

Лекція №1

Основні поняття оптики

Світло. Спектр електромагнітних хвиль. Шкала електромагнітних хвиль. Предмет вивчення оптики. Геометрична, хвильова і квантова оптика. Поняття оптики: світловий промінь, електромагнітна хвиля, фотони. Поширення в просторі електромагнітної хвилі за теорією Максвелла. Корпускулярно-хвильовий дуалізм.

Оптика – це розділ фізики, в якому вивчаються властивості, фізична природа світла та його взаємодія з речовиною. Під **світлом** розуміють електромагнітні хвилі таких довжин, які сприймаються оком людини. Ці хвилі мають довжину від $3,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ до $7,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$. Такий діапазон хвиль називається **видимим** діапазоном. Поняття „світло” охоплює не тільки електромагнітні хвилі видимого діапазону, але й прилеглі до нього ділянки спектра інфрачервоного та ультрафіолетового випромінювань.

Електромагнітні хвилі класифікуються за довжиною (λ) або за частотою (ν) хвилі, які зв'язані між собою. Сукупність електромагнітних хвиль, що існують у природі, називається *спектром* електромагнітних хвиль. Спектр електромагнітних хвиль за збільшенням довжини хвилі включає наступні ділянки: гама-випромінювання, рентгенівське випромінювання, ультрафіолетове випромінювання, видимий діапазон, інфрачервоне випромінювання, радіохвилі. Різні ділянки спектра розрізняються за способом випромінювання та за способом прийому електромагнітних хвиль, тому між ділянками спектра відсутні чіткі межі, але кожна з них має свої особливості. Ілюстрацією спектра електромагнітних хвиль є *шкала електромагнітних хвиль* (рис. 1).

Оптика вивчає електромагнітні хвилі від м'якого рентгенівського випромінювання ($\lambda \sim 10^{-9} \text{ м}$) до радіохвиль міліметрової довжини ($\lambda \sim 10^{-4} \text{ м}$), рентгенівське та гама-випромінювання вивчаються в квантовій та ядерній фізиці, радіохвилі вивчаються в класичній електродинаміці.

Оптику поділяють на геометричну та фізичну. **Геометрична оптика** – це розділ оптики, в якому вивчаються закони поширення світла на основі уявлень про світлові промені. Під **світловим променем** розуміють не вузький світловий пучок, а геометричну лінію, що вказує напрям переносу енергії світлової хвилі. Звичайно, чим більш вузьким є світловий пучок, тим легше за його допомогою встановити напрям поширення світла, тобто визначити світловий промінь. Проте реально нескінченно вузький світловий пучок створити неможливо, бо цьому заважає дифракція світла. Отже, світловий промінь не є фізичним образом, а є геометричним поняттям, тобто математичною абстракцією. Геометрична оптика являє собою засіб розв'язання більш простих задач оптики, коли метод променів дає задовільні результати. Особливо це стосується побудови зображень в оптичних системах.

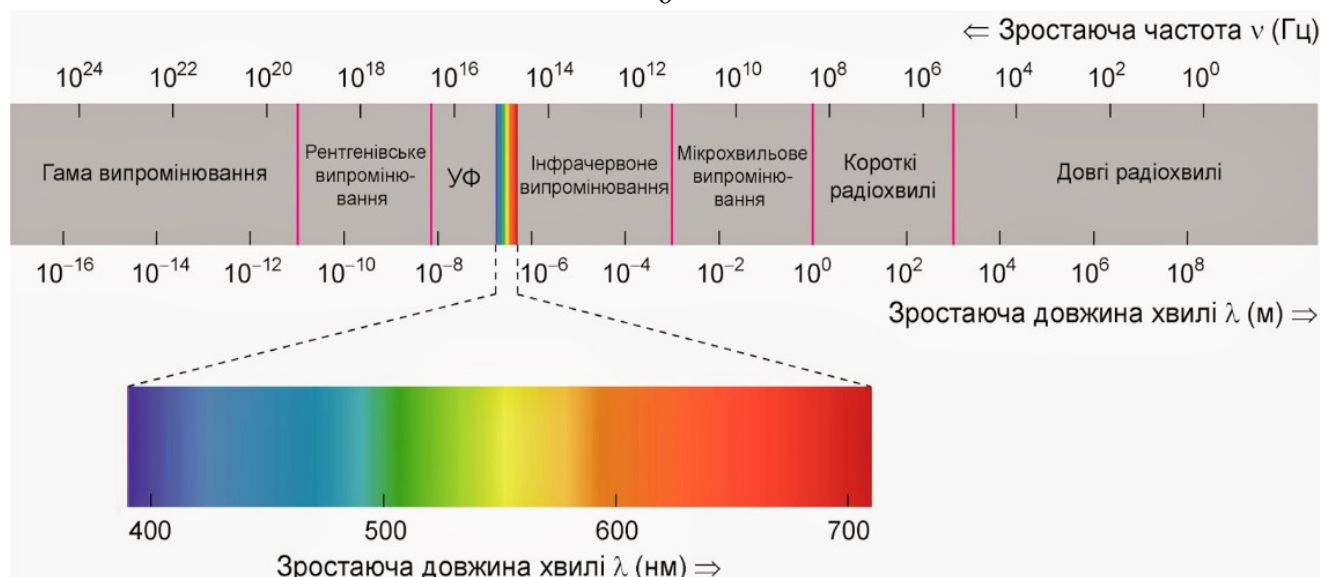


Рис. 1. Шкала електромагнітних хвиль

Фізична оптика поділяється на *хвильову* та *квантову*. У **хвильовій оптиці** розглядаються явища, в яких проявляється хвильова природа світла (*інтерференція, дифракція*). Основним поняттям хвильової оптики є поняття електромагнітної хвилі.

