

#### 4. ОСНОВИ ОПТИЧНОЇ МІКРОСКОПІ ТА РЕФРАКТОМЕТРІЇ



##### 4.1. Основні закони та формули

- Формула тонкої лінзи

$$\frac{1}{d} \pm \frac{1}{f} = \pm \frac{1}{F};$$

$$(n-1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{F}$$

- Оптична сила лінзи

$$D = \frac{1}{F}$$

- Збільшення тонкої лінзи

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$$

- Збільшення лупи

$$\Gamma = \frac{S}{F}$$

- Збільшення мікроскопу

$$\Gamma = \frac{L \cdot S}{F_{об} \cdot F_{ок}}$$

- Межа розрізнення сухого мікроскопу

$$z = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

- Межа розрізнення імерсійного мікроскопу

$$z = \frac{\lambda}{2 n \sin \theta}$$

- Числова апертура сухого мікроскопу

$$A = 2 \sin \theta$$

- Числова апертура імерсійного мікроскопу

$$A = 2 n \sin \theta$$

- Корисне збільшення мікроскопу

$$\Gamma_{кор} = \frac{z_{ок} \cdot A}{z_{об}}$$

- Відстань найкращого зору

$$S = 25 \text{ см.}$$

- Межа розрізнення ока

$$z_{ок} = (140 \div 280) \text{ мкм.}$$

- Абсолютний показник заломлення середовища

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon \mu}$$

- Відносний показник заломлення

$$n_{12} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\sqrt{\epsilon_1 \mu_1}}{\sqrt{\epsilon_2 \mu_2}} = \frac{v_2}{v_1}$$

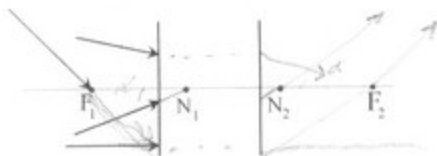
- Закон повного внутрішнього відбивання

$$\sin \alpha_{гр} = \frac{n_2}{n_1}, \quad n_1 > n_2$$

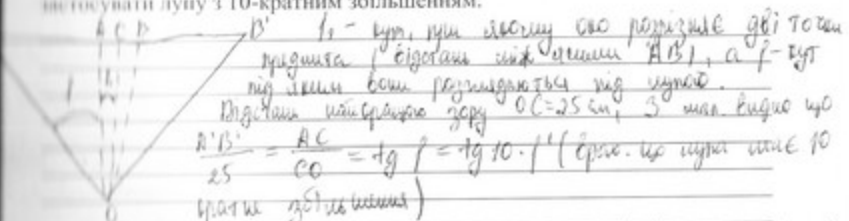
##### 4.2. Задачі для самостійного розв'язку

Для кожної з 10 наступних задач запишіть скорочену умову, розв'язок та відповідь.

1. Побудуйте хід променів в центрованій оптичній системі



2. В нормі найменший кут зору, при якому око розрізняє дві точки предмета, розташованого на відстані найкращого зору, дорівнює одній кутовій хвилині. Знайти граничну відстань між двома точками, якщо використовувати лупу з 10-кратним збільшенням.



Відстань між двома точками  $A'B'$  при використанні лупи, становить  $A'B' = 25 \cdot \text{tg } (10 \cdot \frac{1}{250}) = 50 \cdot \text{tg } (\frac{1}{250}) = 1,5 \text{ мм}$

3. Чому дорівнює збільшення мікроскопу, якщо збільшення об'єктива дорівнює 100, а оптична сила окуляра 10 діоптр?

Збільшення  $k$  об'єк. збільшення;  $k = k_{об} \cdot k_{ок}$ , де  $k_{об}$  і  $k_{ок}$  - збільшення лупи збільшення;  $k_{об} = \frac{S}{F_{об}}$ ;  $S$  - відстань між окуляром зору (25 см),  $F_{об}$  - фокусна відстань об'єктива  $F_{об}$  використовуваним;

$k_{ок} = \frac{S}{F_{ок}}$ ;  $F_{ок}$  - фокусна відстань окуляра  $F_{ок}$  використовуваним;

$$k = k_{об} \cdot k_{ок} = 5 \cdot 100 = 500$$

Відповідь: 250

4. Знайти числову апертуру імерсійного мікроскопу, якщо числова апертура сухого мікроскопу дорівнює 0,94, а швидкість поширення світла в імерсійній рідині складає  $2 \cdot 10^8 \frac{m}{c}$ .

