

Вивчення дифракційних явищ на періодичних і неперіодичних структурах

Ціль роботи: ознайомлення із принциповою схемою дифракції Фраунгофера від дифракційної решітки при спостереженні у випромінюванні лазера; визначення довжини хвилі лазерного випромінювання і характеристик решітки; ознайомлення з методом визначення розмірів дрібних частинок.

Дифракцією називається сукупність явищ, що спостерігаються при поширенні світла в середовищі з різкими неоднорідностями і пов'язаних з відхиленнями від законів геометричної оптики. Дифракція, зокрема, приводить до огинання світловими хвилями перешкод, порівнянних з довжиною хвилі, і проникненню світла в область геометричної тіні.

Розрізняють дифракцію в збіжних променях (дифракція Френеля) і дифракцію в паралельних променях (дифракція Фраунгофера).

В практичних застосуваннях явища дифракції широке поширення одержала дифракційна решітка. Одномірна дифракційна решітка являє собою прозору пластину з великою кількістю (до 1000 на довжині 1 мм) тонких паралельних щілин, розділених рівними по ширині непрозорими проміжками. Відстань d між серединами сусідніх щілин (або довжина штриха й щілини) називається *постійною (періодом)* решітки.

Принципова схема спостереження дифракції Фраунгофера від дифракційної решітки показана на рис.1. Паралельний пучок променів 1 монохроматичного світла падає на решітку 2. Ці промені зазнають дифракцію при проходженні через щілини решітки, утворюючи когерентні пучки (вторинні) під різними кутами $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_k$. Ці кути утворені нормаллю до решітки й напрямком променів і називаються кутами дифракції. Пучки, що пройшли лінзу 3 (коліматор), дають на екрані E дифракційну картину у вигляді максимумів і мінімумів інтенсивності, що чергуються (рис. 1б). Відповідно до принципу Гюйгенса-Френеля

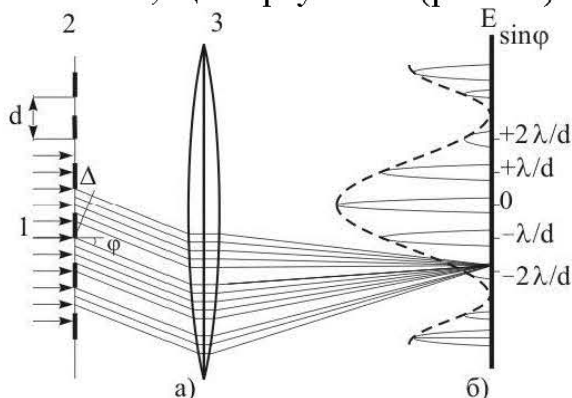


Рис.1

розподіл інтенсивності в дифракційній картині визначається накладенням когерентних хвиль, що приходять у точку спостереження від різних щілин решітки. При цьому амплітуди всіх хвиль при заданому куті φ практично однакові. З рис.1 видно, що різниця ходу променів Δ від сусідніх щілин дорівнює $\Delta = d \sin \varphi_k$. Якщо падаюча хвиля перпендикулярна поверхні решітки, то інтенсивність дифрагованого

світла максимальна для тих кутів φ_k , для яких хвилі, що приходять від всіх щілин, перебувають у фазі. Для них $\Delta = k\lambda$. Отже, умова максимумів інтенсивності

$$d \sin \varphi_k = \pm k\lambda \quad (1)$$

де $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ – порядок дифракційного максимуму.

Максимуми, які обумовлені формулою (1), називаються головними.

Як випливає з (1), кути, при яких спостерігаються максимуми, залежать від довжини хвилі λ . Тому, якщо на решітку падає немонохроматичне світло (наприклад, біле), то вона його розкладає на складові, тобто в спектр. При $k=0$ максимуми для всіх довжин хвиль накладаються один на одного ($\varphi=0$) і утворюють центральний максимум (незабарвлений). По обидві сторони від нього утворюються спектри-максимуми порядків $\pm k$. У спектрі кожного порядку максимуми для більш коротких хвиль розташовуються ближче до нульового максимуму, для більш довгих хвиль – далі від нього. Властивість решітки розкладати світло в спектр дозволяє використати її як *диспергуючий пристрій* у спектральних приладах, які застосовуються для визначення довжин хвиль, хімічного складу сплавів і ін.

При використанні газового лазера оптична система спрощується, тому що лазер випромінює когерентні світлові пучки, які вже паралельні і не потребують коліматора.

Основними характеристиками дифракційної решітки є *кутова дисперсія* й *роздільна здатність*.

