

Лабораторна робота №12 ВТРАТИ ВИПРОМІНЮВАННЯ В ОПТОВОЛОКНІ

Мета роботи: ознайомитися з будовою оптоволокон, засвоїти методи введення світла в волокно та визначення втрат світла у волокні, визначити ефективність введення світла лазерів і напівпровідникових світлодіодів у волокна.

Обладнання: оптоволокна, лазери та напівпровідникові діоди, приймач світла, вимірник електричного сигналу, допоміжне оптичне обладнання.

1. Будова оптоволокон

Вступна частина цієї лабораторної роботи – ознайомлювальна. Студенти повинні вивчити класифікацію, будову і призначення основних волоконних деталей. Це оптичні волокна, волоконно-оптичні кабелі, з'єднувачі та розгалужувачі та ін. Будову волокна представлено на рис. 1. Завдяки повному внутрішньому відбиванню на межі серцевина–оболонка світло не виходить назовні волокна, а поширюється в серцевині, проходячи від вхідного до вихідного торця волокна.

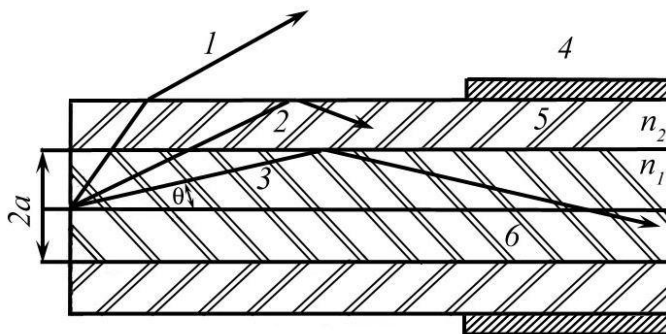


Рис. 1. Центральний поперечний переріз оптоволоконного кабелю: 1, 2, 3 – промені, що відповідають випромінювальним модам, оболонковим модам і скерованим модам волокна, 4 – захисне покриття волокна, 5 – оболонка волокна, 6 – серцевина волокна. n_1 і n_2 – показники заломлення серцевини та оболонки, відповідно, θ – кут поширення променя (світлової моди) до поперечної осі волокна.

Біля витоків волоконної оптики стояли такі науковці як Дж. Тендал, О. Белл, В. Вілер, Р. С. Капані, Р. Френч та інші. Основний параметр волокон – це т. зв. *V-параметр* (або нормований радіус його серцевини):

$$V = (2\pi/\lambda)a\sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (1)$$

де a – радіус серцевини волокна, λ – довжина світлової хвилі, n_1 і n_2 – показники заломлення серцевини і оболонки. Визначають ще *числову апертуру* волокна NA :

$$NA = \sin\theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (2)$$

де θ_a – це т. зв. *апертурний кут* волокна. Тобто, це такий максимальний кут, під яким світло ще може поширюватися у волокні, не покидаючи його крізь бокові поверхні волокна.

Якщо для *V-параметра* маємо $V \gg 10$, то явища в оптоволоконках описують за-

конами геометричної оптики. Такі (переважно «товсті») волокна називають *світловодами*. Типовими для них є значення a від 100 мкм до 5 мм і $(n_1 - n_2) = 0.05-0.3$.

Навпаки, при $V \leq 10$ і «тонких» оболонках для опису волокон використовують електромагнітну теорію. Для таких волокон замість «променя» використовують поняття «моди». Дуже спрощено, *світлова мода* у волокні – це електромагнітний аналог променів, які поширюються під деяким кутом до повздовжньої осі волокна та характеризуються деякою фазовою швидкістю поширення у волокні.

Як видно з рис. 1, не всі моди доходять від входу до виходу волокна. Це стається тільки із т. зв. *хвилеводними* (або *скерованими*) модами. Інші ж моди (*оболонкові* та *випромінювані моди*) поступово покидають волокно, не доходячи до його виходу, а тому й не формують корисного інформаційного сигналу. За кількістю скерованих мод волокна класифікують на *одномодові* (для них теорія дає умову $V < 2.41$) і *багатомодові* ($V \geq 2.41$). Для багатомодових волокон часто маємо $a = 20-100$ мкм і $(n_1 - n_2) = 0.005-0.1$. Тонкі одномодові волокна ($a = 5-20$ мкм) переважно використовують для передавання інформації на далекі відстані.

