

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Н.М.БРУКВА, І.Ф.СКІЦЬКО

ФІЗИКА

**Дискретність енергії атома.  
Дослід Франка і Герца**

Навчальний посібник

*Рекомендовано Методичною радою  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, як навчальний посібник для здобувачів  
ступеня бакалавра, які навчаються за освітньою програмою «Без-  
пека державних інформаційних ресурсів, спеціальні телекомуніка-  
ційні системи» спеціальності 125 «Кібербезпека», 172 «Телекому-  
нікації та радіотехніка»*

Електронне мережеве навчальне видання

Київ  
КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО  
2023

УДК 539.1  
В19

Автори: Бруква Наталія Миколаївна, старший викладач.  
Скіцько Іван Федорович, канд.фіз.-мат. наук, доцент.

Рецензент Савченко Д.В., в.о. зав. кафедри ЗФ та моделювання фізичних процесів КПІ ім. Ігоря Сікорського, д-р фіз.-мат. наук, доц.

Відповідальний редактор Лінчевський І.В., професор кафедри загальної фізики КПІ ім. Ігоря Сікорського, д-р фіз.-мат. наук, проф.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 2 від 26.10.2023 р.)  
за поданням вченої ради фізико-математичного факультету  
(протокол № 9 від 20.09.2023 р.)*

Скіцько І.Ф.

В19

Фізика: Дискретність енергії атома. Дослід Франка і Герца. Інструкція до лабораторної роботи [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Безпека державних інформаційних ресурсів, спеціальні телекомунікаційні системи» спеціальності 125 «Кібербезпека», 172 «Телекомунікації та радіотехніка». / Н.М.Бруква, І.Ф.Скіцько; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 29 с.

Посібник забезпечує проведення лабораторної роботи: "Дискретність енергії атома. Дослід Франка і Герца" за програмою навчальної дисципліни "Фізика". Детально розглядається теорія лабораторної роботи, методика проведення дослідження і обробки результатів вимірювань.

Призначений для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 125 "Кібербезпека", 172 "Телекомунікації та радіотехніка". Буде корисним і для студентів інших технічних спеціальностей вищих навчальних закладів.

УДК 539-1

Реєстр. № НП **XX/XX-XXX**. Обсяг 1,82 авт. арк.

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, <https://kpi.ua>.

Свідцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© Н.М.Бруква, І.Ф.Скіцько, 2023  
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023

## **Дискретність енергії атома.**

### **Дослід Франка і Герца**

#### **Мета роботи:**

1. Вивчення будови атомів.
2. Ознайомлення з дослідом Франка і Герца.
3. Визначити резонансний потенціал та енергію збудження атому гелію
4. Визначити енергією однократної іонізації атому гелію.
5. Порівняти отримані результати обробки експериментальних даних із теоретичними даними.
6. Записати кінцевий результат отриманих величин та зробити висновки по роботі.

#### **Теорія**

### **Постулати Бора**

Планетарна модель атома не узгоджувалася із законами класичної електродинаміки. Рух електрона по замкнутих орбітах навколо ядра є прискореним. За законами класичної електродинаміки пришвидшений рух заряду завжди супроводжується ви-

промінюванням електромагнітних хвиль. Електромагнітні хвилі переносять енергію, тому електрон, втрачаючи енергію на випромінювання, має впасти на ядро. Ніхто не міг спростувати цей важливий наслідок законів електродинаміки. Проте існування стабільних атомів також є незаперечним фактом. Данський фізик Нільс Бор перший дійшов висновку, що протиріччя моделі Резерфорда з класичною електродинамікою можна усунути лише тоді, коли відмовитися від класичного (ньютонівського) опису руху електрона по замкнутих орбітах у планетарній моделі атома.

На початку лютого 1913р. суто випадково Н.Бор зустрів студентського приятеля Ханса Хансена, який розказав йому про спектральні формули Бальмера, Рідберга, Рітца. Н.Бор зга-

дував: «Як тільки я побачив формулу Бальмера, мені все одразу ж стало ясно» Прийнявши гіпотезу Планка про кванти енергії, формулу (17.11) помножимо на сталу планка  $\hbar$ . Тоді вона переписується так:

$$\hbar\omega_{nk} = \frac{\hbar R\omega}{n^2} - \frac{\hbar R\omega}{k^2},$$

або

$$\hbar\omega_{nk} = |W_n| - |W_k|, \quad (1)$$

де  $\hbar\omega_{nk}$  – квант енергії випромінювання дорівнює різниці двох значень енергії атома водню ( $W_k$  – енергія до випромінювання,  $W_n$  – енергія після випромінювання).

Для усунення протиріччя планетарної моделі атома із законами класичної електродинаміки Нільс Бор припустив, що, рухаючись по орбіті, електрон не випромінює електромагнітні хвилі, а залишається на орбіті

достатньо тривалий час. Упродовж 1913 року Н.Бор опублікував три праці, в яких він сформулював свої знамениті постулати.

З цього приводу американський фізик (один із творців теорії надпровідності) Леон Купер сказав: «Звичайно, було дещо самонадіяно висувати припущення, які протирічили електродинаміці Максвелла і механіці Ньютона, але Бор був молодим».

**ПОСТУЛАТ 1** (Про стаціонарні стани).

*Атоми можуть перебувати тільки у визначених станах, в яких, попри рухи електронів по замкнених дискретних орбітах, вони не випромінюють енергію. У цих станах атоми мають енергію, яка утворює дискретний ряд:  $W_1, W_2, \dots, W_n, \dots$ . Ці стани характеризуються стійкістю: будь-яка зміна енер-*

гії  $W_n$  завдяки випромінюванню чи поглинанню електромагнітного випромінювання або інших форм обміну атома енергією може відбуватися у разі повного переходу із одного стану в інший.

За цим постулатом електрони під час руху навколо ядра майже весь час перебувають на стабільних, незалежних від часу орбітах, які мають цілком визначену енергію. Такі орбіти називають *стаціонарними*.

$$mv_n r_n = \hbar n$$

Далі, для пояснення спектральних закономірностей, зумовлених процесами поглинання і випромінювання електромагнітних хвиль пропонується такий постулат.

