НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО

ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра загальної фізики

Лабораторна робота № 3-12

ВИВЧЕННЯ ЕФЕКТУ РАМЗАУЕРА

Протокол, варіант №_____

Виконав_____
Група_____
Факультет_____

Мета роботи:

1. Вивчити особливості процесів розсіювання електронів на атомах інертних газів в залежності від їхньої енергії.

2. Експериментально спостерігати ефект Рамзауера за допомогою вольт-амперної характеритики електронної лампи.

3. Визначити критичні значення енергії електронів, які відповідають максимуму і, по можливості, мінімуму прозорості інертного газу для них.

4. Вивчити квантову природу ефекта Рамзауера.

5. Визначити глибину і, по мож-ливості, ширину потенційної ями, що моделює взаємодію електрона з атомом інертного газу.

Вступ

Ефект Рамзауера відомий також як ефект Рамзауера-Таундсена – явище аномально слабкого розсіювання повільних електронів атомами нейтральних газів. Вперше спостерігалось в 1921 році Карлом Рамзауером при вивченні розсіювання електронів в аргоні, а пізніше ефект спостерігався і в інших речовинах.

Рух заряджених частинок (електронів і іонів) в газі є одним із фізичних процесів, що займає провідне місце в фізиці плазми і газових розрядів і визначає умови роботи всіх газорозрядних і плазмових приладів. При цьому мають місце різні зіткнення заряджених частинок з нейтральними частинками газу (атомами, молекулами).

В залежності від енергії електронів розрізняють *пружні* і *непружні* зіткнення. Пружні зіткнення не супроводжуються зміною внутрішньої енергії атомів. Частина кінетичної енергії, яка передається при пружному зіткненні електрона з атомом приблизно дорівнює відношенню маси електрона m_e і атома M. Це відношення по порядку величини дорівнює: $m_e/M \sim 10^{-4}$. Тому пружне зіткнення практично не змінює кінетичну енергію електронів, а змінює тільки напрямок їхнього руху. Пружні зіткнення характерні для електронів з кінетичною енергією, яка дорівнює одиницям електрон-Вольт (еВ).

Зіткнення, при яких внутрішня енергія атома і кінетична енергія електрона змінюються, називаються непружними. Непружні зіткнення бувають 1-го і 2-го роду. При непружних зіткненнях 1-го роду електрон віддає частину своєї енергії на збудження або іонізацію атома. Вони мають місце, якщо електрони, які налітають на атом, мають достатню для збудження атома кінетичну енергію – десятки і сотні (еВ). При непружних зіткненнях 2-го роду електрону пере-

дається частина енергії збудженого атома, або вся ця енергія збудження. Тому такого роду зіткнення можуть відбуватись між електронами і атомами, які знаходяться в збудженому стані.

Пружне розсіювання електронів на атомах

Основною характеристикою процесу пружного розсіювання є його ефективний переріз σ, який характеризує ймовірність пружного зіткнення електрона із окремим атомом. Величину σ можна вважати площею кола з центром в ядрі атома, при попаданні в який електрон відхиляється від початкового напрямку. Ефективний переріз пружного розсіювання пов'язаний простим співвідношенням з коефіцієнтом ослаблення електронного пучка за його проходженням через газ:

$$k = \sigma \cdot n, \qquad (1)$$

де n – число атомів в одиниці об'єму газу. Можна показати, що зменшення інтенсивності пучка I при його проходженні через шар газу завтовшки x є експоненційним:

$$I(x) = I(0) \cdot \exp(-kx). \quad (2)$$

Експериментально вимірюється величина ослаблення електронного струму

$$I(x)/I(0).$$

Тоді можна знайти значення ефективного перерізу σ.

Як σ повинна би залежати від швидкості (енергії) електронів? З погляду класичної фізики, слід очікувати залежності перерізу σ пружного розсіювання електронів від їх швидкостей у газі. При русі електрона поблизу атома електричне поле електрона зміщує електронну оболонку атома відносно ядра, у результаті атом набуває дипольний момент. Потенційне поле цього наведеного диполя викликає силу притягання між електроном і атомом, яке змінює траєкторію руху електрона. Чим повільніше рухаються електро-

ни, тим більше часу вони знаходяться в потенційному полі атома і тим більша зміна напрямку руху відбуватиметься. Іншими словами, електрони з більшою кінетичною енергією розсіюватимуться атомами так само, як електрони з меншою енергією, якщо вони пролітатимуть на менших відстанях від атома. Таким чином, ефективний переріз розсіювання має монотонно зменшуватися зі збільшенням швидкості електронів, що налітають на атоми.