За законом зміни величини показника заломлення в поперечному перерізі волокна їх поділяють на *східчасті волокна* (таким є, наприклад, волокно, на рис. 1) і *градієнтні волокна*. У східчатих волокнах показник заломлення зазнає стрибка (від величини n_1 до величини n_2) на межі серцевина–оболонка. Для східчастих волокон кількість скерованих мод M можна визначити за приблизною формулою:

$$M \approx V^2/2. \quad (3)$$

Водночас, для градієнтних волокон закон зміни показника заломлення в поперечному перерізі є плавним. Серед цих волокон найпоширеніші т. зв. *селфоки*, у яких залежність показника заломлення від поперечних координат x і y квадратична. Оскільки лазерний промінь у селфоках періодично фокусується, то короткі відрізки селфоків часто використовують для введення випромінювання в інші волокна.

Нарешті, для передачі інформаційних сигналів багато тонких ($a \leq 10$ мкм) волокон збирають у т. зв. *оптичні кабелі*.

2. Введення світла у волокно

Введення світла у волокно – важлива задача в практичній роботі з волоконною лінією зв'язку. Введення світла у волокно характеризують *ефективністю*

$$\eta_0 = I/I_0, \quad (4)$$

де I_0 та I – відповідно інтенсивності світла на вході та виході волокна. На практиці ефективність введення частіше описують не формулою (4), а *втратами в децибелах* α_0 . Ці втрати подають виразом

$$\alpha_0 = -10 \lg \eta_0 = -10 \lg(I/I_0). \quad (5)$$

Зручність параметра α_0 полягає в тому, що загальні втрати у волоконно-оптичній мережі обчислюють не перемноженням (як у разі використання формули (4)), а простим і зручним *сумуванням* втрат на кожному послідовному елементі цієї мережі. Скажімо, якщо волоконна лінія зв'язку містить дві компоненти, втрати в яких дорів-

нують α_1 і α_2 , то загальні втрати лінії зв'язку складатимуть $\alpha_1 + \alpha_2$. За визначенням, втрати в 1 дБ відповідають інтенсивності на виході $I \approx 0.79I_0$, тобто $I/I_0 \approx 79\%$.

За теорією, для ефективного введення світла в багатомодове волокно треба: 1) зібрати падаючий пучок світла в межах торця серцевини; 2) забезпечити, щоб світло падало на вхідний торець волокна під кутами, меншими за максимальний (або апертурний) кут θ_a . Ефективність введення залежить від багатьох факторів: від площі випромінювальної ділянки джерела світла, кутової діаграми випромінювання цього джерела, діаметра серцевини a і числової апертури волокна NA , якості його торців, взаємного розміщення джерела світла і волокна та ін.

Кутова діаграма випромінювання джерела світла – це залежність інтенсивності світла цього джерела від кута θ , який відраховують од повздовжньої осі джерела (див. рис. 2). Кутові діаграми випромінювання напівпровідникових джерел (світлодіодів і лазерів) описують формулою:

$$I_0(\theta) = I_0(0)\cos^m \theta, \quad (6)$$

де θ – кут, що відраховується від нормалі до випромінювальної ділянки, m – деяке число ($m \geq 1$).

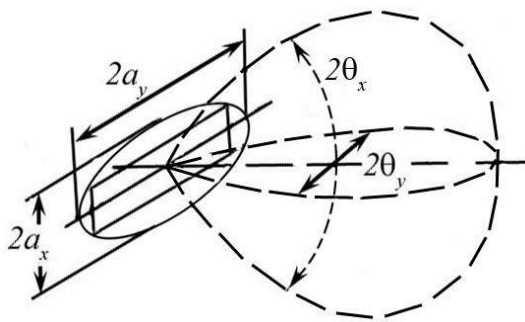


Рис. 2. Світловипромінювальна ділянка (з розмірами a_x і a_y) і кутова діаграма випромінювання (кути θ_x і θ_y) типового напівпровідникового джерела світла.

За умови розміщення напівпровідникового джерела світла і волокна впритул одне до одного *ефективність прямого введення* світла у волокно дорівнює

$$\eta_0 = \frac{\pi a^2}{8a_x a_y} (NA)^2 (m+1), \quad (7)$$

де a_x і a_y – розміри випромінювальної ділянки джерела світла вздовж поперечних осей x і y (вважається, що джерело світить у напрямку осі z), a – радіус серцевини волокна і NA – його числова апертура. Тут вважають, що величина $4a_x a_y$ більша за площу перерізу серцевини волокна. Якщо ж протилежну нерівність $\pi a^2 \geq 4a_x a_y$, то відношення цих площ у формулі (7) слід замінити на одиницю.

