

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Лабораторна робота №85. Градування термопар і визначення її термоелектрорушійної сили	5
2. Лабораторна робота №88. Дослідження напівпровідникових випрямлячів.....	13
3. Лабораторна робота №89. Вивчення температурної залежності опору напівпровідника і визначення його енергії активації.....	22
4. Лабораторна робота №101. Дослідження електричних властивостей фоторезистора.....	32
5. Лабораторна робота №102. Визначення інтегральної чутливості вентильного фотоелемента.....	37
6. Лабораторна робота №110. Дослідження роботи транзистора у схемі ввімкнення зі спільною базою.....	42
Перелік використаних джерел.....	50

ВСТУП

В зв'язку з бурхливим розвитком в наш час електронних засобів комунікації особливо важливе значення в системі знань і умінь майбутніх інженерів посідає вивчення фізики напівпровідників. Робота будь-якого електронного приладу базується на фізичних законах і явищах, які відбуваються в царині напівпровідникових матеріалів. Для більш глибокого засвоєння студентами суті цих законів і явищ і формування в них навиків використовувати їх в своїй практичній діяльності і призначений даний практикум. В практикумі значне місце відводиться принципам, ідеї фізичного експерименту. Він націлює студентів на те, щоб вони самі стали для себе першовідкривачами тих чи інших законів. Студент повинен добре розуміти, навіщо досліджується дане фізичне явище, як його дослідити, як оформити результати проведених дослідів, та як оцінити похибки експерименту.

Слід зазначити, що в наш час прогрес майже в усіх галузях науки і техніки багато в чому обумовлений успіхами напівпровідникової електроніки. Тому знання основ технічної електроніки необхідні інженерам будь-якої спеціальності. Особливо важливо уявити можливості сучасної напівпровідникової техніки для вирішення наукових та виробничих завдань в тій чи іншій галузі. Багато задач керування, вимірювання, інтенсифікації технологічних процесів, що виникають в різних галузях техніки, можуть бути успішно розв'язані спеціалістами, знайомими з основами напівпровідникового матеріалознавства.

Практикум містить 6 лабораторних робіт. В кожній роботі дається виклад теорії та вказана методика і послідовність виконання роботи, а також додається перелік запитань для перевірки засвоєних знань.

Метою даного лабораторного практикуму є знайомство з фізичними основами, принципами дії та параметрами напівпровідникових приладів, набуття навиків їх використання для вирішення виробничих завдань.

Лабораторна робота №85

ГРАДУЮВАННЯ ТЕРМОПАРИ І ВИЗНАЧЕННЯ ЇЇ ТЕРМОЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ

Мета роботи: ознайомитись з термоелектричними явищами.

Прилади і матеріали: термопара, термометри, термостійкі посудини, електронагрівна спіраль, мінеральне масло, мікровольтметр.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Контактні явища в металах

Якщо два різнорідних метали привести в контакт, то між ними виникає **контактна різниця потенціалів**. Італійський фізик А. Вольта встановив, що якщо метали Al, Zn, Sn, Pb, Hg, Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Pd привести в контакт у вказаній послідовності, то кожний попередній при дотику з одним із наступних зарядиться позитивно. Цей ряд металів називається **рядом Вольта**. А. Вольта експериментально встановив такі два закони:

1. Контактна різниця потенціалів між двома металами залежить тільки від хімічного складу і температури контактуючих металів.

2. Контактна різниця потенціалів послідовно з'єднаних різних провідників при однаковій температурі не залежить від хімічного складу проміжних провідників і рівна контактній різниці потенціалів, яка виникає при безпосередньому з'єднанні крайніх провідників.

Для пояснення явища виникнення контактної різниці потенціалів розглянемо контакт двох металів з різними роботами виходу A_1 і A_2 електронів, тобто з різними положеннями рівнів Фермі (верхніх заповнених електронами енергетичних рівнів). Якщо $A_1 < A_2$, то рівень Фермі в металі 1 вищий, ніж в металі 2- (рис. 85.1a). Таким чином, при контакті цих металів електрони з більш високих рівнів металу 1 будуть переходити на більш низькі рівні металу 2. При цьому метал 1 зарядиться позитивно, а метал 2 –

негативно. Одночасно відбувається відносне зміщення енергетичних рівнів: в металі 1, який заряджений позитивно – вниз, а в металі 2, який заряджений негативно – вверх. Цей процес буде проходити до тих пір, доки між контактуючими металами не встановиться рівновага, яка характеризується співпаданням рівнів Фермі в

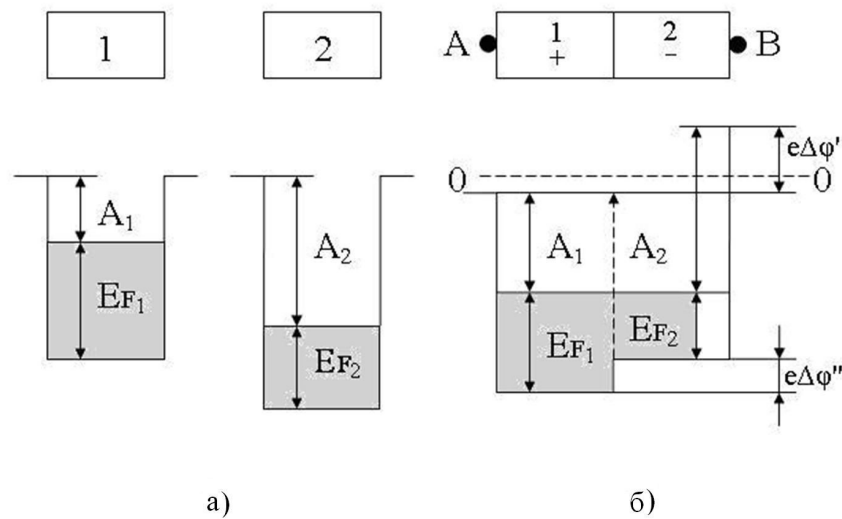


Рисунок 85.1

обидвох металах (рис. 85.1б). Оскільки в контактуючих металах рівні Фермі співпадають, а роботи виходу A_1 і A_2 електронів не змінюються, то потенціальна енергія електронів в точках А і В (рис. 85.1б) буде різною, тобто між точками А і В виникне різниця потенціалів

$$\Delta\phi' = \frac{A_2 - A_1}{e}, \quad (85.1)$$

де e – заряд електрона. Ця різниця потенціалів $\Delta\phi'$ називається **зовнішньою контактною різницею потенціалів**.

Якщо рівні Фермі E_{F1} і E_{F2} для контактуючих металів не однакові, то між внутрішніми точками в цих металах існує **внутрішня контактна різниця потенціалів**, рівна

$$\Delta\phi'' = \frac{E_{F1} - E_{F2}}{e} \quad (85.2)$$

В квантовій теорії доводиться, що причиною виникнення внутрішньої контактної різниці потенціалів є різна концентрація електронів в контактуючих металах, а її величина пропорційна температурі T в контакті металів:

$$\Delta\phi'' = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}, \quad (85.3)$$

де k – стала Больцмана; n_1 і n_2 – концентрації електронів в металах 1 і 2 відповідно. Повна контактна різниця потенціалів в контактуючих металах:

$$\Delta\phi = \Delta\phi' + \Delta\phi'' = \frac{A_2 - A_1}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} \quad (85.4)$$

1.2 Термоелектричні явища і їх застосування

Згідно другого закону А. Вольта в замкненому колі, яке складається з декількох металів при однаковій температурі, сумарна контактна різниця потенціалів рівна 0, тобто струм в колі проходити не буде. Але якщо температура контактів різна, то в колі виникає **термоелектричний струм**, оскільки при цьому сумарна контактна різниця потенціалів відмінна від 0, тобто виникає **термоелектрорушійна сила**. Явище виникнення термоелектричного струму (**явище Зеебека**), а також тісно зв'язані з ним **явища Пельтьє і Томсона** називають **термоелектричними явищами**.

Французький фізик Ж. Пельтьє виявив, що при проходженні через контакт двох різних провідників електричного струму в залежності від його напрямку, крім теплоти Джоуля виділяється (поглинається) додаткова теплота. На відміну від теплоти Джоуля, яка пропорційна квадрату сили струму, теплота Пельтьє пропорційна силі струму і

змінює знак при зміні напрямку струму. Явище Пельтьє можна пояснити так. Електрони по різні сторони від контакту металів мають різну середню енергію. Якщо електрони з більшою енергією перейдуть в метал, де є електрони з меншою енергією, то надлишок своєї енергії вони віддадуть кристалічній ґратці і місце контакту металів буде нагріватись. Якщо ж електрони з меншою енергією перейдуть в метал, де є електрони з більшою енергією, то вони будуть забирати недостачу енергії в кристалічній ґратці і контакт буде охолоджуватись. Явище Пельтьє використовується в термоелектричних напівпровідникових холодильниках та в інших електронних приладах.

В. Томсон (Кельвін), досліджуючи термоелектричні явища, виявив, що при проходженні струму по нерівномірно нагрітому провіднику відбувається додаткове виділення (поглинання) теплоти, аналогічної теплоті Пельтьє. Це явище отримало назву **ефекту Томсона**. Оскільки в більш нагрітій частині провідника електрони мають більшу середню енергію, то, рухаючись в напрямі зменшення температури, вони віддають частину своєї енергії кристалічній ґратці, що й обумовлює виділення теплоти Томсона. Якщо ж електрони рухаються в сторону збільшення температури, то вони, навпаки, поповнюють свою енергію за рахунок зменшення енергії кристалічної ґратки, в результаті чого відбувається поглинання теплоти Томсона.

