



Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

5417 Методичні вказівки
до лабораторних робіт
із курсу **«Оптоелектронні системи та лазерні технології»**
для студентів спеціальності *171 «Електроніка»*
освітнього ступеня «магістр»
денної, заочної й дистанційної форм навчання

Суми
Сумський державний університет
2022

Методичні вказівки до лабораторних робіт із курсу
«Оптоелектронні системи та лазерні технології» / укладачі:
І. М. Пазуха, А. О. Степаненко, О. В. Пилипенко. – Суми :
Сумський державний університет, 2022. – 39 с.

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

ВСТУП

На сьогодні лазерні технології незамінні в метрології, технології оброблення матеріалів, хімічній технології й хімічному аналізі, моніторингу довкілля, космічній техніці, медицині, інтегральній і волоконній оптиці, інформаційних системах тощо. Незалежно від галузі застосування їм властиві висока продуктивність процесів і якість виробів, економічність та екологічність.

Лазерні технології ефективні під час роботи з будь-якими матеріалами: металами, напівпровідниковими, діелектричними (пластмасою, керамікою, стеклами тощо) і навіть біологічними матеріалами.

Метою цих методичних вказівок є ознайомлення з основними методами вимірювання характеристик лазерного випромінювання, а також набуття практичних навичок проведення хімічного аналізу речовини й вимірювання товщини тонких плівок за допомогою лазерного випромінювання.

Лабораторна робота 1

Визначення просторово-енергетичних параметрів лазерного випромінювання

Мета роботи – ознайомитися з основними методами вимірювання просторово-енергетичних параметрів лазерного випромінювання, визначити кут розходження лазерного променя.

Елементи теорії. Порівняно з некогерентними джерелами лазерному випромінюванню властива висока спрямованість пучка. Її визначають за його розходженням у просторі. Вона характеризується плоским або тілесним кутом, у межах якого поширюється більша частина випромінювання.

В активному середовищі лазера резонатор ініціює виникнення деякої спрямованості, для якої виконується умова самозбудження. У цьому напрямку процеси вимушеного випромінювання можуть компенсувати втрати. За таких умов випромінювання чітко спрямоване вздовж осі резонатора. За повної просторової когерентності лазерного випромінювання дифракція на випромінювальній апертурі приводить до конусного розходження променя (дифракційного обмеження). Також на кутове розходження впливає геометрія резонатора й наявність неоднорідностей у речовині.

Під час вимірювання розходження лазерного випромінювання розрізняють структуру поля в ближній та дальній зонах. Вплив дифракції на вихідній апертурі й неоднорідностях активного середовища зменшується майже до нуля на відстані L_0 , що визначають за співвідношенням

$$L_0 = \frac{D_0^2}{\lambda}, \quad (1)$$

де D_0 – діаметр вихідної діафрагми лазера;
 λ – довжина хвилі.

За відстані $L > L_0$ (наближення Фраунгофера) випромінювання характеризується майже плоским хвильовим фронтом. За $L \leq L_0$ для опису дифракції використовують наближення Френеля. Розходження лазерного променя визначають у дальній зоні (за $L > L_0$), оскільки біля вихідної апертури лазера кутовий розподіл має неоднорідну конфігурацію.

Для визначення розходження лазерного пучка застосовують два підходи. Відповідно до першого характеристичними параметрами є плоский Q_p або тілесний θ_s кути, що обумовлюють ширину діаграми спрямованості в дальній зоні за заданим рівнем кутового розподілу енергії чи потужності щодо його максимального значення. Найчастіше беруть значення рівня 0,5 та $1/e^2$, де e – основа натуральних логарифмів. Це визначення використовують лише для одномодових лазерів. За багатомодового режиму випромінювання має численні бічні пелюстки, що містять значну частину енергії, тому зручнішою характеристикою є енергетична розбіжність лазерного випромінювання (θ_{wp} або θ_{ws}), тобто плоский або тілесний кут, у межах якого поширюється задана частка енергії чи потужності.

Іншим підходом до характеризування розходження лазерного пучка є визначення діаметра поперечного перерізу променя, усередині якого проходить задана частка енергії або потужності.

Для практичного вимірювання розходження лазерного пучка застосовують три основні методи:

- метод перерізів;
- метод реєстрації діаграми спрямованості;
- метод фокальної плями.

Найбільш простим є метод двох перерізів, схема якого наведена на рисунку 1.

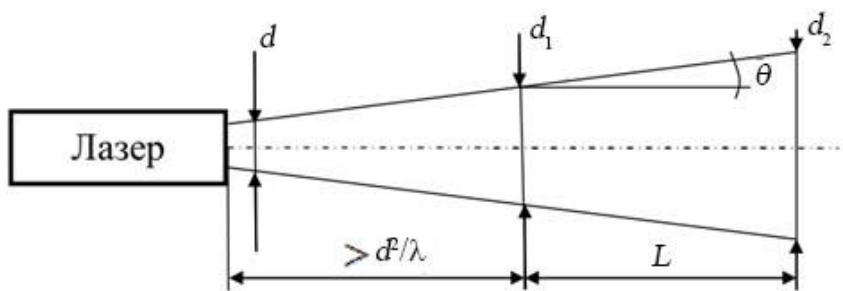


Рисунок 1 – Схема визначення розходження лазерного пучка методом двох перерізів

Розходження лазерного пучка визначають способом вимірювання діаметрів пучка d_1 і d_2 у двох поперечних перетинах дальньої зони, віддалених один від одного на відстані L , та обчислення кута θ за співвідношенням:

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left[(d_2 - d_1) / 2L \right] \approx (d_2 - d_1) / L, \quad (2)$$

де d_1, d_2 – діаметри пучка у двох поперечних перерізах;

L – відстань між ними.

Діаметри вимірюють одночасно або послідовно за заданим рівнем інтенсивності чи енергії (потужності). Перевагою методу є простота, але для забезпечення високої точності вимірювання необхідна достатньо велика (декілька метрів) відстань між перерізами. Для зменшення лінійних габаритів лабораторної установки застосовують оптичні лінії затримки (системи дзеркал та призм).

Метод реєстрації діаграми спрямованості дає змогу одержати найбільш повну інформацію про просторовий розподіл лазерного випромінювання. Для вимірювання діаграми спрямованості використовують фотоелемент або фотоелектричний перетворювач, що розміщують у дальній зоні. Фотоприймач закритий діафрагмою з отвором малого діаметра. Кутовий розподіл інтенсивності випромінювання реєструють,

переміщуючи фотоприймач по дузі. Схема методу реєстрації наведена на рисунку 2.

За діаграмою спрямованості розраховують енергетичне й кутове розходження випромінювання. Оскільки метод є достатньо складним, його застосовують рідко.