Із формули (7) видно, що для світлодіодів із великою випромінювальною ділянкою практична ефективність введення становить хіба кілька відсотків. До речі, використання додаткових ліз, на жаль, тільки зменшить, але не збільшить величину η_0 . Тому єдиний практичний вихід – це здійснити пряме введення, впритул наблизивши джерело і волокно.

Істотно вищою є ефективність введення для напівпровідникових лазерів із істотно меншою випромінювальною ділянкою та вузькою кутовою діаграмою випро-

мінювання. Для них ефективність уведення світла у волокно сягає 80–90%.

Нарешті, якщо джерелом світла є газовий лазер з дуже малою кутовою розбіжністю пучка, то для грамотного введення світла у волокно треба встановити лінзу (або систему кількох лінз) між лазером і волокном. Так можна досягти дуже високих значень ефективності введення світла у волокно ($\eta_0 \approx 96\%$). Підвищити останню величину дуже важко, оскільки вона визначається тільки втратами світла внаслідок його відбивання на вхідному торці багатомодового волокна.

3. Втрати світла при його поширенні у волокні

Втрати світла під час проходження ним волокна – це інша важлива характеристика волокна. Відносне загасання оптичного інформаційного сигналу можна визначати за таким диференціальним параметром:

$$\alpha = -\frac{1}{I} \frac{dI}{dz}, \quad (8)$$

де I – інтенсивність світла, z – координата вздовж осі волокна. Припустивши для простоти, що загасання не залежить від координати z і однакове в будь-якій точці волокна, на практиці вводять набагато зручніші *питомі втрати*:

$$\alpha_z = \frac{10}{L} \lg \frac{I_0}{I}, \quad (9)$$

де I_0 – це інтенсивність світла, введеного в оптоволокно з довжиною L , а I – інтенсивність світла на виході волокна. Розмірність питомих втрат у волокні – дБ/км.

Серед втрат світла у волокні розрізняють *втрати на поглинання і випромінювальні втрати*. *Втрати на поглинання*, у свою чергу, поділяють на втрати від власного та домішкового поглинання. Власне поглинання пов'язане з поглинанням основної речовини, з якої зроблено волокно. Типово це плавлений кварц (SiO_2) або скло. Домішкове ж поглинання спричинене неконтрольованими домішками у матеріалі волокна, особливо домішками металів, які повністю поглинають видиме та інфрачервоне світло.

Деяко складніші для розуміння *випромінювальні втрати*. Вони з'являються через те, що енергія світла передається від скерованих мод до випромінювальних або оболонкових мод, які покидають волокно за умови значних пройдених відстаней. У свою чергу, причинами такого шкідливого обміну енергією є різноманітні нерегулярності волокна (зміни його діаметра або згини волокна), а також стики (з'єднання) компонентів волоконно-оптичної лінії зв'язку.

Ще істотніша причина випромінювальних втрат – розсіяння світла на неоднорідностях густини та хімічного складу речовини волокна. Такі втрати пропорційні до λ^{-4} , де λ – довжина світлової хвилі (див. рис. 3). Нарешті, на вихідному торці волокна маємо додаткові втрати світла внаслідок його відбивання від цього торця.

Зазначимо, що волоконна інформатика пройшла непростий шлях від перших світловодів із жахливо високими питомими втратами на зразок $\alpha_z \sim 1000$ дБ/км до високоякісних сучасних кабелів зв'язку, питомі втрати в яких близькі до з теоретично мінімального значення $\alpha_z \sim 0.15$ дБ/км. Крім того, вирішення проблеми втрат світла було однією з причин того, чому інженери використовують у волоконних лініях

зв'язку не «зручне» видиме світло, а невидиме для людського ока (інфрачервоне) світло з довжинами хвиль 1.3 мкм або 1.55 мкм.

