МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ХАРКІВСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАУКОВО-НАВЧАЛЬНИЙ ІНСТИТУТ
КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
Кафедра інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем магістр

«Дифракційний метод вимірювання діаметра тонких волокон»

Виконав: студент 2 курсу, групи НФ-63
Мамедов Р. Ш.
Спеціальність: 105 Прикладна фізика
та наноматеріали
Освітня програма: Прикладна фізика
енергетичних систем
Керівник: д.ф.-м.н., проф.Кокодій М.Г.
Рецензент:

Харків – 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально - науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра інформаційних технологій у фізико-енергетичних системах
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр
Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Руслан СУХОВ
підпис
"____"_____2023 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Мамедов Роман Шахинович

1.Тема роботи «Дифракційний метод вимірювання діаметра тонких волокон» керівник роботи: Кокодій Микола Григорович, доктор фізико-математичних наук, професор.

Затверджено наказом по університету від 12 вересня 2023 року № 4201–5/2491.

2. Строк подання студентом роботи 07.12.2023

3. Перелік питань, які потрібно розробити:

1) Огляд методів вимірювання діаметра тонких волокон

2) Експериментальна вимірювальна установка

3) Вимірювання діаметра волокон за допомогою окулярного мікрометра

4) Вимірювання діаметра волокон мікроскопом з цифровою приставкою

5) Вимірювання діаметра волокон дифракційним методом

6) Порівняння методів вимірювання

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вибір теми.
2	Затвердження теми на кафедрі
3	Робота над літературою та іншими джерелами
4	Написання вступу до роботи та першого розділу
5	Написання другого розділу
6	Написання третього розділу
7	Завершення написання дипломної роботи (висновки та література)
8	Подача науковому керівнику
9	Відгук, рецензія, підготовка до захисту
10	Попередній захист
11	Захист

5. Дата видачі завдання

Студент _____ Роман МАМЕДОВ
підпис

Керівник роботи _____ Микола КОКОДІЙ
підпис

РЕФЕРАТ

Мамедов Роман «Дифракційний метод вимірювання діаметра тонких волокон» Кваліфікаційна робота магістра з прикладної фізики. – Х.: ХНУ імені В. Н.Каразіна, 2023. – 37 с.

В роботі досліджуються методи вимірювання поперечних розмірів тонких волокон (діаметром від декількох мікрометрів до декількох десятків мікрометрів). Зроблено огляд декількох методів вимірювання – механічними мікрометрами, методами з застосуванням мікроскопів, дифракційних методів.

Більш детально розглянуто дифракційний метод. Встановлено, що загальновживаний метод з вимірюванням першого дифракційного мінімуму можна застосовувати для непрозорих волокон, але він дає великі похибки при вимірюванні прозорих волокон. Виведена формула для вимірювання діаметра прозорих волокон.

Проведені вимірювання діаметра металевої дротинки і скловолокна декількома методами і зроблено порівняння одержаних результатів.

Ключові слова: металеві волокна, скловолокно, вимірювання, діаметр, дифракційний метод.

ABSTRACT

Roman Mamedov

Qualification work of the master of applied physics. – Kharkiv. – V.N. Karazin KhNU, 2023. – 37 p.

Methods of measuring the transverse dimensions of thin fibers are investigated in the work. An overview of several measurement methods was made - mechanical micrometers, methods using microscopes, diffraction methods.

The diffraction method is considered in more detail. It was established that the commonly used method with the measurement of the first diffraction minimum, but it gives large errors when measuring transparent fibers. Derived formula for measuring the diameter of transparent fibers.

Measurements of the diameter of the metal wire and glass fiber were made by several methods and the results were compared.

Key words: metal fibers, glass fiber, measurement, diameter, diffraction method.

ЗМІСТ

Вступ……7
Розділ 1. Мікрометри……10
1.1. Механічний мікрометр з лінійним відліком……..10
1.2. Електронний мікрометр з цифровим відліком……..14
1.3. Переваги та недоліки окулярного мікрометра……...……18
Розділ 2. Мікроскоп з окулярним мікрометром……..……20
2.1. Принцип роботи окулярного мікрометра……...20
2.2. З яких частин складається окулярний мікрометр……..21
2.3. Переваги та недоліки окулярного мікрометра……...23
Розділ 3. Вимірювання діаметра оптичних волокон дифракційним методом з цифровою обробкою картини розсіювання світла……..……..……..25
Розділ 4. Експеримент та обробка результатів..……...33
Висновки…….……36
Список використаних джерел та літератури…….……..37

ВСТУП

При вирішенні багатьох завдань фізики, техніки, хімії, біології, екології необхідно вимірювати розміри та оптичні властивості твердих або рідких частинок, у тому числі волокон – скляних, полімерних, металевих, графітових та ін. В останні роки виникло завдання вимірювання діаметра нановолокна. Актуальними залишаються завдання вимірювання діаметрів волокон у діапазоні від кількох мікрометрів до кількох сотень мікрометрів. Вирішення цих і подібних завдань присвячено, наприклад, роботи [1-4].

За допомогою формул, що пов'язують положення дифракційних мінімумів із довжиною хвилі випромінювання та діаметром волокна, визначають значення останнього.

Точні математичні вирази, що описують дифракцію електромагнітної хвилі на циліндрі, яким є волокно, дуже громіздкі. Навіть у найпростішому випадку кругового циліндра – це довгі ряди з доданками, що містять функції Бесселя та Ханкеля. Так, вирази для індикатриси розсіювання *F(φ)* мають такий вигляд:

$$F(\varphi) = |T(\varphi)|^2, \tag{1}$$

де

$$T(\varphi) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} b_l cosl\varphi, \tag{2}$$

$$b_l = \frac{mJ_l^{'}(m\rho)J_l(\rho) - J_l(m\rho)J_l^{'}(\rho)}{mJ_l^{'}(m\rho)H_l^{(2)}(\rho) - J_l(m\rho)H_l^{(2)'}(\rho)}, \tag{3}$$

$\rho = \frac{\pi d}{\lambda}$, d – діаметр циліндра, λ – довжина хвилі випромінювання, m – відносний комплексний показник заломлення, $J_l(z)$ і $H_l^{(2)}(z)$ – функції Бесселя і Ханкеля, φ – кут розсіювання, що відраховується від напрямку поширення випромінювання.

Ці формули відносяться до випадку, коли електричний вектор хвилі паралельний осі циліндра (*E*-хвиля). У разі *H*-хвилі (магнітний вектор хвилі

паралельний осі циліндра) замість коефіцієнтів b_l у формулах беруть участь коефіцієнти

$$a_l = \frac{mJ_l(m\rho)J_l^{'}(\rho) - J_l^{'}(m\rho)J_l(\rho)}{mJ_l(m\rho)H_l^{(2)'}(\rho) - J_l^{'}(m\rho)H_l^{(2)}(\rho)}. \quad (4)$$

Для визначення діаметра волокна необхідно вирішити обернену задачу - виміряти положення нулів індикатриси розсіювання і підібрати таке значення діаметра волокна, щоб у обчисленій за формулою (1) індикатрисі розсіювання положення нулів були такими ж, як в експерименті. Для цього потрібно зробити багато обчислень. Оскільки наведені вище суворі математичні співвідношення дуже складні, це може тривати багато часу. Обчислення стають ще тривалішими, якщо невідомий показник заломлення, і потрібно перебирати його можливі значення.

