

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет

Г.І. Ткаченко, Ю.В. Єчкало

ЕЛЕМЕНТИ КВАНТОВОЇ ТЕОРІЇ

Навчальний посібник

Кривий Ріг
2024

Рецензенти: Завідувач кафедри фізики та методики її навчання Криворізького державного педагогічного університету, канд. пед. наук, доцент **М.А. Слюсаренко**;
Директор Науково-дослідного гірничорудного інституту Криворізького національного університету; докт. техн. наук, професор **В.П. Щокін**;
В.о. директора Навчально-наукового інституту Державного університету економіки і технологій, канд. техн. наук, доцент **Д.В. Пополов**.

Ткаченко Г.І., Єчкало Ю.В. Елементи квантової теорії: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2024. 96 с.

Навчальний посібник складено відповідно до чинної робочої програми з фізики та вимогам кредитно-модульної системи організації навчального процесу для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальностями: 122 «Комп'ютерні науки»; 123 «Комп'ютерна інженерія»; 015 «Професійна освіта (Цифрові технології)». Посібник містить стислий теоретичний матеріал щодо тематики лабораторних робіт. Подано опис лабораторних робіт, які згруповані за розділами «Квантова оптика» та «Атомна фізика» і відповідають змістовим модулям. Приділено значну увагу методам статистичної обробки розрахунків та аналізу результатів. Посібник містить глосарій, до якого включено найбільш уживані у квантовій оптиці фізичні терміни з перекладом на англійську мову. Навчальний посібник має на меті допомогти здобувачам вищої освіти у засвоєнні теоретичного матеріалу з третьої частини фізики, удосконалити навички самостійної дослідницької роботи з фізики, набуті певні компетентності згідно освітньо-професійної програми.

Затверджено до видання Вченою радою Криворізького національного університету, протокол № 2024 р.

©Ткаченко Г.І, Єчкало Ю.В. 2024,
© Криворізький національний університет, 2024

ЗМІСТ

Передмова.....	7
Загальні рекомендації до виконання лабораторних робіт.....	8
Правила оформлення звіту про виконання лабораторної роботи.....	9
Методичні вказівки до обчислень.....	9
Приклад складання висновку до лабораторної роботи.....	10
Розділ I. Змістовий модуль «Квантова оптика»	
1. Теоретична частина.....	11
§1.1. Дифракція світла й умови її спостереження.....	11
§1.2. Дифракція Фраунгофера на одній щілині.....	12
§1.3. Дифракційна ґратка	14
§1.4. Теплове випромінювання. Квантова природа випромінювання.....	16
§1.5. Фотони та їх характеристики.....	17
§1.6. Зовнішній фотоефект та його закони.....	18
§1.7. Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту.....	20
§1.8. Елементарна теорія спектрів. Спектральні закономірності найпростіших атомів.....	22
Інструкції до лабораторних робіт.....	26
1.1. Лабораторна робота №3 «Визначення довжини світлової хвилі за допомогою дифракційної ґратки».....	26
1.2. Лабораторна робота №7 «Вивчення властивостей фотоелемента».....	29
1.3. Лабораторна робота №8 «Вивчення спектрів випромінювання атомів неону та ртуті».....	33
1.4. Лабораторна робота №9 «Вивчення спектра атома водню».....	37
Розділ II. Змістовий модуль «Атомна фізика»	
2. Теоретична частина.....	41
§2.1. Метали, діелектрики та напівпровідники, згідно з зонною теорією.....	41
§2.2. Квантові генератори світла.....	43

§2.3	Термістори. Температурна залежність напівпровідників.....	47
§2.4	Фотопровідність напівпровідників.....	50
§2.5	$p - n$ перехід та його вольт-амперна характеристика	52
§2.6	Світлодіоди.....	54
	Інструкції до лабораторних робіт.....	55
2.1.	Лабораторна робота №10 «Визначення довжини хвилі когерентного випромінювання лазера».....	58
2.2.	Лабораторна робота №15 «Визначення ширини забороненої зони напівпровідникового терморезистора».....	63
2.3.	Лабораторна робота №16 «Дослідження вольт-амперної характеристики напівпровідникового діода».....	67
2.4.	Лабораторна робота №17 «Вивчення фотопровідності напівпровідників».....	69
	Статистична обробка результатів вимірювань.....	74
	Список рекомендованої літератури	80
	Перелік посилань.....	81
	Додатки.....	83
	Глосарій основних фізичних термінів.....	89

ПЕРЕДМОВА

Фізичний експеримент, як метод дослідження, набуває дальшого поширення в суміжних з фізикою дисциплінах, особливо в мікроелектроніці, нанотехнологіях, технічних науках.

Лабораторні роботи забезпечують ґрунтовні навички здобувача вищої освіти застосовувати теорію на практиці, тому до виконання лабораторних робіт насамперед потрібно з'ясувати фізичну суть процесів: опрацювати теоретичний матеріал, необхідний для зрозуміння експериментальної частини. З цією метою, кожний розділ містить теоретичний матеріал, який узгоджено з темами лабораторних робіт. Але, треба мати на увазі, що викладений теоретичний розділ не може бути повною заміною підручника та конспекту лекцій. Крім цього, перед виконанням практичної частини, потрібно опрацювати інструкцію до лабораторної роботи та підготувати відповіді на контрольні запитання.

В додатках, у кінці посібника, подано методику статистичної обробки результатів експерименту, наведено довідкові матеріали, таблиці із значеннями деяких фізичних величин. Особливістю запропонованого посібника є додаток, в якому представлений глосарій деяких фізичних термінів з перекладом на англійську мову.

Всі навчальні посібники, методичні вказівки, збірники задач, які видаються викладачами кафедри вищої математики та фізики Криворізького національного університету потрапляють в електронний навчально - методичний комплекс, розташований на дистанційних платформах: Google Classroom, Google Meet. Здобувач має можливість користуватися як паперовою, так і електронною версіями навчально – методичної літератури.

Загальні рекомендації до виконання лабораторних робіт

На виконання кожної лабораторної роботи відводиться дві години аудиторної роботи студентів і на оцінювання впливає як якість виконання самої роботи, так і вчасність її здачі.

Для ефективного використання часу рекомендується наступне.

1. Вдома, готуючись за електронними версіями методичних інструкцій до лабораторних робіт, бажано підготувати «пусту заготовку» до лабораторної роботи, яка включатиме в себе оформлену титульну сторінку, записані мету та обладнання для роботи, короткі теоретичні відомості й звітну таблицю тощо.

2. Перед виконанням завдання необхідно ретельно опанувати відповідний теоретичний розділ. Вдома, готуючись до заняття, завчасно знайти та записати у зошит відповіді на контрольні запитання до лабораторної роботи, щоб мати змогу вчасно захистити свою роботу й отримати більш високий оцінювальний бал.

3. Під час роботи неприпустиме порушення академічної доброчесності: здобувач повинен вказати джерело інформації, використане під час виконання завдання.

4. На занятті, виконавши необхідну серію вимірювань та отримавши перші розрахункові значення шуканих величин, проконсультуватися з викладачем щодо правильності виконання роботи та пересвідчитися в правильності виконання розрахунків (це дасть змогу попередити необхідність повторного виконання вимірювань чи розрахунків у подальшому).

5. На занятті завершити всі необхідні розрахунки, сформулювати висновок до роботи і здати на перевірку викладачеві.

Правила оформлення звіту про виконання лабораторної роботи

За підсумками кожної виконаної лабораторної роботи оформлюється звіт, який повинен містити наступні розділи:

1. Титульна сторінка: ПІБ студента, група, ПІБ викладача, який контролює виконання лабораторної роботи та оцінює її результат.
2. Назва, мета роботи.
3. Короткі теоретичні відомості: обов'язкове наведення розрахункових формул з поясненнями.
4. Таблиці, які містять результати здійснених розрахунків.
5. Статистична обробка отриманих результатів.
6. Висновок.

Методичні вказівки до обчислень

1. Перед тим, як перейти до обчислень, треба засвоїти відповідний теоретичний матеріал.

2. Виразити всі числові дані в одній системі одиниць СІ (якщо це доцільно).

3. Одержати числовий результат, користуючись правилами наближених обчислень. Відповідь треба записувати у стандартному вигляді. Наприклад, замість 567000 слід записати $5,67 \cdot 10^5$, замість 0,000355 записати $3,55 \cdot 10^{-4}$. Остаточний результат, як правило, треба записувати з трьома значущими цифрами.

4. Після одержання числового результату слід оцінити його достовірність. Така оцінка іноді допомагає знайти допущену помилку у розрахунках. Наприклад, прискорення вільного падіння не може перевищувати швидкості світла у вакуумі, або заряд частинки не може бути меншим від елементарного заряду.

Приклад складання висновку до лабораторної роботи

Висновок є важливим скороченим відображенням всієї роботи та має містити вичерпну інформацію про отримані результати. Правильно складений висновок має впливати з мети та містити в собі інформацію про отриманий результат та похибки його визначення.

Наприклад, нехай в деякій роботі було сформульовано мету: «визначити довжину хвилі лазерного випромінювання». Якщо в ході виконання роботи отримали кінцевий результат $\lambda = (6,23 \pm 0,15) \cdot 10^{-7}$ м, тоді висновок до цієї роботи можна записати наступним чином: *«в лабораторній роботі було визначено довжину хвилі випромінювання гелій-неонового лазера, яка дорівнює $\lambda = (6,23 \pm 0,15) \cdot 10^{-7}$ м, з відносною похибкою 2,4% та відносною теоретичною похибкою 1,6%»*

При необхідності, отриманий результат можна проаналізувати, особливо коли отримано великі похибки (більше 20%).

Аналізуючи результат роботи слід пам'ятати, що відносна похибка характеризує якість виконання розрахунків, а відносно теоретична похибка показує відповідність самої лабораторної роботи (її установки чи науково-методичної основи) поставленій меті.

Розділ І. Змістовий модуль «Квантова оптика»

Теоретична частина

Грунтовні дослідження в квантовій оптиці, атомній фізиці, квантовій механіці завдячують оптичному явищу – дифракція. Дифракційні методи дослідження (спектральний аналіз, рентгенівські дослідження на кристалічних ґратках, голографія, створення дзеркал напівпровідникових лазерів) - дуже різноманітні. Завдяки дифракції світла наочно було підтверджено теорію корпускулярно- хвильової природи світла.

§1.1. Дифракція світла й умови її спостереження

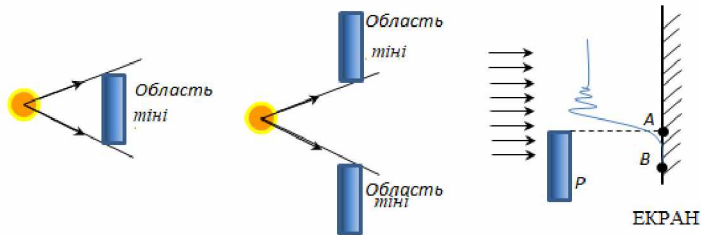


Рис.1.1

Можливість спостереження дифракції залежить від співвідношення довжини хвилі і розмірів неоднорідностей (перешкод на шляху проходження світла).

Якщо на шляху світлової хвилі перебувають непрозорі тіла або екрани з отворами, то грубі спостереження показують, що за цими тілами утворюється область тіні (див рис.1.1). Цю область можна окреслити геометрично, вважаючи, що світло поширюється прямолінійно, світлові промені є прямі лінії.

Більш детальне спостереження показує, що світлові хвилі заходять в область геометричної тіні, причому на границі між областями світла й тіні з'являються границі, що чергуються максимумами й мінімумами світла, що свідчить про деякий перерозподіл світлової енергії на цій границі.

Це огинання світловими хвилями границь непрозорих тіл є утвором інтерференційного перерозподілу енергії по різних напрямках називається дифракцією хвилі.

(Або: явища, що виникають при поширенні світла в середовищі з різкими неоднородностями, називається дифракцією світла).

Явище дифракції можна пояснити, користуючись принципом

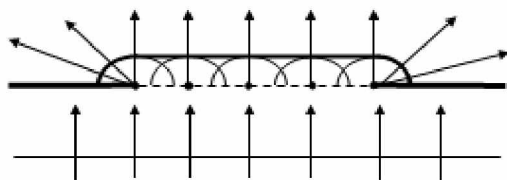


Рис. 1.2.

Гюйгенса: кожна точка середовища, до якої дійшла хвиля, є самостійним джерелом вторинних хвиль; новий фронт хвилі утворюється внаслідок інтерференції.

Наочно принцип Гюйгенса, на прикладі падіння плоскої хвилі на перешкоду з отвором, показано на рис.1.2. Хвильовий фронт плоский лише в середній частині, а біля границі отвору відбувається його загинання, тобто хвиля проникає в область геометричної тіні, огинаючи краї перешкоди. В однорідному середовищі вторинні хвилі матиме форму півсфери, напрямки поширення вторинних хвиль збігаються з напрямком поширення первинної хвилі [3].

§ 1.2. Дифракція Фраунгофера на одній щілині

Дифракція Йозефа Фраунгофера (дифракція плоских світлових хвиль, дифракція в паралельних променях) спостерігається в тому випадку, коли джерело світла й точка спостереження нескінченно вилучені від перешкоди, що викликала дифракцію.

Для спостереження дифракції Фраунгофера необхідно точкове джерело помістити у фокусі збирної лінзи, а дифракційну картину можна спостерігати у фокальній площині другої збирної лінзи, установленій за перешкодою. Нехай монохроматична

хвиля падає нормально площини нескінченно довгої вузької щілини, де b – ширина щілини (рис.1.3) [4].

Різниця ходу між променями 1 і 2 у напрямку φ : $\Delta = b \sin \varphi$. Розіб'ємо хвильову поверхню на ділянці щілини MN на зони Френеля, що мають вид смуг, паралельних ребру M щілини.

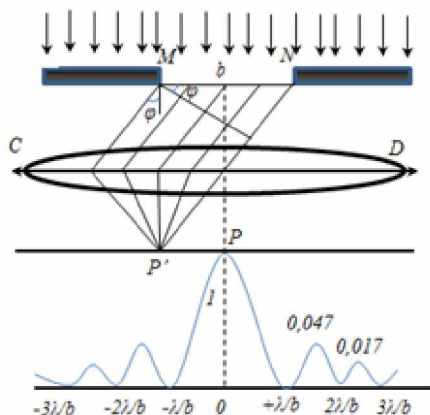


Рис.1.3.

Ширина кожної смуги вибирається так, щоб різниця ходу від країв цих зон була рівна $\lambda/2$, тобто всього на ширині щілини укладеться $2\Delta/\lambda$ зон. Так як світло на щілину падає нормально, то площина щілини збігається із фронтом хвилі, отже, усі точки фронту в площині щілини будуть коливатися синфазно. Амплітуди

вторинних хвиль у площині щілини будуть

рівні, тому що обрані зони Френеля мають однакові площі й однаково нахилені до напрямку спостереження.

Число зон Френеля, що дорівнюють $2\Delta/\lambda$ та укладаються на ширині щілини, залежить від кута φ . Умова мінімуму при дифракції Френеля за умови парого числа зон Френеля:

$$\frac{2\Delta}{\lambda} = \pm 2m \quad \text{або} \quad b \cdot \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2}, \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

тобто в т. Р (див.рис.1.2) спостерігається дифракційний мінімум.

Умова максимуму (для непарного числа зон Френеля): $\frac{2\Delta}{\lambda} = \pm(2m + 1)$,

$$\text{або} \quad b \cdot \sin \varphi = \pm(2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

тобто спостерігається дифракційний максимум.

При $\varphi=0$, $\Delta = 0$ у щілині укладається одна зона Френеля й, отже, у т. Р спостерігається головний (центральный) максимум нульового порядку. Основна частина світлової енергії

зосереджена в головному максимумі: $m = 0, 1, 2, 3, \dots$; $I = 1; 0,047; 0,017; 0,0083 \dots$ (m - порядок максимуму; I - інтенсивність світла).

Звуження щілини приводить до розширення головного максимуму й зменшенню його яскравості (те ж і з іншими максимумами). При розширенні щілини ($b > \lambda$) максимумами будуть яскравіше, але дифракційні смуги стають більш вузькими, а кількість самих смуг - збільшується. При $b \gg \lambda$ у центрі спостерігається різке зображення джерела світла, тобто має місце прямолінійне поширення світла.

При падінні білого світла буде розкладання на його складові. При цьому фіолетове світло буде відхилятися менше, синє - більше і т.д.; червоне - максимально. Головний максимум у цьому випадку буде білого кольору.

§ 1.3. Дифракційна ґратка

Вище було визначено, що явище відхилення світлових променів в однорідному середовищі від прямолінійного напрямку називається дифракцією світла. Відхилення світлових променів від прямолінійного напрямку спостерігається і тоді, коли світло проходить через дуже маленький отвір (щілину). Чим вужча щілина, тим різкіше буде помітне явище дифракції. Відполірована скляна пластинка, на поверхні якої нанесено ряд паралельних рівновіддалених штрихів являє собою дифракційну ґратку. Проміжки між штрихами і є щілинами. Загальна ширина щілини та прозорого проміжку називається періодом або постійною ґратки і позначається літерою b .

У 1785 році американський астроном Девід Ріттенхаус винайшов дифракційну ґратку з метою роз'яснення щодо дивного ефекту при розгляданні вуличного ліхтаря через хустинку.

Вперше дифракційні ґратки для вивчення спектрів було використано у 1821 році німецьким фізиком Фраунгофером [1].

Дифракційна ґратка являє собою сукупність великого числа N однакових по ширині й паралельних одна одній щілин, розділених непрозорими проміжками також однаковою шириною.

Дифракційна картина на ґратці визначається як результат взаємної інтерференції хвиль, що йдуть від усіх щілин, тобто в дифракційній ґратці здійснюється багатопроменева інтерференція. Так як щілини знаходяться одна від одної на однакових відстанях, то різниці ходу променів, що йдуть від двох сусідніх щілин, будуть для даного напрямку під кутом φ однакові в межах усієї дифракційної ґратки (див.рис.1.4) [3].

$$\Delta = (a+b)\sin\varphi ,$$

b - ширина щілини; a - ширина непрозорої ділянки;

$d = a + b$ - період або стала ґратки.

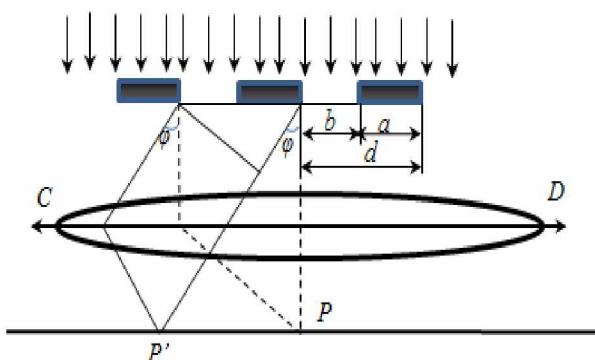


Рис.1.4.

У напрямках, в яких спостерігається мінімум для однієї щілини, будуть мінімуми й у випадку N щілин, тобто умова головних мінімумів дифракційної решітки буде аналогічно умові мінімумів для щілини:

$b \cdot \sin\varphi = \pm m \frac{\lambda}{2}$; $m = 0,1,2,3,\dots$ - умова головних мінімумів.

За умовою максимумів: ті випадки кутів φ , які задовольняють максимумам для однієї щілини, можуть бути або максимумами, або мінімумами, тому що все залежить від різниці ходу між променями.

$b \cdot \sin\varphi = \pm k \frac{\lambda}{2}$; $k = 0,1,2,3,\dots$ - умова головних максимумів.

Ці максимуми будуть розташовані симетрично щодо центрального (нульового $k = 0$) максимуму.

Дифракційна картина, при дифракції на дифракційній ґратці залежить від N і від відношення d/b .

