

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

Н.М.БРУКВА, І.Ф.СКІЩЬКО

Вивчення законів зовнішнього фотоефекту

Навчальний посібник
(інструкція до лабораторної роботи)

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Безпека державних інформаційних ресурсів» за спеціальністю 125 «Кібербезпека та захист інформації», освітньою програмою «Спеціальні системи електронних комунікацій» за спеціальністю 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2025

УДК 535.1

С42

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

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

Відповідальний редактор: Лінчевський І. В. д.ф.-м. н., професор,
професор кафедри загальної фізики КПП ім. Ігоря Сікорського.

*Гриф надано Методичною радою КПП ім. Ігоря Сікорського (протокол
№ 5 від 06.03.2025 р.) за поданням вченої ради фізико-математичного
факультету (протокол №5 від 06.03.2025 р.)*

С 42 Скіцько І.Ф.

Фізика: «Вивчення законів зовнішнього фотоэффекту». Інструкція до лабораторної роботи [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Безпека державних інформаційних ресурсів» за спеціальністю 125 «Кібербезпека та захист інформації» та освітньою програмою «Спеціальні системи електронних комунікацій» за спеціальністю 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»./ І. Ф. Скіцько, Н. М. Бруква КПП ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 1119 КБ). – Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2025 . – 42 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/73268>

Посібник забезпечує проведення лабораторної роботи: «Вивчення законів зовнішнього фотоэффекту». за програмою навчальної дисципліни “Фізика”. Детально розглядається теорія лабораторної роботи, методика проведення дослідження і обробки результатів вимірювань.

Призначений для студентів-здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 125 «Кібербезпека та захист інформації» та спеціальністю 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» буде корисним і для студентів інших технічних спеціальностей закладів вищої освіти.

УДК 535.1

Реєстр. № НП 24/25-286. Обсяг 2,64 авт. арк.

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

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

© І.Ф.Скіцько, Н.М.Бруква, 2025

© КПП ім. Ігоря Сікорського, 2025

Вивчення законів зовнішнього фотоефекту

Мета роботи

1. Вивчити закони зовнішнього фотоефекту.

2. Перевірити виконання законів зовнішнього фотоефекту.

3. Визначити за допомогою експериментальних даних сталу Планка та її невизначеність.

4. Порівняти отримане значення сталої Планка із довідниковим значенням.

5. Зробити висновки по роботі.

Теоретичні відомості

Зовнішній фотоефект та його закони.

Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту

Фотоелектричним ефектом називаються електричні явища, які зумовлені поглинанням

світлового випромінювання в речовині.

Розрізняють:

1) *зовнішній фотоефект* — виривання електронів з речовини під дією світла у вакуум або в інше середовище. Практичне значення має фотоефект із твердого тіла у вакуум;

2) *внутрішній фотоефект*, при якому відбувається лише перерозподіл електронів за енергетичними станами в конденсованому середовищі внаслідок поглинання електромагнітного випромінювання. В напівпровідниках і діелектриках фотоефект проявляється в зміні електропровідності середовища та діелектричної проникності;

3) *фотогальванічний ефект*, при якому на границі поділу напівпровідника і металу або на границі поділу двох напівпровідників під впливом опромінювання виникає електрорушійна сила (за відсутності зовнішнього електричного поля);

4) *фотоефект в газоподібному середовищі*, який полягає у фотоіонізації окремих молекул або атомів.

Розглянемо закономірності зовнішнього фотоефекту. Фотоефект відкрив у 1887 р. Г.Герц, який виявив, що при освітленні негативного електрода іскрового розрядника ультрафіолетовими променями розряд відбувається при меншій напрузі між електродами, ніж без такого освітлення.

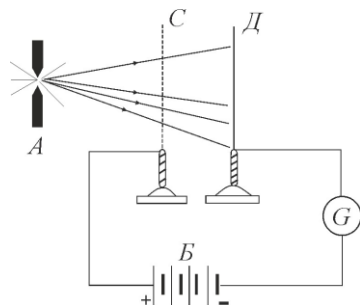


Рис.1.

Перші фундаментальні дослідження фотоефекту виконанні в 1888 – 1889р. О.Г. Столетовим за допомогою установки, що показана на рис.1.

Конденсатор, який утворений дріткою з міді *С* (анод) і суцільною цинковою пластинкою *Д* (катод), був послідовно ввімкнений з гальванометром *Г* в коло акумуляторної батареї *Б*. При освітленні негативно зарядженої пластини *Д* світлом від джерела *А* в колі виникає електричний струм, який називається фотострумом. На основі своїх

дослідів Столетов дійшов таких висновків:

- 1) найбільшу дію чинять ультрафіолетові хвилі;
- 2) сила струму зростає зі збільшенням освітленості пластини;
- 3) заряди, які випускаються із пластини D під дією світла, мають від'ємний знак.

У 1898 р. Леонард і Томсон методом відхилення зарядів у електричному і магнітному полях визначили питомий заряд q/m частинок, що вириваються світлом з катода, довівши, що ці частинки є електронами.

Леонард й інші дослідники удосконалили прилад Столетова, помістивши електроди у вакуумну трубку (рис.2). Катод K , покривався металом, який досліджувався, і освітлювався монохрома-

тичним світлом, яке проходило через кварцове вікно. Напругу U між катодом K і анодом A можна регулювати за допомогою потенціометра Π і вимірювати вольтметром V . Дві акумуляторні батареї B_1 і B_2 дають можливість за допомогою потенціометра Π змінити не лише абсолютну величину, а й знак напруги U . Цей пристрій дав можливість дослідити вольт-амперну характеристику фотоефекту — залежність фотоструму I від напруги між електродами (рис.3).

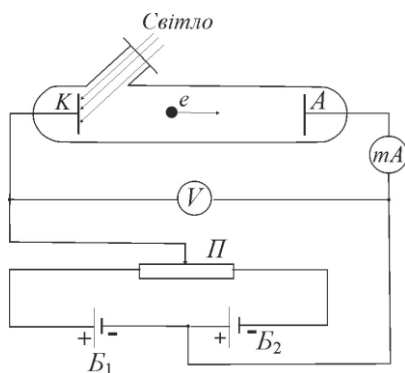


Рис.2.

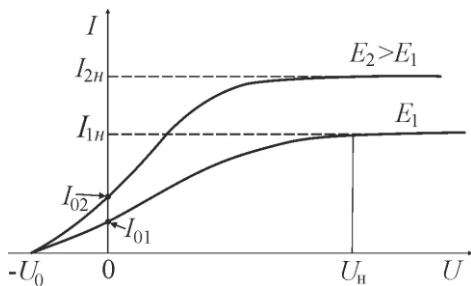


Рис. 3.

Така залежність відповідає двом різним освітленням E катоду. У міру збільшення напруги U фотострум I поступово зростає, тобто все більша кількість фотоелектронів досягає анода. Максимальне значення фотоструму I_n , яке називається фотострумом насичення, відповідає таким значенням U , при яких усі електрони, що вибиваються з катода світлом, досягають анода:

$$I_n = en, \quad (1)$$

де n — кількість електронів, які вилітають з катода за 1с.

З вольт-амперної характеристики виходить, що при $U = 0$

фотострум не зникає (струми I_{01} і I_{02}). Електрони, вибиті з катода світлом, мають деяку початкову швидкість v , а отже і відмінну від нуля кінетичну енергію і можуть досягати анода без зовнішнього поля. Для того, щоб фотострум став нульовим, необхідно прикласти **затримуючу напругу** U_0 (на катоді K позитивний потенціал по відношенню до анода A). При $U = U_0$ жоден з електронів не може подолати затримуючого поля і досягнути анода ($I = 0$, рис.3). Отже,

$$\frac{m_e v_{max}^2}{2} = eU_0, \quad (2)$$

тобто, вимірявши U_0 , можна знайти максимальні значення швидкості v_{max} і кінетичної енергії фотоелектронів, маса яких m_e .

