрагма з круглим отвором. Визначити радіус отвору, при якому центр дифракційної картини на екрані буде найбільш темним.
- 2.18. На щілину шириною  $0,2 \text{ мм}$  падає нормально паралельний пучок монохроматичного світла з довжиною хвилі  $0,5 \text{ мкм}$ . Екран, на якому спостерігається дифракційна картина, розташований паралельно до щілини на відстані  $1 \text{ м}$ . Визначити відстань між першими

дифракційними мінімумами, розташованими по обидва боки центрального фраунгоферового максимуму.

- 2.19. На щілину шириною  $a = 6\lambda$  падає нормально паралельний пучок монохроматичного світла з довжиною хвилі  $\lambda$ . Під яким кутом буде спостерігатись третій дифракційний мінімум світла?
- 2.20. На дифракційну ґратку падає нормально пучок світла від розрядної трубки, заповненої гелієм. На яку лінію 3 в спектрі третього порядку накладеться червона лінія гелію ( $\lambda_2 = 670\text{нм}$ ) другого порядку?
- 2.21. Знайти найбільший порядок спектра для жовтої лінії натрію ( $\lambda = 589\text{нм}$ ), якщо стала дифракційної ґратки  $d = 2\text{мм}$ .
- 2.22. Якою повинна бути стала  $d$  дифракційної ґратки, щоб у першому порядку були розділені лінії спектра калію  $\lambda_1 = 404,4\text{нм}$  і  $\lambda_2 = 404,7\text{нм}$ ? Ширина ґратки  $a = 3\text{см}$ .
- 2.23. Стала дифракційної ґратки  $d = 2\text{мм}$ . Яку різницю довжин хвиль  $\Delta\lambda$  може розрізнити ця ґратка в області жовтих променів ( $\lambda = 600\text{нм}$ ) у спектрі другого порядку? Ширина ґратки  $a = 2,5\text{см}$ .
- 2.24. Визначити число штрихів на  $1\text{мм}$  дифракційної ґратки, якщо куту дифракції  $\pi/2$  відповідає максимум п'ятого порядку для монохроматичного світла з довжиною хвилі  $0,5\text{мм}$ .
- 2.25. Стала дифракційної ґратки  $d = 2,5\text{мм}$ . Знайти кутову дисперсію  $d\varphi/d\lambda$  ґратки для  $\lambda = 589\text{нм}$  в спектрі першого порядку.
- 2.26. На вузьку щілину нормально падає паралельний пучок монохроматичного світла з довжиною хвилі  $\lambda$ . Під яким кутом буде спостерігатись третій дифракційний максимум, якщо ширина щілини  $6\lambda$ .
- 2.27. Яку фокусну відстань повинна мати лінза, яка проектує на екран спектр, одержаний за допомогою дифракційної ґратки, щоб відстань між двома лініями калію ( $\lambda_1 = 404,4\text{нм}$  і  $\lambda_2 = 404,7\text{нм}$ ) в спектрі першого порядку була рівною  $0,1\text{мм}$ ? Стала дифракційної ґратки  $d = 2\text{мм}$ .
- 2.28. Вузький паралельний пучок монохроматичного рентгенівського випромінювання падає на грань кристала з відстанню  $0,28\text{нм}$  між

його атомними площинами. Визначити довжину хвилі рентгенівського випромінювання, якщо під кутом  $30^\circ$  до площини грані спостерігається дифракційний максимум другого порядку.