Нехай $N = 5$, $d/b = 4$. Тоді число головних максимумів ($\sin \varphi = 1$) $k_{max} < d/\lambda$.

Між ними по $N - 2 = 3$ додаткових максимуму й $N - 1 = 4$ додаткових мінімумів. При $k/m = d/b = 2, 4, 8, \dots$ - головних максимумів не буде, а будуть головні мінімуми.

Якщо дифракційну ґратку висвітлювати білим світлом, то всі максимуми, крім центрального ($k = 0$) розкладуться в спектр - сукупність складових кольорів, причому фіолетові лінії будуть ближче до центру, а червоні далі (тому що $\lambda_{\text{ф}} < \lambda_{\text{черв.}}$, те $\varphi_{\text{черв}} < \varphi_{\text{ф}}$).

Систематичний аналіз спектральних ліній деяких хімічних елементів дозволило Кірхгофу і Бунзену встановити однозначний зв'язок між спектрами поглинання і випромінювання газів і індивідуальністю відповідних атомів. Так у 1859 році був запропонований спектральний аналіз, за допомогою якого у теперішній час можна виявити речовини, концентрація яких складає 0,1 нм.

§1.4. Тепле випромінювання

Квантова природа випромінювання

Вчення про теплове випромінювання вважається однією з наймолодших гілок у фізиці. У першій половині XIX ст. існувала плутанина між тепловим і світловим випромінюваннями. Всі нагріті тіла при будь якій температурі випромінюють енергію у вигляді електромагнітних хвиль: слабо нагріті тіла є джерелом інфрачервоного випромінювання, сильно нагріті – видимого і ультрафіолетового. Випромінювання тіл, зумовлене нагріванням, що виникає за рахунок внутрішньої енергії тіл (теплого руху молекул і атомів), називається тепловим випромінюванням. Воно відноситься до інфрачервоної частини спектра електромагнітних хвиль, тобто більш 780 нм. Дослідно встановлено, що це єдиний вид випромінювання, яке перебуває в рівновазі з випромінювальними тілами. Тобто, теплове випромінювання є

рівноважним: в замкненій системі розподіл енергії між тілами, які випромінюють і поглинають будь які частоти, є незмінним. Умовою термодинамічної рівноваги системи з оточуючим середовищем є вираз: $dW_{\text{погл}} = dW_{\text{пад}}$.

На підставі дослідних даних, використовуючи класичні положення термодинаміки, Джозеф Стефан і Людвіг Больцман встановили закон, який показує розподіл енергії всього спектра випромінювання для будь-яких тіл:

$$R_e = \sigma T^4,$$

де R_e – енергетична світність (інтегральна випромінювальна здатність) абсолютно чорного тіла; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}^4)$ – стала Стефана – Больцмана; T – абсолютна (термодинамічна) температура тіла.

Можливість обчислити розподіл енергії при будь - який температурі, якщо він відомий при даній температурі; показати й пояснити, чому у разі зниження температури максимум енергії випромінювання зміщується у бік більших довжин хвиль:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T},$$

де λ_{max} – довжина хвилі, яка відповідає максимальному значенню випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла;

$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{K}$ – стала Віна.

Дослідження теплового випромінювання зіграло важливу роль у створенні квантової теорії світла, підґрунтям якою виявилось введення Максом Планком у 1900р квантової гіпотези, яка була не продовженням класичної фізики, а переворотом у ній [2].

§1.5. Фотони та їх характеристики

Пропускаючи і поглинаючи енергію світло поводить ся як потік частинок з енергією $E = h\nu$. Порція світла випадково почала бути схожою на те, що називають частинкою. Властивості світла, які виявляються під час поглинання і випромінювання, називають корпускулярними, а саму світлову частинку - фотоном, або квантом електромагнітного випромінювання.

У сучасній фізиці фотон розглядають як одну із елементарних частинок. Таблиця елементарних частинок уже декілька десятків років починається із фотона.

Відповідно до теорії відносності енергія завжди пов'язана з масою відношенням: $E=mc^2$.

Прирівнявши обидва рівняння для енергії фотона отримаємо масу фотона:

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}; \quad m = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{\lambda c}$$

Отже:

1. Фотон має лише релятивіську масу і не має маси спокою:

$$m_{\phi} = 0$$

2. Фотон має масу, поки він рухається зі швидкістю світла.

Якщо фотон зіштовхується з перешкодою, енергія фотона переходить до перешкоди і його маса зникає. Фотонів, які перебувають у спокої, не існує.

За відомою масою і швидкістю можна визначити імпульс фотона:

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Імпульс фотона направлений вздовж променю світла і є векторною величиною. Якщо на шляху фотона виникає перешкода, він передає імпульс їй. Як і в класичній механіці, в квантовій оптиці виконуються закони збереження енергії та імпульсу.

За сучасними уявленнями світло випромінюється і поглинається порціями, а тому і поширюється порціями. Фотон зберігає свою індивідуальність протягом всього свого існування. Водночас світлу властиві явища інтерференції, дифракції, поляризації та інші хвильові властивості.

§1.6. Зовнішній фотоефект та його закони.

У розвитку уявлень про природу світла важливий крок зроблено під час вивчення явища, відкритого Г. Герцем і ґрунтовно вивченого О. Г. Столетовим. Це явище отримало назву фотоефект.

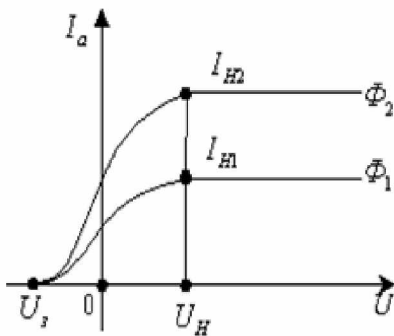


Рис. 1.5.

Фотоелементом називають явище виривання електронів із речовини під дією світла. Розрізняють:

- зовнішній фотоелемент - явище вибивання електронів з поверхні тіла під дією електромагнітного випромінювання;
- внутрішній фотоелемент - явище збільшення електропровідності напівпровідника або діелектрика за рахунок електронів, вирваних з молекул або атомів під дією світла;

- вентильний фотоелемент – збудження ЕРС на межі метал-напівпровідник чи на межі різних напівпровідників.

Експериментально встановлені закономірності зовнішнього фотоелементу, які мають назву вольт-амперних характеристик (рис. 1.5) дозволили встановити наступне:

а) якщо немає напруги між електродами значення фотострум відмінне від нуля. (Це означає, що фотоелектрони мають під час вильоту кінетичну енергію);

б) у разі досягнення між електродами деякої прискорювальної напруги U_H фотострум перестає залежати від напруги, тобто його значення досягає насичення I_{H1}, I_{H2} ;

в) за деякої затримувальної напруги U_z (на електрод А подано «-» від джерела струму) фотострум припиняється;

г) значення затримувальної напруги U_z не залежить від світлового потоку Φ .

Вимірюючи затримувальну напругу, можна знайти максимальне значення кінетичної енергії електронів, що вириваються світлом із катода:

$$\frac{mv_{max}^2}{2} = eU$$

Червоне світло з великою довжиною хвилі не вибивало електрони, а фіолетове за будь-якого малого світлового потоку легко вибивало електрони.

На основі цих дослідів були сформульовані закони зовнішнього фотоефекту:

I. Закон Столетова: при фіксованій частоті падаючого світла, кількість фотоелектронів, що вириваються із катода за одиницю часу пропорційна до інтенсивності світла (сила фотоструму насичення пропорційна до енергетичної освітленості катода).

II. Максимальна початкова швидкість (максимальна початкова кінетична енергія) фотоелектронів зростає лінійно з частотою світла і не залежить від його інтенсивності.

III. Для кожної речовини існує «червона межа» фотоефекту, тобто мінімальна частота ν_0 падаючого світла, нижче від якої фотоефект неможливий. Значення ν_0 залежить від хімічної природи речовини і стану її поверхні.

Фотоефект є безінерційним і виліт фотоелектронів починається з моменту освітлення катода. Це пояснюється тим, що передавання енергії при взаємодії фотона з електроном відбувається майже миттєво.

Лише перший закон зовнішнього фотоефекту можна було пояснити на основі класичної електромагнітної хвильової теорії.

§1.7. Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту

Альберт Ейнштейн у 1905 р. показав, що явище фотоефекту і його закони можна пояснити за допомогою запропонованої ним квантової теорії фотоефекту: світло з частотою ν не лише випромінюється, але і поширюється у просторі, і поглинається речовиною окремими порціями, енергія яких $\mathcal{E} = h\nu$, де h – стала Планка.

Поширення світла треба розглядати не як неперервний хвильовий процес, а як потік дискретних світлових квантів, що рухаються у вакуумі із швидкістю світла. Ці кванти й отримали назву фотонів. За Ейнштейном, кожен фотон поглинається лише одним електроном. Тому кількість вирваних фотоелектронів повинна бути пропорційна до кількості поглинутих фотонів, тобто пропорційна до інтенсивності світла (перший закон фотоефекту).

При зовнішньому фотоефекті фотон поглинається електроном провідності металу і одержує його енергію $h\nu$ повністю. Енергія фотона витрачається на виконання електроном роботи виходу A з металу (таблична величина) і на надання електрону масою m , що вилітає з металу, кінетичної енергії $\frac{mv^2}{2}$. Енергетичний баланс цієї взаємодії описується рівнянням Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту:

$$E = A_{\text{вих}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2},$$

де $A_{\text{вих}}$ – робота виходу електрона з освітлюваного металу, Дж; $m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31}$ – маса спокою електрона, кг; v_{max} – максимальна швидкість фотоелектрона, м/с².

Рівняння Ейнштейна дає змогу пояснити другий і третій закони фотоефекту. Максимальна кінетична енергія фотоелектрона лінійно зростає із збільшенням частоти падаючого світла і не залежить від його інтенсивності, оскільки ні робота виходу, ні частота ν від інтенсивності світла не залежать (другий закон). Оскільки із зменшенням частоти світла кінетична енергія фотоелектрона зменшується, то при деякій досить малій частоті $\nu = \nu_0$ кінетична енергія фотоелектрона буде дорівнювати нулю. Енергії кванта вистачить тільки на те, щоб вирвати електрон з металу: $h\nu_0 = A_{\text{вих}}$ [3].

Отже, - енергія кванта має бути більшою ніж $A_{\text{вих}}$;
- мінімальна частота ν_{min} , з якої починається фотоефект, має назву «червона межа» фотоефекту:

$$\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{вих}}}{h};$$

Відповідно:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{hc}{A};$$

λ_{max} – максимальна довжина хвилі випромінювання, при якій ще можливий фотоефект.

Наприклад, для цинку «червона межа» відповідає довжині хвилі $\lambda_{\text{min}} = 3,7 \cdot 10^{-7}$ м ультрафіолетового проміння.

Значення «червоної межі» ν_0 (мінімальної частоти, або максимальної довжини хвилі) залежить лише від роботи виходу електрона з металу, тобто від хімічної природи речовини і стану її поверхні (третій закон зовнішнього фотоефекту).

Прилади, в яких використовується явище фото ефекту, називаються фотоелементами.

Завдяки відкриттю фото ефекту стало можливим:

- 1) звукове кіно;
- 2) створення різноманітних апаратів, які слідкують за освітленістю вулиць, своєчасно запалюють і гасять бакени на річках, працюють "контролерами" в метро, рахують готову продукцію, контролюють якість обробки деталей;
- 3) перетворення світлової енергії в електричну за допомогою фотоелементів.

§1.8. Елементарна теорія спектрів. Спектральні закономірності найпростіших атомів

Квантова фізика, яка відрізняється від попередніх теорій введенням М. Планком елементарного кванта дії, існує лише з початку XX ст. Але її експериментальні корені частково знаходяться у XIX ст., коли було доведено, що окремі лінії спектрів газоподібних речовин утворюють серії (групи) ліній, частоти яких мають певну закономірність. Вивчення атомних спектрів дозволило спізнати внутрішню структуру атомів.

Спектром випромінювання називається розподіл інтенсивності світла по частотам. Спектром поглинання називається розподіл інтенсивності світла по частотам поглинаємого тілом випромінювання. Піки інтенсивності називаються спектральними лініями.

Оптичні спектри спостерігаються в області частот від інфрачервоної до ультрафіолетової. Вони поділяються на лінійчаті, смугасті та суцільні. Всі три типи спектрів обумовлені особливостями енергетичного стану електонів в атомах і молекулах речовини. Спектральні лінії оптичних лінійчатих спектрів утворюються внаслідок випромінювання одноатомних газів та пари металів при переходах валентних електронів з вищих збуджених станів на нижчі або в основний стан. Смугасті (молекулярні) спектри – це сукупність смуг, утворених близько розміщеними спектральними лініями. Суцільні спектри належать рідинам і твердим речовинам.

Світло після проходження через призму з прозорого матеріалу розкладається в спектр. Це явище називається дисперсією.

Воно зумовлене залежністю показника заломлення речовини від частоти (або довжини) світлової хвилі. Тому призма використовується для побудови спектральних приладів (монохроматорів, спектрографів і т. і.). Її якість характеризується кутовою дисперсією $\frac{d\delta}{d\lambda}$, яка залежить від заломлюючого кута призми та матеріалу призми.

Для дослідження в різних частинах спектра потрібні призми з різних матеріалів: для видимої з скла, для ультрафіолетової – з кварцу, для інфрачервоної – з кам'яної солі або флюориту [2].

У монохроматорах спектр розглядають через окуляр. Для фіксації певних спектральних ліній в окулярі встановлюють відліковий покажчик, спектр у полі зору переміщують за допомогою спеціального вимірного барабана. В спектрографах, у фокальній площині окуляра розміщують фотопластинку і спектр фотографують. Сучасні спектрографи спроможні сприймати та фотографічне реєструвати випромінювання від 100 нм до 1000 нм.

Для визначення довжин хвиль на спектрограмі призматичного спектрографа потрібно попередньо проградувати його шкалу за відомим спектром.

Якщо на щілину спектрографа направити світло від Сонця або світло від розжарених до білого світіння твердих і рідких тіл, то їхній спектр має вигляд різноколірної стрічки з неперервним переходом одного спектрального кольору в інший. Такий спектр називають суцільним, або неперервним. У ньому представлені всі довжини хвиль, що йдуть неперервно.

Якщо на щілину спектрографа за допомогою лінзи спроектувати світло від газорозрядних трубок, наповнених, наприклад, неонем, воднем або паром ртуті чи натрію, то утворюється спектр, що складається з окремих елементів. Такі спектри називаються лінійчастими.

При одержанні спектрів випромінювання проявляються також спектри поглинання світла. В цьому разі на фоні суцільного

спектра видно темні лінії або смуги. Спектр такого типу відкрив Фраунгофер, досліджуючи спектр Сонця. Ці лінії утворюються в результаті поглинання деяких світлових хвиль у сонячній і земній атмосфері.

Важливе відкриття, що стосується спектрів поглинання, належить Густаву Кірхгофу. Він довів, що будь який елемент у газоподібному стані поглинає світло такої самої довжини хвиль, які він випромінює (див. §1.3).

При нагріванні газу або при пропусканні скрізь нього електричного струму кожен газ випромінює світло зі строго визначеними довжинами хвиль.

Найважливіша властивість лінійчастих спектрів полягає в тому, що лінії в такому спектрі розташовані в певному порядку, утворюючи так звані серії спектральних ліній.

Спектральною серією називається сукупність ліній випромінювання, що відповідають переходу електрона в атомі на один і той же нижчий рівень енергії.

Ця правильність розташування ліній особливо яскраво виявляється у спектрі атома водню. У видимій області спектр водня має чотири спектральні лінії. Закономірність між довжинами хвиль цих чотирьох ліній водню, виявив Йоганн Бальмер у 1885 р. Він помітив, що довжини хвиль цих ліній видимого спектра водню можна обчислити за формулою:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right), k = 2; m = 3, 4, 5, \dots \quad (1)$$

В подальших дослідженнях було виявлено, що, крім серії Бальмера, у спектрі атомарного водню існують інші серії, які також можна визначити аналогічними формулами. Отже, оптичний спектр атома водню складається з декількох серій, що заходяться у невидимій області випромінювання.

- ✓ Серії Лаймана – у віддаленій ультрафіолетовій області.
- ✓ Серії Бальмера у видимій і наближеній до ультрафіолетовій областях. Спектральні лінії, що відрізняються різними значеннями k (1), утворюють серію ліній у відомій області спектра, яка називається серією Бальмера. Виявлено 37 ліній серії Бальмера.

- ✓ Серії Пашена, Брекета, Пфунда- в інфрачервоній області спектра.

Подальші роботи шведського вченого Йоханнеса Ридберга та інших вчених дали можливість всі відомі серії атомарного водню подати однією емпіричною формулою, яка називається узагальненою формулою Бальмера:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

де $n = 1, 2, 3, \dots$ має в кожній серії стале значення і визначає серію; $m = n+1, n+2, n+3, \dots$ - визначає окремі лінії серії; набуває значень, що починаються з числа, на одиницю більшого за n , і до безмежності.

$R = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ - стала Ридберга; λ - довжина хвилі.

Константу R вдалося визначити зі спектроскопічних вимірювань з точністю до однієї мільйонної. Так, для водневого спектра ця константа дорівнює: $R = (10967770 \pm 4) \text{ м}^{-1}$.

Наведені формули підібрано емпірично і довгий час не мали теоретичного обґрунтування.

Інструкції до лабораторних робіт

1.1. Лабораторна робота № 3

ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИФРАКЦІЙНОЇ ҐРАТКИ

Мета роботи: визначити довжину світлової хвилі червоного і фіолетового кольору за допомогою дифракційної ґратки.

Прилади: оптична лава з установленими на ній освітлювачем, дифракційною ґраткою та екраном із вузькою вертикальною щілиною.

1. Короткі теоретичні відомості

Головне призначення дифракційної ґратки, як спектрального приладу, є визначення довжини світлової хвилі. Формула дифракційної ґратки:

$$d \sin \phi = k\lambda \quad (1)$$

В даній роботі використовується желатинова репліка, що має 100 щілин на 1 мм довжини, відповідно постійна ґратки дорівнює:

$$b=1/100 \text{ мм}=10^{-5}\text{м}$$

Якщо на дифракційну ґратку падають монохроматичні промені світла, то фіксуються тільки дифракційні максимуми, забарвлені в колір падаючого світла. У даному випадку, коли на ґратку падає біле світло, фіксуються дифракційні максимуми у вигляді

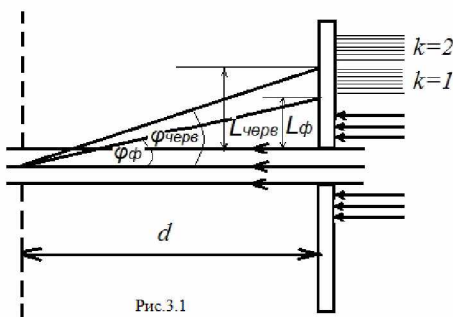


Рис.3.1

дифракційного спектра, в якому променям, що мають більшу довжину хвилі, відповідає більше відхилення від початкового напрямку. Тобто червоний промінь відхиляється більше, ніж інші промені видимого спектра, а фіолетовий – менше

(рис.3.1.). В центрі дифракційної картини видно геометричне зображення щілини, так званий дифракційний максимум. Перші,

колі коефіцієнт $K=1$, спектри по обидва боки від центрального чіткого зображення щілини називаються спектрами першого порядку, другого ($K=2$), і т.д. Якщо відомі постійна ґратки, порядок спектру, визначення довжини хвилі зводиться до виміру дифракційного кута (це кут між нормаллю до площини ґратки і напрямком на положення максимума від центрального зображення щілини). Як видно з рис.3.1, кут дифракції, як правило, малий, тому $\sin \phi = \operatorname{tg} \phi = L/d$. Підставимо останній вираз у формулу (1) і одержимо робочу формулу для даної лабораторної роботи:

$$\lambda = bL_{\text{cep}}/kd,$$

де λ - довжина хвилі; b - постійна ґратки;

L - відстань даного дифракційного спектра від центрального зображення щілини; d - відстань від ґратки до екрану; k - порядок спектру.