**ПОСТУЛАТ 2** (Правило частот).

*У разі переходу з одного стаціонарного стану в інший*

*атоми випромінюють чи поглинають електромагнітні хвилі визначеної частоти. Випромінювання, що висилається або поглинається у разі переходу із стаціонарного стану  $W_k$  у стаціонарний стан  $W_n$ , є монохроматичним і його частота визначається співвідношенням:*

$$\omega_{nk} = \frac{|W_n| - |W_k|}{\hbar}. \quad (2)$$

Теорія Бора, побудована на сформульованих постулатах, блискуче пояснила структуру спектральних ліній атома водню. Власне, Н. Бор і брав за основу ці експериментальні дані під час формулювання своїх постулатів. Тому відразу постало питання про безпосередні, незалежні підтвердження постулатів Бора, про наявність стаціонарних станів та правил переходу між ними.

### **Класичний дослід Франка і Герца**

Дослід Франка і Герца, проведений у 1913р, став яскравим експериментальним підтвердженням постулатів Бора про

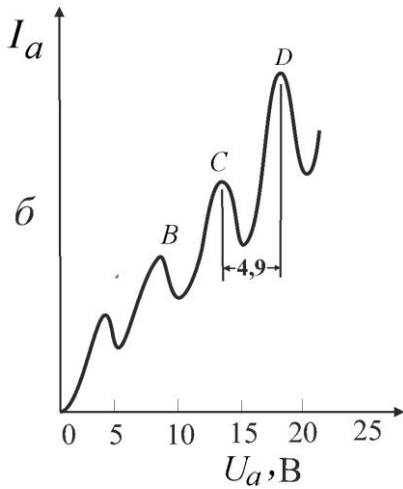
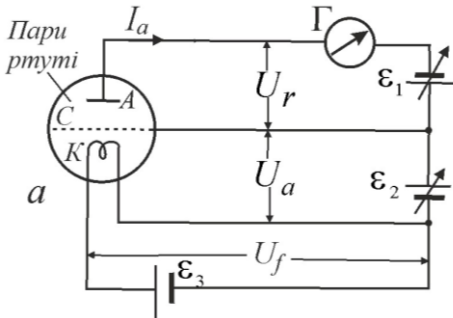


Рис.1. а) електрична схема установки, б) вольт-амперна характеристика досліджень Франка і Герца.

існування стаціонарних енергетичних станів атомів та випускання або поглинання атомом

кванта випромінювання при переході з одного стаціонарного стану в інший.

Установка, яку вони використовували схематично показана на рис.1,а. В трубці із гарячим катодом  $K$ , живлення якого здійснюється від батареї  $\epsilon_3$ , із сіткою  $C$  і анодом  $A$  знаходяться пари ртуті при низькому тиску при температурі біля  $150^\circ\text{C}$ . Між катодом і сіткою прикладена прискорююча різниця потенціалів  $U_a$ , яку можна змінювати від 0 до 60В. Між анодом і сіткою створюється невелике гальмівне поле з різницею потенціалів  $U_r$  ( $\approx 0,5\text{В}$ ).

Дуже чутливий гальванометр  $\Gamma$ , який включений, послідовно в коло анода, вимірює анодний струм ( $\approx 10^{-9}\text{А}$ ). Характерна крива залежності анодного струму  $I_a$  від прискорюючого потенціалу  $U_a$  приведена на

рис.1,б. Виявилось, що із збільшенням  $U_a$ , як і в будь-якій електронній лампі, анодний струм зростає, однак цей ріст не є монотонним, а супроводжується різкими спадами струму кожний раз, коли  $U_a$  збільшується приблизно на 5В.

Не монотонність кривої є результатом взаємодії електрона з атомами ртуті. Маса атома ртуті майже в 400000 разів перевищує масу електрона. Така різниця в масі повинна би забезпечити монотонну ВАХ експерименту, як результат пружних зіткнень електронів і атомів ртуті. Проте ВАХ на рис.1,б показує, що це не так. Внутрішня енергія атома ртуті змінюється стрибком, а електрон після зіткнення втрачає свою кінетичну енергію.

Тому ідея досліду полягає у вимірюванні кількості енергії,

яка передається атому під час його співударів з електронами, Якщо атоми мають дискретні значення енергії, то удари між електронами і атомами можуть бути як пружні, так і непружні. Удар називають пружним, якщо електрон не передає атому енергію, а лише змінює напрям своєї швидкості. Непружним називають удар, в результаті якого за рахунок енергії електрона змінюється внутрішній стан атома, тобто електрон при зіткненні з атомом передає атому ту енергію, яка потрібна для переведення його в збуджений стан. У досліді джерелом електронів є катод (К), а досліджуваною речовиною пари ртуті при тиску 0,1 мм рт. ст. (рис. 1).

Поки енергія бомбуючого електрона не перевищує 4,9eВ, його зіткнення з атомами ртуті є пружними (електрон розсіюється-

ся на атомах без зміни енергії, змінюючи лише свою траєкторію). Такий електрон не здатний збудити атом ртуті (немає резонансної взаємодії). Ситуація докорінно змінюється після досягнення електроном енергії 4,9 еВ.

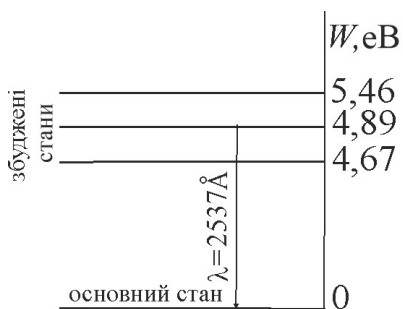


Рис.2. Діаграма енергетичних рівнів атома ртуті.

Тепер електрон може збудити атом ртуті, передавши йому частину своєї кінетичної енергії.

