

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
Національний авіаційний університет

Фізика

Модуль **5**

ОПТИКА

*За загальною редакцією професора
А. П. Поліщука*

*Рекомендовано
Міністерством освіти і науки,
молоді та спорту України
як навчальний посібник для студентів
технічних спеціальностей
вищих навчальних закладів*

Київ 2012

УДК 537.1(075.8)
ББК В 33я7
П 509

*Розповсюджувати та тиражувати
без офіційного дозволу НАУ забороняється*

Рецензенти:

В. Я. Дегода — д-р фіз.-мат. наук, провідний наук. співроб.
(Київський Національний університет імені Тараса Шевченка)
О. В. Ковальчук — д-р фіз.-мат. наук, провідний наук. співроб.
(Інститут фізики НАН України)
В. П. Сергієнко — д-р пед. наук, проф.
(Національний педагогічний університет імені М. П. Драгоманова)

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки,
молоді та спорту України
(Лист № 1/11-5131 від 23.06.2011)*

Фізика. Модуль 5. Оптика: навч. посіб. / [А. П. Поліщук,
П 509 Ж. О. Рудницька, І. А. Сліпухіна, П. І. Чернега]; за заг. ред.
проф. А. П. Поліщука. — К. : НАУ, 2012. — 388 с.
ISBN 978-966-598-241-8
ISBN 978-966-598-747-5 (модуль 5)

Пропонований посібник є одним з найперших видань нового типу, підготовка яких стала необхідною у зв'язку з приєднанням України до Болонського процесу та переходом до кредитно-модульної системи навчання. Він продовжує започатковану та апробовану на кафедрі загальної фізики НАУ серію «Модульне навчання. Фізика», що складається з семи модулів.

У модулі 5 «Оптика» систематизовано подано програмний матеріал з основних положень і законів класичної оптики. Навчальні елементи цього модуля містять теоретичне ядро, задачі для аудиторної та індивідуальної роботи, а також лабораторний практикум. Запитання для самоперевірки допоможуть студентам в підготовці до рейтингового контролю.

Для студентів технічних спеціальностей вищих навчальних закладів.

УДК 537.1(075.8)
ББК В 33я7

ISBN 978-966-598-241-8
ISBN 978-966-598-747-5 (модуль 5)

© Поліщук А. П., Рудницька Ж. О.,
Сліпухіна І. А., Чернега П. І., 2012
© НАУ, 2012

ВСТУП

1. Загальні відомості про зміст

У цьому посібнику подано п'ятий модуль «Оптика» дисципліни «Фізика». Його мета — допомогти студентам оволодіти фундаментальними знаннями з основ класичної оптики.

У результаті вивчення матеріалу модуля студенти мають *знати* визначення таких понять, як світловий промінь, світловий потік, сила світла, освітленість, яскравість, світність, поляризація світла, когерентність, основні закономірності таких явищ, як інтерференція, дифракція, дисперсія.

Студенти повинні *вміти* використовувати методи експериментальних і теоретичних досліджень оптичних явищ, будувати графіки, визначати похибки фізичних вимірювань, використовувати здобуті знання для розв'язування практичних задач.

Необхідно *розуміти*, що в основу таких явищ, як інтерференція, дифракція, дисперсія покладено хвильову природу світла.

Зауважимо, що виклад ведеться з використанням диференціального та інтегрального числення, але на доступному для студента-першокурсника рівні.

2. Структура модуля М 5

Модуль «Оптика» складається з навчальних елементів (НЕ), а саме:

НЕ-1 — «Електромагнітні властивості світла. Геометрична оптика»;

НЕ-2 — «Інтерференція світла»;

НЕ-3 — «Дифракція світла»;

НЕ-4 — «Поляризація світла»;

НЕ-5 — «Дисперсія світла»;

НЕ-6 — «Лабораторні роботи»;

НЕ-7 — «Індивідуальні завдання».