2. Порядок виконання роботи

1. Ввімкнути освітлювач, встановлений на оптичній лаві.
2. На відстані $d = 0,7$ м від щілини розмістити дифракційну ґратку, встановивши її паралельно до площині щілини в екрані.
3. Дивлячись через дифракційну ґратку, досягти чіткого зображення вертикальних дифракційних смуг в площині щілини.
4. Взяти паперову смужку і переміщуючи її паралельно до щілини, сумістити край смужки з серединою першої дифракційної смуги фіолетового кольору ліворуч від щілини. Відмічають поділку на шкалі, що відповідає середині дифракційної смуги. Визначити за міліметровою шкалою на екрані відстань L від смужки до щілини. Аналогічний відлік дістати праворуч від щілини. Визначити середнє значення L .
5. У кожному спектрі вибирають два кольори (червоний і фіолетовий), і вимірюють положення цих спектрів першого і другого порядків.
6. Змінити відстань від щілини до дифракційної ґратки до 0,35 м.
7. Повторити вимірювання для тих же кольорів і тих же порядків спектрів (див.п.4).

8. Дані вимірювань і обчислень довжини світлової хвилі занести до звітної таблиці 3.1.

9. Розрахувати похибки вимірювань (див. розділ «Статистична обробка результатів вимірювань»).

10. Записати кінцевий результат у вигляді: $\lambda = \lambda_{\text{сер}} \pm \Delta\lambda$ для червоного і фіолетового кольорів.

11. Порівняти одержані результати із середніми табличними значеннями довжин хвиль фіолетового і червоного кольору (див. Додатки) і сформулювати висновок.

Таблиця 3.1

Колір спектру	Порядок спектру	Ліворуч L, м	Праворуч L, м	Середнє L _{сер} , м	λ_i , м	$\Delta\lambda_i$, м	$(\Delta\lambda_i)^2$, м ²
<i>b=0,7 м</i>							
фіолетовий	<i>k=1</i>						
	<i>k=2</i>						
червоний	<i>k=1</i>						
	<i>k=2</i>						
<i>b=0,35 м</i>							
фіолетовий	<i>k=1</i>						
	<i>k=2</i>						
червоний	<i>k=1</i>						
	<i>k=2</i>						

Контрольні запитання

1. Що називається дифракцією світла і які умови необхідні для її спостереження?
2. Чому в повсякденному житті ми не спостерігаємо дифракцію світла?

3. Що являє собою дифракційна ґратка? Що розуміють під періодом ґратки?
3. Поясніть вигляд дифракційної картини при дифракції білого світла на щілині. Чому дифракційна ґратка розкладає біле світло в спектр?
4. Записати і пояснити формулу дифракційної ґратки.

1.2. Лабораторна робота № 7

ВИВЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФОТОЕЛЕМЕНТА

Мета роботи:

- побудувати вольт - амперну і світлову характеристики фотоелемента;
- визначити чутливість фотоелемента.

Прилади: фотоелемент, джерело світла (лампа), оптична лавка, блок живлення фотоелемента, мікроамперметр, вольтметр, потенціометр R, випрямляч.

1. Короткі теоретичні відомості

Явище фотоефекту полягає в тому, що світлові кванти (фотони), падаючи на атоми металів, вибивають з поверхні останніх електрони. Енергетичний баланс цієї взаємодії описується рівнянням Ейнштейна:

$$h\nu = A + E_{max},$$

де $h\nu$ - енергія фотона, A - робота виходу електрона із металу, E_{max} - максимальна кінетична енергія електрона, що вилітає із металу.

Під дією світла виникає електричний струм - фотострум. Прилади, в яких використовується явище фотоефекту, називаються фотоелементами.

2. Опис установки

Установку для дослідження зовнішнього фотоефекту змонтовано на оптичній лаві, вздовж якої закріплено масштабну лінійку.

Джерело світла (електрична лампочка) і вакуумний фотоелемент поміщені у світлонепроникний металевий кожух. Електричну схему установки наведено на рис. 7.1. Основною частиною установки є вакуумний фотоелемент Φ із центральним анодом A , який являє собою сітку на який подається додатний потенціал електричного поля. Фотоелемент являє собою скляний

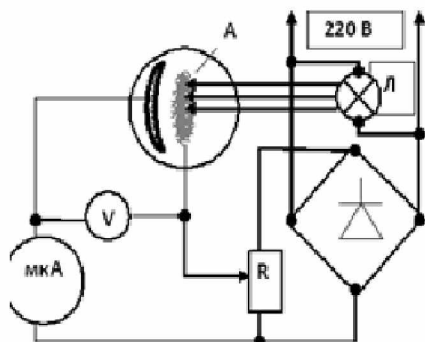


Рис. 7.1

сферичний балон, на одну половину внутрішньої поверхні якого нанесені один на один тонкий шар сурми і тонкий світлочутливий шар цезію, шляхом конденсації парів цих металів у вакуум.

Світлочутливий шар фотоелемента - катод K , на який подається від'ємний потенціал електричного поля. Для спостереження

фотоелемента у електричне коло ввімкнено мікроамперметр, так як величина фотоструму має порядок $10^{-5} A$. Змінювання прикладеної до фотоелемента напруги відбувається потенціометром.

3. Порядок виконання роботи.

І. Побудова вольтамперної характеристики (ВАХ) фотоелемента.

Вольтамперною характеристикою фотоелемента називається залежність фотострума від анодної напруги при постійному світловому потоці, що падає на катод фотоелемента :

$$I_{\phi} = f(U_a)$$

при $\Phi = const$, де Φ -світловий потік, що падає на катод фотоелемента.

Примітка: Фотострумом називається струм, що проходить через фотоелемент, його вимірюють у даній роботі мікроамперметром.

Анодною напругою U_a називається різниця потенціалів між катодом **К** и анодом **А** фотоелемента, що вимірюється в даній роботі вольтметром **V** і змінюється потенціометром.

1. Встановити фотоелемент на відстані **20 см** від джерела світла.
2. Увімкнути установку в мережу 220 В і увімкнути світло лампи.
3. За допомогою потенціометра **R** встановити по вольтметру **V** анодну напругу **100 В** и записати значення струму.
4. Змінюючи потенціометром напругу від **100 В** до **0** через кожні **20 В** записувати значення струмів.
5. Виконати виміри по пунктах (3 - 4) для відстаней **25** і **30** см між джерелом світла і фотоелементом.
6. Результати вимірювань записати в звітну табл. 7.1.
7. За результатами вимірювань (п.п. 1-5) побудувати три графіки залежності $I_\phi = f(U_a)$ в одній системі координат.

II. Вимірювання світлової характеристики фотоелемента і визначення його чутливості.

Світловою характеристикою називається залежність фототока від світлового потоку, що падає на катод фотоелемента при *постійній різниці потенціалів* між катодом і анодом, тобто

$$I_\phi = f(\Phi) \text{ при } U = \text{const}$$

1. За допомогою потенціометра **R** установити напругу **U=100 В** і підтримувати її **постійною**.
2. Установити фотоелемент на оптичній лавці на відстані **l=18 см** від лампи.
3. Збільшуючи відстань між фотоелементом і лампою, через кожні **2см** записати в табл. 7.2 показання мікроамперметра.
4. Для кожного значення відстані обчислити розмір світлового потоку Φ за формулою:

$$\Phi = \frac{I \cdot S}{l^2},$$

де **I** - сила світла джерела, яка дорівнює 20 кД,
S - площа вікна фотоелемента, $S = 3 \times 10^{-4} \text{ м}^2$.

5. Обчислити для всіх значень I_Φ чутливість фотоелемента γ за формулою: $\gamma = \frac{I_\Phi}{\Phi}$.

6. Результати вимірювань та обчислень занести до табл.7.2.

7. Побудувати графік залежності $I_\Phi = f(\Phi)$.

Таблиця 7.1

№п п	U _a , В	Сила струму при різних відстанях фотоелемента, мкА		
		<i>l</i> =20 см	<i>l</i> =23 см	<i>l</i> = 25 см
1	100			
2	90			
3	80			
4	70			
5	60			
6	50			
7	40			
8	30			
9	20			
10	10			
11	0			

Таблиця 7.2

№ <i>nn</i>	ℓ , <i>м</i>	U _a , <i>В</i>	I _Φ , 10 ⁻⁶ А	Φ, <i>лм</i>	γ _i , А/лм	Δγ _i , А/лм	(Δγ _i) ² , (А/лм) ²
1		100					
2							
3							
4							
5							

7. Обчислити середнє арифметичне значення чутливості фотоелемента $\gamma_{\text{сер.}}$.

8. Розрахувати похибку вимірювань чутливості фотоелемента за стандартною методикою (див. «Статистична обробка результатів вимірювань»).

9. Остаточний результат записати у вигляді:

$$\gamma = (\gamma_{\text{сер}} \pm \Delta\gamma) \text{ А/лм}$$

10. У висновках по роботі проаналізувати отримані результати, зазначити, який вигляд мають вольт-амперні та світлова характеристики фотоелемента.

Контрольні запитання

1. Які існують труднощі пояснення законів зовнішнього фотоелефекту в хвильовій теорії світла?
2. Запишіть рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоелефекту та, використовуючи її, поясніть закони зовнішнього фотоелефекту.
3. Що таке робота виходу електрона з металу і від чого вона залежить?
4. При якій умові у вакуумному фотоелементі може спостерігатися фотострум насичення?
5. Назвіть фотометричні величини, які використовуються у даній роботі і дайте їх визначення.
6. Наведіть сучасні приклади застосування явища фотоелефекту.

1.3. Лабораторна робота № 8

ВИВЧЕННЯ СПЕКТРІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ АТОМІВ НЕОНУ ТА РТУТІ

Мета роботи: визначити довжини хвиль ліній у спектрі випромінювання ртутно-кварцової лампи за допомогою монохроматора.

Прилади: монохроматор УМ-2, неонові лампи, ртутно-кварцова лампа.

1. Опис установки

Спостереження спектральних ліній випромінювання виконується на монохроматорі УМ-2 зі скляною оптикою, який використовується як спектроскоп. Він призначений для просторового розділення хвиль різної довжини і спектральних досліджень в діапазоні $0,38 - 1,0 \text{ мкм}$.

На рис. 8.1 наведено оптичну схему установки. Від джерела S світло падає на вхідну щілину **1**, розміщену у фокальній площині коліматорної лінзи **3**. Ширина вхідної щілини регулюється мікрометричним гвинтом **2**. Світло паралельним

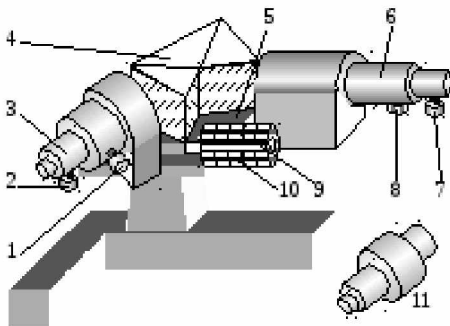


Рис.8.1

пучком падає на призму **4**. Якщо світло від джерела не монохроматичне, то проходячи крізь призму, воно розкладається по довжинах хвиль $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots$. Ці промені утворюють спектральну картину у фокальній площині збиральної лінзи **6**. У спектроскопах спектр розглядають через окуляр

7. Для фіксації певних спектральних ліній в окулярі встановлюють візир **8**. Спектр у полі зору переміщується за допомогою мікрометричного гвинта **5** з відліковим барабаном, ціна поділки якого 2^0 . На барабані нанесено гвинтову доріжку з градусними поділками. Вдовж доріжки рухається показчик повороту барабана. При обертанні барабану призма повертається і в центрі поля зору з'являються різні частини спектра.

Увага! Джерелом світла в даній роботі є газорозрядні спектральні лампи, наповнені неоном та парами ртуті. Лампи слід вмикати тільки на час вимірювань, для уникнення їх старіння.

2. Порядок виконання роботи

Завдання 1. Градування шкали монохроматора

1. Градування шкали монохроматора здійснюється для того, щоб виразити покази шкали барабана у довжинах хвиль. Для градування використовують неонову лампу.
2. Розмістити неонову лампу перед вхідною щілиною монохроматора **1**, увімкнути її в мережу 220 В.
3. Досягти чіткого зображення спектральних ліній в окулярі **7** (див.рис.8.1)., регулюючи ширину вхідної щілини монохроматора (гвинт **2**)
Лінії спектра неону повинні бути тонкими і яскравими, що досягається незначним регулюванням мікрометричним гвинтом **2** ширини вхідної щілини **1** (див. рис. 8.1).
4. Плавно обертаючи барабан **5** суміщати візир окуляра по черзі з серединою кожної видимої спектральної лінії (від червоної до зеленої) і по чергово зробити відлік n за шкалою барабана.
5. Значення відліків занести до табл. 8.1, в якій вже вказано довжини хвиль λ для спектра випромінювання неону.

Таблиця 8.1

	Колір ліній	Довжина хвилі λ , нм	Відлік, n , відн.од.
Неон <i>Ne</i>	Яскраво-червоний	640,2	
	Червоно-оранжевий	614,3	
	Жовтий	585,2	
	Зелений	540,0	

6. За даними табл. 8.1 побудувати графік градування монохроматора на міліметровому папері, або користуючись Excel. Вздовж осі абсцис відкладають покази n шкали барабана, а вздовж осі ординат – довжини хвиль λ відповідних спектральних ліній. Масштаб треба підібрати так, щоб графік був достатньо великим і дозволяв чітко визначити довжину хвилі.
7. Скорисавшись виглядом градувального графіка, який наведений в «Додатках», зробіть апроксимацію побудованого

графіка. Графік градування монохроматора повинен мати вигляд плавної кривої.

Завдання 2. Визначення довжини хвилі спектральних ліній ртуті.

1. Розмістити перед вхідною щілиною монохроматора ртутно - кварцову лампу.
2. Переміщуючи окуляр 7 зорової труби монохроматора, поворотом барабана 5 по чергово встановлювати спектральні лінії випромінювання ртуті навпроти візиру 8.
3. Суміщаючи візир окуляра по черзі з серединою кожної спектральної лінії (від червоної до фіолетової), зробити відлік по шкалі барабана.
4. Значення відліків занести до табл. 8.2.

Таблиця 8.2

Ртуть <i>Hg</i>	Колір ліній	Відлік, <i>n</i> , відн. од.	Довжина хвилі λ , нм
	Червоний		
	Жовтий		
	Зелений		
	Голубий		
	Фіолетовий		

5. Користуючись раніше побудованим графіком градування монохроматора, визначити довжини хвиль λ відповідних ліній спектра ртуті.
6. Отримані результати занести до табл. 8.2.
7. Зробити висновок, порівнявши отримані результати з довідковими даними для спектра випромінювання ртуті (див. табл. Д.8 у Додатках).

Контрольні запитання

1. Поясніть існування спектрів різних типів. Які типи спектрів Вам відомі?

2. Що називають спектром випромінювання і поглинання, спектральними лініями?
3. Який фізичний зміст мають квантові числа m і n у серіальній формулі?
4. Опишіть будову та призначення монохроматора.
5. Вкажіть різницю між спектроскопом і монохроматором.

1.4. Лабораторна робота № 9

ВИВЧЕННЯ СПЕКТРА АТОМА ВОДНЮ

Мета роботи: експериментально дослідити видиму частину спектра випромінювання атома водню та за результатами визначення довжин хвиль спектральних ліній водню розрахувати сталу Рідберга та сталу Планка.

Прилади: газорозрядна трубка, що наповнена воднем, монохроматор УМ-2.

1. Короткі теоретичні відомості

Довжини хвиль спектральних ліній видимого спектра атома водню можна обчислити за формулою Бальмера:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad m = 3, 4, 5, \dots \quad (9.1)$$

де $R = 1,1 \cdot 10^7$ 1/м – стала Рідберга.

Для видимої частини спектра атома водню $n=2$.

Значення сталої Рідберга R можна визначити, записавши формулу (9.1) так:

$$R = \frac{4 \cdot m^2}{\lambda \cdot (4 - m^2)}, \quad m = 3, 4, 5, 6 \quad (9.2)$$

Стала Рідберга R у формулі (9.1) визначається із співвідношення:

$$R = \frac{Z^2 m_e e^4}{8 h^3 \varepsilon_0^2},$$

де Z – порядковий номер воднеподібного атома (для атома водню $Z=1$; $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – маса електрона; $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл –

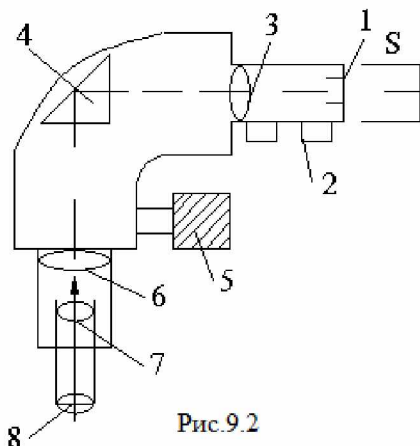
заряд електрона; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ ф} \cdot \text{м}^{-1}$ - електрична стала; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ - швидкість світла; h - стала Планка.

Одержане за формулою (9.1) значення R , може бути використане для визначення сталої Планка:

$$h = \sqrt[3]{\frac{m_e \cdot e^4}{8 \cdot R \cdot \epsilon_0^2 \cdot c}} \quad (9.3)$$

2. Опис установки

Спостереження спектральних ліній випромінювання та фіксація їх положення виконується на монохроматорі УМ-2 зі



скляною оптикою. Він призначений для спектральних досліджень у діапазоні довжин хвиль $\lambda = 0,38 - 1,0 \text{ мкм}$. На рис. 9.2 наведено схему спектрального апарата. Від джерела S світло падає на входну щілину 1, розмішену у фокальній площині коліматорної лінзи 3. Ширина входної щілини регулюється

мікрометричним гвинтом 2. Світло паралельним пучком

падає на призму 4 і розкладається в спектр, який фокусується збиральною лінзою об'єктива 6. У спектроскопах спектр розглядають через окуляр 7. Для фіксації певних спектральних ліній в окулярі встановлюють показчик 8. Спектр у полі зору переміщується за допомогою мікрометричного гвинта 5 з відліковим барабаном. На барабані нанесено гвинтову доріжку з градусними поділками. Вдовж доріжки рухається показчик повороту барабана. При обертанні барабана, призма повертається, і в центрі поля зору з'являються різні частини спектра

3. Порядок виконання роботи

1. Газорозрядну трубку з воднем розмістити перед коліматором і увімкнути її.
2. Обертаючи барабан, сумістити візирну нитку з серединою кожної спектральної лінії і зробити відлік за шкалою барабана.
3. Результати вимірювань записати в табл. 9.1.
4. За допомогою кривої градування монохроматора, (див. додатки, рис. Д2) визначити довжини хвиль λ спектральних ліній. Результати записати в табл. 9.1.
5. За формулою (9.2) для кожної спектральної лінії обчислити величину сталої Рідберга R .

