

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

ФІЗИКА

Модуль 4 “Напівпровідники в електричному колі”

Методичні рекомендації

до виконання лабораторних робіт для здобувачів вищої освіти
освітнього ступеня «Молодший бакалавр» початкового рівня
(короткий цикл) спеціальностей
208 “Агроінженерія”,
181 “Харчові технології” денної та заочної форм навчання

Миколаїв
2021

Рекомендовано до друку методичною радою Інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету (протокол №___ від _____ 2021р.)

Укладачі:

Л. В. Вахоніна – канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет;

В. А. Мардзявко – асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет;

А. Ю.Руденко – асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

Рецензенти:

І. П. Атаманюк - д-р техн. наук, професор кафедри вищої та прикладної математики, Миколаївський національний аграрний університет;

А. А. Ставинський - д-р техн. наук, професор кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

© Миколаївський національний аграрний
університет, 2021

ЗМІСТ

Вступ	4
Підготовка до виконання робіт.	4
Вказівки щодо допуску до виконання лабораторних робіт.....	5
Виконання лабораторних робіт та вимоги техніки безпеки.....	5
Відпрацювання лабораторних робіт.	6
Вимоги до оформлення графіків.	7
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 «Визначення питомого заряду методом магнетрона».....	8
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 «Фізичні параметри біполярного транзистора».....	15
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 «Зняття вольт-амперної характеристики напівпровідникового діоду».....	200
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 «Дослідження залежності опору напівпровідників від температури».	27
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 «Внутрішній фотоефект у напівпровідниках».	40
ЛІТЕРАТУРА	408

Вступ

У процесі занять студенти вчаться застосовувати набуті теоретичні знання. Вивчення теорії на прикладах, взятих із життя і досягнень науки та техніки, чітка організація практичних знань, високі вимоги до студентів сприяють вихованню якостей, які повинен мати майбутній спеціаліст.

Студент має ґрунтовно опрацьовувати відповідний лекційний матеріал, визначати незрозумілі питання для з'ясування під час занять, виконувати лабораторні роботи та домашнє завдання.

Для засвоєння матеріалу, розширення та поглиблення знань, з'ясування функціональної залежності фізичних величин, встановлення зв'язку теорії з практикою, розвитку самостійного мислення і навичок самостійної роботи – виконання лабораторних робіт має першорядне значення. Отже, для виконання лабораторних робіт недостатньо формального знання фізичних законів. Для цього необхідне міркування, аналітично мислити, розуміти чому так, а не інакше.

Перед тим, як виконувати лабораторну роботу, студент повинен вивчити відповідний лекційний матеріал за літературою, рекомендованою викладачем, зрозуміти завдання до теми заняття, відповісти на запитання, поставлені до даної теми.

Підготовка до виконання робіт.

Перед виконанням лабораторної роботи студент повинен:

- опрацювати інструкцію до роботи, законспектувати її;
- знати мету виконання роботи та основні її завдання;
- усвідомити основні теоретичні положення і закони, на яких базується виконання роботи;
- якщо самостійне опрацювання матеріалу за літературою, вказаною в інструкції виявилось недостатнім для розуміння суті явищ чи процесів, слід звернутися за консультацією до викладача;
- ознайомитись з робочим місцем та обладнанням, яке використовується в процесі виконання роботи;

- якщо спосіб використання окремого обладнання студенту невідомий, то йому потрібно взяти у лаборанта технічну інструкцію до цього обладнання і опрацювати її;
- рівень роботи студента з обладнанням оцінює лаборант;
- чітко розмежувати величини, які слід виміряти в ході виконання роботи і величини, які будуть обчислені;
- знати порядок виконання роботи та послідовність операцій;
- підготувати таблиці для запису результатів вимірювань і обрахунків, а також папір для побудови графіків.

Вказівки щодо допуску до виконання лабораторних робіт

Допуск до виконання лабораторних робіт дає керівник занять. У співбесіді зі студентом (або бригадою) виявляється ступінь їх готовності до заняття. Якщо студент не може сформулювати основні положення теорії, на яких базується робота, описати послідовність виконання досліджень, не вміє працювати з обладнанням – то він до виконання роботи не допускається.

Після отримання допуску студенти одержують додатковий інструктаж на робочому місці стосовно конкретної роботи, уточнені завдання до роботи, беруть в лаборанта додаткове обладнання чи прилади. Допуск студентів до виконання робіт оцінюється і фіксується в лабораторному журналі.

Виконання лабораторних робіт та вимоги техніки безпеки.

При виконанні лабораторних робіт слід дотримуватись таких правил:

1. Дотримуватись розпорядку роботи в лабораторії і правил техніки безпеки, з якими студенти ознайомлені на вступному занятті та при допуску до виконання роботи.
2. Без перевірки викладачем або лаборантом готовності до дії установки і електричної схеми не можна починати вимірювання, щоб не зіпсувати прилади.
3. Не можна брати без дозволу прилади з інших робочих місць.
4. Якщо в процесі виконання роботи виникають неполадки в роботі приладів або обладнання, про це слід негайно повідомити

керівника заняття і лаборанта. Самостійно налагоджувати роботу приладів не дозволяється.