Навчальні елементи НЕ-1 — НЕ-5 складаються з теоретичного ядра і прикладів розв'язування теоретичних задач.

У навчальному елементі НЕ-6 подано опис лабораторних робіт, які виконуються в цьому розділі фізики, та інструкції до їх виконання.

Навчальний елемент НЕ-7 містить задачі для виконання індивідуальних домашніх завдань.

Модуль «Оптика» необхідний і корисний для студентів усіх технічних спеціальностей. Поняття, що вивчаються в цьому модулі, є базовими для інших розділів фізики, зокрема вони використовуються і поглиблюються в курсах технічної електродинаміки, світлотехніки тощо.

3. Вступ до розділу «Оптика»

У розділі «Оптика» вивчаються світлові явища на основі класичних уявлень про світло, як електромагнітні хвилі, що поширюються у просторі.

У навчальному елементі НЕ-1 розглянуто закони геометричної оптики, виведені із властивостей електромагнітних хвиль, що поширюються в однорідному середовищі та на межі поділу різних середовищ. Також описані світлові потоки і пов'язані з ними фотометричні величини.

На основі принципу суперпозиції, справедливого для будь-яких хвильових процесів, у тому числі й електромагнітних хвиль, за відсутності нелінійних явищ, у навчальному елементі НЕ-2 вивчається інтерференція світла. Уводяться поняття часової і просторової когерентності, які дають можливість увести кількісні критерії спостереження інтерференційної картини. Розглядаються різні способи отримання інтерференційних картин, а також інтерферометри — прилади, в яких використовується інтерференція світла.

У навчальному елементі НЕ-3 досліджується явище дифракції світла. Використовується принцип Гюйгенса — Френеля, що значно спрощує математичні викладки. Виводиться кількісний критерій, що дозволяє оцінити, як поширюється світло за наявності перешкод, який вид дифракції спостерігатиметься і чи можна застосовувати закони геометричної оптики. Детально описано важливий спектральний прилад — дифракційну ґратку.

Явища, пов'язані із поляризацією світла, розглянуто в навчальному елементі НЕ-4.

Навчальний елемент НЕ-5, присвячений дисперсії світла як явища, зумовленого взаємодією світла із речовиною.

Навчальний елемент 1

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ СВІТЛА. ГЕОМЕТРИЧНА ОПТИКА

Оптика — вчення про світлові явища. Історично склалося, що оптика має два етапи розвитку. Один з них охоплює класичну оптику, фізичні принципи якої розроблені ще до 1900 р. Другий етап належить до ХХ ст., коли оптика разом з усією фізикою глибоко переглядалася на основі нових відкриттів, зокрема, відкриття фотона — кванта електромагнітної енергії. Ці відкриття докорінно змінили уявлення про світло, але вони не зробили теорії першого етапу непотрібними. Вони тільки виявили неповноту цих теорій та встановили межі їх застосування.

У посібнику розглянемо властивості світла згідно з класичною фізикою.

У модулі 4 «Коливання і хвилі» зазначалось, що Максвелл задовго до експериментального підтвердження дійшов висновку, що світло являє собою електромагнітні хвилі. Тому світлові явища потрібно описувати тими самими рівняннями, які виражають виникнення та поширення електромагнітних хвиль з урахуванням взаємодії їх з речовиною.

Згідно з електромагнітною теорією Максвелла для врахування впливу речовини на електромагнітні процеси слід взяти до уваги три характеристики речовини: діелектричну проникність ϵ , магнітну проникність μ та провідність σ . Провідність речовини σ означає поглинання хвиль, а діелектрична проникність ϵ і магнітна проникність μ — фазову швидкість поширення електромагнітних хвиль у конкретному середовищі

$$v = 1 / \sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0} .$$

Оскільки фазова швидкість світла у вакуумі $c = 1 / \sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ ($\epsilon = 1$, $\mu = 1$), то

$$v = c / \sqrt{\epsilon\mu}.$$

Фазова швидкість v поширення світла в речовині пов'язана з її абсолютним коефіцієнтом заломлення n співвідношенням

$$v = c / n,$$

де $n = \sqrt{\epsilon\mu}$. Для більшості прозорих речовин $\mu = 1$, тому $n = \sqrt{\epsilon}$.