Таблиця 9.1

Колір спектральної лінії	m	Відлік за шкалою монохроматора	λ_i , м	$1/\lambda$, м ⁻¹	$1/m^2$	R_i , м ⁻¹	$\Delta R_i = R_{сер} - R_i $, м ⁻¹	$(R_{сер} - R_i)^2$, м ⁻²
Червоний	3							
Зелений	4							
Синій	5							
Фіолетовий	6							

6. Обчислити похибку розрахунку сталої Ридберга за стандартною методикою.
7. Остаточний результат записати у вигляді:
 $R = (R_{сер} \pm \Delta R) \text{ м}^{-1}$.
8. Використовуючи одержане середнє значення $R_{сер}$, за формулою (9.3) знайти величину сталої Планка h .
9. Записати в табл. 9.1 обернені значення довжин хвиль $1/\lambda$.
10. Побудувати графік залежності оберненої довжини хвилі ($1/\lambda$) від оберненого квадрата номеру серії ($1/m^2$) для спектральної серії Бальмера.
11. Визначити за нахилом графіка значення сталої Рідберга:

$$R = \frac{\frac{1}{\lambda_4} - \frac{1}{\lambda_1}}{\frac{1}{m_1^2} - \frac{1}{m_4^2}} = \frac{\Delta(\frac{1}{\lambda})}{\Delta(\frac{1}{m^2})}.$$

12. Проаналізувати одержані результати обчислення сталої Рідберга за формулою (9.2) і графічним методом. Порівняти одержані результати з табличним значенням сталої Ридберга (див. Додатки, табл.Д) і записати висновки.

Контрольні запитання

1. Як утворюється лінійчатий спектр?
2. Що таке спектральна серія?
3. Запишіть узагальнену формулу для визначення довжин хвиль у спектрі випромінювання атома водню.
4. Назвіть спектральні серії в лінійчатому спектрі атома водню. У яких областях спектра вони розташовані?

Розділ II. Змістовий модуль «Атомна фізика» Теоретична частина

Елементи фізики твердого тіла

§2.1. Метали, діелектрики та напівпровідники, згідно з зонною теорією

Зонна теорія - один з основних розділів квантової теорії твердих тіл. Треба пам'ятати, що це - модель! Зонна теорія описує рух електронів у твердих тілах (кристалах) і є основою сучасної теорії металів, напівпровідників і діелектриків.

Через близьку відстань між атомами у твердих тілах, порядку міжатомних відстаней, енергетичні рівні атомів зміщуються, розщеплюються та розширюються в зони, утворюючи зонний енергетичний спектр. Це стосується, в основному, рівнів зовнішніх валентних електронів. У результаті з кожного дискретного рівня атома або молекули утвориться енергетична зона (зонний енергетичний спектр) і електрони, що знаходяться на цих рівнях, можуть вільно переміщатися по кристалу. На рис.2.1 показано розщеплення рівнів ізольованих спочатку атомів, як функція відстані r між атомами (r_0 - рівноважна відстань, що відповідає умові мінімуму середньої енергії). Ми бачимо, що більш високі рівні валентних електронів розщеплюються сильніше через слабкий зв'язок з атомом. Сусідні енергетичні рівні в межах зони відстоять один від одного на $\Delta E \sim 10^{-22}$ еВ [6,7].

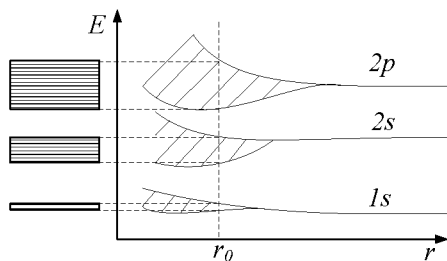


Рис. 2.1

Електрони у твердому тілі можуть мати тільки ті енергії, значення яких лежать у межах дозволених енергетичних зон. Проміжки між ними є забороненими зонами з енергіями, які електрони

цієї речовини мати не можуть.

Розходження в електричних властивостях твердих тіл пояснюється в зонній теорії різним заповненням електронами дозволених енергетичних зон і шириною заборонених зон.

У загальному випадку можна виділити валентну зону, що цілком заповнена електронами й утворена з енергетичних рівнів внутрішніх електронів вільних атомів, заборонену зону і зону провідності, яка частково заповнена електронами, або вільна й утворена з енергетичних рівнів зовнішніх суспільних електронів ізольованих атомів. Чотири можливих варіанти розміщення і заповнення цих зон показані на рис. 2.2 [6].



Рис.2.2

У першому випадку сама верхня зона, яка містить електрони, заповнена частково, тобто є вакантні рівні. Одержавши енергію ззовні $> 10^{-22}$ еВ електрон може перейти на більш високий енергетичний рівень у межах цієї ж зони, стати вільним і брати участь у провідності. Це властиво металам.

Другий варіант реалізується, коли валентна зона, що виникла за рахунок розщеплення нижнього стану валентних електронів, перекривається вільною зоною, що виникла при розщепленні верхнього збудженого рівня. Представником такої структури є вісмут. Подібна „гібридна" зона заповнюється валентними електронами лише частково. Тверде тіло (напівметал) є провідником електричного струму і в цьому випадку, але на відміну від металів, у яких кількість електронів у зоні провідності практично не залежить

від температури, у напівметалів кількість електронів у зоні провідності збільшується з підвищенням температури.

Коли в кристалі одна (валентна) зона виявляється заповненою цілком, а інша (зона провідності) - вільна, то такі тверді тіла відносяться або до класу діелектриків ($\Delta E \sim 5$ eV), або напівпровідників (ΔE до 1 eV) у залежності від ширини забороненої зони ΔE .

Розходження між металами і діелектриками, з погляду зонної теорії, полягає в тому, що при $T = 0$ К у зоні провідності металів є електрони, а в зоні провідності діелектриків вони відсутні.

Якщо ширина забороненої зони порядку декількох електрон-вольт (в алмазі $\Delta E = 6$ eV), то тепловий рух не може перекинути електрони з валентної зони в зону провідності і кристал є діелектриком.

У напівпровідників ΔE до 1 eV перехід електронів може бути здійснене або шляхом теплового збудження, або за рахунок зовнішнього джерела, спроможного передати електронам валентної зони енергію ΔE для перекидання їх у зону провідності. Типовими, найбільше широко застосовуваними напівпровідниками є хімічно чистий германій, кремній, телур, селен, а так само хімічні сполуки: InSb, GaAs, CdS, AlGaAs і ін. [3, 6].

§2.2. Квантові генератори світла

Квантовий генератор – загальна назва джерел електромагнітного випромінювання, що працюють на основі вимушеного випромінювання атомів і молекул. Залежно від того, яку довжину хвилі випромінює квантовий генератор, він може називатися по-різному: лазер, мазер, разер, газер.

Вперше на можливість створення квантового генератора вказав В.А. Фабрикант в кінці 40 років XX ст. Перший мазер на молекулах аміаку був зроблений в 1954 році одночасно і незалежно Басовим і А.М. Прохоровим і Ч. Таунсом зі співробітниками. В 1964 році за цю роботу їм була присуджена Нобелівська премія [8].

Лазер або оптичний квантовий генератор – це джерело когерентного електромагнітного випромінювання оптичного діапазону. Слово «лазер» (LASER) походить від перших літер англійської назви Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – «підсилення світла за допомогою вимушеного випромінювання».

Робота лазера основана на квантових процесах – інверсії заселеності і оптичному накачуванні.

Конструктивно лазер складається з трьох основних частин:

- активне середовище (тверде тіло, напівпровідник, газ, рідина), в якому створюється стан з інверсною заселеністю енергетичних рівнів атомів;
- система накачування (оптична, теплова, електрична) для створення інверсії в активному середовищі;
- оптичний резонатор (пара паралельних одне до одного дзеркал), який формує вихідний світловий пучок.

У результаті оптичного накачування (наприклад, при потужному спалахові світла або електричному розряді) більшість атомів активного середовища переходить спочатку в збуджений стан (електрони з основних, найнижчих енергетичних рівнів переходять на вищі) і майже відразу, протягом 10^{-8} с – в метастабільний (нерівноважний) стан, де кількість атомів у збудженому стані перевищує їхню кількість у основному стані. Цей метастабільний стан називають станом з інверсною заселеністю. Процес створення стану з інверсною заселеністю називають накачуванням. У метастабільному стані атоми знаходяться значно довше ($\sim 10^{-3}$ с).

При опроміненні активного середовища світлом, частота якого дорівнює частоті переходу з метастабільного стану атоми переходять в основний стан. При цьому вимушеному (індукованому) переході відбувається випромінювання атомом фотона (вторинного), додатково до того фотона (первинного), під дією якого відбувається перехід. Випромінювання фотонів, що виникає в результаті таких переходів називається вимушеним або індукованим випромінюванням.

Суттєвим є те, що вторинні фотони тотожні до первинних. Вимушене випромінювання має таку ж частоту, фазу,

поляризацію і напрямок поширення, як і падаюче випромінювання. Випромінені фотони стимулюють подальші індуковані переходи, і число фотонів росте лавиноподібно. Лавиноподібне зростання інтенсивності світла в активному середовищі є ознакою того, що середовище діє як підсилювач електромагнітних хвиль. Цей ефект зростає при багаторазовому проходженні світла крізь те ж середовище за рахунок використання резонатора – двох паралельних дзеркал, одне з яких непрозоре, а інше – прозоре.

Особливістю лазерного випромінювання є те, що його фотони мають одну частоту (монохроматичність), одну фазу в певній точці (часова когерентність), сталі співвідношення фаз між різними точками (просторова когерентність), однакову напрямленість (мале кутове розходження), велику концентрацію в пучку (випромінювання $E_2 - E_1$ величезною кількістю атомів з енергією E_2 практично одночасно).

У 1961 р. було створено перший газовий лазер, який працював на суміші He і Ne (0,1 мм. рт.ст.) під загальним тиском ~ 1 мм рт.ст. Роль систем накачування виконував газовий розряд. Під дією високочастотного електромагнітного поля атоми He збуджувались електронами розряду і переходили на рівень 2^3S . (рис.2.3). Ударяючись об незбуджені атоми Ne , збуджені атоми He передавали їм (без випромінювання) енергію, переводячи атоми Ne в стан, який умовно позначено $2S$; цей рівень, у свою чергу, складається з чотирьох підрівнів. Виникає інверсійна заселеність рівнів $2S$. Переходи з $2S$ на $2P$ (10 підрівнів) і дають лазерне випромінювання. Найінтенсивнішим серед них є перехід, $2S_2 \rightarrow 2P_4$ з

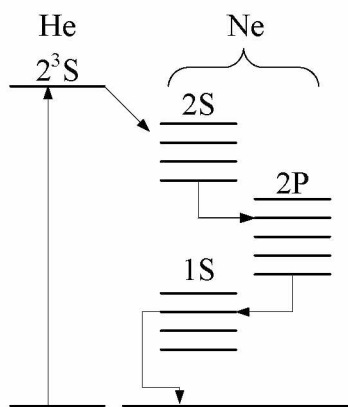


Рис. 2.3

$\lambda = 1,153$ мкм. При переході $3S_2 \rightarrow 2P_4$ лазер випромінює червоне світло ($\lambda = 0,633$ мкм) [8].

Лазерне випромінювання характеризується такими властивостями:

- ✓ строга монохроматичність ($\Delta\lambda \sim 10^{-11} \text{ м}$);
- ✓ висока часова і просторова когерентність;
- ✓ велика інтенсивність потоку випромінювання;
- ✓ спрямованість і вузькість

пучка (дуже малий кут розходження).

Ці унікальні властивості лазерного випромінювання зумовили його використання в електронних пристроях для читання і запису інформації, оптичного зв'язку, пристроях для зчитування штрих-кодів, лазерних принтерах, лазерних дисплеях, лазерних шоу, мікрозварюванні твердих матеріалів, космічних технологіях, голографії, медицині, та ін. Розглянемо приклад одного з напоширених застосувань лазерного випромінювання, а саме – голографію.

Голографія — це спосіб одержання об'ємних зображень предметів на фотопластинці за допомогою когерентного випромінювання лазера. Створення голографічних зображень ґрунтується на явищі інтерференції світла.

Голограма фіксує не саме зображення предмета, а структуру відбитої від нього світлової хвилі (її амплітуду та фазу). Для отримання голограми необхідно, щоб на фотографічну пластинку одночасно потрапили два когерентних світлових пучки: предметний, відбитий від об'єкта та опорний – що приходить безпосередньо від лазера. Світло обох пучків інтерферує, створюючи на пластинці (голограмі) чергування дуже вузьких темних і світлих смуг – інтерференційну картину.

Метод одержання голограми запропонував у 1948 р. Денніс Габор, він же застосував термін «голограма». За цей винахід він одержав Нобелівську премію. У тому ж році професором Т. Маймамом був сконструйований імпульсний лазер на рубіні. Ця система (на відміну від безперервного лазера) дає потужні та короткі, тривалістю в кілька наносекунд (10 - 9 нсек), лазерні імпульси, що дозволяють фіксувати на голограмі рухомі об'єкти. Перший портрет людини був знятий з допомогою рубінового лазера в 1967 році [4,7].

Початок образотворчої голографії було покладено роботами Емметта Лейт і Юріс Упатнієкса з Мічиганського Технологічного Інституту (США), які одержали в 1962 р. першу об'ємну голограму, що відновлюється в лазерному світлі. Схема запису голограм, запропонована цими вченими, тепер використовується в голографічних лабораторіях у всьому світі.

Українські науковці беруть активну участь у дослідженнях голографічних зображень. Американський проект Вісеп, заснований українцями Богданом Шевчуком та Олегом Коханом, розробляє перший у світі гаджет для показу голограм, орієнтований на масовий ринок [5].

В реальності лазери генерують випромінювання зі складним розподілом інтенсивності. Для оцінки якості розповсюдження реальних лазерних пучків сучасні міжнародні стандарти в лазерній фізиці використовують добуток параметрів пучка (BPP – beam parameter product) і параметр поширення пучка (M^2). Одиницею вимірювання BPP параметру є (мм·мрад) [14].

§2.3. Термістори. Температурна залежність напівпровідників

Реалізація широкої автоматизації різноманітних процесів у промисловості, наукових дослідженнях, побуті значною мірою визначається можливостями напівпровідникових пристроїв для одержання інформації про регульований параметр або процес. Серед багатьох напівпровідникових приладів, використаних у цей час, найважливіше місце належить напівпровідниковим термочутливим резисторам, які одержали назву терморезистор

(ТР). Їх називають також термісторами (від англійської назви «thermally sensitive resistor»).

Термістор, або термоопір, (Negative Temperature Coefficient) – напівпровідниковий прилад, електричний опір якого змінюється в залежності від його температури. Технологічно він являє собою пластинку напівпровідникового матеріалу з антизапірними контактами.

Залежність опору R напівпровідників від температури в певних температурних інтервалах описується експоненціальним виразом:

$$R = R_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}$$

де R - опір при температурі $T^\circ K$;

R_0 – деяка константа, або постійний опір, що не залежить від температури і має розмірність опору, Ом;

κ - ширина забороненої зони), Дж;

T - абсолютна температура, K^0 .

Зменшення опору (збільшення провідності σ) напівпровідників з підвищенням температури пояснюється, з точки зору зонної теорії, збільшенням кількості вільних носіїв заряду, тобто збільшенням концентрації вільних електронів та дірок.

На рис.2.4 показана схематична крива залежності $\ln \sigma = f(1/T)$ провідності для домішкових напівпровідників від температури.

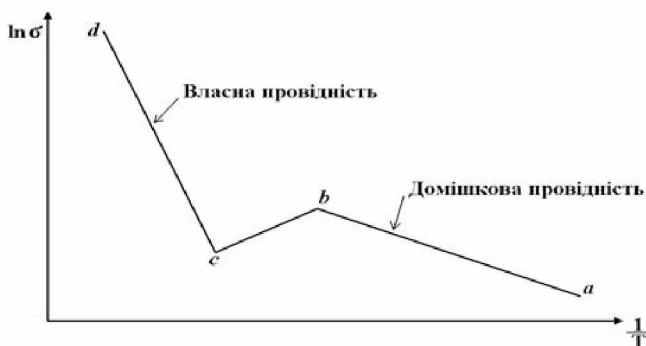


Рис.2.4.

Провідність домішкових напівпровідників при малих енергіях збудження, в першу чергу, забезпечується домішковими атомами, енергії іонізації яких досить малі порівняно з шириною забороненої зони. На цій залежності ділянка “*ab*” відповідає низьким температурам і визначає провідність напівпровідника за рахунок лише домішкових акцепторних або донорних атомів. Ділянка “*cd*” – визначає лише власну провідність напівпровідника.

Домішкові атоми при деяких температурах стають повністю задіяними в провідності. Однак при цих температурах енергії для збудження електронів основних носіїв у валентній зоні ще не достатньо. Тому зростання температури в цьому випадку супроводжується певним “зменшенням” провідності напівпровідника. Ця особливість провідності домішкового напівпровідника показана на ділянці “*bc*”. В точці “*b*” всі домішкові атоми беруть участь у здійсненні провідності. Тому ділянка “*bc*” показує, що провідність домішкових атомів повністю себе вичерпала і залишається при подальшому підвищенні температури, незмінною.

При досягненні більш високої температури, в провідності напівпровідника починають брати участь атоми основного напівпровідника валентної зони. При цій температурі енергія зовнішнього збудження стає співрозмірною з шириною забороненої зони. Ділянка “*cd*” рис. 2.4 показує, що власна провідність напівпровідника стає, порівняно з домішковою провідністю, домінуючою [9].

Основним матеріалом для виготовлення термісторів служить германій Ge. Однак чистий германій (монокристалічний і полікристалічний) має в області низьких температур занадто великий питомий опір. Зменшити питомий опір можна, легуючи германій домішками, наприклад миш’яком, галієм або сурмою. Вміст зазначених домішок повинен становити приблизно від 10^{22} до 10^{24} атомів/м³. Електропровідність германію, легованого домішками, у температурному інтервалі від 1 до 100 К подвоюється. У діапазоні 10 - 100 К провідність визначається рухливими носіями заряду, що збуджуються термічно із

домішкових рівнів, а в діапазоні приблизно 1 - 10 К здійснюється проходження електронів між атомами домішок [12].

Терморезистори мають вигляд стержнів, пластинок або пігулок, виготовлених методами керамічної технології. Опір й інші властивості терморезисторів залежать не тільки від складу, але і від розміру зерен, від технологічного процесу виготовлення; тиску при пресуванні (якщо напівпровідник беруть у вигляді порошку) і температури випалювання.

Напівпровідникові матеріали з великим числом складових хімічних елементів знаходять технічне застосування при виготовленні термоелементів, термогенераторів і холодильних пристроїв. До таких матеріалів відносять, наприклад, потрійний сплав Bi-Sb-Zn, що застосовується для додатних областей термоелементів, тверді розчини 0.25 Pb; 0.5 PbSe; 0.25 PbTe та інші, що йдуть на виготовлення від'ємного електрода термоелементів [6].

З напівпровідникової кераміки терморезистори виготовляють у вигляді дисків невеликої товщини і призначають для контролю та регулювання температури, використання в системах пожежної сигналізації, запобігання перегріву двигунів, обмеження струмів, вимірювання швидкості потоків рідин і газів тощо.

Терморезистори використовуються для вимірювання та регулювання температури, для вимірювання потужності електромагнітного випромінювання, для стабілізації напруги, обмеження імпульсних пускових струмів, вимірювання теплопровідності рідин, як безконтактні реостати і струмові реле часу.

§2.4. Фотопровідність напівпровідників

Потік світла, який падає на речовину, зазвичай, відбивається, поглинається або проходить наскрізь. Якщо в результаті поглинання світла енергії електронів достатньо для виходу з речовини, то спостерігається зовнішній фотоефект (див. §1.6). Якщо при опромінюванні змінюється енергетичний стан носіїв заряду в об'ємі напівпровідника, то ми маємо справу з внутрішнім фотоефектом. Світлова енергія, що поглинається

напівпровідником, викликає появу в ньому надлишкової кількості носіїв зарядів (електронів та дірок), що приводить до зростання електропровідності. Цей процес має назву - фотопровідність, тобто збільшення електропровідності речовини, яка обумовлена носіями зарядів, створеними електромагнітним випромінюванням. У фотопровідності проявляється квантова природа світла.