Описаний вигляд ВАХ (характер залежності $I(U)$) поясню-

ється двома причинами. По-перше, фотони поглинаються електронами не тільки на поверхні металу, а й у приповерхневій зоні, яка має товщину порядку довжини хвилі світла, яке опромінює поверхню металу, і включає $\sim 10^3$ атомних шарів. Тому при виході з металу електрон, окрім роботи виходу A , витрачає додаткову енергію, внаслідок взаємодії з іншими електронами та кристалічною ґраткою металу на шляху до поверхні. Як наслідок, електрони вилітають із фотокатода в різних напрямках і з різними швидкостями – від 0 до максимального значення v_{max} , яке й фігурує в рівнянні (2). По-друге, у результаті неперервної втрати електронів під час опромінення світлом, фотокатод виявляється позитивно зарядженим,

і навколо нього виникає локальне електричне поле, що перешкоджає вильоту фотоелектронів і повертає більшість із них назад на катод. Але ті фотоелектрони, що виходить із катода зі швидкостями, близькими до максимальної, мають достатню кінетичну енергію, аби перебороти “повертаюче” поле катода й “самотужки” дістатись анода. Такі електрони створюють деякий струм I_0 навіть за відсутності напруги на фотоелементі (рис.3). При подаванні на фотоелемент зворотної напруги такі “швидкі” електрони для потрапляння на анод повинні долати не тільки локальне поле катода, а й гальмівне поле анода. Тому із збільшенням зворотної напруги кількість електронів, які потрапляють на анод, і струм фотоелемента поступово змен-

шуються. Це пояснює хід ВАХ в області $U < 0$. Зрозуміло, що фотоелектрон зможе потрапити на анод тільки за умови, що його початкова кінетична енергія буде достатньою для виконання роботи проти гальмівного поля анода. Тому затримуючий потенціал визначається із (2).

Дослідами встановлено такі основні **закони зовнішнього фотоефекту**:

1. При фіксованій частоті падаючого світла кількість фотоелектронів, що вириваються з катода за одиницю часу, пропорційна інтенсивності світла (сила фотоструму насичення I_n пропорційна енергетичній освітленості E катода:

$$I_n = \gamma E,$$

де γ — спектральна чутливість фотокатода).

2. Максимальна початкова швидкість фотоелектронів визначається лише частотою ν світла і не залежить від його інтенсивності. Величина v_{max} зростає зі збільшенням частоти ν .

3. Для кожної речовини існує "червона межа" фотоефекту, тобто максимальна довжина хвилі λ_{max} , при якій ще спостерігається фотоефект. Величина λ_{max} залежить від хімічної природи речовини і стану його поверхні.

Була встановлена фактична безінерційність зовнішнього фотоефекту. Проміжок часу між початком освітлення і початком фотоструму не перевищує 10^{-9} с.

Фотоефект — це результат трьох послідовних процесів:

1) поглинання фотона і поява електрона з великою (порівняно із середньою) енергією;

2) рух цього електрона до поверхні, при якому частина енергії може розсіятись;

3) вихід електрона в інше середовище через поверхню розділу.

Кількісною характеристикою фотоефекту є квантовий вихід β — число електронів, які вилітають під дією одного фотона, що падає на поверхню тіла. Величина β залежить від властивостей тіла, стану його поверхні і енергії фотона. Біля порогу фотоефекту ($\lambda \approx \lambda_{\max}$) для більшості матеріалів $\beta \sim 10^{-4}$ електрон/фотон. Така мала величина β обумовлена тим, що світло проникає в метал на глибину $\sim 10^{-7}$ м і там в основному поглинається. Фотоелектрони при своєму русі до поверхні сильно взаємодіють з електронами провідності, яких в

металі багато, і швидко розсіюють енергію, отриману від випромінювання. Енергію, яка достатня для виконання роботи виходу зберігають тільки ті фотоелектрони, які утворились біля поверхні на глибині, яка не перевищує 10^{-9} м. Крім того, поверхні металів сильно відбивають видиме і ближнє ультрафіолетове випромінювання. Різкого збільшення β і зсуву $\lambda_{\max}$ металів у видиму область спектру досягають за допомогою покриття чистої поверхні металу моноатомним шаром електропозитивних атомів або молекул ($\text{Cs}, \text{Rb}, \text{Cs}_2\text{O}$), які утворюють на поверхні дипольний електричний шар.

Важливе значення для фотоефекту має залежність спектральної чутливості приймача випромінювання від довжини світ-

лової хвилі (спектральна чутливість приймача у оптичного випромінювання — це відношення величини, яка характеризує рівень реакції приймача (наприклад, фотоструму), до потоку

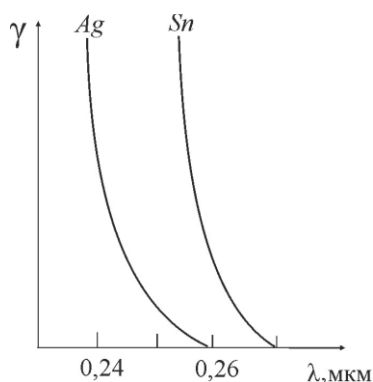


Рис. 4.

енергії монохроматичного випромінювання, яке викликає цю реакцію. Вимірюється γ в А/Вт). З рис.4 видно, що, починаючи від "червоної межі", із зменшенням λ відбувається зростання чутливості фотокатода.

Фотоефект не можна пояснити з погляду хвильової теорії

світла. В 1905р. А.Ейнштейн показав, що явище фотоефекту і його закономірності можуть бути пояснені на основі запропонованої ним квантової теорії фотоефекту.

Згідно Ейнштейна, світло з частотою ν не лише випромінюється, але і поширюється в просторі і поглинається речовиною окремими порціями, енергія яких $\epsilon = h\nu$. Поширення світла треба розглядати не як безперервний хвильовий процес, а як потік локалізованих у просторі дискретних світлових квантів, що рухаються зі швидкістю поширення світла у вакуумі. Ці кванти електромагнітного випромінювання отримали назву **фотонів**.

За Ейнштейном, кожний фотон поглинається лише одним електроном. Тому кількість вир-

ваних фотоелектронів повинна бути пропорційна до кількості поглинутих фотонів, тобто пропорційна до інтенсивності світла (перший закон фотоефекту). Безінерційність фотоефекту пояснюється тим, що передача енергії при зіткненні фотона з електроном відбувається майже миттєво.

За законом збереження енергії, енергія падаючого фотона витрачається на виконання електроном роботи виходу $\Phi_{\text{вих}}$ з металу і на надання електрону, який вилетів, кінетичної енергії $m_e v_{\text{max}}^2 / 2$, тому максимальна початкова швидкість фотоелектронів визначається лише частотою ν світла і не залежить від його інтенсивності (другий закон фотоефекту).

$$h\nu = \Phi_{\text{вих}} + m_e v_{\text{max}}^2 / 2. \quad (3)$$

Це *рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту*.