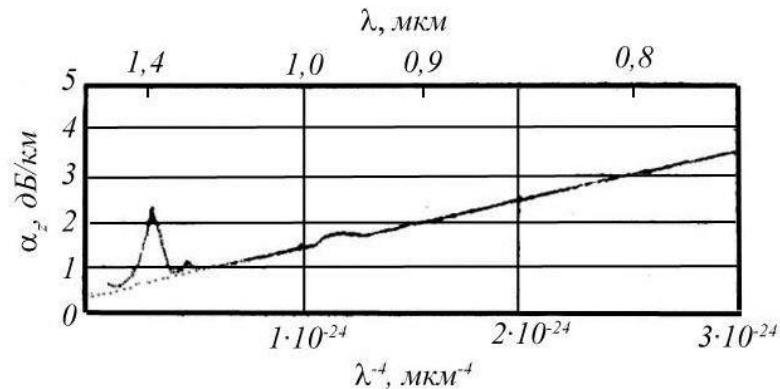


Рис. 3. Типова залежність питомих втрат α_z світла у волокні від довжини хвилі світла λ для високоякісного оптичного волокна. Втрати світла поступово зростають зі зменшенням довжини хвилі. Тому втрати у видимій області ($\lambda < 0.8$ мкм) помітно вищі, аніж втрати в близькій інфрачервоній області (наприклад, при $\lambda \approx 1.3$ мкм і $\lambda \approx 1.55$ мкм). Водночас, втрати на проміжних довжинах хвиль ($\lambda \approx 1.4$ мкм) теж порівняно високі. Отже, маємо т. зв. «вікна прозорості» волокна при 1.3 і 1.55 мкм.

Робоча формула для визначення питомих втрат світла в оптоволокні така:

$$\alpha_z = \frac{10}{L_2 - L_1} \lg \frac{I_1}{I_2}, \quad (10)$$

де L_1 і L_2 – довжини коротшого та довшого відрізків волокна, I_1 і I_2 – відповідні інтенсивності світла на їхньому виході.

4. Експериментальна схема, вимірювання та обчислення

Практичні завдання для студентів у цій лабораторній роботі полягають у введенні випромінювання газового He-Ne-лазера та напівпровідникового світлодіода у волокно (в т. ч. за допомогою фокусувальної лінзи) та визначенні ефективності введення. Для максимальної ефективності лінзового введення діаметр світлового пучка в фокусі повинен бути не більшим за діаметр серцевини, а максимальний кут введення – не перевищувати апертуру волокна (рис. 4).

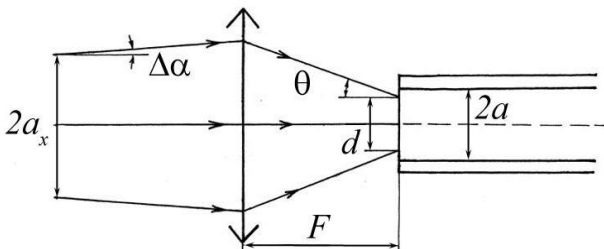


Рис. 4. До вибору оптимальної фокусної відстані лінзи для введення лазерного світла у волокно. Кут розбіжності лазерного світла $\Delta\alpha$ на рисунку для наочності перебільшено.

Ці дві умови визначають оптимальну фокусну віддаль лінзи. Діаметр пучка в фокальній площині лінзи залежить від розбіжності лазерного променя $\Delta\alpha$ і фокусної віддалі лінзи F . Тому перша умова приводить до нерівності

$$d = F\Delta\alpha \leq 2a, \text{ або } F \leq 2a/\Delta\alpha. \quad (9)$$

Із рис. 4 видно, що кут введення світла θ дорівнює

$$\theta = \arctg(a_x/F), \quad (10)$$

де $2a_x$ – діаметр лазерного пучка. Згідно з другою умовою, цей кут не повинен перевищувати апертурний кут θ_a , який визначається умовою (2): $NA = \sin\theta_a$. Звідси

$$\varphi \leq \arcsin NA, \text{ або } F \geq a_x/\text{tg}(\arcsin NA). \quad (11)$$

Формули (9) і (11) визначають оптимальний інтервал для фокусної відстані лінзи:

$$a_x/\text{tg}(\arcsin NA) \leq F \leq 2a/\Delta\alpha. \quad (12)$$

Експериментальна схема для дослідження ефективності введення світла в волокна показана на рис. 5. Лінза 6 на рис. 5 не потрібна, якщо вихідний торець волокна 5 поміщено впритул до фотоприймача 7. Деякі параметри випромінювання джерел світла, використаних у роботі, наведено в Таблиці.

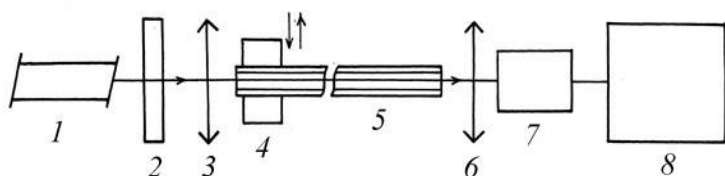


Рис. 5. Схема визначення ефективності введення світла у волокно: 1 – джерело світла, 2 – світлофільтр або поляризатор (поляроїд), 3, 6 – лінзи, 4 – координатний столик, 5 – волокно, 7 – приймач світла, 8 – пристрій реєстрації.

