

Визначення довжини світлової хвилі за допомогою дифракційної ґратки

Мета роботи: вивчення явища дифракції світла та використання, цього явища для визначення довжини світлової хвилі.

Прилади та приладдя: гоніометр, прозора дифракційна ґратка, джерело світла з лінійчатим спектром.

Теоретичний вступ

При проходженні поблизу перешкод хвиль будь-якої природи (електромагнітних, звукових, хвиль на поверхні води та ін.) відбувається відхилення хвиль від прямолінійного поширення, огинання перешкод, загинання хвиль за перешкоду. Відбувається просторовий перерозподіл інтенсивності хвиль під впливом перешкод. Така властивість хвиль називається **дифракцією**. Дифракція стає добре видимою, якщо розміри перешкод (або отворів) одного порядку з довжиною хвилі.

З цією метою виготовляються дифракційні ґратки. **Дифракційна ґратка** є прозорою, зазвичай скляною, полірованою пластинкою, на якій алмазним різцем нанесено за допомогою спеціальної машини багато (десятки і сотні тисяч) паралельних рівновіддалених однакових штрихів (подряпин).

Поверхня скла всередині канавок (штрихів), яка подряпана алмазом, стає шорсткою, матованою, і ці канавки стають непрозорими. Між ними залишаються прозорі смужки скла, що грають роль щілин.

Таким чином, дифракційна ґратка являє собою систему паралельних щілин, розділених між собою непрозорими проміжками.

Штрихи наносять через однакові відстані один від одного. Якщо прозорий проміжок має ширину a , а непрозорий - b , то величину $d = a + b$ називають **періодом (сталю)** ґратки. Сучасні дифракційні ґратки містять велику кількість штрихів – від 100 до кількох тисяч на 1 мм. Цим задовольняється умова спостереження дифракції: поперечні розміри прозорих і непрозорих смуг, що чергуються, мають бути порівнянні з довжиною світлової хвилі.

Розглянемо плоску монохроматичну хвилю (у термінах геометричної оптики – **пучок паралельних променів**), що падає нормально до поверхні ґратки, як зображено на рис. 1. Паралельно ґратці розміщуємо збірну лінзу, у фокальній площині якої помістимо екран.

Відповідно до так званого принципу Гюйгенса - Френеля, кожна щілина стає джерелом вторинних когерентних сферичних хвиль, які поширюються в усіх напрямках.

Внаслідок дифракції світло огинає краї щілин і за дифракційною ґраткою крім променів, що йдуть прямо, будуть промені, що відхилилися від початкового напрямку на різні кути φ , при цьому кути відхилення променів мають значення від 0° до 90° праворуч і ліворуч.

За допомогою лінзи на екрані в кожній точці фокальної площини зберуться хвилі, що випускаються вторинними джерелами під тим самим кутом φ до нормалі, який називається *кутом дифракції*.

У цих точках хвилі додаються, підсилюють чи ослаблюють одна одну.

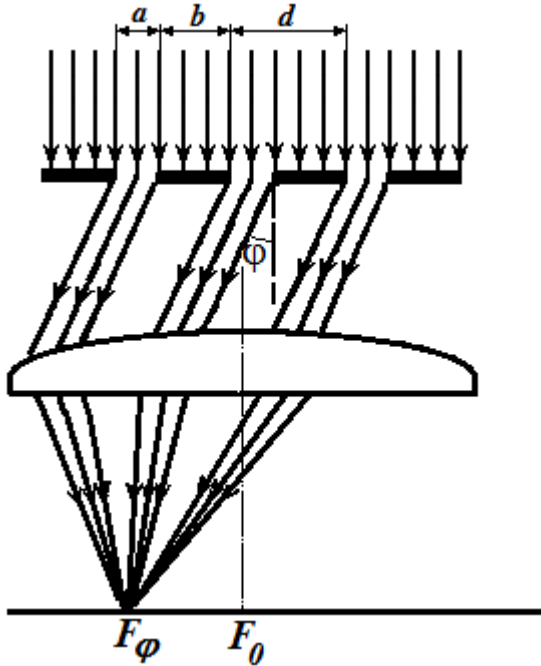


Рис.1.