Числова апертура імерсійного мікроскопу дорівнює  $A_e = n \sin \alpha$   
 $A_i = n \sin \alpha$ , тут  $\alpha$  - асиметричний кут, а  $n$  - показник заломлення імерсійної рідини, який показує у скільки разів швидкість світла у вакуумі більша від швидкості у даному середовищі;  $n = \frac{c}{v}$ ;  $A_i = A_e \cdot n = A_e \cdot \frac{c}{v} =$   
 $= 0,94 \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{2 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = 1,41$

Відповідь: 1,41

5. Як зміниться роздільна здатність імерсійного мікроскопу при заміні кедрової олії з показником заломлення 1,515 на воду з показником заломлення 1,33?

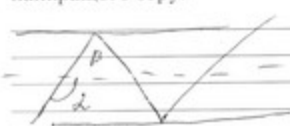
Формула для роздільної здатності імерсійного дзеркала для двох випадків:  
 $d_0 = \frac{0,5 \lambda}{n_0 \sin \alpha}$ ;  $d_0 = \frac{0,5 \lambda}{n_0 \sin \alpha}$ , тут  $n_0$  і  $n_0$  - показник заломлення води і олії, а  $d_0$  і  $d_0$  - роздільна здатність мікроскопа  
 $\frac{d_0}{d_0} = \frac{0,5 \lambda}{n_0 \sin \alpha} = \frac{n_0}{n_0} = \frac{1,33}{1,515} = 0,88$ ;  $\frac{1}{0,88} = 1,14$  рази  
 Відповідь: роздільна здатність імерсійного збільшиться в 1,14 рази

6. Які найменші предмети можна спостерігати за допомогою імерсійного мікроскопу з конденсорним освітленням, якщо довжина хвилі дорівнює 450 нм, показник заломлення імерсії 1,6 та апертурний кут  $60^\circ$ . Як зміниться межа розрізнення при освітленні предмета паралельними променями?

Роздільна здатність імерсійного мікроскопа з показником заломлення імерсії 1,6 та апертурним кутом  $\alpha = 60^\circ$ , при освітленні предметом, довжина хвилі якого  $\lambda = 450 \text{ нм}$   
 $Z = \frac{0,5 \lambda}{n \sin \alpha} = \frac{0,5 \cdot 450 \cdot 10^{-9} \text{ м}}{1,6 \cdot \sin 60^\circ} = \frac{0,5 \cdot 4,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{1,6 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}} =$   
 $= 1,65 \cdot 10^{-7} \text{ м}$

Відповідь:  $1,65 \cdot 10^{-7} \text{ м}$

7. В мікроскопі фокусна відстань об'єктива дорівнює 5,4 мм, а окуляра 2 см. Предмет знаходиться на відстані 5,6 мм від об'єктива. Знайти збільшення мікроскопу для нормального ока, якщо око акомодоване на відстань найкращого зору.



2-й кут падіння променя на осі сітчатого водян. Графічний кут падіння на сітчатоб. водян.  $\frac{1}{4} = \sin \alpha$   
 $\sin \alpha = \arcsin \frac{1}{4} = \arcsin \frac{1}{4}$

$$d = \frac{F_1}{2} - \left( \frac{F_1}{2} - f \right) = \frac{F_1}{2} + f = \frac{F_1}{2} + \arcsin \frac{1}{4}$$

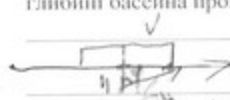
Відповідь:  $\frac{F_1}{2} + f = \frac{F_1}{2} + \arcsin \frac{1}{4}$

8. Світловод виготовлений з прозорого матеріалу з показником заломлення 1,41. Під яким максимальним кутом до вісі світловода може падати світловий промінь на торці світловода, щоб пройти світловод без послаблення?