- 2.29. Яку найменшу роздільну здатність  $R$  повинна мати дифракційна ґратка, щоб за її допомогою можна було розрізнити дві спектральні лінії калію ( $\lambda_1 = 578\text{нм}$  і  $\lambda_2 = 580\text{нм}$ )? Яке найменше число  $N$  штрихів потрібно нанести на ґратку, щоб розрізнити ці спектральні лінії було можливо у спектрі другого порядку?
- 2.30. На дифракційну ґратку нормально падає пучок світла. Червона лінія ( $\lambda_1 = 630\text{нм}$ ) спостерігається у спектрі третього порядку під кутом  $\varphi = 60^\circ$ . Яка спектральна лінія  $\lambda_2$  спостерігається під таким самим кутом у спектрі четвертого порядку? Яке число штрихів  $n$  на одиницю довжини має дифракційна ґратка?
- 2.31. На дифракційну ґратку з періодом  $d = 4,8\text{мкм}$  нормально падає пучок природного світла. Які спектральні лінії, що відповідають довжинам хвиль у видимій області спектра, збігатимуться у напрямку  $\varphi = 30^\circ$ .
- 2.32. Порівняйте найбільшу роздільну здатність для червоної лінії кадмію ( $\lambda = 644\text{нм}$ ) двох дифракційних ґраток однакової довжини ( $l = 5\text{мм}$ ), але з різними сталими ( $d_1 = 4\text{мкм}$ ,  $d_2 = 8\text{мкм}$ ).
- 2.33. Знайти найбільший порядок спектра для жовтої лінії натрію ( $589\text{нм}$ ), якщо період дифракційної ґратки  $2\text{мкм}$ .
- 2.34. Стала дифракційної ґратки шириною  $2\text{см}$  рівна  $2\text{мкм}$ . Яку різницю довжини хвилі може розділити ця ґратка в області жовтих променів у спектрі другого  $600\text{нм}$  порядку.
- 2.35. Скільки штрихів на довжини має мати дифракційна ґратка, якщо зелена лінія ртуті  $5461\text{Å}$  у спектрі другого порядку спостерігається під кутом  $30^\circ$ .
- 2.36. На дифракційну ґратку нормально падає пучок світла від розрядної трубки, наповненої гелієм. На яку лінію в спектрі третього порядку накладається червона лінія гелію  $670\text{нм}$  спектра другого порядку?
- 2.37. Знайти період дифракційної ґратки, якщо зелена лінія ртуті  $546\text{нм}$  в спектрі першого порядку спостерігається під кутом  $30^\circ$ .

- 3.38. Період дифракційної ґратки  $2\text{ мкм}$ . Яку різницю довжин хвиль  $\Delta\lambda$  може розрізнити ця ґратка в області жовтих променів ( $600\text{ нм}$ ) в спектрі другого порядку? Ширина дифракційної ґратки  $3\text{ см}$ .
- 2.39. Визначити мінімальну кінетичну енергію (в мегаелектрон - вольтах), яку повинен мати електрон, щоб у середовищі з показником заломлення  $n = 1,5$  виникло свічення Вавілова-Черенкова.
- 2.40. Знайти кут падіння  $i_B$  повної поляризації при відбиванні світла від скла, показник заломлення якого  $n = 1,6$ .
- 2.41. Граничний кут повного внутрішнього відбиття для деякої речовини  $r = 45^\circ$ . Знайти для цієї речовини кут  $i_B$  повної поляризації.
- 2.42. Знайти показник заломлення  $n$  скла, якщо при відбитті від нього світла відбитий промінь був повністю поляризованим при куті заломлення  $\beta = 30^\circ$ .
- 2.43. Знайти кут між оптичними осями поляризатора і аналізатора, якщо інтенсивність природного світла, яке пройшло через поляризатор і аналізатор, зменшилась у 4 рази. Поглинаванням поляризатора і аналізатора знехтувати.
- 2.44. Визначити, у скільки разів зменшиться інтенсивність світла, яке проходить через два ніколи, розташованих так, що кут між їх оптичними осями рівний  $45^\circ$ , а в кожному з ніколів тратиться 5% інтенсивності падаючого на нього світла.
- 2.45. Визначити найменшу товщину кристалічної пластинки у півхвилі для  $\lambda = 589\text{ нм}$ , якщо різниця показників заломлення для звичайного і незвичайного променів для даної довжини хвилі  $\Delta n = 0,17$ .
- 2.46. Природне монохроматичне світло падає на систему з двох схрещених ніколів, між якими знаходиться кварцева пластинка товщиною  $4\text{ мм}$ . У скільки разів зменшиться інтенсивність світла, яке пройде через цю систему, якщо питоме обертання кварцу рівне  $15\text{ град/мм}$ ?
- 2.47. Промінь світла проходить шар льоду, падає на алмазну пластинку, частково відбивається та частково заломлюється. Визначити, яким повинен бути кут падіння, щоб відбитий промінь був максимально поляризованим.
- 2.48. Визначити коефіцієнт поглинання світла у поляроїдах, якщо за кута  $\varphi = 45^\circ$  між їх площинами поляризації через систему з двох поляроїдів проходить 16% падаючого світла.

