

Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
«Приазовський державний технічний університет»
Кафедра фізики

Єфременко В.Г.

ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ СВІТОВОЇ ХВИЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИФРАКЦІЙНОЇ РЕШІТКИ

Методичні вказівки
по виконанню лабораторної роботи № 79
по курсу «Фізика»
для здобувачів вищої освіти
усіх спеціальностей всіх форм навчання

Маріуполь 2021

Визначення довжини світлової хвилі за допомогою дифракційної решітки. [Електронний ресурс]: методичні вказівки щодо виконання лабораторної роботи № 79 з курсу «Фізика» для здобувачів вищої освіти усіх спеціальностей всіх форм навчання / уклад. В.Г.Єфременко - Маріуполь: ПДТУ, 2021. - 13с. - Режим доступу:

Містить основні теоретичні положення щодо дифракції світла, опис установки і методики вимірювань.

Укладач В.Г.Єфременко, докт.техн.наук, професор

Рецензент О.В. Цветкова, канд. ф.-м. наук, доцент

Затверджено
на засіданні кафедри фізики,
протокол № 10 від 13 січня 2021 р.

Затверджено
на засіданні методичної комісії
факультету інформаційних технологій,
протокол № 5 від 15 січня 2021 р.

ВСТУП

Вивчення розділу фізики «Хвильова оптика» передбачає спостереження таких явищ, як дифракція, інтерференція і поляризація. Так як для прояву цих явищ потрібні певні умови, то створити ці умови можна спеціальними пристроями. Зокрема, дифракцію спостерігають за допомогою дифракційної решітки, що і пропонується побачити в даній лабораторній роботі.

1 МЕТА

Спостерігати явище дифракції та визначити довжину світлової хвилі за допомогою дифракційної решітки.

Вказівки з підготовки до роботи: опрацюйте дане керівництво; вивчіть лекційний матеріал по темі «Дифракція світла»; дайте відповідь на контрольні питання.

2 КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Якщо на шляху світлової хвилі знаходяться непрозорі тіла або екрани з отворами, то за цими тілами утворюється область тіні. Цю область можна окреслити геометрично, вважаючи, що світло поширюється прямолінійно, і світлові промені – прямі лінії. Більш детальні спостереження показують, що світлова хвиля може заходити в область геометричної тіні, причому на межі між областями світла і тіні з'являються максимуми і мінімуми світла, які чередуються, що свідчить про деякий перерозподіл світлової енергії на цій межі. Обгинання світловою хвилею кордонів непрозорих тіл з утворенням інтерференційного перерозподілу енергії по різним напрямкам називається *дифракцією¹ хвилі*.

¹ Дифракція – від лат. «diffractus» – розламаний

Явище дифракції можна пояснити, користуючись принципом Гюйгенса. Згідно з цим принципом, кожную точку фронту світлової хвилі, заданого в певний момент часу (наприклад, коли хвиля дійшла до пластинки з отвором), можна розглядати як самостійне джерело елементарної (вторинної) хвилі (сферичної в однорідному і ізотропному середовищі). Обгинаюча всіх цих елементарних хвиль заходить в область геометричної тіні і дає встановлюване розташування фронту хвилі в наступні моменти часу. Однак при цьому залишається відкритим питання про розподіл енергії вздовж фронту хвилі; якщо це розподіл задано на початку хвилі, то його необхідно знайти і для наступних моментів часу. Це завдання можна вирішити, якщо скористатися додатковим зазначенням, яке зробив Френель до принципу Гюйгенса, а саме: всі точки фронту хвилі коливаються з однаковою частотою і в однаковій фазі (тобто представляють собою сукупність когерентних джерел). Урахування амплітуд і фаз вторинних хвиль дозволяє вирішити задачу інтерференції вторинних хвиль і знайти амплітуду результуючої хвилі в будь-якій точці простору.

Явище дифракції, так само як і явище інтерференції, підтверджує хвильову природу світла. Дифракція світла завжди супроводжується інтерференцією діфрагированих променів.