Розглянемо електричне коло із двох спаяних між собою різнорідних провідників. Такий пристрій називається термопарою. При однакових температурах T контактів 1 і 2 термопари (рис. 85.2а)

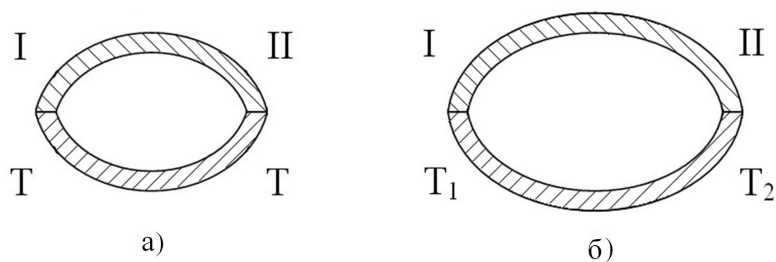


Рисунок 85.2

струм в колі відсутній, оскільки контактні різниці потенціалів в обидвох спаях рівні за величиною, але компенсують одна одну, тобто результуюча контактна різниця потенціалів $\Delta\varphi$, яка рівна термоелектрорушійній силі ε , згідно співвідношення (85.4)

$$\Delta\varphi = \varepsilon = \Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1 = 0 \quad (85.5)$$

Якщо ж температури спаїв 1 і 2 різні (рис. 85.2б), то загальна контактна різниця потенціалів в колі при $T_2 > T_1$

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1 \quad (85.6)$$

Підставивши значення $\Delta\varphi_1$ і $\Delta\varphi_2$ згідно співвідношення (85.4) в (85.6), отримаємо:

$$\Delta\varphi = \frac{\kappa T}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} (T_2 - T_1) \quad (85.7)$$

Загальна контактна різниця потенціалів є сумою стрибків потенціалів у замкненому колі, отже є термоелектрорушійною силою:

$$\varepsilon = \Delta\varphi = \frac{\kappa T}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} \Delta T, \quad (85.8)$$

де $\Delta T = T_2 - T_1$. Величина

$$\alpha = \frac{\kappa T}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} \quad (85.9)$$

називається **диференціальною термоелектрорушійною силою**. Вона є постійною для даної пари металів в широкому діапазоні температур. З урахуванням (85.9) вираз (85.8) набуває вигляду:

$$\varepsilon = \alpha \Delta T, \quad (85.10)$$

звідки

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{\Delta T}, \quad (85.11)$$

тобто диференціальна термодинамічна сила є термоелектрорушійною силою при різниці температур між спаями $\Delta T = 1\text{К}$.

З метою градуювання термопарі її спаї занурюють в посудини з маслом, в яких містяться термометри. В одній з цих

посудин є електронагрівна спіраль, що дає змогу змінювати різницю температур ΔT між спаями досліджуваної термопари. Для вимірювання термоелектрорушійної сили ε в коло термопари ввімкнений мікровольтметр (рис. 85.3).

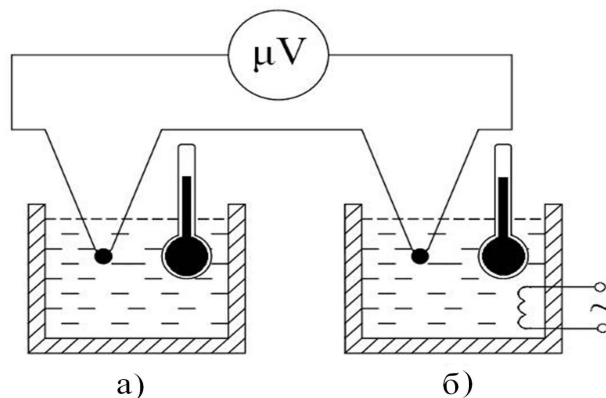


Рисунок 85.3

Термопару – комбінацію двох провідників різного хімічного складу – найчастіше використовують для вимірювання температури. До її вільних кінців приєднують чутливий гальванометр. Знаючи силу струму, яку показує гальванометр, можна визначити термоелектрорушійну силу термопари. На практиці, як правило, шкала гальванометра проградуєвана в градусах температури. За допомогою термопар з точністю до сотих часток градуса можна вимірювати як низькі, так і високі температури. Для вимірювання високих температур (до 1900K) зазвичай застосовують платинові термопари. При цьому термопару розміщують у трубці з вогнетривкого матеріалу. Кінець із спаям обох металів поміщають в середовище, температуру якого потрібно виміряти. Для вимірювання відносно низьких температур (до 700K) найчастіше використовують мідно-константанові та залізо-константанові термопари.

2 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Завдання 1. Градування термопари

1. Скласти електричну схему (рис. 85.3).
2. За допомогою термометра визначити температуру T_0 „холодного” спаю.
3. Підігрівати масло в посудині з „гарячим” спаєм за допомогою електронагрівної спіралі.
4. Через кожні 5 градусів визначати різницю температур $\Delta T = T - T_0$ „гарячого” і „холодного” спаїв та знімати відповідні покази ε вольтметра.
5. Дані вимірювань занести в таблицю.

Таблиця 85.1

№ п.п.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta T, K$										
$\varepsilon, мВ$										

6. Побудувати графік $\varepsilon = f(\Delta T)$ залежності термоелектрорушійної сили ε від різниці температур ΔT між „гарячим” і „холодним” спаями термопари.
7. Зробити висновок.

Завдання 2. Визначення диференціальної термоелектрорушійної сили

1. Користуючись графіком залежності $\varepsilon = f(\Delta T)$, визначити диференціальну термоелектрорушійну силу α . На графіку, де величина буде визначатись кутовим коефіцієнтом дотичної до експериментальної кривої, її можна визначити за формулою

$$\alpha = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\Delta T_2 - \Delta T_1}, \quad (85.12)$$

де $(\Delta T_1; \varepsilon_1)$ і $(\Delta T_2; \varepsilon_2)$ – координати точок 1 і 2 відповідно на графіку $\varepsilon=f(\Delta T)$.

2. Згідно формули (85.9) оцінити теоретичне значення диференціальної термоелектрорушійної сили та порівняти його з експериментально визначеним значенням α .

3. Зробити висновок.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Якими причинами обумовлена контактна різниця потенціалів на межі стику двох металів?
2. З яких складових частин складається контактна різниця потенціалів?
3. Від чого і як залежить зовнішня контактна різниця потенціалів?
4. Від чого і як залежить внутрішня контактна різниця потенціалів?
5. Поясніть утворення контактної різниці потенціалів на основі зонної теорії твердого тіла.
6. Які явища називають термоелектричними?
7. Що таке ефект Зеебека? Які умови необхідні для його виникнення?
8. Що таке явище Пельтьє і як воно відбувається?
9. Що таке явище Томсона і які процеси в провіднику при цьому відбуваються?
10. Що є причиною виникнення термоелектрорушійної сили і від чого залежить її величина?
11. Що являє собою термопара?
12. Яке практичне застосування термопар?

13. Які основні переваги термопари перед звичайним термометром?
14. Що таке диференціальна термоелектрорушійна сила?
15. Від чого і як залежить величина диференціальної термоелектричної сили?
16. Фізичний зміст диференціальної термоелектричної сили.

Лабораторна робота №88

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ

Мета роботи: ознайомитись з елементами зонної теорії домішкових напівпровідників, отримати вольт-амперні характеристики напівпровідникових випрямлячів та визначити їх коефіцієнт випрямлення.

Прилади і матеріали: селеновий і германієвий напівпровідникові діоди, вольтметр, міліамперметр, мікроамперметр, реостат, джерело постійного струму, однополюсний електричний вимикач, двохполюсний перемикач.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Елементи зонної теорії домішкових напівпровідників

Електропровідність напівпровідників, обумовлена домішками, називається домішковою провідністю, а самі напівпровідники – домішковими напівпровідниками. Домішками можуть бути атоми сторонніх хімічних елементів, надлишкові атоми, пусті вузли кристалічної ґратки, міжвузольні атоми. Наявність в напівпровіднику домішок суттєво змінює його електропровідність.

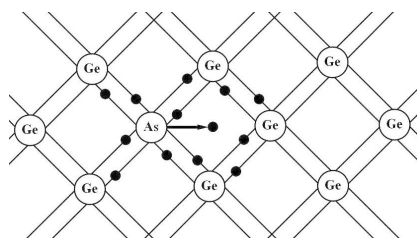


Рисунок 88.1

При заміщенні чотирьохвалентного атома германію п'ятивалентним атомом миш'яку один його електрон виявляється зайвим і не утворює ковалентного зв'язку. При теплових коливаннях кристалічної ґратки він легко відокремлюється від атома, тобто стає вільним (рис. 88.1). Утворення вільного електрона не супроводжується порушенням ковалентного зв'язку і внаслідок цього дірка не виникає. Надлишковий позитивний заряд, що міститься поблизу атома домішки, зв'язаний з ним і тому переміщуватись по кристалу не може. З точки зору зонної теорії твердого тіла цей процес можна пояснити так. Введення домішки

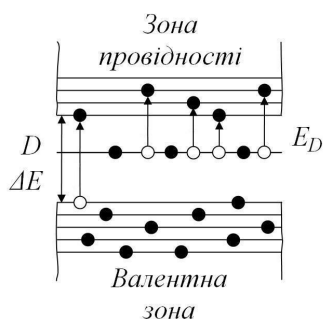


Рисунок 88.2

спотворює силове поле ґратки, що обумовлює виникнення в забороненій зоні енергетичного рівня D валентних електронів миш'яку, який називається донорним рівнем (рис. 88.2). Цей рівень розміщується близько від дна зони провідності германію. Вже при

звичайних температурах енергія теплового руху достатня для того, щоб перекинути електрони з домішкового рівня D в зону провідності. Дірки, які утворюються при цьому, локалізуються на нерухомих атомах миш'яку і участі в провідності не беруть.

Отже в напівпровідниках з домішкою, валентність якої на одиницю більша, ніж валентність основних атомів, носіями струму є електрони. В цьому випадку виникає електронна домішкова провідність n-типу. Домішки, які є джерелом електронів, називаються **донорами**, а енергетичні рівні цих домішок – **донорними рівнями**. Якщо, наприклад, у кристал кремнію введено домішковий атом бору з трьома валентними електронами, то один із ковалентних зв'язків залишається неukoмплектованим і четвертий електрон може бути захоплений від сусіднього атома основної речовини, де утворюється дірка (вакансія)(рис. 88.3). Дірки не залишаються локалізованими, а переміщуються в ґратці кремнію як

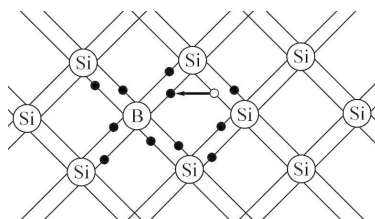


Рисунок 88.3

вільні позитивні заряди. Надлишковий від'ємний заряд, що виникає поблизу атома домішки, зв'язаний з ним і по ґратці переміщатись не може.