Тому використовуються різні наближені формули для індикатриси розсіювання. Якщо волокно непрозоре (металеве, графітове тощо), застосовується такий вираз:

$$F(\varphi) = \rho^2\left(\frac{sin\rho\varphi}{\rho\varphi}\right)^2. \quad (5)$$

З нього випливає, що перші мінімуми індикатриси розсіювання знаходяться під кутами

$$\varphi_k = \frac{k\pi}{\rho} = \frac{k\lambda}{d}, \qquad k = 1, 2, 3, \ldots \quad (6)$$

У разі прозорих волокон формулами (5-6) користуватись не можна – виходить велика похибка. Для такого випадку в роботі пропонується методика визначення діаметра волокна з вимірювань положення мінімумів або максимумів індикатриси розсіювання в області кутів від 30^o до 60^o. При цьому необхідно знати показник заломлення волокна.

У цій роботі:

1. Обґрунтовано метод вимірювання діаметра товстих волокон за становищем двох перших мінімумів індикатриси розсіювання. Він застосовується як для прозорих, так і для непрозорих волокон.

2. Для детектування картини розсіювання зазвичай використовуються одиночні приймачі або ПЗЗ-матриці. У першому випадку здійснюється просторове сканування, що є досить тривалим процесом. Використання ПЗЗ-матриць полегшує та прискорює вимірювання. Але матриці зазвичай малі – розмір приймального майданчика, яку падає світло, вони, зазвичай, становить 1-2 см, а розміри дифракційної картини у місці розташування приймача випромінювання може бути набагато більшими.

У цій роботі описано метод вимірювання параметрів дифракційної картини, який полягає в наступному:

- цифровою камерою фотографується на екрані картина розсіяного волокном світла;

- за допомогою комп'ютера здійснюється оцифрування зображення;

- Результати оцифрування підставляються в необхідні формули.

У роботі такий метод був використаний для вимірювання розмірів мікрочастинок. При цьому необхідно було виміряти амплітудну характеристику фотоапарата, що є досить складним завданням.

1. Мікрометри

Мікрометр є дуже широко використовуваним інструментом для вимірювання зовнішнього діаметра, товщини тощо. Це найбільш часто використовуваний майстер-інструмент для лінійних вимірювань завдяки своїй простій конструкції, простоті використання, швидкості роботи та досить високій точності вимірювань. Кожен верстатник, механік, технік і конструктор має свій мікрометр. Його універсальний дизайн дозволяє вимірювати різні зовнішні поверхні, що робить його універсальним інструментом.

Якість сучасних мікрометрів дуже висока. Гвинти з прецизійним шліфуванням, гвинтові та гайкові з’єднання без люфтів і твердосплавні торцеві вимірювальні поверхні забезпечують плавний рух гвинтів без хитання торцевих поверхонь. Використання нержавіючої сталі та термообробка забезпечує антикорозійні властивості інструменту, стійкість до зношування та корозії. Перевагою мікрометрів є те, що вони відповідають принципу Аббе, що значно підвищує точність вимірювань.

Сучасні мікрометри, мікрометричні прилади та інструменти діляться на дві групи:

- мікрометр механічний зі шкалою відліку ліній і ноніусом;
- електронний мікрометр з цифровим відліком.

Лінійний мікрометр називається аналоговим, а цифровий – цифровим.

1.1. Механічний мікрометр з лінійним відліком

Основним елементом мікрометра є пара мікрометричних гвинтів. При цьому поступальний рух вимірювальної поверхні (торця) гвинта мікрометра пов'язаний з обертанням відлікового барабана. Один оберт мікрогвинтового барабана еквівалентний переміщенню кінчика мікрогвинта на один крок різьби. У більшості конструкцій крок різьби становить 0,5 мм, а барабан має градацію 50 або 100. Таким чином, ціна розділення зчитування становить 0,01 або 0,05

мм. Точність мікрогвинтів залежить від точності гвинтового приводу, тому їх виготовлення вимагає особливої обережності. Гвинт виготовлений із загартованої сталі. Різьба гвинта шліфуються на високоточних верстатах. Латунна гайка розрізна для усунення люфту гвинтового приводу. Мікрометрична пара приладу виконана у вигляді окремого пристрою, що називається мікрометричною головкою рис. 1.



Рисунок 1. Мікрометрична головка

Мікрометричні головки входять до складу різноманітних приладів, включаючи мікрометри для різних цілей, вимірювачі отворів, глибиноміри, вимірювальні пристрої або пристрої для визначення точних рухів.

У голівці мікрометричний гвинт переміщується разом з барабаном відносно хвостовика, який жорстко з'єднаний з мікрометричною гайкою. Головка мікрометра зазвичай має дві поділки рис. 2. Кругова шкала для визначення часток обертів і лінійна шкала для визначення загального числа обертів мікрометричного гвинта. Зовнішню поверхню ніжки (або гільзи, розташованої на ніжці) позначають лінійними лусочками і вертикальними штрихами.

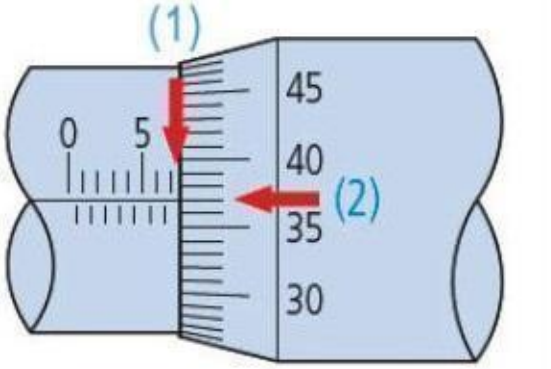


Рисунок 2. Барабан мікрометра

Ціна поділки лінійної шкали дорівнює кроку гвинта. Довжина поділки 1,0 мм наноситься на дві частини шкали, розташовані на відстані 0,5 мм і зсунуті відносно одна одної на 0,5 мм. Загальна довжина лінійної шкали визначається вимірювальним ходом гвинта мікрометра (зазвичай 25 мм). На скошеній грані барабана нанесені кругові шкали, кінці яких являють собою лінійні шкали. Індикатори кругової шкали являють собою вертикальні штрихи лінійної шкали.

Діаметр барабана вибирають таким чином, щоб довжина розрізу становила приблизно 1 мм. Для обчислення дробових поділок на круговій шкалі в деяких випадках використовують ноніус, схожий на ноніус штангенциркуля, який можна читати без паралакса. Величина поділу ноніуса становить 0,001 мм. Однак використання ноніуса має сенс лише в тому випадку, якщо розрахований коефіцієнт розщеплення менший за похибку передачі мікрометра.

Для стабілізації вимірювальної сили передбачені спеціальні пристрої (тріскачки або муфти), встановлені на барабані. За допомогою цього пристрою на вимірювальній поверхні мікрометричного гвинта створюється сила, яка для більшості мікрометричних головок знаходиться в діапазоні від 5 до 10 Н.

Мікрометр — універсальний прилад для зовнішніх вимірювань.



Рисунок 3. Мікрометр

Мікрометр рис. 3 має скобу, на якому з одного боку встановлена головка мікрометра, а з іншого - п'ята. Конструкція мікрометра забезпечена фіксатором для фіксації гвинта мікрометра. Вимірювальною поверхнею мікрометра є

площина, паралельна кінчику гвинта мікрометра та п’яті, зазвичай діаметром 8 мм. Для підвищення точності вимірювань випускаються мікрометри з діапазоном вимірювання до 100 мм, діаметр робочої поверхні (стрижень і п'ята) зменшений до 6,5 мм. Для підвищення зносостійкості вимірювальна поверхня мікрометра виготовлена з твердого сплаву. Для установки нульової точки мікрометр з нижньою межею вимірювання 25 мм оснащений установкою. Більшість механічних мікрометрів мають коефіцієнт шкали 0,01 мм. Виготовляється також мікрометр з використанням товщиною розколу 0,05 мм і ноніуса з щільністю 0,001 мм.