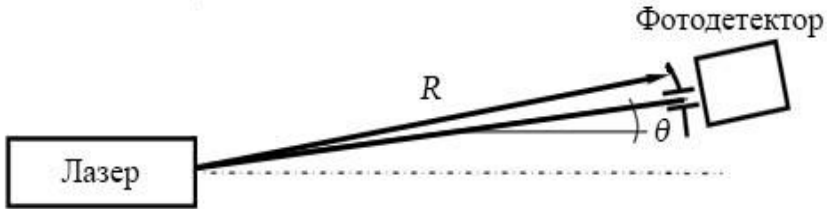


Рисунок 2 – Схема визначення розходження лазерного пучка методом реєстрації діаграми спрямованості

Найбільш поширеним для вимірювання розходження є метод фокальної плями. Для проведення вимірювань у дальній зоні (області дифракції Фраунгофера) потрібні значні відстані від джерела випромінювання. Умову виникнення дифракції Фраунгофера можна одержати у фокальній площині ідеальної позитивної лінзи. Схема методу фокальної плями наведена на рисунку 3.

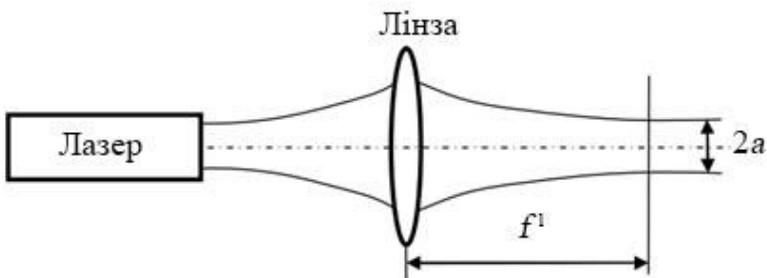


Рисунок 3 – Схема визначення розходження лазерного пучка методом фокальної плями

Для переходу до кутового розподілу необхідно поділити лінійний розподіл у фокальній площині на фокусну відстань лінзи. Кут розходження лазерного променя визначають за співвідношенням

$$\theta \approx a / f', \quad (3)$$

де a – радіус плями на фокальній площині.

На практиці використовують довгофокусні лінзи з апертурою, що вдвічі перевищує діаметр лазерного пучка. Фокусна відстань лінзи повинна задовольняти умову

$$f' > 2,44 \frac{\lambda}{\theta_{wp}^e},$$

де λ – довжина хвилі лазерного випромінювання;

θ_{wp} – енергетичне розходження лазерного випромінювання.

Похибка вимірювання цього методу достатньо велика (до 27 %) і пов'язана з неточністю визначення розміру плями.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з елементами теорії.
2. Скласти схему для практичного визначення розходження пучка лазерного випромінювання методом двох перерізів (рис. 4).
3. Установити екран біля лазера й відцентрувати пляму лазерного випромінювання на перехресті екрана.
4. Установити екран на відстані 1 м від лазера та визначити діаметр d_1 .
5. Переміщувати екран від лазера з кроком 1 м і вимірювати діаметр d_2 .
6. Визначити кут розходження θ за формулою (2).
7. Занести результати до таблиці 1.

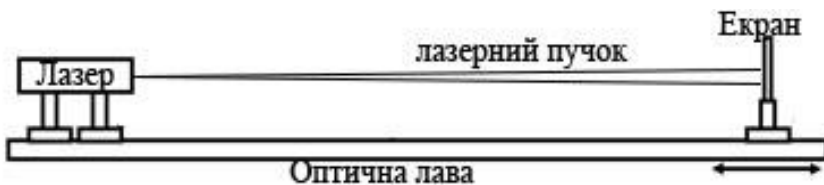


Рисунок 4 – Схема експериментального вимірювання розходження лазерного пучка методом двох перерізів

Таблиця 1 – Результати вимірювання кута розходження

	$L_1 = 1 \text{ м}$	$L_2 = 2 \text{ м}$...	$L_n = \dots \text{ м}$
$d_1, \text{ мм}$				
$d_2, \text{ мм}$				
$\theta, \text{ рад}$				

8. Побудувати графік залежності кута розходження від положення площини вимірювання L .

9. Зробити висновки щодо роботи.

Зміст звіту

1. Номер, назва та мета роботи.
2. Конспект елементів теорії.
3. Рисунки, таблиці та графіки згідно із завданням.
4. Висновок.

Контрольні запитання

1. Як визначають спрямованість лазерного випромінювання?
2. У якій зоні (ближній чи дальній) проводять практичне вимірювання кута розходження й чому?
3. Які основні методи застосовують для практичного вимірювання розходження?
4. У чому полягає суть методу перерізів?

5. На чому базується метод реєстрації діаграми спрямованості?
6. Наведіть і поясніть схему методу фокальної плями.

Лабораторна робота 2

Визначення просторового розподілу енергії в лазерному пучку

Мета роботи – ознайомитися з основними методами вимірювання просторового розподілу енергії в лазерному промені й побудувати такий розподіл для гелій-неонового та напівпровідникового лазерів.

Елементи теорії. Для визначення розподілу енергії в лазерному промені застосовують два основні методи: метод каліброваних діафрагм і метод розподілу щільності енергії (потужності) лазерного випромінювання.



Рисунок 1 – Структурна схема методу каліброваних діафрагм

Схема методу каліброваних діафрагм наведена на рисунку 1. Для неї використовують діафрагму з плавно змінним діаметром або змінні калібровані діафрагми. Їх установлюють безпосередньо в пучку чи фокальній площині лінзи. Діаметр пучка регулюють у межах заданої від максимальної частки потужності зміною діаметра діафрагми. У схемі такого вимірювача є дві гілки, в одній із яких вимірюють повну енергію пучка *I*. Потім порівнюють значення випромінювання в кожній із гілок.

Недоліками методу є низька оперативність, відсутність інформації про енергетичний розподіл біля максимуму інтенсивності й неможливість виявлення неоднорідностей у розподілі випромінювання.

Для усунення цих недоліків передбачено метод реєстрації розподілу щільності енергії (потужності) лазерного випромінювання в поперечному перерізі пучка. Відповідно до нього у видимому й інфрачервоному діапазонах спектра застосовують фотографування плями випромінювання з подальшими фотометруванням і чисельним інтегруванням. Для потужних лазерів необхідне послаблення за допомогою нейтральних світлофільтрів.

Зручнішим методом вимірювання розподілу інтенсивності у сфокусованій плямі є схема з автокалібруванням, наведена на рисунку 2.