Таке зіткнення електрона з атомом ртуті є непружним. Непружне зіткнення електрона з атомом ртуті можна порівняти із вимушеними коливаннями в режимі резонансу. При резонансі має місце максимальна передачі

енергії від вимушуючої сили коливальному контуру.

Внутрішня енергія атома ртуті збільшується стрибком, а електрон після зіткнення втрачає майже всю свою кінетичну енергію. В результаті таких зіткнень енергія електронів наскільки зменшується, що електрони не можуть подолати слабе затримуюче поле, яке створюється різницею потенціалів  $U_r$ , і не досягають анода. Анодний струм при цьому різко зменшується. Якщо прискорюючий потенціал  $U_a$  збільшити ще на 5В, то електрони можуть зазнати ще одне непружне зіткнення і втратити при цьому повністю свою енергію. Це пояснює другий спад (спостерігається на кривій струму при  $U_a=10В$ ), який буде більш різким, ніж перший спад, так як відповідає електронам, які зазнали два непружних зіткнен-

ня. Третій спад струму  $I_a$  відповідає електронам, які зазнають три непружних зіткнення і т.д.

Дослід Франка і Герца підтверджує і другий постулат Бора – правило частот. Кожний раз, коли відбувається непружне зіткнення, атом ртуті переходить у збуджений стан і потім, повертаючись в основний стан, випромінює фотон з довжиною хвилі  $\lambda = 2537 \text{ \AA} = 0,2537 \text{ мкм}$ , що відповідає переходам атомів ртуті із першого збудженого стану в основний стан (рис.2). Енергія такого фотона дорівнює  $\varepsilon = hc/\lambda = 4,89 \text{ еВ}$ .

Цей результат, а також той факт, що відстань між двома сусідніми спадами струму  $I_a$  дорівнює приблизно 4,9В, переконливо доводить існування дискретних енергетичних рівнів в атомі ртуті. Удосконалена методика експерименту дозволила

визначити також енергії збудження для інших енергетичних рівнів. І не дивно, що за ці чудові досліди Дж. Франк і Г. Герц в 1925р. отримали Нобелівську премію з фізики.

Покажемо, слідом за Бором, до яких наслідків призведуть сформульовані постулати для атома водню. Рівняння Ньютона  $\frac{m_e v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$  для руху електрона в атомі водню допускає безмежну кількість замкнутих колових орбіт. Постає питання про існування стаціонарних орбіт серед безмежної кількості можливих. Перший постулат Н. Бора стверджує, що стаціонарні орбіти існують. Тоді відразу таке запитання: «А як стаціонарні орбіти вирізнити з-поміж безмежної кількості всіх можливих, що задовольняють співвідношенню  $\frac{m_e v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ ?». Осць

тут Н. Бор зрозумів, а можливо і вгадав, як відповісти на це запитання. І ця відповідь була простою, тому і геніальною.

Уже від 1905 року в науці утвердилися і завоювали визнання квантові ідеї, про що йшлося у попередньому розділі. Нагадаємо, що стала Планка  $h$  має розмірність дії і на початку названа Планком квантом дії. Але ж поняття дії у класичній механіці відоме ще з часів Гамільтона і Лагранжа. Розмірність дії має орбітальний момент імпульсу  $\vec{L} = \vec{r} \times m\vec{v}$ .

$\vec{L}$  ще називають моментом кількості руху. Він перпендикулярний як радіусу-вектору  $\vec{r}$  так і вектору кількості руху  $m\vec{v}$ . Величина орбітального моменту імпульсу для колового руху електрона навколо силового центру (ядра) є  $L = m_e r v$ .

Бор відчував, що є глибинний зв'язок між двома "мінімальностями" в природі:

— існуванням найменшої величини для розмірів "електронного рою" в атомі. Меншою ця величина бути не може;

— існуванням найменшої величини для фізичної дії, менше якої не буває.

Весною 1912р. Бор дійшов висновку, що будова "електронного рою" в резерфордському атомі управляється квантом дії — сталою Планка " $\hbar$ ".

Отже, коли фізична величина має розмірність дії, то найменше числове значення, яке вона може набувати дорівнює сталій Планка, а більші значення — кратні сталій Планка. Після тривалих міркувань і розрахунків Н.Бор дійшов висновку, що стаціонарні можуть бути лише ті колові орбіти, для яких орбіта-

льний момент імпульсу кратний  $\hbar$ :

$$m_e r v = n \hbar. \quad (3)$$

Ціле число  $n$  називається квантовим числом ( $n \neq 0$ ).

### Дослід Франка і Герца в даній лабораторній роботі

В даній лабораторній роботі на відміну від класичних дослідів Франка і Герца використовується газ гелію, як сповільнювач руху електронів. На рис.3 показано спрощену енергетичну діаграму атома гелію. У незбудженому стані атома обидва його електрони знаходяться на найнижчому енергетичному рівні  $W_1$ , енергія якого прийнята за початок відліку енергії. Тому  $W_1 = 0$ .

Стрілками показані переходи електронів на збуджений рівень  $W_2$  та в найнижчий енергетичний стан, який відповідає

іонізації атома,  $W_i$  – енергія іонізації, тобто, мінімальна енергія, необхідна для відриву від ядра одного електрона.

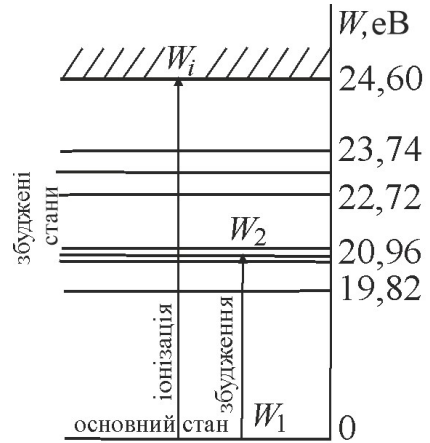


Рис.3. Спрощена схема енергетичних рівнів в атомі гелію.