- 2.49. Аналізатор у чотири рази зменшує інтенсивність світла, яке пройшло через поляризатор. Визначити кут  $\varphi$  між площинами поляризації поляризатора та аналізатора.
- 2.50. Ступінь поляризації  $P$  частково поляризованого світла дорівнює 0,5. У скільки разів відрізняється максимальна інтенсивність світла, що проходить через аналізатор, від мінімальної?
- 2.51. У скільки разів зменшиться інтенсивність природного світла при проходженні його через два ніколі, кут між площинами поляризації яких дорівнює  $\varphi = 60^\circ$ ?
- 2.52. Граничний кут повного внутрішнього відбивання для деякої речовини  $45^\circ$ . Знайти для цієї речовини кут повної поляризації.
- 2.53. Знайти показник заломлення скла, якщо при відбиванні від нього світла відбитий промінь буде повністю поляризованим при куті заломлення  $30^\circ$ .
- 2.54. Визначити кут падіння повної поляризації при відбиванні світла від скла, показник заломлення якого рівний  $\sqrt{3}$ .
- 2.55. Визначити відстань між атомними площинами у кристалі кам'яної солі, якщо дифракційний максимум першого порядку спостерігається при падінні рентгенівських променів з довжиною хвилі  $0,147\text{нм}$  під кутом  $15^\circ 12'$  до поверхні кристала.
- 2.54. Визначити, у скільки разів зменшиться інтенсивність природного світла, яке пройшло через два ніколі, оптичні осі яких утворюють кут  $45^\circ$ . Кожний ніколь поглинає 10% світла, яке падає на нього.
- 2.55. Пучок монохроматичного світла, довжина хвилі якого у вакуумі рівна  $600\text{нм}$ , падає на пластинку ісландського шпату перпендикулярно до його оптичної осі. Знайти довжини хвиль звичайного і незвичайного променів у кристалі, якщо показники заломлення ісландського шпату для звичайного і незвичайного променів рівні відповідно 1,66 і 1,49.
- 2.56. Знайти кут між оптичними осями поляризатора і аналізатора, якщо інтенсивність природного світла, що пройшло через поляризатор і аналізатор, зменшилась у чотири рази. Поглинанням світла знехтувати.

- 2.57. Визначити мінімальну товщину кристалічної пластини в півхвилі для довжини хвилі  $589\text{нм}$ , якщо різниця показників заломлення звичайного і незвичайного променів для даної довжини хвилі рівна  $0,17$ .