Енергія фотона визначається відомою формулою:

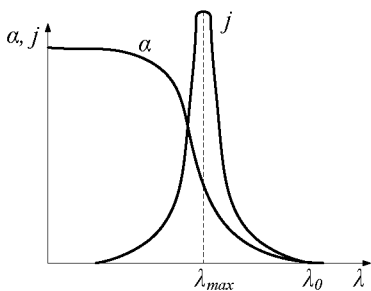
$$E = \frac{hc}{\lambda}.$$

Фотопровідність власного провідника виникає у випадку, коли $h\nu > \Delta E$, де $h\nu$ – енергія падаючого кванта, ΔE – ширина забороненої зони напівпровідника. Електрони валентної зони, які поглинають такі кванти, мають енергетичну можливість переходу до зони провідності, в результаті чого електропровідність напівпровідника підвищується. Отже, за умови переходів електронів з валентної зони в зону провідності, що приводить до появи додаткових електронів у зоні провідності і дірок у валентній зоні, виникає власна фотопровідність.

У власному напівпровіднику енергія витрачається на утворення електронно-діркових пар за рахунок переходу електронів з валентної зони в зону провідності. Гранична довжина хвилі, обумовлена енергією кванта, достатньою для переходу електрона із найвищого рівня валентної зони на найнижчий рівень зони провідності, дозволяє обчислити ширину забороненої зони напівпровідника.

Тому для кожного напівпровідника існує межа фотопровідності ν_0 , яку можна знайти із умови $h\nu_0 = \Delta E$. Якщо $\nu < \nu_0$, фотопровідність не виникає. При збільшенні частоти $\nu > \nu_0$ збільшується коефіцієнт поглинання і фотопровідність зменшується.

Фотопровідність пов'язана з властивостями як основної речовини напівпровідника, так і домішок, що містяться в ньому. Якщо напівпровідник має домішки, то фотопровідність може виникати і при $h\nu < \Delta E$: у напівпровідниках з донорною домішкою фотон повинен мати енергію $h\nu > \Delta E_d$, а з акцепторною домішкою $h\nu > \Delta E_a$. При поглинанні світла домішковими



центрами відбувається перехід електронів з донорного рівня у зону провідності у напівпровідника n – типу; або з валентної зони на акцепторні рівні у напівпровідника p – типу. В результаті виникає домішкова фотопровідність. Максимальна довжина хвилі, при якій ще збуджується фотопровідність (червона

границя фотопровідності), знаходимо з умови: $\lambda_0 = \frac{ch}{\Delta E}$, для власних напівпровідників. Для домішкових напівпровідників $\lambda_0 = \frac{ch}{\Delta E_{AKT}}$, де ΔE_{AKT} – енергія активізації домішкових атомів. Червона границя для власних напівпровідників припадає на видиму область спектра, для домішкових — на інфрачервону.

На рис.2.5 показано залежність фотопровідності j і коефіцієнта поглинання α від довжина хвилі λ падаючого світла. Спад фотопровідності в короткохвильовій частині спектра смуги поглинання пояснюється великою швидкістю рекомбінації в умовах сильного поглинання в тонкому поверхневому шарі товщиною - 1 мкм ($\alpha \sim 10^6 \text{ м}^{-1}$) [8].

§2.5. $p - n$ перехід та його вольт-амперна характеристика

Широкого практичного застосування набули явища, які виникають при контакті двох напівпровідників з різними типами домішкової провідності. Такий контакт двох напівпровідників з різними n - і p - типами провідності називається електронно-дірковим переходом (p - n переходом. Для отримання p - n –переходів у пластинку чистого напівпровідника вводять дві домішки – донорну і акцепторну. Перша надає напівпровіднику електронну провідність, а друга – діркову. На практиці в пластинку германію або кремнію донорними домішками беруть елемент p 'ятої групи періодичної системи (фосфор, миш'як та ін.), а акцепторними – третьої групи (бор, індій та ін.). Розглянемо фізичні процеси, що

відбуваються в p - n переході (див. рис.2.6) [6]. Різниця концентрацій електронів і дірок у контактних областях напівпровідника приводить до виникнення дифузійних потоків. Електрони з n - напівпровідника, де їхня концентрація вище, будуть переміщатися в p - напівпровідник, де їхня концентрація нижче. Рух дірок буде здійснюватись у протилежному напрямку. У результаті в n - напівпровіднику через відхід електронів поблизу границі поділу з'явиться некомпенсований позитивний об'ємний заряд нерухомих іонізованих донорних атомів.

У p - напівпровіднику через відхід дірок утвориться об'ємний заряд нерухомих іонізованих акцепторів. Подвійний електричний запірний шар L , що виникає, перешкоджає подальшим перехідним процесам.

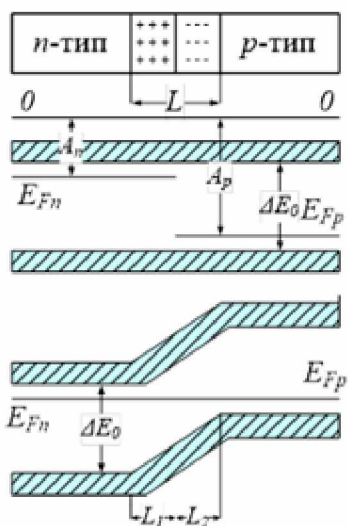


Рис.2.6

При досягненні визначеної товщини ($L_1 + L_2 = L = 1 \dots 0,1 \text{ мкм}$) p - n переходу з'явиться рівноважний стан для обох напівпровідників. У результаті викривлення енергетичних зон виникають потенційні бар'єри як для електронів, так і для дірок. Контактна різниця потенціалів складає сотні мілівольтів, тому при кімнатних температурах шар є замикаючим, який має підвищений опір у порівнянні з

опором інших об'ємів напівпровідників.

Якщо прикласти до переходу зовнішнє електричне поле, що збігається за напрямком з полем контактного шару, то відбувається рух електронів у n - напівпровіднику і дірок у p - напівпровіднику від границі p - n - переходу в протилежні сторони. У результаті розширення запірного шару L його опір зростає і струм практично припиняється.

Сила струму в p - n - переході визначається:

$$I = I_0 \left(\exp \left(-\frac{eU}{kT} \right) - 1 \right),$$

де I_0 - граничне значення сили зворотного струму, А;

U - напруга, В.;

e – заряд електрона, Кл;

kT – добуток сталої Больцмана на абсолютну температуру, Дж.

При зміні полярності зовнішньої напруги зустрічний рух електронів і дірок, що переміщуються під дією зовнішнього поля з глибини напівпровідників у область $p - n$ -переходу, збільшиться число рухливих носіїв струму на контакті. Товщина й опір запірного шару зменшиться, отже, у цьому напрямку (від p - напівпровідника до n - напівпровідника) електричний струм пройде через $p - n$ - перехід. Цей напрямок називається пропускним чи прямим вмиканням. Струм, який при цьому виникає в $p - n$ - переході називається прямим і визначається:

$$I = I_0 \left(\exp \left(\frac{eU}{kT} \right) - 1 \right),$$

де I_0 - граничне значення сили зворотного струму, А;

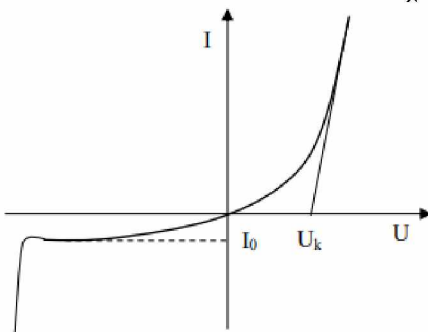
U - напруга, В.;

e – заряд електрона, Кл;

kT – добуток сталої Больцмана на абсолютну температуру, Дж.

У загальному вигляді вираз:

$$I = I_0 \left(\exp \left(\pm \frac{eU}{kT} \right) - 1 \right) -$$



рівнянням вольт-амперної характеристики (ВАХ) $p - n$ - переходу, яка має вигляд, зображений рис. 2.7 [14].

Струм зростає експоненціально з прикладеною напругою в прямому напрямку, і в зворотньому майже не змінюється. При зростанні напруги

у зворотньому напрямку (зазвичай десятки вольт) до критичного значення в діоді виникає лавінний пробій, що реєструється великим зворотнім струмом. Отже, $p-n$ - перехід має односторонню (вентильну) провідність.

§2.6. Світлодіоди

При вмиканні в коло змінного струму $p-n$ - перехід є випрямлячем. В якості випрямлячів в електронних схемах застосовуються діоди. Діоди - це напівпровідникові прилади, що дозволяють струму протікати тільки в одному напрямку.

Зараз діоди використовуються також як ефективні напівпровідникові випромінювачі світла (в світлодіодах) і сонячних елементах (в фотоелектриці).

Світловипромінюючий діод або світлодіод – це прилад, з одним або декількома електричними переходами, який перетворює електричну енергію в енергію звичайного некогерентного випромінювання [10]. Цей процес завжди відбувається в конкуренції з невивипромінювальною рекомбінацією, при якій енергія просто перетворюється в тепло. Коли світло випромінюється від світлодіода, енергія фотонів дорівнює енергії «забороненої зони». Через це світлодіодні світильники мають чисті кольори і вузькі спектри випромінювання щодо інших джерел світла, таких як лампи розжарювання та люмінесцентні лампи. Світлодіодні ліхтарі енергоефективні і, отже, зазвичай прохолодні на дотик.

Середня теплова енергія електронів і дірок дорівнює kT . При прямому зміщенні $p-n$ -переходу носії, що мають високу енергію, швидше дифундують в область з протилежною провідністю, ніж носії з низькою енергією, тому як раз вони частіше беруть участь у процесах рекомбінації. При кімнатній температурі енергія $4kT$ відповідає напрузі ~ 100 мВ.

$p-n$ -перехід – контакт двох напівпровідників із різними типами провідності. Для цього при контактні шари напівпровідникового кристала легують різними домішками: по один бік акцепторними, по інший – донорськими. Але не всякий $p-n$ -перехід випромінює світло. Чому? По-перше, ширина

забороненої зони в активній області світлодіоду повинна бути близька до енергії квантів світла видимого діапазону. По-друге, ймовірність випромінювання при рекомбінації електронно-діркових пар повинна бути високою, для чого напівпровідниковий кристал повинен містити мало дефектів, через які рекомбінація відбувається без випромінювання. Ці умови тією чи іншою мірою суперечать одна одній. На практиці, щоб дотримати обидві умови, виготовляють багатошарові напівпровідникові структури (гетероструктури) [10].

Розглянемо фізичний процес, на якому ґрунтується робота світлодіодів. Згадаємо, що хімічно чисті напівпровідники такі як Si та Ge, поглинають і випромінюють світло дуже слабо. Це пояснюється величиною забороненої зони. Процес створення трійки «електрон-дірка-фотон» мало ймовірний, рекомбінація відбувається дуже повільно. мають Ефективну люмінесценцію (світіння) мають напівпровідники, такі як GaAs та GaP.

На рис.2.8, а), показано гетероструктуру GaAs світлодіода; на рис.2.8, в) зонну діаграму розташування його енергетичних зон.

Шар GaAs з p -провідністю охоплений по обидва боки шаром p -

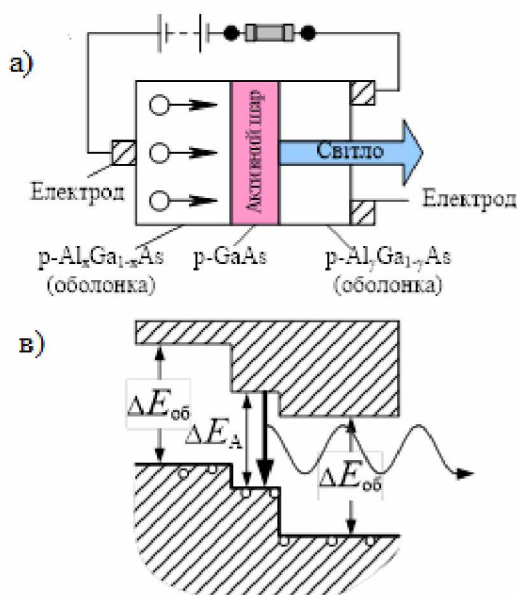


Рис.2.8

типу $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ і шаром n -типу $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$. Із шару n -типу в активний шар GaAs

інжектуються електрони, але через енергетичний бар'єр в області переходу шару GaAs і шару p -типу електрони не розсіюються в шарі p -типу, а накопичуються в шарі GaAs і потім переходять у зону валентних електронів,

генеруючи спонтанне випромінювання з частотою $\nu = \Delta E_A/h$. Випромінюване світло не поглинається електронами валентної зони шарів оболонки ($\Delta E_{об} > \Delta E_A$) і переходить через оболонку назовні.

Червоні, помаранчеві, жовті та зелені світлодіоди можуть бути виготовлені відносно легко з твердих розчинів AlP - GaAs. Спочатку було дуже важко виготовити сині світлодіоди, оскільки найкращий напівпровідник у «правильному» енергетичному діапазоні - це нітрид галію GaN, який технологічно важко зробити.

Працюючи в корпорації Nichia в Японії, Shuji Nakamura вдалося розробити технологічний процес для P-gan, який є основою синього світлодіода. Через важливість цієї роботи в розвитку зберігання інформації (технологія Blu-Ray) і повного

спектру, енергоефективне світлодіодне освітлення, Накамура поділився Нобелівською премією 2014 з фізики з Ісаму Асакі та Хіроші Аmano, обидва з яких зробили раніше внесок у розвиток діодів GaN [11,12].

У суперлюмінісцентних світлодіодах світло виводиться через торець активного шару. При інжекційному струмі 100 - 200 мА досягається потужність випромінюваного світла 100 мВт при ширині спектра 30 - 60 нм в області довжин хвиль 730 – 900 нм. При освітленні світлом в області $p - n$ - переходу спостерігається вентильний фотоэффект, який приводить до виникнення фотоЕРС.

При відсутності світла перехід знаходиться у рівноважному стані, з висотою потенціального бар'єру eU . Під дією світла висота потенціального бар'єру зменшується, так як в області $p - n$ - переходу починається генерація електрон-діркових пар.

Електрони з p - області дифундують до $p - n$ - переходу та під дією поля переходять у n - область. Дірки не можуть подолати потенціальний бар'єр eU і залишаються в p - області. Таким чином, p - область заряджається позитивно, а n - область – негативно. Це приводить до виникнення додаткової різниці потенціалів у прямому напрямку, яка і має назву фотоелектрорушійна сила (ФЕРС). ФЕРС існує до тих пір, поки під дією світла електрони мігрують у n - область [13].

Інструкції до лабораторних робіт

2.1. Лабораторна робота № 10

ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ХВИЛІ КОГЕРЕНТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЛАЗЕРА

Мета роботи: - вивчити хвильові властивості світла на прикладі явища дифракції випромінювання газового лазера на дифракційній ґратці;

- експериментально визначити довжину хвилі лазерного випромінювання за допомогою дифракційної ґратки і визначити сталу тонкої структури.

Прилади: газовий лазер ЛГ-56, оптична лава з рейтерами, дифракційна ґратка і тонка структура.

1. Короткі теоретичні відомості

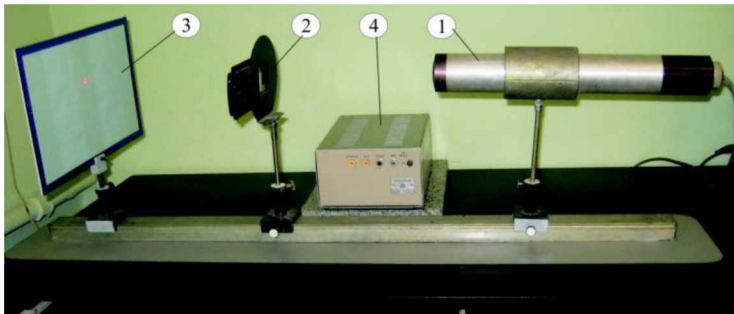
Принцип дії і конструкція гелій - неонових лазерів

У даній роботі використовується газовий лазер ЛГ-56, основним елементом якого є газорозрядна трубка діаметром 7–10 мм, що наповнена сумішшю гелію і неону. Парціальний тиск гелію 1 мм рт. ст., неону 0,1 мм рт. ст. (для порівняння: нормальним атмосферним тиском вважається 765 мм.рт.ст.). При високій постійній напрузі 1–2 кВ, яка подається між електродами трубки, у трубці виникає електричний газовий тліючий розряд, який виконує роль системи накачування. Накачування відбувається у два етапи: гелій є носієм енергії збудження, а лазерне випромінювання створює неон. Електрони розряду при зіткненні збуджують атоми гелію. При зіткненні збуджених атомів гелію з незбудженими атомами неону відбувається передача їм енергії (без випромінювання). В результаті виникає інверсна заселеність на одному із верхніх рівнів атома неону. Перехід атома неону з верхнього рівня на один із нижніх супроводжується лазерним випромінюванням (генерацією червоного світла з довжиною хвилі $\lambda = 0,6328$ мкм).

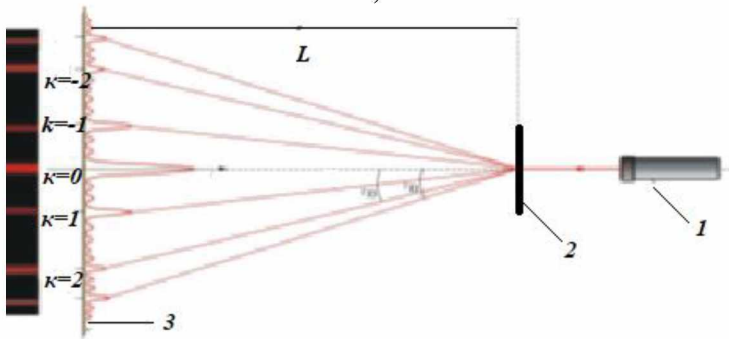
2. Опис установки

Всі деталі установки (екран, лазер, дифракційну ґратку) змонтовано на оптичній лаві. Лазерне випромінювання, що пройшло через дифракційну ґратку, дає на екрані ряд дифракційних максимумів і мінімумів, розташованих симетрично відносно найбільш яскравого центрального максимуму нульового порядку (рис. 10.1).

У даній роботі використовується дифракційна ґратка зі сталою величиною $b = 10^{-5}$ м.



а)



в)

Рис.10.1. Зовнішній вигляд лабораторної роботи (а) та її схематичне зображення (в): 1- газовий лазер; 2-дифракційна ґратка; 3 - екран; 4 - джерело живлення

Увага! Вмикання лазера робить тільки викладач. Лазер вмикається тільки на 10 хвилин. Попадання в очі прямого

лазерного випромінювання небезпечно для зору. Тому, при роботі з лазером, його світло треба спостерігати тільки на розсіювальних поверхнях.

3. Порядок виконання роботи

Завдання 1. Визначення довжини хвилі лазерного випромінювання.

1. Увімкнути блок живлення лазера в мережу 220 В і через 1–2 хв. натиснути на кнопку «Запуск». З'явиться лазерний промінь.

2. На відстані $\sim 0,6$ м від вихідного вікна лазера розмістити рейтер з дифракційною ґраткою так, щоб промінь лазера проходив через її центр. Впевнитись, що лазерний промінь розповсюджується в горизонтальному напрямку паралельно оптичній лаві, попадає на дифракційну ґратку і на екран, а останні орієнтовані так, що площі їх перпендикулярні променю. Головні максимуми дифракції повинні бути розташованими симетрично по обидва боки від центрального.

3. Змінюючи відстань L від дифракційної ґратки до площини екрану, виміряти лінійкою відстань D_k між центрами лівого і правого максимумів другого порядку.