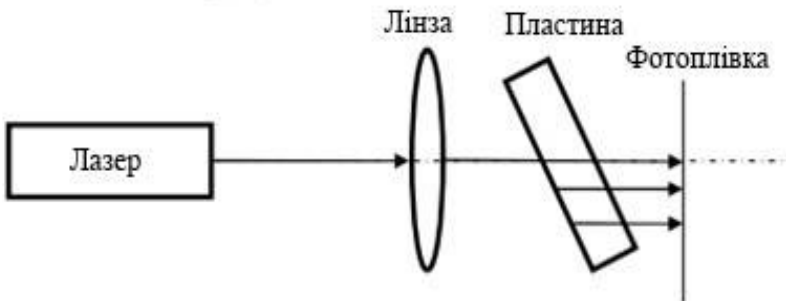


Рисунок 2 – Схема вимірювання розходження лазерного пучка методом автокалібрування

Автокалібрування базується на розділенні лазерного пучка за допомогою пластины на низку просторово подібних і віддалених один від одного променів із різною інтенсивністю. Товста пластина, розміщена під кутом до лазерного пучка, послаблює й багаторазово розщеплює промінь.

Якщо коефіцієнт відбиття обох поверхонь дорівнює n , то інтенсивність I_i , пучка з номером i , що виходять з похилої пластини, можна визначити зі співвідношення

$$I_i = I_0 (1 - n)^{2n^{2(i-1)}},$$

де I_0 – інтенсивність вихідного лазерного пучка;

n – коефіцієнт відбиття обох поверхонь;

i – номер пучка.

На фотоплівці фіксують кілька зображень плями з різною експозицією, з яких можна досить точно визначити діаметр плями на заданому рівні інтенсивності. Сучасні багатоканальні приймачі випромінювання (фотодіодні, фототранзисторні й фоторезисторні матриці) забезпечують значне підвищення швидкості одержання й точності результатів. Паралельний принцип вимірювання багатоканальних локальних густин енергії дає змогу аналізувати імпульсний і нестабільний у часі та просторі лазерний пучок.

Автоматизоване математичне оброблення інформації з цифрових багатоканальних фотоприймачів забезпечує:

- обчислення енергетичного розходження;
- виділення ізорівнів;
- оброблення фокальних плям неправильної форми;
- корекцію спотворень;
- визначення осі діаграми спрямованості та її дрейф

упродовж часу.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з елементами теорії.
2. Скласти схему для практичного визначення енергетичного розходження пучка лазерного випромінювання (рис. 3).
3. Установити екран на відстані L (2–6 м) від джерела випромінювання й відцентрувати пляму лазерного випромінювання на перехресті екрана.



Рисунок 3 – Схема експериментального вимірювання енергетичного розходження пучка лазерного випромінювання

4. Зробити цифровий фотознімок лазерної плями.

5. Розмістити фотодіод на такій відстані від лазера, щоб промінь не виходив за межі діода, та визначити максимальну потужність випромінювання зі співвідношення

$$P_{\max} = I \cdot U, \quad (2)$$

де I – фотострум;

U – напруга на діоді.

6. За допомогою програми аналізу зображень («ImageJ») провести фотометрію одержаних зображень перерізу лазерного променя. Для цього по осі ординат необхідно відкласти кут розходження θ і відкалібрувати шкалу за кутом $\theta \approx x/L$ (x – відліковувана відстань від центра до краю лазерної плями, м) у програмі.

7. Скориставшись даними для кутової залежності інтенсивності, побудувати кутовий розподіл потужності випромінювання. Для цього перебудувати графік у координатах

$$P(\theta), \text{ де } P = \frac{P_{\max}}{\text{Gray_Value}_{\max}} \cdot \text{Gray_Value}, \theta = \text{Distane_}(unit).$$

8. Виконати пункти 2–7 для напівпровідникового лазера.

9. Зробити висновки щодо роботи.

Зміст звіту

1. Номер, назва й мета роботи.
2. Конспект елементів теорії.
3. Рисунок, таблиці та графіки згідно із завданням.

4. Висновок.

Контрольні запитання

1. Які методи застосовують для визначення розподілу енергії в лазерному промені?
2. У чому полягає суть методу каліброваних діафрагм?
3. Які основні недоліки методу каліброваних діафрагм?
4. Наведіть і поясніть схему автокалібрувального способу вимірювання розходження лазерного пучка.
5. Які переваги цифрових багатоканальних фотоприймачів над фотоплівкою під час вимірювання енергетичного розходження лазерного пучка?

Лабораторна робота 3

Визначення довжини хвилі лазерного випромінювання

Мета роботи – ознайомитися з поняттям когерентності й визначити довжину хвилі випромінювання напівпровідникового лазера за допомогою дифракції від нитки.

Елементи теорії. Особливістю лазерного випромінювання є його високий ступінь *когерентності*, під яким розуміють узгодженість фаз коливань, що спостерігаються в різних точках простору в різні моменти часу. Висока когерентність обумовлена природою індукованого випуску й наявністю оптичного резонатора. Під когерентністю розуміють узгоджене протікання в просторі та часі декількох коливальних або хвильових процесів, що проявляється в закономірності зв'язку між фазами, частотами, поляризацією й амплітудами.

Часова когерентність – це узгодження протікання декількох коливальних або хвильових процесів у різні моменти часу в одній і тій самій точці простору. Пояснити часову когерентність можна за допомогою рисунка 1.

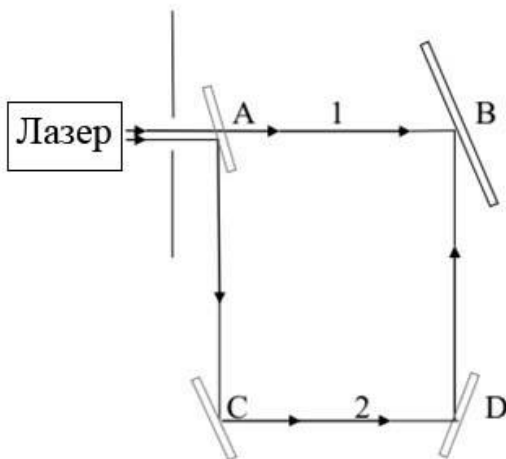


Рисунок 1 – Схема для пояснення часової когерентності

За допомогою напівпрозорого дзеркала в точці А промінь розділяється на два пучки. Пучок 1 проходить шлях АВ за час t_1 , а пучок 2 – АСДВ за час $t_2 > t_1$. На екрані в точці В складаються дві світлові хвилі, відокремлені одна від одної інтервалом часу $t = t_2 - t_1$. Якщо впродовж цього часу різниця фаз світлових коливань пучків 1 та 2 в будь-якій точці екрана зберігається незмінною, то світло має часову когерентність. На екрані виникає стійка інтерференційна картина. Часом когерентності називають максимальний інтервал, упродовж якого спостерігається інтерференція. Чим вищий ступінь монохроматичності хвилі, тим триваліша когерентність (для лазерів її час становить 10^{-2} с і більше).