### 3.3 Квантова оптика

- 3.1. Знайти енергію, масу та імпульс фотона, якщо відповідна йому довжина хвилі  $= 3,31\text{нм}$ .
- 3.2. З якою швидкістю повинен рухатись електрон, щоб його імпульс був рівним імпульсу фотона з довжиною хвилі  $\lambda = 650\text{нм}$ ?
- 3.3. З якою швидкістю повинен рухатись електрон, щоб його кінетична енергія була рівною енергії фотона довжиною хвилі  $\lambda = 650\text{нм}$ ?
- 3.4. Знайти співвідношення між довжиною хвилі фотона (у мікрометрах,  $\text{мкм}$ ) та його енергію у електрон-вольтах, ( $eV$ ).
- 3.5. Визначити в електрон-вольтах енергію фотона, при якій його маса рівна масі спокою електрона. Маса спокою електрона  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}\text{кг}$ .
- 3.6. Знайти довжину хвилі де Бройля для електрона, який має кінетичну енергію  $2\text{кеВ}$ .
- 3.7. З якою швидкістю повинен рухатись протон, щоби його кінетична енергія була рівною енергії фотона з довжиною хвилі  $520\text{нм}$ .
- 3.8. Знайти довжину хвилі де Бройля для електрона, який рухається зі швидкістю  $5 \cdot 10^5\text{м/с}$ .
- 3.9. Знайти довжину хвилі де Бройля для електронів, які пройшли різницю потенціалів  $200\text{В}$ .
- 3.10. Заряджена частинка, прискорена різницею потенціалів  $200\text{В}$ , має довжину хвилі де Бройля  $2\text{нм}$ . Знайти масу частинки, якщо її заряд чисельно рівний елементарному заряду.
- 3.11. Заряджена частинка, прискорена різницею потенціалів  $200\text{В}$  має довжину хвилі де Бройля рівну  $0,02\text{Å}$ . Знайти масу цієї частинки, якщо відомо, що її заряд чисельно дорівнює заряду електрона.



- 3.12. Знайти довжину хвилі де Бройля для протонів, які пройшли різницю потенціалів  $2\text{кВ}$ . Маса спокою протона  $1,67 \cdot 10^{-27}\text{кг}$ .
- 3.13. Заряджена частинка, прискорена різницею потенціалів  $200\text{В}$  має довжину хвилі де Бройля  $2,02\text{нм}$ . Знайти масу частинки, якщо її заряд чисельно рівний заряду електрона.
- 3.14. Знайти співвідношення між довжиною хвилі фотона у ( $\text{мкм}$ ) і його енергією в ( $\text{еВ}$ ).
- 3.15. Визначити мінімальну довжину хвилі рентгенівського випромінювання, одержаного від трубки, яка працює при напрузі  $50\text{кВ}$ .
- 3.16. Знайти енергію, масу та імпульс фотона, якщо відповідна йому довжина хвилі  $0,4\text{мкм}$ .
- 3.17. Визначити масу, імпульс та енергію фотона: 1) червоного світла ( $\lambda = 7 \cdot 10^{-5}\text{см}$ ); 2) рентгенівських променів ( $\lambda = 2,5\text{нм}$ ); 3) гамма-променів ( $\lambda = 1,24\text{пм}$ ).
- 3.18. Визначити довжину хвилі  $\lambda$ , масу  $m$  та імпульс  $p$  фотона з енергією  $W = 1\text{МеВ}$ . Порівняти масу цього фотона з масою електрона, що перебуває у стані спокою.
- 3.19. Визначити енергію  $W$ , імпульс  $p$  і масу  $m$  фотона з довжиною хвилі  $\lambda = 0,16\text{нм}$ .
- 3.20. Визначити енергію  $W$ , імпульс  $p$  і масу  $m$  фотона рентгенівського випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda = 100\text{пм}$ . Порівняйте масу цього фотона з масою спокою електрона.
- 3.21. Визначити, з якою швидкістю повинен рухатися електрон, щоб його кінетична енергія дорівнювала енергії фотона, довжина хвилі якого  $\lambda = 0,5\text{мкм}$ .
- 3.22. Визначити в електрон-вольтах енергію фотона, при якій його маса рівна атомній одиниці маси ( $1\text{а.о.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27}\text{кг}$ ).
- 3.23. Монохроматичний промінь світла ( $\lambda = 520\text{нм}$ ), падаючи по нормалі до поверхні, створює світловий тиск ( $P = 0,5\text{мкПа}$ ). Яке число фотонів падає в одиницю часу на одиницю площі цієї поверхні? Коефіцієнт відбивання світла поверхнею  $\rho = 0,5$ .