Якщо двом лініям, що відрізняються по довжині хвилі на $\delta\lambda$, відповідає різниця в кутах, рівна $\delta\varphi$, то *мірою кутової дисперсії служить величина* $D = \delta\varphi / \delta\lambda$. Диференціюючи формулу (1), одержимо $d \cos \varphi_k \delta\varphi = k \delta\lambda$. Тоді

$$D = \delta\varphi / \delta\lambda = k / d \cos \varphi_k, \quad (2)$$

де φ_k - відповідний кут дифракції. З (2) видно, що дисперсія тим більше, чим менше період решітки d і чим більше порядок k спостережуваного спектра. Інакше кажучи, кутова дисперсія характеризує протяжність спектра або здатність решітки просторово розділяти світлові пучки різних довжин хвиль.

Кожна спектральна лінія зображується спектральним апаратом не у вигляді лінії, а у вигляді більш-менш розмитої дифракційної картини з максимумами й мінімумами інтенсивності. Позначимо найменшу різницю довжин хвиль двох спектральних ліній, при якій спектральний апарат зображує ці лінії роздільно $\delta\lambda$. *Мірою роздільної здатності R спектрального апарата* прийнято вважати відношення довжини хвилі λ , біля якої виконується вимір, до зазначеного мінімального інтервалу $\delta\lambda$, тобто $R = \lambda / \delta\lambda$.

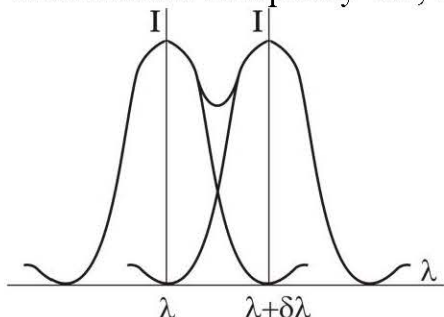


Рис. 2

Для дифракційної решітки Релей запропонував наступний *критерій спектрального розрізнення*. Спектральні лінії із близькими довжинами хвиль λ і $\lambda + \delta\lambda$ вважаються роздільними, якщо максимум (середина) дифракційної картини для однієї довжини хвилі збігається по своєму положенню з першим дифракційним мінімумом (краєм) для іншої довжини хвилі в тому ж порядку (рис. 2).

Можна показати, що відношення $\lambda / \delta\lambda = kN$, де N – число діючих штрихів решітки, k – порядок спектра. Тоді *роздільна здатність дифракційної решітки* буде дорівнювати

$$R = \lambda / \delta\lambda = kN. \quad (3)$$

Явище дифракції світла знаходить цілий ряд практичних застосувань. Одне з

них ми вже відзначили – застосування дифракційної решітки в якості диспергуючого елемента в спектральних апаратах. Дифракцію використовують також для визначення з високим ступенем точності діаметрів дрібних (у кілька мікрометрів) часток у тому випадку, якщо універсальні засоби (мікроскоп, проектор, контактні прилади і ін.) дають погрішності, які порівнянні з розмірами цих часток.

Принципова схема спостереження дифракції на малій сферичній частці наведена на рис. 3а. Монохроматичний пучок променів від лазера 1 падає на частку 2 радіуса r , дифрагує на ній і дає дифракційну картину на екрані Е, який розташовано на відстані l від частки. На екрані виникає періодичний розподіл інтенсивності світла у вигляді концентричних кілець – дифракційних максимумів і мінімумів (рис. 3б).

Дифракційна картина на одній частці буде слабкою і нерізкою на фоні прямого не дифрагованого світла. Для її посилення в площині 2 замість однієї міститься велика кількість однакових сферичних часток. Оскільки в паралельному пучку лазера, що має осьову симетрію, при зсуві часток убік від осі перпендикулярно їй, дифракційна картина не змінює свого положення, то всі частки дадуть однакові дифракційні картини, що накладаються одна на одну в площині Е. Інтенсивності цих картин додадуться і результуючий контраст підсилиться. Хаотичність розподілу часток виключає можливість інтерференційного ефекту