Зауважимо, що величини ϵ , μ і σ залежать від частоти, тому наведені співвідношення виконуються, коли ϵ , μ і σ виміряні за великих значень частот, тобто частот видимого діапазону світла.

Середовище називають *оптично однорідним*, якщо його абсолютний показник заломлення однаковий в усіх точках цього середовища ($n = \text{const}$). Якщо ця умова не виконується, середовище називають *оптично неоднорідним*. Для характеристики напрямку поширення світлової хвилі в різних точках середовища користуються поняттям променя. *Променем* називають лінію, дотична в кожній точці якої збігається з напрямом вектора густини потоку енергії світлової хвилі в цій точці. Для плоскої або сферичної хвилі в оптично однорідному середовищі промені прямолінійні. Якщо середовище *ізотропне*, то промені перпендикулярні до хвильових поверхонь. Надалі будемо використовувати термін «промінь» (або «промінь світла»), маючи на увазі вузький пучок світла, що поширюється у певному напрямі.

Отже, в ізотропному однорідному середовищі ($n = \text{const}$) світлова хвиля поширюється прямолінійно (див. підрозд. 1.3). Зміна напрямку або швидкості хвилі відбувається в разі взаємодії з середовищем, що має інший показник заломлення.

1.1. Відбивання та заломлення плоскої електромагнітної хвилі на межі поділу двох діелектриків

Досліди свідчать, якщо світлова хвиля падає на межу поділу двох діелектричних середовищ, то вона розділяється на дві: одна відбивається від межі поділу, поширюючись у першому середовищі, а друга, заломлюючись, поширюється в другому середовищі.

1.1.1. Сталість частоти хвилі в разі відбивання та заломлення

Нехай на плоску нескінченну межу поділу двох однорідних та ізотропних діелектриків з абсолютними показниками заломлення n_1 і n_2 падає плоска електромагнітна хвиля (межа поділу має бути нескінченною, щоб відбивання від зовнішніх меж не спотворювало результат). Задамо напрям падаючої хвилі за допомогою хвильового вектора \vec{k} , відбитої хвилі — за допомогою \vec{k}' , а заломленої — \vec{k}'' . Поведінка хвилі на межі поділу, де немає вільних зарядів і струмів провідності, визначається граничними умовами

$$E_{\tau 1} = E_{\tau 2}, \quad H_{\tau 1} = H_{\tau 2}, \quad (1.1)$$

де $E_{\tau 1}$, $E_{\tau 2}$ і $H_{\tau 1}$, $H_{\tau 2}$ — тангенціальні складові напруженості електричного і магнітного полів у першому і другому середовищах (див. модуль 3 «Електрика і магнетизм», підрозд. 1.5 і 4.3).

Напруженість електричного поля падаючої хвилі, що поширюється у напрямі вектора \vec{k} , подамо у вигляді

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{r})}. \quad (1.2)$$

Згідно з принципом суперпозиції (див. п. 2.1) напруженість електричного поля в першому середовищі визначається напруженостями полів падаючої та відбитої хвиль:

$$\vec{E}_1 = \vec{E} + \vec{E}' = \vec{E}_0 e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{r})} + \vec{E}'_0 e^{i(\omega' t - \vec{k}'\vec{r})}, \quad (1.3)$$

а в другому середовищі тільки полем заломленої хвилі

$$\vec{E}_2 = \vec{E}''_0 e^{i(\omega'' t - \vec{k}''\vec{r})}. \quad (1.4)$$

Тут $E_0 = |E_0| e^{i\alpha}$, $E'_0 = |E'_0| e^{i\alpha'}$, $E''_0 = |E''_0| e^{i\alpha''}$ — комплексні амплітуди падаючої, відбитої та заломленої хвиль; α , α' , α'' — відповідно початкові фази цих хвиль; \vec{r} — радіус-вектор, початок якого довільний, а кінець розміщується в точці падіння хвилі на межі поділу діелектриків.