- 3.24. На зачорнену поверхню площею  $10\text{см}^2$ , перпендикулярно до неї, кожної секунди падає  $9 \cdot 10^{20}$  фотонів. Енергія кожного фотона  $\varepsilon = 2\text{eV}$ . Знайти тиск, який створює цей промінь світла на дану поверхню.
- 3.25. Визначити, з якою швидкістю повинен рухатися електрон, щоб його імпульс дорівнював імпульсу фотона, довжина хвилі якого дорівнює  $\lambda = 2\text{нм}$ .
- 3.26. На яку довжину хвилі  $\lambda_m$  припадає максимум випромінювальної здатності чорного тіла, що має температуру: 1)  $T = 0^\circ\text{C}$ ; 2) тіла людини, тобто  $T = 37^\circ\text{C}$ ?
- 3.27. Якою є найменша частота світла, за якої ще можливий фотоэффект, якщо робота виходу електронів із металу дорівнює  $A = 2,06\text{eV}$ ?
- 3.28. На поверхню площею  $0,1\text{м}^2$ , перпендикулярно до неї, падає електромагнітне випромінювання потужністю  $W = 1,05\text{Вт}$ . Визначити тиск, створюваний цим випромінюванням, для випадків, коли поверхня повністю поглинає або відбиває падаюче на неї випромінювання.
- 3.29. Знайти довжину хвилі  $\lambda_0$ , яка відповідає червоній границі фотоэффекту, для літію. (Робота виходу електронів із літію  $A = 2,4\text{eV}$ ).
- 3.30. Довжина хвилі світла, яка відповідає червоній границі фотоэффекту, для деякого металу  $\lambda_0 = 275\text{нм}$ . Знайти мінімальку енергію фотона ( $у\text{eV}$ ), який викличе фотоэффект.
- 3.31. Знайти затримуючу різницю потенціалів  $U$  для електронів, які вириваються із калію світлом довжиною хвилі  $\lambda = 330\text{нм}$ . Робота виходу електронів із калію  $A = 2,0\text{eV}$ .
- 3.32. Фотони з енергією  $= 5,5\text{eV}$  виривають електрони із металу з роботою виходу  $A = 4,7\text{eV}$ . Знайти максимальний імпульс вирваних електронів.
- 3.33. Яку кінетичну енергію мають електрони, що вириваються з поверхні цезію при опроміненні її світлом із частотою  $\nu = 10^{15}\text{Гц}$ ? Червона межа фотоэффекту для цезію дорівнює  $\nu_0 = 5 \cdot 10^{14}\text{Гц}$ .
- 3.34. На скільки зміниться довжина хвилі червоної межі фотоэффекту, якщо цинковий катод фотоелемента замінити на літійовий?

- 3.35. Червона межа фотоефекту для деякого металу дорівнює  $\lambda_0 = 0,5 \mu\text{м}$ . Визначити мінімальне значення енергії фотона, що спричиняє фотоефект.
- 3.36. На металеву пластину падає пучок ультрафіолетового випромінювання ( $\lambda = 0,25 \mu\text{м}$ ). Фотострум припиняється за мінімальної затримувальної різниці потенціалів  $U_3 = 0,96 \text{В}$ . Визначити роботу виходу  $A$  електронів із металу.
- 3.37. На яку довжину хвилі припадає максимум спектральної густини випромінювання абсолютно чорного тіла, яке має температуру, рівну температурі людського тіла ( $37^\circ\text{C}$ )?
- 3.38. Знайти величину затримуючого потенціалу для фотоелектронів, які вириваються з поверхні калію (робота виходу  $2 \text{eВ}$ ) світлом, довжина хвилі якого  $4,1 \cdot 10^{-7} \text{м}$ .
- 3.39. Знайти потенціал іонізації атома водню.
- 3.40. Довжина хвилі  $\gamma$  - випромінювання радію  $1,6 \text{нм}$ . Яку мінімальну різницю потенціалів необхідно прикласти до рентгенівської трубки, щоб одержати рентгенівські промені з цією довжиною хвилі?
- 3.41. Знайти енергію, масу та імпульс фотона, якщо відповідна йому довжина хвилі  $1,5 \text{нм}$ .
- 3.42. Зачорнена металева кулька остигає від температури  $107^\circ\text{C}$  до температури  $27^\circ\text{C}$ . На скільки зміниться довжина хвилі максимуму спектральної густини її випромінювання?
- 3.43. Яку мінімальну енергію в ( $\text{eВ}$ ) повинні мати електрони, щоби при збудженні атомів водню ударами цих електронів спектр свічення водню мав три спектральні лінії? Знайти довжини хвиль цих ліній.
- 3.44. Плоский алюмінієвий електрод освітлюється ультрафіолетовим випромінюванням із довжиною хвилі  $\lambda = 8 \text{нм}$ . На яку максимальну відстань від поверхні електрода зможе віддалитися фотоелектрон, якщо поза електродом наявне затримувальне електричне поле з напруженістю  $E = 7,5 \text{В/м}$  ?
- 3.45. При фотоефекті з платинової поверхні ( $A = 5,3 \text{eВ}$ ) електрони повністю затримуються різницею потенціалів  $U = 0,4 \text{В}$ . Знайти довжину хвилі  $\lambda$  використовуюваного випромінювання та граничну довжину хвилі  $\lambda$ , при якій ще можливий фотоефект.