4. Користуючись даними результатів вимірювання для головних максимумів других порядків, що спостерігаються, визначити довжину хвилі λ лазерного випромінювання за формулою:

$$\lambda = \frac{b \cdot D_k}{2L \cdot k},$$

де $b = 10^{-5}$ м – стала ґратки, $k = 2$ – порядок спектру.

5. Результати вимірювань та обчислень занести до табл. 10.1.

Таблиця 10.1

$N_{\text{п}}$	k	$L, \text{ м}$	$D_k, \text{ м}$	$\lambda_i, \text{ м}$	$\Delta\lambda_i, \text{ м}$	$(\Delta\lambda_i)^2, \text{ м}^2$
1	2					
2						
3						
4						
5						

6. Знайти середнє значення довжини хвилі лазерного випромінювання $\lambda_{\text{сер}}$ та розрахувати абсолютні похибки кожного обчислення.

7. Виконати статистичну обробку результатів обчислень λ за стандартною методикою (див. Додатки).

8. Обчислити межу довірчого інтервалу:

$$\Delta\lambda = t_{n,\alpha} \cdot S_{\lambda},$$

де n – кількість отриманих значень; $i = 1, 2, \dots, n$; величина довірчої ймовірності $\alpha = 0,9$. Коефіцієнт Ст'юдента $t_{n,\alpha}$ обрати за табл.Д4 у Додатках.

9. Обчислити відносну похибку результатів вимірювань:

$$E = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{сер}}} 100\%$$

10. Остаточний результат записати у стандартному вигляді:

$$\lambda = \lambda_{\text{сер}} \pm \Delta\lambda \text{ (м)}$$

Завдання 2. Визначення сталої тонкої структури

1. Зняти з оптичної лави рейтер з дифракційною ґраткою та екраном.

2. На відстані $\sim 0,6$ м від вихідного вікна лазера розмістити рейтер з тонкою структурою (желатинова реплика з невідомим періодом).

3. Не змінюючи відстань L від рейтера з тонкою структурою до екрану (~ 3 м) виміряти відстань D_k між центрами лівих і правих максимумів різних порядків ($k=1,2,3,4,5$). Екраном у даному випадку слугує аудиторна дошка.

4. Обчислити сталу b тонкої структури за формулою:

$$b = \frac{k \cdot \lambda_{\text{сер}} \cdot 2L}{D_k},$$

де $\lambda_{\text{сер}}$ середнє значення довжини хвилі лазерного випромінювання, знайдене в попередньому завданні.

5. Результати вимірювань та обчислень занести до табл. 10.2.

Таблиця 10.2

N_p nn	k	$L, м$	$D_k, м$	$b_i, м$	$\Delta b_i, м$	$(\Delta b_i)^2, м^2$
1	1	3				
2	2					
3	3					
4	4					
5	5					

6. Знайти середнє значення довжини хвилі лазерного випромінювання $b_{сер}$ та розрахувати абсолютні похибки кожного обчислення.

7. Виконати статистичну обробку результатів обчислень b за стандартною методикою (див. Додатки).

8. Обчислити межу довірчого інтервалу:

$$\Delta b = t_{n,\alpha} \cdot S_{\cdot},$$

де n – кількість отриманих значень; $i = 1, 2, \dots, n$; величина довірчої ймовірності $\alpha = 0,9$. Коефіцієнт Ст'юдента $t_{n,\alpha}$ обрати за табл.Д4 у Додатках.

9. Обчислити відносну похибку результатів вимірювань:

$$E = \frac{\Delta b}{b_{сер}} 100\%$$

10. Остаточний результат записати у стандартному вигляді:

$$b = b_{сер} \pm \Delta b \text{ (м)}$$

11. Проаналізувати одержані результати і записати висновок, в якому порівняти експериментальне значення довжини хвилі лазерного випромінювання з паспортними даними для лазера, що використовується в роботі.

Контрольні запитання

1. Яке явище називається явищем дифракції?
2. Що являє собою дифракційна ґратка? Що розуміють під періодом ґратки?

3. Які властивості має лазерне випромінювання?
4. Що таке лазер? Які основні частини лазера і їх призначення?
5. Які властивості лазерного випромінювання?
6. Як утворюється інверсна заселеність енергетичних рівнів атомів в гелій-неоновому лазері?
7. За яких умов виникає вимушене (індуковане) випромінювання?
8. Як можна визначити експериментально довжину хвилі лазерного випромінювання?

2.2. Лабораторна робота № 15

ВИЗНАЧЕННЯ ШИРИНИ ЗАБОРОНЕНОЇ ЗОНИ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ТЕРМОРЕЗИСТОРА

Мета роботи: визначити ширину забороненої зони напівпровідника з температурної залежності його опору.

Прилади: (змонтовані на загальному стенді): терморезистор, електропіч, джерело постійної напруги, вольтметр, міліамперметр, термопара, термометр на основі термопары.

1. Короткі теоретичні відомості

Характерною особливістю напівпровідників є не величина питомого опору, а його сильна залежність від температури. З точки зору зонної теорії при підвищенні температури зростає число електронів, які внаслідок теплового руху переходять із валентної зони, долаючи заборонену зону, в зону провідності, і можуть брати участь у перенесенні електричного заряду.

Прийнято вважати, що якщо розмір забороненої зони $\Delta E \leq 1eV$, то це напівпровідник. При $\Delta E > 2eV$ тіло вважають діелектриком.

У даній лабораторній роботі вивчається властивість термистора при нагріванні і визначається ширина енергетичної зони цього напівпровідника.

Опір термисторів змінюється за законом :

$$R = R_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}} \quad (15.1)$$

де R - опір при температурі $T^{\circ}K$;

R_0 - постійний опір, що не залежить від температури і має розмірність опору, Ом; K - стала Больцмана ($K = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); ΔE - енергія необхідна для переходу електрона в зону провідності (ширина забороненої зони), Дж;

T - абсолютна температура, K^0 .

Оскільки в рівнянні (15.1) ліворуч і праворуч знаходяться величини однакової розмірності (Ом), то R і R_0 можна розглядати як числа, рівні опорам, і оперувати з ними, як з числами.

Логарифмуємо рівняння (15.1):

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta E}{2K} \cdot \frac{1}{T} \quad (15.2)$$

Порівняємо отриманий вираз (15.2) з рівнянням $y = b + ax$.

Графік цієї залежності добре відомий. Це пряма лінія, що не проходить через початок координат. Її нахил $a = \operatorname{tg} \alpha$. (рис. 15.1).

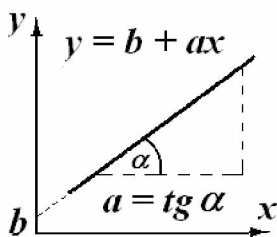


Рис. 15.1

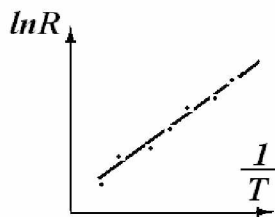


Рис. 15.2

Якщо тепер уявити рівняння (15.2) у вигляді:

$$\ln R = b + a \cdot \frac{1}{T}$$

то можна побудувати аналогічний графік, якщо відкласти на ньому по осі абсцис $1/T$, а по осі ординат $\ln R$. Отримаємо також пряму лінію (рис. 15. 2).

Нахил цієї прямої лінії (будемо його позначати теж буквою a)

$$a = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta E}{2k}$$

Варто відмітити, якщо у виразі $y = b + ax$ кутовий коефіцієнт a є безрозмірною величиною, то для рівняння (15.2) кутовий коефіцієнт прямої лінії - величина розмірна, його розмірність - кельвін (К).

По тангенсу кута нахилу цієї прямої можна визначити ширину забороненої зони термістора ΔE .

Користуючись рівністю (15.2), для двох температур напівпровідника одержимо:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\ln R_1 - \ln R_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} = \frac{\Delta E}{2K}; \quad \Delta E = 2K \operatorname{tg} \alpha$$

звідки:

$$\Delta E = \frac{2K(\ln R_1 - \ln R_2)T_1T_2}{T_2 - T_1} \quad (15.3)$$

Для побудови графіка необхідно знати опір термістора R при різних температурах. Його можна визначити за законом Ома:

$$R = \frac{U}{I} \quad (15.4)$$

де U – напруга, прикладена до термістора, I – струм, що протікає через термістор.

Для одержання енергії в електронвольтах (eB) використовують співвідношення: $1 eB = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

2. Опис установки

Лабораторна установка складається з нагрівного елемента (електропечі) з розміщеними всередині нього досліджуваного напівпровідника (термістора) і датчика температури. Піч підключена до мережі 220 В. Термістор приєднано до джерела постійної напруги, що знаходиться в корпусі установки. Напруга контролюється вольтметром.

Температура напівпровідника визначається за допомогою термометра на основі термопар. Струм, що тече через термістор реєструється міліамперметром постійного струму.

3. Порядок виконання роботи

1. Увімкнути установку в мережу 220 В.
2. Тумблером "Вкл" увімкнути піч і подати на термістор напругу $U = 4B$, яку підтримувати постійною.

3. Нагрівати піч від кімнатної температури до 70°C і через кожні 10°C знімати покази міліамперметра, що визначають струм I , який протікає через термістор.

4. Результати вимірювань занести до табл. 15.1.

5. За формулою (15.4) обчислити опір R термістора при різних температурах і результати записати в табл. 15.1.

Таблиця 15.1

N_2 , mm	t°, C	T, K	$1/T, \text{K}$	R , Ом	$\ln R$	I, A
1						
2						
3						
4						
5						

6. Побудувати графік залежності $\ln R$ від $1/T$. Лінеаризуючи точки методом найменших квадратів (МНК), побудувати пряму, яка найменше відхиляється від експериментальних точок (методику I, A розрахунку МНК наведено в Додатках).

7. Визначити за формулою (15.3) ширину забороненої зони ΔE досліджуваного напівпровідника. Результат, отриманий в джоулях, перевести в електронвольти.

8. Проаналізувати отриманий результат, порівнявши значення отриманої графічно ширини забороненої зони з табличним значенням (див. табл. Д10 у Додатках).

Контрольні запитання

1. Які речовини називають провідниками, діелектриками, напівпровідниками?

2. Яка відмінність між провідниками, напівпровідниками і діелектриками згідно із зонною структурою твердих тіл?

3. Чому опір металів збільшується із зростанням температури, а напівпровідників зменшується?

4. У чому полягає суть методики визначення ширини забороненої зони напівпровідників за температурною залежністю їхнього опору?

5. Який вигляд має залежність власної провідності напівпровідника від температури?
6. Яку розмірність має кутовий коефіцієнт прямої лінії?
7. В яких одиницях вимірюють ширину забороненої зони напівпровідника?

2.3. Лабораторна робота № 16

ДОСЛІДЖЕННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ДІОДА

Мета роботи: дослідити вольт-амперну характеристику (ВАХ) напівпровідникового діода.

Прилади: стенд з германієвими діодами, джерело струму, мікроамперметр, амперметр, вольтметр, перемикач.

1. Короткі теоретичні відомості

Широкого практичного застосування набули явища, які виникають при контакті двох напівпровідників з різними типами домішкової провідності. Такий контакт називається електронно-дірковим переходом (або $p-n$ – переходом).

Властивість односторонньої провідності $p-n$ – переходу покладена в основу напівпровідникових діодів та тріодів. Прямий та зворотний напрям увімкнення діода зображено на рис. 16.1,а.

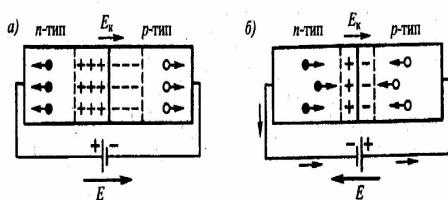


Рис.16, а

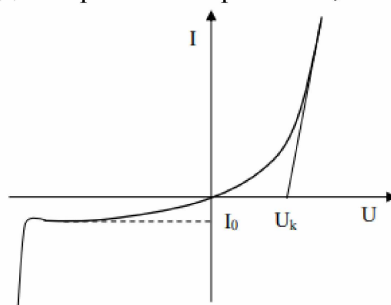


Рис.16,б

Залежність сили струму I від прикладеної напруги U називається вольт-амперною характеристикою (ВАХ) напівпровідникового діода (рис.16,б). Вона має дві вітки – пряму і зворотну. Ця залежність нелінійна.

2. Порядок виконання роботи

1. Увімкнути лабораторний стенд в мережу 220 В. Вимірювання спочатку виконати для 1-го діода.
2. Для вимірювання прямого струму повзунок потенціометра поставити в положення, яке відповідає мінімальному значенню напруги на джерелі струму. Поставити перемикач в положення "П", яке відповідає прямому струму.
3. Поступово (через 0,1 В) збільшуючи напругу від нуля до 1 В, записувати в таблицю 16.1 значення напруги U_{np} за показами вольтметра і відповідні їй значення прямого струму I_{np} за показами амперметра.
4. Для дослідження зворотного струму повзунок потенціометра поставити в початкове положення, перемикач в положення "О", яке відповідає зворотному струму.
5. Поступово (через 0,1 В) збільшуючи напругу від нуля до 1 В, записувати в табл. 16.1 значення напруги $U_{зв}$ за показами вольтметра і відповідні їй значення зворотного струму $I_{зв}$ за показами мікроамперметра.
6. Повторити п.п. 2 - 6 для 2-го діода.

Таблиця 16.1

1-й діод				2-й діод			
Пряма вітка		Зворотня вітка		Пряма вітка		Зворотня вітка	
I_{np}, A	U_{np}, B	$I_{зв}, мКА$	$U_{зв}, B$	I_{np}, A	U_{np}, B	$I_{зв}, мКА$	$U_{зв}, B$

7. Побудувати на одному графіку вольт-амперні характеристики (ВАХ) для 1-го і 2-го діодів (пряму і зворотну вітки).
8. Виконати аналіз побудованих ВАХ і зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Які напівпровідники називають власними, n - типу, p - типу?
2. Що таке основні та неосновні носії струму в напівпровідниках?
3. Поясніть фізичний принцип роботи напівпровідникового діода.
4. Як досягти прямий і зворотній струми через p - n перехід?
5. Поясніть фізичний принцип роботи напівпровідникового діода.

2.4. Лабораторна робота № 17

ВИВЧЕННЯ ФОТОПРОВІДНОСТІ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Мета роботи: одержати спектральну характеристику фотопровідності (СХФ) напівпровідника та визначити довжину хвилі максимальної фоточутливості.

Прилади: монохроматор УМ-2, лампа розжарювання, фоторезистор, джерело постійного струму ИПД-1, мікроамперметр постійного струму.

1. Короткі теоретичні відомості

В роботі досліджується напівпровідниковий селеновий фотоелемент (фоторезистор). Спектральною характеристикою фотопровідності (СХФ) називається залежність фотоструму I_{ϕ} або фотопровідності від довжини хвилі λ електромагнітного випромінювання при сталому світловому потоці. СХФ напівпровідника нелінійна і має максимум на довжині хвилі, яка відповідає ширині забороненої зони напівпровідника. (рис. 17.1).

Основна розрахункова формула:

$$E_m = \frac{hc}{\lambda_m},$$

де h – стала Планка ($h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с); c – швидкість світла у вакуумі.), λ_m – довжина хвилі, що відповідає максимуму довжини волни, соответствующая максимуму спектральної характеристики напівпровідника.

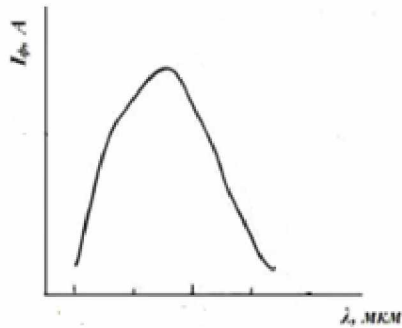


Рис.17.1. Спектральна характеристика фотоелемента.

2. Опис лабораторної установки

Оптичну схему експериментальної установки для дослідження спектрального розподілу фотопровідності зібрано на базі монохроматора УМ-2. Її загальний вигляд зображено на рис.17.2. На рис.17.3 в окрему групу виділені основні елементи монохроматора.

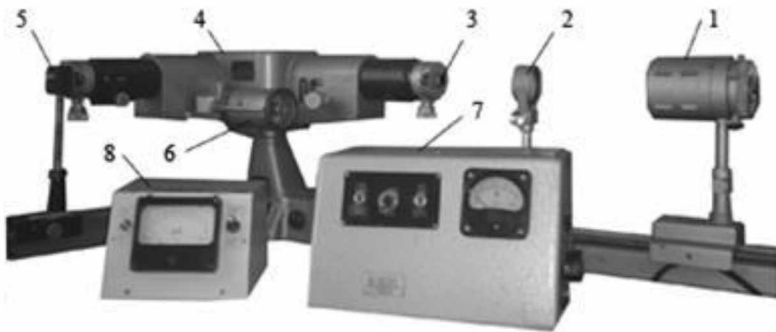


Рис.17.2. Монохроматор УМ-2. 1 – джерело світла, яке розміщене в захисному кожусі; 2 – конденсорна лінза; 3 – вхідна щілина; 4 – монохроматор; 5 – селеновий фотоелемент; 6 – барабан довжин хвиль монохроматора; 7 – джерело живлення лампочки розжарення; 8 – мікроамперметр.

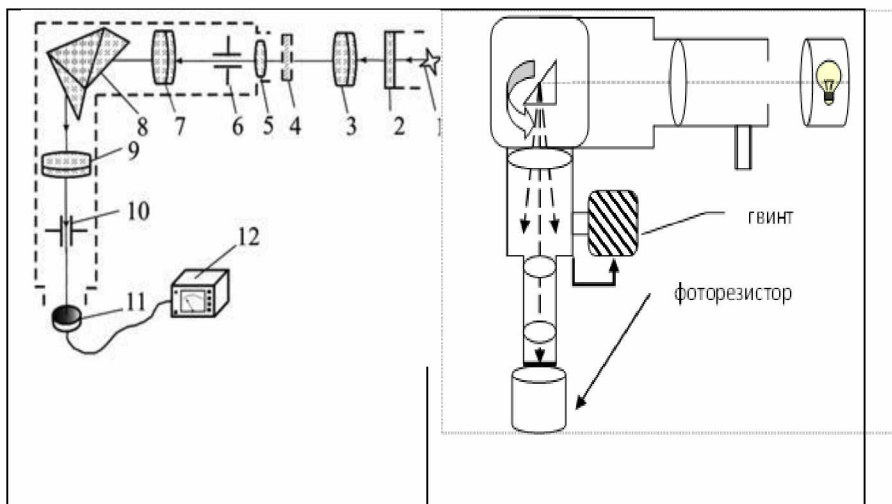


Рис.17.3. 1 – джерело світла; 2 – захисне скло кожуха лампи; 3 – конденсорна лінза; 4 – збиральна лінза; 5 – вхідна щілина; 6 – об’єктив коліматора; 7 – дисперсійна призма; 8 – об’єктив зорової труби; 9 – вихідна щілина; 10 – фотоелемент; 11 – мікроамперметр.

Схематично установка зображена на рис.17.3. Світловий потік від лампи накалу (1), проходячи крізь вхідну щілину монохроматора (6), розкладається за допомогою призми (8) у неперервний спектр. Вихідна щілина (10) монохроматора виділяє з неперервного спектра вузьку ділянку довжин хвиль $\Delta\lambda$. Шляхом повертання призми за допомогою гвинта на вихідну щілину, тобто на фотоелемент (11), проектується та чи інша довжина хвилі λ (у інтервалі довжин хвиль $\Delta\lambda$). Довжина хвилі λ визначається за показанням на шкалі повороту призми за допомогою градуйованого графіку.