Якщо енергія фотона менша роботи виходу $\Phi_{\text{вих}}$ з металу, то фотоефект не спостерігається, тобто є "червона межа" фотоефекту, або максимальна довжина хвилі λ_{max} , при якій ще спостерігається фотоефект (третій закон фотоефекту):

$$h\nu_{\text{min}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{max}}} = \Phi_{\text{вих}}$$

Якщо створити поле, яке затримуватиме рух електронів, тобто на катод подати " +", а на анод "-", то фотострум буде зменшуватись і при напрузі U_0 струм дорівнюватиме нулю (рис.3). Ця напруга називається *затримуючим потенціалом*. Тоді формула Ейнштейна матиме вигляд із урахуванням (2)

$$h\nu = \Phi_{\text{вих}} + eU_0. \quad (4)$$

Якщо замість роботи виходу підставити значення енергії фотона що відповідає червоній межі фотоефекту, то

$$h\nu = h\nu_{\min} + eU_0. \quad (5)$$

Звідки отримаємо, що

$$eU_0 = h(\nu - \nu_{\min}). \quad (6)$$

Перевірку формули Ейнштейна з достатньою точністю здійснив в 1916р. Міллікен. Він створив прилад, в якому поверхні, що досліджувались, очищались у вакуумі, після цього вимірювалась їх робота виходу $\Phi_{\text{вих}}$ і досліджувалась залежність максимальної кінетичної енергії фотоелектронів від частоти ν світла.

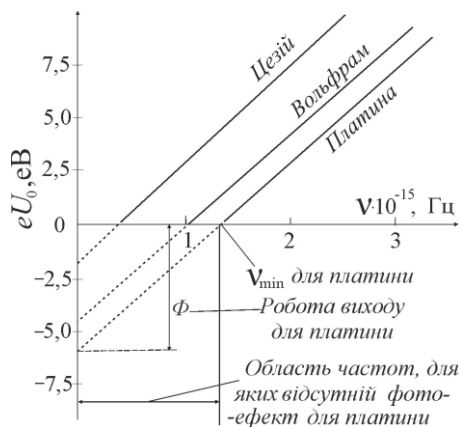


Рис.5.

Результати вимірювань приведені на рис.5. Відповідні графіки залежності $eU_0 = m_e v_{\max}^2 / 2$ від частоти ν приведені для трьох різних металів. Графіки мають дві цікаві характерні особливості.

По-перше, залежність eU_0 від частоти ν — лінійна і, по-друге, графіки для різних металів не співпадають, хоч вони і паралельні один до одного. Лінійна залежність eU_0 від ν підтверджує рівняння Ейнштейна (4). Тангенс

кута нахилу прямої $(\Delta(eU_0)/(\Delta v))$, дорівнює сталій Планка h , а відрізок $\Phi_{\text{вих}}$, який відтинається прямою на координатній осі eU_0 , при $v = 0$ – роботі виходу електрона із металу. Стає зрозумілим, чому прямі на рис.5 паралельні (кожна має однаковий нахил h) і чому не зливаються в одну лінію (кожна характеризується своїм певним значенням роботи виходу $\Phi_{\text{вих}}$). Коли $eU_0 = 0$, то $v = v_{\text{min}}$. Тут v_{min} *гранична частота*, тобто мінімальна частота світла, яке падає на метал, при якій ще можливе вибивання електронів із поверхні металу. Цю частоту також називають *червоною межею*. При $v = v_{\text{min}}$ кінетична енергія фотоелектронів буде дорівнювати нулю. Енергії кванта вистачає тіль-

ки, щоб вирвати електрон з металу. Отже

$$hv_{\text{min}} = h(c/\lambda_{\text{max}}) = \Phi_{\text{вих}}. \quad (7)$$

Величина λ_{max} залежить тільки від роботи виходу електрона, тобто від хімічної природи речовини і стану її поверхні.

Прийнято вважати, що фотоефект дає найбільш прямий експериментальний доказ квантової природи випромінювання.

Опис експерименту

Експериментальні дослідження закономірностей фотоефекту й перевірка рівняння Ейнштейна (4) зводиться до вивчення вольт-амперних характеристик (ВАХ) вакуумного фотоелемента при різних умовах опромінення.

Прямолінійна залежність $eU_0(v)$ підтверджується експериментально (рис.5).

Принципова схема вимірювання ВАХ фотоелемента показана на рис.2, а самий фотоелемент на рис.6.



Рис.6. Вакуумний фотоелемент

Фотоелемент це вакуумна двохелектродна лампа (діод), із катодом K із матеріалу, що має невелику роботу виходу ($A \sim 1$ еВ). Катод є світлочутливим елементом і називається *фотокатодом*. На фотоелемент від джерела живлення подається напруга, величину та полярність якої можна змінювати на свій розсуд і вимі-

рювати вольтметром. Фотострум, який виникає при опроміненні фотокатода, вимірюється чутливим мікроамперметром (який на схемі позначено як Г- гальванометр).

У режимі насичення $U > U_n$ (рис.3) у фотоелементі створюється настільки сильне прискорююче поле, що всі фотоелектрони, незалежно від напрямку та величини швидкості вильоту, потрапляють на анод. Напруга насичення U_n залежить від речовини фотокатода та конструкції фотоелемента й звичайно складає кілька десятків вольтів.

Таким чином існує однозначний зв'язок між параметрами ВАХ фотоелемента U_0 і I_n , з одного боку, й фізичними характеристиками фотоелектронів $mv^2/2 = eU_0$ і n (формула (1)).

Тому, вимірюючи U_0 і I_n при різних інтенсивностях освітлення E та частотах ν світла, яким опромінюється фотокатод, можна спостерігати й перевіряти основні закономірності фотоэффекту: закон Столетова, згідно з якими: при сталій частоті світла, яким опромінюється фотокатод, струм насичення є прямо пропорційним його інтенсивності та лінійну залежність потенціалу затримки U_0 (отже, й кінетичної енергії фотоелектронів) від частоти світла, яким опромінюється фотокатод. Покажемо це на прикладі досліду Р.Міллікена.

В1916р. Р. Міллікеном при дослідженні фотоэффекту з поверхні натрію були отримані такі дані (див.табл.М):

Таблиця М

$\nu \cdot 10^{-14}, \text{Гц}$	5,49	6,92	7,41	8,22	9,60	11,83
$U_0, \text{В}$	0,47	1,02	1,20	1,60	2,13	3,02

Тут ν – частота світла, U_0 – напруга затримки. Використовуючи ці дані, визначити: а) значення сталої Планка h ; б) роботу виходу $\Phi_{\text{вих}}$ електрона із натрію.

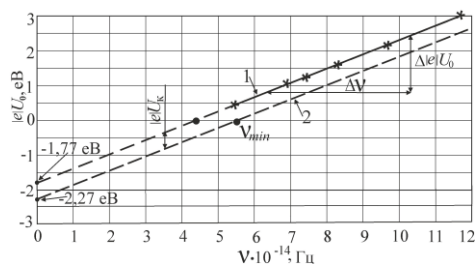


Рис.7.

Для знаходження невідомих величин необхідно побудувати графік $|e|U_0 = f(\nu)$, який представлений на рисунку 7, пряма 1. Із графіка знаходимо нахил прямої лінії:

$$h = \frac{\Delta(|e|U_0)}{\Delta\nu} = \frac{2,5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{6 \cdot 10^{14}} \text{ Дж} \cdot \text{с} = 6,67 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

і точку перетину прямої лінії з віссю ординат (eU) при $v = 0$, ордината якої дорівнює роботі виходу $\Phi_{\text{вих}}$ електрона із катоду:

$$\Phi_{\text{вих}} = 1,77 \text{ еВ.}$$

Такий метод визначення сталої Планка h називається *методом затримуючого потенціалу*.