- 3.46. Фотон з довжиною хвилі  $\lambda_0 = 110\text{нм}$  розсіявся під кутом  $180^\circ$  на вільному електроні. Визначити в електрон-вольтах кінетичну енергію електрона віддачі.
- 3.47. Рентгенівські промені з довжиною хвилі  $70\text{нм}$  зазнають комптонівське розсіювання на парафіні. Знайти довжину хвилі рентгенівських променів, розсіяних у напрямках: 1)  $\varphi = \pi/2$ ; 2)  $\varphi = \pi$ .
- 3.48. Якою була довжина хвилі  $\lambda_0$  рентгенівського випромінювання, якщо при комптонівському розсіянні цього випромінювання графітом під кутом  $60^\circ$  довжина хвилі розсіяного випромінювання виявилась рівною  $24,5\text{нм}$ ?
- 3.49. При комптонівському розсіянні енергія падаючого фотона розподілилась порівну між розсіяним фотоном і електроном віддачі. Кут розсіяння  $\varphi = \pi/2$ . Знайти енергію та імпульс розсіяного фотона.
- 3.50. При проходженні світлом в деякій речовині шляху  $x$  його інтенсивність зменшилась в два рази. Визначити, у скільки раз зменшиться інтенсивність світла при проходженні ним шляху  $4x$ .
- 3.51. При проходженні світлом у деякій речовині шляху  $X = 3\text{см}$  інтенсивність його зменшилась у 20,1 рази. Знайти коефіцієнт поглинання цієї речовини.
- 3.52. На яку довжину хвилі  $\lambda_m$  припадає максимум спектральної густини випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ), яке має температуру, рівну температурі  $t = 37^\circ\text{C}$  людського тіла?
- 3.53. Температура АЧТ змінилась при нагріванні від  $1000\text{K}$  до  $3000\text{K}$ . У скільки разів збільшиться при цьому: 1) густина випромінювання; 2) максимальне значення спектральної густини випромінювання? На скільки змінилась довжина хвилі  $\lambda_m$ , на яку припадає максимум спектральної густини випромінювання?
- 3.54. АЧТ має температуру  $T_1 = 3000\text{K}$ . При остиганні тіла довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної густини випромінювання, змінилась на  $\Delta\lambda = 10\text{мкм}$ . До якої температури  $T_2$  охолодилось тіло?
- 3.55. Потужність випромінювання АЧТ рівна  $15\text{кВт}$ . Знайти площу випромінюючої поверхні тіла, якщо максимум спектральної густини його випромінювання припадає на довжину хвилі  $\lambda_m = 550\text{нм}$ .