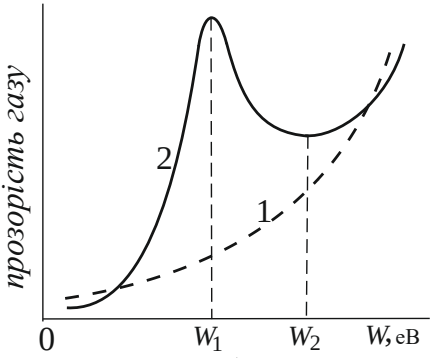

Рис.1.

Це означає, що згідно формули (2) при $x = \text{const}$, прозорість газу для електронів буде монотонно зростати із збільшенням їхньої енергії, як схематично показано на рис.1 (пунктирна лінія 1).

Тим часом, досліджуючи в 1921 році проходження електронного потоку дуже повільних електронів (з енергією 0.75 – 1.1 эВ) у газі аргоні, К.Рамзауер виявив, що із зменшенням енергії електронів, розсіювання останніх дуже різко зменшується. Це фізичне явище, коли електрони певної енергії проходять через газ практично безперешкодно (рис.1, максимум лінії 2), отримало назву ефекту Рамзауера. Цей ефект, що явно суперечить уявленням класичної фізики про зіткнення електронів з нейтральними атомами, знайшов своє пояснення при врахуванні хвильової природи мікрочастинок.

Властивість мікрочастинок відбиватися від областей з різким стрибком потенціалу є чисто квантово-механічним ефектом, що випливає з хвильових властивостей матерії і

не можна пояснити в класичній фізиці. Саме цей ефект відбивання електронного потоку від поверхонь зі стрибком потенціалу дозволяє пояснити ефект Рамзауера.

Електрони при русі в газі складно взаємодіють з атомами. Головним фактором, що визначає ймовірність зіткнення, є потенційне поле атома, створюване електронами і ядром, що входять до його складу. Важливу роль відіграє спо-

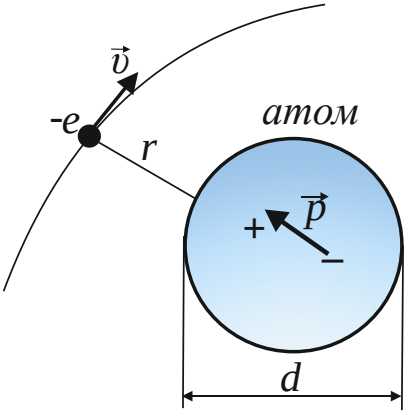

Рис.2.

творення потенційного поля атома електронами, що рухаються біля нього, внаслідок утворення у частинки – мішені наведеного дипольного моменту (рис.2.). Поле цього наведеного диполя $\vec{p}$ викликає додаткове притягання між електроном та атомом і є вирішальним для появи ефекту Рамзауера. Крім цієї поляризаційної сили притягання, існує ціла низка інших сил, що діють під час зіткнення електрона з нейтральною часткою:

1)додаткова поляризаційна сила відштовхування;

2) кулонівська сила притягання між електроном та атомним ядром;

3) сила відштовхування від електронів, що екранують ядро;

4) короткодіюча обмінна сила відштовхування, обумовлена принципом Паулі для частинок з однаковими спінами. Ця сила перешкоджає просторовому перекриванню електронних оболонок частинок-мішеней і вільного електрона;

Результуюче в результаті всіх перерахованих взаємодій потенційне поле можна приблизно представити як тривимірну потенційну яму зі сті-

нками різної крутизни. Однак, точний квантово-механічний розгляд ефекту Рамзауера з використанням моделі тривимірної сферичної потенційної ями є досить складним. Зазвичай обмежуються описом даного явища на основі моделі одновимірної прямокутної потенційної ями, що дозволяє тим не менш, вияснити його основні риси та отримати наближені кількісні співвідношення.

Схематично потенційна яма разом із зображенням атома-мішені приведена на рис.3.

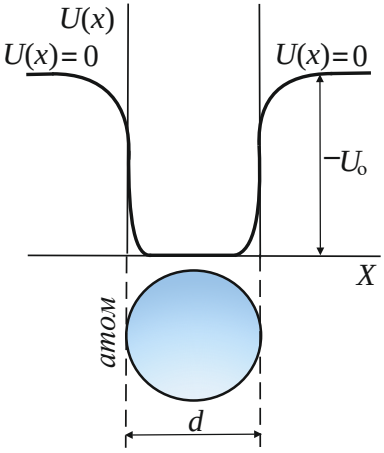

Рис.3.