Виникнення електричного поля внаслідок зміни магнітного поля було відкрито Фарадеєм у 1831 р. Обернене явище – виникнення магнітного поля під час будь-якої зміни електричного поля було теоретично передбачене іншим видатним англійським фізиком Максвеллом. Розвиваючи уявлення Фарадея про взаємозв'язок електричних та магнітних явищ, Максвелл прийшов до відкриття електромагнітного поля. Одним з висновків теорії електромагнітного поля, розробленої Максвеллом у 1860-1865 роках, є те, що у вакуумі або в повітрі можуть поширюватися електромагнітні хвилі з швидкістю $c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$, яка ще називається *швидкістю світла*.

Через 23 роки (1888 р.) німецький фізик Герц експериментально дістав електромагнітні хвилі у вільному просторі, а російський фізик Попов використав ці хвилі для здійснення бездротового телеграфу.

Згідно теорії Максвелла, якщо в просторі змінюється електричне поле, то в цій області простору воно викликає змінне магнітне поле. Змінне магнітне поле, в свою чергу, породжує змінне електричне поле, причому це електричне поле повинно бути вихровим, тобто лінії напруженості електричного поля є замкненими і охоплюють лінії індукції магнітного поля. Сукупність змінних електричних та магнітних полів називається **електромагнітним полем**. Виникнувши в певному місці простору, змінне електромагнітне поле передається від однієї точки простору до іншої зі швидкістю світла (рис. 2). Процес поширення змінного електромагнітного поля в просторі називається **електромагнітною хвилею**.

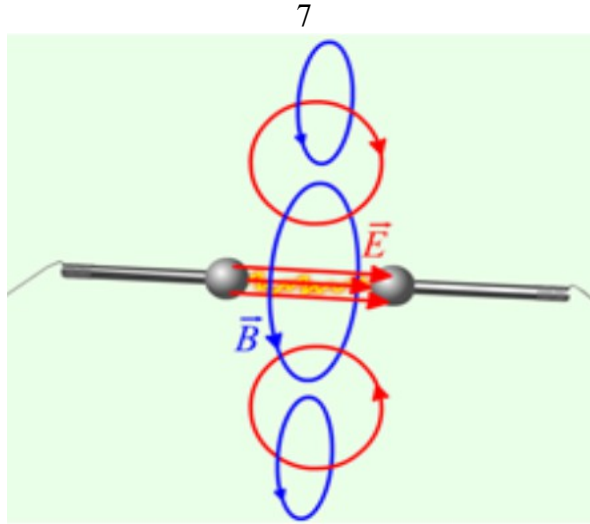


Рис. 2. Модель поширення електромагнітної хвилі в просторі

З теорії Максвелла випливає, що напрям вектора напруженості електричного поля $\vec{E}_0$, вектора індукції магнітного поля $\vec{B}_0$, а також напрям поширення електромагнітної хвилі OZ є взаємно перпендикулярними, тому електромагнітні хвилі називаються ще *поперечними* (рис. 3). Поперечність світлових хвиль на момент створення теорії електромагнітного поля була доведена експериментально. На рис. 3 λ – довжина хвилі, яка дорівнює найкоротшій відстані між точками простору, в яких вектори $\vec{E}_0$ і $\vec{B}_0$ коливаються в однакових фазах. Частотою (ν) електромагнітної хвилі називається кількість коливань векторів $\vec{E}_0$ або $\vec{B}_0$ за час, що дорівнює одній секунді. Для вакууму довжина хвилі і частота зв'язані співвідношенням:

$$\lambda = \frac{c}{\nu},$$

де $c = 3 \cdot 10^8 \frac{M}{c}$ – швидкість світла у вакуумі.

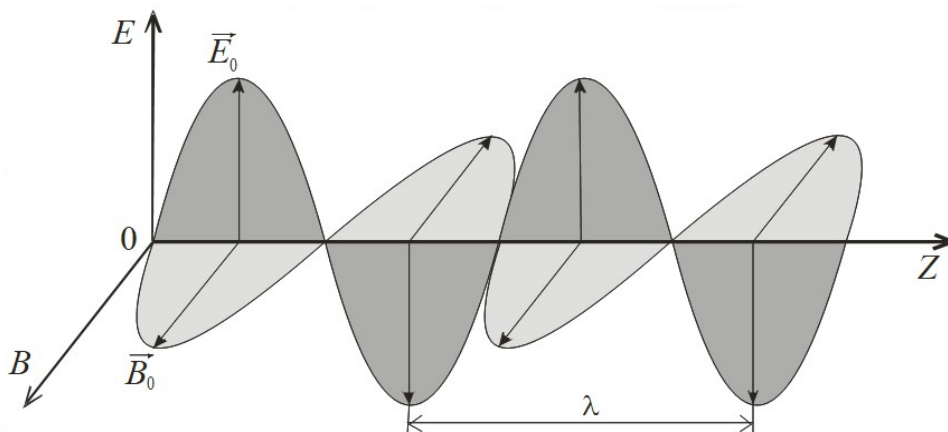


Рис. 3. Модель поперечної електромагнітної хвилі

У **квантовій оптиці** розглядаються явища, в яких вивчається квантова природа світла (квант – порція енергії). З точки зору квантової оптики світло є потоком фотонів з енергією $W = h\nu$, де $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – стала Планка, ν – частота світла, c – швидкість світла у вакуумі. До таких явищ відносять *теплове випромінювання* (електромагнітне випромінювання, що випускається речовиною і виникає за рахунок внутрішньої енергії), *фотоефект* тощо.