- 3.56. При нагріванні АЧТ довжина хвилі  $\lambda_m$ , на яку припадає максимум спектральної густини випромінювання, змінилась від  $700\text{нм}$  до  $500\text{нм}$ . У скільки разів при цьому збільшилась густина випромінювання АЧТ?
- 3.57. В яких областях спектра лежать довжини хвиль, які відповідають максимуму спектральної густини випромінювання, якщо джерелом світла є: спіраль електричної лампочки розжарювання ( $T = 3000$ ); поверхня Сонця ( $T = 6000$ ).
- 3.58. Яку потужність  $N$  необхідно підводити до зачорненої металевій кульки радіусом  $r = 3\text{см}$ , аби підтримувати її температуру на  $\Delta T = 37\text{К}$  вище від температури навколишнього середовища? Температура навколишнього середовища  $T = 293\text{К}$ . Вважати, що тепло витрачається тільки внаслідок випромінювання.
- 3.59. Знайти густину випромінювання АЧТ, якщо максимум спектральної густини його випромінювання припадає на довжину хвилі  $\lambda = 550\text{нм}$ .
- 3.60. Визначити енергію  $W$ , що випромінюється за одну хвилину зі спостережувального вікна плавильної печі, якщо її температура  $T = 1200\text{К}$ . Площа вікна дорівнює  $S = 8\text{см}^2$ .
- 3.61. Довжина хвилі світла, що відповідає червоній границі фотоефекту для деякого металу  $300\text{нм}$ . Знайти мінімальну енергію фотона, який викличе фотоефект.
- 3.62. Яку потужність необхідно підводити до зачорненої металевій кульки діаметром  $6\text{см}$ , щоби підтримувати її температуру на  $20^\circ\text{C}$  вище температури навколишнього середовища ( $17^\circ\text{C}$ )? Вважати, що тепло втрачається тільки внаслідок випромінювання.
- 3.63. При нагріванні АЧТ довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної густини випромінювання, зменшилась від  $700$  до  $500\text{нм}$ . У скільки разів при цьому збільшилась густина випромінювання АЧТ?
- 3.64. У скільки раз зменшиться інтенсивність рентгенівських променів з довжиною хвилі  $0,2\text{Å}$  при проходженні через залізний лист товщиною? Масовий коефіцієнт поглинання заліза для цієї довжини рівний  $1,1\text{м}^2/\text{кг}$ , густина заліза  $7900\text{кг}/\text{м}^3$ .

- 3.65. Червона границя фотоефекту для деякого матеріалу рівна  $3000\text{Å}$ . Знайти мінімальне значення енергії фотона в  $(eV)$  який викликає фотоефект.
- 3.66. Визначити енергію, масу та імпульс фотона з довжиною хвилі  $0,05\text{Å}$ .
- 3.67. Знайти потужність, яку випромінює абсолютно чорне тіло з поверхні площею  $2\text{см}^2$ , якщо відомо, що максимум його спектральної густини випромінювання припадає на довжину хвилі  $600\text{нм}$ .
- 3.68. Потужність випромінювання абсолютно чорного тіла рівна  $36\text{кВт}$ . Знайти температуру цього тіла, якщо відомо, що площа його поверхні рівна  $0,5\text{м}^2$ .
- 3.69. Як і в скільки разів зміниться енергетична світність абсолютно чорного тіла, якщо максимум енергії випромінювання переміститься з червоної межі видимого спектра ( $\lambda_{m1} = 780\text{нм}$ ) на фіолетову ( $\lambda_{m2} = 390\text{нм}$ )?
- 3.70. З якою швидкістю повинна рухатись альфа частинка, щоб її імпульс був рівний імпульсу фотона з довжиною хвилі  $550\text{нм}$ ? Маса спокою альфа частинки  $6,64 \cdot 10^{-27}\text{кг}$ .

## Розділ 4

### Література

1. Яворский В.М., Пинский А.А. Основы физики. – М.: Наука, 1981. – Т.1-2.
2. Савельев И.В. Сборник задач по общему курсу физики. - М.: Наука, 1982.
3. Трофимова Т.М. Курс физики. - М.: Высшая школа, 1990.
4. Лопатинський І.Є. Курс фізики. Л.: Афіша, 2003.
5. Вакарчук С.О. Фізика. ЛНУ ім. Ів. Франка. 2010.
6. Вайданич В.І. Фізика. Національний лісотехнічний університет України. 2009.
7. Волькенштейн В.С. Сборник вопросов и задач по общей физике. - М.: Наука, 1985.
8. Чертов А.Г. и др. Задачник по физике. М.: Высшая школа, 1981.
9. Иродов И.Е. Задачи по физике. - М: Наука, 1979.
10. Лопатинський І.Є. Задачі з фізики.-Львівська політехніка. 2001
11. Фуртак С.П. Пірометричні вимірювання. - Житомир: Полісся, 1997.