Квантовий розгляд пружного розсіювання електронів

Руху електронів у квантовій механіці ставиться в відповідність деякий хвильовий процес – хвиля де Бройля, або Ψ - хвиля. Відповідно, взаємодія електронного пучка з атомами газу розглядається як розсіювання на них первинної «падаючої» хвилі де Бройля. Вторинні Ψ - хвилі, що утворюються під час розсіювання цієї хвилі на різних частинах атома, інтерферують між собою, а кількість розсіяних у тому чи іншому напрямку електронів є пропорційна квадрату модуля амплітуди результуючої розсіяної Ψ - хвилі. Може вийти так, що за певного співвідношенні між довжиною хвилі електрона та характерними розмірами атома розсіяні Ψ - хвилі в результаті інтерференції послаблять одна одну і таким чином виникнуть сприятливі умови для практично безперешкодного проходження електронів крізь газ. Так появляться умови. для спостереження ефекту Рамзауера.

Як у класичній, так і в квантовій механіці, процеси розсіювання визначаються, зрештою, потенційною енергією взаємодії частки, що розсіюється, і розсіювача (у нашому випадку – електрона та атома). Правильне якісне уявлення про енергію їх взаємодії можна скласти, враховуючи два основні фактори: для електронів, що пролітають "поза" атомом, - поява у атома наведеного електричного дипольного моменту, направленого позитивним полюсом до електрона (рис.2), а для електронів, що проходять «крізь» атом, – зменшенням екранування ядра електронами оболонки. Обидві ці причини сприяють притяганню електрона до атома, що відповідає появі «потенційної ями», що має розміри порядку розмірів атома (рис.3). За межами ями потенційна енергія взаємодії електрона дуже швидко виходить на постійне значення, що зазвичай приймається за нуль. За такого вибору початку відліку енергії потенційна енергія всередині ями буде негативною. У наближенні, що розглядається, реальний хід потенціалу всередині ями замінюють деяким постійним значенням $U = U_0$, де U_0 - ефективна глибина ями. Зрозуміло, потенційна яма має не прямовисні, а пологі стінки. *Однак крутизна стінок* (рис.3) *збільшується зі зростанням атомного номера елемента і особливо сильно – для атомів благородних газів, які відрізняються найбільш компактною електронною структурою та різкою зовнішньою границею. Саме з цієї причини ефект Рамзауера краще всього проявляється в аргоні, криптоні та ксеноні.* Для них можна використовувати модель сферичносиметричної потенційної ями з вертикальними стінками і вважати, що вторинні Ψ - хвилі, які інтерферують і визначають ймовірність розсіювання електронів, утворюються в результаті відбиття падаючої хвилі де Бройля від стінок цієї ями. Пе-

реходячи до ще більш грубої моделі – до одновимірної прямокутної ями (див. рис. 4), отримуємо, що за такого – одномірного – розсіювання результат інтерференції безпосередньо визначається співвідношенням між шириною потенційної ями d і довжиною Ψ-хвилі для електронів «всередині» ями λ.

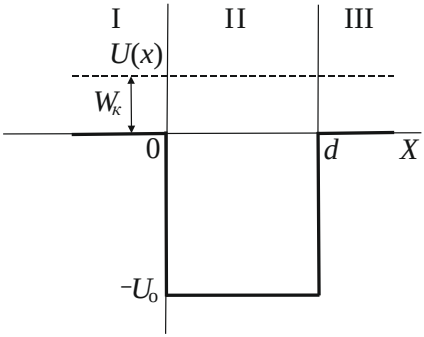

Рис.4.

Згідно з де Бройлем, довжина хвилі, що відповідає електрону з імпульсом p, дорівнює

$$\lambda = \frac{h}{p}\cdot \qquad (3)$$

При малих (нерелятивістських) енергіях

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e W_к}}, \qquad (4)$$

де h – стала Планка; m_e – маса електрона, $W_к$ – кінетична енергія електрона. Поки електрон знаходиться за межами потенційної ями (рис.4) його кінетична енергія $W_к$ збігається з повною енергією W і довжина хвилі дорівнює

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e W}}\cdot \qquad (5)$$

Всередині потенційної ями кінетична енергія електрона буде більша:

$$W_к = W - (-U_0) = W + U_0, \qquad (6)$$

а довжина Ψ-хвилі λ всередині ями – менша, ніж поза нею:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e(W+U_0)}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1+\frac{U_0}{W}}}\cdot \qquad (7)$$

Якщо провести аналогію з оптикою, то знаменник у формулі (7) можна інтерпретувати як показник заломлення n для Ψ - хвиль:

$$n = \sqrt{1+\frac{U_0}{W}} \qquad (8)$$

Таким чином, на передній стінці ями Ψ-хвиля переходить у область з більшим показником заломлення, а на задній – з меншим. Розглянемо інтерфе-

ренцію хвиль де Бройля при проходженні атома (рис.5).