Рисунок 4.Механічний мікрометр (скоба) для вимірювання великих діаметрів

Мікрометр для вимірювання діаметрів (скоб) понад 500 мм виготовлений із зварної труби для зменшення ваги і забезпечений ізоляційною прокладкою рис. 4. Скоби постачаються розміром 100 мм кожна та оснащені змінними наконечниками з кроком 25 мм. Діапазон вимірювання мікрометричних скоб до 1500 мм. Похибка вимірювання скоб іноді визначається за формулою:

$$U = \pm \left(6 + \frac{L}{75}\right) \text{мкм},$$

де L — максимальна межа вимірювання цього скоби в мм.

Слід зазначити, що вимірювання великих діаметрів (більше 500 мм) за допомогою мікрометричних затискачів - дуже незручне заняття, що вимагає досвіду і терпіння. Результати вимірювань недостовірні.

Скоби більшого розміру доступні зі штриховими або електронними головками з цифровим зчитуванням. Це полегшує процес вимірювання. У деяких випадках електронні головки оснащені функціями виведення на зовнішні пристрої, що дозволяє виконувати кілька послідовних вимірювань і статистичну обробку результатів.

1.2. Електронний мікрометр з цифровим відліком

Незважаючи на поширеність мікрометрів зі штриховими шкалами і ноніусними шкалами, зчитування двох лінійних шкал і сумування їх результатів незручне, особливо в умовах поганого зору і поганого освітлення. Тому поява електронних мікрометрів з цифровим відліком зробила процес вимірювання набагато простішим, зручнішим і в деяких випадках точнішим.

Конструктивно електронні мікрометри рис. 5 мало відрізняються від механічних мікрометрів, але замість лінійної шкали вони оснащені інкрементним ємнісним або індуктивним перетворювачем, компактною електронікою і цифровим дисплеєм. Датчик схожий на інкрементальний перетворювач, який використовується в штангенциркулях. Він складається з двох невеликих дискових пластин з електродами, розташованими окремо одна від одної. Один диск обертається разом з гвинтом, а другий диск фіксується і утримується на місці ключем, розташованим уздовж гвинта. Обидва диски рухаються разом з мікрогвинтом протягом усього ходу гвинта.



Рисунок 5.Електронний мікрометр

Скоба мікрометра також містить електронний мікропроцесор і цифровий дисплей з роздільною здатністю зчитування 0,01 мм або 0,001 мм. Висота цифр 7-9 мм. У цьому випадку є дві кнопки: «Вкл./Вимк.» і налаштування нуля. П’яту мікрометра можна використовувати разом або нульову точку можна встановити в будь-якій точці діапазону вимірювання (наприклад, для контролю розміщення ідентичних частин). Деякі моделі мають додаткові функції, такі як сортування за розміром, друк і інтерфейс для зовнішніх пристроїв (наприклад, комп’ютерів або спеціальних пристроїв). Для підключення до зовнішніх пристроїв мікрометр оснащений кабелем з роз'ємом USB. Також виробляються моделі, які дозволяють передавати дані без кабелю через невеликий передавач із кнопкою. Можливість передачі результатів вимірювань на зовнішній пристрій використовується для статистичної обробки результатів вимірювань партії деталей.

Крім стандартного мікрометра, є інші моделі, які вимірюють товщину стінки труб зі сферичною вимірювальною поверхнею, вимірює м'які матеріали з дископодібною вимірювальною поверхнею, вимірює середній діаметр різьби, загальну нормальну довжину зубчастих коліс з дископодібною вимірювальною поверхнею, вимірює зовнішній діаметр багато-лезових інструментів тощо.

Сумарна похибка вимірювання за допомогою мікрометра складається з таких складових:

- похибка мікрометричної головки;

- відхилення площинності і паралельності плоских вимірювальних поверхонь гвинта і п'яти (при різних і зафіксованих кутах повороту гвинта мікрометра). При роботі з мікрометром відхилення паралельності вимірювальних поверхонь гвинта і п'яти викликають різні похибки в залежності від форми вимірюваної деталі (плоска, циліндрична, сферична). Залежно від дії вимірювальної сили змінюється і деформація цих деталей.
- скоба мікрометра деформується внаслідок дії вимірювальної сили.
- похибки в монтажних діях;
- важливою складовою похибки вимірювання в мікрометрах (особливо мікрометрах великого розміру) є температурна похибка, викликана різницею температур між вимірюваною частиною та мікрометром, нагріванням мікрометра, а іноді і нагріванням контрольованої частини, теплом руки контролера (термозахисна прокладка передбачена для зменшення похибок у мікрометрах під час вимірювання розмірів більше 50 мм).
- похибки, які виникають в електронних мікрометрах через помилки в ємнісних або індуктивних перетворювачах.

Границі допусків похибки мікрометрів наведено в табл. 1. Зазначені значення похибок базуються на діапазоні вимірювання.

Межі допуску мікрометричної головки (при виготовленні окремого виробу), мають форму максимальної похибки $\delta = \pm 4$ мкм.

Максимальний допуск похибки G мікрометра в будь-якій точці діапазону вимірювання (25 мм) вказано в табл. 1:

Діапазон вимірів, мм	Гранично допустима похибка G, мкм	Відхилення від паралельності та площинності гвинта та п'яти, мкм
0 – 50	4	2
50 – 100	5	2
100 – 150	6	3
150 – 200	7	4
200 – 250	8	4
250 – 300	9	5
300 – 350	10	5
350 – 400	11	6
400 – 450	12	6
450 – 500	13	7

Максимальний допуск G, наведений у таблиці, включає похибки мікрометричної голівки, похибки через прогин скоби мікрометра та похибки через нерівності та непаралельність вимірювальної поверхні.

Калібрування і перевірка мікрометрів проводиться за допомогою штампів в різних точках діапазону вимірювань. Калібр вибирають таким чином, щоб максимальну похибку вимірювання G мікрометра можна було визначити в будь-якій точці діапазону вимірювання. Наприклад, рекомендований калібр для мікрометричного контролю становить 3,1; 6,5; 9,7; 12,5; 15,8; 19,0; 21,9 і 25 мм.

Щоб перевірити відхилення площинності та паралельності вимірювальних поверхонь мікрометра (наконечник гвинта та п’ята), використовуйте градієнт висоти 1/4 або 1/3 (0,5 мм) кроку мікрогвинта. Це дозволяє повністю повернути мікрогвинт і перевірити його в трьох або чотирьох положеннях.

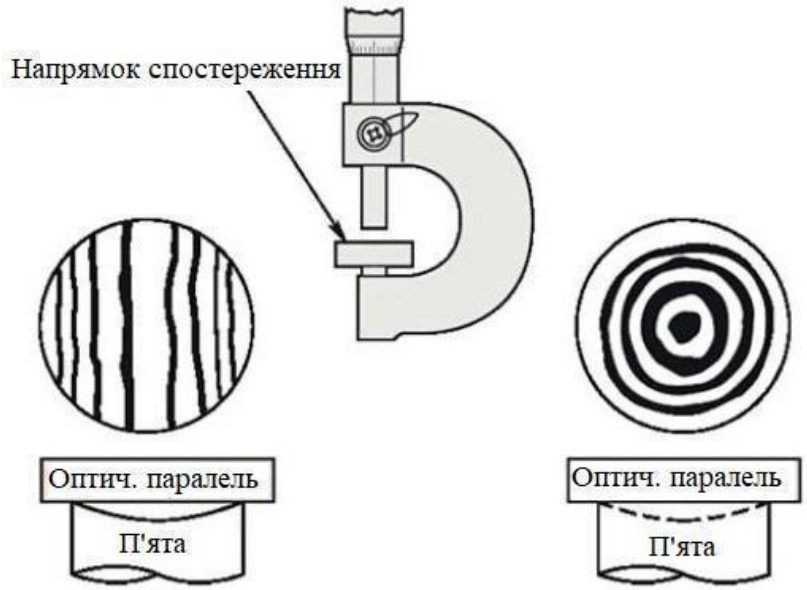


Рисунок 6. Перевірка паралельності торців п'ят по оптичному склу

Щоб перевірити, помістіть пластину між п’ятою та кінцем гвинта. Визначте мінімальну кількість інтерференційних кілець або смуг на одній вимірювальній поверхні, обережно переміщаючи пластину між вимірюваними поверхнями рис. 6.