Просторова когерентність – це узгоджене протікання декількох коливальних або хвильових процесів у різних точках простору в один і той самий момент часу. Пояснити просторову когерентність можна за допомогою рисунка 2.

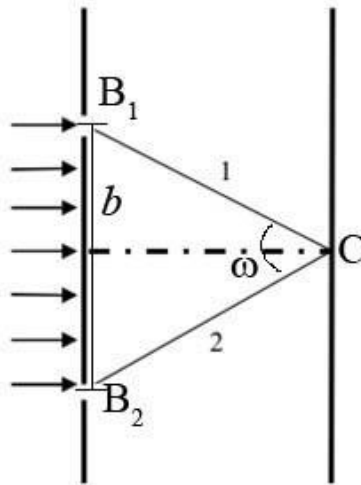


Рисунок 2 – Схема для пояснення просторової когерентності

Екран має два малі отвори B_1 та B_2 , через які в точку C приходять промені 1 і 2, не зміщені в часі ($t_1 = t_2$). У такому разі

шляхи $V_1C = V_2C$. Коливання вважають просторово когерентними, якщо різниця фаз у точці С постійна.

Оптичну когерентність пов'язують з інтерференцією, тому що інтерференція є найпростішим явищем, у якому спостерігається узгодженість між світловими пучками, що спричиняє просторово-неоднорідний розподіл інтенсивності. Інтерференція проявляється у формуванні зон підсилення або ослаблення інтенсивності та стає можливою за умови

$$2b \sin \omega \leq \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

де λ – довжина хвилі випромінювання;

ω – кут когерентності (апертурний кут інтерференційної схеми).

Дифракція – це сукупність явищ, що спостерігаються під час розповсюдження світла в середовищі з різкими неоднорідностями, пов'язаними з відхиленням від законів геометричної оптики. Вона проявляється в огинанні хвилями перешкод і падінні світла в зону геометричної тіні. Якщо розміри перешкоди порівняні з довжиною хвилі, то можна спостерігати дифракційні максимуми й мінімуми, подібні до інтерференційних.

Дифракцію Фраунгофера спостерігають у паралельних пучках. Такі умови виникають за достатньо великих відстаней між джерелом світла та екраном. У монохроматичному світлі дифракційна картина виглядає як почергові темні й світлі полоси.

Дифракція Френеля виникає в разі використання точкових джерел світла, розміщених поблизу з перешкодою. Дифракційна картина спостерігається на екрані, що також знаходиться поряд із перешкодою.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з елементами теорії.

2. Скласти схему для одержання дифракційної картини лазерного пучка від тонкої нитки (рис. 3).



Рисунок 3 – Схема експериментального одержання дифракційної картини від тонкої нитки

3. Розмістити екран на відстані L_0 (2–2,5 м) від лазера.

4. Увімкнути напівпровідниковий лазер і відцентрувати зображення перерізу лазерного променя на екрані.

5. Помістити на відстані b (0,5–1 см) на шляху лазерного пучка пластинку з вольфрамовою ниткою.

6. Виміряти відстань L від нитки до екрана й відстань l_n між центральним та n -ми максимумами.

7. Розрахувати довжину хвилі лазерного випромінювання для всіх дифракційних максимумів. Ураховуючи, що для малих кутів $\sin \varphi \approx \tan \varphi$, з умови дифракційного максимуму $d \cdot \sin \varphi = n \cdot \lambda$ співвідношення для довжини хвилі є таким:

$$\lambda = \frac{d \cdot l_n}{n \cdot L}, \quad (2)$$

де n – номер дифракційного максимуму;

d – товщина вольфрамової нитки, що становить 0,2 мм.

8. Визначити середню довжину хвилі $\lambda_{сер}$ і похибку вимірювання $\Delta\lambda$. Результат репрезентувати як

$$\lambda = \lambda_{сер} \pm \Delta\lambda, \quad (3)$$

9. Зробити висновки щодо роботи.

Зміст звіту

1. Номер, назва й мета роботи.

2. Конспект елементів теорії.
3. Рисунки, таблиці та графіки згідно із завданням.
4. Висновок.

Контрольні запитання

1. Чим зумовлена висока когерентність лазерного випромінювання?
2. Що розуміють під часовою когерентністю?
3. Що таке просторова когерентність?
4. Коли можна спостерігати дифракцію Фраунгофера?
5. За яких умов виникає дифракція Френеля?
6. Зобразіть схему експериментального одержання дифракції лазерного пучка від тонкої нитки.
7. За яким співвідношенням розраховують довжину хвилі лазерного випромінювання в цій роботі?

Лабораторна робота 4

Визначення ефективності введення лазерного випромінювання в оптичне волокно

Мета роботи – ознайомитися з методикою введення лазерного випромінювання в оптичне волокно й оцінити ефективність такого введення для напівпровідникового лазера.

Елементи теорії. Основними характеристиками елементів зв'язку джерела лазерного випромінювання та оптичного волокна є *ефективність уведення* й *модова вибірковість*. Першу визначають за частиною від загальної енергії, що виводиться з оптоволокна. Багатомодові елементи зв'язку характеризуються загальною ефективністю, хоча в таких системах ефективність можна обчислювати окремо для кожної моди. Ефективність уведення лазерного випромінювання характеризують *коефіцієнтом ефективності*, що визначають за співвідношенням

$$\eta = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{max}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де P_{max} – вихідна максимальна потужність лазера;

$P_{\text{вих}}$ – потужність лазерного випромінювання, що пройшло через оптичну систему.

Ефективність уведення випромінювання в оптоволокно залежить від таких параметрів:

- взаємного розміщення випромінювача й волокна;
- площі поверхні випромінювання та внутрішнього діаметра волокна;
- відбиття випромінювання від торців світловода;
- прозорості оптичних елементів системи.

Лазери здебільшого мають резонатори порівняно великої довжини й діаметри випромінювальних поверхонь $d \geq 1$ мм, тому лазерне випромінювання можна вважати паралельним і монохроматичним. Зазвичай для введення лазерного пучка в оптоволокно використовують збиральну лінзу (рис. 1).

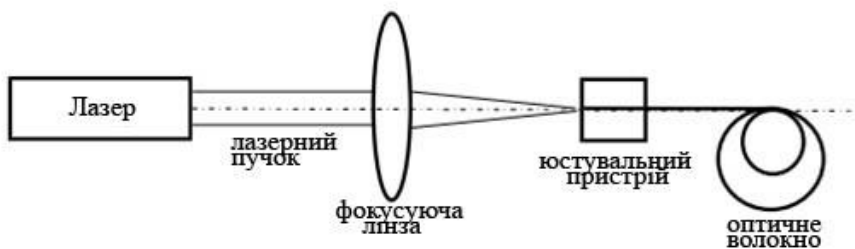


Рисунок 1 – Схема введення лазерного випромінювання в оптоволокно

Випромінювання лазера фокусується лінзою на вхідний торець волокна. За діаметра плями випромінювання D фокусну відстань лінзи f вибирають такою, щоб апертюра пучка, що падає на торець волокна, не перевищувала апертюру самого волокна N , та було додержаним співвідношення

$$\frac{D}{2f} \leq N. \quad (2)$$

У цьому разі діаметр фокальної плями повинен дорівнювати внутрішньому діаметру оптоволокна.