## Додатки

1. Деякі фундаментальні фізичні сталі.

Швидкість світла у вакуумі	$c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Стала планка	$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ еВ} \cdot \text{с}$
Елементарний заряд (електрона)	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Маса спокою електрона	$m = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Стала Авогадро	$N_a = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Уніфікована атомна одиниця маси	$1 \text{ а.о.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Перша стала Віна (закон зміщення Віна)	$b = 2,898 \cdot 10^3 \text{ мкм} \cdot \text{К}$
Друга стала Віна (другий закон Віна)	$B = 1,286 \cdot 10^{-11} \text{ м}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{К}^{-5}$
Комптонівська довжина хвилі	$\lambda_c = 2,426 \text{ нм}$
Стала Больцмана	$k = 1,3881 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} = 8,619 \cdot 10^{-5} \text{ еВ/К}$
Стала Стефана-Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^4$

2. Префікси і множники для утворення десятикратних та часткових одиниць.

Множник	Назва	Позначення
$10^{18}$	екса	<i>E</i>
$10^{15}$	пета	<i>P</i>
$10^{12}$	тера	<i>T</i>
$10^9$	гіга	<i>G</i>
$10^6$	мега	<i>M</i>
$10^3$	кіло	<i>k</i>
$10^2$	гекто	<i>g</i>
$10^1$	дека	<i>da</i>
$10^{-1}$	деци	<i>d</i>
$10^{-2}$	санти	<i>c</i>
$10^{-3}$	мілі	<i>m</i>
$10^{-6}$	мікро	<i>mk</i>
$10^{-9}$	нано	<i>n</i>
$10^{-12}$	піко	<i>p</i>
$10^{-15}$	фемто	<i>f</i>
$10^{-18}$	атто	<i>a</i>

3. Показники заломлення (середні для видимого світла).

Речовина	Показник заломлення <i>n</i>	Речовина	Показник заломлення <i>n</i>
Алмаз	2,42	Олія оливкова	1,46
Бензол	1,5	Скипидар	1,48
Вода	1,33	Скло	1,5-1,9
Гліцерин	1,47	Сірковуглець	1,63
Кіновар	3,02	Спирт	1,39
Кремній	1,31	Топаз	1,63
Лід	1,31	Цукор	1,56
Оргкло	1,51		

## 4. Роботи виходу електронів із деяких металів.

Метал	$A, eV$	$A, Дж$
Алюміній	4,25	$6,8 \cdot 10^{-19}$
Вольфрам	4,54	$7,26 \cdot 10^{-19}$
Залізо	4,45	$7,12 \cdot 10^{-19}$
Калій	2,25	$3,6 \cdot 10^{-19}$
Літій	2,3	$3,7 \cdot 10^{-19}$
Літій	2,3	$3,7 \cdot 10^{-19}$
Мідь	4,4	$7,04 \cdot 10^{-19}$
Натрій	2,28	$3,65 \cdot 10^{-19}$
Нікель	4,9	$7,84 \cdot 10^{-19}$
Олово	4,38	$7 \cdot 10^{-19}$
Платина	5,32	$8,51 \cdot 10^{-19}$
Срібло	4,7	$7,5 \cdot 10^{-19}$
Цинк	4,24	$6,78 \cdot 10^{-19}$
Цезій	1,94	$3,1 \cdot 10^{-19}$

## 5. Межа К-серії рентгенівських променів для різних матеріалів антикатада.

Речовина	Довжина хвилі, $\lambda, нм$
Вольфрам	1,78
Золото	1,53
Мідь	13,8
Платина	1,58
Срібло	4,84