Світловод виготовлений з прозорого матеріалу з показником заломлення 1,41. Під яким максимальним кутом до вісі світловода може падати світловий промінь на торці світловода, щоб пройти світловод без послаблення?  
 Для цього потрібно, щоб промінь падав на границю розділу матеріалу світловода з повітрям під кутом, більшим за критичний кут. Критичний кут  $\alpha_c$  визначається умовою  $\sin \alpha_c = \frac{n_2}{n_1}$ , де  $n_1$  - показник заломлення матеріалу світловода, а  $n_2$  - показник заломлення повітря. Тоді  $\alpha_c = \arcsin \frac{1}{1,41}$ .

Відповідь:

9. На дні басейна з водою ( $n = 1,33$ ) знаходиться точкове джерело світла. На поверхні води плаває пліт, що має площу правильного шестикутника площею  $2 \text{ м}^2$ . Центр плота знаходиться над точковим джерелом. При якій глибині басейна промені світла не вийдуть з води?



Розуміючи правильний шестикутник, який складає площу плота, можна побачити, що він складається з шести трикутників, які мають спільну сторону  $S$ .

$$\sin \alpha = \frac{h}{S}$$

$$S = 2\sqrt{3} R^2$$

$$\cos \alpha = \frac{h}{S} \quad S = 2\sqrt{3} R^2$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \frac{v}{k} ; \frac{\sin^2 \theta}{\cos^2 \theta} = \frac{v^2}{n^2 - 1} = \frac{v^2}{1 - \frac{1}{n^2}} = \frac{v^2}{n^2 - 1}$$

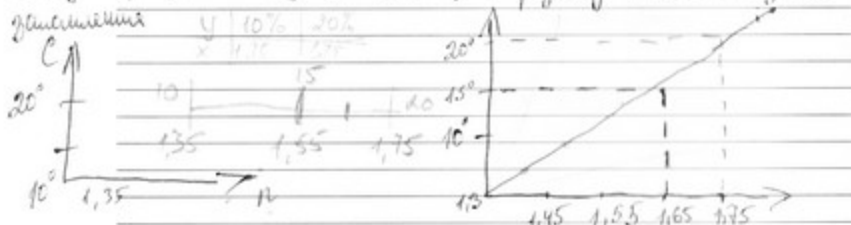
$$\frac{1}{n^2 - 1} = \frac{v^2}{n^2} ; n = \sqrt{\frac{v^2}{v^2 - 1}} ; \text{Наб. чл. } v = \sqrt{\frac{5}{2 \cdot 2 \cdot 3}}$$

$$\text{То } n = \sqrt{\frac{5}{2 \cdot 2 \cdot 3}} \cdot \sqrt{n^2 - 1} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4}{2 \cdot 1,42} \cdot \sqrt{(1,37)^2 - 1}}$$

Відповідь: 0

10. Для розчину з концентрацією 10% показник заломлення світла дорівнює 1,35, а для розчину з концентрацією 20% - 1,75. Яка концентрація розчину, для якого показник заломлення дорівнює 1,65?

На осі абсцис побудуємо графік залежності показника заломлення, на осі ординат - концентрації розчину і їхню залежність збільшимо.



Відповідь: збільшує показник заломлення становить 15%

Враховуючи, що світло - це електромагнітні коливання, то при заломленні світла на межі розділення двох середовищ частота світла залишається незмінною, а швидкість його поширення змінюється. Це призводить до змін довжини хвилі та напрямку поширення. Зміна напрямку поширення відбувається так, що світло заломлюється ближче до нормалі до межі розділення.

Величина заломлення залежить від частоти світла. Частота світла, що падає на межі розділення, збільшується, тоді заломлення збільшується. Зміна напрямку поширення відбувається так, що світло заломлюється ближче до нормалі до межі розділення.



### 4.3. Тестові завдання

Для кожного з наступних 10 тестових завдань знайдіть одну вірну відповідь і позначте її хрестиком в таблиці тестових відповідей (після тесту № 10).