Основним поняттям квантової оптики є поняття фотона. **Фотон** – це окрема назва світлового кванта електромагнітного поля, тому що він під час випромінювання, поширення в просторі, а також в момент взаємодії з речовиною поводить себе так, як класична елементарна частинка. Але фотон – це особлива частинка, яка істотно відрізняється від таких частинок, як електрон, протон, нейтрон, що мають відмінну від нуля масу спокою. Фотон не має маси спокою й може існувати тільки в русі зі швидкістю світла. Він не має електричного заряду, магнітного моменту, його час життя є безмежним. Це свідчить про те, що фотон є стійкою частинкою, для якої самовільного розпаду не відбувається. Фотон достатньої енергії, проходячи повз важке атомне ядро, може перетворюватися на пару елементарних частинок електрон – позитрон. Відбувається також зворотній процес: електрон і позитрон можуть перетворюватися на гама-фотон.

Кожний з перелічених розділів оптики має своє застосування: геометрична оптика – це проєкційні прилади, мікроскопи, телескопи, окуляри; хвильова оптика – інтерферометри, дифракційні спектрографи, поляриметри; квантова оптика – пірометри, спектрографи, фотоелементи, лазери.

Хвильова і квантова точки зору на природу світла взаємно виключають одна одну, тому що багато ознак хвилі й частинки є протилежними. Фізична гіпотеза про те, що світло має одночасно хвильові та квантові (корпускулярні) властивості називається **корпускулярно-хвильовим дуалізмом**. Таким чином, під світлом слід розуміти потік електромагнітних хвиль і разом з тим потік фотонів.

У прояві суперечливих властивостей світла є закономірність: у довгохвильового випромінювання (наприклад, інфрачервоного) квантові властивості проявляються слабше, але більш сильнішими стають хвильові властивості. Із зменшенням довжини хвилі хвильові властивості послаблюються, але підсилюються квантові властивості. Єдність цих протилежностей виражає складність природи світла.

Запитання для самоконтролю

1. Що є предметом вивчення оптики?
2. Що являє собою світло?
3. Що називається видимим діапазоном?
4. Що називається спектром електромагнітних хвиль?
5. Які види випромінювання включає спектр електромагнітних хвиль?
6. Що називається шкалою електромагнітних хвиль?
7. Який діапазон довжин хвиль вивчає оптика?
8. Що є предметом вивчення геометричної оптики?
9. Що являє собою світловий промінь?
10. Що є предметом вивчення хвильової оптики?
11. Що являє собою електромагнітне поле?
12. Що являє собою електромагнітна хвиля?
13. Як пояснює теорія електромагнітного поля процес поширення світла в просторі?
14. Чому дорівнює швидкість світла у вакуумі?
15. Чому електромагнітна хвиля вважається поперечною?
16. Що називається довжиною хвилі?
17. Що називається частотою хвилі?
18. Як зв'язані між собою довжина і частота електромагнітної хвилі?
19. Що є предметом вивчення квантової оптики?
20. Що являє собою фотон?
21. У чому проявляється особливість фотона як елементарної частинки?
22. Як визначити енергію фотона?
23. Що являє собою корпускулярно-хвильовий дуалізм?
24. Як залежать хвильові та квантові властивості світла від довжини електромагнітної хвилі?

Лекція №2

Геометрична оптика

1. Закони геометричної оптики. Абсолютний та відносний показники заломлення. Хід світлових променів з менш оптично густого середовища в більш оптично густе й навпаки. Дисперсія світла Явище повного внутрішнього відбивання.
2. Центровані оптичні системи. Тонкі лінзи. Типи лінз. Фокусна відстань лінзи. Оптична сила лінзи. Побудова дійсних і уявних зображень за допомогою лінзи. Формула тонкої лінзи. Правила знаків.

1. Геометрична оптика заснована на деяких положеннях, які спочатку були встановлені як експериментальні закони. Розглянемо ці закони:

1) закон прямолінійного поширення світла – в однорідному прозорому середовищі світло поширюється прямолінійно;

2) закон незалежності поширення світлових променів – світлові промені, які поширюються в просторі, під час перетину не впливають один на одного;

3) закон оборотності світлових променів – якщо світловий промінь поширюється з точки 1 в точку 2, то в зворотному напрямі з точки 2 в точку 1 він поширюється по тому самому шляху;

4) закон відбивання світла – промінь падаючий, промінь відбитий і перпендикуляр, поставлений в точку падіння, лежать в одній площині; при цьому кут падіння дорівнює куту відбивання $i = i'$. Кутом падіння (i) називається кут між падаючим променем (SO) і перпендикуляром (NO) у точку падіння. Кут між відбитим променем (OA) і перпендикуляром (NO) у точку падіння називається кутом відбивання (i') (рис. 1).

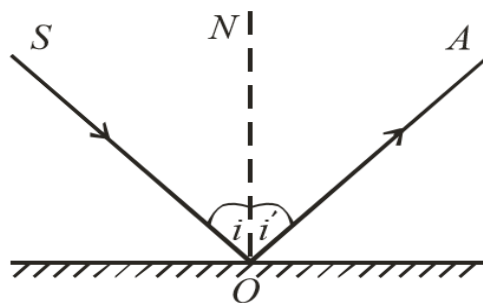


Рис. 1. Відбивання світлового променя від непрозорої поверхні

5) закон заломлення світла – промінь падаючий, промінь заломлений і перпендикуляр, поставлений в точку падіння, лежать в одній площині; при цьому для будь-якого кута падіння відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення є величина стала для двох певних середовищ і називається **відносним показником заломлення** :

Кутом заломлення (r) називається кут між заломленим променем (OB) і продовженням перпендикуляра (NO) в точку падіння (рис. 2).