Інтенсивності I та I_0 можуть істотно відрізнитися за величиною. Щоб вони обидві втрапили в лінійний діапазон світлової характеристики фотоприймача, лазерний пучок послаблюють за допомогою фільтра (або поляроїда) 2. Зазначимо, що лазерний промінь повинен бути строго паралельним до повздовжньої осі волокна.

Під час розрахунків η_0 або α_0 за формулами (1) або (2) можна знехтувати додатковим зменшенням I через питомі втрати світла в короткому волокні, які не пов'язані з уведенням світла. Справді, у високоякісних сучасних багатомодових волокнах типові питомі втрати складають 5 дБ/км. Тоді на довжині волокна порядку 1 м втрати становлять лише $5 \cdot 10^{-3}$ дБ, тобто інтенсивність на виході волокна лише на 0.1% менша від початкової інтенсивності I_0 на вході волокна. Такі малі зміни інтенсивності хтосна чи реально визначити на апаратурі, використаній у роботі.

Таблиця. Характеристики деяких малопотужних джерел світла.

Марка джерела	Тип джерела	Вихідна потужність, мВт	Діаметр пучка, мм	Кутова розбіжність, рад	Довжина хвилі, нм
ЛГН-105	He-Ne-лазер	2	2.5	$3 \cdot 10^{-3}$	632.8
ЛГН-207Б	He-Ne-лазер	1	0.7	$2 \cdot 10^{-3}$	632.8
АЛ, ЗЛ	напівпровідниковий світлодіод, GaP	0.5 *	$5 \cdot 10^{-3}$ –0.1 **	~ 0.3	690–710

Примітки: * сила світла, мкд; ** розміри випромінювальної ділянки, мм)

Зазначимо, що в цій лабораторній роботі студентам не пропонується визначати питомі втрати світла α_z у волокні. Ця задача технічно надто складана, оскільки потребує вимірювання та порівняння інтенсивностей світла на виході волокон різних довжин (див. формулу (10)). Проте тоді важко забезпечити ідентичні умови введення світла в ці два волокна. Тобто, інтенсивності на їхньому виході будуть різними не тільки через різні довжини цих волокон, але також через різні ефективності введення світла. Звісно, можна вирішити цю проблему, уводячи світло в єдине волокно з деякою довжиною L_1 , а потім виміряти інтенсивність на його виході та порівняти її з інтенсивністю світла на виході коротшого волокна з довжиною L_2 , просто обрізавши перше волокно з кінця. Але такий метод має інший недолік – він потребує значних витрат волокон.

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. За формулами (1) і (2) розрахувати V-параметр одномодового та багатомодового волокон. Для багатомодового волокна взяти значення $a = 30$ мкм і $NA = 0.2$, а для одномодового – $a = 10$ мкм і $NA = 0.01$.

2. За формулою (3) розрахувати кількість мод M в одномодовому та багатомодовому волокнах. Для цих волокон взяти значення a і NA , наведені вище.

3. За формулами (4) і (5) побудувати графік залежності $\alpha_0(I/I_0)$ втрат у децибелах α_0 від відносної величини оптичного сигналу I/I_0 . Для цього використати програмний пакет Origin або написати програму, наприклад, на Python.

4. Розрахувати величини оптимальних фокусних лінз для введення світла в багатомодове та одномодове волокна, використовуючи формулу (12) і дані Таблиці. Для цих волокон взяти значення a і NA , наведені вище.

5. Зібрати схему рис. 5. Як джерело світла використати газовий лазер. Затиснути вхідний торець багатомодового волокна на координатному столику, а вихідний торець волокна помістити впритул до приймача світла. Переміщуючи столик, виставити центр торця в фокусі лінзи і виміряти інтенсивність світла I на виході волокна, яка відповідатиме максимальним показам пристрою реєстрації. Виміряти інтенсивність світла лазера I_0 , скерувавши світло лазера безпосередньо на приймач (можливо, з попереднім послабленням – див. зауваження в попередньому параграфі). За формулами (1) і (2) розрахувати ефективність введення η_0 і втрати α_0 .

ПРИМІТКА. Вимірювання проводити в умовах затемнення оптичної лави, аби на фотоприймач не потрапляло денне світло або світло від сторонніх джерел.

6. Повторити всі вимірювання та обчислення для одномодового волокна.

7. Виконати пряме введення випромінювання світлодіода в багатомодове волокно. Знайти ефективність введення світла.

8. За формулою (7) розрахувати ефективність прямого введення випромінювання напівпровідникового світлодіода в багатомодове волокно. Порівняти її з експериментальною величиною.