Світловий потік від лампи розжарювання 1, проходячи крізь вхідну щілину 2 монохроматора, розкладається за допомогою призми 4 у неперервний спектр. Вихідна щілина 6 монохроматора виділяє з неперервного спектра вузьку ділянку довжин хвиль $\Delta\lambda$. Шляхом повертання призми за допомогою барабана 5 на вихідну щілину (тобто на фоторезистор 7) проектується та чи інша

довжина хвилі λ (у інтервалі довжин хвиль $\Delta\lambda$). Довжина хвилі λ визначається за показами на шкалі повороту барабану **5** за допомогою градуовального графіку.

3. Порядок виконання роботи

1. Встановити максимальну ширину вхідної щілини та увімкнути лампу розжарювання в мережу 220 В.
2. Обертаючи барабан **6** (див.рис.17.2) довжин хвиль монохроматора в межах $n = 2000 - 3100$ поділок його шкали, через кожні 100 поділок визначати значення фотоструму I_ϕ за показами мікроамперметра. Спостерігати за стрілкою мікроамперметра максимум фотоструму. Відхилення стрілки мікроамперметра повинно становити не менше, ніж 50 поділок. У разі меншої чутливості мікроамперметра регулюванням положення лампи **1** та вхідної ширини щілини **3** монохроматора виправити виявлений недолік в чутливості фотоелемента.
3. Результати занести до табл. 17.1.
4. За допомогою градуовального графіка (див. Додатки, рис.Д2) встановити відповідність між показами шкали барабана n та відповідними довжинами хвиль λ .
5. Результати занести до табл. 17.1.

Таблиця 17.1

№з/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$I_{\text{мкА}}$														
n , под														
λ , нм														

6. Побудувати СХФ (графік повинен мати не менш 10-12 точок) та визначити довжину хвилі λ_m , яка відповідає максимуму СХФ.
7. Обчислити енергію кванта E_m , яка відповідає максимальній фоточутливості напівпровідника за формулою (17.1).
8. Зробити висновки, в яких вказати одержані значення λ_m та E_m .

Контрольні запитання

1. Що називають фотопровідністю ?
2. Як впливає освітлення фотодіода на прямий і зворотний струми?
3. Де можна застосовувати фотоелементи?
4. Поясніть наявність максимуму в спектральній характеристики фотоелемента.
5. Що розуміють під «червоною межею» внутрішнього фотоефекта?
6. Що таке світлодіод?
7. Джерелом якого випромінювання є світлодіод? Чи є випромінювання світлодіода когерентним?

СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРІВ

При безпосередньому вимірюванні фізичної величини неможливо одержати її справжнє, абсолютно точне значення через недосконалість вимірювальних приладів, впливи умов вимірювань, індивідуальних властивостей дослідника тощо. Як результат, значення відрізняється від справжнього, тобто виникають похибки. Повторюючи вимірювання декілька разів, застосовуючи більш досконалі прилади і інструменти, можна наблизити результат вимірювань до істинного значення. Але багаторазові вимірювання однієї і тієї ж величини дають різні числові значення, виникають відхилення від істинного значення в обидва боки, тобто завжди існують випадкові похибки вимірювань і виключити їх неможливо. Тому, при визначенні фізичної величини треба знайти не тільки її найбільш імовірне значення, але й інтервал, у якому це значення знаходиться. Чим вужчий цей інтервал, тим точніше визначено фізичну величину.

При оцінюванні похибок експериментальних вимірювань в лабораторних роботах рекомендовано дотримуватись наступної послідовності.

Нехай за результатами n вимірювань деякої величини x одержано n її наближених значень: $x_1; x_2; \dots; x_i; \dots; x_n$.

1. Обчислити середнє арифметичне значення $x_{\text{сеп}}$ цієї величини:

$$x_{\text{сеп}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

де x_i – результат i -го вимірювання (обчислення), n – кількість вимірювань.

2. Обчислити абсолютні похибки окремих результатів вимірювань:

$$\Delta x_1 = |x_{\text{сеп}} - x_1|$$

.....

$$\Delta x_n = |x_{\text{сеп}} - x_n|$$

3. Обчислити середнє квадратичне відхилення величини x_i від середнього значення:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{\text{сер}} - x_i)^2}{n(n-1)}} =$$

4. Обчислити межі довірчого інтервалу Δx :

$$\pm \Delta x = t_{\alpha, n} \cdot \Delta S,$$

де $t_{\alpha, n}$ - коефіцієнт Стюдента.

Величина довірчого інтервалу $\pm \Delta x$ означає, що виміряні n значень величини x з ймовірністю α відхиляються від середнього значення $x_{\text{сер}}$ не більш як на Δx в той чи інший бік.

Значення коефіцієнта Стюдента наведені в табл.Д1(див. Додатки). Наприклад, для 90%-го довірчого інтервалу при $n=5$ вимірах коефіцієнт Стюдента $t_{\alpha, n}=2,13$.

5. Записати кінцевий результат у вигляді

$$x = (x_{\text{сер}} \pm \Delta x) \text{ од. вим.}$$

Одержані значення повинні бути зведені до одиниць SI.

6. Визначити відносну похибку визначення шуканої величини.

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_{\text{сер}}} \cdot 100\% =$$

7. Визначити абсолютну похибку виміру

$$\delta = \frac{|x_{\text{сер}} - x_T|}{x_T} \cdot 100\%$$

де x_T – теоретичне значення шуканої фізичної величини.

8. Проаналізувати отримані результати, записати сформульований висновок.

Побудова графіків методом найменших квадратів (МНК)

З метою встановлення зв'язку між величинами, ми наносимо їхні значення на графік. Кожній парі значень величин x і y на графіку відповідає точка. Звичайно такі точки не лягають на одну лінію, а займають на площині креслення деяку область, створюючи так звану діаграму розсіювання. (рис.1)

Причини розсіювання можуть бути самими різними. Серед них можна назвати похибки вимірів, невраховані чинники та ін. Багато залежностей між величинами мають нелінійний характер. Однак, деякі нелінійні залежності можна перетворити в лінійні, тобто лінеаризувати. Рівняння прямої лінії має вигляд:

$$y = a + bx \quad (1)$$

де a - довжина відрізка від початку координат до точки перетину прямої із віссю y ; b - тангенс кута нахилу α прямої до осі x ($b = \operatorname{tg} \alpha$). Див рис.1.

Рівняння виду (1) часто називають рівнянням лінійної регресії.

Термін «регресія» на мові математичної статистики означає статистичний зв'язок між випадковими величинами.

Широке використання лінійних залежностей пояснюється простотою зв'язків і відносно малим об'ємом обчислень.

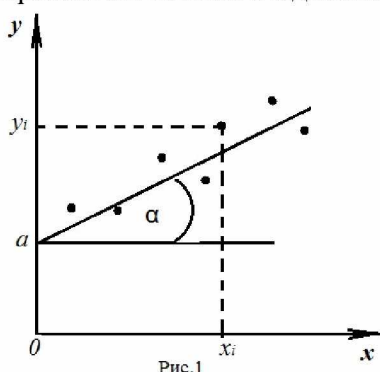


Рис.1

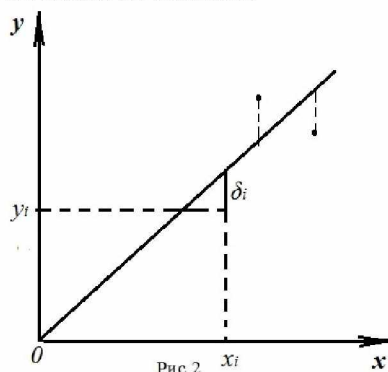


Рис.2

Ідея методу найменших квадратів (МНК), полягає в тому, що серед можливих комплектів пар чисел a та b існує єдиний такий комплект, для якого сума квадратів відхилень ординат експериментальних точок від відповідних ординат прямої лінії з параметрами a та b є мінімальною.

Пряму лінію намагаються провести так, щоб сума квадратів відхилень розрахункових значень $y_{\text{розрах}}$ від експериментальних значень $y_{\text{експер}}$ була мінімальною для всіх n -значень (графік на рис.2):

$$\sum_{i=1}^n \delta^2_i = \sum_{i=1}^{n\Sigma} (y_{\text{порп}} - y_{\text{експ}})^2 = \sum_{i=1}^{n\Sigma} (kx_i - y_i)^2 \rightarrow \min.$$

Математично доведено, що цій умові задовольняють вирази для a і b :

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{n(\sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2};$$

$$b = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i^2)(\sum_{i=1}^n y_i) - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n x_i y_i)}{n(\sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2};$$

де n – загальне число дослідів, у яких вимірювалися значення x і y .

Для розрахунків a і b (коефіцієнтів лінійної регресії і побудови графіка зручно використовувати Excel.

Розглянемо приклад лінеаризації експоненціальної залежності опору напівпровідника від температури на прикладі лабораторної роботи №15.

Для власних напівпровідників залежність опору від температури описується виразом:

$$R = R_0 e^{-\frac{E}{kT}}$$

Прологарифмувавши цей вираз, одержимо:

$$\ln R = \ln R_0 - \frac{E}{k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (2)$$

Введемо наступні позначення:

$$y = \ln R; \quad a = \ln R_0; \quad b = -\frac{E}{k}; \quad x = \frac{1}{T}.$$

Для спрощення розрахунків позначимо в рівнянні (1) $b = -\frac{\Delta W}{k}$.

Одержимо рівняння $\ln R = \ln R_0 + b \frac{1}{T}$ - аналогічне рівнянню (1):

в якому потрібно найкращим чином підібрати параметри R_0 та b за умови найменшої суми квадратів відхилень експериментальних значень R_i від значень R , що одержані з формули (2):

$$\sum_{i=1}^n \left[\left(\ln R_0 - b \frac{1}{T_i} \right) - \ln R_i \right] \rightarrow \min, \quad (3)$$

Рівність нулю часткових похідних по R_0 та по b від (3), дозволяє отримати систему двох лінійних рівнянь відносно невідомих параметрів R_0 і b :

$$\begin{cases} b \sum_{i=1}^n (1/T_i) + n \cdot \ln R_0 = \sum \ln R_i \\ b \sum_{i=1}^n (1/T_i)^2 + \ln R_0 \cdot \sum_{i=1}^n (1/T_i) = \sum (1/T_i) \ln R_i \end{cases} \quad (4)$$

Для обчислення ширини забороненої зони ΔE потрібно визначити параметр b . Розв'язуючи систему рівнянь (4), одержуємо:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (1/T_i) \cdot \sum_{i=1}^n \ln R_i - n \cdot \sum_{i=1}^n (\ln R_i / T_i)}{(\sum_{i=1}^n 1/T_i)^2 - n \cdot \sum_{i=1}^n (1/T_i)^2}$$

Тоді ширина забороненої зони напівпровідника, в електронвольтах, обчислюється за виразом:

$$\Delta E = -\frac{2\kappa}{e} \cdot b = -1,725 \cdot b \cdot 10^{-4} \text{ (eV)}$$

Для побудови графіка вільний член $\ln R_0$ рівняння прямої визначається за виразом:

$$\ln R_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_i}\right)^2 - \sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i} * \sum_{i=1}^n (\ln R_i * \frac{1}{T_i})}{n * \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_i}\right)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i}\right)^2}$$

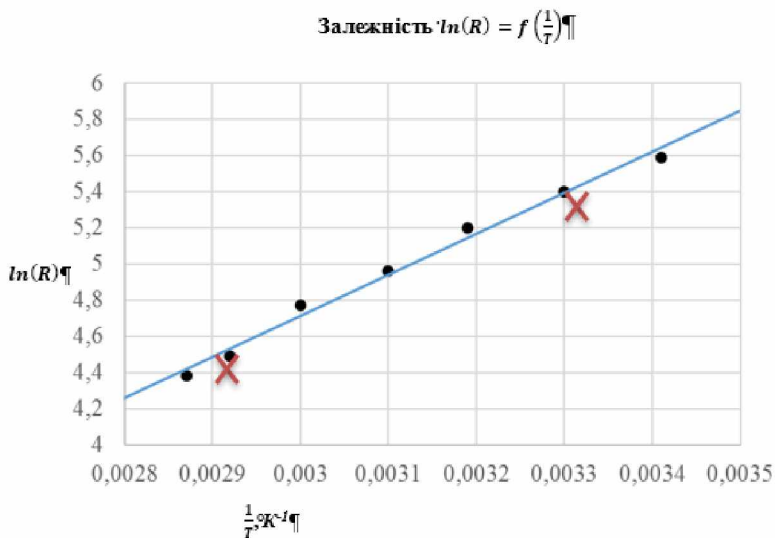


Рис.3. Приклад побудови графіка в Excel методом МНК.

Довільно виберемо на отриманому графіку дві точки: нехай це будуть відмічені хрестиками точки: $(0,0029 K^{-1}; 4,5)$ та $(0,0033 K^{-1}; 5,4)$.

$$T_1 = \frac{1}{0,0029 K^{-1}} \approx 345 K;$$

$$T_2 = \frac{1}{0,0033 K^{-1}} \approx 303 K.$$

Ширина забороненої зони:

$$\Delta E = \frac{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot (5,4 - 4,5) \cdot 303 \cdot 345}{345 - 303} \approx 6,2 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$$

Отримане значення енергії в eV:

$$\Delta E = \frac{6,2 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} \approx 0,38 \text{ eV}$$

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Здешиц В.М. Оптика. Атомна та ядерна фізика / Навчальний посібник. Кривий Ріг: Мінерал, 2003, 247 с.
2. Кучерук І.М. Загальний курс фізики: У трьох томах. Т.3. Оптика. Квантова фізика / І.М. Кучерук, І.Т. Горбачук. 2-ге вид., випр. К.: Техніка, 2006, 532 с.
3. Лопатинский І.Є., Зачек І.Р., Ільчук Г.А. та ін. Фізика для інженерів. Підручник для студентів вищих технічних навчальних закладів. Львів. Вид-во: Львівська політехніка, 2009, 385 с.
4. Бушок Г.Ф., Венгер Є.Ф. Курс фізики / Навч. посібник: У 2 кн. Кн. 2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Либідь, 2001. - 424 с.
5. Герасимова К.В. Лабораторний практикум з фізики. Частина III. Оптика та атомна фізика: для студентів інженерно-технічних спеціальностей усіх форм навчання / К.В. Герасимова, Г.І. Ткаченко. - Кривий Ріг, вид-во КНУ, 2021, - 71 с.
6. Герасимова К.В. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Фізика (вибрані розділи)» для студентів спеціальності 121«Інженерія програмного забезпечення» / К.В. Герасимова, Г.І. Ткаченко. - Кривий Ріг, вид-во КНУ, 2021, - 52 с.
7. Статистична обробка результатів вимірів до виконання лабораторних робіт з курсу фізики. Укладачі: Герасимова К.В., Ткаченко Г.І. – Кр.Ріг: Видавн. центр ДВНЗ «КНУ», 2013.- 64 с.
8. Лабораторний практикум з фізики. Ч.III. Оптика та атомна фізика: навч. посібник / За ред. І.Є. Лопатинського. Львів: Вид-во Національного ун-ту «Львівська політехніка», 2006, 264 с.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Садовий М.І., Трифонова О.М. Історія фізики з перших етапів становлення до початку ХХІ століття: навчальний посібник [для студ. ф.-м. фак. вищ. пед. навч. закл.] – Кіровоград: ПП «Центр оперативної поліграфії «Авангард», 2013. – [2-ге вид. переробл. та доп.] – 436 с.
2. Кучерук І.М. Загальний курс фізики: У 3-х т. Т.3. Оптика. Квантова фізика / І.М. Кучерук, І.Т. Горбачук. 2-ге вид., випр. К.: Техніка, 2006, 532 с.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Є.Ф. Курс фізики / Навч. посібник: У 2 кн. Кн. 2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Либідь, 2001. - 424 с.
4. Лазерні технології. Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. Г. С. Тимчик. – Електронні текстові дані (1 файл 6,22 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 276 с. – Назва з екрана.
5. Дисперсія та інтерференція світла - Google Sites Електронний ресурс: <https://sites.google.com/view/galinaokhotnik-t13>.
6. Фізика процесів у напівпровідниках та елементах електроніки : курс лекцій: [навчальний посібник] / [Д. М. Фреїк, В. М. Чобанюк, З. Ю. Готрата ін. ; за заг. ред. заслуженого діяча науки і техніки України, доктора хімічних наук, проф. Д. М. Фреїка].–Івано-Франківськ: Видавництво Прикарпатського національного університету ім. Василя Стефаника, 2010. – 263 с.
7. Eichler H.J., Eichler J., Lux O. Lasers. Basics, Advances and Applications / Hans Joachim Eichler, Jürgen Eichler, Oliver Lux. – Springer Nature Switzerland, 2018. – 511p.
8. Голографія: навч. Посібник / П. В. Полянський, Х. В. Фельде, Г. В. Богатирьова; за ред. П. В. Полянського. – Чернівці: Чернівецький нац. Ун-т, 2013. – 208с.
9. E.I. Shtyrkov paper Optical Echo Holography 2013 pdf - [Electronic resource] - <http://bourabai.kz/shtyrkov/echo-holography>.

10. Назаренко Л. А. Фізика і техніка світлодіодів : навч. посібник / Л. А. Назаренко, А. І. Колесник ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 255 с.
11. Світлодіоди: фізика, технологія виготовлення, застосування : навч. посібник / В. І. Карась, Л. А. Назаренко, І. В. Карась ; Харків. нац. академ. міськ. госп-ва. – Харків : ХНАМГ, 2012. – 323 с
12. В.І Карась Електричні властивості світлодіодів - Електронний ресурс: <https://eprints.kname.edu.ua/3-5.pdf>
13. Wikipedia«Light-emitting diodes»
: https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode
14. Encyclopaedia britannica [Electronic resource]. – (2016) Luminescence. – Regime of access: <https://www.britannica.com/science/luminescence>, free (date of the application: 17.03.2019)
15. Лабораторний практикум з фізики. Ч.Ш. Оптика та атомна фізика: навч. посібник / За ред. І.Є. Лопатинського. Львів: Вид-во Національного ун-ту «Львівська політехніка», 2006, 264 с.
16. Герасимова К.В. Лабораторний практикум з фізики. Частина Ш. Оптика та атомна фізика: для студентів інженерно-технічних спеціальностей усіх форм навчання / К.В. Герасимова, Г.І. Ткаченко. - Кривий Ріг, вид-во КНУ, 2021, - 71 с.
17. Герасимова К.В. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Фізика (вибрані розділи)» для студентів спеціальності 121«Інженерія програмного забезпечення» / К.В. Герасимова, Г.І. Ткаченко. - Кривий Ріг, вид-во КНУ, 2021, - 52 с.
18. Герасимова К.В. Загальна фізика в таблицях і формулах. Методичні вказівки для самостійної роботи студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / К.В. Герасимова, Г.І. Ткаченко. - Кривий Ріг: Видавничий центр ДВНЗ «КНУ», 2018. – 92 с.
19. Прикладна фізика. Українсько-російсько-англійський тлумачний словник: У 4 т., /уклад.: О. Т. Богорош, С. О. Воронов, О. Г. Шайко-Шайковський, В. З. Маїк, М. Ф. Ясінський. — Львів: Укр. акад. друкарства, 2015. — 1584 с.

ДОДАТКИ

Таблиця Д1

Міжнародна система одиниць СІ.

Параметри	Розмірність	Найменування	Позначення
Довжина	L	метр	[м]
Маса	m	кілограм	[кг]
Час	t	секунда	[с]
Температура	Θ	кельвін	[К]
Кількість речовини	N	моль	[моль]
Сила струму	I	ампер	[А]
Сила світла	J	кандела	[кд]
Плоский кут	-	радіан	[рад]
Тілесний кут	-	стерадіан	[ср]

Таблиця Д3

Окремі перевідні множники

<u>Довжина</u>	<u>Час</u>
1 мікрон (мк) = 10^{-6} м 1 нанометр (нм) = 10^{-9} м 1 ангстрем (Å) = 10^{-10} м	1 доба = $1,44 \cdot 10^3$ хв 1 рік = $5,26 \cdot 10^3$ хв = $3,156 \cdot 10^7$ с
<u>Маса</u>	<u>Енергія</u>
1 атомна од. маси (а.о.м.) = $1,66035 \cdot 10^{-27}$ кг	1 eB = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж

Головні фізичні сталі.