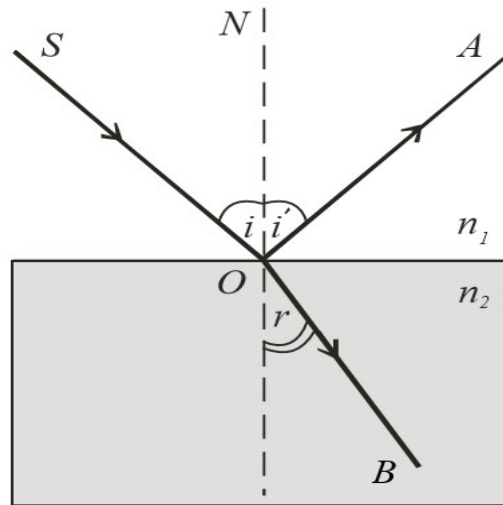


Рис. 2. Відбивання та заломлення світлового променя на межі поділу двох прозорих середовищ ($n_1 < n_2$)

Усі прозорі середовища характеризуються абсолютним показником заломлення. **Абсолютним показником заломлення** даного середовища називається відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення, коли падаючий промінь йде із вакууму або із повітря в дане середовище:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n.$$

Абсолютний показник заломлення вакууму дорівнює одиниці $n_{\text{вакуум}} = 1$. Показник заломлення повітря вважають таким, що дорівнює одиниці, хоч його більш точне значення при нормальних умовах $n_{\text{повітря}} = 1,000292$.

Позначимо абсолютний показник заломлення першого середовища n_1 , а другого – n_2 . Тоді співвідношення між абсолютними та відносними показниками заломлення мають вигляд:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}, \quad n_{12} = \frac{n_1}{n_2}, \quad n_{21} = \frac{1}{n_{12}}.$$

З теорії електромагнітного поля випливає, що абсолютний показник заломлення є числом, яке показує в скільки разів швидкість світла у вакуумі (c) більша за швидкість світла в даному середовищі (v):

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

Якщо $n_1 = \frac{c}{v_1}$, $n_2 = \frac{c}{v_2}$, то закон заломлення можна подати у вигляді:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}.$$

де v_1, v_2 – швидкості світла в даних середовищах.

Абсолютний показник заломлення залежить від довжини (λ) або від частоти (ν) світлової електромагнітної хвилі. Різним довжинам або частотам хвиль відповідають різні показники заломлення. Залежність показника заломлення від довжини (частоти) хвилі називається **дисперсією**. Розрізняють *нормальну* дисперсію, коли із збільшенням довжини хвилі показник заломлення зменшується і *аномальну* дисперсію, коли із збільшенням довжини хвилі показник заломлення збільшується.

Пояснюється явище дисперсії неоднаковим значенням фазової швидкості електромагнітних хвиль під час поширення в певному прозорому середовищі. У випадку нормальної дисперсії для електромагнітних хвиль червоного кольору фазова швидкість максимальна, а показник заломлення мінімальний. Для електромагнітних хвиль фіолетового кольору фазова швидкість мінімальна, а показник заломлення максимальний. У вакуумі швидкість електромагнітних хвиль завжди однакова для будь-яких довжин (частот) хвиль й дорівнює $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

Нормальну дисперсію можна спостерігати під час проходження світла крізь скляну тригранну призму (рис. 3). Вперше такий дослід був проведений Ньютоном у 1672 р.

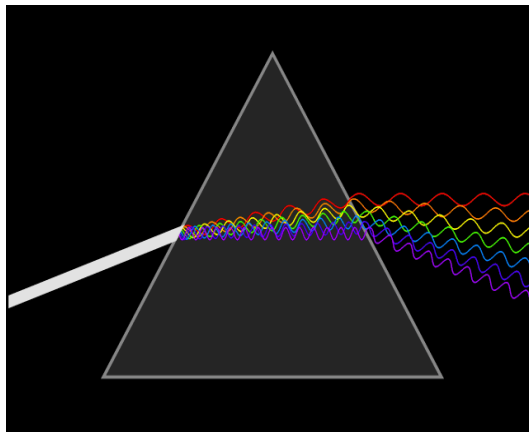


Рис. 3. Модель нормальної дисперсії

Цим дослідом Ньютон довів, що біле світло складається з світла різних довжин хвиль. Райдуга є прикладом прояву нормальної дисперсії в природних умовах.

Явище аномальної дисперсії, для якого фіолетові електромагнітні хвилі заломлюються менше ніж червоні, спостерігається під час поглинання енергії електромагнітних хвиль певної довжини речовиною. Практично вона має місце для всіх газів поблизу ліній поглинання (частоти коливань електронів, що входять до складу атомів або молекул газів).

Середовище, що характеризується більшим показником заломлення, називається **більш оптично густим**. Промінь світла, що проходить з менш

оптично густого середовища в більш оптично густе середовище, наближається до перпендикуляра, поставленого в точку падіння (рис. 4, а). За законом оборотності промінь, що йде з більш оптично густого середовища в менш оптично густе, відхиляється від перпендикуляра, поставленого в точку падіння (рис. 4, б).