Список літератури

1. Корчак Ю., Фургала Ю., Рихлюк С. Оптоелектронна інформатика. – Том I. Основні принципи та прилади. – Львів : Видавн. ЛНУ імені Івана Франка, 2016. – 312 с.
2. Черняков Э. И., Мачехин Ю. П., Кухтин М. П. Оптоелектроніка. Частина 1. Фізичні основи. – Харків : ХНУРЕ, 2015. – 396 с.
3. Оптоелектроніка. Частина 2. Прилади та пристрої / Э. И. Черняков, Ю. П. Мачехин, М. П. Кухтин, С. М. Кухтин. – Харків : ХНУРЕ, 2016. – 292 с.
4. Чадюк В. О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Передавання, перетворення та приймання оптичного випромінювання. Книги 1 і 2. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. – 398 с.
5. Григорук В. І., Коротков П. А. Сучасний термінологічний словник з оптоелектроніки. – Київ: Либідь, 2011. – 400 с.
6. Гридин В. Н., Дмитриев В. П., Дмитриев М. В. Оптоэлектронные приборы, системы и сети. – Москва : Наука, 2007. – 226 с.
7. Игнатов А. Н. Оптоэлектронные приборы и устройства – Москва : Экотрендз, 2006. – 272 с.
8. Основы оптоэлектроники / Я. Суэмацу, С. Катаока, К. Кисино, Я. Кокубун, Т. Судзуки, О. Исии, С. Ёнэдзава. – Москва : Мир, 1988. – 289 с.
9. Носов Ю. Р. Оптоэлектроника. – Москва : Радио и связь, 1989. – 360 с.
10. Рахимов Н. Р., Ушаков О. К. Оптоэлектроника: лабораторный практикум. Новосибирск : СГГА, 2009. – 92 с.
11. Общая электротехника с основами электроники / Гаврилюк В. А., Гершунский Б. С., Ковальчук А. В., Куницкий Ю. А., Шаповаленко А. Г. – Київ : Вища школа, 1980. – 480 с.
12. Експериментальна оптика / О. С. Кушнір, Ю. М. Корчак, Л. П. Луців-Шумський, С. В. Рихлюк. – Львів : Видавн. центр ЛНУ імені Івана Франка, 2009. – С. 104–113.
13. Андреева О. В. Прикладная голография. – Санкт-Петербург : СПбГУИТМО, 2008. – 184 с.
14. Волоконная оптика и приборостроение / М. М. Бутусов, С. Л. Галкин, С. П. Орбинский, Б. П. Пал. – Ленинград : Машиностроение, 1987. – 328 с.
15. Андрушко Л. М., Гроднев И. И., Панфилов И. П. Волоконно-оптические линии связи. – Москва : Радио и связь, 1984. – 137 с.
16. Гауэр Дж. Оптические системы связи. – Москва : Радио и связь, 1989. – 502 с.
17. Верник С. М., Гитин В. Я., Иванов В. С. Оптические кабели связи. – Москва : Радио и связь, 1988. – 144 с.

18. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Кюма, К. Хататэ. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
19. Бушок Г. Ф. Курс фізики. Кн. 3: Оптика. Фізика атома та атомного ядра. – Київ : Вища школа. – 2003. – 311 с.
20. Построение идеальной оптики в Zemax [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/303714/>
21. Енциклопедія сучасної України. Голографія [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://esu.com.ua/search_articles.php?id=25436
22. Agrawal G. P. Fiber Optic Communication Systems. – New York : John Wiley & Sons Inc., 2010. – 630 p.
23. Handbook of Optoelectronics: Concepts, Devices, and Techniques. Vol. 1 / Ed. by J. P. Dakin, R. Brown. – Boca Raton : CRC Press, 2018. – 858 p.
24. Ghatak A., Thyagarajan K. Optical Electronics. – New Delhi : Cambridge University Press, 1994. – 633 p.
25. Grundmann M. Nano-Optoelectronics – Concepts, Physics and Devices. Berlin : Springer, 2002. – 458 p.
26. Kasap S. O. Optoelectronics and Photonics – Principles and Practices. – Upper Saddle River : Pearson Education, Inc., 2013. – 544 p.
27. Maini A. K. Lasers and Optoelectronics: Fundamentals, Devices and Applications. – Berlin : Wiley. – 2013. – 615 p.
28. Rosencher E., Vinter B. Optoelectronics. – Cambridge : Cambridge University Press, 2002. – 744 p.
29. Ryer A. Light Measurement Handbook. – Newburyport, Massachusetts : International Light, Inc., 1998. – 64 p.
30. Weber M. J. Handbook of lasers. – Berlin : Springer Science & Business Media, Inc., 2005. – 795 p.
31. Yariv A. Optical Electronics. – New York : Holt, Rinehart and Winston, 1991. – 552 p.