- Центрована оптична система (ЦОС) характеризується...
  - трьома кардинальними точками і трьома кардинальними площинами;
  - шістьома кардинальними точками і трьома кардинальними площинами;
  - трьома кардинальними точками і шістьома кардинальними площинами;
  - трьома кардинальними точками і однією кардинальною площиною;
  - шістьома кардинальними точками і шістьома кардинальними площинами.
- Для ЦОС фокусна відстань та відстані від предмета і зображення до головних площин зв'язані співвідношенням:
  - $\frac{f_1}{a_1} + \frac{f_2}{a_2} = 1$ ;
  - $\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f_1 f_2}$ ;
  - $\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{a_1 a_2}$ ;
  - $f_1 a_1 + f_2 a_2 = 1$ ;
  - $\frac{a_1}{f_1} + \frac{a_2}{f_2} = 1$ .
- Яке явище обмежує мінімальний розмір предмета, який спостерігають за допомогою оптичного мікроскопа?
  - інтерференція світла;
  - дисперсія світла;
  - поляризація світла;
  - дифракція світла;
  - поглинання світла.
- Збільшенням мікроскопу називається
  - відношення відстані між оком і предметом до відстані між роговицею ока і сітківкою;
  - відношення кута зору, під яким видно зображення предмета, до кута зору, під яким видно предмет, що знаходиться на відстані найкращого зору;
  - відношення розміру предмета до розміру зображення;
  - відношення кута зору, під яким видно зображення предмета, до фокусної відстані окуляра;
  - відношення кута зору, під яким видно зображення предмета, до відстані найкращого зору.

5. Збільшення мікроскопу дорівнює...

- а) відношення добутку фокусних відстаней об'єктива та окуляра до добутку довжини тубуса та відстані найкращого зору;
- б) відношення добутку довжини тубуса та відстані найкращого зору до добутку фокусних відстаней об'єктива та окуляра.
- в) відношення фокусної відстані окуляра до фокусної відстані об'єктива;
- г) відношення фокусної відстані об'єктива до фокусної відстані окуляра;
- д) відношення відстані найкращого зору до фокусної відстані окуляра.

6. Межею розрізнення мікроскопу називається...

- а) величина, обернена найменшій відстані між двома точками предмета, які сприймаються в мікроскопі як дві точки;
- б) відстань між предметом та об'єктивом;
- в) відстань між заднім фокусом об'єктива і переднім фокусом окуляра;
- г) величина, рівна найменшій відстані між двома точками предмета, які сприймаються в мікроскопі як дві точки;
- д) величина рівна довжині хвилі світла, яке використовується для освітлення предмета.

7. Збільшення роздільної здатності мікроскопу здійснюється за рахунок:

- 1 – збільшення довжини хвилі; 2 – зменшення довжини хвилі;
- 3 – збільшення числової апертури; 4 – зменшення числової апертури;
- 5 – застосування імерсійної рідини; 6 – збільшення фокусної відстані об'єктива.

- а) 1, 3, 5; в) 2, 3, 5; д) 1, 3, 5, 6.
- б) 2, 4, 5, 6; г) 1, 4, 6;

8. Показник заломлення середовища дорівнює відношенню...

- а) частоти світла у вакуумі до частоти світла в даному середовищі;
- б) швидкості світла в даному середовищі до швидкості світла у вакуумі;
- в) частоти світла в даному середовищі до частоти світла у вакуумі;
- г) швидкості світла у вакуумі до швидкості світла в даному середовищі;
- д) довжини хвилі у вакуумі до довжини хвилі в даному середовищі.

9. Явище повного внутрішнього відбивання може відбуватися при...

- а) переході світла з середовища з меншою оптичною густиною в середовище з більшою оптичною густиною;
- б) переході світла з середовища з більшою оптичною густиною в середовище з меншою густиною;
- в) відбиванні світла від мутного середовища;
- г) поглинанні світла за рахунок дихроїзму;
- д) виконанні умови Брюстера  $tg\alpha = \frac{n_2}{n_1}$ .

10. Рефрактометр виміряє концентрацію розчинів на основі використання...

- а) залежності поглинання світла від концентрації;
- б) залежності інтенсивності розсіяного світла від розміру оптичних неоднорідностей середовища;
- в) оптичної активності розчинів;
- г) властивостей границі поділу двох середовищ;
- д) залежності показника заломлення розчинів від концентрації.