Додайте до цього числа кількість кілець або смуг на інших вимірювальних поверхнях. При довжині світлової хвилі приблизно 640 нм одна інтерференційна картина має ширину 320 нм (0,32 мкм).

Важливо відзначити, що мікрометри забезпечують відмінну простежуваність, якщо їх перевірити або відкалібрувати.

1.3. Переваги та недоліки окулярного мікрометра

Мікрометр (іноді званий мікрометричним гвинтом) – це вимірювальний інструмент, який використовується для точних вимірювань довжини, товщини або діаметра об'єктів. Ось деякі переваги та недоліки мікрометра:

Переваги:

Висока точність: Мікрометр забезпечує дуже точні вимірювання завдяки його механічному механізму та мікрометричній шкалі.

Довговічність: Мікрометри, як правило, виготовляються із міцних матеріалів та можуть служити довгий час.

Вимірювання зовнішніх та внутрішніх розмірів: Існують різні види мікрометрів, включаючи зовнішні та внутрішні мікрометри, що дозволяє вимірювати обидва типи розмірів.

Недоліки:

Обмеження за розміром: Мікрометр не підходить для вимірювання великих об'єктів через свої обмежені розміри.

Можливість зношування: Після багаторазового використання мікрометр може піддаватися зношуванню, що впливає на його точність.

2. Мікроскоп з окулярним мікрометром

Окулярний мікрометр, який зазвичай називають окулярним мікрометром, є важливим інструментом, який використовується в мікроскопах для точного вимірювання розміру об’єктів, які спостерігаються через мікроскоп. Він відіграє важливу роль у різноманітних наукових і дослідницьких сферах, допомагаючи вченим і дослідникам аналізувати та кількісно оцінювати мікроструктури.

Мікрометричний окуляр складається з тонкого прозорого скляного диска з точним градуюванням, ретельно вигравіруваним на ньому. Шкала зазвичай ділиться на 100 поділок, і кожна поділка має довжину 0,01 мм (мкм). Важливо відкалібрувати мікрометр окуляра, і це робиться шляхом порівняння його зі столичним мікрометром, який є спеціальним столиком із точно розміщеними позначками, які використовуються для калібрування.

Щоб використовувати окуляр-мікрометр, ви повинні спочатку встановити столик на столик мікроскопа та сфокусувати його за допомогою ручок грубого та точного регулювання. Уважно спостерігаючи та підраховуючи кількість поділок окулярного мікрометра, які збігаються з поділкою мікрометра одного предмета, можна визначити збільшення окулярного мікрометра.

Як тільки збільшення окулярного мікрометра встановлено, він стає потужним інструментом для вимірювання розміру мікроскопічних об’єктів.

2.1. Принцип роботи окулярного мікрометра

Принцип окулярного мікрометра полягає у використанні каліброваної шкали для точного вимірювання розміру об’єктів, які видно через мікроскоп. Ця шкала, зазвичай поділена на 100 поділок, кожна з яких має розмір 0,01 мм (мкм), є важливим компонентом, який розміщується в окулярі мікроскопа.

При спостереженні об'єкта в мікроскоп одночасно видно шкалу окулярного мікрометра. Щоб визначити розмір об’єкта, користувач підраховує

кількість поділок окулярного мікрометра, які відповідають довжині об’єкта, що вимірюється.

Щоб встановити справжні розміри об'єкта, необхідно знати збільшення мікроскопа. Цього можна досягти, підрахувавши кількість поділок на сітці окуляра, які відповідають одній поділці на мікрометрі предмета. Наприклад, якщо прицільна сітка окуляра має 10 поділок, що дорівнює одній поділці мікрометра, збільшення визначається як 10х.

За допомогою набору збільшення мікроскопа окулярний мікрометр можна використовувати для вимірювання розміру об’єктів. Підрахувавши кількість поділок мікрометра окуляра, які відповідають довжині спостережуваного об’єкта, можна точно обчислити розмір об’єкта в мікрометрах. Наприклад, якщо об’єкт охоплює 5 поділок мікрометра окуляра, а вказане збільшення становить 10х, розмір об’єкта становитиме 0,05 мм (мкм) або 50 мікрометрів.

Принцип дії окулярного мікрометра заснований на тому, що нанесені на приладі шкали точно відомі і вивірені. Підраховуючи поділки мікрометра окуляра, що відповідають довжині предмета, користувач може з великою точністю визначити його розмір у мікрометрах, часто досягаючи 0,01 мкм.

2.2. З яких частин складається окулярний мікрометр

Мікрометр-окуляр складається з кількох ключових компонентів, які працюють разом, щоб полегшити точні вимірювання об’єктів, які спостерігаються за допомогою мікроскопа. Ці частини включають:

1. **Шкала:** Шкала є основним і найважливішим компонентом мікрометра-окуляра. Це тонкий прозорий диск з градуйованим, точно відкаліброваним маркуванням. Шкала зазвичай ділиться на 100 поділок, і кожна поділка має довжину 0,01 мм (мкм). Ця шкала потрібна для вимірювання розмірів об’єктів під мікроскопом.
2. **Прицільна сітка окуляра:** Прицільна сітка окуляра — це ще одна невелика шкала корекції, розташована всередині окуляра мікроскопа.

Подібно до шкали окулярного мікрометра, сітка окуляра зазвичай поділена на 100 поділок, кожна поділка має довжину 0,1 мм (мкм). Ця сітка також використовується для вимірювання розміру об’єктів, які видно в мікроскоп.

3. **Корпус:** Корпус мікрометра-окуляра – це корпус, який містить шкалу та сітку окуляра. Зазвичай виготовлені з металу або пластику, вони призначені для надійного утримання каліброваного компонента всередині окуляра.
4. **Обкладинка:** Покривне скло – це тонкий шматок скла, який розміщується над шкалою та сіткою окуляра. Основна мета — забезпечити точність і довговічність мікрометра-окуляра шляхом захисту цих тендітних компонентів від подряпин та інших можливих пошкоджень.
5. **Фланець:** Фланець є важливою частиною мікрометра-окуляра, який полегшує кріплення до окуляра мікроскопа. Це забезпечує надійне та стабільне з’єднання між окуляром-мікрометром та мікроскопом, забезпечуючи послідовні та надійні вимірювання.
6. **Кошик:** Рама мікрометра-окуляра утримує шкалу та сітку окуляра на місці. Це підтримує та підтримує вирівнювання цих компонентів, що дозволяє проводити точні вимірювання під час мікроскопії.
7. **Гвинт:** Гвинт використовується для регулювання положення шкали окуляра та візирної сітки всередині мікрометра окуляра. Ці налаштування важливі для калібрування мікрометра та забезпечення точних вимірювань.

Таким чином, окулярний мікрометр складається з основних частин, таких як шкала та сітка окуляра, щоб точно вимірювати об’єкти, які спостерігаються через мікроскоп. Корпус, обкладинка, фланець, рама та гвинти відіграють важливу роль у кріпленні та вирівнюванні каліброваних компонентів, забезпечуючи функціональність і точність мікрометра. Розуміючи різні компоненти та функції, науковці та дослідники можуть ефективно використовувати мікрометри-окуляри для різноманітних мікроскопічних вимірювань та аналізів.