Іменний покажчик

- Аббе Е. К. 9
Айнштайн А. 17
Андерсон Дж. 12
Араго Д. 9
Бабіне Ж. 9
Басов М. 17
Белл О. 135
Бентон С. 109
Блумберген Н. 17
Бойль Р. 8
Больцман Л. 18, 80, 82, 90
Брегг В. Г. 9
Брегг В. Л. 9
Брюстер Д. 22, 38, 39
Бугер П. 17, 127
Віллар П. 126
Вілер В. 135
Він В. 83
Вуд Р. 12
Вульф Г. В. 9
Гейгер Г. В. 128–132
Грімальді Ф. М. 9
Габор Д. 108–110
Гаус К. Ф. 32, 33, 116, 117, 120, 125
Гордон Дж. 17
Гюйгенс Х. 9, 10, 13
Девісон К. 9
Денисюк Ю. 109, 110
Джаван А. 17
Джермер Л. 9
Захар'євський О. 8
Зоммерфельд А. 9
Капані Н. С. 135
Кірхгоф Г. Р. 9
Комптон А. Х. 127, 128
Крос Л. 109
Лауе М. 9
Лейт Е. 109, 110
Малюс Е. Л. 36, 39, 40, 45
Мейман Т. 17
Мюллер В. 128, 129, 131, 132
Ньютон І. 8
Перо А. 20
Планк М. 17
Прохоров О. 17
Пуасон С. Д. 116, 118–120, 122–124
Ровленд Г. О. 9, 12
Стефан Й. 80, 82, 90
Тавнс Ч. 17
Тейлор Дж. 8
Тендал Дж. 135
Упатнієкс Ю. 109, 110
Фабрі Ш. 20
Фраунгофер Й. 9–14, 110
Френель О. Ж. 8–10, 13
Френч Н. 135
Фур'є Ж. 110
Холон'як Н. 17
Цайгер Е. 17
Цельсій А. 82
Церніке Ф. 9
Юнг Т. 8, 9, 14

Зміст

Передмова	3
1. ВИВЧЕННЯ ХВИЛЬОВОЇ ПРИРОДИ СВІТЛА	5
1. Інтерференція.....	5
2. Дифракція.....	8
2.1. Опис дифракції.....	8
2.2. Дифракційні ґратки.....	11
3. Порядок виконання роботи.....	14
2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИПРОМІНЮВАННЯ ЛАЗЕРА	17
1. Вступ.....	17
2. Основи теорії лазерів.....	17
3. Класифікація та будова лазерів.....	20
4. Будова та особливості гелій-неонового лазера.....	21
5. Деякі властивості лазерного світла.....	22
5.1. Розбіжність лазерного пучка.....	22
5.2. Часова еволюція інтенсивності випромінювання лазера.....	23
6. Порядок виконання роботи.....	25
Додаток. Таблиця результатів вимірювань сили струму на фотодіоді	34
3. ПОЛЯРИЗАЦІЯ СВІТЛА	36
1. Поняття поляризації світла.....	36
2. Види поляризації.....	36
3. Поляризатори.....	37
4. Закон Малюса для інтенсивності поляризованого світла.....	39
5. Порядок виконання роботи.....	40
4. АБЕРАЦІЇ ЛІНЗ ФОТОКАМЕР	46
1. Сферична аберація.....	46
2. Хроматична аберація.....	47
3. Астигматизм.....	48
4. Кома.....	50
5. Дисторсія.....	51
6. Порядок виконання роботи.....	51
5. ВИМІРЮВАННЯ ФОКУСНОЇ ВІДСТАНІ ОБ'ЄКТИВІВ ФОТОКАМЕР ЗА ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМ МЕТОДОМ	56
1. Площина зображення об'єктива.....	56
2. Методика визначення площини зображення.....	57
3. Фотоелектричний пристрій для визначення фокусної відстані фотооб'єктивів... 60	60
4. Порядок виконання роботи.....	63
6. ФОТОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЖЕРЕЛ ВИПРОМІНЮВАННЯ ... 64	64
1. Основні фотометричні характеристики.....	64
2. Порядок виконання роботи.....	67