Таблиця відповідей на тестові завдання

№ тесту	а	б	в	г	д
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Для з'ясування мікроскопа роздільна здатність залежить від довжини хвилі світла, яке використовується для освітлення предмета. Чим менше довжина хвилі, тим краще роздільна здатність мікроскопа. Також впливають на роздільну здатність числова апертура об'єктива та окуляра. Чим більша числова апертура, тим краще роздільна здатність мікроскопа. Для збільшення роздільної здатності мікроскопа можна використовувати імерсійну рідину, яка зменшує довжину хвилі світла, яке використовується для освітлення предмета.

$$n = \frac{c}{v}$$

$$D = \frac{1}{\Delta x}$$

4.4. Установіть відповідності і заповніть таблиці логічних пар.

1.

1) головна оптична вісь оптичної системи	а) ... в якій центри всіх сферичних поверхонь лежать на одній прямій
2) фокусна відстань	б) ... від оптичного центру до фокуса
3) центрована оптична система	в) ... яка проходить через фокус перпендикулярно до головної оптичної вісі
	г) ... яка проходить через оптичні центри всіх сферичних поверхонь системи

1)	б
2)	а
3)	г

2. При визначенні величини роздільної здатності оптичного мікроскопу... вважають рівною(ним)...

1) довжину хвилі	а) 5,55 мкм
2) апертурний кут	б) 1,5
3) показник заломлення імерсійної рідини	в) $555 \cdot 10^{-9} \text{ м}$
	г) $10^{-2} \text{ рад}$
	д) 0,78 рад

1)	а
2)	г
3)	в

3.

Характеристика	Формула
1) збільшення мікроскопу	а) $\Gamma = \frac{Z_{\text{око}}}{Z_{\text{ок}}}$
2) збільшення об'єктиву	б) $\Gamma = \frac{S}{F_{\text{об}}}$
3) збільшення окуляру	в) $\Gamma = \frac{L \cdot S}{F_{\text{об}} \cdot F_{\text{ок}}}$
4) корисне збільшення	г) $\Gamma = \frac{F_{\text{об}}}{F_{\text{ок}}}$
	д) $\Gamma = \frac{L}{F_{\text{ок}}}$

1)	а
2)	б
3)	г
4)	д

4.

Характеристика	Формула
1) межа розрізнення сухого оптичного мікроскопу з освітленням паралельними променями	а) $2n \sin \theta$
2) межа розрізнення сухого оптичного мікроскопу з конденсорним освітленням	б) $\frac{\lambda}{2 n \sin \theta}$
3) межа розрізнення імерсійного оптичного мікроскопу з освітленням паралельними променями	в) $\frac{h}{2 m n \sin \theta}$
4) числова апертура	г) $\frac{\lambda}{n \sin \theta}$
5) межа розрізнення імерсійного оптичного мікроскопу з конденсорним освітленням	д) $\frac{\lambda}{2 \sin \theta}$
	е) $\frac{\lambda}{\sin \theta}$

1)	а
2)	б
3)	в
4)	г
5)	д

5.

Характеристика	Числове значення
1) межа розрізнення сухого оптичного мікроскопа з конденсорним освітленням	а) 700 ÷ 1400
2) межа розрізнення оптичного імерсійного мікроскопа з конденсорним освітленням	б) $0,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$
3) корисне збільшення сухого оптичного мікроскопа з конденсорним освітленням	в) $3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$
4) корисне збільшення оптичного імерсійного мікроскопа з конденсорним освітленням	г) 500 ÷ 1000
	д) $0,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$

1)	а
2)	б
3)	г
4)	д

6. Для градування шкали окуляра мікроскопа використовується співвідношення  $C_x = C \frac{k_1}{k_2}$ , де...

1) $C$	а) ціна поділки шкали об'єкта мікрометра
2) $k_1$	б) кількість поділок шкали окуляра
3) $k_2$	в) ціна поділки шкали об'єктива
4) $C_x$	г) кількість поділок шкали окуляра
	д) ціна поділки шкали окуляра

1)	<input type="checkbox"/>
2)	<input checked="" type="checkbox"/>
3)	<input type="checkbox"/>
4)	<input type="checkbox"/>

7.

Величина	Одиниці вимірювання
1) оптична сила	а) м
2) показник заломлення	б) безрозмірна величина
3) межа розрізнення	в) дптр
4) роздільна здатність	г) $\frac{1}{\text{м}^2}$
	д) $\frac{1}{\text{м}}$

1)	<input type="checkbox"/>
2)	<input checked="" type="checkbox"/>
3)	<input type="checkbox"/>
4)	<input type="checkbox"/>

8. Знайдіть вірні формулювання закону...