2.3. Переваги та недоліки окулярного мікрометра

Переваги:

Застосування окулярних мікрометрів має багато переваг і значною мірою сприяє їх широкому застосуванню в науковій та промисловій сферах. Деякі з ключових переваг включають:

Точність: окулярні мікрометри забезпечують високоточні вимірювання з точністю до 0,01 мм (мкм). Цей рівень точності має вирішальне значення в таких галузях, як біологія, нанотехнології та матеріалознавство, де точні вимірювання необхідні для досліджень і розробок.

Точність і відтворюваність: окулярні мікрометри дозволяють неодноразово вимірювати один і той же об'єкт і отримувати послідовні надійні результати. Ця точність є важливою для процесів контролю якості та наукових експериментів, забезпечуючи цілісність даних і відтворюваність.

Гнучкість: окулярні мікрометри знаходять застосування в різних галузях, включаючи біологію, хімію, фізику, техніку тощо. Ця універсальність дозволяє вченим та інженерам вимірювати різноманітні об’єкти в різноманітних галузях досліджень.

Вимірювання в реальному часі: окулярні мікрометри забезпечують миттєві вимірювання під час мікроскопічного спостереження в реальному часі. Ця можливість дозволяє дослідникам точно налаштовувати свої експериментальні установки розміру мікроскопічних структур.

Сумісність із різними мікроскопами: окулярні мікрометри можна використовувати з різноманітними мікроскопами, включаючи складені мікроскопи та стереомікроскопи, що робить їх придатними для широкого спектру застосувань у мікроскопії.

Тому окулярні мікрометри мають багато переваг. Ці переваги роблять його незамінним інструментом у наукових дослідженнях і промислових процесах, де точне вимірювання мікроскопічних об’єктів має першочергове значення.

Недоліки:

Хоча окулярні мікрометри пропонують численні переваги, вони також мають певні обмеження та недоліки, які слід враховувати. Деякі з основних недоліків:

Уразливість: окулярний мікрометр – це тонкий інструмент зі скла або пластику. У разі необережного поводження з ним можуть виникнути подряпини або поломки.

Праця: використання окулярного мікрометра може зайняти багато часу. Це особливо актуально під час встановлення на предметний столик мікроскопа та проведення точних вимірювань. Це може сповільнити експериментальний процес і збір даних.

Можливі неточності: окулярні мікрометри вимагають точного вирівнювання та ретельних вимірювань для забезпечення точності. Якщо мікроскоп використовується неправильно або неправильно відкалібрований, результати можуть бути неточними.

Розділ 3. Вимір діаметра оптичних волокон дифракційним методом з цифровою обробкою картини розсіювання світла

Процес вимірювання діаметра волокна дифракційним методом полягає у визначенні положення мінімумів індикатриси розсіювання світла волокном. За формулами, що пов'язують положення цих мінімумів із довжиною хвилі випромінювання та діаметром волокна, визначають значення останнього.

Вирази для індикатриси розсіювання *F(φ)* мають такий вигляд:

$$F(\varphi) = |T(\varphi)|^2 \tag{7}$$

де

$$T(\varphi) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} b_l cosl\varphi, \tag{8}$$

$$b_l = \frac{mJ_l^{'}(m\rho)J_l(\rho) - J_l(m\rho)J_l^{'}(\rho)}{mJ_l^{'}(m\rho)H_l^{(2)}(\rho) - J_l(m\rho)H_l^{(2)'}(\rho)}, \tag{9}$$

$\rho = \pi d/\lambda$, d – діаметр циліндра, λ – довжина хвилі випромінювання, m – відносний комплексний показник заломлення, $J_l(z)$ та $H_l^{(2)}(z)$ – функції Бесселя і Ханкеля, φ – кут розсіювання, що відраховується від напрямку поширення випромінювання.

Ці формули відносяться до випадку, коли електричний вектор хвилі паралельний осі циліндра (*E*-хвиля). У разі *H*-хвилі (магнітний вектор хвилі паралельний осі циліндра) замість коефіцієнтів b_l у формулах беруть участь коефіцієнти.

$$a_l = \frac{mJ_l(m\rho)J_l^{'}(\rho) - J_l^{'}(m\rho)J_l(\rho)}{mJ_l(m\rho)H_l^{(2)'}(\rho) - J_l^{'}(m\rho)H_l^{(2)}(\rho)}. \tag{10}$$

Для визначення діаметра волокна необхідно виміряти положення мінімумів індикатриси розсіювання та підібрати таке значення діаметра волокна, щоб у обчисленій за формулою (7) індикатрисі розсіювання положення мінімумів були такими ж, як в експерименті. Для цього потрібно зробити багато обчислень. Оскільки наведені вище суворі математичні співвідношення дуже

складні, це може тривати багато часу. Обчислення стають ще тривалішими, якщо невідомий показник заломлення, і потрібно перебирати його можливі значення.

Тому використовуються різні наближені формули для індикатриси розсіювання. Якщо волокно непрозоре (металеве, графітове тощо), застосовується такий вираз:

$$F(\varphi) = \rho^2\left(\frac{sin\rho\varphi}{\rho\varphi}\right)^2. \quad (11)$$

З нього випливає, що перші мінімуми індикатриси розсіювання знаходяться під кутами

$$\varphi_k = \frac{k\pi}{\rho} = \frac{k\lambda}{d}, \quad k=1,2,3, \ldots \quad (12)$$

Застосування формули (11) дає хороші результати, коли $\rho>>1$, тобто у разі товстих циліндрів. Відносна похибка у своїй приблизно дорівнює $1/\rho$. Це означає, що при вимірі волокна діаметром 30 мкм похибка не перевищує 0.7 %, якщо джерелом випромінювання використовується гелій-неоновий лазер (λ = 0.6328 мкм). Така похибка найчастіше прийнятна. Але якщо діаметр волокна становить кілька мікрометрів, похибка може стати неприпустимо великою. Наприклад, для діаметра 3 мкм вона сягає 7%.

У разі прозорих волокон формулами (11-12) користуватись не можна – виходить велика похибка. Для такого випадку в роботі пропонується методика визначення діаметра волокна з вимірювань положення мінімумів або максимумів індикатриси розсіювання в області кутів від 30° до 60°. При цьому необхідно знати показник заломлення волокна.

У цій роботі:

1. Обґрунтовано метод вимірювання діаметра товстих волокон за становищем двох перших мінімумів індикатриси розсіювання. Він застосовується як для прозорих, так і для непрозорих волокон.

2. Для детектування картини розсіювання зазвичай використовуються одиночні приймачі або ПЗЗ-матриці. У першому випадку здійснюється просторове сканування, що є досить тривалим процесом. Використання

ПЗЗ-матриць полегшує та прискорює вимірювання. Але матриці зазвичай малі – розмір приймального майданчика, яку падає світло, вони, зазвичай, становить 1-2 см, а розміри дифракційної картини у місці розташування приймача випромінювання може бути набагато більшими.

У цій роботі описано метод вимірювання, який полягає в наступному:

– цифровою камерою фотографується на екрані картина розсіяного волокном світла;

– за допомогою комп'ютера здійснюється оцифрування зображення;

У роботі такий метод був використаний для вимірювання розмірів мікрочастинок. При цьому необхідно було виміряти амплітудну характеристику фотоапарата, що є досить складним завданням.

Розглянемо завдання дифракції електромагнітної хвилі на заломлюючому циліндрі, діаметр якого набагато більший за довжину хвилі ($\rho >> 1$). Для функцій Бесселя і Ханкеля застосуємо асимптотичні формули Дебая [5]:

$$H_l^{(2)}(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi z sin\tau}} exp\left[-i\left(zf - \frac{\pi}{4}\right)\right],$$

$$H_l^{(2)'}(z) = \sqrt{\frac{2sin\tau}{\pi z}} exp\left[-i\left(zf + \frac{\pi}{4}\right)\right],$$

$$J_l(z) = Re\left\{H_l^{(2)}(z)\right\}.$$

Тут $f = sin\tau - \tau cos\tau$, $cos\tau = \frac{l}{\rho}$.