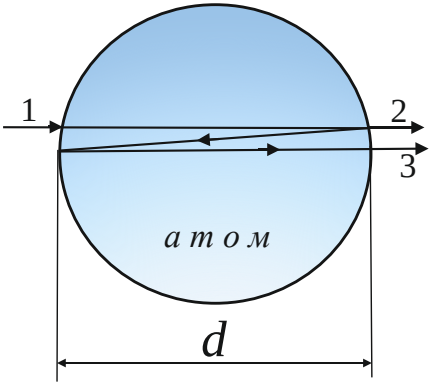

Рис.5.1- падаюча хвиля на атом. 2 і 3 – хвилі, які проходять атом.

Хвиля 3 зазнає подвійного відбивання всередині атома (потенційної ями). Хвилі 2 і 3 когерентні і інтерферують між собою. Максимум інтерференції цих хвиль означає, що падаюча хвиля 1 на рис.5 буде проходити атом і це буде відповідати умові максимуму прозорості газу для електронів (максимуму інтерференції хвиль). Хвилі 2 і 3 на рис.5 набувають різницю ходу $\Delta = 2d$. Максимуму інтерференції буде відповідати умова, що

$$\Delta = 2d = \lambda. \qquad (9)$$

Із урахуванням (7) (9) можна переписати так:

$$\frac{h}{\sqrt{2m_e(W+U_0)}} = 2d. \qquad (10)$$

Звідки знайдемо, що максимально прозоро (рис.1) проходити газ будуть електрони з енергією

$$W_1 = \frac{h^2}{8m_e d^2} - U_0. \qquad (11)$$

Мінімуму прозорості газу для електронів буде відповідати випадок, коли хвилі 2 і 3 на рис.5 будуть компенсувати одна одну (суперпозиція цих хвиль буде давати мінімум інтерференції). Це відповідає умові, що

$$\Delta = 2d = \frac{3}{2}\lambda, \qquad (12)$$

а із урахуванням (7) отримаємо, що

$$\frac{3}{2}\frac{h}{\sqrt{2m_e(W+U_0)}} = 2d. \qquad (13)$$

Звідки знайдемо, що при енергії електронів

$$W_2 = \frac{9h^2}{32m_e d^2} - U_0 \qquad (14)$$

буде мінімум прозорості газу для них, або максимум розсіювання електронів на атомах газу (рис.1, лінія 2).

Квантово-механічний розгляд розсіювання електронів на одномірній потенційній ямі дає точно такі ж значення енергій W_1 (формула 11) і W_2 (формула 14). Детальніше цей випадок розглянутий в інструкції до роботи.

Співвідношення (11) і (14) містять дві невідомих величини: розмір атома d і глибину потенційної ями U_0, Якщо експериментально визначені енергії електронів W_1 і W_2, тоді розв'язок рівнянь (11) і (14) дає для характерного розміру атома вираз:

$$d = \frac{h\sqrt{5}}{4\sqrt{2m_e(W_2 - W_1)}}, \quad (15)$$

а для глибини потенційної ями атома –

$$U_0 = \frac{4}{5}W_2 - \frac{9}{5}W_1. \quad (16)$$

Експериментальне дослідження ефекту Рамзауера. Опис установки

У цій роботі ефект Рамзауера на атомах інертного газу досліджується за допомогою тиратрону. Тиратрон - це три- або чотириелектродна вакуумна лампа, яка заповнена всередині невеликою кількістю інертного газу (найчастіше ксенону) при тиску близько 30 Па. Тиратрон містить оксидний катод, що нагрівається, анод і керуючі сітки. Оксидний катод-метал покритий спеціальним окислом робота виходу електронів із якого менша, ніж у металу. Це дозволяє отримувати