1) відбивання світла	а) падаючий промінь, заломлений промінь і перпендикуляр, побудований до границі поділу двох середовищ в точці падіння, лежать в одній площині; відношення сінуса кута падіння до сінуса кута заломлення є величина стала і дорівнює відносному показнику заломлення другого середовища відносно першого
----------------------	---

2) заломлення світла	б) падаючий промінь, який поширюється під кутом падіння більше граничного кута в інше середовище не заходить
3) повного внутрішнього відбивання	в) падаючий промінь, заломлений промінь і перпендикуляр, побудований до границі поділу двох середовищ в точці падіння, лежать в одній площині; відношення сінуса кута падіння до сінуса кута заломлення є величина стала і дорівнює відносному показнику заломлення першого середовища відносно другого
	г) падаючий промінь, відбитий промінь і перпендикуляр, побудований до границі поділу двох середовищ в точці падіння, лежать в одній площині; кут падіння дорівнює куту відбивання

1)	<input type="checkbox"/>
2)	<input checked="" type="checkbox"/>
3)	<input checked="" type="checkbox"/>

9.

Величина	Формула
1) кут падіння	а) $\frac{v_1}{v_2}$
2) абсолютний показник заломлення	б) $\frac{1}{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0}}$
3) відносний показник заломлення	в) $\arcsin \frac{n_2}{n_1}$
4) кут повного внутрішнього відбивання	г) $\frac{c}{v}$
	д) $\arcsin \frac{n_2}{\sin \beta \cdot n_1}$

1)	<input type="checkbox"/>
2)	<input type="checkbox"/>
3)	<input checked="" type="checkbox"/>
4)	<input checked="" type="checkbox"/>

Середовище	Співвідношення між показниками заломлення та кутами падіння і заломлення
1) перше середовище оптично більш густе ніж друге	а) $n_1 = n_2, \alpha = \beta$
2) перше середовище оптично менш густе ніж друге	б) $n_1 > n_2, \alpha < \beta$
3) перше і друге середовище мають однакову оптичну густину	в) $n_1 > n_2, \alpha > \beta$
	г) $n_1 < n_2, \alpha < \beta$
	д) $n_1 < n_2, \alpha > \beta$

1)	<input type="checkbox"/>
2)	<input type="checkbox"/>
3)	<input type="checkbox"/>

## 5. ОСНОВИ ПОЛЯРИМЕТРІЇ. ОПТИЧНИЙ КВАНТОВИЙ ГЕНЕРАТОР

### 5.1. Основні закони та формули

- Закон Брюстера
 
$$\operatorname{tg} \alpha_B = \frac{n_2}{n_1}$$
- Закон Малюса
 
$$I = I_0 \cos^2 \varphi$$
- Паралельні поляризатори
 
$$\varphi = 0, \quad I = I_0$$
- Схрещені поляризатори
 
$$\varphi = \frac{\pi}{2}, \quad I = 0$$
- Звичайний показник заломлення
 
$$n_o = \frac{c}{v_{\perp}} = \sqrt{\varepsilon_{\perp}}$$
- Незвичайний показник заломлення
 
$$n_e = \frac{c}{v} = \sqrt{\varepsilon}$$
- Кут повороту площини поляризації світла оптично активною речовиною
 
$$\varphi = \varphi_0 L$$
- Стала обертання
 
$$\varphi_0 = [\varphi_0] C$$
- Кут повороту площини поляризації світла оптично активним розчином
 
$$\varphi = [\varphi_0] CL$$
- Закон Біо
 
$$\varphi_0 \sim \frac{1}{\lambda^2}$$
- Енергія фотона
 
$$E = h\nu$$
- Імпульс фотона
 
$$p = \frac{h\nu}{c}$$
- Розподіл Больцмана для рівноважної заселеності енергетичних рівнів
 
$$N = N_0 e^{-\frac{\varepsilon_i}{kT}}$$
- Довжини хвиль He-Ne лазера
 
$$\lambda_1 = 632,8 \text{ нм.}$$

$$\lambda_2 = 1,15 \text{ мкм.}$$

$$\lambda_3 = 3,39 \text{ мкм.}$$