Підставивши ці формули у вираз (9) для коефіцієнтів b_l і зробивши деякі перетворення, отримаємо:

$$b_l = \frac{1}{2}\left[1 + ire^{2i\rho f_0} - \left(1 - r^2\right)e^{2i\rho\left(f_0 - nf_l\right)} \sum_{p=2}^{\infty} (-ir)^{p-2} e^{2i(p-2)\rho n f_l}\right].$$

(13)

де

$$f_0 = sin\tau_0 - \tau_0 cos\tau_0, \quad cos\tau_0 = \frac{l}{\rho},$$

$$f_1 = sin\tau_1 - \tau_1 cos\tau_1, \quad cos\tau_1 = \frac{l}{\rho},$$

$$r = -\frac{n\sin\tau_1 - \sin\tau_0}{n\sin\tau_1 + \sin\tau_0},$$

τ_0 і τ_1 – кути, що доповнюють до $\pi/2$ кути падіння та заломлення, r – френелевський коефіцієнт відбиття, n – показник заломлення циліндра.

Фізичний зміст виразу (13) наступний. Перше доданок відповідає випромінюванню, дифрагированному на утворюючих циліндра (розподіл інтенсивності описується формулою (11)). Друге - визначає випромінювання, відбите від поверхні циліндра за законами геометричної оптики. Третє відповідає променям, що вийшли з циліндра після двох, трьох і т.д. відбитків та заломлень усередині циліндра.

Променям, що йдуть уздовж діаметра циліндра, відповідає $\tau_0 = \pi/2$, тобто $l = 0$, променям, що ковзають уздовж поверхні циліндра, – $\tau_0 = 0$, тобто $l = \rho$. Тому при підстановці виразу (13) (8) можна вважати, що значення індексу l змінюються від $-\rho$ до ρ.

Аналогічні перетворення для коефіцієнта al також призводять до виразу (13), але при цьому

$$r = -\frac{n\sin\tau_0 - \sin\tau_1}{n\sin\tau_0 + \sin\tau_1}.$$

Підставимо тепер вираз (13) у (8). Підсумовування замінимо інтегруванням. Перший доданок інтегрується легко. Інтегрування другого та третього доданків проведемо методом стаціонарної фази. В результаті отримаємо:

$$T(\varphi) = \rho\frac{sin\rho\varphi}{\rho\varphi} + \frac{1}{2}r\left(\frac{\varphi}{2}\right)\sqrt{\pi\rho sin\frac{\varphi}{2}}e^{i\alpha'} - \frac{1}{4}\sum_{p=2}^{\infty}\left[1 - r^2\left(\tau_0''\right)\right]r^{p-2}\left(\tau_0''\right)\sqrt{\frac{\pi\rho sin\left(\tau_0''\right)}{1-\frac{p-1}{n}\frac{sin\left(\tau_0''\right)}{sin\left(\tau_1''\right)}}} \times$$

$$\times e^{i\alpha''} - \frac{1}{4}\sum_{p=2}^{\infty}\left[1 - r^2\left(\tau_0'''\right)\right]r^{p-2}\left(\tau_0'''\right)\sqrt{\frac{\pi\rho sin\left(\tau_0'''\right)}{1-\frac{p-1}{n}\frac{sin\left(\tau_0'''\right)}{sin\left(\tau_1'''\right)}}}e^{i\alpha'''},$$

(14)

де

$$\alpha' = 2\rho sin\frac{\varphi}{2} - \frac{3\pi}{4},$$

$$\alpha'' = 2\rho sin\tau_0'' - 2\rho n(p-1)sin\tau_1'' - (p-2)\frac{\pi}{2} + \delta\frac{\pi}{4},$$

$$\alpha''' = 2\rho sin\tau_0''' - 2\rho n(p-1)sin\tau_1''' - (p-2)\frac{\pi}{2} + \delta\frac{\pi}{4},$$

τ_0'' і τ_0''' знаходяться з рівняння $2\tau_0 - 2(p-1)\tau_1 \quad \varphi = 0$, у якому верхній знак відповідає τ_0'', нижній – τ_0'''.

Кути τ_0 та τ_1 пов'язані співвідношенням $cos\tau_0 = ncos\tau_1$.

Множник δ визначається так:

$$\delta = sign\left(1 - \frac{p-1}{n}\frac{sin\tau_0}{sin\tau_1}\right).$$

Вважаємо, що $n \approx 1$. Тому коефіцієнт відображення випромінювання від межі розділу середовищ невеликий, і в сумах третього і четвертого доданків вирази (14), що описують промені, що вийшли після багаторазових відображень з циліндра, найбільший внесок дають перші члени, відповідні двічі заломленим променям. Тільки їх ми і враховуватимемо в подальших перетвореннях. Далі визначимо становище перших мінімумів індикатриси розсіювання ($\varphi << 1$). У цьому третє і четверте доданки в (14) ще спрощуються, а другим – можна знехтувати.

В результаті, розділивши дійсну $T'(\varphi)$ і уявну $T''(\varphi)$ частини виразу (14), отримаємо:

$$T'(\varphi) = \rho\frac{sin\rho\varphi}{\rho\varphi} - Asin\gamma, \tag{15}$$

$$T''(\varphi) = -Acos\gamma, \tag{16}$$

де

$$A = \frac{2n}{(n+1)^2}\sqrt{\frac{\pi\rho n}{n-1}}, \qquad \gamma = 2\rho(n-1) + \frac{\pi}{4}.$$

З виразів (15) і (16) слід, що індикатриса розсіювання формується з променів, дифрагованих на краях (утворюючих) циліндра, і променів, що

пройшли через циліндр і зазнали двох заломлень. Інтенсивність останніх при φ << 1 розподілена у просторі рівномірно (від кута φ не залежить).

На рис. 7 показано графіки залежності дійсної $T'(\varphi)$ і уявну $T''(\varphi)$ складових індикатриси розсіювання циліндра діаметром 50 мкм із показником заломлення 1,5 при довжині хвилі випромінювання 0,532 мкм. Суцільними лініями показані результати розрахунків за строгими формулами, штриховими лініями – за формулами (15) та (16). Криві для дійсної складової практично збігаються до φ = 0,25. Далі видно деякі різницю між ними. Значення уявної складової, розраховане за наближеними формулами, від кута φ не залежить. Розрахунок за строгими формулами показує, що є невеликі коливання близько деякого середнього значення.