Згідно з виразами (1.1) тангенціальні складові на межі поділу мають бути однакові:

$$E_{0\tau} e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{r})} + E'_{0\tau} e^{i(\omega' t - \vec{k}'\vec{r})} = E''_{0\tau} e^{i(\omega'' t - \vec{k}''\vec{r})}. \quad (1.5)$$

Для виконання цієї рівності в довільний момент часу t і в довільній точці на межі поділу діелектриків необхідні й достатні такі умови:

$$\omega t = \omega' t = \omega'' t \Rightarrow \omega = \omega' = \omega'', \quad (1.6)$$

$$\vec{k}\vec{r} = \vec{k}'\vec{r} = \vec{k}''\vec{r} \Rightarrow k_r r = k'_r r = k''_r r \Rightarrow k_r = k'_r = k''_r, \quad (1.7)$$

де k_r , k'_r , k''_r — проекції хвильових векторів на вектор \vec{r} .

З виразу (1.6) випливає, що частота електромагнітної хвилі при відбиванні й заломленні не змінюється. Цей результат є природним, оскільки частоти коливань електронів речовини (електронних осциляторів), збуджених електричним полем світлової хвилі, збігаються з частотою вимушеної сили, яку створює падаюча хвиля (див. модуль 4 «Коливання і хвилі», підрозд. 1.1 і 2.3).

1.1.2. Співвідношення між кутами падіння, відбивання та заломлення

Оскільки початок радіуса-вектора \vec{r} довільний, то його (початок) можна вибрати в площині поділу діелектриків так, щоб вектор \vec{r} був перпендикулярним до вектора \vec{k} , тобто виконувалась умова $\vec{k}\vec{r} = 0$. Тоді з умови (1.7) випливає, що $\vec{k}'\vec{r} = \vec{k}''\vec{r} = 0$. Отже, вектори \vec{k}' і \vec{k}'' так само перпендикулярні до вектора \vec{r} , а це означає, що хвильові вектори падаючої (\vec{k}), відбитої (\vec{k}') та заломленої (\vec{k}'') хвиль лежать в одній площині, перпендикулярній до площини поділу діелектриків.

Площину, в якій лежать вектор \vec{k} і нормаль \vec{n} до площини поділу діелектриків у точці падіння променя, називають *площиною падіння* променя. Звісно, що в площині падіння лежать також вектори \vec{k}' і \vec{k}'' .

Знайдемо співвідношення між кутами падіння, відбивання та заломлення. Для цього виберемо початок прямокутної декартової системи координат у точці падіння хвилі, вісь Z спрямуємо в інше середовище. Вважатимемо, що в площині XZ лежать вектори \vec{k} , \vec{k}' і \vec{k}'' , а межа поділу діелектриків є площиною YX . Напрямок нор-

малі до межі поділу характеризуватимемо одиничним вектором \vec{n} ; одиничний вектор $\vec{\tau}$, що лежить у площині поділу діелектриків, спрямуємо вздовж осі X , уздовж цієї ж осі спрямуємо і вектор \vec{r} (рис. 1.1).