Результат інтерференції хвиль у точці F_φ залежить від різниці ходу хвиль між відповідними променями (променями, що виходять з точок сусідніх щілин, віддалених на відстані d одна від одної).

Розглянемо відповідні промені, зображені на рис. 2, які виходять із точок A і B . З точки A опустимо перпендикуляр на промінь, що виходить з точки B , отримаємо прямокутний трикутник ABC , у якому $\angle BAC = \varphi$.

Від джерела світла до площини ґратки промені проходять однакові шляхи (оскільки вони паралельні), від AC до точки F_φ оптичний шлях променів також однаковий (лінза оптичної різниці ходу не вносить). Отже, різниця ходу між відповідними променями від сусідніх щілин

$$\Delta = BC = AB \sin \varphi = d \sin \varphi, \quad (1)$$

де d – період ґратки. Така сама різниця ходу буде між відповідним промінням від будь-яких двох сусідніх щілин.

Якщо різниця ходу Δ між вторинними хвилями, що йдуть з *еквівалентних точок* сусідніх щілин, дорівнює цілому числу довжин хвиль λ :

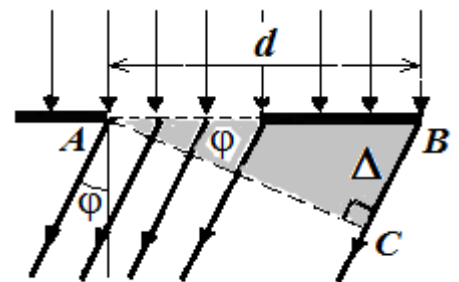


Рис.2.

$$d \sin \varphi = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2)$$

то вторинні хвилі від усіх щілин підсилюватимуть одна одну. У точках на екрані, де збираються промені, що поширюються під кутами φ_m , що задовольняють умові (2), розміщені так звані *головні максимуми* дифракційної картини.

У напрямку невідхилених хвиль ($\varphi = 0, m = 0$) спостерігається нульовий максимум, який є центром дифракційної картини.

У напрямках, для яких вторинні хвилі від окремих щілин взаємно погашають одна одну, утворюються мінімуми.

Сумарна ширина щілини і між щілинної ділянки (стала ґратки) $d = 1/n$, де n – число щілин на одиницю довжини дифракційної ґратки.

Як впливає з формули (2), кути, для яких спостерігаються світлові максимуми, залежать від довжини хвилі. Тому, якщо на дифракційну ґратку падає світло складного спектрального складу (наприклад, біле), то вона розкладає його на

складові – у спектр. На рис. 3 показаний розподіл інтенсивності світла при освітленні ґратки білим світлом.

Величина m у формулі (2) називається *порядком спектра*. При $\varphi = 0$ з'являється максимум нульового порядку, що збігається для всіх довжин хвиль. В результаті цього нульовий максимум, на відміну від усіх інших, виявляється незабарвленим.