Емітовані катодом електрони рухаються в прискорюючому полі лампи і стикаються на своєму шляху з атомами гелію. При цьому є дві можливості:

1. Якщо кінетична енергія електронів  $W_k = eU$ , набута ними у електричному полі, різниця потенціалів якого  $U$ , недостатня для переведення атомів у збу-

джений стан ( $W_k < W_2 - W_1$ ), то зіткнення електронів з атомами відбуваються пружно. Немає резонансної взаємодії електрона і атома гелію. При цьому електрони майже не втрачають швидкості й лише змінюють напрям руху, оскільки їх маса набагато (приблизно в  $10^4$  разів) менша за масу атомів гелію.

2. Друга можливість реалізується, коли електрони отримують від поля енергію, достатню для переведення атомів у збуджений або іонізований стан. У такій ситуації при зіткненнях внутрішня енергія атомів збільшується за рахунок кінетичної енергії електронів і зіткнення стають непружними. Очевидно, що такі зіткнення можливі тільки за умови, коли  $W_k = eU > W_2 - W_1$ . Найменша різниця

потенціалів  $U$ , при якій стають можливими непружні зіткнення електронів із атомами гелію, називаються резонансним потенціалом. Резонансна різниця потенціалів визначається умовою:

$$U_{\text{рез}} = \frac{W_2 - W_1}{e} \quad (4)$$

Таким чином, при різниці потенціалів  $U > U_{\text{рез}}$  кінетична енергія частини електронів суттєво зменшується внаслідок непружних зіткнень з атомами гелію.

Як і класичному досліді Франка – Герца такі сповільнені електрони можна затримати й не пропустити на анод електронної лампи, створивши біля анода гальмівне електричне поле. В такому разі поява непружних зіткнень призведе до помітного зменшення величини струму в

лампи, що можна зареєструвати, вимірюючи вольт-амперну характеристику лампи, тобто, – залежність анодного струму від напруги. В даній роботі визначається енергія переходу тільки в перший збуджений стан («резонансний потенціал») і енергія однократної іонізації («перший іонізаційний потенціал») атома гелію, оскільки визначення енергій переходу в більш високі збуджені стани пов'язане з істотним ускладненням експерименту.

### Опис лабораторної установки

Найпростіша принципова електрична схема установки для проведення досліду Франка – Герца показана на рис.4, а сама лабораторна установка на рис.5.

Основним елементом схеми є тиратрон – чотирьохелектродна лампа (3) на рис.4 і 5,

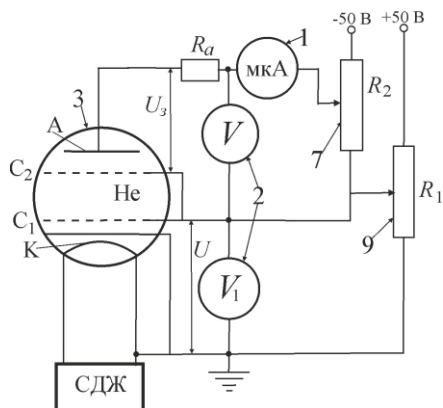


Рис.4. Електрична схема лабораторної установки.



Рис.5. Лабораторна установка. 1 – мікроамперметр; 2 - вольтметр; 3 – електронна лампа; 4 – осциллограф; 5 – вимикач; 6 – вибір режиму роботи; 7 - регулятор запірної напруги  $U_3$ ; 8 - перемикач вольтметра; 9 - регулятор напруги прискорення електронів  $U$ .

заповнена досліджуваним газом (гелієм) при малому тиску. Електроди тиратрона мають осьову симетрію: катодом слугує нитка

розжарення, а сітки та анод мають форму коаксіальних циліндрів. Нитка розжарення живиться від стабілізованого джерела живлення – СДЖ. Електрони, випущені катодом  $K$ , потрапляють у прискорююче електричне поле між першою сіткою  $C_1$  і катодом. Величина прискорюючої напруги  $U$  регулюється потенціометром  $R_1$  (регулятор напруги 9 на рис.5) і вимірюється вольтметром  $V_1$ . Тиск газу в лампі підбирається таким, аби довжина вільного пробігу електронів була набагато більшою, ніж відстань від катода до сітки  $C_1$ . За такої умови більша частина електронів проходить прискорююче поле без зіткнень з атомами гелію і влітає в простір між сітками  $C_1$  і  $C_2$  з кінетичною енергією  $W_k = eU$ . У просторі між сітками,

де електричного поля немає, відбувається зіткнення електронів з атомами. На другу сітку  $C_2$ , яка розміщена в безпосередній близькості від анода, подається потенціал, який на невелику величину  $U_3$  нижчий за потенціал анода  $A$ . Тим самим у зазорі між цією сіткою та анодом для електронів створюється невелике гальмівне (затримуюче) електричне поле. Затримуюча напруга  $U_3$  регулюється потенціометром  $R_2$  (7 - регулятор запірної напруги  $U_3$  на рис.5) і вимірюється вольтметром  $V_1$ , який позначений цифрою 2 на (рис.4 і 5). Анодний струм вимірюється мікроамперметром мкА, який позначений цифрою (1) на рис.4 і 5.

### Вольт-ампера характеристика (ВАХ) тиратрона

Проаналізуємо вигляд залежності анодного струму  $I$  від прискорюючої напруги  $U$  при постійній затримуючій напрузі  $U_3$ . Така залежність називається вольт-амперною характеристикою (ВАХ). Реальний вигляд ВАХ тиратрона показано на рис.6, а схематично цю ВАХ показано на рис.7. При зміні прискорюючої напруги  $U$  від 0 до величини  $U_{\text{рез}}$ , яка визначається виразом (4), кінетична енергія електронів, із якою вони потрапляють в область між сітками, лишається недостатньою для збудження атомів. Через це зіткнення електронів з атомами, як відзначалося раніше, є пружними. При цьому змінюється тільки напрямок руху електронів, але не їхня кінетична енер-

гія. Тому, з огляду на циліндричну форму анода, практично всі електрони, що проходять крізь

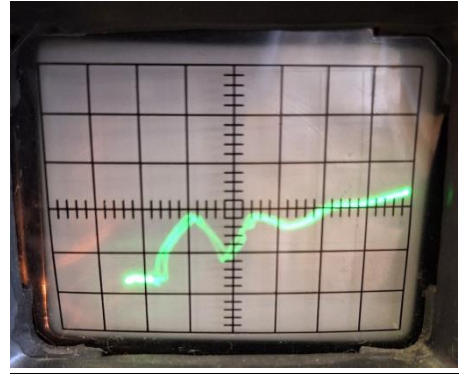


Рис.6. Осцилограма ВАХ тиратрона, наповненого гелієм.