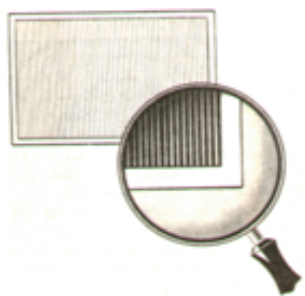


Рисунок 1 –
Дифракційна решітка

Дифракційна решітка являє собою сукупність великого числа дуже вузьких щілин, розділених непрозорими проміжками (рис. 1). Доброякісну решітку виготовляють за допомогою спеціальної розділяючої машини, яка наносить на скляній пластині паралельні штрихи. Число штрихів доходить до декількох тисяч на 1 мм; загальне число штрихів перевищує 100000. Прості у

виготовленні желатинові відбитки з такої решітки, що затиснуті між двома скляними пластинами. Найкращі якості мають так звані відбивні решітки. Вони являють собою систему чередовних ділянок, які відбивають світло і розсіюють його. Штрихи, які розсіюють світло, наносяться різцем на відшліфованій металевій пластині.

Основними параметрами дифракційної решітки є число штрихів на одиницю довжини решітки $n=1/d$ і її період (стала дифракційної решітки) $d = a + b$, де a – ширина прозорих щілин (або відбиваючих смуг), b – ширина непрозорих проміжків (або смуг, які розсіюють світло).

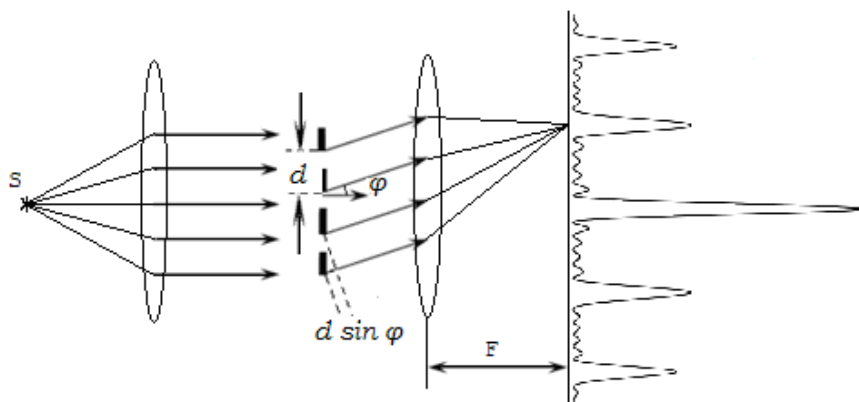


Рисунок 2 – Хід променів при спостереженні дифракції від решітки

Дифракційні решітки зазвичай застосовуються в таких умовах, коли має місце дифракція Фраунгофера, тобто, коли на решітку падає плоска хвиля, а точка спостереження практично знаходиться на нескінченності (рис.2). Якщо в світловому полі після дифракційної решітки помістити збиральну лінзу, то в фокальній площині вона збере промені, що вийшли з щілин паралельно під кутом φ до вісі. Тому екран поміщають в фо-кальній площині, і вже на ньому спостерігають дифракційну

картину. Слід зазначити, що лінза не створює додаткової різниці ходу променів. У цьому випадку напрямок, в якому проводиться спостереження, визначається кутом ϕ між нормаллю до решітки і напрямком променів. Результат інтерференції променів від різних щілин буде залежати від різниці фаз, з якою вони накладаються один на одного в фокальній площині лінзи. При монохроматичному джерелі світла різниця фаз в точці зустрічі сусідніх променів буде залежати від їх різниці ходу і довжини хвилі. При цьому амплітуди всіх інтерферуючих хвиль при заданому куті ϕ практично однакові, а фази складають арифметичну прогресію.

Нехай падаюча на решітку світлова хвиля поширилася перпендикулярно її поверхні. Інтенсивність дифрагированого світла максимальна для таких кутів ϕ_m , для яких хвилі, що приходять в точку спостереження від усіх щілин решітки, виявляються в фазі. Як впливає з рис. 2, для цих напрямків справедливо співвідношення

$$d \sin \phi = m\lambda \quad (m - \text{ціле число}), \quad (2.1)$$

яке називають умовою головних дифракційних максимумів.