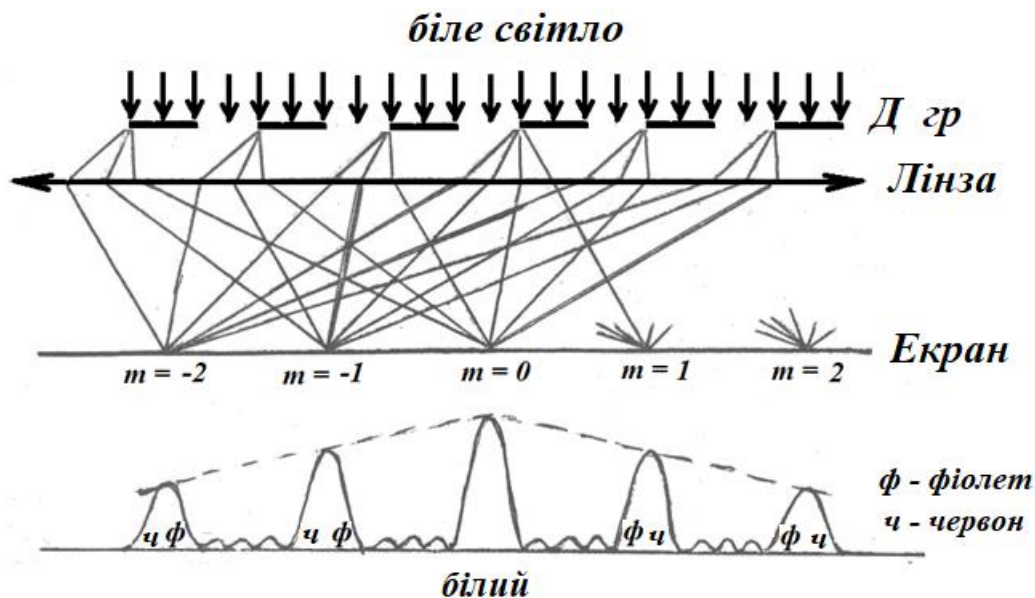


Рис.3.

По обидва боки від нього розташовуються спектри – максимуми порядків $\pm m$. У спектрі кожного порядку максимуми коротких хвиль (фіолетові промені) розміщуються ближче до нульового максимуму, а максимуми довших хвиль (червоні промені) - далі від нього.

Рівняння (2) є основним при практичному використанні дифракційних ґраток. Вимірявши кути φ_m , що відповідають положенням дифракційних максимумів, можна, знаючи d , визначити довжину хвилі світла λ .

При роботі з дифракційними ґратками важливо виконати точне вимірювання кутів, під якими спостерігаються максимуми для різних довжин хвиль. У цій роботі для цього використовується гоніометр ГС-30. Опис та правила користування гоніометром наведено у додатку.

Порядок виконання роботи

1. Знайомляться з **будовою гоніометра та правилами користування ним** (див. Додаток).

2. Включають джерело світла. Перевіряють різкість зображення щілини та хреста ниток у полі зору зорової труби.

3. Встановлюють дифракційну ґратку на столик гоніометра так, щоб щілини ґратки були паралельні щілині коліматора, а площина ґратки перпендикулярна до осей зорової та коліматорної труб. Шляхом повороту столика домагаються досить яскравої та різкої дифракційної картини у зоровій трубі.

4. Повертаючи зорову трубу вправо і вліво, переглядають дифракційний спектр і визначають число m видимих порядків спектрів з обох боків від не відхиленого положення труби (нульового максимуму). Спектральні лінії мають бути видимими різко і розміщуватися симетрично щодо нульового максимуму.

5. Наводять зорову трубу на **лінію з відомою довжиною хвилі** (задається викладачем) у спектрі першого порядку **праворуч** від не відхиленого пучка так, щоб зображення цієї лінії потрапило в просвіт між вертикальними штрихами відлікового хреста окуляра зорової труби гоніометра. Вимірюють за шкалою лімба кут α'_m .

Потім наводять трубу **на таку ж лінію зліва** від не відхиленого пучка і роблять відлік α''_m . Аналогічні вимірювання виконують і для ліній цієї довжини хвилі в інших видимих порядках спектру (не менше 3-х). Кути дифракції визначають за формулою $\varphi_m = (\alpha'_m - \alpha''_m) / 2$.

6. Обчислюють сталу d дифракційної ґратки, користуючись формулою (2), у всіх порядках спектра. Знаходять середнє значення $\langle d \rangle$.

7. Вимірювання, аналогічні п. 5, проводять для спектральних ліній з невідомою довжиною хвилі (не менше 2-х).

8. Знаючи $\langle d \rangle$, обчислюють, використовуючи ту ж формулу (2), довжини хвиль цих ліній у всіх порядках спектра, що спостерігаються.

9. Результати вимірювань та обчислень заносять до таблиць 1 і 2 із зазначенням одиниць вимірювань.

Визначення сталої дифракційної ґратки.

Таблиця 1

Колір лінії	k	α'_k	α''_k	φ_k	λ	d_i	$\langle d \rangle$	Δd_i	Δd	$E\%$

Визначення довжини світлової хвилі.