Згідно із зонною теорією твердого тіла введення трьохвалентного атома в ґратку кремнію обумовлює виникнення в забороненій зоні основного матеріалу домішкового рівня A, не зайнятого електронами (рис. 88.4). Цей рівень розміщений вище верхнього краю валентної зони. При порівняно низьких температурах електрони із валентної зони переходять на домішкові рівні в забороненій зоні і, зв'язуючись з атомами домішки, втрачають здатність переміщатись по ґратці основного матеріалу, тобто в провідності участі не беруть. Носіями струму є тільки

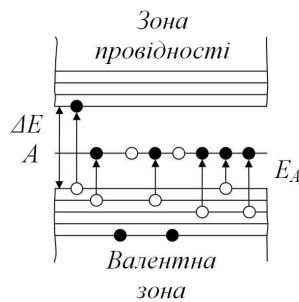


Рисунок 88.4

квазічастинки, тобто дірки. Домішкові напівпровідники з такою провідністю називаються дірковими (р-типу). Домішки, які захоплюються електронами із валентної зони напівпровідника, називаються **акцепторами**, а енергетичні рівні цих домішок – **акцепторними рівнями**.

Слід зауважити, що крім розглянутих основних носіїв у домішковому напівпровіднику є ще неосновні носії, у напівпровіднику n-типу – дірки, а в напівпровіднику р-типу – електрони. Концентрація основних носіїв у домішковому напівпровіднику в багато разів більша, ніж концентрація неосновних носіїв.

1.2 р-n-напівпровідниковий перехід і його вольт-амперна характеристика

При контакті двох напівпровідників з різним типом провідності на їх межі утворюється подвійний заряджений шар. Електрони з n-напівпровідника будуть дифундувати в дірковий напівпровідник. Це обумовить збіднення електронами n-напівпровідника поблизу контактної межі і утворення в ньому надлишкових позитивних зарядів. (рис 88.5)

Дифузія ж дірок з р-напівпровідника в n-напівпровідник обумовить утворення надлишкових негативних зарядів у дірковому напівпровіднику на межі електронно-діркового переходу. Таким чином утвориться подвійний заряджений шар, який перешкоджає

наступному переходу електронів і дірок через межу розділу двох напівпровідників з різними типами провідності. Цей подвійний заряджений шар є потенціальним бар'єром для електронів і дірок. Він має підвищений електричний опір і перешкоджає дифузії електронів з n- в р-напівпровідник та дірок з р- в n-напівпровідник. По цій причині подвійний заряджений шар на р-n-переході називається **запiрним**. Вектор напруженості E_0 запiрного шару напрямлений з n-напівпровідника в р-напівпровідник (рис. 88.5). Дія зовнішнього електричного поля істотно впливає на опір запiрного шару.

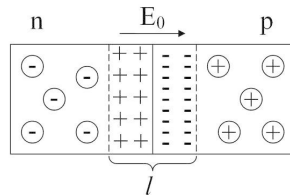


Рисунок 88.5

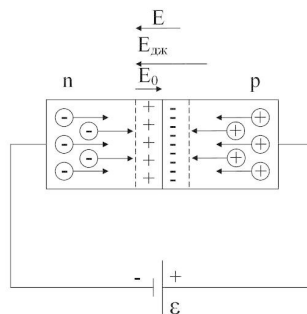


Рисунок 88.6

Під'єднаємо до р-n-переходу джерело струму ε так, що n-напівпровідник контактує з від'ємним полюсом, а р-напівпровідник – з додатнім полюсом джерела. Електричне поле джерела ε напруженістю $E_{дж}$ напрямлене протилежно до вектора напруженості E_0 запiрного шару. Оскільки $E_{дж} \gg E_0$, то вектор напруженості E результуючого електричного поля напрямлений з р-

в n-напівпровідник, тобто сприяє збільшенню струму через нього. Цей напрям струму називається прямим (рис. 88.6).

Якщо змінити полярність прикладеної до р-n-переходу напруги джерела ε (від'ємний полюс джерела струму приєднати до р-напівпровідника, а додатний – до n-напівпровідника), то напрям напруженості $E_{дж}$ джерела струму буде співпадати з напрямом напруженості E_0 заперного шару, тобто результуюча напруженість E значно підвищить потенціальний бар'єр заперного шару (рис. 88.7). В цьому випадку ширина заперного шару на р-n-переході збільшиться, а концентрація вільних зарядів – електронів і дірок – значно менша, ніж в контактуючих домішкових напівпровідниках.

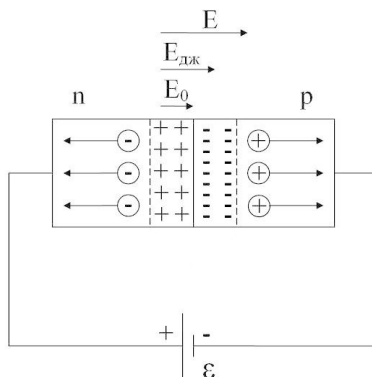


Рисунок 88.7

Чим більша заперна напруженість р-n-переходу, тим товстішим є заперний шар. При значній величині оберненої напруги заперний шар є практично ізолятором, в якому відсутні вільні носії струму. У випадку контакту ідеальних домішкових напівпровідників різного типу провідності зворотного струму не повинно бути. Насправді ж зворотний струм існує. Він обумовлений неосновними носіями (електронами в дірковому напівпровіднику та дірками в електронному напівпровіднику). Типова вольт-амперна характеристика реального р-n-переходу представлена на рис. 88.8.

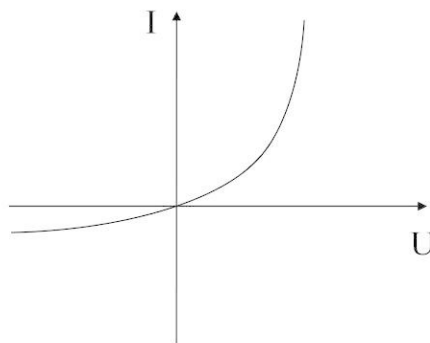


Рисунок 88.8

При прикладенні змінної напруги до р-п-переходу реалізується одностороння провідність, тобто відбувається випрямлення змінного струму. Такий р-п-перехід називається **напівпровідниковим діодом**. Його ефективність характеризується **коефіцієнтом випрямлення** α , який рівний відношенню

прямого $I_{пр}$ і зворотного $I_{зв}$ струмів при однаковій напрузі ($U = \text{const}$):

$$\alpha = \frac{I_{пр}}{I_{зв}}. \quad (88.1)$$

Чим більший коефіцієнт випрямлення α , тим більш ефективним є напівпровідниковий діод.

Для дослідження напівпровідникового діода використовується установка, електрична схема якої зображена на рис. 88.9.

2 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Зібрати електричну схему згідно рис. 88.9.

2. Встановити повзунок потенціометра ПТ в положення, яке відповідає найменшій напрузі.

3. Ввімкнути селеновий випрямляч, для чого перемикач ПК ввімкнути на клема 1-2, а ключ К – на клему 5.

4. Пересуваючи повзунок потенціометра ПТ, збільшувати напругу через 0,5 В, записуючи при цьому покази вольтметра і міліамперметра.

5. Для зняття вольт-амперної характеристики при зворотному струмі ввімкнути перемикач ПК на клема 3-4, поставивши заздалегідь повзунок потенціометра ПТ в положення, яке відповідає найменшій напрузі.

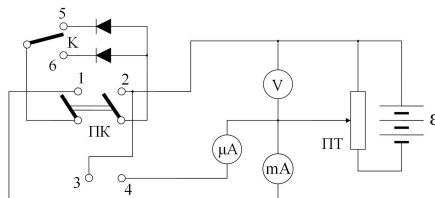


Рисунок 88.9

6. Пересуваючи повзунок потенціометра ПТ, збільшувати напругу через кожні 0,5 В, записуючи при цьому покази вольтметра і міліамперметра.

7. Аналогічно вимірювання (п.п. 2-6) провести для германієвого випрямляча, перемкнувши ключ К на клему 6.

8. Результати вимірювань і обчислень занести в таблицю.

Таблиця 88.1

№ п.п	Селеновий випрямляч							Германієвий випрямляч						
	$U_{пр},$ В	$I_{пр},$ А	$U_{зв},$ В	$I_{зв},$ А	α	$\Delta\alpha$	$\Delta\alpha/\alpha$	$U_{пр},$ В	$I_{пр},$ А	$U_{зв},$ В	$I_{зв},$ А	α	$\Delta\alpha$	$\Delta\alpha/\alpha$

9. За результатами вимірювань побудувати вольт-амперні характеристики для селенового і германієвого випрямлячів. Для

цього по вісі абсцис відкладати значення напруги, а по вісі ординат – відповідні значення струму. Прямі значення напруг і струмів відкладати на додатних піввісях координат, а зворотні значення напруг і струмів – на від’ємних піввісях координат.

10. За формулою (88.1) розрахувати значення коефіцієнта випрямлення α для досліджуваних випрямлячів при різних значеннях напруги.

11. Визначити абсолютну і відносну похибки для коефіцієнта випрямлення і зробити висновок.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Яка різниця між власними і домішковими напівпровідниками?

2. Які домішки у напівпровіднику називаються донорами? Навести конкретний приклад.

3. Які домішки у напівпровіднику називаються акцепторами? Навести конкретний приклад.

4. На основі зонної теорії твердих тіл пояснити електропровідність домішкового напівпровідника n-типу.

5. На основі зонної теорії твердих тіл пояснити електропровідність домішкового напівпровідника p-типу.