Обробка результатів таблиці М методом найменших квадратів дає наступні результати:

$$h = 6,49 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с},$$

невизначеність типу А

$$U_A(h) = 0,15 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с},$$

відносну невизначеність

$$\delta(h) \cong 2\%,$$

роботу виходу електрона із катоду $\Phi_{\text{вих}} = (1,77 \pm 0,02) \text{ еВ.}$

Зауваження. Якщо подивитись в довідникові таблиці, то побачимо, що робота виходу електрона із натрію

$\Phi_{\text{вих}}(\text{Na}) = 2,27 \text{ еВ.}$ Щоб отримати таке значення роботи виходу електрона із натрію прямолінійна залежність $eU_0 = f(v)$ (рис.7 пряма 2) повинна бути нижче прямої 1 на рис.7 на величину $(2,27 - 1,77) \text{ еВ} = 0,50 \text{ еВ.}$ Це зв'язано з проявом контактної різниці потенціалів U_k між анодом і катодом фотоелемента. Тому рівняння (4) із врахуванням U_k потрібно записувати так:

$$h\nu = \Phi_{\text{вих}} + e(U_z + U_k)$$

де $U_0 = U_z + U_k$ (U_z – затримуюча різниця потенціалів, яка повинна входити в рівняння Ейнштейна для фотоефекту). U_k може мати як додатні, так і від'ємні значення. Контактна різниця потенціалів проявилась в результатах таблиці М.

Про контактну різницю потенціалів [1]

Утворення контакту між двома твердими тілами неминує 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 $\text{\AA}$) 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 пе-

решкоджає потоку електронів із першого металу в другий. Різниця потенціалів U_K , 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 за-*

лежить 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 додатках. 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.

В нашій лабораторній роботі U_k не може бути врахована через обмежені можливості. То-

му роботу виходу $\Phi_{\text{вих}}$ і відповідно червону межу фотоефекту ν_{min} , або λ_{max} в даній роботі не визначаємо. За нахилом прямолінійної залежності $|e|U_0 = f(\nu)$ визначаємо тільки сталу Планка h .

Експериментальна установка

На рис. 8 показана лабораторна установка для вимірювання ВАХ фотоелемента. Пучок від джерела світла за допомогою конденсорної лінзи фокусується на вхідну щілину монохроматора, всередині розділяється просторово за частотами і виходить з вихідної щілини з вузьким діапазоном частот (монохроматичним).

Світловий пучок із заданою частотою, що виходить із монохроматора, потрапляє на катод фотоелемента, який розміщений у світлонепроникному кожусі і

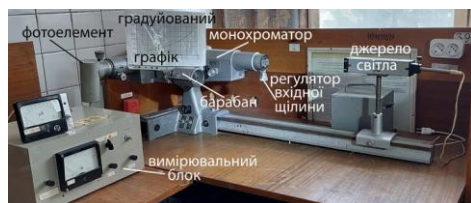


Рис.8. Лабораторна установка.

закріплений на вихідній щілині монохроматора. Необхідні для проведення вимірів конкретні відомості про експериментальну установку є в інструкції на робочому місці.

Порядок виконання роботи

Перед початком вимірів необхідно вивчити інструкцію на робочому місці й діяти відповідно до поданих у ній вказівок.

Завдання 1. Отримання ВАХ фотоелемента

1. Увімкнути установку, переміщенням джерела світла сфокусувати світловий пучок на вхідну щілину монохроматора й установити необхідну ширину

вхідної та вихідної щілин монохроматора.

2. Установити барабан монохроматора в положення N , що відповідає зазначеній у робочій інструкції частоті (довжині хвилі) світла і виміряти залежність струму фотоелемента від напруги між анодом і катодом U . Результати вимірів занести до табл. 1.

Завдання 2. Вимірювання залежності $U_0 = f(\nu)$

3. Для вказаних у робочій інструкції (чи заданих викладачем) частот ν_i розрахувати значення довжин хвиль λ_i . За допомогою градуовального графіка, який знаходиться на робочому місці, визначити поділки барабана монохроматора N_i , що відповідають отриманим значенням λ_i . Значення ν_i та N_i занести до табл. 2

4. Для кожного значення v_i виконати 5 вимірів U_0 та занести результати до табл.2.

5. Установивши на барабані монохроматора значення N_i , що відповідає максимальній величині струму насичення I_n , виміряти затримуючу напругу U_0 для чотирьох різних значень ширини вхідної щілини монохроматора d при незмінній довжині хвилі λ . Дані записати в табл. 3.

Завдання 3. Перевірка закону Столетова

6. Переміщенням джерела світла домогтися рівномірної освітленості вхідної щілини монохроматора.

7. За даними табл.1 (чи за вказівкою викладача) подати на фотоелемент напругу U_n і виміряти струм насичення I_n для п'яти різних значень ширини d

вхідної щілини монохроматора. Результати занести до табл. 4.

Обробка результатів

1. За даними табл. 1 на міліметрівці побудувати ВАХ фотоелемента, вказавши на графіку значення U_0, U_n, I_n та вибрану частоту ν .

2. За даними табл. 2 обчислити середню величину $\langle U_{0i} \rangle$ для кожного значення v_i й занести її в табл.2.

3. Використовуючи отримані середні значення $\langle U_{0i} \rangle$, побудувати графік залежності $e\langle U_0 \rangle = f(\nu)$, де e – заряд електрона.

4. За допомогою графіка $e\langle U_0 \rangle = f(\nu)$ за формулою $h = \frac{\Delta((eU_0))}{\Delta\nu}$ визначити сталу Планка h .

5. Опрацювати ці дані експерименту за допомогою методу найменших квадратів в таблиці

Excel, яка додається до протоколу роботи.

6. Записати кінцевий результат визначення сталої Планка із врахуванням невизначеності типу А. Знайти відносну похибку отриманого результату. Порівняти отримане значення сталої Планка із його довідниковим значенням.

7. За даними табл.3 розрахувати середню величину $\langle U_0 \rangle$ для кожного значення ширини щілини d й занести їх у табл.3. Зробити висновок про залежність U_0 від інтенсивності світла, яким опромінюється фотокатод.

8. За даними табл. 4 побудувати графік залежності $I_n(d)$ і зробити висновок про виконання закону Столетова. У випадку помітного відхилення залежності $I_n(d)$ від лінійної, проаналізувати

можливі причини порушення лінійності.

Контрольні запитання

1. Які види фотоефекту існують?

2. Що таке зовнішній фотоефект? Чим він відрізняється від інших видів фотоефекту.

3. Запишіть і поясніть рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту.

4. Які властивості світла стали основою для написання Ейнштейном рівняння для фотоефекту?

5. Що свідчить про наявність у фотоелектронів початкової кінетичної енергії?

6. Чому фотоелектрони виходять із металу з різними швидкостями? Від чого і як залежить максимальна швидкість фотоелектронів?

7. Від чого і як залежить потік фотоелектронів, тобто кількість електронів, що вириваються світлом за одиницю часу з металу?

8. Що таке червона межа фотоефекту і від чого вона залежить?

9. Запишіть рівняння Ейнштейна використовуючи частоту ν_{min} (довжину хвилі λ_{max} червоної межі фотоефекту).

10. Зобразіть загальний вигляд ВАХ фотоелемента та поясніть залежність $I(U)$ в області зворотної напруги ($U < 0$). Що таке затримуючий потенціал U_0 і чим він визначається?

11. Зобразіть сімейство ВАХ фотоелемента при опроміненні його світлом постійної інтенсивності E і з частотами. $\nu_1 = \nu_{min}$; $\nu_2 = 2\nu_{min}$; $\nu_3 = 3\nu_{min}$ (ν_{min} —

частота червоної межі фотоефекту).

12. Зобразіть графік залежності затримуючого потенціалу від частоти опромінюючого світла. Як по цьому графіку можна визначити сталу Планка h ?

13. Як за графіком залежності $U_0(\nu)$ можна довести, що при опроміненні металу світлом із частотою, меншою за червону межу, фотоефект неможливий?

14. Зобразіть загальний вигляд ВАХ фотоелемента та поясніть залежність $I(U)$ в області прямої напруги ($U \geq 0$). Чим визначається величина струму насичення I_n при заданій інтенсивності світла?