тиратрон

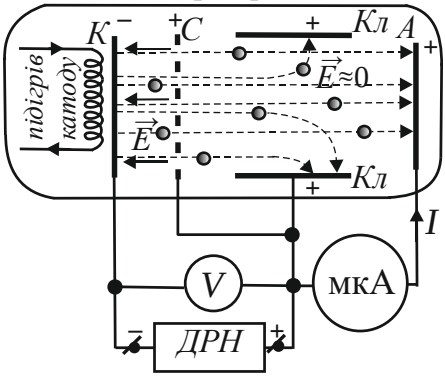

Рис.6. Принципова схема лабораторної установки. На схемі такі позначення. ***K*** – катод, ***A*** – анод, ***C*** – сітка, яка прискорює електрони, ***Кл*** - колектор, $\vec{E}$ –напруженість електричного поля, ***V*** – вольтметр, **мкА**– мікроамперметр для вимірювання анодного струму I_a, **ДРН** – джерело регульованої напруги, ● – позначення електронів на рисунку.

електронну емісію при незначному нагріванні катода. До появи відповідних напівпровідникових приладів тиратрони застосовувались у випрямлячах змінного струму, а також у генераторах релаксаційних коливань. У звичайних робочих режимах у тиратроні виникає несамостійний дуговий розряд. Для дослідження ефекту Рамзауера підбирають такий робочий режим, щоб розряд у тиратроні не виникав, а струм був чисто електронним.

Розсіювання електронів на атомах інертного газу вивчається за допомогою тиратрона, принципова схема якого показана на рис.6. Звертаємо увагу, що від джерела регульованої напруги ДРН на катод ***К*** подається негативний потенціал, а на прискорюючи сітку ***С***, анод ***А,*** колектор ***Кл***, які з'єднані між собою, подається позитивний потенціал відносно катода ***К***. Таке з'єднання електродів лампи забезпечує існування електричного поля $\vec{E}$ між катодом ***К*** і сіткою ***С***, яке прискорює електрони а також практично відсутність електричного поля між сіткою ***С***, анодом ***А*** і колектором ***Кл.*** Такий розподіл електричного поля в лампі забезпечує умови для вивчення ефекту Рамзауера.

Відбувається це таким чином. Електрони, які внаслідок нагрівання катода ***К*** (має місце явище термоелектронної емісії) виходять із нього, попадають в область електричного поля між катодом і сіткою ***С***. Це поле прискорює електрони і вони через сітку влітають в напрямку анода ***А*** в область між сіткою і анодом, де електричне поле відсутнє, але є атоми інертного газу. Подальший рух електронів визначається тільки розсіюванням на атомах газу. Електрони, які не зазнають розсіювання, попадають на анод і створюють анодний струм I_a, який вимірюється мікроамперметром **мкА** (рис.6).

Припустимо тепер, що пучок електронів, вилітаючи з катода $\boldsymbol{K}$ (рис.6), проходить прискорюючу різницю потенціалів V, яка прикладена між катодом та сіткою $\boldsymbol{C}$, і набуває при цьому енергію

$$W = \frac{m_e v^2}{2} = eV$$

При проходженні через газ частина електронів розсіюється на атомах, відхиляється в сторону від прямолінійного руху (рис.6) і збирається колектором $\boldsymbol{Кл}$, а електрони, які не зазнають розсіювання, потрапляють на анод $\boldsymbol{A}$ та створюють анодний струм $\boldsymbol{I_a}$. Оскільки струм $\boldsymbol{I_a}$ пропорційний числу електронів, які проходять відстань між сіткою $\boldsymbol{C}$ і анодом $\boldsymbol{A}$, то цей струм безпосередньо характеризує проникність газу для електронного пучка. При цьому ми можемо змінювати швидкість руху електронів, регулюючи прикладену різницю потенціалів V між катодом $\boldsymbol{K}$ і сіткою $\boldsymbol{C}$. Згідно з класичними уявленнями із зростанням напруги V розсіювання має зменшуватися і струм має монотонно зростати. З погляду квантової теорії газ буде прозорий для електронів лише за певних значень енергії, які відповідають умовам інтереференційних максимумів. Енергії, при яких спостерігаються інтерференційні мінімуми, відповідають ситуації, коли газ є для електронів непрозорим середовищем, розсіювання в якому велике.