6. Які явища відбуваються на контакті двох напівпровідників різного типу провідності?

7. Що таке заірний шар? Чому він так називається?

8. Пояснити електропровідність заірного шару при прямому ввімкненні зовнішнього джерела струму.

9. Пояснити електропровідність заірного шару при зворотному ввімкненні зовнішнього джерела струму.

10. Що є причиною виникнення зворотного струму в напівпровідниковому випрямлячі?

11. Пояснити вольт-амперну характеристику напівпровідникового випрямляча.

12. Що таке коефіцієнт випрямлення напівпровідникового випрямляча і від чого він залежить?

13. Де можуть використовуватись напівпровідникові випрямлячі, зокрема у Вашій спеціальності?

Лабораторна робота №89

ВИВЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ОПОРУ НАПІВПРОВІДНИКА І ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО ЕНЕРГІЇ АКТИВАЦІЇ

Мета роботи: ознайомитись з основами зонної теорії твердого тіла, дослідити температурну залежність опору власного напівпровідника та визначити його енергію активації.

Прилади і матеріали: цифровий омметр, логометр, нагрівна піч, термостійка пробірка, термоопір, дослідницький напівпровідник.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Зонна теорія твердого тіла

Розглянемо процес утворення кристала з ізольованих атомів. Якщо атоми перебувають на великих відстанях один від одного, то схеми їх енергетичних рівнів повністю ідентичні. При цьому їх заповнення електронами здійснюється в кожному атомі незалежно від заповнення аналогічних рівнів в інших атомах. При утворенні кристалу, по мірі зближення атомів між ними посилюється взаємодія, яка і обумовлює зміну положення енергетичних рівнів.

Замість одного ідентичного рівня для всіх N атомів, які утворюють кристал, виникає N щільно розміщених підрівнів. Таким чином, кожний енергетичний рівень атома розширюється, зміщується і розщеплюється в кристалі на N дуже близьких підрівнів, які утворюють **енергетичну зону**.

Ступінь розширення зони для різних енергетичних рівнів не однакова. Більш інтенсивно збурюються рівні, заповнені в атомі зовнішніми (валентними) електронами. Тому відповідні енергетичні зони порівняно широкі. Рівні, заповнені внутрішніми електронами, які сильніше зв'язані з ядром, зазнають тільки незначних збурень від інших атомів, внаслідок чого їх енергетичні рівні в кристалі утворюють вузькі енергетичні зони. На рис. 89.1 показано розщеплення енергетичних дискретних рівнів ізолюваних атомів і утворення енергетичних зон при зменшенні відстані r між сусідніми атомами. Із зонної схеми видно, що розщеплення рівнів, яке спостерігається для внутрішніх електронів, досить мале. Інтенсивно розщеплюються тільки вищі енергетичні рівні, зайняті зовнішніми валентними електронами.

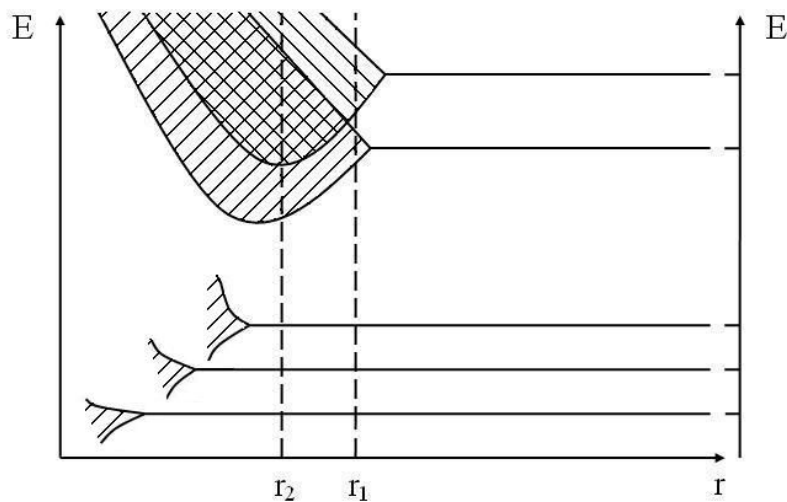


Рисунок 89.1

Ступінь заповнення електронами енергетичних підрівнів у зоні визначається заповненням відповідного рівня в ізольованому атомі. Із незайнятих рівнів утворюються вільні енергетичні зони, із частково заповнених – частково заповнені енергетичні зони. В загальному випадку можна говорити про 3 типи енергетичних зон в твердому тілі: валентну зону, зону провідності (вільну зону) та заборонену зону. **Валентна зона** утворюється із енергетичних рівнів внутрішніх (зв’язаних) валентних електронів вільних атомів. **Зона провідності (вільна зона)** або частково заповнена електронами, або вільна і утворена із енергетичних рівнів зовнішніх “колективізованих” вільних електронів ізольованих атомів. Валентна зона I і зона провідності II є дозволеними і розділені забороненою зоною III (рис.89. 2).

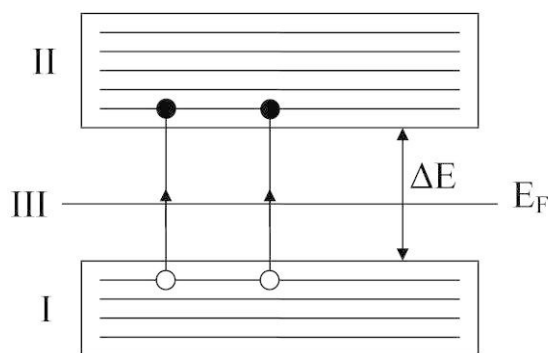


Рисунок 89.2

В забороненій зоні електрони не можуть перебувати. Таким чином, **заборонена зона** – це сукупність значень енергії, яких не можуть набувати електрони в твердому тілі. Ширина енергетичних зон не залежить від розмірів кристала. Дозволені зони (валентна і вільна) тим ширші, чим слабший зв’язок валентних електронів із ядрами.

Зонна теорія твердого тіла дає змогу з єдиної точки зору пояснити існування металів, діелектриків і напівпровідників, інтерпретуючи відмінності їх електрофізичних властивостей неоднаковим заповненням електронами дозволених енергетичних зон та шириною забороненої зони. Відмінність між металами і діелектриками з точки зору зонної теорії полягає в тому, що при температурі $T = 0\text{K}$ в зоні провідності металів є електрони, а в зоні провідності діелектриків вони відсутні. Різниця ж між діелектриками і напівпровідниками визначається шириною забороненої зони: для діелектриків вона досить широка ($>1\text{eV}$), а для напівпровідників – досить вузька ($<1\text{eV}$).

В залежності від внутрішньої будови твердого тіла рівноважна відстань між сусідніми атомами в кристалі може бути або типу r_1 (для діелектриків і напівпровідників), або типу r_2 (для металів) (рис. 89.1). При відстанях типу r_1 між валентною зоною і зоною провідності існує заборонена зона. При відстанях типу r_2 відбувається перекривання валентної зони і зони провідності, тобто немає забороненої зони. Зонну структуру енергетичного спектру твердого тіла можна отримати безпосередньо із розв'язку рівняння Шредінгера для електрона, який рухається в періодичному силовому полі кристалічної ґратки.

1.2 Електрофізичні властивості власних напівпровідників

Всі напівпровідникові матеріали можна розділити на дві групи – **власні** і **домішкові** напівпровідники. Власними напівпровідниками є хімічно чисті елементи (Ge, Si, Se) а також хімічно чисті сполуки (InSb, GaAs, CdS) та ін. Одним із найбільш поширених напівпровідникових елементів є кремній, який має кристалічну структуру типу алмазу, в якій кожний атом з'єднаний ковалентними зв'язками з чотирма найближчими сусідніми атомами. Спрощена плоска схема розміщених атомів в кристалі зображена на рис. 3, де кожна риска позначає ковалентний зв'язок, здійснюваний одним електроном. В ідеальному кристалі при температурі $T = 0\text{K}$ така структура є діелектриком, оскільки всі валентні електрони утворюють хімічні зв'язки і, таким чином, не

існує вільних зарядів. При підвищенні температури(або під дією інших зовнішніх факторів) теплові коливання ґратки можуть обумовлювати розрив деяких ковалентних зв'язків, тобто частина електронів переходить у вільний стан. В покинутому електроном місці утворюється вакансія, яка отримала назву дірки (на рис. 89.3 вона зображена світлим кружечком), заповнити яку можуть електрони із сусідньої пари. В результаті вакансія (дірка), так як і вільний електрон, буде рухатись по кристалу. Рухи електронів провідності і квазічастинок – дірок при відсутності зовнішнього електричного поля будуть хаотичними. Якщо ж на кристал накласти електричне поле, то електрони почнуть рухатись проти напруженості поля, а квазічастинки (дірки) – за полем, що

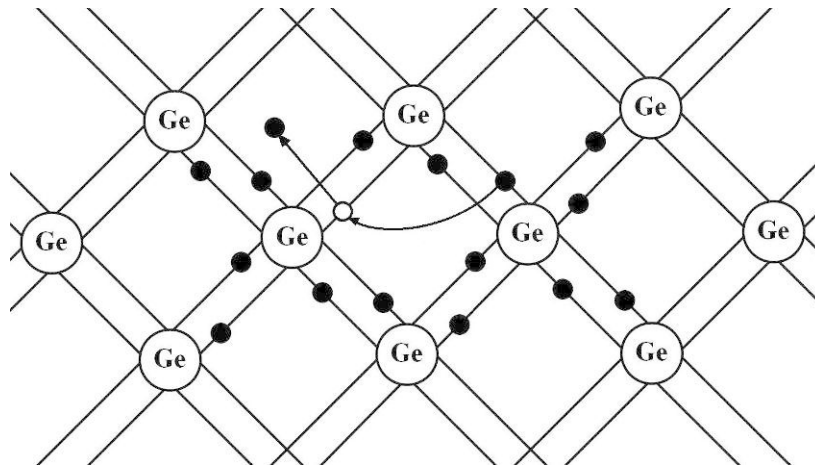


Рисунок 89.3

обумовить **власну провідність** напівпровідника. Провідність власних напівпровідників, обумовлена вільними електронами, називається **електронною провідністю** (провідність n-типу). Електропровідність власних напівпровідників, обумовлена квазічастинками (дірками), називається **дірковою провідністю**

(провідність р-типу). Отже, у власних напівпровідниках є два механізми провідності – електронна і діркова. Кількість електронів в зоні провідності рівна кількості дірок у валентній зоні.