15. Зобразіть сімейство ВАХ фотоелемента при опроміненні світлом постійної частоти ν , але різної освітленості фотокатода:

$$E_1 = E_0; E_2 = 2E_0; E_3 = 3E_0.$$

фекту на основі хвильової теорії

16. Чи можна пояснити закономірності зовнішнього фотое-

електромагнітного випромінювання? Відповідь обґрунтувати.

Таблиця 1

$U, \text{В}$								
$I, \text{мкА}$								

Таблиця.2

i		1	2	3	4	5	6
Поділки барабану, N_i							
Довжина хвилі $\lambda_i, \text{нм}$							
Частота хвилі $\nu_i \cdot 10^{-14}, \text{Гц}$							
	m						
$U_{0mi}, \text{В}$	1						
	2						
	3						
	4						

	5						
$\langle U_{0i} \rangle, \text{В}$							

Таблица 3

$d_i, \text{мм}$	$U_{0i}, \text{В}$							
i	1	2	3	4	5	6	7	$\langle U_0 \rangle, \text{В}$

Таблица 4

$d, \text{мм}$					
$I_{\text{н}}, \text{мкА}$					

Додаток 1. Приклад обробки результатів експерименту.

1. За даними табл. 1 на міліметрівці будуємо графік ВАХ фотоелемента, визначаємо по графіку значення U_0 , U_H , I_H та позначаємо їх на графіку (див.табл.д.2.1 та д.2.2).

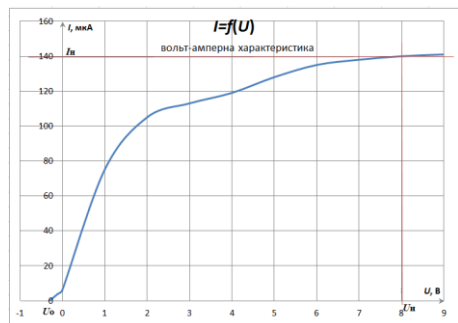
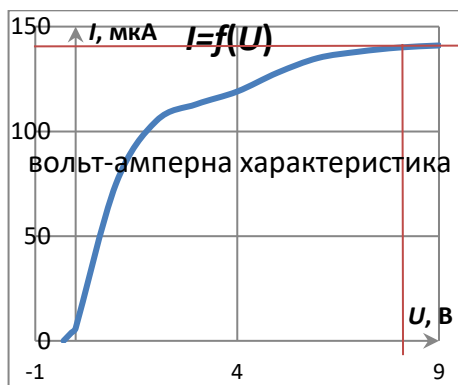


Рис. д.1.1. ВАХ фотоелемента

Для частоти $\nu = 4,5 \cdot 10^{14}$ Гц з графіка отримали такі значення: $U_0 = -0,3$ В; $U_H = 8$ В; $I_H = 140$ мкА.

2. За даними табл. 2 обчислюємо середню величину $\langle U_{0i} \rangle$ для кожного значення ν_i та будуємо графік залежності $|U_0| = f(\nu)$, або $e \cdot U_0 = f(\nu)$.

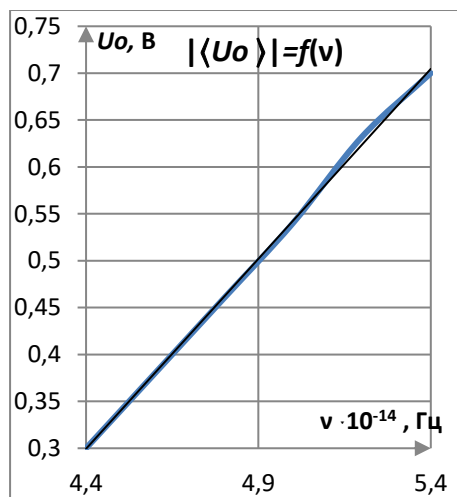


Рис.д.1.2

3. З графіка $|U_0| = f(\nu)$ за формулою $h = \frac{e|\Delta U_0|}{\Delta \nu}$ визначаємо сталу Планка h (Дж·с).

$$h = \frac{1,6 \cdot 10^{-19}(0,54 - 0,3)}{(5 - 4,4) \cdot 10^{14}} = 6,4 \cdot 10^{-34}$$

4. Опрацьовуємо дані експерименту за допомогою методу найменших квадратів в таблиці Excel.

5. Математична обробка результатів експерименту (див табл.д.2.1) дає значення кутового коефіцієнта залежності величини $e \cdot U_0$ від ν . Тобто $a = h = 6,48 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, а середня квадратична похибка експерименту $\sigma_a = 0,0786 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. Округлюємо до двох значущих цифр та приймаємо її за невизначеність типу А. Тоді розширена невизначеність величини h : $U(h) = 2\sigma_a \approx 0,16 \cdot 10^{-34}$ Дж·с з ймовірністю довіри $P=95\%$. Відносна невизначеність h : $\delta_h = 2\sigma_a/h = (0,16/6,48) \cdot 100\% = 2,5\%$.

6. Запишемо кінцевий результат визначення сталої Планка із врахуванням невизначеності типу А: $h = (6,48 \pm 0,16) \cdot 10^{-34}$ Дж·с. Табличне значення сталої Планка $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. знаходиться біля верхньої межі інтервалу довіри. Відхилення отриманого значення сталої від довідникового складає $\delta = (6,63 - 6,48)/6,63 \cdot 100\% = 2,3\%$.

7. За даними табл.3 розраховуємо середню величину $\langle U_0 \rangle$ для кожного значення ширини щілини d та заносимо їх значення до табл.3. Середні значення U_0 майже однакові для всіх розмірів щілин, тобто U_0 від інтенсивності світла, яким опромінюється фотокатод, не залежить.

8. За даними табл. 4 будуємо графік залежності $I_n = f(d)$

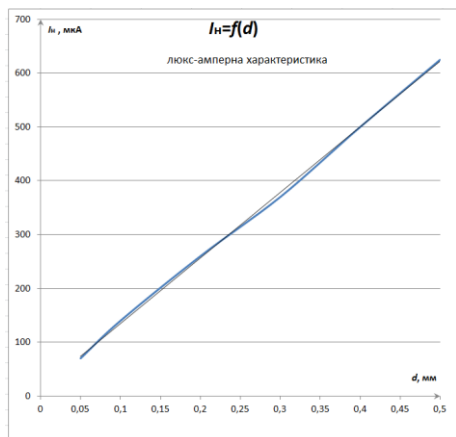


Рис.д.1.3.ЛАХ.

Як бачимо графік лінійний, тоді можемо зробити висновок, що закон Столетова виконується.

9. Аналіз отриманих результатів (висновки):

1. отримали значення сталої Планка, яке відрізняється від табличного значення на 2,3%, що вказує на добре проведений експеримент;

2. переконалися, що струм насичення лінійно зростає зі збільшенням ширини щілини;

3. визначили середню затримуючу напругу $\langle U_0 \rangle$ для різних значень ширини щілини d , переконалися, що $\langle U_0 \rangle$ не залежить від d .

Додаток 2. Приклад розрахунків даної роботи за допомогою програми Excel.

Для розрахунків скористаємося ексель файлом «робоча прогр. мет. наймен. квадрат (11точок)», який окремо додається до завдання. Його необхідно *завантажити*, відкрити, створити новий файл для даної роботи, для цього перейти на вкладку «файл», і натиснути кнопку «запам'ятати як», назву файлу обираємо таким чином: номер роботи і ваше прізвище, наприклад: «3-9. Лимар».

1. Аналізуємо завдання та приходимо до висновку, що роботу варто починати з таблиці 2.