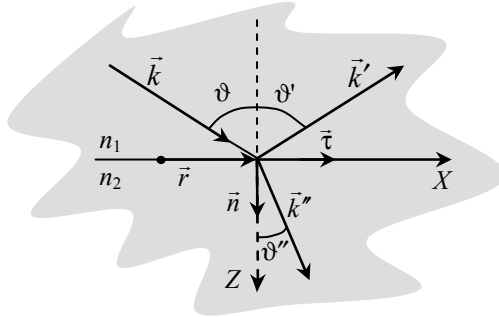


Рис. 1.1

Площина, в якій лежать вектор \vec{k} , нормаль \vec{n} до межі поділу в точці падіння променя, а також вектори \vec{k}' і \vec{k}'' , є площиною падіння променя. Кути ϑ , ϑ' і ϑ'' , що відраховуються від нормалі, називають відповідно *кутами падіння, відбивання та заломлення*.

За такого вибору системи координат проекції хвильових векторів k_r , k'_r , k''_r є проекціями на вісь X , тобто $k_r = k_x$, $k'_r = k'_x$, $k''_r = k''_x$. Як видно з рис. 1.1

$$\begin{aligned} k_x &= k \cos(90 - \vartheta) = k \sin \vartheta; \\ k'_x &= k' \cos(90 - \vartheta') = k' \sin \vartheta'; \\ k''_x &= k'' \cos(90 - \vartheta'') = k'' \sin \vartheta''. \end{aligned}$$

З урахуванням умови (1.7) з цих співвідношень випливає

$$k \sin \vartheta = k' \sin \vartheta' = k'' \sin \vartheta''. \quad (1.8)$$

Для першого середовища $k = k' = \omega / v_1$, а для другого $k'' = \omega / v_2$, тому

$$\frac{\omega}{v_1} \sin \vartheta = \frac{\omega}{v_1} \sin \vartheta' = \frac{\omega}{v_2} \sin \vartheta''. \quad (1.9)$$

Звідси дістаємо два співвідношення:

$$\sin \vartheta = \sin \vartheta' \Rightarrow \vartheta = \vartheta'; \quad (1.10)$$

$$\frac{\sin \vartheta}{\sin \vartheta''} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (1.11)$$

За означенням абсолютні показники заломлення першого та другого середовищ відносно вакууму дорівнюють: $n_1 = c/v_1$, $n_2 = c/v_2$, тому співвідношення (1.11) набирає вигляду

$$\frac{\sin \vartheta}{\sin \vartheta''} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{12}, \quad (1.12)$$

де n_{12} — відносний показник заломлення другого середовища відносно першого.

У природному світлі напрям вектора \vec{E} до площини падіння довільний. У розрахунках напрям вектора \vec{E} до площини падіння нічим не обмежувався, тому співвідношення (1.12) справедливі як для лінійно поляризованого світла з довільним напрямом вектора \vec{E} , так і природного світла в цілому.

Співвідношення (1.10) є законом відбивання світла: *відбитий промінь лежить в одній площині з падаючим променем і нормаллю, відновленою в точці падіння променя, при цьому кут падіння дорівнює куту відбивання.*

Співвідношення (1.12) є законом заломлення світла: *заломлений промінь лежить в одній площині з падаючим променем і нормаллю, відновленою в точці падіння променя; відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення дорівнює відносному показнику заломлення середовищ, який є сталою величиною для даних речовин за визначеної довжини хвилі світла.*

У загальному випадку показник заломлення середовища залежить від довжини хвилі, температури і тиску.

Із закону заломлення (1.12) випливає, що в разі поширення світла з менш оптично щільного середовища в більш оптично щільне середовище ($n_1 < n_2$) кут падіння більший від кута заломлення $\vartheta > \vartheta''$. Це означає, що пучку променів у вигляді конуса з кутом

ЗМІСТ

Вступ	3
-----------------	---

Навчальний елемент 1

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ СВІТЛА

ГЕОМЕТРИЧНА ОПТИКА (А. П. Поліщук, Ж. О. Рудницька). 5

1.1. Відбивання та заломлення плоскої електромагнітної хвилі на межі поділу двох діелектриків	6
1.2. Фотометричні величини та їхні одиниці	22
1.3. Геометрична (променева) оптика	33
1.4. Запитання та завдання для самоконтролю	69
1.5. Задачі (І. А. Сліпухіна)	70
1.5.1. Приклади розв'язування задач	70
1.5.2. Аудиторні задачі	75