Провідність напівпровідників завжди є збудженою, тобто проявляється тільки під дією зовнішніх факторів (температури, опромінення, сильних електричних полів і т.д.). У власному напівпровіднику рівень Фермі E_F знаходиться посередині забороненої зони (рис.89.2). Рівень Фермі – це особливий енергетичний рівень. Його специфіка полягає в тому, що при температурі $T = 0K$ він повністю заповнений електронами. Вищі енергетичні рівні при цій температурі є порожніми. При вищій температурі ($T > 0K$) ймовірність заповнення електронами рівня Фермі становить 50%.

Для переходу електрона з верхнього рівня валентної зони на нижній рівень зони провідності затрачається **енергія активації**, яка рівна ширині ΔE забороненої зони (рис.89.2). При появі електрона в зоні провідності у валентній зоні виникає дірка. Отже енергія, затрачена на утворення пари носіїв струму, повинна ділитись на дві рівні частини. Тому енергія, яка відповідає половині ширини забороненої зони, іде на перекидання електрона і така ж сама енергія затрачається на утворення дірки. Початок відліку кожного з цих процесів повинен знаходитись посередині забороненої зони. Енергія Фермі у власному напівпровіднику – це енергія, від якої відбувається збудження електронів і дірок.

Температурна залежність опору R власного напівпровідника виражається співвідношенням:

$$R = R_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (89.1)$$

де R_0 – стала для даного напівпровідника величина, k – стала Больцмана, T – абсолютна температура. Зменшення опору напівпровідника з підвищенням температури є його характерною особливістю і з точки зору зонної теорії пояснюється дуже просто: при підвищенні температури збільшується кількість електронів, які внаслідок теплового збудження переходять із валентної зони в зону провідності і беруть участь в електропровідності.

Для вивчення температурної залежності опору напівпровідників використовується установка, схема якої подана на рис. 89.4. Досліджуваний напівпровідник 2 міститься в термостаті 6. Термостат нагрівається за допомогою електropечі 1, всередині якої він знаходиться. Для вимірювання електричного опору досліджуваного напівпровідника служить цифровий омметр 5. Вимірювання температури в термостаті здійснюється за допомогою логометра 4. Датчиком температури є термоопір 3, який разом із досліджуваним зразком знаходиться всередині термостата.

Для отримання робочої формули визначення енергії активації A прологарифмуємо формулу (89.1). При цьому отримується співвідношення:

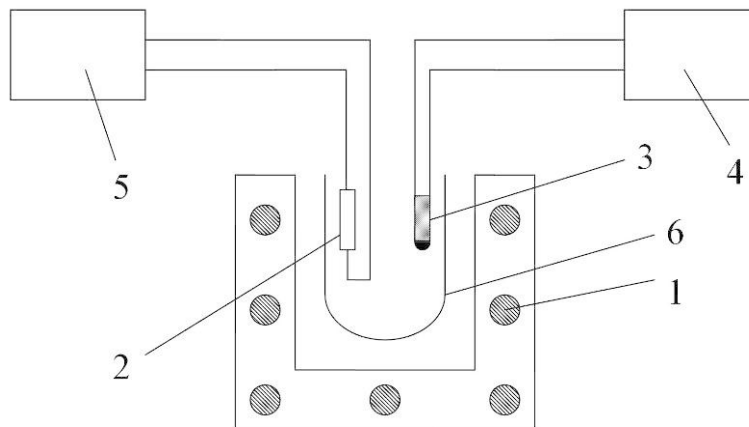


Рисунок 89.4

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta E}{2k} \frac{1}{T} \quad (89.2)$$

Графіком залежності (89.2) в координатах $(\frac{1}{T}, \ln R)$ є пряма (див. рис. 89.5), кутовий коефіцієнт якої

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta E}{2k} . \quad (89.3)$$

Із рис. 89.5 видно, що

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} . \quad (89.4)$$

Прирівнявши праві частини (89.3) і (89.4), отримаємо:

$$\frac{\Delta E}{2k} = \frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} , \quad (89.5)$$

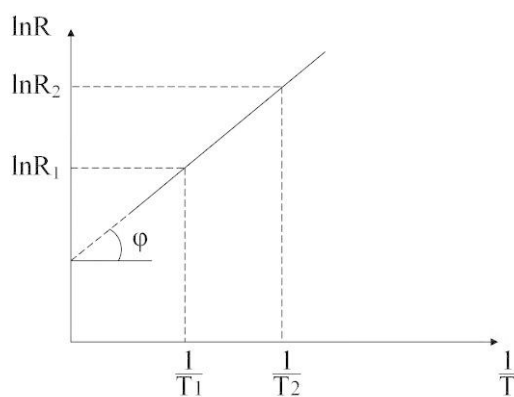


Рисунок 89.5

звідки енергія активації

$$A = \Delta E = 2k \frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}, \quad (89.6)$$

або

$$A = 2kT_1T_2 \frac{\ln R_2 - \ln R_1}{T_1 - T_2}. \quad (89.7)$$

Відносна похибка енергії активації

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta T(T_1 + T_2)}{T_1T_2} + \frac{2\Delta T}{T_1 - T_2} + \frac{\Delta R(R_1 + R_2)}{R_1R_2(\ln R_2 - \ln R_1)}. \quad (89.8)$$

Слід звернути увагу, що, згідно позначень на рис.89.5, $T_2 \gg T_1$.

2 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Ознайомитись з експериментальною установкою, зокрема з правилами користування цифровим омметром і логометром.

2. Підвищуючи температуру в пробірці від кімнатної до 70°C, записати покази омметра через кожні 5°C.

3. Побудувати графік залежності $R = f_1(T)$ і зробити висновок.

4. Побудувати графік залежності $\ln R = f_2(1/T)$ і, використовуючи його, за формулою (89.7) обчислити енергію активації досліджуваного напівпровідника. При цьому звернути увагу, що температура виражається в кельвінах.

5. Використовуючи формулу (89.8), визначити відносну і абсолютну похибки енергії активації.

6. Результати вимірювань і обчислень занести в таблицю.
7. Зробити висновок.

Таблиця 89.1

№ п.п	T , К	R , Ом	$\frac{1}{T}$, К ⁻¹	$\ln R$	ΔT , К	ΔR , Ом	A , Дж	ΔA , Дж	$\frac{\Delta A}{A}$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Поясніть процес утворення енергетичних зон в твердому тілі.
2. Що таке валентна зона, зона провідності, заборонена зона?
3. Яка різниця між металами, напівпровідниками і діелектриками з точки зору зонної теорії твердого тіла?
4. Поясніть суть електронної і діркової провідності напівпровідників.
5. Чому дірки називають квазічастинками?
6. Поясніть залежність опору напівпровідників від температури.
7. Наведіть приклад практичного використання залежності опору напівпровідників від температури.
8. Виведіть робочу формулу для визначення енергії активації напівпровідника.
9. Як, користуючись експериментальними результатами дослідження температурної залежності опору напівпровідника, визначити його енергію активації?
10. Що таке рівень Фермі і які його особливості?
11. Які напівпровідники є власними і які їх особливості?
12. Де знаходиться рівень Фермі у власному напівпровіднику?
13. Що таке енергія активації напівпровідника?
14. Яким основним фактором визначається електропровідність напівпровідника?

Лабораторна робота №101

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФОТОРЕЗИСТОРА

Мета роботи: ознайомитись з вольт-амперною характеристикою фоторезистора та визначити його питому інтегральну чутливість.

Прилади і матеріали: оптична лава, електрична лампочка розжарювання, джерело струму, фоторезистор, потенціометр, вольтметр, мікроамперметр.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Будова і принцип дії фоторезистора

Робота різних напівпровідникових приладів випромінювання, до яких належить і фоторезистор, базується на використанні явища **внутрішнього фотоефекту**. Воно полягає в тому, що під дією випромінювання в напівпровідниках відбувається генерація пар носіїв заряду – електронів і дірок. Суть цього процесу полягає в

тому, що якщо енергія фотона більша від ширини забороненої зони напівпровідника, то електрон переходить із валентної зони в зону провідності (розривається ковалентний зв'язок і електрон переходить із зв'язаного стану у вільний). При цьому у валентній зоні напівпровідника виникає дірка. Ці додаткові вільні заряди, які виникають у напівпровіднику внаслідок опромінення, суттєво збільшують його електропровідність, яка отримала назву **фотопровідності**.

Фоторезистор являє собою напівпровідниковий резистор, електроопір якого змінюється під дією випромінювання. Принципова схема будови фоторезистора зображена на рис. 101.1. На діелектричну пластину 1 нанесено тонкий шар напівпровідника 2 з контактами 3 по краях. Щоб запобігти механічному пошкодженню напівпровідникового шару, його покривають прозорою захисною плівкою 4. Полярність джерела електричного струму, яке під'єднують до контактів 3, може бути довільною. Якщо світло не попадає на фоторезистор, то він має великий електричний опір R_t ,

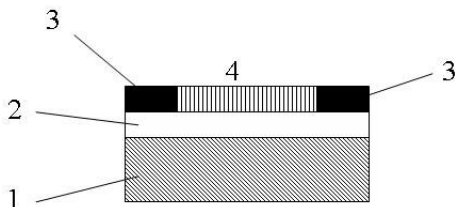


Рисунок 101.1

який називається **темновим**. Він є однією із основних характеристик фоторезистора і становить $(10^4 \div 10^7)$ Ом. Відповідний струм I_t через фоторезистор називається **темновим струмом**.

Під дією випромінювання з великою енергією фотонів в фоторезисторі відбувається генерація вільних рухомих зарядів (електронів і дірок) і його опір значно зменшується.