Фізична стала	Позначення	Значення
Прискорення вільного падіння	g	$9,81 \text{ м/с}^2$
Гравітаційна стала	G	$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг с}^2$
Стала Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Молярна газова стала	R	$8,31 \text{ Дж/моль К}^0$
Стандартний об'єм	V_μ	$22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$
Стала Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}^0$
Елементарний заряд	e	$1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Швидкість світла у вакуумі	c	$3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Стала Стефана – Больцмана	σ	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$
Стала Вина	b	$2,90 \cdot 10^{-3} \text{ м К}$
Стала Планка	h	$6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж с}$
Стала Ридберга	R	$1,10 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$
Енергія іонізації атома водню	E_i	$2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$

Таблиця Д4.

Значення коефіцієнта Стюдента $t_{\alpha,N}$

Кількість вимірів N	Довірча ймовірність α	
	$\alpha = 0,90$	$\alpha = 0,95$
2	6,31	12,7
3	2,92	4,30
4	2,35	3,18
5	2,13	2,78
6	2,02	2,57
7	1,94	2,45
8	1,89	2,36
9	1,86	2,31
10	1,83	2,26
∞	-----	1,96

Таблиця Д5

Довжини хвиль, що відповідають певному кольору спектра

Колір спектра	Інтервал довжин хвиль, нм	Колір спектра	Інтервал довжин хвиль, нм
Фіолетовий	400-450	Жовтий	560-590
Синій	450-480	Оранжевий	590-620
Блакитний	480-500	Червоний	620-760
Зелений	500-560		

Таблиця Д6

Робота виходу електрону з різних металів

Речовина	Робота виходу A		Речовина	Робота виходу A	
	eV	$A \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$		eV	$A \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$
Алюміній	3,74	5,98	Літій	2,3	3,7
Вольфрам	4,5	7,2	Натрій	2,5	4,0
Золото	4,58	7,42	Цинк	4,0	6,4
Молібден	4,3	6,9	Германій	4,8	7,7
Нікель	4,5	7,2	Кальцій	2,8	4,5
Платина	5,3	8,5	Цезій	1,8	2,9

Червона межа фотоефекту для деяких речовин

<i>Речовина</i>	λ_0 , нм	<i>Речовина</i>	λ_0 , нм
Барій	484	Платина	190
Германій	272	Рубідій	573
Вольфрам	272	Срібло	261
Мідь	270	Цезій	662
Нікель	249	Цезій на платині	895
Оксид барію	1235	Калій	550

Таблиця Д8.

**Довжини хвиль яскравих ліній у спектрі
випромінювання ртутної лампи**

Колір лінії	Відносна яскравість (візуальна оцінка)	Довжини хвиль, λ , нм
Червона	10	623,40
Червоно - помаранчева	10	612, 26
	9	607,29
Жовта	10	579, 07
	8	576,96
Зелена	10	546,07
	10	490,0
Блакитна	1	491,60
Синя	8	435,83
	8	434,67
Фіолетова	1	407.78
	2	404,66

**Рис.Д1. Спектр атома неону**

Таблиця Д9.

**Довжини хвиль яскравих ліній у спектрі
випромінювання неону**

Колір лінії	Відносн. яскравість (візуальна оцінка)	Довжини хвиль, нм	Колір лінії	Відносн а яскравість (візуальна оцінка)	Довжини хвиль, λ , нм
Червона	1	671,70	Червоно - помаранчева	3	609,62
	8	667,83		4	607,43
	5	659,89		2	603,00
	5	653,29	Помаранчева	2	597,55
	5	650,65		3	598,44
Яскраво-червона	10	640,22	Жовта	4	588,19
	10	638,30		10	585,25
	5	633,44		3	576,44
	2	630,48	Зелена	8	540,06
	8	626,65		5	534,11
	3	621,73		5	533,08
	5	616,36		3	503,13
Червоно - помаранчева	6	614,31	Блакитна	5	482,73

Таблиця Д10

**Ширина забороненої зони ΔE (енергія активації)
деяких власних напівпровідників**

Хімічний елемент	<i>Si</i>	<i>Ge</i>	<i>Se</i>
Ширина забороненої зони ΔE , eV	1,12	0,67	1,8

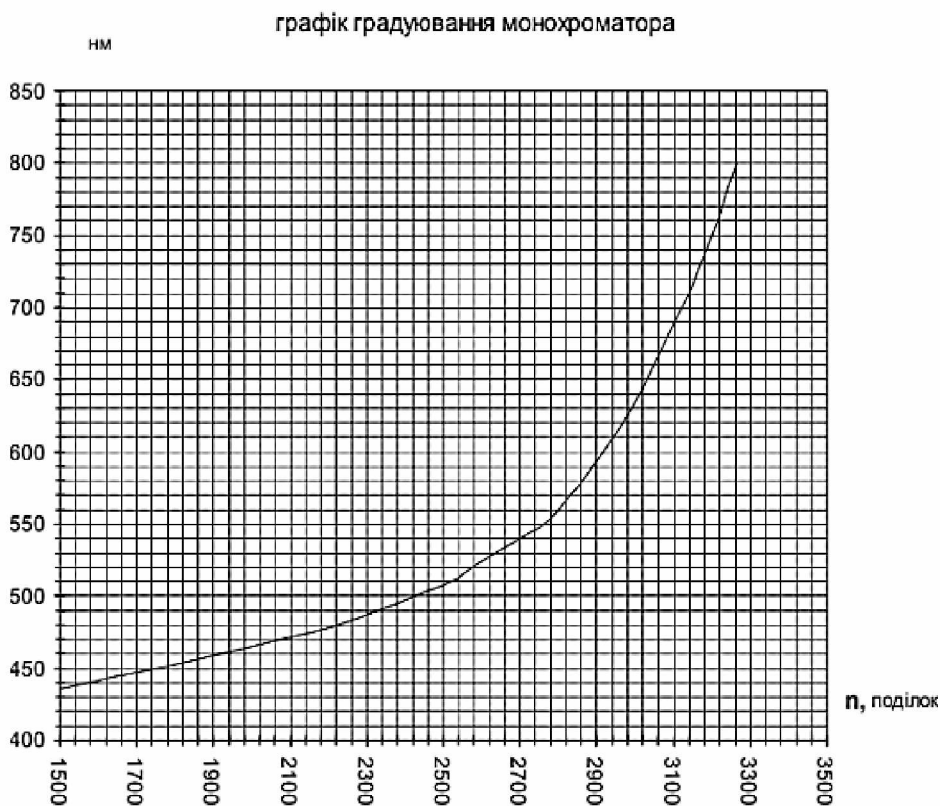


Рис.Д2. Графік градування монохроматора УМ-2

	GLOSSARY OF PHYSICAL TERMS	
	UKRAINIAN	ENGLISH
1.	Атом – (водневоподібний) – атом, на зовнішньому шарі якого міститься один і тільки один електрон;	Atom – (a hydrogenlike atom) – an atom the outershell of which has one and only one electron;
2.	Безвипромінювальний квантовий перехід – перехід, при якому енергія квантової система атома змінюється не шляхом поглинання або випускання електромагнітного випромінювання (тобто при випромінюваному квантовому переході), а в результаті її взаємодії з іншими системами.	Nonradiating transition. – is a quantum transition at which energy of the quantum system atom changes not by absorption or emitting by it electromagnetic radiations (I. e. in radiate quantum transition), but as a result of it co-operations with other systems.
3.	Вакансія - дефект кристала, який проявляється у відсутності атома чи іона у вузлі кристалічної ґратки. Вакансія електронна – вакансія, яку може зайняти електрон.	Vacancy - a defect of a crystal, such as a lack of an atom or ion in the lattice point. e-vacancy – some vacant space which can be taken by an electron.
4.	Власний напівпровідник – напівпровідник без домішок, концентрація дірок у якому дорівнює густині електронів у стані термодинамічної рівноваги.	Intrinsic semiconductor – almost pure semiconductor in which the electron and hole densities are equal at thermal equilibrium.
5.	Довірчий інтервал – проміжок значень параметра	Confidence interval. – the interval of parameter

	моделі, в якому за припущенням лежить його справжнє значення з деякою імовірністю.	values of the model, which presumably lies its true value with a certain probability;
6.	Генератор квантовий напівпровідниковий – лазер із напівпровідниковим кристалом у ролі робочої речовини; на відміну від лазерів інших типів, використовуються випромінювальні квантові переходи не між ізольованими рівнями енергії атомів, молекул та іонів, а між дозволеними енергетичними зонами кристала (твердого тіла).	Generator quantum semiconductor – a laser with a semiconductor crystal as the workingsubstance. Unlike other types of lasers it uses radiative quantum jumps not between isolated energy levels of atoms, molecules and ions, but between the allowed energy bands of a crystal (solid body).
7.	Гратка (решітка) дифракційна – оптичний прилад, який працює за принципом дифракції світла, являє собою сукупність великої кількості регулярно розташованих штрихів (щілин, виступів), нанесених на деяку поверхню;	Lattice, grating, grid diffraction – an optical devicethat operates on the principle of light diffraction; it consists a collection of a series of regularly spaced lines (slits, ledges), ruled on some surface;
8.	Дискретність – властивість системи або процесу, який складається з окремих частинок.	Discreteness – the property of a system or process consisting of separate parts.
9.	Діод – електронна лампа або напівпровідниковий прилад із двома електродами, який пропускає електричний струм лише в одному напрямі.	Diode –electron tube or semiconductor device with two electrodes, which let electric currentflow in one direction only. It is used for

	Застосовують для випрямлення змінного струму.	alternating current rectification.
10.	Електронвольт – одиниця вимірювання енергії. Один Ев дорівнює енергії, яка необхідна для перенесення електрона в електростатичному полі між точками з різницею потенціалів у 1 В. $1 \text{ Ев} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$	Electronvolt – unit of energy in units. One Ev is the energy required for electron transfer in electrostatic field between the points of potential difference of 1 V.
11.	Енергія активації – мінімальна кількість енергії, яку повинні отримати електрони донорної домішки, для того, щоб потрапити у зону провідності.	Energy activation – the minimum amount of energy that should get the electrons of donor impurities in order to get into the conduction band;
12.	Закономірність емпірична – систематизоване знання, яке ґрунтується тільки на експериментальних відомостях.	Pattern empirical regularity – the systematic knowledge that is based only on experimental data.
13.	Збудження атома – квантовий перехід атома чи молекули з більш низького (напр., основного) рівня енергії на більш високий під час поглинання ними фотонів (фотозбудження) або під час зіткнення з електронами та іншими частинками.	Excitement atom – quantum transition of an atom or molecule with a lower (e. g. ground) energy level higher in the absorption of the photon (photoexcitation), or by collisions with electrons and other particles.
14.	Зона енергетична – квазібезперервна сукупність одночасткових станів в енергетичному спектрі	Zone power – quasi continuous aggregate one-particle states in the energy

	конденсованого середовища (зокрема, твердого тіла).	spectrum of condensed matter (eg, solid).
15.	Інверсія – зміна нормального положення атомів, розташування їх у зворотньому порядку;	Inversion – change in the normal position of the atoms, their location in the reverse order;
16.	Інверсія заселення – одне з фундаментальних понять фізики та статистичної механіки, яке використовують для опису принципів функціонування лазерів;	Population inverted – one of the fundamental concepts of physics and statistical mechanics used to describe the principles of operation of lasers;
17.	Інтенсивність інтегрального випромінювання – характеризує розподіл сумарної для всіх довжин хвиль енергії випромінювання за всілякими напрямками у певній точці для вибраного моменту часу.	Integrated intensity. – integral emission intensity – that characterizes the distribution of the total for all wavelengths of the radiation energy in all directions at a given point for the selected time;
18.	Інтерференція явище збільшення або зменшення амплітуди результуючої хвилі при складанні двох або декількох хвиль, що мають однакові частоти коливань. Інтерференція спостерігається у хвилях різної природи – поверхневих (на воді), поперечних та поздовжніх звукових, електромагнітних (світло, радіохвилі), хвиль де Бройля.	Interference – the phenomenon of superposition of coherent wave processes on each other, which resulted in some places there has been increasing the intensity of the resultant, and some – easing. Interference is observed at the waves of arbitrary nature of superficial (on water), transversal and longitudinal voice, electromagnetic (light-,

		radiowaves) waves de Broylya;
19.	Квазічастинка – квант колективного коливання або збурення багаточастинкової системи, яка має певну енергію і, як правило, імпульс (наприклад, фонон). Міжквазічастинками та звичайними елементарними частинками існує ряд подібностей та відмінностей.	Quasi-particle – is a quantum of joint fluctuation or many – particles system which has defined power and as a rule is the impulse (for example – phonon). There are many similarities and differences between quasi-particle and usual elementary particles.
20.	Квант – неподільна порція будь-якої величини у фізиці; загальна назва певних порцій енергії (квант енергії), моменту кількості руху (кутового моменту), його проекції.	Quantum – non-divided portion of some value in physics; the common name of a certain portion of energy (photon energy), the angular momentum (angular momentum), its projections.
21.	Квантова оптика – розділ оптики, що вивчає явища, в яких виявляються квантові властивості світла (теплове випромінювання, фотоэффект, ефект Комптона, фотохімічні процеси, вимушене випромінювання (і, відповідно, фізика лазерів) тощо. Квантова оптика є більш загальною теорією, ніж класична оптика: описує взаємодії світла з речовиною з врахуванням квантової природи об'єктів.	Quantum optics – section of optics, engaged in the study of the phenomena quantum properties of light show up in which. To such phenomena behave: thermal radiation, photoeffect, effect of Komptona, actinic processes, forced radiation (and, accordingly, physics of lasers) and other A quantum optics is more general theory, than classic optics. A basic problem, affected a quantum optics,

		is description of co-operation of light with a matter taking into account quantum nature of objects.
22.	Квантування (наприклад, поглинальне) – поглинання енергії молекулою газу, при якому відбуваються переходи електронів з одного енергетичного рівня в інший, а також зміни її коливальної та обертальної енергії.	Absorption quantified – the energy absorption by a gas molecule accompanied by the passage of electrons from one energy level to another, as well as by changing of its vibrational and rotational energy.
23.	Квантовий генератор – загальна назва джерел електромагнітного випромінювання, що працюють на основі вимушеного випромінювання атомів і молекул. Залежно від того, яку довжину хвилі випромінює г. к., він може називатися по різному: лазер, мазер, разер, газер.	Generator quantum – the common name for electromagnetic radiation sources operating on the basis of forced emission of atoms and molecules. Depending on the wavelength emitting by a quantum generator, it can be called in different ways: a laser, maser, raser, gaser.
24.	Люмінесценція - процес випромінювання речовинами енергії у вигляді світла; цю енергію вони заздалегідь повинні отримати ззовні;	Luminescence - process of emission of energy substances in the form of light, this energy, they must first get outside;
25.	Поглинання світла – зменшення інтенсивності оптичного випромінювання при проходженні через будь-яке середовище за рахунок взаємодії з ним, у результаті чого світлова енергія переходить в інші види енергії	Absorption of light – optical radiation fallout when passing through some medium caused by the interaction with it; as a result light energy transfers into other energy

	або в оптичне випромінювання іншого спектрального складу.	types or into optical radiation of another frequency content.
26.	Потік енергії – фізична величина, чисельно рівна потоку енергії через малу площадку одиничної площі, перпендикулярну напрямку потоку	Energy flow – a physical quantity that is numerically equal to the flow of energy through a small pad of unit area perpendicular to the direction of flow.
27.	p-n діод – напівпровідниковий діод на основі p-n-переходу. Однією із головних властивостей є різка асиметрія вольтамперної характеристики: висока провідність за прямого зсуву та низька за зворотного. Ця властивість діода використовується у випрямних діодах.	p-n diode – a semiconductor diode based on the p-n-junction. One of the main features is the sharp asymmetry of current-voltage characteristics: high conductivity at low forward bias and low at the reverse. This property is used in rectifier diodes
28.	Резонатор лазерний – дзеркала лазера не тільки забезпечують позитивний зворотний зв'язок, а й працюють як резонатор, підтримуючи тільки одні генеровані лазером моди, що відповідають стоячим хвилям цього резонатора.	Resonator laser. – laser mirror not only ensure the existence of positive feedback, but also work as a resonator, supporting one generated by the laser modes, corresponding to standing waves of the cavity.
29.	Рекомбінація випромінювальна – процес, при якому електрон із зони провідності, втрачаючи енергію, перескакує у валентну зону, де з'єднується з діркою; втрачена ним	Recombination emissivity – a process in which an electron from the conduction band, losing energy, jump into the valence band, where it connects with the hole,

	енергія висвічується у вигляді кванта електромагнітного випромінювання.	they lost energy appears as a quantum of electromagnetic radiation.
30.	Рекомбінація електрон-дірка – зникнення пари електрон провідності – дірка в результаті переходу електрона із зони провідності у валентну зону.	Recombination electron-hole – the disappearance of an electron conductivity – a hole in the transition of an electron from the conduction band to the valence band.
31.	Рівень Фермі – енергетичний рівень, який характеризує заповнення дозволених енергетичних зон носіями заряду.	Fermi level – is an enrgeticlevel, which characterize the completion of allowable energetic
32.	Роздільна здатність дифракційної ґратки - визначається загальною кількістю штрихів та порядком спектра. Величина роздільної здатності може становити сотні тисяч одиниць.	Resolution of the diffraction grating – is determined by the total number of strokes and the order of the spectrum. The value of the resolution can be hundreds of thousands: units.
33	Світлодіод - напівпровідниковий прилад (діод), який випромінює світло при пропущенні через нього електричного струму. Характеристики світлодіодів (колір світіння, яскравість світіння тощо) залежать від хімічного складу напівпровідників.	Light-emitting diode - begins to conduct current, acquiring properties of a typical semiconductor.
34.	Фотоелектричний ефект – передача енергії фотона	Photoelectric – the transfer of photon energy

	електрону з наступним вильотом останнього з атома.	to an electron followed by its escape from the atom.
35.	Фотоелектричний ефект – випускання електронів речовиною під впливом світла.	Photoelectric e. – the phenomenon of electron emission substance when exposed to light.
36.	Фотон – це безмасова частинка, здатна існувати тільки ухаючись зі швидкістю світла. Електричний заряд фотона також дорівнює нулю. Фотон може перебувати тільки у двох станах спінів з проекцією спіну на напрямок руху (спиральністю) ± 1 . Фотону як квантовій частині притаманний корпускулярно-хвильовий дуалізм, він проявляє одночасно властивості частинки та хвилі.	Photon - is massless particle which can run with velocity of light. Photon's electric charge is equal zero. Photon may be only in two spin states with spin's projection towards to move (spital) $\pm$
37.	Ширина забороненої зони – це ширина енергетичного зазору між дном зони провідності та стелею валентної зони, у якому відсутні дозволені стани для електрона;	Band gap – is the width of the energy gap between the bottom of the conduction band and valence band, where there are no allowed states for an electron;

Навчальне видання

Галина Іванівна Ткаченко
Юлія Володимирівна Єчкало

Елементи квантової теорії

Навчальний посібник

Підписано до друку_2024 року

Формат А5 Обсяг 98 стор.

Електронне мережеве видання

Реєстр №_____ Обсяг 3,1 авт. арк.

Криворізький національний університет,
вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, 50027, knu@knu.edu.ua