Таким чином, потік електронів $N(x)$ на відстані x від сітки $\boldsymbol{C}$, яка прискорює електрони (тобто число електронів, що проходять через поперечний переріз лампи в точці x в одиницю часу) зменшується зі зростанням x від початкового значення N_0 біля катоду (у точці $x = 0$) до деякого значення N_a ,біля аноду (у точці $x = L$). Анодний струм $I_a = eN_a$, де N_a - число електронів, що падають на анод в одну секунду, тобто. потік не розсіяних електронів. Відповідний розрахунок показує, що величина N_a експонен-

ційно залежить від *ймовірності w розсіювання* електрона на атомі:

$$N_a = N_0 \cdot \exp\{-kw\},$$

де N_0 - потік електронів, що пройшли через сітку $\boldsymbol{C}$; k - коефіцієнт, що залежить від параметрів лампи. Відповідно,

$$I_a(V) = I_0 \exp\{-kw(V)\}.$$

1.Величину $I_0 = eN_0$ можна вважати сталою величиною, так як при даних умовах експерименту потік N_0 слабо залежить від напруги V.

2.Згідно з класичними уявленнями ймовірність розсіювання $w(V)$, яка залежить від розмірів атомів газу, їхньої концентрації та відстані між сіткою $\boldsymbol{C}$ і анодом $\boldsymbol{A}$ повинна спадати монотонно із зростанням напруги V (обернено пропорційно швидкості електрона, тобто. обернено пропорційно квадратному кореню з його енергії), а значить, вольтамперна характеристика $I_a(V)$ (ВАХ) буде монотонною зростаючою функцією (рис.7, лінія 1).

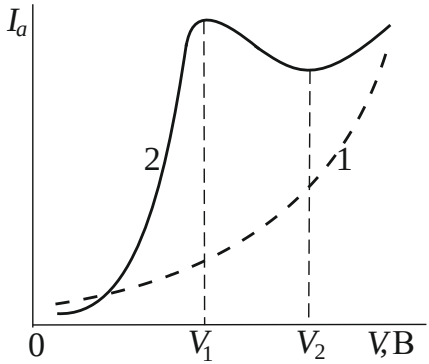

Рис.7. Вольтамперна характеристика тиратрону. 1 – ВАХ за класичною теорією; 2 – прояв ефекту Рамзауера на експериментальній ВАХ.

Однак внаслідок ефекту Рамзауера залежність $I_a(V)$ виявляється немонотонною. Це пояснюється тим, що прозорість атомів газу $\boldsymbol{D}$ істотно залежить від напруги прискорення V (енергії електронів). Тому, вимірюючи ВАХ тиратрона, ми тим самим фактично вимірюємо залежність $\boldsymbol{D}(\boldsymbol{W})$ і можемо експериментально визначити енергію електронів W_1, при якій вони безперешкодно (майже без розсіювання) про-

ходять газ і енергію електронів W_2, при якій вони зазнають максимального розсіювання. Тобто, при напрузі $V_1 = W_1/e$, що відповідає умові (11), спостерігається максимум струму I_a (рис.7, лінія 2). Тому вимірювання залежності $I_a(V)$ дозволяє визначити значення напруги V_1 (і енергію електронів W_1), при якій розсіювання зникає. Аналогічно з умови мінімуму струму (що відповідає максимальному розсіюванню) знаходиться значення напруги V_2 (і енергія електронів W_2). Далі за формулою (14) можна розрахувати ефективну потенційну енергію U_0 взаємодії електрона з атомом інертного газу.

Для вимірювання ВАХ тиратрона в анодне коло (рис.6) ввімкнений мікроамперметр **мкА,** а між сіткою і катодом – вольтметр ***V.***

На рис.8 приведена експериментальна установка в лабораторії. Необхідно відзначити, що в процесі вимірювань проявляються апаратурні ефекти, які дещо спотворюють справжні значення параметрів ефекту Рамзауера, що визначаються.

Рис.8. Експериментальна установка.

Рис.9. Осцилограма вольтамперної характеристики тиратрона.

1. Перший ефект полягає в тому, що при зміні напруги розжарення катода в межах $V_{\text{розж}} = (4 \div 6{,}3)\text{В}$ спостерігається істотна зміна глибини рамзауерівського мінімуму на

кривій $I_a(V)$. Цей апаратурний ефект обумовлений явищем виникнення «віртуального катода» перед реальним катодом при підвищеному розжаренні катода (~ 6.3 В), коли хмара емітованих електронів, що повільно «розсмоктується» при малих значеннях анодної напруги (~ 1В), ускладнює емісію з катода нових поколінь електронів. Останнє зменшує анодний струм і виглядає як хибний результат збільшення ефективного перерізу розсіювання в області рамзауерівського мінімуму.