На юстувальному пристрої закріплюють прийомний торець волокна. Для узгодження розміщення торця волокна з фокусом лінзи й забезпечення узгодження осей лінзи та прийомного волокна юстувальний прилад повинен мати три просторові й дві кутові координати.

У лазерних діодів випромінююча поверхня менша, ніж внутрішній діаметр оптоволокна, тому втрати під час уведення в них пучка пов'язані з перевищенням апертурними кутами випромінювання апертурних кутів волокна. Є декілька методів уведення випромінювання від лазерного діода в оптичне волокно (рис. 2), що відрізняються за ефективністю й технологічною складністю.

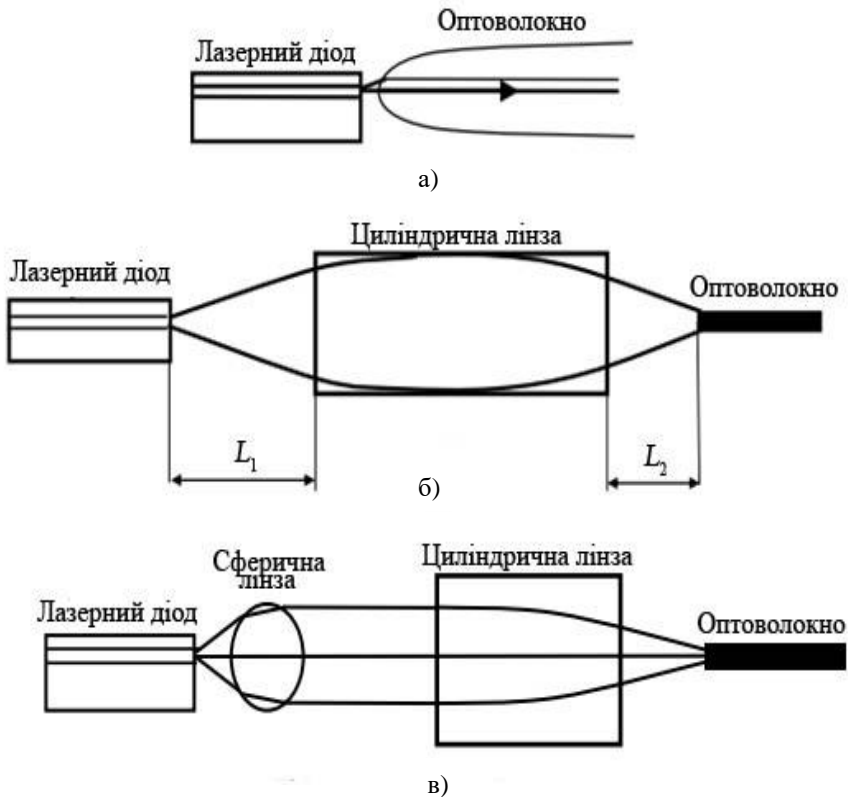


Рисунок 2 – Методи введення випромінювання від лазерного діода в оптичне волокно:

- а) безпосереднє введення;
- б) із використанням циліндричної лінзи;
- в) за допомогою комбінації сферичної й циліндричної лінз

Застосовують безпосереднє з'єднання лазерного діода з волокном без додаткового оброблення торця оптоволокна або з ним: торцю світловода надають заокругленої конусоподібної форми, створюючи в результаті цього мікролінзу. Найбільш ефективним є виготовлення мікролінзи способом травлення торця оптичного волокна. Використання таких лінз дає змогу

збільшити інтервал перекриття поля випромінювання й поля хвильоподібної моди.

Для корекції еліптичної форми перерізу випромінювання від лазерного діода необхідні циліндричні лінзи. Підбираючи довжину такої лінзи та відстані, на яких її розміщують між діодом і волокном, можна значно скоротити розбіжність пучка у вертикальному напрямку (коректуючи поперечний переріз пучка до круглої форми) та зменшити енергетичні втрати під час уведення. Лінза має циліндричну форму з плоскими торцевими поверхнями. Її властивості базуються на створенні розподілу коефіцієнта заломлення симетрично оптичній осі по радіусу за квадратичним законом.

Сферичні лінзи в результаті збільшення апертурного кута підвищують коефіцієнт зв'язку, чим значно збільшують уведену в оптоволокно потужність.

Третім способом уведення випромінювання від лазерних діодів до оптоволокна є використання комбінації сферичної й циліндричної лінз. Випромінювальну поверхню діода розміщують у фокусі сферичної лінзи, а потім установлюють циліндричну лінзу для фокусування на торець оптоволокна.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з елементами теорії.
2. Скласти схему для вимірювання оптичної потужності P_{max} напівпровідникового лазера (рис. 3).

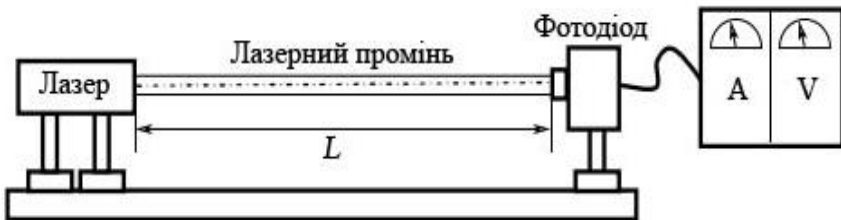


Рисунок 3 – Схема експериментальної установки для вимірювання оптичної потужності лазера

3. Визначити потужність лазерного випромінювання. Для цього направити промінь на фотодіод. Розмістити фотодіод на такій відстані L від джерела, щоб лазерна пляма не виходила за межі приймальної поверхні фотодіода. Максимальну потужність випромінювання розраховують за співвідношенням

$$P_{\max} = I \cdot U, \quad (3)$$

де I – фотострум;

U – напруга на фотодіоді.

4. Скласти схему для вимірювання оптичної потужності лазерного випромінювання, що пройшло через оптоволокно, $P_{\text{вих}}$ (рис. 4).