Таблиця 2

Колір лінії	k	α'_k	α''_k	φ_k	$\langle d \rangle$	λ_i	$\langle \lambda \rangle$	$\Delta \lambda_i$	$\Delta \lambda$	$E\%$
	1									
	2									
	3									
	1									
	2									
	3									

10. Величини Δd , $\Delta\lambda$ та $E\%$ обчислюються за стандартною процедурою статистичної обробки даних експерименту (див. Додаток). Остаточний результат записують у вигляді

$$d = \langle d \rangle \pm \Delta d \text{ (мм)}$$

$$\lambda = \langle \lambda \rangle \pm \Delta\lambda \text{ (нм)}$$

при $\alpha =$

Контрольні питання

1. У чому полягає явище дифракції та коли дифракція найбільш помітно виражена?
3. Що являє собою прозора дифракційна ґратка? Де подібна ґратка використовується?
4. Яке призначення лінзи, що використовується разом з дифракційною ґраткою?
5. Чому при освітленні білим світлом у центральній частині дифракційної картини виникає біла смуга?
6. Як розташовуються максимуми хвиль різного кольору стосовно центру дифракційної картини?
7. На дифракційну ґратку, яка має 430 штрихів на 1 мм, нормально падає пучок світла від натрієвого пальника ($\lambda = 589$ нм). Визначити кут відхилення труби спектрометра, за якого спостерігається останній дифракційний максимум. Який порядок цього максимуму?

Додаток 1.

Опис та правила користування гоніометром ГС-30

Загальний вигляд гоніометра ГС-30 показаний на рис.1 (з боку зорової труби). Прилад складається з коліматора, столика, пристосування для вимірювання кутів (частина, що обертається) так званої алідади з зоровою трубою, які кріпляться на масивній підставі. *Алідада*— частина приладу у вигляді круга, який обертається всередині лімба навколо однієї з ним осі і несе на собі навідний, і відліковий пристрій.

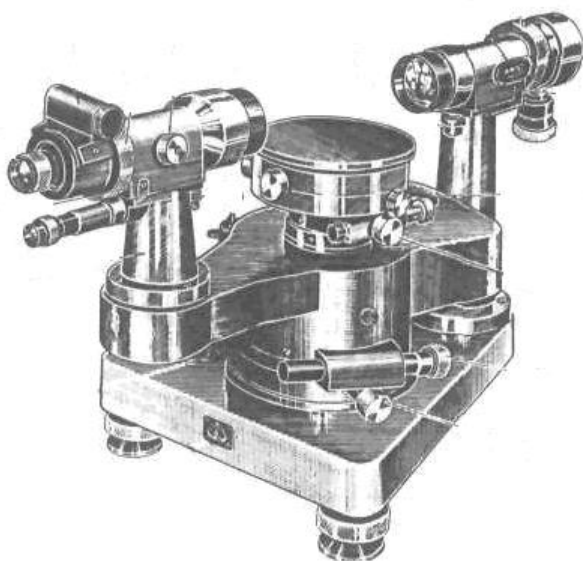


Рис.1

На столику розміщуються досліджувані предмети.

Коліматор служить для отримання паралельного пучка променів. Він складається з об'єктива і щілини, ширина якої (від 0 до 2 мм) регулюється мікрометричним вінтом. Коліматор кріпиться нерухомо на підставі гоніометра.

Зорова труба складається з об'єктиву і окуляра

Алідада обертається навколо своєї осі відносно нерухомого лімба разом з верхньою частиною приладу; при цьому проводиться відлік по горизонтальному кругу.

Лімба розділений на 360° , ціна однієї поділки лімба 1° . Зображення штрихів лімба через систему призм та об'єк-

тивів передається на сітку мікроскопа і розглядається через окуляр при включеному освітленні приладу. Вимикач розміщений на нерухомій частині основи. Різкість зображення шкали регулюється обертанням оправы окуляра.

Поле зору окуляра представлено на рис. 2. У віконці видно зображення штрихів лімба, оцифровані 2; 1; 0 та шкала сітки мікроскопа. Шкала має два ряди штрихів, розміщених один під одним. Ціна поділки в кожному з рядів дорівнює 1". Нижній ряд штрихів зсунутий щодо верхнього на половину поділки. Це дає можливість робити відлік з точністю до 30" і навіть до 15".

Відлік провадиться наступним чином. Число градусів береться за лівою від нуля найближчою цифрою, що відповідає поділкам лімба. Число десятків та одиниць кутових хвилин береться по верхньому ряду чисел шкали мікроскопа. Число десятків секунд відраховується на око за нижньою шкалою мікроскопа. Положення, вказане на рис. 2 відповідає відліку $1^{\circ} 30' 00''$.