Навчальний елемент 2

ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ СВІТЛА (А. П. Поліщук, П. І. Чернега) . . 79

2.1. Принцип суперпозиції	79
2.2. Поняття про когерентність. Інтерференція світлових хвиль	80
2.3. Когерентність	95
2.4. Методи створення когерентних пучків світла	104
2.5. Інтерферометри	121
2.6. Стоячі світлові хвилі	132
2.7. Запитання та завдання для самоконтролю	138
2.8. Задачі (І. А. Сліпухіна)	138
2.8.1. Приклади розв'язування задач	138
2.8.2. Аудиторні задачі	145

Навчальний елемент 3

ДИФРАКЦІЯ СВІТЛА (А. П. Поліщук, П. І. Чернега) 148

3.1. Принцип Гюйгенса – Френеля	148
3.2. Зони Френеля	150
3.3. Графічне обчислення результуючої амплітуди. Зональна пластинка	156

3.4. Дифракція Френеля від найпростіших перешкод	160
3.5. Дифракція Фраунгофера	171
3.6. Дифракційна ґратка	183
3.7. Дифракція на двовимірних і тривимірних ґратках. Дифракція рентгенівських променів	198
3.8. Запитання та завдання для самоконтролю	206
3.9. Задачі (І. А. Сліпухіна)	207
3.9.1. Приклади розв'язування задач	207
3.9.2. Аудиторні задачі	212
Навчальний елемент 4	
ПОЛЯРИЗАЦІЯ СВІТЛА (А. П. Поліщук)	214
4.1. Природне й поляризоване світло	214
4.2. Поляризація у разі відбивання й заломлення світла на межі двох діелектриків	221
4.3. Поляризація у разі подвійного променезаломлення	226
4.4. Запитання та завдання для самоконтролю	260
4.5. Задачі (І. А. Сліпухіна)	260
4.5.1. Приклади розв'язування задач	260
4.5.2. Аудиторні задачі	265
Навчальний елемент 5	
ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ З РЕЧОВИНОЮ (А. П. Поліщук)	267
5.1. Дисперсія світла	267
5.2. Групова швидкість	284
5.3. Поглинання (абсорбція) світла	288
5.4. Розсіювання світла	294
5.5. Запитання та завдання для самоконтролю	301
5.6. Задачі (І. А. Сліпухіна)	302
5.6.1. Приклади розв'язування задач	302
5.6.2. Аудиторні задачі	306
Навчальний елемент 6	
ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ (Ж. А. Рудницька)	307
Навчальний елемент 7	
ІНДИВІДУАЛЬНІ ДОМАШНІ ЗАВДАННЯ (І. А. Сліпухіна)	350
Список літератури	380
Навчальний елемент 8	
ТАБЛИЦІ ДОВІДОК	381

Навчальне видання

ПОЛІЩУК Аркадій Петрович
РУДНИЦЬКА Жанна Олександрівна
СЛІПУХІНА Ірина Андріївна
ЧЕРНЕГА Петро Іванович

ФІЗИКА

Модуль 5

ОПТИКА

Навчальний посібник

*За загальною редакцією
професора **А. П. Поліщука***

Редактор *Р. М. Шульженко*
Технічний редактор *А. І. Лавринович*
Художник обкладинки *О. О. Зайцева*
Коректор *О. О. Крусь*
Верстка *О. М. Іваненко*

Підп. до друку 11.04.12. Формат 60×84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 22,55. Обл.-вид. арк. 24,25.
Тираж 300 пр. Замовлення № 78-1.

Видавець і виготовлювач
Національний авіаційний університет
03680, Київ-58, просп. Космонавта Комарова, 1
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002
Тел. (044) 406-78-28. Тел./факс: (044) 406-71-43
E-mail: publish@nau.edu.ua