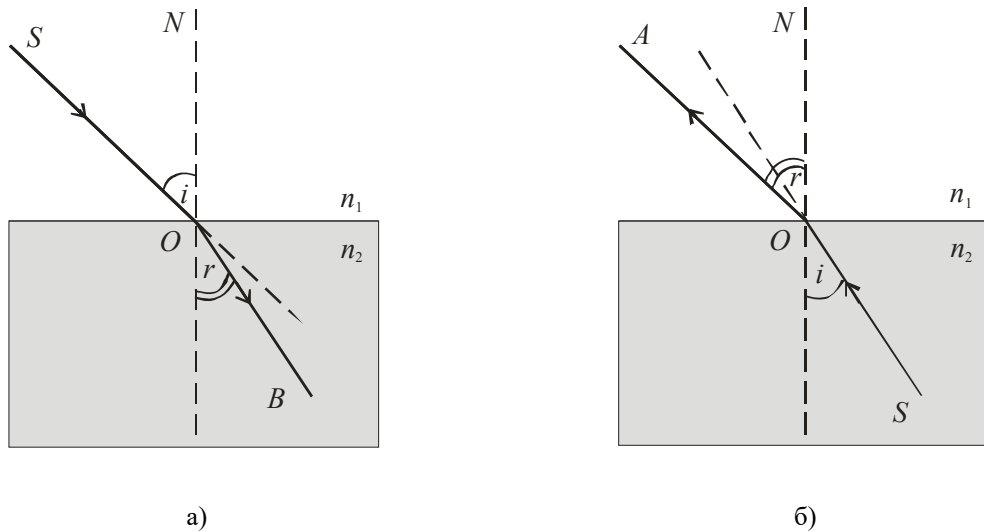


Рис. 4. Хід світлового променя через межу поділу двох прозорих середовищ ($n_1 < n_2$)

Коли світло поширюється з більш оптично густого середовища в менш оптично густе, то на межі їхнього поділу відбувається перерозподіл світлових потоків у залежності від кута падіння. Розглянемо окремі випадки (рис. 5).

Якщо кут падіння дорівнює нулю ($i = 0$), то світловий промінь (1) без заломлення проходить з одного середовища в інше. Для деякого кута падіння ($i < i_0$) світловий промінь на межі поділу двох середовищ поділяється на відбитий (2) та заломлений (3). Для будь-якої пари прозорих середовищ завжди існує певний кут падіння ($i = i_0$), при якому кут заломлення r досягає максимального значення $r_{max} = 90^\circ$ й заломлений промінь (4) ковзає по межі поділу двох середовищ. Такий кут падіння називається *граничним кутом повного внутрішнього відбивання*. Якщо кут падіння перевищуватиме граничний кут повного внутрішнього відбивання ($i > i_0$), то заломлення світлового променя не відбувається й відбитий промінь (5) повністю залишається в більш оптично густому середовищі. Таке явище називається **повним внутрішнім відбиванням**.

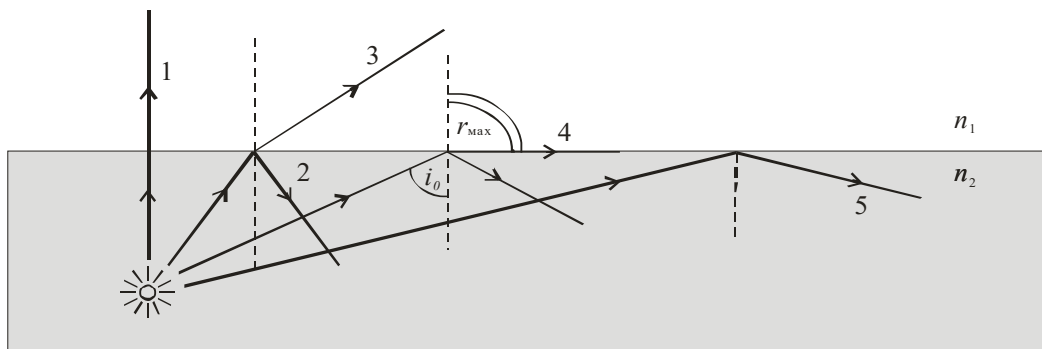


Рис. 5. Хід світлових променів з більш оптично густого середовища в менш оптично густе

Граничний кут повного внутрішнього відбивання для двох даних середовищ знаходиться за допомогою закону заломлення $\frac{\sin i_0}{\sin 90^\circ} = \frac{n_1}{n_2}$.

Враховуючи, що $\sin 90^\circ = 1$, маємо $\sin i_0 = \frac{n_1}{n_2}$. Звідки $i_0 = \arcsin \frac{n_1}{n_2}$.

2. Оптичною системою називається пристрій, який формує дійсне оптичне зображення об'єкта або перетворює світловий потік. Оптична система складається з лінз, призм, прозорих пластинок, дзеркал тощо, скомбінованих між собою так, щоб одержувати оптичне зображення об'єкта або перетворювати світловий потік. У загальному випадку оптичні системи мають дві й більше заломлювальних поверхонь. Практичного значення набули системи, для яких центри кривизни всіх заломлювальних поверхонь лежать на одній прямій. Оптичні системи, що мають таку властивість, називаються **центрованими**. Пряма лінія, на якій лежать центри кривизни заломлювальних поверхонь оптичної системи, називається **головною оптичною віссю** центрованої оптичної системи.