Точна теорія решітки *враховує як інтерференцію хвиль, що приходять від різних щілин, так і дифракцію на кожній щілині*. Як показує простий розрахунок, інтенсивність світла, що поширюється під кутом ϕ до нормалі, дорівнює

$$I = I_0(\phi) \frac{\sin^2 \left(N \frac{kd \sin \phi}{2} \right)}{\sin^2 \frac{kd \sin \phi}{2}}, \quad \text{де} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{хвильове число,}$$

а множник $I_0(\phi)$ враховує дифракцію хвиль, що випускаються одним «періодом» (щілиною) решітки [1,2].

Аналіз останнього виразу показує, що при більшій

кількості щілин світло, що пройшло через решітку, поширюється по ряду різко обмежених напрямків, які визначаються співвідношенням (2.1). Залежність інтенсивності світла від кута спостереження представлена на рис.3.

У проміжках між сусідніми головними максимумами є по $(N-1)$ додатковому мінімуму. Ці мінімуми виникають в тих напрямках, для яких коливання від окремих щілин взаємно гасять один одного. Напрямки додаткових мінімумів

$$d \sin \varphi = \frac{m'}{N} \lambda$$

визначаються з умови, де m' приймає всі цілочисельні значення, крім $0, N, 2N, \dots$, при яких виконується умова (2.1).

Тут слід враховувати, що головний максимум певного порядку пропадає, якщо його положення збігається з яким-небудь мінімумом дифракційної картини від однієї щілини (умова дифракційного мінімуму від щілини $a \sin \varphi = k \lambda$).



Рисунок 3 – Розподіл інтенсивності світла при дифракції від дифракційної решітки

Як впливає зі співвідношення (2.1), кути, при яких спостерігаються світлові максимуми, залежать від довжини хвилі λ . Таким чином, дифракційна решітка являє собою спектральний прилад. Якщо на дифракційну решітку падає

світло непростого спектрального складу, то після решітки утворюється спектр, причому фіолетові промені відхиляються решіткою менше, ніж червоні. Величина m , яка входить до (2.1) зветься порядком спектру. При $m = 0$ максимуми інтенсивності для всіх довжин хвиль накладаються один на одного, тому при освітленні білим світлом нульовий максимум, на відміну від всіх інших, виявляється незабарвленим.

3 ОПИС УСТАНОВКИ І МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАНЬ

У даній лабораторній роботі довжина світлової хвилі визначається за допомогою гоніометра (рис. 4). Він складається з коліматора К і зорової труби Зр, які можуть переміщатися в горизонтальній площині по круговій шкалі (лімбу). Шкала нанесена на столику Т, в центрі якого може бути встановлена дифракційна решітка Др. На кінці коліматора знаходиться щілина S, ширину якої можна регулювати. Коліматор призначений для того, щоб направляти на решітку паралельний пучок променів, тому щілина або її зображення повинні знаходитися в фокусі лінзи O_2 . Щілина коліматора, що освітлена джерелом світла (неонова лампочка), сама стає джерелом, тому дифракційні зображення мають вигляд вузьких смуг, паралельних щілини коліматора. Зорова труба складається з об'єктива O_3 і окуляра O_4 . В окулярі є вертикальна нитка (візирна лінія) для наведення труби на певну лінію спектру. Вимірюючи кут повороту зорової труби, можна визначити кут дифракції.