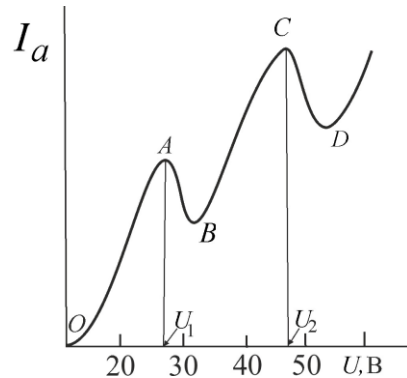


Рис.7. Графік ВАХ тиратрона, наповненого гелієм.

сітку  $C_1$ , потрапляють на анод. Отже, пружні зіткнення електронів із атомами не впливають

на анодний струм, і ВАХ має типовий для електронних ламп вигляд – із збільшенням напруги  $U$  струм зростає (ділянка  $OA$  на ВАХ). Але коли напруга  $U$  стане дорівнювати чи трохи більшою, ніж  $U_{\text{рез}}$ , значна частина електронів почне стикатися з атомами гелію непружно, віддаючи їм майже всю кінетичну енергію. Відтак ці електрони виявляються нездатними подолати затримуюче поле між сіткою  $C_2$  й анодом і не потрапляють на анод. Через це анодний струм різко зменшується, й на ВАХ з'являється провал (ділянка  $AB$  на рис.7). Але при подальшому збільшенні напруги  $U$  енергія, що залишається в електронів після зіткнення з атомами гелію, теж збільшується і знову стає достатньою для подолання

затримуючого поля. Тому струм знову зростає, аж доки прискорююча напруга не досягне величини  $U \geq 2U_{\text{рез}}$  (ділянка  $BC$  на рис.7). При такій напрузі електрони отримують енергію, достатню для того, щоб на шляху до анода збудити два атоми гелію. Відтак на ВАХ з'являється другий провал (ділянка  $CD$  на рис.7)

Описану ВАХ тиратрона (рис.7) можна візуально спостерігати за допомогою електронного осцилографа (рис.6). Для цього на прискорюючу сітку  $C_1$  подається змінна напруга

$$U = U_0 \sin \omega t \quad (5)$$

і така ж напруга подається на вхід  $X$  осцилографа. В такому разі в кожен момент часу зміщення електронного променя на екрані вздовж осі  $X$  є прямо пропорційним поданій напрузі:

$Y(t) \sim U(t)$ . З іншого боку, напруга на резисторі  $R_a$  в анодному колі тиратрона (рис.4) є прямо пропорційною до струму:  $U_a = I(t)R_a$ . Якщо цю напругу подати на вхід  $Y$  осцилографа, то зсув променя на екрані вздовж осі  $Y$  буде прямо пропорційним силі струму в тиратроні:  $Y(t) \sim I(t)$ . Тому при одночасному подаванні вказаних напруг на обидва входи осцилографа електронний промінь буде рухатися по траєкторії, форма якої співпадає з кривою  $I(U)$ , тобто, – з вольт-амперною характеристикою. Оскільки напруга  $U$  (вираз (5)) періодично змінюється з промисловою частотою  $\nu = \omega / (2\pi) = 50$  Гц, траєкторія променя буде точно відтворюватися 50 разів за секунду, й на екрані осцилографа буде спосте-

рігатися стійке зображення ВАХ (рис.6). Параметри кривої на екрані залежать не лише від напруги та струму в тиратроні, а й від параметрів схеми осцилографа, тому в даній роботі осцилограф використовується тільки для спостереження ВАХ. Кількісні параметри ВАХ визначаються за допомогою включених у схему вимірювальних приладів (див. рис.4 і 5).

Визначення резонансного потенціалу. Резонансному потенціалові (формула 4) на ВАХ повинна би відповідати напруга, при якій починається спад струму, тобто  $U_1 = U_{\text{рез}}$ , відповідно,  $U_2 = 2U_{\text{рез}}$ . Напруги  $U_1$ ,  $U_2$  в роботі вимірюються вольтметром  $V_1$  (рис.7) і це повинна бути різниця потенціалів між катодом  $K$  і сіткою  $C_1$  (рис.4).

Але у зв'язку з цим необхідно зауважити наступне. Між катодом і сіткою  $C_1$  існує так звана контактна різниця потенціалів, тому покази вольтметра  $V_1$  відрізняються від різниці потенціалів між катодом і сіткою  $C_1$   $U_{1KC_1}$ , яку проходять електрони, на невідому величину  $U_{\text{конт}}$ . Так, що

$$U_{\text{вольтметра } V_1} = U_{1KC_1} + U_{\text{конт}}, \quad (6)$$

де  $U_{\text{вольтметра } V_1} = U_1$ , а

$U_{\text{вольтметра } V_2} = U_{2KC_1} + U_{\text{конт}}$ , де

$$U_{\text{вольтметра } V_2} = U_2.$$

Але цю похибку легко виключити, знайшовши різницю показів вольтметра, що відповідають точкам  $A$  і  $C$  на ВАХ (рис. 7)

$$\begin{aligned} U_C - U_A &= U_2 - U_1 = \\ &= U_{\text{вольтметра } V_2} - U_{\text{вольтметра } V_1} = \\ &= U_{\text{рез}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Тепер можна визначити контактну різницю потенціалів, записавши, що

$$U_1 = U_{\text{рез}} + U_{\text{конт}}.$$

Звідки знаходимо:

$$U_{\text{конт}} = U_1 - U_{\text{рез}}, \quad (8)$$

або

$$U_{\text{конт}} = U_2 - 2U_{\text{рез}}. \quad (9)$$

### Про контактну різницю потенціалів [1]

Утворення контакту між двома твердими тілами неминуче викликає взаємний обмін рухомими носіями заряду. При однаковій температурі тіл в стаціонарному стані встановлюється термодинамічна рівновага. Встановлення рівноваги супроводжується переходом електронів, який здійснюється в результаті термоелектронної емісії або інших процесів в залежності від якості контакту і властивостей