Слід відмітити, що стала Планка рівна кутовому коефіцієнту залежності $e\langle U_0 \rangle = f(\nu)$, тому його заносимо до програми «метод найменших квадратів», а щоб побачити залежність між величинами побудуємо ще один графік $|\langle U_0 \rangle| = f(\nu)$, де частоти будемо відкладати з коефіцієнтом $\cdot 10^{-14}$.

2. Приступаємо до створення і одночасного заповнення таблиці 2. Для цього обираємо комірку L2 і заносимо в неї назву таблиці - «Таблиця 2».

До комірки L3 записуємо літери « $\nu \cdot 10^{-14}$, Гц» - позначення частоти з коефіцієнтом та її розмірність. Нижче в комірки L4 і L5 і т.д. вносимо самі значення з таблиці даних.

3. Наступний стовпчик міститиме значення частоти без

коефіцієнта. В комірку M3 заносимо літери « ν , Гц» - символ частоти та її розмірність, в комірки M4 заносимо формулу « $=L4*1E14$ », набираємо на англійській, на закінчення вводу формули натискаємо кнопку «Enter».

Продублюємо цю формулу до наступних комірок цього стовпчика: знову натискаємо на комірку M4, курсор наводимо на нижній правий кут і сам курсор прийняв вигляд жирного знака «+», затискаємо ліву кнопку мишки і тягнемо вниз на 5-6 комірок, при цьому програма сама впише формулу в наступні комірки в виділеній області, і в них появиться результат.

4. Стовпчики N, O, P, Q, R міститимуть значення затримуючих напруг U_{0i} при заданому

значенню частоти, якщо кількість вимірів п'ять. А якщо кількість вимірів U_0 при даному значенні частоти, які провела бригада студентів, більше – то відповідно кількість стовпчиків треба збільшити. Заносимо в комірки N3, O3, P3, Q3 та R3 літери: « U_{01} , В», « U_{02} , В», « U_{03} , В», « U_{04} , В» та « U_{05} , В» - позначення затримуючої напруги та її розмірність. В комірки 4-10 стовпчиків N, O, P, Q та R заносимо значення відповідних напруг з таблиці даних.

5. Наступний стовпчик S міститиме середні значення вимірів затримуючої напруги при даному значенні частоти. В комірку S3 заносимо літери « $\langle U_0 \rangle$, В»- позначення середнього значення затримуючої напруги та її розмірність. В ко-

мірку S4 треба ввести формулу: $(U_{01} + U_{02} + U_{03} + U_{04} + U_{05})/5$. Цю формулу можемо записати з допомогою функції суми: для цього в обраній комірці S4 натискаємо знак «=», потім латинські великі літери і відкриваючу дужку «SUM(», далі натискаємо на першу комірку N4, затискаємо ліву кнопку миші і переводимо курсор до останньої комірки R4, вміст яких буде додаватися, набираємо закриваючу дужку «)», знак ділення «/», і цифру 5, та натискаємо кнопку «Enter», тоді в рядку формул буде – «=SUM(N4:R4)/5» (в знаменнику цифра має дорівнювати кількості доданків в чисельнику).

Потім продублюємо цю формулу до наступних комірок

цього стовпчика так, як описано в останньому абзаці пункту 3.

6. Наступний стовпчик Т міститиме середні значення енергії, яку втрачає електрон при проходженні затримуючої напруги при даному значенні частоти. В комірку Т3 заносимо літери « $e < U_0$ », Дж»- позначення середнього значення енергії та її розмірність. В комірку Т4 треба ввести формулу: $e * U_0$, для цього виконуємо наступні дії: наводимо курсор на комірку Т4, натискаємо праву кнопку миші, натискаємо знак дорівнює на клавіатурі, знак мінус та число 1,6E-19, потім натискаємо знак множення, наводимо курсор на комірку S4 і натискаємо ліву кнопку миші – «=-1,6E-19*S4», потім обов'язково натиснути кнопку «Enter». Тоді в

рядку формул буде: «=-1,6E-19*S4», а в комірці з'явиться результат.

Потім продублюємо цю формулу до наступних комірок цього стовпчика так, як описано в останньому абзаці пункту 3.

Нагадування: запис будь-яких формул та назви комірок в формулах необхідно завжди набирати великими латинськими літерами.

7. До останнього стовпчика заносимо модулі середнього значення затримуючої напруги, яка необхідна для побудови графіка $|U_0| = f(v)$. В комірку U3 заносимо літери « $|U_0|$, В» - символ модуля затримуючої напруги та її розмірність, в комірку U4 заносимо формулу: $-U_0$, для цього виконуємо наступні дії: наводимо курсор на ко-

мірку U4, натискаємо праву кнопку миші, натискаємо знак дорівнює на клавіатурі «=», знак мінус «-», наводимо курсор на комірку з середніми значеннями затримуючої напруги S4 і натискаємо ліву кнопку миші, потім обов'язково натиснути кнопку «Enter». При цьому в рядку формул має бути: «=-S4», а в комірці з'явиться результат. Потім продублюємо цю формулу до наступних комірок цього стовпчика як описано в останньому абзаці пункту 3.

8. Приступаємо до побудови графіка $e \langle U_0 \rangle = f(v)$. Для цього натискаємо на комірку M4, затискаємо ліву кнопку миші, опускаємо курсор до останньої комірки T9, відпускаємо кнопку миші, натискаємо кнопку «копіювати», наводимо кур-

сор на x1 (відповідна комірка B5) на виділеній області методу найменших квадратів, натискаємо на неї, і натискаємо кнопку «вставити», при цьому біля комірки спливає віконце «параметри вставлення», в якому слід відмітити першу іконку під «вставити значення», в комірках з'являться такі ж числа як в комірках стовпчика M. Так само потрібно перенести значення стовпчика T до комірок у графіка (відповідні комірки C5-C10).

Також переносити числа з однієї комірки до іншої можна з допомогою функції «дорівнює»: в комірку B5 записуємо формулу «=M4» та дублюємо її до наступних комірок цього стовпчика, а в комірку C5 – відповідно «=T4» та продублювати до наступних комірок.

Нагадування: запис будь-яких формул завжди закінчуємо натисканням кнопки «Enter».

9. Дана програма визначає кутовий коефіцієнт a та точку перетину з віссю ординат b лінійної апроксимації: $y = ax + b$ та їх середньо квадратичні похибки, на основі яких знаходимо значення сталої Планка та її невизначеність.

До комірки L12 запишемо літери « h експ, Дж·с» - символ отриманої сталої Планка та її розмірність. В комірку M12 треба ввести значення сталої, котре рівне кутовому коефіцієнту a і знаходиться в комірці F5, для цього виконуємо наступні дії: наводимо курсор на комірку M12, натискаємо праву кнопку миші, натискаємо знак дорівнює на клавіатурі «=», наводимо ку-

рсор на комірку F5 і натискаємо ліву кнопку миші, потім обов'язково натиснути кнопку «Enter». При цьому в рядку формул буде: «=F5».

В комірку L13 запишемо літери « $\sigma(h)$, Дж·с» - символ середньо квадратичної похибки сталої та її розмірність. В комірку M13 треба ввести формулу, для цього виконуємо наступні дії: наводимо курсор на комірку M13, натискаємо праву кнопку миші, натискаємо знак дорівнює на клавіатурі «=», наводимо курсор на комірку F9 і натискаємо ліву кнопку миші, потім обов'язково натискаємо кнопку «Enter». Тоді в рядку формул буде: «=F9», а в комірці – число, яке округлюємо до двох значущих цифр.