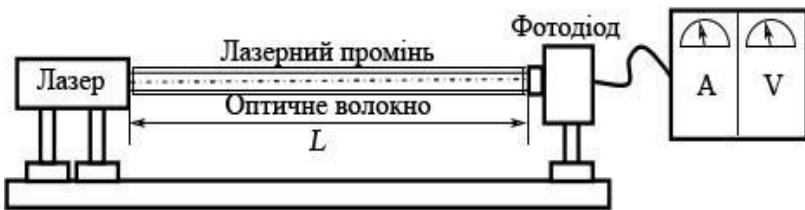


Рисунок 4 – Схема експериментальної установки для вимірювання потужності лазерного випромінювання, що проходить через оптоволокно

5. Аналогічно до пункту 3 визначити оптичну потужність лазерного випромінювання, що пройшло через оптоволокно, $P_{\text{вих}}$.

6. За співвідношенням (1) розрахувати коефіцієнт втрат випромінювання.

7. Зробити висновки щодо роботи.

Зміст звіту

1. Номер, назва й мета роботи.
2. Конспект елементів теорії.
3. Рисунки, таблиці та графіки згідно із завданням.
4. Висновок.

Контрольні запитання

1. Які основні характеристики елементів зв'язку джерела лазерного випромінювання та оптичного волокна?
2. Які характеристики ефективності введення лазерного випромінювання?
3. Навести й пояснити схему введення лазерного випромінювання в оптоволокно.
4. Які методи введення випромінювання від лазерного діода в оптичне волокно ви знаєте?
5. Що використовують для корекції еліптичної форми перерізу випромінювання від лазерного діода?
6. Яку функцію виконує сферична лінза в процесі введення лазерного пучка в оптоволокно?
7. Як експериментально виміряти потужність лазерного випромінювання?

Лабораторна робота 5

Використання лазерного випромінювання для хімічного аналізу й вивчення молекулярної будови матеріалів: раманівська спектроскопія

Мета роботи – ознайомитися з принципом роботи раманівського спектрометра та методикою проведення хімічного аналізу речовини з використанням лазерного випромінювання.

Елементи теорії. Суть раманівської спектроскопії полягає в тому, що через зразок досліджуваної речовини пропускають промінь із певною довжиною хвилі, що розсіюється під час контакту з ним. Отримані промені за допомогою лінзи збирають в один пучок і пропускають через світлофільтр, що відділяє слабкі (0,001 % інтенсивності) *раманівські* промені від значно інтенсивніших (99,999 %) *релеївських*. «Чисті» раманівські промені підсилюють і направляють на детектор, що фіксує частоту їх коливання.

Метод дає змогу проводити неруйнівний хімічний аналіз і вивчати молекулярну будову композитних матеріалів у стані рідин, газів, твердих тіл, порошків, гелів, суспензій, водних розчинів тощо. Він базується на аналізі комбінаційного розсіювання світла.

У 1923 р. Адольф Смекал теоретично передбачив явище непружного розсіювання. Згодом (у 1928 р.) Ч. В. Раману й К. С. Крішнану вдалося довести його експериментально. Для цього було сконструйовано спеціальний спектрометр, що за допомогою телескопа фокусував сонячні промені на зразку чистої рідини. Використовуючи систему світлофільтрів, учені відділили промені з частотою коливань, відмінною від частоти променів, що падають. Це свідчило про існування іншого – нерелеївського – розсіювання.

Раман-спектрометр складається з чотирьох основних компонентів:

- джерела монохроматичного випромінювання (лазера);
- системи освітлення зразка й фокусування променів;

- світлофільтра;
- системи виявлення та комп'ютерного контролю.

Здебільшого як джерело збуджувального світла використовують такі лазери, як Ar^+ (351,1–514,5 нм), Kr^+ (337,4–676,4 нм) і He–Ne (632,8 нм). В останні роки впроваджують також пульсівні лазери Nd : YAG, діоди й ексімерні лазери для УФ-резонансної раман-спектроскопії. З часу появи спектроскопії до винайдення лазера (1960-ті рр.) єдиним джерелом збудження були ртутні лампи з додатковим світлофільтром. Щоб досягнути необхідної потужності, до комплекту таких ламп входили спеціальні підсилювачі.

Оскільки лазерний промінь має малий діаметр (приблизно 1 мм), його нескладно сфокусувати на зразку. Розсіяні промені направляють на світлофільтр переважно за допомогою системи збірних і фокусувальних лінз (рис. 1), хоча також використовують систему дзеркал.

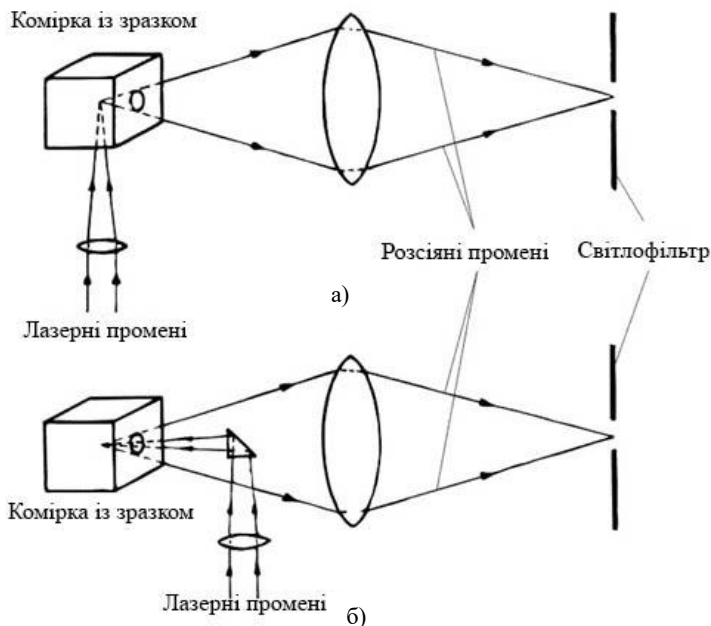


Рисунок 1 – Системи лінз раманівських спектрометрів

Система ахроматичних лінз може мати дві конфігурації залежно від того, фіксуються промені, що розсіюються, під кутом 90° (рис. 1 а) чи 180° (рис. 1 б).

Найпоширеніші інтерференційні фільтри, у яких дві оптичні площини можуть пропускати лише промені з довжинами хвиль, кратними подвоєній товщині фільтра. Нещодавно почали використовувати акустичні фільтри.

Зважаючи на малу інтенсивність раманівського сигналу, до детекторів ставлять серйозні вимоги, тому фотографічні плівки поступилися місцем високочутливим фотодетекторам.

У цій роботі ми використовуватимемо мікроспектрометр «RENISHAW inVia Reflex», зображений на рисунку 2.



Рисунок 2 – Раманівський спектрометр «RENISHAW inVia Reflex»

Технічними особливостями цього приладу є:

– твердотільні лазери з довжинами хвиль 532 нм і 785 нм та максимальною вихідною потужністю, не меншою ніж 50 мВт;

- дифракційні ґратки на 1 200, 1 800 і 2 400 ліній;
- конфокальний оптичний мікроскоп, оснащений об'єктивами 5x, 10x, 20x, 50x, 100x.