тіл, які контактують. При достатньо малій відстані (порядку декількох  $\text{Å}$ ) між металами можливий обмін електронами внаслідок термоелектронної емісії. Якщо роботи виходу електронів у металів різні, то один із них набуде надлишкового електронного заряду. Зменшення його потенціалу викликає появу в зазорі електричного поля, яке перешкоджає потоку електронів із першого металу в другий. Різниця потенціалів  $U_{\text{конт}}$ , яка виникає між металами в рівноважному стані, називається зовнішньою контактною.

Тобто між вільними кінцями провідників виникає зовнішня різниця потенціалів. Значення зовнішньої контактної різниці потенціалів дорівнює різниці робіт виходу електронів

із металів, віднесеної до заряду електрона.

Якщо електричне коло скласти з кількох провідників, то контактна різниця потенціалів між крайніми провідниками визначається тільки їх роботами виходу і не залежить від внутрішніх провідників кола (правило Вольта). *Контактна різниця потенціалів може досягати величини в декілька вольт.* Вона залежить від будови провідника та стану його поверхні. Тому величина контактної різниці потенціалів може бути змінена обробкою поверхні (покриттями, адсорбцією і т. п.), введенням домішок (у випадку напівпровідників) і сплавленням з іншими речовинами (у випадку металів).

Контактна різниця потенціалів відіграє важливу роль

у фізиці твердого тіла та її дода-тках. Вона помітно впливає на роботу електровакуумних приладів. В електронних лампах контактна різниця потенціалів між електродами складається з прикладеними зовнішніми напругами і впливає на вид вольт-амперних характеристик.

#### **Визначення першого іонізаційного потенціалу**

За досить значної енергії електрон при зіткненні з атомом може спричинити ударну іонізацію, при якій атом втрачає один свій електрон і перетворюється на однозарядний іон. Мінімальна необхідна для цього енергія  $W_{i1}$  називається *енергією однократної іонізації* або *першим іонізаційним потенціалом* атома. Вона залежить від природи атома (для гелію  $W_{i1} = 24,6$  еВ).

Очевидно, що для іонізації атомів у тиратроні емітовані катодом електрони повинні прискорюватися сіткою  $C_1$  до енергії  $eU \geq W_{i1}$ . Отже, іонізація спостерігається при різниці потенціалів між катодом і сіткою  $C_1$ , якщо  $U \geq W_{i1}/e$ , числове значення якої дорівнює величині  $W_{i1}$ , вираженій в електрон-вольтах.

Створені іони, потрапляючи на анод, дають внесок у вимірюваний анодний струм. Цей іонний струм можна зареєструвати і, відтак, експериментально визначити перший іонізаційний потенціал гелію. Для цього треба забезпечити дві умови: 1) виключити електронний струм, який створюється при великій прискорюючій напрузі, та 2) забезпечити легке

потрапляння іонів на анод, оскільки прискорююче для електронів поле між катодом і сіткою  $C_1$

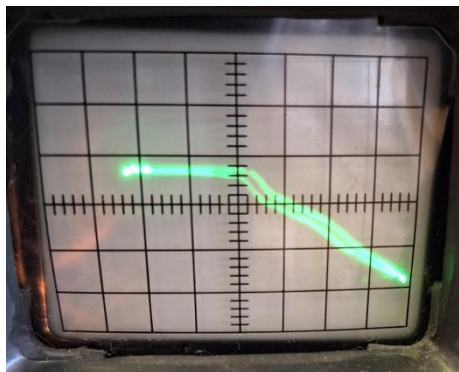


Рис.8. Осцилограма ВАХ в режимі іонізації атомів гелію.

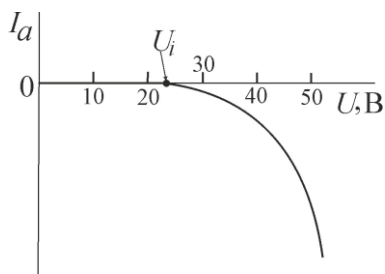


Рис.9. Графік ВАХ в режимі іонізації атомів гелію.

спрямовує іони не на анод, а на катод. Обидві умови легко виконуються, якщо при вимірюваннях ВАХ перейти в «режим іонізації», збільшивши затримуючу

напругу  $U_3$  до значення 35–40В, яка істотно перевищує значення  $U_i$ , при якій появляється струм (рис.9). При цьому між сітками й анодом створюється сильне прискорююче для іонів і гальмівне для електронів поле. В такому режимі анодний струм буде створюватися тільки іонами й залежатиме від прискорюючої напруги між катодом і сіткою  $C_1$ , як показано на осцилограмі рис.8 і схематично на рис.9. Тому, вимірявши напругу прискорення між катодом  $K$  і сіткою  $C_1$ , при якій з'являється цей іонний струм, можна визначити перший іонізаційний потенціал гелію.

Що для цього необхідно зробити? 1. Для вимірювання анодного струму в режимі іонізації треба змінити полярність

включення мікроамперметра (1) на рис.4.

2. При визначенні іонізаційного потенціалу  $U_i$  за показами вольтметра потрібно враховувати контактну різницю потенціалів, про яку говорилося вище.

#### **Порядок виконання роботи**

1. Відповідно до інструкції на робочому місці ввімкнути вимірювальний блок і осцилограф і дати їм прогрітися протягом 5 хв.