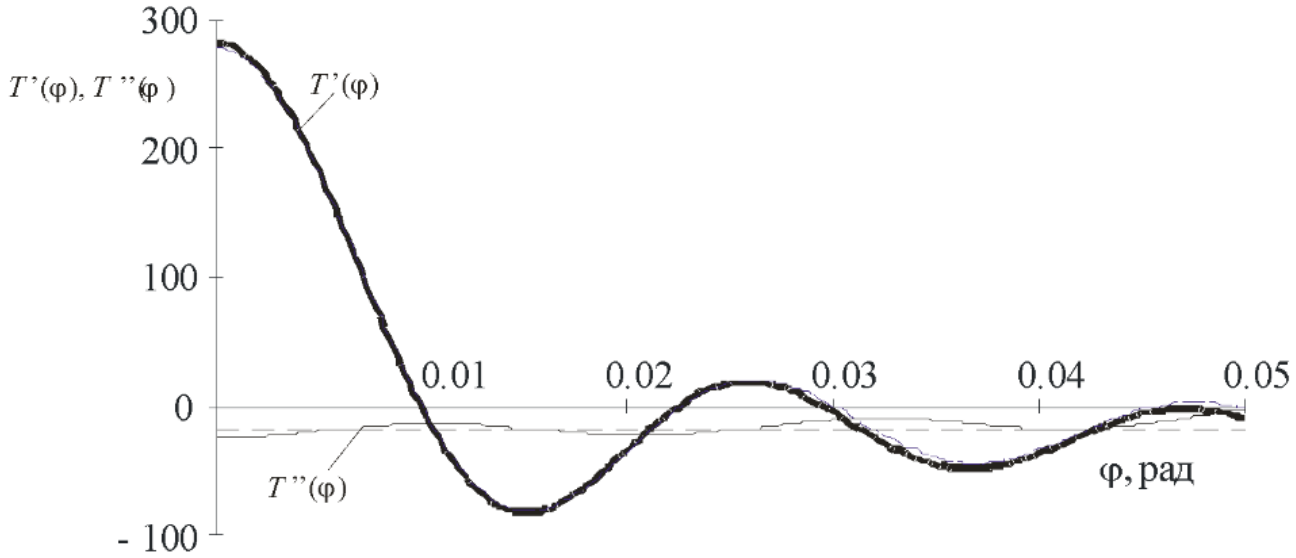


Рисунок 7. Компоненти індикатриси розсіювання циліндра

На рис. 8 показані результати розрахунку індикатриси розсіювання такого циліндра (товста суцільна лінія – за суворими формулами, штрихова лінія – за наближеними формулами (15) та (16), тонка суцільна лінія – за формулою (11) для непрозорого циліндра). До φ = 0,25 формули (15) і (16) описують хід зміни інтенсивності розсіяного світла $I(\varphi)$ добре, і визначити положення перших двох мінімумів індикатриси можна досить точно. Положення третього та наступних мінімумів описується цими формулами з великою похибкою. Пояснюється це тим, що формули (15) і (16) враховують лише два промені, що пройшли через циліндр.

Формула (11) для непрозорого циліндра визначає положення мінімумів з великими похибками.

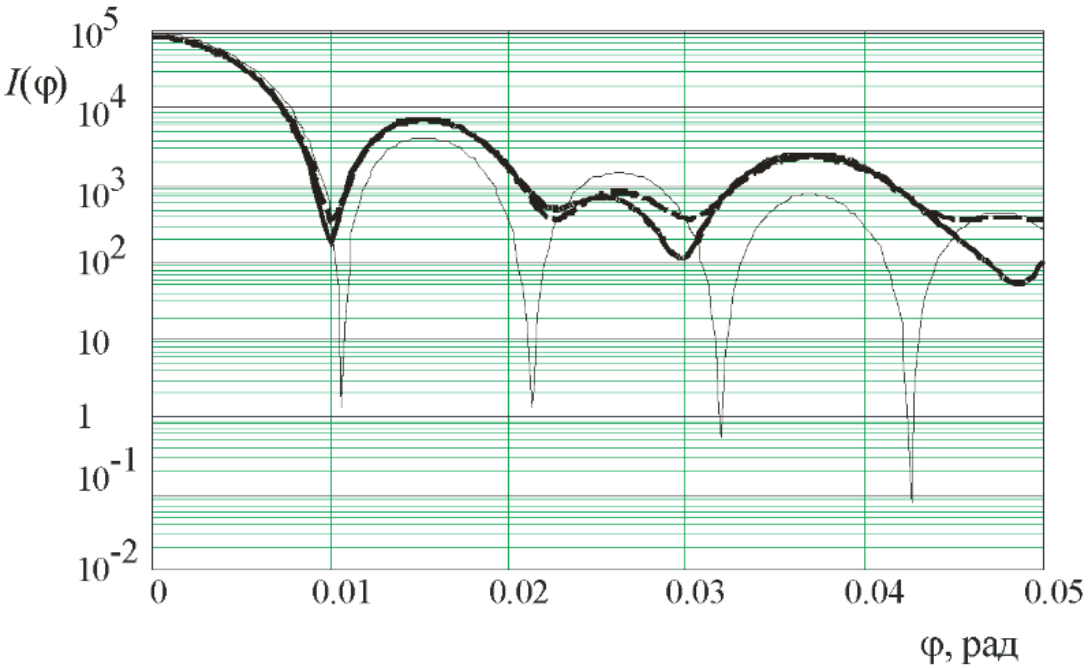


Рисунок 8. Індикатриса розсіювання циліндра (товста суцільна лінія – розрахунок за суворими формулами, штрихова лінія – розрахунок за формулами (15) та (16), тонка суцільна лінія – розрахунок за формулою (11).

Мінімуми індикатриси розсіювання знаходяться в точках, де $T'(\varphi) = 0$. При вирішенні трансцендентного рівняння (15) необхідно врахувати, що його друге доданок набагато менше першого, оскільки воно має порядок $\rho^{\frac{1}{2}}$, тоді як перше має порядок ρ. Тому значення кореня рівняння визначається, переважно, першим доданком, а друге дає малу добавку. Враховуючи це, отримаємо таке рішення:

$$\varphi_{1min} = \frac{\pi}{\rho}\left(1 - \frac{A}{\rho} sin\gamma\right). \quad (17)$$

Значення другого мінімуму буде таким:

$$\varphi_{2min} = \frac{2\pi}{\rho}\left(1 + \frac{A}{\rho} sin\gamma\right). \quad (18)$$

Формули (17) і (18) є системою з двох рівнянь з двома невідомими – ρ і γ. Вимірявши в експерименті кути φ_{1min} і φ_{2min}, та вирішивши її, можна визначити ці невідомі.

Але показник заломлення за допомогою цієї системи рівнянь не можна визначити. Функція *sinγ*, яка входить туди, швидко осцилює і існує дуже велика кількість рішень системи. Система може бути вирішена лише чисельним методом, і для виділення істинного значення показника заломлення потрібно задати його початкове значення з точністю 2-3 знаків після коми, що практично неможливо.

Діаметр волокна можна визначити в такий спосіб. Знайдемо лінійну комбінацію функцій (17) та (18):

$$2\varphi_{1min} + \varphi_{2min} = \frac{4\pi}{\rho}.$$

Звідси:

$$\rho = \frac{4\pi}{2\varphi_{1min}+\varphi_{2min}},$$

а діаметр волокна дорівнює:

$$d = \frac{4\lambda}{2\varphi_{1min}+\varphi_{2min}}. \qquad (19)$$

До формули (19) не входить показник заломлення. При вимірах знати його не потрібно. Формула застосовна до будь-яких волокон – як заломлюючим, так і поглинаючим. Це її перевага, порівняно з іншими відомими формулами, де необхідно знати показник заломлення.

Розділ 4. Експеримент та обробка результатів

Схема експериментальної установки показано на рис. 9.

Випромінювання лазера 1 потрапляє на волокно 2 і розсіюється ним. Розсіяне випромінювання формує на екрані 3 дифракційну картину 4 у вигляді світлих і темних смуг, що чергуються. Прямий промінь лазера проходить через отвір в екрані 3 і потрапляє в поглинач 5. Це необхідно, щоб світлова пляма на екрані від прямого променя, що має велику яскравість, не заважало фотографуванню дифракційної картини цифровим фотоапаратом 6. Відстань від волокна до екрана дорівнює 980 мм.