Столик може обертатися разом з лімбом при нерухомій зоровій трубці і самостійно від руки, з фіксацією будь-якого положення закріплювальним гвинтом. Алідада обертається або грубо від руки, або (при затиснутому гвинті) точно за допомогою мікрометричного гвинта.

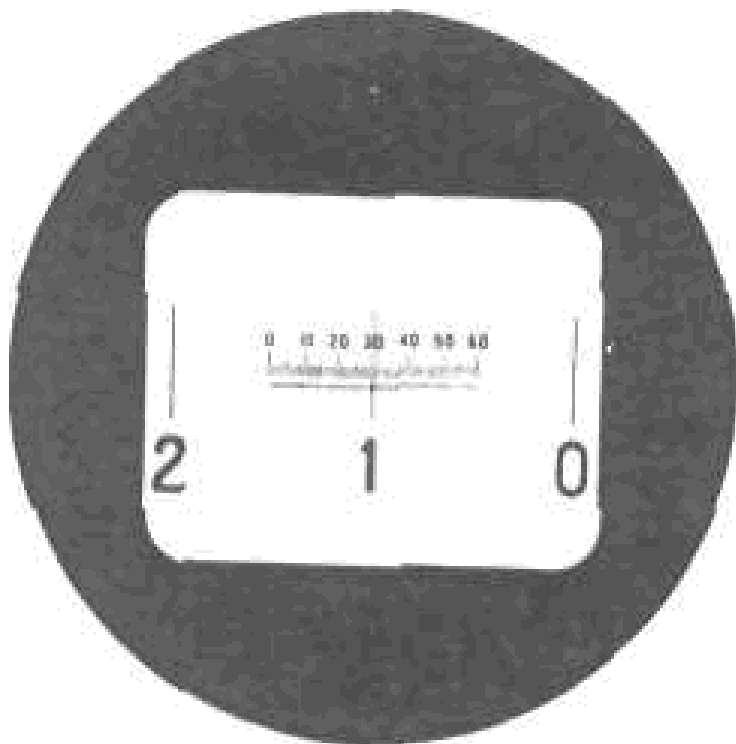


Рис. 2.

Література

1. Кучерук І. М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики. У 3 т. Т.3: Оптика. Квантова фізика. Навчальний посібник для студентів вищих технічних та педагогічних закладів освіти – К.; "Техніка", 2006, -520 с
2. Курс фізики (під редакцією Лопатинського І.Є).. – Львів. – "Бескід Біт". – 2002.
3. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Фізика. Навчальний посібник у 7 частинах. Ч. 5. - Хвильова оптика. - Д. НТУ «Дніпровська політехніка», 2020. - 58 с. -

Методика обробки експерименту

1. Проводять n незалежних дослідів та визначають n значень шуканої величини $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$.

2. Розраховують середнє арифметичне значення шуканої величини:

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

3. Розраховують відхилення кожного результату від середнього значення:

$$\Delta x_i = x_i - \langle x \rangle.$$

4. Визначають стандартне відхилення середнього

$$S_{\langle x \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 + \dots}{n(n-1)}}.$$

5. Задають довірчу ймовірність α . Зазвичай довірчу ймовірність вважають рівною 0,90; 0,95; 0,98; 0,99. За вибраним значенням довірчої ймовірності α і для виконаної кількості вимірювань n за таблицею визначають коефіцієнт Стьюдента $t_{\alpha, n}$ (Таблиця є в кожній лабораторії).

6. Обчислюють півширину довірчого інтервалу (**абсолютну похибку середнього**)

$$\Delta \langle x \rangle = t_{\alpha, n} S_{\langle x \rangle}.$$

7. Визначають відносну похибку

$$E = \frac{\Delta \langle x \rangle}{\langle x \rangle} \cdot 100\%.$$

8. Остаточний результат вимірювання записують у вигляді:

$$x = (\langle x \rangle \pm \Delta \langle x \rangle) \text{ одиниць виміру, при } \alpha = \dots$$

Склали І.П.Гаркуша, А.І.Лютій