До найпростіших центрованих систем відноситься **лінза**. Вона складається з двох заломлювальних поверхонь, які обмежують прозору речовину, наприклад, скло. Одна із заломлювальних поверхонь обов'язково повинна бути сферичною, друга – або сферичною, або плоскою (рис. 6). У залежності від комбінації заломлювальних поверхонь лінзи можуть бути: *двоопуклі* (1), *плоско опуклі* (2), *вгнуто опуклі* (3), *двовгнуті* (4), *плоско вгнуті* (5), *опукло вгнуті* (6). При цьому лінзи 1-3 є **збірними**, лінзи 4-6 є **розсіюючими**, якщо матеріал, з якого вони виготовлені, буде більш оптично густим, ніж навколишнє середовище.

Розглянемо двоопуклу лінзу (рис. 7). Лінзу називають **тонкою**, якщо її товщина AB досить мала в порівнянні з радіусами кривизни R_1 і R_2 заломлювальних поверхонь. При цьому вважається, що вершини цих поверхонь A і B зливаються в точку O , яку називають **оптичним центром** лінзи.

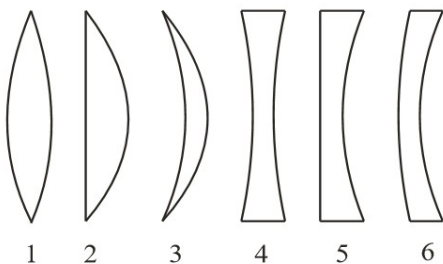


Рис. 6. Типи лінз

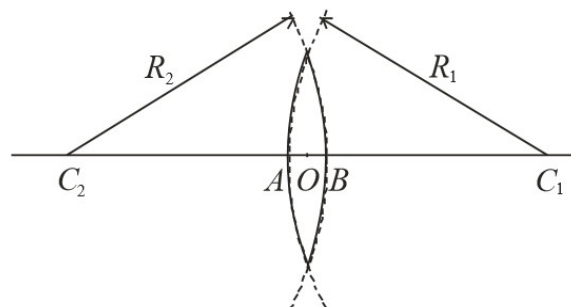


Рис. 7. Двоопукла лінза

Будь-яка пряма, що проходить через оптичний центр лінзи, називається **оптичною віссю** лінзи. Оптична вісь C_2OC_1 , яка проходить через центри кривизни C_1 і C_2 заломлювальних поверхонь та оптичний центр лінзи O , називається **головною оптичною віссю** лінзи.

Промені, які є паралельними до головної оптичної осі, заломлюються в

збірній лінзі й перетинаються в точці F , яка лежить на цієї осі й називається **фокусом** лінзи (рис. 8, а). Для розсіюючої лінзи фокусом є точка на головній оптичній осі, в якій перетинаються не самі промені, а їх уявні продовження в бік, що протилежний напрямку поширення світла (рис. 8, б). Відстань від фокуса лінзи до її оптичного центра називається **фокусною відстанню** (f). Площина, яка перпендикулярна до головної оптичної осі й проходить через фокус лінзи, називається **фокальною площиною**.

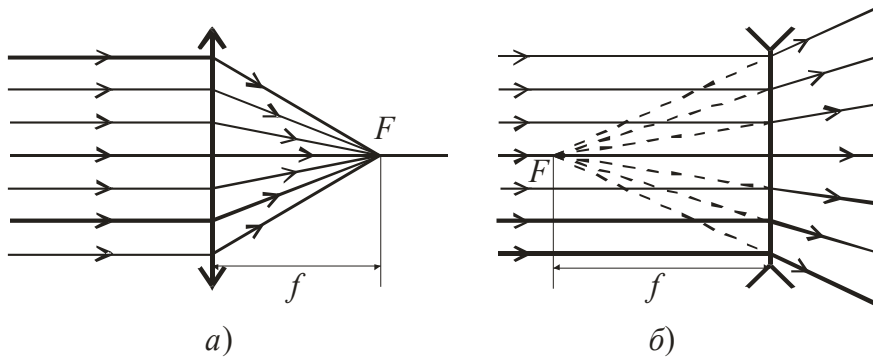


Рис. 8. Хід світлових променів через тонку лінзу

Фокусна відстань лінзи може бути розрахована за формулою:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right),$$

де n_2 – показник заломлення матеріалу, з якого виготовлена лінза; n_1 – показник заломлення середовища, що оточує лінзу; R_1 і R_2 – радіуси кривизни заломлювальних сферичних поверхонь.

Відповідно до типу лінз ця формула записується згідно **правила знаків**: якщо заломлювальна поверхня знаходиться *ліворуч* від центра кривизни, то радіус кривизни цієї поверхні є *додатним*; якщо заломлювальна поверхня знаходиться *праворуч* від центра кривизни, то радіус кривизни цієї поверхні є *від'ємним*.

Величина, яка є оберненою до фокусної відстані, називається **оптичною силою** лінзи:

$$D = \frac{1}{f}.$$

Оптична сила визначає збірну або розсіюючу здатність лінзи і вимірюється в *діоптріях* (дптр). Оптичну силу в 1 діоптрію має лінза з фокусною відстанню 1 м. Оптична сила збірних лінз є *додатною*, розсіюючих лінз – *від'ємною*. Оптична сила оптичної системи, яка складається з кількох лінз, дорівнює алгебраїчній сумі оптичних сил цих лінз. Наприклад, оптична система з двох збірних лінз має більшу оптичну силу й меншу фокусну відстань, ніж кожна з них окремо.