2. Другий апаратурний ефект виникає внаслідок появи паразитної «контактної різниці потенціалів» $V_к$ між катодом і закороченими сітками та анодом тиратрону. При цьому на межі контакту металів утворюється стрибок потенціалу, який дорівнює різниці енергій Фермі обох металів до виникнення контакту, що перешкоджає безперешкодному переходу електронів провідності з одного тіла до іншого, а між їх вільними поверхнями виникає контактна різниця потенціалів, яка дорівнює різниці робіт виходу електронів із цих металів.

Тому до отриманих експериментальних значень V_1 і V_2 необхідно додати цю величину $V_к$, щоб отримати справжні значення енергій електронів $W_1 = e(V_1 + V_к)$ і $W_2 = e(V_2 + V_к)$ при яких має місце рамзауерівський максимум і мінімум прозорості газу.

Таким чином, вивчення вольтамперної характеристики тиратрону з наповненим інертним газом дозволяє виявити основні особливості ефекту Рамзауера і знайти значення енергії W_1 і W_2, при яких ефективний переріз розсіювання електронів на атомах інертного газу проходить через максимум та мінімум.

Другий метод дослідження ефекту Рамзауера базується на осцилографування анодного струму при подачі на сітку $\boldsymbol{C}$ тиратрону напруги, що періо-

дично змінюється. В даній роботі використовується осцилограф для візуального спостереження ВАХ ефекту Рамзауера (рис.9). В нашому випадку всі виміри необхідно виконувати за допомогою стрілочних приладів вольтметра і мікроамперметра (рис.8).

Порядок проведення експерименту

1. Перед початком експерименту необхідно вивчити інструкцію на робочому місці, підготувати установку до увімкнення.

2. Увімкнути установку, дати їй прогрітися протягом 5 хв. і зробити, якщо це передбачено інструкцією на робочому місці, калібрування вольтметра $\boldsymbol{V}$ (рис.8). Точність показів цього вольтметра дуже важлива для подальших обчислень.

3. Подати напругу між катодом $\boldsymbol{K}$ і сіткою $\boldsymbol{C}$ (рис.6) для прискорення електронів. Змінюючи цю напругу в інтервалі 0,…2,5 В, виміряти за допомогою мікроамперметра **мкА** (рис.8) відповідні значення анодного струму I_a у відносних одиницях (поділках шкали мікроамперметра). Покази вольтметра у Вольтах, а покази амперметра у відносних одиницях занести до таблиці 1 результатів експерименту.

Таблиця 1

№ п/п	V, В	I_a, відн.од.	№ п/п	V, В	I_a, відн.од.
1			13		
2			14		
3			15		
4			16		
5			17		
6			18		
7			19		
8			20		
9			21		
10			22		
11			23		
12			24		

Вказівка. Для точнішого визначення резонансної напруги V_1 в області максимуму струму I_a ВАХ, напругу прискорення V бажано змінювати з кроком $\Delta V = 0{,}05$ В. На інших ділянках ВАХ вимірювання виконувати з кроком $\Delta V = 0{,}1$ В.

Обробка результатів експерименту

1. За результатами вимірювання напруги прискорення V і відповідного анодного струму I_a побудувати графік ВАХ тиратрона, подібну як на рис.7 (лінія 2).

2. З графіка ВАХ з максимально можливою точністю визначити прискорюючі напруги V_1 (для максимума струму) і V_2 для мінімуму струму. Додати до цих значень напруги контактну різницю потенціалів $V_к$ (*задається на робочому місці*) і за формулами

$$W_1 = e(V_1 + V_к) \qquad (17)$$

і

$$W_2 = e(V_2 + V_к) \qquad (18)$$

розрахувати енергії при яких має місце рамзауерівський максимум і мінімум прозорості газу. *Для нашої експериментальної установки контактна різниця потенціалів* $V_к \approx 01$ В.

3. За формулою (15)

$$d = \frac{h\sqrt{5}}{4\sqrt{2m_e(W_2 - W_1)}}$$

оцінити розміри атома інертного газу, а за формулою (16)

$$U_0 = \frac{4}{5}W_2 - \frac{9}{5}W_1$$

оцінити глибину потенційної ями атома, або, іншими словами, ефективну потенційну енергію U_0 взаємодії електрона з атомом інертного газу.

Важливе зауваження. На деяких експериментальних установках не вдається досягнути чітко вираженого мінімуму, щоб визначити енергію W_2.