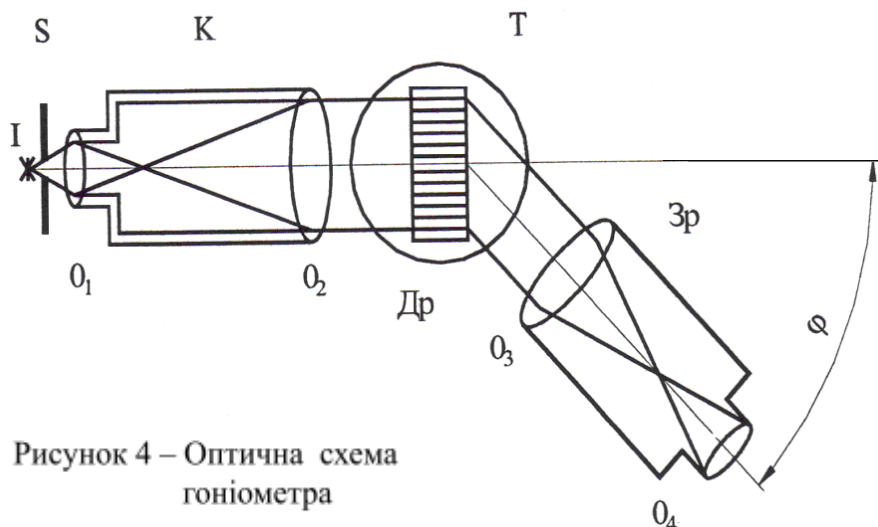


Рисунок 4 – Оптична схема
гоніометра

Лімб гоніометра розділений на 360° , а кожен градус розділений ще навпіл, так, що маленький поділ відповідає $30'$. Шкала гоніометра забезпечена ноніусом, який дозволяє відрховувати кути з точністю до $5'$.

Вимірювання кута по шкалі ноніуса проводиться наступним чином. Нехай φ – вимірюваний кут. Знак ∇ знаходиться між k і $k + 1$ поділами лімба і показує ціле число градусів k (рис.5). Для визначення хвилин кута звертаємо увагу на розташування знака ∇ між k і $k + 1$ поділами. Якщо знак ∇ знаходиться ближче до значення k , то дивимося, який з поділок ноніуса від $0'$ до $30'$ точно збігається з будь-яким розподілом лімба. Якщо знак знаходиться ближче до значення $k + 1$, то дивимося, який з поділок ноніуса від $30'$ до $60'$ точно збігається з будь-яким розподілом лімба. У наведеному на рис.5 прикладі кут $86^\circ 35'$.

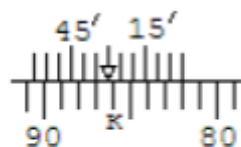


Рисунок 5 –
Шкала ноніуса

Вимірювання на гоніометрі виконуються наступним чином. Спочатку обертанням кільця окуляра O_4 потрібно домогтися того, щоб візирна лінія була чітко видна. Потім, направивши зорову трубу на будь-який віддалений предмет, пересуванням окулярної трубки домагаються різкого зображення цього предмета (установка зорової труби на нескінченність). Після цього повертають трубу так, щоб вона була на продовженні вісі коліматора, і спостерігають зображення щілини. Якщо щілина коліматора може пересуватися, то, усуваючи або висуваючи її, потрібно домогтися різкого зображення щілини. Тепер потрібно помістити дифракційну решітку на столик гоніометра так, щоб її площина збіглася з віссю обертання труби і була перпендикулярна падаючим променям. Критерієм перпендикулярності площини решітки до падаючих променів може служити строго симетричне розташування спектрів по відношенню до центрального незафарбованого зображення щілини.

Слід зазначити, що дане зауваження про симетричне розташуванні спектрів значне, тому що гоніометр визначає не кут дифракції, а кут, під яким спостерігається лінія спектра за шкалою лімба. Щоб знайти кут дифракції лінії m -го порядку визначають кути, під якими спостерігаються лінії цього порядку справа $\varphi_m^{\text{прав}}$ і зліва $\varphi_m^{\text{лів}}$ від центрального. Тоді кут дифракції визначається за формулою:

$$\varphi_m = \frac{\varphi_m^{\text{прав}} - \varphi_m^{\text{лів}}}{2}.$$

З умови головних дифракційних максимумів (2.1) ви-водимо **розрахункову формулу** :

$$\lambda = d \frac{\sin\left(\frac{\varphi_m^{\text{прав}} - \varphi_m^{\text{лів}}}{2}\right)}{m}$$

де: d – постійна решітки;
 m – порядок спектру.