2. За допомогою перемикача (8) на рис.5 і потенціометра  $R_2$  установити затримуючу напругу (вольтметр  $V$  на рис.4)  $U_3 \cong 5 - 10\text{В}$  і спостерігати на екрані стійку вольт-амперну характеристику тиратрона.

3. За допомогою перемикача (8) на рис.5 переключити вольтметр (2) на рис.5 для вимірю-

вання напруги між катодом і сіткою  $C_1$  (вольтметр  $V_1$  на рис.4). Змінюючи потенціометром  $R_1$  прискорюючу напругу  $U$  між катодом і сіткою  $C_1$  у межах (10 – 50)В з кроком 1В, виміряти струм  $I_a$  у поділках шкали мікроамперметра (1) на рис.4 і 5 й занести значення  $U$  та  $I_a$  до табл. 1. Для підвищення точності визначення напруг  $U_{A1}$  і  $U_{C2}$ , в області максимумів ВАХ виміри потрібно проводити з найменш можливим кроком (0,2-0,5В).

4. Вимірювання іонізаційного потенціалу. За допомогою перемикача (8) на рис.5 і потенціометра  $R_2$  установити затримуючу напругу (вольтметр  $V$  на рис.4)  $U_3 \cong (35 - 40)\text{В}$  і змінити полярність включення мікроамперметра (1). За допомогою перемикача (8) на рис.5 переключо-

чити вольтметр (2) на рис.5 для вимірювання напруги між катодом і сіткою  $C_1$  (вольтметр  $V_1$  на рис.4). Змінюючи потенціометром  $R_1$  прискорюючу напругу  $U$  між катодом і сіткою  $C_1$  у межах (10 – 50)В з кроком 1В, дослідити вольт-амперну характеристику тиратрона в режимі іонізації атомів гелію, тобто виміряти струм  $I_a$  у поділках шкали мікроамперметра (1) на рис.4 і 5. Особливо ретельно потрібно визначати прискорюючу напругу  $U$  в момент появи анодного струму. Для цього спочатку грубо визначають напругу  $U_i$  (рис.9), при якій з'являється струм, а потім цю область пройти з малим кроком. Результати вимірів занести до табл. 2.

#### **Обробка експериментальних даних**

1. За даними табл. 1 на міліметровій побудувати вольт-амперну характеристику тиратрона в режимі збудження атомів. Криву по експериментальних точках треба проводити акуратно, під лекало, враховуючи розкид точок через випадкові похибки вимірів.

2.3 побудованої ВАХ знайти значення  $U_1$ ,  $U_2$  (див. рис. 7) і за формулою (7) визначити  $U_{рез}$ . За отриманим значенням  $U_{рез}$  по формулі (4) визначити різницю енергії першого збудженого стану  $W_2$  та енергії  $W_1$  основного стану атома гелію (в еВ і Дж).

3. За результатами п.2 і формулами (8), або (9) визначити величину та знак контактної різниці потенціалів  $U_{конт}$  між катодом  $K$  і сіткою  $C_1$ .

4. За даними табл. 2 на міліметровій в прийнятному масштабі побудувати потрібну ділянку ВАХ тиратрона в режимі іонізації, та визначити за графіком з максимально можливою точністю напругу  $U_i$ , при якій з'являється іонний струм.

5. Визначити перший іонізаційний потенціал атома гелію за формулою:

$$U_{i1} = U_i - U_{\text{конт}} \quad (10)$$

6. Порівняти отримане значення  $U_{i1}$  з теоретичним (24,6 В) і оцінити відносну похибку знайденої в досліді величини першого іонізаційного потенціалу гелію.

#### Додаток 1. Приклад обробки даних.

1. По даним таблиці 1 будемо графік.

2. Із графіка визначимо напругу першого і другого максимуму струму:  $U_1 = 23\text{В}$ ,  $U_2 = 44\text{В}$ . Оскільки значення струму

Таблиця 1

$U, \text{В}$	$I, \text{под.}$	$U, \text{В}$	$I, \text{под.}$
2	0	26	22
4	0	28	16
6	0	30	9
8	0	32	10
10	2	34	12
12	10	36	16
14	14	38	22
16	18	40	27
18	21	42	32
20	24	44	34
22	26	46	26
24	27	48	21
26	22	50	17

для першого максимуму 26 і 27 поділок при напругах 22 і 24 близькі за значеннями, то можна зробити висновок, що максимум

при зміні напруги з кроком 2В може знаходитися при 23В, тому

**Режим збудження  $U_3 = 9В$ .**

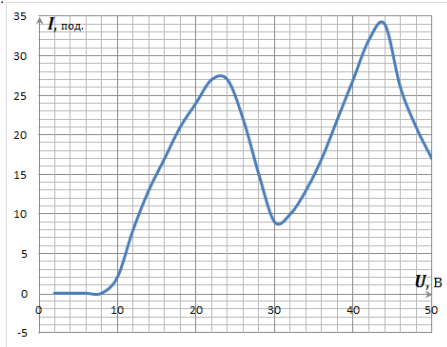


Рис.10. Експериментальна ВАХ тиратрона в режимі збудження.

логічно визначити перший максимум як  $U_1 = 23В$ . Тоді резонансний потенціал:

$$U_{рез} = U_2 - U_1 = 44 - 23 = 21В.$$

Використовуючи отримане значення резонансного потенціалу  $U_{рез} = 21В$ , знайдемо енергію переходу атома гелію в збуджений стан:

$$\begin{aligned} W &= eU_{рез} = 21eВ = \\ &= 21 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{Дж} = \\ &= 33,6 \cdot 10^{-19} \text{Дж}. \end{aligned}$$

Такий результат добре узгоджується із схемою енергетичних рівнів в атомі гелію (див. рис.3). Одне із значень енергії збудженого атома гелію характеризується енергією  $W_2 = 20,96eВ$ . Можна стверджувати, що більшість атомів гелію при непружному зіткненні з електронами переходили з основного стану на другий збуджений рівень.