Для отримання фоторезисторів використовують різні напівпровідники з необхідними властивостями. Так, наприклад, сірчистий свинець найбільш чутливий до інфрачервоного випромінювання, а сірчистий кадмій – до видимого світла. Значна

залежність опору напівпровідника від температури є суттєвим недоліком для фоторезисторів. Суттєвим недоліком слід вважати також їх велику інерційність, яка пояснюється досить великим часом рекомбінації електронів і дірок після припинення опромінювання. Практично фоторезистори використовують для змінного струму частотою $\nu = (10^2 - 10^3)$ Гц. Фоторезистори широко використовуються в різних схемах автоматики.

1.2 Чутливість фоторезисторів

Залежність величини фотоструму i від прикладеної до фоторезистора напруги U при сталому світловому потоці Φ називається **вольт-амперною характеристикою**. Для зняття вольт-амперної характеристики фотоопору використовується експериментальна установка, зображена на рис. 101.2. Фоторезистор R_Φ і освітлювач розміщені на оптичній лаві. На клеми фоторезистора R_Φ подається різниця потенціалів U від джерела постійного струму $\mathcal{E}$.

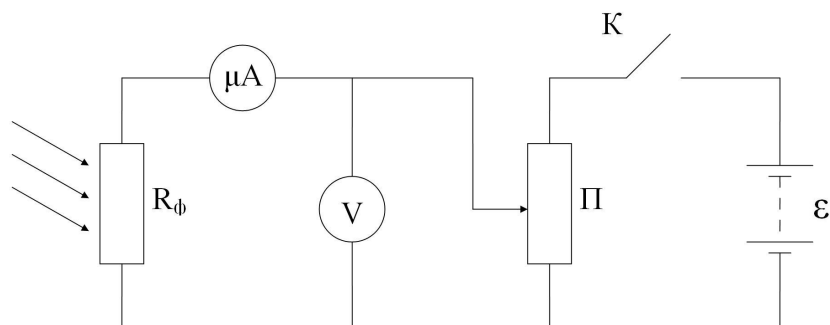


Рисунок 101.2

Величина напруги регулюється пересуванням повзунка реохорда П і вимірюється вольтметром V. Струм i через фоторезистор R_Φ вимірюється мікроамперметром μA . Фоторезистори мають лінійну вольт-амперну характеристику. Важливою характеристикою фоторезистора є **питома інтегральна чутливість γ** , яка рівна відношенню

величини

фотоструму i_ϕ до величини світлового потоку Φ , віднесеної до одиниці прикладеної до фоторезистора напруги U :

$$\gamma = \frac{i_\phi}{\Phi U} \quad (101.1)$$

Струм i через фоторезистор складається із темнового струму i_t і фотоструму i_ϕ :

$$i = i_t + i_\phi, \quad (101.2)$$

звідки величина фотоструму:

$$i_\phi = i - i_t. \quad (101.3)$$

Величина світлового потоку:

$$\Phi = ES, \quad (101.4)$$

де E – освітленість фоторезистора, S – площа поверхні фоторезистора. Освітленість:

$$E = \frac{I}{r^2}, \quad (101.5)$$

де I – сила світла джерела освітлення, r – відстань від джерела світла до освітлюваної поверхні фоторезистора. Враховуючи (101.5), вираз (101.4) набуває вигляду:

$$\Phi = \frac{IS}{r^2}. \quad (101.6)$$

Підставивши вирази (101.3) і (101.6) у формулу (101.1), отримаємо:

$$\gamma = \frac{i - i_t}{ISU}. \quad (101.7)$$

2 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Завдання 1. Визначення питомої інтегральної чутливості фоторезистора

1. Зібрати електричну схему (рис. 101.2).
2. При вимкненій освітлювальній лампочці виміряти темновий струм i_t через фоторезистор при заданій напрузі U .
3. Розмістити освітлювальну лампочку на заданій відстані r від фоторезистора і записати покази мікроамперметра i .

4. За формулою (101.7) розрахувати питому інтегральну чутливість γ фоторезистора.

5. Дослід повторити не менше 3-х разів і визначити похибки.

Завдання 2. Зняття вольт-амперної характеристики фоторезистора

1. При вимкненій освітлювальній лампочці і закритій поверхні фоторезистора зняти залежність величини темного струму від прикладеної напруги U .

2. Дані вимірювань занести в таблицю і побудувати графік $i_T = f(U)$ при $\Phi = 0$.

3. Розмістити фоторезистор на максимальній відстані r від освітлювальної лампочки і ввімкнути її. За формулою (101.3) визначити значення фотоструму i_Φ при $\Phi = \text{const}$ і таких самих значеннях напруг U , як в п.1.

4. Розмістити освітлювальну лампочку на проміжній відстані r_2 від фоторезистора і провести вимірювання, як і в п.3.

5. Розмістити освітлювальну лампочку на мінімальній відстані r_3 від фоторезистора і провести вимірювання, як і в п.3.

6. На одному графіку побудувати 3 вольт-амперні характеристики фоторезистора, відкладаючи по вісі абсцис значення напруг, а по вісі ординат – значення фотоструму ($i_\Phi = f(U)$ при $\Phi = \text{const}$).

7. Зробити висновок.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. В чому полягає явище внутрішнього фотоефекту?
2. Пояснити будову та принцип дії фоторезистора.
3. Що таке темновий опір фоторезистора?
4. Що таке темновий струм і як його визначити?
5. Чому фоторезистори використовують в колах змінного струму невеликих частот?
6. Чим обумовлена велика інерційність фоторезисторів?
7. Які основні недоліки фоторезисторів?
8. Наведіть приклади практичного застосування фоторезисторів.

9. Що таке вольт-амперна характеристика фоторезистора?
10. Що таке питома інтегральна чутливість фоторезистора? Її фізичний зміст.
11. Як визначити величину фотоструму в фоторезисторі?
12. Від чого і як залежить світловий потік?
13. Виведіть формулу для визначення питомої інтегральної чутливості фоторезистора.
14. Пояснити, чому вольт-амперна характеристика фоторезистора виражається прямою лінією?

Лабораторна робота №102

ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ЧУТЛИВОСТІ ВЕНТИЛЬНОГО ФОТОЕЛЕМЕНТА

Мета роботи: ознайомитись з явищем вентильного фотоелемента та визначити інтегральну чутливість фотоелемента.

Прилади і матеріали: селеновий вентильний фотоелемент, мікроамперметр, оптична лава, освітлювач.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Вентильні фотоелементи

Вентильні фотоелементи використовуються для перетворення енергії випромінювання в електричну енергію. Вони є фотодіодами, які працюють без джерела зовнішньої напруги і створюють власну електрорушійну силу під дією випромінювання.

Проаналізуємо явища, які відбуваються на p-n-переході вентильного фотоелемента (фотоелемента зі запірним шаром) при попаданні на нього світла. Фотони, які попадають в область

p-р-переходу, обумовлюють генерацію рухомих зарядів. Електрони і дірки, які виникають в n- і р-областях, дифузують до переходу, і, якщо вони не встигли рекомбінувати, то попадають під дію внутрішнього електричного поля запірного шару. Це поле розділяє електрони і дірки. Для неосновних носіїв, наприклад, для електронів в р-області, поле запірного шару є прискорюючим. Аналогічно дірки перекидаються прискорюючим полем із n-області в р-область. Для основних носіїв, наприклад, дірок в р-області, електричне поле запірного шару є гальмуючим. Тому основні носії залишаються в своїх областях, тобто дірки залишаються в р-області, а електрони в n-області. В результаті таких процесів в n- і р-областях накопичуються надлишкові основні носії і виникає різниця потенціалів, яку називають **фотоелектрорушійною силою**. Із збільшенням світлового потоку фото е.р.с. зростає по нелінійному закону.

В даний час найбільш широкого застосування набувають кремнієві вентильні фотоелементи. Вони перетворюють енергію сонячного випромінювання в електричну. Їх фото е.р.с. досягає 0.5В. Із таких елементів при їх послідовному і паралельному з'єднаннях створюють сонячні батареї, які мають порівняно високий к.к.д. і можуть розвивати потужність до декількох кВт. Сонячні батареї із кремнієвих фотоелементів – це основні джерела живлення на штучних супутниках Землі, космічних кораблях, автоматичних метеостанціях і ін. Практичне використання сонячних батарей набуває все більшого значення.

1.2 Інтегральна чутливість вентильного фотоелемента

Інтегральною чутливістю фотоелемента називається відношення величини фотоструму i до величини світлового потоку Φ , який падає на фотоелемент:

$$\gamma = \frac{i}{\Phi} \quad (102.1)$$

Світловий потік рівний добутку освітленості E фотоелемента на його площу S :

$$\Phi = ES \quad (102.2)$$

Якщо світловий потік падає нормально на поверхню фотоелемента, то, згідно закону освітленості:

$$E = \frac{I}{l^2}, \quad (102.3)$$

де I – сила світла лампи розжарення; l – відстань від джерела світла до фотоелемента. Підставивши (102.3) в (102.2), отримаємо:

$$\Phi = \frac{IS}{l^2} \quad (102.4)$$

Враховуючи (102.4), формула (102.1) набуває вигляду:

$$\gamma = \frac{il^2}{IS} \quad (102.5)$$

Інтегральна чутливість вимірюється в амперах, поділених на люмен (А/лм).

Експериментальна установка складається з селенового фотоелемента і освітлювача, розміщених на оптичній лаві. При цьому нитка розжарення лампочки повинна бути встановлена на одній висоті з центром фотоелемента. Селеновий фотоелемент складається із металевої пластинки М, на яку нанесено шар селену А, а поверх нього - напівпрозорий шар золота С. На межі селену і золота виникає запірний шар В (п-р-перехід типу “дірковий напівпровідник – метал”) (рис.102.1). Якщо шар золота з’єднати через мікроамперметр із пластинкою і освітити п-р-перехід зі сторони шару золота, то неосновні для даної області носії (електрони в селені і дірки в золоті, які виникають під дією світлового потоку Φ , без перешкод переходять через п-р-перехід (рис.102.1). В результаті цього в селені нагромаджується надлишковий позитивний заряд, а в золоті – надлишковий негативний заряд. Контакт “метал – дірковий напівпровідник” має односторонню провідність, тому фотоелемент називається **вентильним (із запірним шаром)**.