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ І ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Наблизьте щілину коліматора до розрядної трубки. Установіть коліматор так, щоб оптичні осі зорової труби і коліматора знаходилися на одній прямій.
2. Переміщенням окуляра добийтеся різкого зображення візирної лінії.
3. Зміщуючи зорову трубу, встановіть її так, щоб нитка поєдналася з лінією спектру 1-го порядку, яка розташована праворуч від центрального максимуму і зробіть відрахунок кута $\varphi_1^{прав}$ по правому (або лівому) лімбу кругової шкали, результат запишіть в таблицю 4.1.
4. Аналогічно зробіть вимірювання кутів для ліній того ж кольору 2-го і 3-го порядків спектру. Результат запишіть у таблицю 4.1.
5. Зміщуючи зорову трубу, встановіть її так, щоб візирна лінія поєдналася з лінією спектру 1-го порядку, яка розташована зліва від центрального максимуму і зробіть відлік кута $\varphi_1^{лів}$ по тому ж самому лімбу, результат запишіть в таблицю .
6. Аналогічно зробіть вимірювання кутів для ліній того ж кольору 2-го і 3-го порядків спектра. Результат запишіть у таблицю 4.1.
7. Повторіть вимірювання пунктів 3-6 три рази. Для кожного порядку спектру знайдіть середні значення кутів $\varphi^{лів}$ і $\varphi_m^{прав}$ і обчисліть довжину хвилі $\langle \lambda_i \rangle$ по розрахунковій формулі, підставивши середні значення кутів.

Таблиця 4.1 експериментальних результатів

$d =$

№	$\varphi_1^{прав}$	$\varphi_2^{прав}$	$\varphi_3^{прав}$	$\varphi_1^{лів}$	$\varphi_2^{лів}$	$\varphi_3^{лів}$	$\langle \lambda_i \rangle$
1							
2							
3							
середнє							

Таблиця 4.2 розрахунків

m	$\langle \lambda_i \rangle$, мкм	$\langle \lambda_i \rangle - \langle \lambda \rangle$	$(\langle \lambda_i \rangle - \langle \lambda \rangle)^2$
1			
2			
3			
Σ		_____	

8. Знайдіть середнє значення довжини хвилі $\langle \lambda \rangle$.
9. Заповніть таблицю 4.2 та за її допомогою визначте довірчий інтервал $\Delta \lambda$ (як для прямих вимірювань). Запишіть результат у вигляді

$$\lambda = \langle \lambda \rangle \pm \Delta \lambda, \text{ при } P_a = \quad .$$

10. Зробіть висновки по роботі.

5 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Що називається дифракцією? Як виглядає дифракційна картина? За якої умови спостерігаються найбільш чіткі дифракційні картини?
2. Сформулюйте принцип Гюйгенса-Френеля. Поясніть якісно явище дифракції на основі цього принципу.

3. Що називається дифракційною решіткою? Що називається періодом дифракційної решітки? Як він пов'язаний з числом штрихів на 1 мм?
4. Для чого застосовуються дифракційні решітки?
5. Який вигляд має дифракційна картина від решітки при освітленні білим світлом? Що називають спектрами 1-го, 2-го і т.д. порядків?
6. Який вигляд має дифракційна картина від решітки при освітленні монохроматичним світлом, наприклад, червоним? (Що таке монохроматичне світло?)
7. Запишіть умову спостереження мінімумів і головних максимумів при дифракції на дифракційних решітках.
8. Намалюйте графіки розподілу інтенсивності світла при дифракції від однієї щілини і від дифракційної решітки. У чому їх відмінність? Скільки мінімумів виникає між двома сусідніми максимумами у дифракційному спектрі?
9. Пристрій і принцип роботи гоніометра.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Савельев И.В. Курс общей физики, т.2.-М.:Наука,1982, §125-130.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: Учебник для студ. Вузов-М.:Выш.шк.,1985,§177-181.
3. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Курс физики,т. 3. - М.: Выш.шк., 1970, §§ 6.3,6.4.
4. Лопатинський І.Є., Зачек І.Р. та ін. Фізика для інженерів. - Львівська політехніка, 2009. - 385 с.