3.Визначаємо контактну різницю потенціалів:

$$\begin{aligned} U_{конт} &= U_1 - U_{рез} = 23 - \\ &- 21 = 2В. \end{aligned}$$

**Режим іонізації  $U_3 = 30В$**

4. За даними табл. 2 будемо потрібну ділянку ВАХ тиратрона в режимі іонізації. Визначаємо напругу  $U_i$ , при якій з'являється іонний струм:  $U_i = 27В$ . При 26В струму ще немає,

а при 28В вже є, тому логічно припустити, що  $U_i = 27\text{В}$ .

Таблиця 2

$U, \text{В}$	$I, \text{под.}$
20	0
22	0
24	0
26	0
28	-1
30	-4
32	-8
34	-12
36	-14
38	-16
40	-18
42	-20
44	-22
46	-24
48	-26
50	-29

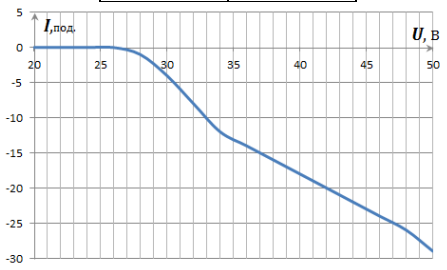


Рис.11.Експериментальна ВАХ тиратрона в режимі іонізації.

5. Визначаємо перший іонізаційний потенціал атома гелію:

$$U_{i1} = U_i - U_{\text{конт}} = 27 - 2 = 25\text{В}$$

Знайдемо енергією однократної іонізації:

$$\begin{aligned} W &= eU_{i1} = 25\text{еВ} = \\ &= 25 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{Дж} = \\ &= 40 \cdot 10^{-19} \text{Дж}. \end{aligned}$$

6. Отримане значення першого іонізаційного потенціалу  $U_{i1} = 25\text{В}$  відрізняється від теоретичного  $U_{i1\text{теор}} = 24,6\text{В}$  на  $\Delta U_i = 25 - 24,6 = 0,4\text{В}$ . Відносна невизначеність першого іонізаційного потенціалу:  $\delta_{U_i} = (2 \cdot 0,4 / 24,6) \cdot 100\% \approx 3\%$ , що вказує на добре проведений експеримент.

#### Аналіз отриманих результатів (висновки)

1. Отримали значення резонансного потенціалу  $U_{\text{рез}} = 21\text{В}$ , що мало відрізняється від зна-

чень, які приведені на схемі (рис.3).

2. Отримали значення першого іонізаційного потенціалу  $U_{i1} = 25\text{В}$  з відносною похибкою  $\delta_{U_i} \approx 3\%$ , що також добре узгоджується з прийнятим значенням  $24,6\text{В}$  (див.рис.3).

3. Слід зауважити, що наведені дані отримувались з кроком  $2\text{В}$  для прискорюючої напруги  $U$ , що призводить до збільшення похибки до  $\pm 1\text{В}$  для потенціалів і  $\pm 1\text{еВ}$  для енергій. Тому, для збільшення точності визначення резонансного та іонізаційного потенціалів, досліди слід проводити з найменшим можливим кроком ( $0,5\text{-}1,0\text{ В}$ ), а в області максимумів ВАХ (рис.7) виміри потрібно проводити з кроком, який дорівнює ціні поділки вольтметра.

### Контрольні питання

1. Які дослідні факти свідчать про неспроможність класичної фізики пояснити будову атома?

2. Які зіткнення частинок називаються абсолютно пружними, а які – непружними? Запишіть закон збереження енергії для абсолютно пружного й абсолютно непружного зіткнення двох тіл.

3. Коли в тиратроні відбуваються тільки пружні зіткнення електронів з атомами, а коли можливі й непружні зіткнення?

4. Зобразіть принципову електричну схему вимірювань вольт-амперної характеристики тиратрона в досліді Франка – Герца в ручному режимі. Поясніть функціональне призначення елементів схеми з огляду на ідею досліді Франка – Герца.

5. Обґрунтуйте те, що крива, яка спостерігається на екрані осцилографа, відображає ВАХ тиратрона  $I = I(U)$ .

6. Зобразіть і поясніть вигляд вольт-амперної характеристики тиратрона в режимі збудження атомів. Чому спостерігається другий провал на ВАХ?

7. Що таке резонансний потенціал атома? Як він визначається в даному досліді?

8. Як можна визначити резонансний потенціал атома, якщо за умовами експерименту можна спостерігати тільки один пік на вольт-амперній характеристиці? Яка при цьому допускається помилка?

9. Покажіть, як за результатами вимірів вольт-амперної характеристики можна визначити контактну різницю потенціалів між катодом і прискорюючою сіткою.

10. Що таке перший іонізаційний потенціал атома? При якій прискорюючій напрузі в тиратроні почнуть утворюватись іони?

11. Що потрібно зробити в установці, щоб перейти від режиму збудження атомів до режиму іонізації? Що в режимі іонізації показує анодний мікроамперметр? Чому?

12. Чому при переході в режим іонізації необхідно змінити полярність включення анодного мікроамперметра? Зобразіть і поясніть вольт-амперну характеристику тиратрона в режимі іонізації.

13. Яке значення дослідів Франка і Герца в розвитку вчення про будову атома?

$U, \text{В}$																			
$I_a, \text{под.}$																			

$U, \text{В}$																			
$I_a, \text{под.}$																			

### Література

1. Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Фізика (Фізика для інженерів): Підручник /: – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 513 с. – Назва з екрану. – Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19035>. §20.4, с.424-426.

2. Кучерук І.М., Горбачук І.І. Загальний курс фізики. Оптика. Квантова фізика. Том 3, §13.4. – К: Техніка, 1999р.

3. Загальна фізика. Квантова фізика: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів денної форми навчання факультету інформатики та обчислювальної техніки / Уклад.: В.П.Бригінець, О.О.Гусева, І.В.Лінчевський, Н.О.Якуніна. – К.: НТУУ "КПІ", 2009. – 60 с.

4. Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Обробка результатів фізичних вимірювань. Навч. посіб./ КПІ ім. Ігоря Сікорського/: – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 88 с. – Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/25320>.