Таблиця 2.

Атомний. номер елемента	Елемент	Радіус атома, нм
2	Гелій	0,122
10	Неон	0,160
18	Аргон	0,192
36	Криптон	0,198
54	Ксенон	0,218
86	Радон	0,214

Для такої установки визначається тільки максимум анодного струму I_a, а значить можна визначити резонансну напругу V_1 і відповідно енергію W_1. В цьому випадку скористаємось літературними даними про розміри атомів інертних газів, які приведені в таблиці 2.

Приймемо для ксенону діаметр атома $d = 2r \approx 2 \cdot 0{,}22$нм = 0,44 нм = 4,4 Å.

Тоді із формули (11) можемо отримати вираз для глибини потенційної ями, або, іншими словами, ефективну потенційну енергію U_0 взаємодії електрона з атомом інертного газу, а саме:

$$U_0 = \frac{h^2}{8m_e d^2} - W_1. \quad (19)$$

4. Зробити висновки по роботі.

Контрольні питання

1. Яка фізична сутність ефекту Рамзауера?

2. Який хід графіка залежності ефективного перерізу розсіювання електронів у інертному газі від їхньої енергії? Який хід графіка передбачає класична фізика?

3. Поясніть різницю між пружним та непружним розсіюванням частинок.

4. Охарактеризуйте «класичний» механізм розсіювання електрона на атомі та поясніть, як і чому має залежати ймовірність розсіювання від швидкості електрона в рамках цього механізму? Яка ця залежність насправді?

5. У чому принципова відмінність квантового способу опису розсіювання електронів на атомах від класичного?

6. Якою є основна ідея квантового опису розсіювання електронів на атомах?

7. Чому електрони притягуються до нейтральних атомів?

8. Поясніть походження сили, що діє з боку атома на електрон, що пролітає.

9. Поясніть, чому взаємодію електрона з атомом моделює

потенційна яма, а не потенційний горб.

10. Яким співвідношенням визначається довжина хвилі де Бройля?

11. Як вводиться показник заломлення хвиль де Бройля?

12. Які умови для мінімуму та максимуму розсіювання електронів газом випливають із моделі прямокутної потенційної ями?

13. При яких значеннях кінетичної енергії електронів, що налітають на атом, спостерігатиметься гасіння хвиль де Бройля, які пройшли через нього?

14. Пояснення ефекту Рамзауера на моделі одновимірної потенційної ями. Яка умова відсутності пружного розсіювання електронів?

15. Вивести співвідношення між глибиною потенційної ями та двома характерними енергіями електронів W_1 та W_2.

16. Яке явище є оптичним аналогом ефекту Рамзауера?

17. Поясніть зміну потенційної енергії електрона під час прольоту через атом.

18. Який вид мають рішення рівняння Шредінгера за потенційною ямою, всередині ями та перед нею в задачі про одновимірне розсіювання?

19. Що таке тиратрон, як він улаштований і де застосовується?

20. Пояснити особливості вольт-амперної характеристики тиратрону, пов'язані з ефектом Рамзауера.

21. Пояснити сутність методу дослідження ефекту Рамзауера з використанням тиратрону.

22. Які особливості конструкції тиратрону призводять до того, що пружне розсіювання електронів суттєво впливає на величину анодного струму?

23. Як пояснити наявність на вольт-амперній характеристиці

лише одного максимуму струму, що протікає через тиратрон?

25. Чому показання вольтметра не дають справжнього значення напруги, яка прискорює електрони? Як її визначити?

26. Як за експериментальною ВАХ визначити енергію електронів, при якій проявляється ефект Рамзауера?

27. Як і чому іонізація атомів впливає на хід вольтамперної характеристики тиратрона.

28. У яких фізичних процесах та явищах, та технічних додатках проявляється ефект Рамзауера?

ЛІТЕРАТУРА

1.Кучерук І.М., Горбачук І.І. Загальний курс фізики. Оптика. Квантова фізика.Том 3, §12.6. - К: Техніка, 1999 р.

2. Бригінець В. П., Гусєва О. О., Лінчевський І. В., Якуніна .Н. О. Загальна фізика. Квантова фізика : Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів денної форми навчання факультету інформатики та обчислювальної техніки. - К.: НТУУ "КПІ", 2009.- 60 с.

ЗАТВЕРДЖЕНО
на засіданні кафедри загальної фізики
Протокол № 11 від 13.12 2022р.
Протокол до даної лабораторної роботи підготовив доцент І.Ф.Скіцько