Галузі використання мікроспектрометра:

- 1) медична й фармацевтична промисловості;
- 2) геліоенергетична галузь;
- 3) нафтопереробна промисловість;
- 4) сільське господарство;
- 5) екологічний моніторинг;
- 6) хімічна промисловість;
- 7) судово-медична експертиза;
- 8) криміналістика та безпека;
- 9) харчова промисловість, товарна інспекція й безпека продуктів харчування;
- 10) археологія, геологія та мінералогія.

Раманівські спектри (рис. 3) будують на основі даних із фотоприймача за допомогою спеціальних програм, що забезпечують керування приладом (для приладів різних виробників використовують індивідуальне програмне забезпечення).

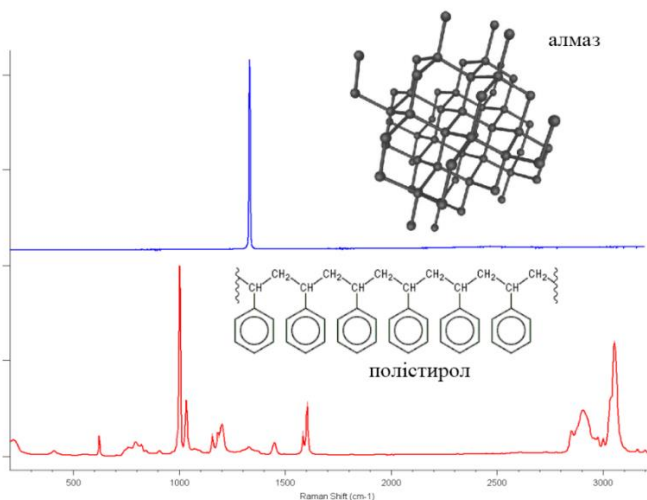


Рисунок 3 – Приклади раманівських спектрів

Спектр кожної речовини індивідуальний. Кількість піків на ньому залежить від кількості й характеру хімічних зв'язків. Порівнюючи їх висоту в досліджуваних зразках для різних хімічних з'єднань, можна визначити концентрацію компонентів. Чим ширший пік, тим менш досконалою є кристалічна будова.

За допомогою одержаної інформації можна досліджувати:

- за характеристиками раманівських частот – будову матеріалів;
- за зсувом частоти раманівських смуг – деформацію;
- за поляризацією раманівського випромінювання – симетрію й орієнтація в кристалах;
- за шириною раманівського піку – якість кристалів.

Схема мікроспектрометра «RENISHAW inVia Reflex» наведена на рисунку 4.

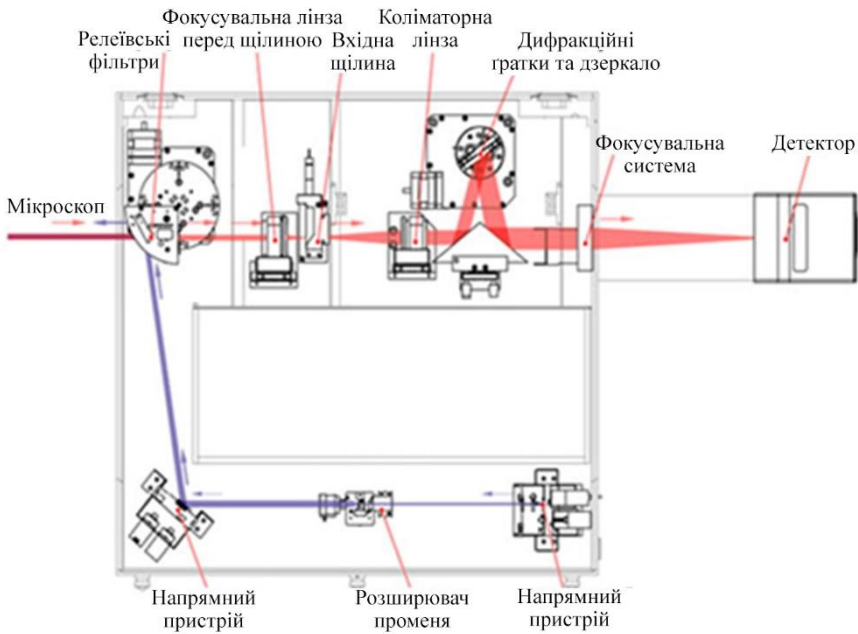


Рисунок 4 – Схема мікроспектрометра «RENISHAW inVia Reflex»

До основних блоків мікроспектрометра належать:

- два напрямні пристрої;
- розширювач променя;
- релеївський фільтр;
- фокусувальна лінза;
- вхідна щілина;
- коліматорна лінза;
- дифракційні ґратки;
- дзеркало;
- детектор;
- фокусувальна система.

Лівий і правий напрямні пристрої моторизовані, містять до трьох дзеркал (тип дзеркала залежить від типу лазера). Їх контролюють за допомогою програмного забезпечення.

Розширювач променя забезпечує високу густину лазерного пучка та його продуктивне використання, дає змогу отримати на зразку точку, розмір якої близький до дифракційної границі.

Релеївський фільтр високоефективно передає лазерний промінь на зразок і блокує релеївське розсіювання.

Фокусувальна лінза перед вхідною щілиною моторизована й автоматично рухається, доставляючи раманівський сигнал.

Вхідна щілина відсікає розсіяне світло, що виходить не з фокальної площини, а також фоновий сигнал.

Коліматорна лінза фокусує промінь після щілини.

Дзеркало направляє раманівське випромінювання на дифракційні ґратки, що розділяють раманівський промінь на спектр. Після цього дзеркало направляє диспергований промінь на детектор.

Фокусувальна система моторизована й забезпечує стабільне фокусування раманівського променя на детекторі – кремнієвій матриці, що охолоджується до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

У приладі використовують чотири лазери (один із них наведений на рисунку 5) у діапазоні від ультрафіолету до

інфрачервоного (довжини хвилі – від 229 нм до 1 064 нм). Програма керування забезпечує автоматичне перемикання, контроль пучка по довжині хвилі та юстування.



Рисунок 5 – Лазер (вигляд зовні)

Для роботи приладу, візуалізації та оброблення інформації використовують спеціальне програмне забезпечення «WiRE Synchronscan». Після одержання спектра від невідомої речовини програма звертається до електронної бази відомих раманівських спектрів, порівнює й визначає склад досліджуваної речовини.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з елементами теорії.
2. Розмістити зразок на предметному столику мікроскопа та, скориставшись програмою керування приладом, одержати раманівський спектр.
3. Одержавши такий спектр, порівняти його зі спектрами відомих речовин. Визначити, якій із них він належить.
4. Одержати раманівські спектри за допомогою трьох різних лазерів. Вибрати один із характерних піків на спектрі й визначити для кожного з лазерів енергетичну ефективність сигналу – величину, значення якої свідчить про те, наскільки ефективно 1 Вт потужності лазерного випромінювання

перетворюється на інтенсивність раманівського випромінювання на детекторі:

$$E = \frac{I}{P}, \quad (1)$$

де I – інтенсивність сигналу в відносних одиницях;

P – вихідна потужність лазера, Вт.