В комірку L14 запишемо літери « $U(h)$, Дж·с» - символ невизначеності сталої та її розмірність. В комірку M14 треба ввести формулу, для цього виконуємо наступні дії: наводимо курсор на комірку M14, натискаємо праву кнопку миші, натискаємо знак дорівнює на клавіатурі «=», число 2 та знак множення «=2*», наводимо курсор на комірку M13 і натискаємо ліву кнопку миші, потім обов'язково натиснути кнопку «Enter». Тоді в рядку формул буде: «=2*M13».

Оскільки невизначеність сталої має дві значущі цифри і на порядок менше сталої, то стало необхідно округлити до двох значущих цифр після коми.

До комірки L15 запишемо літери « δh , %» - символ відносної розширеної невизначеності

сталої та її розмірність. В комірку M15 треба ввести формулу: $\frac{2\sigma_h}{h} * 100\%$, для цього виконуємо наступні дії: наводимо курсор на комірку M15, натискаємо праву кнопку миші, натискаємо знак дорівнює на клавіатурі «=», наводимо курсор на комірку з невизначеністю сталої M14 і натискаємо ліву кнопку миші, знак ділення «/», потім наводимо курсор на комірку M12, натискаємо праву кнопку миші, набиваємо знак множення і число 100, потім обов'язково натиснути кнопку «Enter», в рядку формул маємо: «=M14/M12*100».

10. Побудуємо графік $|U_0| = f(v)$. Наводимо курсор на будь-яку вільну комірку, натискаємо вгорі кнопки «Вставлення», потім – діаграма «точкова», при цьому появляється ві-

конце з п'ятьма діаграмами і вибрати – «точкова діаграма із гладкими лініями» (при наведенні курсора на кожную з іконок з'являється їхня назва). З'явиться графік на вільних комірках посередині екрану, його варто перенести на комірки O11 – O30 та внести його назву. Для цього натискаємо вгорі кнопку «конструктор», з'являються одинадцять макетів діаграм, для нашого графіка найкраще вибрати перший або восьмий макет. Замість слів «Назва діаграми» напишемо $|\langle U_0 \rangle| = f(v)$, напис «Ряд 1» – видаляємо кнопкою «Backspace». Щоб перенести графік потрібно навести курсор на вільне місце графіку, при цьому він прийме вигляд перехрещених відрізків зі стрілочками на кінцях та появиться віконце з

написом «область діаграми», затиснути ліву кнопку миші та встановити на обране місце.

Також можемо змінити розміри графіка; для цього натискаємо на графік, навколо нього з'являється подвійна рамка, яка має вісім активних точок: по кутах і в центрі сторін. Якщо треба збільшити тільки по горизонталі, то наводимо курсор на середину лівої сторони подвійної рамки (або правої), курсор приймає вигляд горизонтального відрізка зі стрілочками, затискаємо ліву кнопку миші, курсор стає жирним хрестиком, і розтягуємо графік на 3-6 комірок основного поля (або стискуємо). Таким же чином можемо змінювати розмір по висоті, а якщо потягнути за кут, то можемо

одночасно змінювати обидва розміри графіка.

Для побудови кривої необхідно навести курсор на вільне місце діаграми (має з'явитися віконце зі словами: «область побудови»), натискаємо праву кнопку миші, у спливаючому вікні натискаємо кнопку «вибрати дані», і під словами «Записи легенд (Ряди)» натиснути кнопку «додати». В новому спливаючому вікні «Редагування ряду» перше віконце під словом «Ім'я ряду» залишаємо порожнім, в друге віконце під словами «значення ряду X»: наводимо курсор на нижчу комірку, натискаємо на неї, потім натискаємо на першу комірку з даними частоти – L4, затискаємо ліву кнопку миші, зміщуємо курсор вниз до комірки L9, відпускаємо ліву

кнопку миші; тепер необхідно записати «значення ряду Y»: наводимо курсор на нижню комірку, натискаємо на неї та видаємо все що там є, а саме: « $=\{1\}$ », потім натискаємо на першу комірку з даними модуля затримуючої напруги – U4, затискаємо ліву кнопку миші, зміщуємо курсор вниз до комірки U9, відпускаємо ліву кнопку миші та натискаємо кнопку «ОК».

Тепер змінимо масштаб вісі X. Наводимо курсор на будь яке число на осі X, натискаємо праву кнопку миші, з'являється віконце, в якому слід натиснути кнопку «Формат осі», з'являється ще одне віконце, в якому можемо змінити налаштування «автоматично» на «фіксовано»: вибираємо «мінімальне

значення», ставимо прапорець біля «фіксовано» та в комірку записуємо найменше округлене значення частоти з таблиці даних (наприклад 4,4); вибираємо «максимальне значення», ставимо прапорець біля «фіксовано» та в комірку записуємо найбільше округлене значення (наприклад 5,4); вибираємо «ціна основних поділок», ставимо прапорець біля «фіксовано» та в комірку записуємо бажану величину (наприклад 0,2), (якщо хочемо мати на графіку ще допоміжні лінії, то вибираємо «ціна проміжних поділок», ставимо прапорець біля «фіксовано» та в комірку записуємо бажану величину (наприклад 0,1), але для даного графіка це лишнє), зліва натискаємо кнопку «тип лінії», натискаємо на віконце справа

слів «тип закінчення», та натискаємо на стрілочку, у віконечку нижче можемо її збільшити, закрити спливаюче вікно кнопкою «Закрити». Якщо проміжні лінії на графіку не появилися, а вам вони необхідні, то слід ще раз навести курсор на будь яке число на осі X, натиснути праву кнопку миші, з'являється віконце, в якому слід натиснути кнопку «Додати проміжні лінії сітки». Таким же чином змінюємо масштаб вісі Y.

11. Отримане значення сталої Планка можемо порівняти з табличним значенням $h=6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, яке запишемо до комірки M11, а в комірку L11 – літери його позначення та розмірність: « h табл., Дж·с».

12. В комірку L16 запишемо слово «Відповідь:», в комірку

L17 – символи « $h=$ », а в комірці M17 – отримане значення сталої Планка та її невизначеність « $(6,48 \pm 0,16)E-34$ Дж·с».

13. Переходимо на наступну сторінку, для цього слід в нижньому лівому кутку натиснути кнопку «Аркуш 2» та приступаємо до побудови таблиці 1.

До комірки A1 заносимо назву таблиці: «Таблиця 1».

14. До комірки A2 заносимо літери « I_n , мкА» - символ сили струму насичення та її розмірність, а до решти комірок цього стовпчика – їх значення з таблиці даних 1.

15. В комірці B2 заносимо літери « U , В» - позначення напруги та її розмірність, а в наступні комірки цього стовпчика – їх значення для різних струмів з таблиці 1 (див.табл.д.2.2).

Об'єднуємо комірки C1 та D1, для цього натискаємо на комірці C1 лівою кнопкою миші і, утримуючи її, переводимо курсор на комірці D1, відпускаємо кнопку, та натискаємо кнопку «Об'єднати та розташувати в центрі», та заносимо літери: «Частота світла, Гц», а в комірці E1 – її значення: « $v=4,5 \cdot 10^{14}$, Гц».

16. Приступаємо до побудови графіка $I = f(U)$. Виділяємо комірки A3 – A15 та B3 – B15, для цього наводимо курсор на комірці A3, затискаємо ліву кнопку миші, зміщуємо курсор на одну комірці вправо та вниз до комірки B15, відпускаємо ліву кнопку миші, натискаємо вгорі кнопки «Вставлення», потім – діаграма «точкова», при цьому появляється віконце з

п'ятьма діаграмами і вибрати – «точкова діаграма із гладкими лініями» (при наведенні курсора на кожну з іконок з'являється їхня назва). З'явиться графік на вільних комітках посередині екрану, його варто перенести на комірки C2 – C25 та внести його назву. Для цього натискаємо вгорі кнопку «конструктор», з'являються одинадцять макетів діаграм, для нашого графіка найкраще вибрати перший або восьмий макет. Замість слів «Назва діаграми» пишемо « $I = f(U)$ », напис «Ряд 1» – видаляємо кнопкою «Backspace». Змінюємо розміри графіка та масштабу осей X, Y як описано в пункті 10.