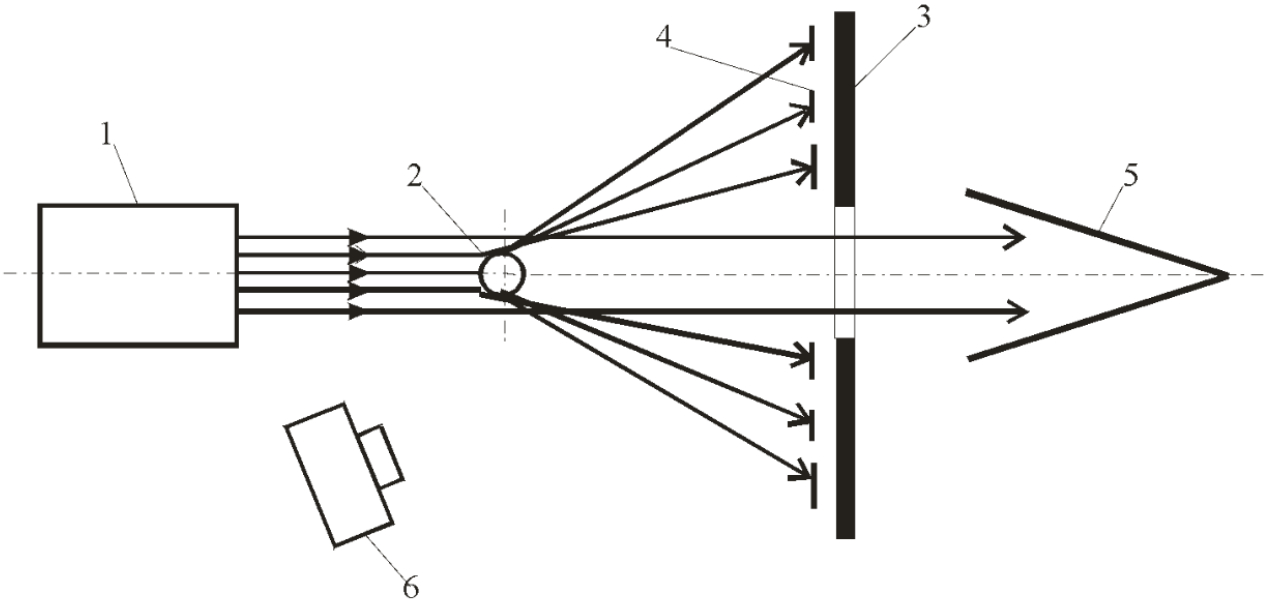


Рисунок 9. Схема експериментальної установки

На рис. 10 показаний фотознімок дифракційної картини, створеної скловолокном. Видно чергуючи дифракційні максимуми і мінімуми розсіяного випромінювання. У верхній частині картини нанесено шкалу міліметрових поділів.

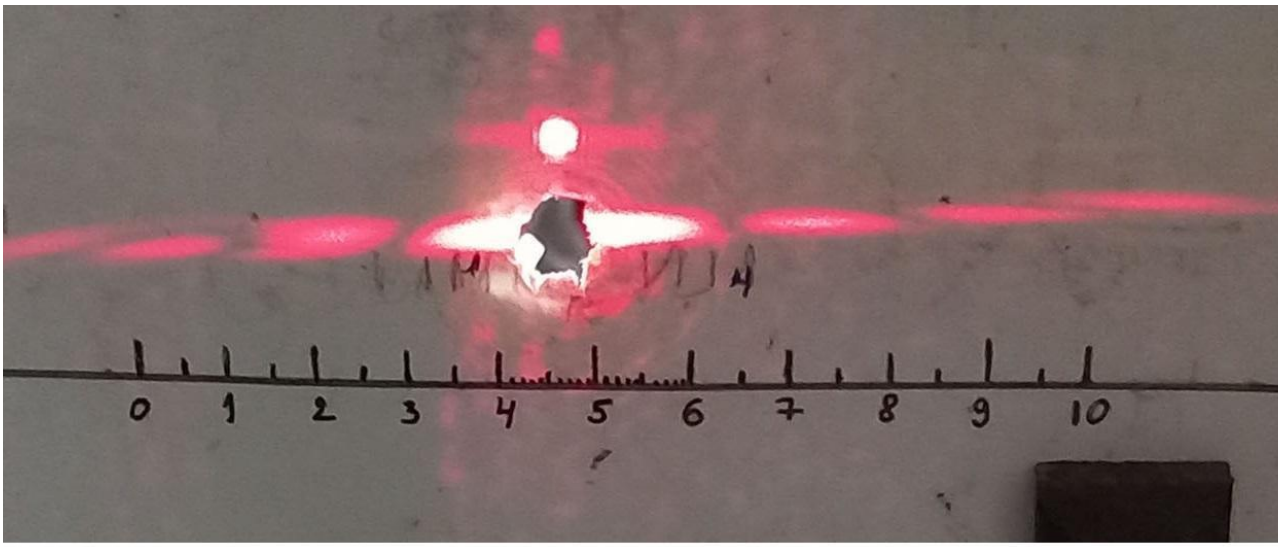


Рисунок 10. Картина розсіювання лазерного випромінювання на скловолокні

Використання окуляр-мікрометра для вимірювання діаметр тонких волокон:

Обладнання: Мікроскоп з окулярним мікрометром.

Вимірювання: Зразки волокон були прикріплені до предметного столика мікроскопа. Ми використовували окулярний мікрометр для вимірювання діаметра волокон, встановлюючи його в окуляр мікроскопа та фокусуючись на волокнах.

Результати вимірів:

Вимірювання 1: Діаметр дроту d = 58 мкм

Вимірювання 2: Діаметр скла d = 30 мкм

Мікроскоп підключений до комп'ютера:

Для вимірювання діаметра волокна було використано програмне забезпечення для аналізу зображень.

Процес виміру: Процес вимірювання: Зразки волокон були поміщені під мікроскоп, зображення волокон були захоплені з використанням програмного забезпечення. Потім вручну вимірювали діаметри волокон на зображеннях.

Результати вимірів:

Вимірювання 1: Діаметр дроту d = 54 мкм

Вимірювання 2: Діаметр скла d = 37 мкм

Дифракційний метод вимірювання діаметра тонких волокон:

L = 106 см. – відстань від волокна до екрану.

$\lambda = 0.633$ мкм.

Вимірювання діаметра дроту:

$$l_1 = 13.5$$

$$l_2 = 27.4$$

$D = \frac{4\lambda}{2\alpha_1+\alpha_2}$ – формула для вимірювання діаметра

$$\alpha_1 = \frac{l_1}{L} = 0.0127$$

$$\alpha_2 = \frac{l_2}{L} = 0.0258$$

$D = 49$ мкм

Вимірювання діаметра скла:

$$l_1 = 17.4$$

$$l_2 = 35.1$$

$D = \frac{4\lambda}{2\alpha_1+\alpha_2}$ – формула для вимірювання діаметра

$$\alpha_1 = \frac{l_1}{L} = 0.0164$$

$$\alpha_2 = \frac{l_2}{L} = 0.0331$$

$D = 38$ мкм

ВИСНОВКИ

1. Механічні мікрометри не можуть бути застосовані для вимірювань діаметрів мікрометрового діапазону. Для цього придатні оптичні методи – мікроскопні і дифракційні.

2. Дифракційний метод, в якому використовується вимірювань положення першого дифракційного мінімума, може застосовуватись для вимірювання діаметра непрозорих волокон. При його застосуванні для прозорих волокон можуть виникати великі похибки.

3. Виведено співвідношення для вимірювання діаметра прозорих волокон, які враховують вклад дифракції на краях, відбитих променів і променів, заломлених циліндром.

4. Проведені вимірювання діаметра металевого і скляного волокон різними методами. Результати вимірювань узгоджуються між собою.

ЛИТЕРАТУРА

1. Van de Hulst, H.C.: Light scattering by small particles. NY, Wiley, Dover (1981).

2. Kerker, M.: The scattering of light and other electromagnetic radiation. New York and London, Academic Press (1969).

3. Bohren, C.F., Huffman, D.R.: Absorbing and scattering of light by small particles. N.Y., Wiley, (1983).

4. Chugui Yu.I, Pavlov A.A. Peculiarities of cylinder diameter determination by diffraction method // Proc. IMEKO. – 2000. – Vol. 2. - P. 169.

5. Debye P. Das elektromagnetische Feld um einen Zylinder und die Theorie des Regenbogens // Physikalische Zeitschrift. – 1908. – B. 9, No. 22. – S. 775-778.