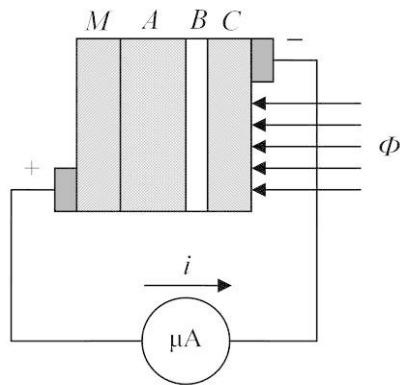


Рисунок 102.1

Інтегральна чутливість γ селенових вентильних фотоелементів досягає декількох сотень мкА/лм. Вони мають спектральну характеристику майже таку саму, як у людського ока. По цій причині селенові фотоелементи мають широке застосування для різних фотометричних методів. Суттєвим недоліком вентильних фотоелементів є низькі частотні властивості і значна залежність інтегральної чутливості від температури.

2 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Завдання 1. Визначення інтегральної чутливості фотоелемента

1. Не вмикаючи джерела світла визначити струм i_0 , який протікає через мікроамперметр при відкритому фотоелементі.
2. Встановити джерело світла на такій відстані від фотоелемента, щоб стрілка мікроамперметра відхилилась більше, ніж на половину його шкали.
3. Визначити величину струму i' через мікроамперметр і виміряти відстань між джерелом світла і фотоелементом.
4. Вимірювання повторити не менш 3-ох разів, змінюючи відстань між джерелом світла і фотоелементом на незначну величину.

5. За формулою (102.5) визначити інтегральну чутливість фотоелемента, вважаючи, що $i = i' - i_0$.

Завдання 2. Визначення залежності величини фотоструму від величини світлового потоку

1. Змінюючи відстань l між джерелом світла і фотоелементом в широких межах, знімати покази мікроамперметра. Вимірювання провести не менше, ніж для 10 різних значень l .

2. За формулою (102.4) розрахувати світлові потоки Φ при заданих значеннях l .

3. Результати вимірювань і обчислень занести в таблицю.

Таблиця 102.1

№ п.п.	I , кд	S , м^2	l , м	Φ , лм	i_0 , мкА	i' , мкА	i , мкА

4. Побудувати графік залежності $i = f(\Phi)$.

5. Зробити висновок.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. В чому полягає явище вентильного фотоефекту?
2. Що таке фотоелектрорушійна сила і як вона виникає?
3. Пояснити конструктивні особливості і принцип дії селенового фотоелемента.
4. Що таке інтегральна чутливість вентильного фотоелемента і від чого вона залежить?
5. Вивести формулу для визначення інтегральної чутливості вентильного фотоелемента.
6. Де використовуються вентильні фотоелементи?
7. Чому у вентильному фотоелементі використовується плівка із золота, а не з іншого металу?
8. Де використовуються вентильні фотоелементи на основі селену і чому?

9. Що таке світловий потік, як його визначають і в яких одиницях він вимірюється?

10. Які основні недоліки вентильних фотоелементів?

11. Що являють собою сонячні батареї, яка їх будова і призначення?

Лабораторна робота №110

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ТРАНЗИСТОРА У СХЕМІ ВВІМКНЕННЯ ІЗ СПІЛЬНОЮ БАЗОЮ

Мета роботи: дослідити роботу транзистора у схемі ввімкнення із спільною базою та визначити коефіцієнт підсилення напруги.

Прилади і матеріали: транзистор, реостат, вольтметр, джерело постійного струму.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Напівпровідниковий тріод (транзистор)

Напівпровідникові р-п-переходи використовуються не тільки для випрямлення змінного струму, але й можуть бути використані також для підсилення електричних сигналів. Якщо в електричну схему із двох ввімкнених послідовно між собою р-п-переходів ввести зворотній зв'язок, то її можна використовувати і для генерації електричних коливань. Напівпровідникові прилади, призначені для розв'язку цих завдань, отримали назву **напівпровідникових тріодів** або **транзисторів**. Перші напівпровідникові тріоди отримали в 1949 р. американські вчені Д. Бардін, В. Браттайн та І. Шоклі, за що були удостоєні Нобелівської премії в 1956 р. Транзистор (TRANSFER RESISTOR – перетворюючий опір) – це напівпровідниковий прилад, який застосовують для підсилення або генерації електричних сигналів.

Для виготовлення транзисторів використовуються в основному германій і кремній, оскільки вони характеризуються значною механічною міцністю, хімічною стійкістю і великою рухливістю носіїв струму. Напівпровідникові тріоди є двох типів – **точкові** і **площинні**. Перші використовуються для підсилення напруг, однак недоцільні для підсилення потужності, оскільки при цьому можуть перегріватись (верхня межа робочої температури точкового германієвого тріода становить 50-80°C). Площинні тріоди є більш потужними.

Розглянемо принцип роботи площинного п-р-п-транзистора (рис. 110.1). Робочі “електроди” транзистора, якими є **база Б** (середня частина транзистора) **емітер Е** і **колектор К** (напівпровідники, які прилягають до бази з обидвох боків з іншим типом провідності, ніж база), вмикаються за допомогою металічних провідників в електричну схему.

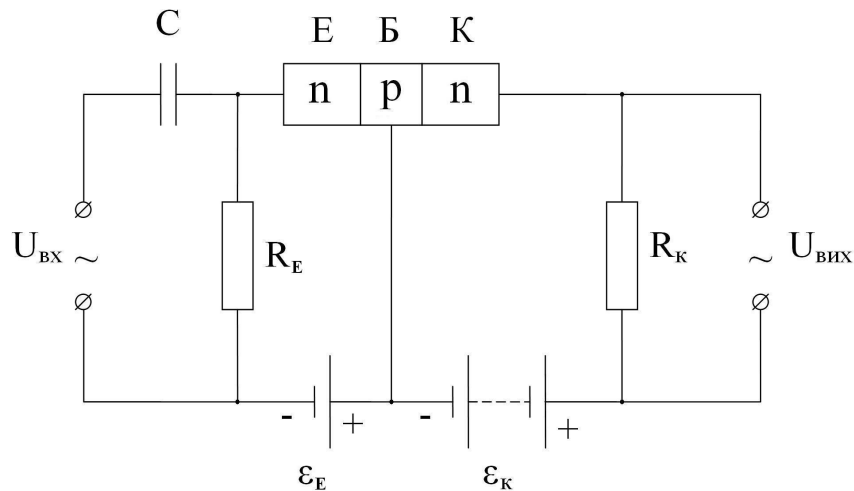


Рисунок 110.1

Між емітером Е і базою Б вмикається постійне джерело ε_E змішуючої напруги в прямому напрямі, а між базою Б і колектором К – постійне джерело ε_K змішуючої напруги в зворотному напрямі. Внаслідок такої полярності ввімкнення ε_E і ε_K n-p-перехід між емітером Е і базою Б буде мати малий опір (буде відкритим), а p-n-перехід між базою Б і колектором К буде мати великий опір (буде закритим). Оскільки база Б одночасно ввімкнена в емітерне і колекторне електричні кола, то така схема ввімкнення транзистора називається схемою із спільною базою. Підсилювана змінна напруга $U_{ВХ}$ подається на вхідний опір $R_{ВХ}$ в емітерному колі, а підсилена напруга $U_{ВІХ}$ знімається із вихідного опору $R_{ВІХ}$ в колекторному колі.

Протікання струму в емітерному колі обумовлене рухом електронів і супроводжується їх “вприскуванням” - **інжекцією** – в область Б. Частина цих електронів рекомбінує із дірками, які є в p-напівпровіднику бази. Оскільки товщина бази Б досить мала (вимірюється в мікронах), то значна частина електронів, які не встигли рекомбінувати під дією прискорюючого електричного поля між базою Б і колектором К, дифузують в нього з великими

швидкостями і змінюють величину струму в колекторному колі. Таким чином, зміна струму в колі емітера обумовлює відповідну зміну струму в колі колектора. Прикладаючи між емітером Е і базою Б змінну напругу $U_{вх}$, отримують в колекторному колі змінний струм, а на вихідному опорі $R_{вих}$ змінну напругу $U_{вих}$.

Використовується й інша найбільш поширена схема ввімкнення транзистора – із спільним емітером (рис.110. 2). В цій схемі р-п-перехід між базою і емітером відкритий і має малий опір. Струм в колекторному колі безпосередньо залежить від струму в базовому колі. Таким чином, величина струму в колекторному колі управляється малим струмом в базовому колі. Якщо в базове коло ввімкнути джерело електричного сигналу, то такий же значно підсилений сигнал виділиться на резисторі навантаження в колекторному колі.

Напівпровідникові тріоди, на відміну від діодів, мають два електронно-діркових переходи, ввімкнених послідовно між собою назустріч один одному (п-р-п або р-п-р-переходи). Умовне позначення транзисторів на схемах подають, як зображено на рис. 110.3.

Напівпровідниковий тріод – транзистор - виконує ті ж завдання, що і ламповий тріод, який має три електроди – катод, анод і сітку.

В транзисторі функцію катода виконує емітер, функцію анода – колектор, функцію сітки – база. Транзистор, подібно до вакуумної електронної лампи, дає підсилення по напрузі і потужності. Якщо в лампі анодний струм регулюється потенціалом сітки, то в транзисторі струм колектора, який відповідає анодному струму лампи, регулюється напругою на базі.