17. Для визначення струму насичення I_n та напруги насичення U_n по графіку необхідно

провести ряд побудов: на графіку встановити горизонтальну та вертикальну пряму, для цього натискаємо послідовно кнопки вгорі: «вставлення», «фігури», «лінія», та натискаємо на вільному місці на графіку, з'являється відрізок прямої під кутом $\pi/4$ з двома кільцями на кінцях. Одночасно з'являються засоби креслення, де можна змінити колір цієї лінії (в наведеному прикладі вибрано червоний для синьої основної кривої). Наводимо курсор на одне з кілець, курсор при цьому змінює свою форму, затискаємо ліву кнопку миші, встановлюємо лінію так, щоб вона стала горизонтально та збільшуємо її розмір, відпускаємо кнопку миші. Знову наводимо курсор на лінію, затискаємо ліву кнопку миші та

встановлюємо її так щоб вона співпала з горизонтальною ділянкою ВАХ. Точка перетину з віссю Y дає струм насичення. Таким же чином будуємо вертикальну лінію і встановлюємо в першу точку злиття горизонтальної прямої з кривою ВАХ, а точка перетину з віссю X показує напругу насичення. Точка перетину кривої ВАХ з віссю X дає U_0 .

18. В комірку A17 запишемо слово «Відповідь:», в комірки A18, A19, A20 – символи « U_0 , В», « U_n , В» та « I_n , мкА», а в комірки B18, B19, B20 – отримані значення затримуючої напруги, напруги насичення, та струму насичення.

19. Будуємо та заповнюємо таблицю 3. В комірку A26 запишемо назву «Таблиця3», в комі-

рку A27 – символи « d , мм», а в комірки B27, C27 і.д. – значення ширини щілини з таблиці даних. Комірки A28, A29 і A30 об'єднуємо та записуємо літери « U_0 , В», а в комірки B28, B29, B30, C28, C29, C30 і т.д. – значення затримуючих напруг з таблиці даних. В комірку A31 запишемо символи « $\langle U_0 \rangle$, В», а в комірку B31 – формулу, тоді в рядку формул буде: «=SUM(B28:B30)/3», потім цю формулу дублюємо до комірок C31, D31, E31.

20. Будуємо та одночасно заповнюємо таблицю 4. В комірку O1 запишемо назву «Таблиця 4», в комірку O2 – символи « d , мм», а в комірки P2, Q2 – U_2 – значення ширини щілини з таблиці даних. В комірку O3 запишемо символи « I_n , мкА», а в

комірки P3–U3 – значення струмів з таблиці даних.

21. Будуємо графік $I_n = f(d)$. Виділяємо комірки P2, P3 та U2 – U3, натискаємо вгорі кнопки «Вставлення», потім – діаграма «точкова», «точкова діаграма із гладкими лініями» З’явиться графік на вільних комірках посередині екрану, його збільшуємо, змінюємо масштаб осей, додаємо назву діаграми та назви осей. Щоб точніше встановити лінійність залежності $I_n = f(d)$, добавимо пряму лінійної апроксимації. Для цього потрібно натиснути на графік, потім вгорі появляться кнопки «Макет», нижче – «Лінія тренду», яку натискаємо і в впливаючому вікні натиснути кнопку «Лінійна пряма тренду».

Література

1.Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Фізика (Фізика для інженерів): Підручник /: — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017.—513с. - Доступ:

<http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19035>

2. 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.

3.Кучерук І.М., Горбачук І.І. Загальний курс фізики. Оптика. Квантова фізика.Том 3, §5.1. - К: Техніка, 1999р.

4.Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Обробка результатів фізичних вимірювань. [Електронний ресурс]: навч. посіб./ КПІ ім. Ігоря Сікорського/: —Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. — 88 с. -

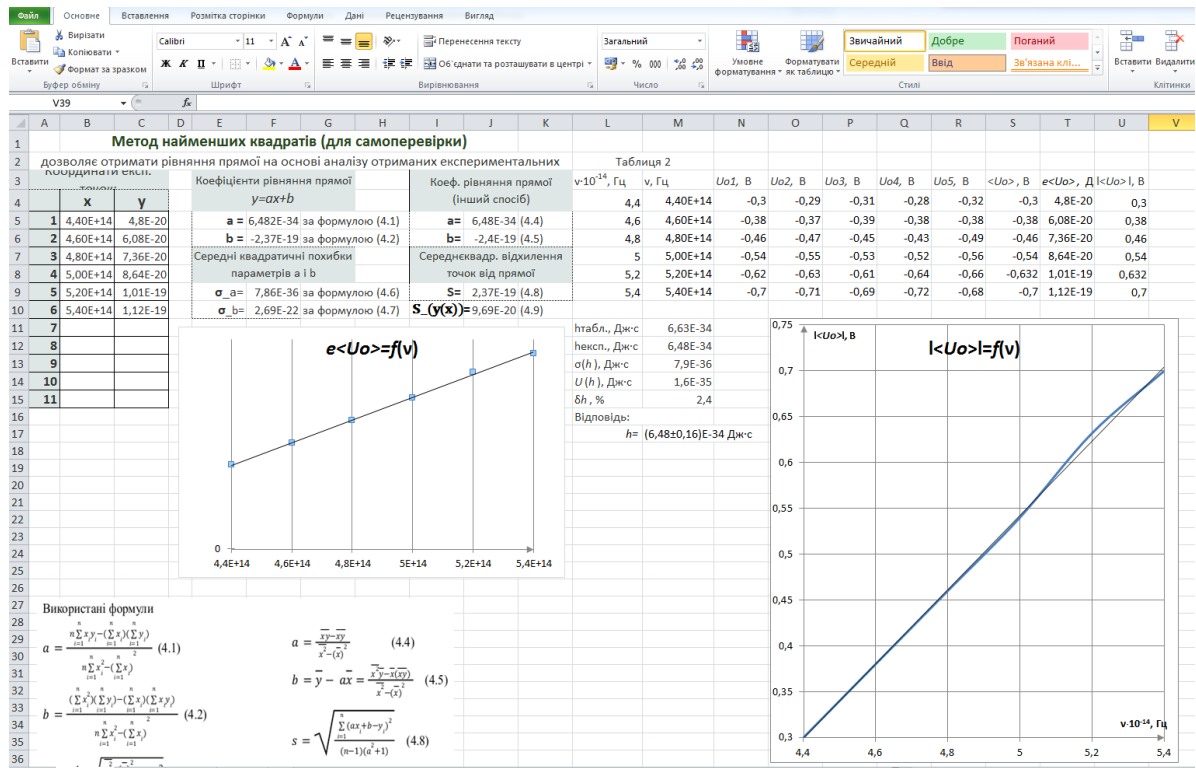
Доступ:

<http://ela.kpi.ua/handle/123456789/25320>.

5.Бурдаков А.В., Жабітенко М.К., Оліх О.Я., Подолян А.О. Лабораторний практикум з курсу «Оптика» для студентів природничих факультетів. — К.: Видавничо - поліграфічний центр «Київський університет», 2006.—74с.

5.Крочук А.С., Підзирайло М.С., Хапко З.А., Антоняк О.Т. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з молекулярної спектроскопії і люмінесценції. II частина: — Львів: Видавничий центр Львівського національного університету імені Івана Франка, 2004. — с.30

Таблиця д.2.1



Таблиця д.2.2