5. Зробити висновки щодо роботи.

Зміст звіту

1. Номер, назва й мета роботи.
2. Конспект елементів теорії.
3. Рисунки, таблиці та графіки згідно із завданням.
4. Висновок.

Контрольні запитання

1. У чому полягає суть раманівської спектроскопії?
2. З яких основних компонентів складається раманівський спектрометр?
3. Яку інформацію можна одержати з раманівських спектрів?
4. Які фізичні властивості речовин можна досліджувати на основі інформації, одержаної за допомогою раманівського спектрометра?
5. Яку функцію виконує релеївський фільтр?
6. Який алгоритм ідентифікації невідомої речовини за допомогою раманівського спектрометра?
7. Який фізичний зміст енергетичної ефективності сигналу?

Лабораторна робота 6

Використання лазерного випромінювання для вимірювання товщини тонких плівок

Мета роботи – ознайомитися з методикою вимірювання товщини тонких плівок за допомогою лазерного випромінювання; побудувати градувальну розмірну залежність освітленості для тонких плівок міді.

Елементи теорії. Під час проходження лазерного випромінювання через напівпрозоре середовище промінь втрачає свою інтенсивність внаслідок розсіювання. Це явище використовують для вимірювання коефіцієнта прозорості речовини:

$$k = \frac{I}{I_0}, \quad (1)$$

де I_0 – інтенсивність вихідного лазерного пучка;

I – інтенсивність лазерного пучка, що пройшов через речовину.

У тонких металевих плівках коефіцієнт прозорості обернено пропорційний до товщини плівок. Цю залежність використовують для вимірювання товщини тонких плівок.

Методика вимірювання

1. Тонку плівку наносять на прозору підкладку, здебільшого на пластини лабораторного скла.

2. Прямим методом (наприклад, інтерферометром) вимірюють товщину d одержаних зразків.

3. Вимірюють освітленість E лазерного випромінювання, що пройшло через тонку плівку.

4. У результаті одержують пряму відповідність між товщиною плівки й освітленістю.

5. Провівши аналогічні операції для зразків одного матеріалу різної товщини (не менше ніж 5), одержаних одним і

тим самим методом та освітлених одним і тим самим лазером, будують градувальні залежності $E(d)$.

Цей метод вимірювання товщини відомий достатньо давно й був поширеним у 1970–1990-х рр. минулого століття. Проте, зважаючи на його істотні недоліки, такі як висока похибка вимірювання (5–15%), необхідність градування для кожного металу відповідно до методу одержання плівок, наявність стабільних лазерів і точних люксометрів, та доступність сучасних частотомірів (ефективні для точного вимірювання товщини методом кварцового резонатора), то використання лазерів для вимірювання товщини значно зменшилося.

На сьогодні смартфони – невід’ємна частина життя, але більшість користувачів навіть не уявляє, на що здатні ці пристрої з усіма ввімкненими функціями. Розвиток електроніки й сенсорної техніки не стоїть на місці, тому з кожним роком моделі стають усе досконалішими, а вибір та функціонал – усе ширшим.

Сучасні смартфони є достатньо потужними кишеньковими комп’ютерами, що, крім комунікативної функції, забезпечують виконання інших складних розрахункових завдань. Зокрема, вони оснащені чутливою системою сенсорів, здатною забезпечити одночасне вимірювання з високою точністю різних фізичних величин (освітленості, індукції магнітного поля, прискорення, тиску та ін.).

Сенсорна система смартфона містить у собі датчик освітленості, за допомогою якого можна визначити освітленість лазерним променем. Доступність кишенькових лазерів (лазерних указок) і смартфонів дає змогу студентам вимірювати товщину тонких плівок у лабораторних практикумах.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з елементами теорії.
2. Підготувати до роботи вакуумну установку ВУП-5М.

3. Отримати тонку плівку міді на скляній підкладці методом термічного випаровування у вакуумі. Одержати 3–5 зразків різної товщини (від 20 нм до 100 нм).

4. Інтерферометричним методом (інтерферометр МП-4) виміряти товщину отриманих плівок.

5. Установити на смартфон безкоштовний мобільний додаток «Physics Toolbox Suite» і визначити, який датчик освітленості встановлено на вашому пристрої.

6. Скласти схему вимірювання освітленості (рис. 1).

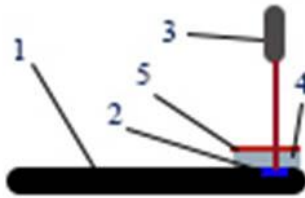


Рисунок 1 – Схема вимірювання товщини плівки:

- 1 – смартфон; 2 – сенсор освітленості; 3 – лазерна указка (довжина хвилі лазерного випромінювання $\lambda = 630$ нм);
4 – скляна підкладка; 5 – тонка плівка

7. Виміряти освітленість сенсора лазерним променем для ваших зразків.

8. Побудувати розмірну залежність освітленості $E(d)$. Оскільки в інтервалі товщин від 20 нм до 100 нм така залежність близька до лінійної, на експериментальній залежності потрібно провести апроксимувальну пряму.

9. Зробити висновки щодо роботи.

Зміст звіту

1. Номер, назва й мета роботи.
2. Конспект елементів теорії.
3. Рисунки, таблиці та графіки згідно із завданням.
5. Висновок.

Контрольні запитання

1. Який фізичний зміст коефіцієнта прозорості речовини?
2. Яка методика вимірювання товщини тонких плівок за допомогою лазерного випромінювання?
3. Які основні недоліки методу вимірювання товщини тонких плівок за допомогою падіння інтенсивності лазерного випромінювання?
4. Яким сенсором вашого смартфона ви можете виміряти освітленість?
5. Який тип лазера та яку довжину хвилі випромінювання ви використали в цій роботі?

Електронне навчальне видання

Методичні вказівки
до лабораторних робіт
із курсу «**Оптоелектронні системи та лазерні технології**»
для студентів спеціальності 171 «*Електроніка*»
освітнього ступеня «магістр»
денної, заочної й дистанційної форм навчання

Відповідальний за випуск І. Ю. Проценко
Редактор О. В. Федяй
Комп'ютерне верстання А. О. Степаненка

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 2,27. Обл.-вид. арк. 1,89.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.