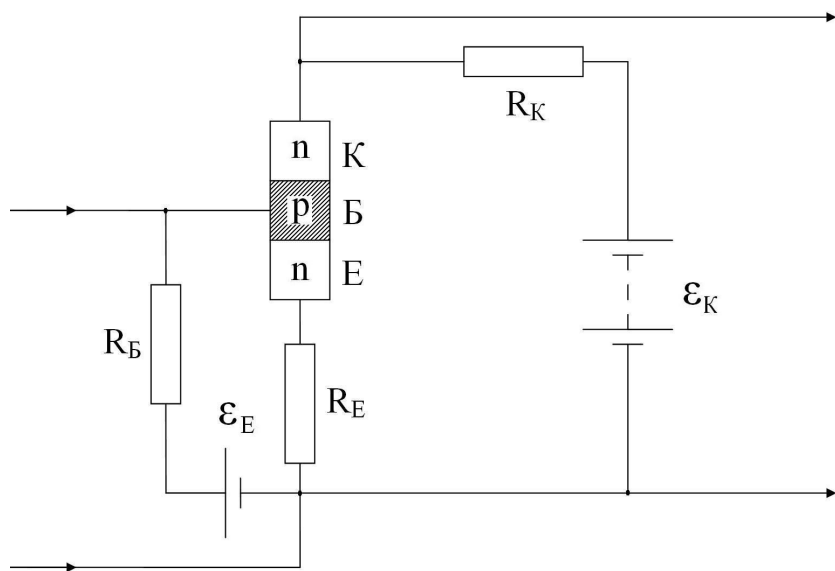


Рисунок 110.2

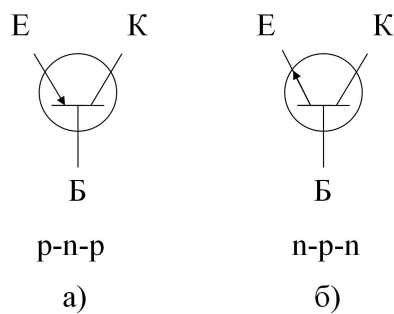


Рисунок 110.3

Транзистори мають суттєві переваги перед вакуумними лампами. Це такі, як малі габаритні розміри, високі к.к.д. і термін експлуатації. Якщо для роботи

підсилювальної лампи необхідна висока напруга, то для живлення транзистора вистачає низьковольтного гальванічного елемента. Транзистори електрично більш економічні від лампового тріода, оскільки в них відсутній нагрівний електрод (катод). Однак транзистори в порівнянні з вакуумними лампами мають деякі недоліки: вони бояться перегріву, виходять з ладу при короткому замиканні навантаження та мають гіршу вольт-амперну характеристику. Тому підсилювачі на лампових схемах набагато якісніші, ніж на транзисторах.

1.2 Визначення коефіцієнта підсилення транзистора

Розглянемо схему ввімкнення транзистора n-p-n із спільною базою (рис.110.4). На перший n-p-перехід між емітером і базою від джерела $\mathcal{E}_E$ подається пряма напруга, під дією якої електрони переходять із емітера в базу. Струм через цей перехід залежить від величини прикладеної напруги. При цьому навіть невеликі зміни

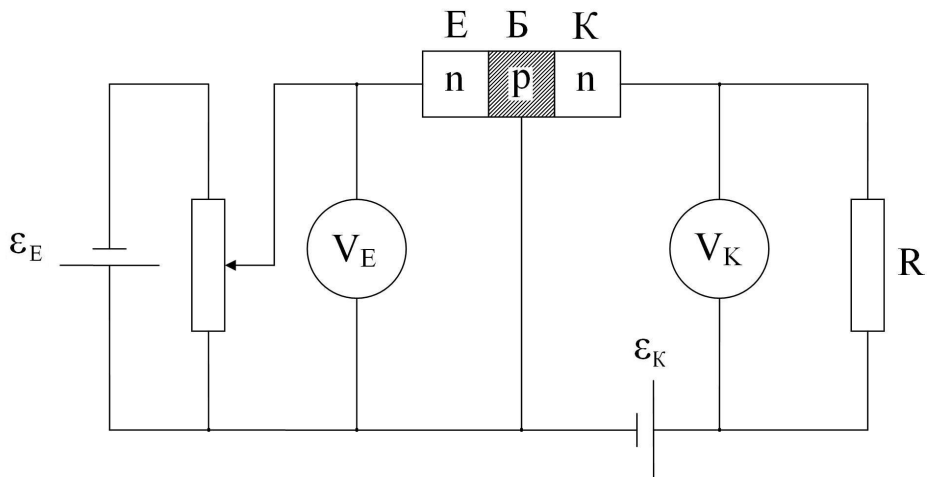


Рисунок 110.4

напруги

$$\Delta U_E = \Delta I_E R_{E-B} \quad (110.1)$$

обумовлюють певну зміну струму ΔI_E в емітерному колі через опір R_{E-B} переходу “емітер-база”. Це пояснюється тим, що опір цього переходу при прямій напрузі незначний. З емітера електрони попадають в базу, яка має інший тип провідності (р-тип). В базі ці електрони рекомбінують з дірками. Для рекомбінації електронів і дірок необхідний деякий час (порядку $10 \div 100$ нс). За цей час електрон встигає пробігти відстань $0.3 \div 0.5$ мм. Товщина бази в транзисторах досягає не більше 0.01 мм. Тому значна частина електронів, які не встигли рекомбінувати в базі, досягає переходу “база-емітер”. Джерело живлення E_K ввімкнено в коло цього переходу в зворотному напрямі. Тому опір переходу “база-колектор” набагато більший, ніж опір переходу “емітер-база”. Внаслідок цього незначні коливання напруги в емітерному колі обумовлюють великі аналогічні коливання напруги в колекторному колі. Спад напруги на переході “база-колектор”

$$\Delta U_K = \Delta I_K R_{B-K}, \quad (110.2)$$

де ΔI_K – зміна величини струму в колекторному колі; R_{B-K} – опір переходу “база-колектор”. Оскільки

$$\begin{cases} \Delta I_K < \Delta I_E \\ R_{B-K} \gg R_{E-B}, \end{cases} \quad (110.3)$$

то згідно співвідношень (110.1) і (110.2)

$$\Delta U_K > \Delta U_E, \quad (110.4)$$

тобто при ввімкненні транзистора в схему із спільною базою відбувається підсилення по

напрузі. Робота транзистора в режимі підсилення по напрузі характеризується коефіцієнтом підсилення

$$\alpha = \frac{\Delta U_K}{\Delta U_E} \quad (110.5)$$

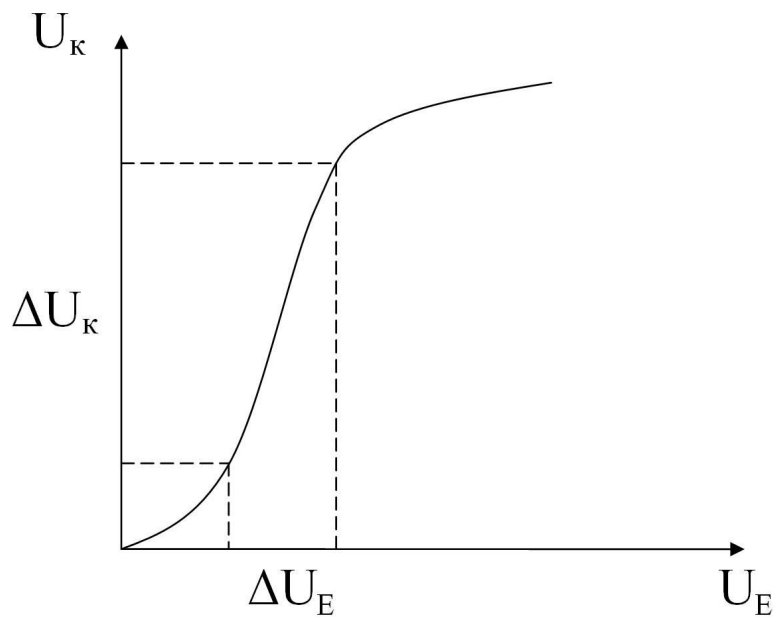


Рисунок 110.5

2 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Пересуваючи повзунок реостата, змінювати вхідну напругу переходу “емітер-база”.
2. Покази вольтметрів U_E і U_K занести в таблицю 1.

3. Побудувати графік залежності $U_K = f(U_E)$, відкладаючи значення U_E по вісі абсцис, а значення U_K – по вісі ординат.

4. Вибрати значення приросту ΔU_E , ΔU_K напруг на переходах “емітер-база” і “база-колектор” відповідно.

5. За формулою (110.5) визначити коефіцієнт підсилення α транзистора.

6. Визначити абсолютну $\Delta\alpha$ і відносну $\Delta\alpha/\alpha$ похибки результату.

7. Зробити висновок.

Таблиця 110.1

№ п.п	U_E , В	U_K , В	ΔU_E , В	ΔU_K , В	α	$\Delta\alpha$	$\Delta\alpha/\alpha$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Для чого використовується напівпровідниковий тріод (транзистор)?

2. Принципова схема будови транзистора.

3. Охарактеризувати функціональні властивості електродів транзистора в порівнянні з функціями електродів лампового тріода.

4. Пояснити призначення джерел постійного струму і їх ввімкнення в електричну схему транзистора.

5. Пояснити принцип роботи транзистора у схемі ввімкнення із спільною базою.

6. Пояснити принцип роботи транзистора у схемі ввімкнення із спільним емітером.

7. Що таке коефіцієнт підсилення транзистора і як його визначити, використовуючи графік $U_K = f(U_E)$?

8. Які суттєві переваги транзистора над ламповим тріодом?

9. Які недоліки має транзистор у порівнянні з ламповим тріодом?

10. Де може використовуватись напівпровідниковий тріод у Вашій спеціальності?

Перелік використаних джерел

1. Зачек І.Р., Кравчук І.М., Романишин Б.М., Габа В.М., Гончар Ф.М. Курс фізики. Фізика для інженерів. – Львів: Бескид БІТ, 2002. – 376с.
2. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Т2. Електрика і магнетизм. – Київ: Техніка, 2001. – 452с.
3. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики. Т3. Оптика. Квантова фізика. – Київ: Техніка, 1999. – 520с.
4. Трофимова Т.И. Курс фізики. – Москва: Высшая школа, 1990. – 478с.
5. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс фізики. – Москва: Высшая школа, 1989. – 608с.