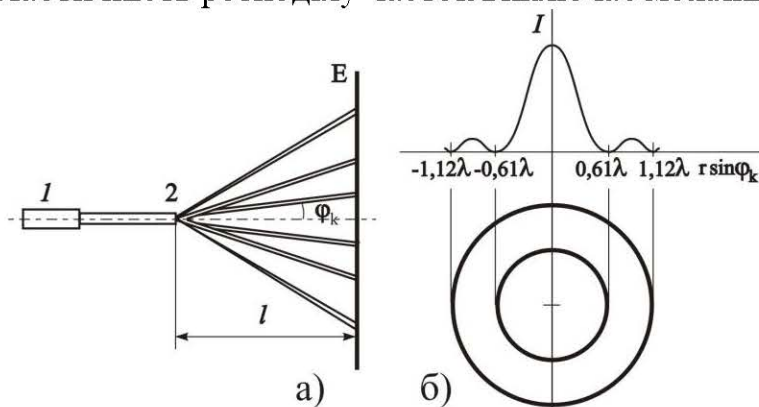


Рис. 3

між світловими пучками, які дифрагували на різних частках. Тому, якщо в пучок потрапило N часток, то інтенсивність дифракційної картини підсилиться в N раз, але не змінить своєї структури. З рис. 3б видно, що більша частина світлового потоку ($\sim 85\%$) припадає на центральний

(нульовий) максимум.

З теорії дифракції маємо наступні співвідношення:

$$\text{для максимумів: } r \sin \varphi_0 = 0; \quad r \sin \varphi_2 = 0,81\lambda; \quad r \sin \varphi_4 = 1,33\lambda; \dots; \quad (4)$$

$$\text{для мінімумів: } r \sin \varphi_1 = 0,61\lambda; \quad r \sin \varphi_3 = 1,12\lambda; \quad r \sin \varphi_5 = 1,62\lambda; \dots; \quad (5)$$

де φ_k – кути дифракції ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$). Вимірюючи кути дифракції і знаючи довжину хвилі випромінювання лазера, можна з (4) і (5) визначити радіуси часток r .

Прилади й приладдя: джерело світла – (He – Ne) лазер, прозора дифракційна решітка, матовий екран зі шкалою, пакет із двох скляних пластин із дрібними частками між ними.

Завдання 1. Визначення довжини хвилі лазерного випромінювання й обчислення основних характеристик решітки.

1. Закріпити на тримачі шкали дифракційну решітку.
2. Визначити число k видимих порядків дифракційного спектра по обидва боки

від центрального максимуму. Виміряти по шкалі кутові відстані a_k й a'_k для всіх порядків по обидві сторони від центрального максимуму й обчислити для них кути дифракції по формулі

$$\varphi_k = (a'_k - a_k)/2. \quad (6)$$

3. Розрахувати довжини хвиль випромінювання по формулі (1) у всіх порядках. Постійна дифракційної решітки d задається викладачем.

4. Визначити кутову дисперсію D по формулі (2) для всіх спостережуваних порядків спектра.

5. Обчислити роздільну силу R дифракційної решітки по формулі (3) для кожного порядку, приймаючи за N – число діючих штрихів решітки. Воно дорівнює ширині лазерного пучка, що падає на решітку (вимірюється лінійкою), поділеному на постійну решітки d .

6. Всі обмірювані й обчислені величини занести в таблицю 1.

Таблиця 1

k	d	a_k	a'_k	φ_k	λ_k	$\langle \lambda \rangle$	$S_{\langle \lambda \rangle}$	$t_{\text{сн}}$	$\Delta\lambda$	E%	D	R
1												
2												
.												
.												

7. Величина $\Delta\lambda$ обчислюється по стандартній процедурі статистичної обробки даних експерименту. Остаточний результат записують у вигляді

$$\lambda = \langle \lambda \rangle \pm \Delta\lambda \quad \text{при } \alpha =$$

Завдання 2. Визначення діаметрів дрібних частинок.

1. Установити пакет пластин із частинками на відстані 15-20см від екрана Е зі шкалою (рис.3). Виміряти діаметри світлих і темних дифракційних кілець, спостережуваних на екрані, та відстань l від часток до екрана.

2. Визначити відповідно до рис.3а синуси кутів дифракції φ_k як відношення радіусів кілець до відстані l та обчислити по формулах (4) і (5) радіуси часток, одержавши не менш п'яти значень. Знайти середнє значення r .

3. Всі обмірювані обчислені величини занести в таблицю 2 (скласти самостійно), а остаточний результат записати в стандартному виді.

Контрольні питання

1. Що називається дифракцією світла?
2. Що являє собою дифракційна решітка? Для чого вона використовується?
3. Що називається періодом дифракційної решітки? Чому дорівнює період решітки, якщо довжина решітки 2 см, а число штрихів дорівнює 500?
4. Назвіть основні характеристики дифракційної решітки. Як вони визначаються?
5. У чому особливість спостереження дифракції у випромінюванні газового лазера?

Література

1. Лабораторний практикум по фізиці під ред. А.С. Ахматова. - М., «Вища школа», 1980.
2. Трофимова Т.І. Курс загальної фізики. - М., „Академія”, 2005.

Укладачі: Глушко Л. М., Лютий О. І. Солопов М.Д.