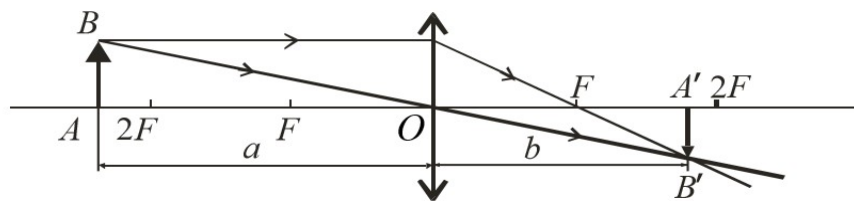
Оптичні зображення предметів, які можна дістати за допомогою лінз, поділяються на дійсні та уявні. *Дійсні зображення* створюються збіжними

пучками променів у точках, де вони перетинаються. Дійсні зображення можна спостерігати на екрані або фотоплівці, які знаходяться в точках перетину променів. Якщо промені, що виходять з оптичної системи, розходяться, то подумки їх можна продовжити в протилежному напрямку, де вони перетинаються. Точку перетину уявних продовжень цих променів називають уявним зображенням точки предмета. Сукупність таких точок складають *уявне зображення* предмета. Уявне зображення неможливо одержати на екрані або зафіксувати на фотоплівці, але інша оптична система (збірна лінза, око людини) здатна перетворити уявне зображення на дійсне.

Тонкі лінзи дають неспотворені зображення предметів, якщо падаюче світло є монохроматичним, а розміри предметів є малими в порівнянні з відстанями від предметів до лінз. Для побудови зображення предмета за допомогою тонкої лінзи достатньо використати два промені, якщо через його крайню точку проходить головна оптична вісь. Перший промінь йде від протилежної крайньої точки предмета паралельно головній оптичній осі й після заломлення в лінзі він перетинає фокус; другий промінь йде від тієї самої точки предмета через оптичний центр лінзи без зміни напрямку.

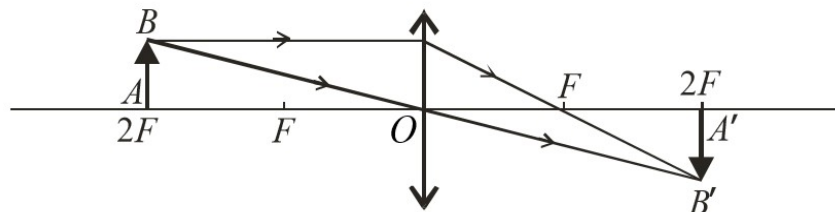
Розглянемо приклади.

1. Предмет AB знаходиться за подвійним фокусом збірної лінзи:



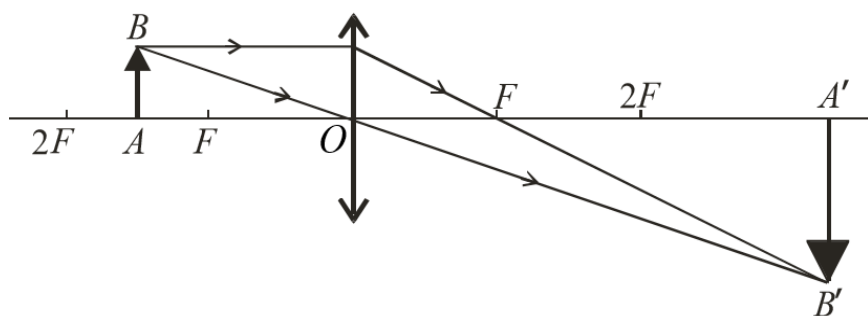
Зображення $A'B'$ є дійсним, перевернутим й зменшеним (a – відстань від предмета до лінзи, b – відстань від лінзи до зображення).

2. Предмет AB знаходиться на подвійному фокусі збірної лінзи:



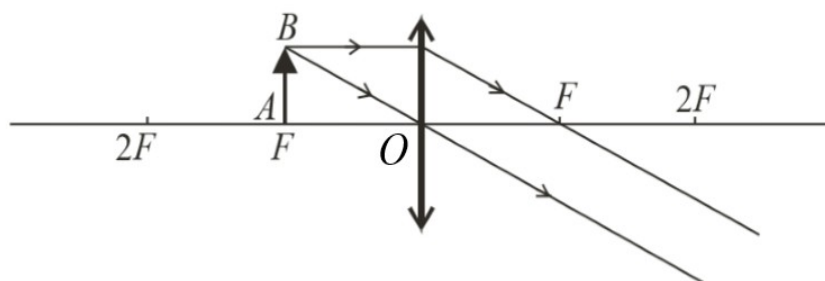
Зображення $A'B'$ є дійсним, перевернутим й таким самим за розміром, як предмет AB .

3. Предмет AB знаходиться між фокусом і подвійним фокусом збірної лінзи:



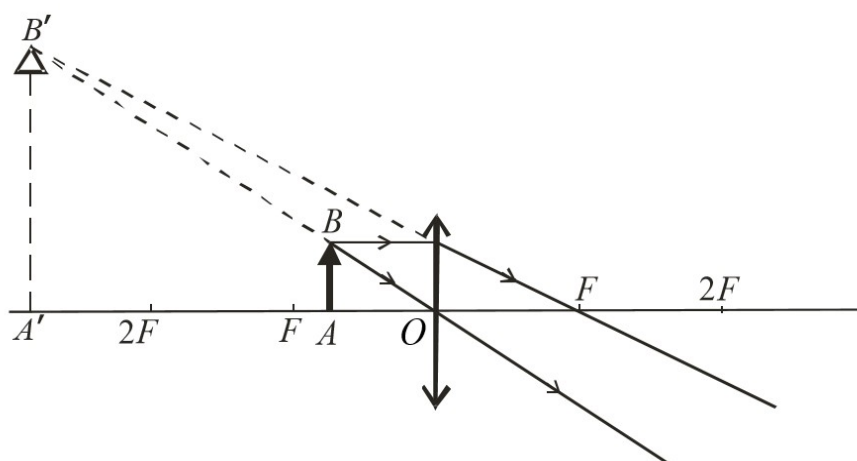
Зображення $A'B'$ є дійсним, перевернутим й збільшеним. Збільшення (зменшення) зображення предмету визначається відношенням лінійного розміру зображення до лінійного розміру предмета:

4. Предмет AB знаходиться у фокусі збірної лінзи:

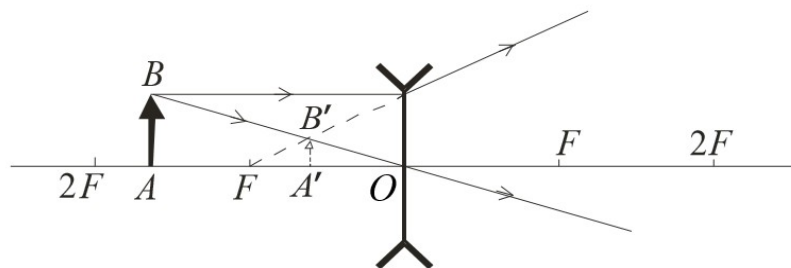


Зображення відсутнє, оскільки після лінзи промені є паралельними.

5. Предмет AB знаходиться між фокусом збірної лінзи та самою лінзою:
Зображення $A'B'$ є уявним, прямим й збільшеним.



6. Предмет AB знаходиться між фокусом та подвійним фокусом розсіюючої лінзи:



Для будь-якого положення предмета AB його зображення $A'B'$ завжди буде уявним, прямим й зменшеним.

Формулою тонкої лінзи називають рівняння вигляду:

$$\frac{1}{b} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f}.$$

Для кожного конкретного випадку побудови зображення предмета формулу тонкої лінзи треба записувати відповідно до **правила знаків**: відстань від оптичного центра лінзи за напрямком поширення променів є *додатною*; відстань від оптичного центра лінзи проти напрямку поширення променів є *від'ємною*. Для збірної лінзи фокусна відстань є додатною, для розсіюючої лінзи – від'ємною.

Для побудов 1, 2, 3 відстані $a < 0, b > 0$, тому формула тонкої лінзи набуває вигляду:

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{a} = \frac{1}{f}.$$

Для побудови 4 відстані $b = \infty, a < 0$, тому формула тонкої лінзи набуває вигляду:

$$\frac{1}{a} = \frac{1}{f}.$$

Для побудови 5 відстані $a < 0, b < 0$, тому формула тонкої лінзи набуває вигляду:

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{b} = \frac{1}{f}.$$

Для побудови 6 $a < 0, b < 0, f < 0$, тому формула тонкої лінзи набуває вигляду:

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{b} = -\frac{1}{f}.$$

Запитання для самоконтролю

1. Які закони лежать в основі геометричної оптики?
2. Сформулювати закон відбивання?
3. Сформулювати закон заломлення?
4. Що називають відносним показником заломлення?
5. Що називають абсолютним показником заломлення?
6. Яким є зв'язок між відносним та абсолютним показниками заломлення?
7. Що являє собою абсолютний показник заломлення з точки зору теорії електромагнітного поля?
8. Яке явище називають дисперсією?
9. Що називають нормальною дисперсією, аномальною дисперсією?
10. Яка причина дисперсії?
11. У яких умовах відбувається аномальна дисперсія?
12. Яке прозоре середовище називають більш оптично густим?
13. Що відбувається із світловим променем, коли він проходить з менш оптично густого середовища в більш оптично густе?
14. Що відбувається із світловим променем, коли він проходить з більш оптично густого середовища в менш оптично густе?
15. Пояснити явище повного внутрішнього відбивання.
16. Як знайти граничний кут повного внутрішнього відбивання ?
17. Що називають оптичною системою?
18. Які оптичні системи називають центрованими?
19. Що називають головною оптичною віссю оптичної системи?
20. Що являє собою лінза? Які існують типи лінз?
21. Яку лінзу називають тонкою?
22. Що називають фокусом лінзи?
23. Що таке фокусна відстань лінзи і за якою формулою її можна визначити?
24. Що називають оптичною силою лінзи? У яких одиницях вона вимірюється в системі СІ?
25. Як визначити оптичну силу оптичної системи, що являє собою комбінацію збірних і розсіюючих лінз?
26. Одержати побудовою зображення об'єкта, що знаходиться за подвійним фокусом тонкої збірної лінзи?
27. Одержати побудовою зображення об'єкта, що знаходиться на подвійному фокусі тонкої збірної лінзи?
28. Одержати побудовою зображення об'єкта, що знаходиться між фокусом і подвійним фокусом тонкої збірної лінзи?
29. Одержати побудовою зображення об'єкта, що знаходиться між фокусом і тонкою збірною лінзою?
30. Одержати побудовою зображення об'єкта, що знаходиться у фокусі тонкої розсіюючої лінзи?
31. Записати й пояснити формулу тонкої лінзи.
32. Сформулювати правила знаків для відстаней від лінзи до предмета й до його зображення; для радіусів кривизни заломлювальних поверхонь.