Додаток 1. Основні енергетичні і світлові величини (відповідно до системи СІ та Міжнародного світлотехнічного словника)	76
Додаток 2. Значення спектральної світлової ефективності залежно від довжини хвилі світла.....	77
Додаток 3. Зв'язок між довжиною хвилі λ і кутовою мірою φ барабана монохроматора.....	78
Додаток 4. Робочі таблиці.....	79
7. ВЛАСТИВОСТІ ВИПРОМІНЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ДЖЕРЕЛ.....	80
1. Основні закономірності теплового випромінювання.....	80
2. Пристрій ФПК-11 для вивчення теплового випромінювання.....	85
3. Порядок виконання роботи.....	86
3.1. Робота з пристроєм ФПК-11.....	86
3.2. Вимірювання та комп'ютерна обробка результатів.....	87
8. СПЕКТРАЛЬНА ЧУТЛИВІСТЬ ФОТОПРИЙМАЧІВ.....	93
1. Вступ.....	93
2. Фотоелектронний помножувач.....	93
2.1. Будова фотоелектронного помножувача.....	93
2.2. Принцип роботи фотоелектронного помножувача.....	94
2.3. Сумарний електричний заряд на аноді фотоелектронного помножувача.....	95
2.4. Шуми в фотоелектронних помножувачах.....	95
3. Напівпровідникові фоторезистори.....	96
3.1. Напівпровідники.....	96
3.2. Принцип роботи та класифікація фоторезисторів.....	96
3.3. Характеристики фоторезисторів.....	97
3.4. Переваги та недоліки фоторезисторів.....	97
3.5. Використання фоторезисторів.....	98
4. Напівпровідникові фотодіоди.....	98
4.1. Формування р-п-переходу в напівпровідниках.....	98
4.2. Пряме та зворотне прикладання напруги до р-п-переходу.....	100
4.3. Принцип роботи фотодіода.....	100
4.4. Режими роботи фотодіодів.....	101
4.5. Переваги фотодіодів та їхнє застосування.....	101
4.6. Характеристики фотодіодів.....	102
4.7. Види фотодіодів.....	102
4.8. Кремнієві та германієві фотодіоди.....	103
5. Порядок виконання роботи.....	103
9. ГОЛОГРАМИ.....	107
1. Основні поняття голографії.....	107
2. Запис і відтворення голограми.....	108
3. Деякі історичні відомості про голографію.....	108
4. Основні види голограм.....	109
5. Дифракційна ефективність голограми.....	110
6. Деякі застосування голографії.....	111

7. Порядок виконання роботи.....	113
10. ВИВЧЕННЯ СТАТИСТИЧНИХ ЯВИЩ (НА ПРИКЛАДІ РАДІОАКТИВНОГО РОЗПАДУ).....	114
1. Випадкові події та величини і їхні основні характеристики.....	114
2. Розподіли випадкових величин.....	116
3. Статистичний характер радіоактивного розпаду.....	118
4. Методика вивчення статистичних параметрів.....	119
5. Порядок виконання роботи.....	120
11. ПОСЛАБЛЕННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ РЕЧОВИНОЮ (НА ПРИКЛАДІ ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ)	126
1. Гамма-випромінювання.....	126
2. Вплив гамма-випромінювання на живі організми.....	126
3. Основні процеси, що відбуваються при проходженні гамма-випромінювання крізь речовину.....	127
4. Реєстрація гамма-квантів.....	128
5. Методика експериментального визначення коефіцієнта послаблення гамма-випромінювання.....	129
6. Порядок виконання роботи.....	130
Додаток. Таблиці результатів вимірювань кількості імпульсів і обчислень швидкості лічби імпульсів після проходження гамма-випромінювання крізь різні поглиначі.....	133
12. ВТРАТИ ВИПРОМІНЮВАННЯ В ОПТОВОЛОКНІ.....	135
1. Будова оптоволокна.....	135
2. Введення світла у волокно.....	136
3. Втрати світла при його поширенні у волокні.....	138
4. Експериментальна схема, вимірювання та обчислення.....	139
5. Порядок виконання роботи.....	141
Список літератури.....	142
Іменний покажчик.....	144
Зміст.....	145

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Кушнір Олег Степанович
Азарова Ірина Миколаївна
Кашуба Андрій Іванович
Крупич Олег Миколайович
Мостова Мар'яна Романівна
Паночко Галина Іванівна

Лабораторний практикум з фізичних основ оптоелектроніки

Навчальний посібник

Редактор ?
Комп'ютерний набір *І. Азарова*
Технічний редактор ?
Коректор ?

Підп. до друку . .2021.
Гарнітура Times New Roman.
Авт. арк. 10,1.

Видавничий центр Львівського національного університету
імені Івана Франка. вул. Дорошенка, 41, 79000 Львів.