5. Будьте обережні, в роботах використовується висока напруга.
6. Результати вимірювань занести до таблиці, заздалегідь продумавши їх форму, якщо вона не вказана в інструкції.
7. Вимірювання кожної величини проводити не менше трьох разів, щоб звести до мінімуму похибки.
8. Після закінчення експерименту, не розбираючи пристрою, слід обчислити кінцеві результати; якщо вони не задовільні, треба заново провести вимірювання.
9. Обговорити з керівником занять чи лаборантом отримані результати. Вони підписуються викладачем або лаборантом.
10. При захисті лабораторних робіт студент подає короткий письмовий звіт з результатами вимірювань, обчисленими величинами та побудованими графіками, висновками. В процесі захисту він повинен відповісти на поставлені керівником занять питання стосовно лабораторної роботи чи окремих її частин.
11. Рекомендується в кінці заняття звітувати за попередньо виконані лабораторні роботи.
12. Якщо студент не захистив більше трьох виконаних лабораторних робіт, він може бути не допущений до виконання наступних.

Відпрацювання лабораторних робіт.

- Якщо студент не був допущений до виконання робіт через свою невідповідність, або ж пропустив заняття по хворобі чи іншій причині, то відпрацювання пропущених робіт проводиться у дні та години, вказані у графіку роботи лабораторії.
- Студент повинен отримати допуск до заняття, виконати всі дослідження, обробити результати вимірювання і обговорити їх з викладачем чи лаборантом.
- В лабораторному журналі фіксується дата відпрацювання таких занять.

Вимоги до оформлення графіків.

При побудові графіків слід дотримуватись таких правил:

1. Графік повинен мати назву – залежність між якими величинами він показує.
2. Позначити осі координат і одиниці вимірювання величин.
3. Вибрати раціональний масштаб осей (прямий однаковий, прямий різний, обернений, логарифмічний, напівлогарифмічний, квадратичний тощо). Вибраний масштаб повинен на графіку зобразити залежність досліджуваних величин прямою лінією. Якщо в роботі вибір масштабу не вказано, зробіть це самі.
4. Вказати мічені (оцифровані) та глухі (неоцифровані) поділки шкал.
5. Графік повинен займати всю площу малюнка.
6. Лінія графіка повинна усереднювати визначені величини в межах похибок.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

«Визначення питомого заряду методом магнетрона»

Теоретична частина. В даній роботі відношення e/m для електрона визначається за допомогою методу, що одержав назву "метод магнетрона". Ця назва пов'язана з тим, що конфігурація електричного і магнітного полів, яка застосовується у цій роботі, нагадує конфігурацію полів в магнетронах-генераторах електромагнітних коливань у галузі надвисоких частот.

Рух електронів в цьому випадку відбувається у кільцевому просторі, який знаходиться між прямолінійним катодом і циліндричним анодом лампового діода. Нитка розжарення (катод) розташовується вздовж осі циліндричного аноду, так що електричне поле направлено по радіусу (рис. 1).

Лампа розташовується усередині соленоїда, що створює магнітне поле, паралельно катоду. З'ясуємо траєкторію електронів, що рухаються під дією комбінації електричного та магнітного полів.

Будемо вважати, що початкова (теплова) швидкість електрона, що вилетів з катода дорівнює нулю. Тоді при заданій орієнтації електричного та магнітного полів рух електрона буде відбуватись у площині, яка перпендикулярна магнітному полю. Скористуємось полярною системою координат. В цьому випадку положення точки характеризується відстанню від осі циліндра r та полярним кутом.

Запишемо рівняння руху електрона в площині (r, φ) , скориставшись рівнянням моментів.

$$\frac{dl}{dt}[r \times qE] + [r \times q[v \times B]] \quad (1)$$

де $q = -e$ - заряд електрона; I - напруженість електричного поля між катодом і анодом.

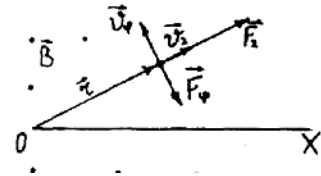
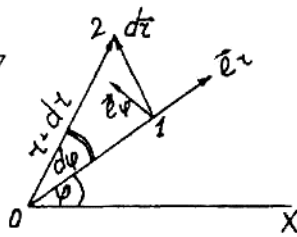
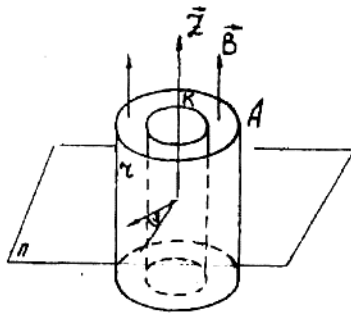
Якщо розглядати електроди двохелектродної лампи як циліндричний конденсатор, то електричне поле буде змінюватись зі зміненням відстані r і визначається виразом

$$E = \frac{U}{\ln \frac{r_a}{r_k}} \times \frac{1}{r} \quad (2)$$

де r_a - радіус анода, r_k - радіус катода.

Момент сили qE , тобто $[\vec{r} \cdot q\vec{E}] = 0$, оскільки $[\vec{r} \parallel \vec{E}]$. Спроектуємо рівняння (1) на вісь Z .

Для знаходження проекту і моменту сили Лоренца на вісь Z розглянемо переміщення електрона у полярній площині ($\vec{r}\varphi$) на величину $d\vec{r}$ (рис. 2). На рис.3 представлені одиничні вектори, радіус-вектори та полярні кути φ \vec{e}_z та \vec{e}_φ відповідно. Тоді вектор швидкості



$$\vec{V} = \frac{dr}{dt} \vec{e}_z + r \frac{d\varphi}{dt} \vec{e}_\varphi = V_z \vec{e}_z + V_\varphi \vec{e}_\varphi$$

Рис. 1

Рис. 2

Рис. 3

Наявність двох складових швидкості V_z та V_φ \vec{V} приводить до двох складових сили Лоренца:

$$F_\varphi = -q \cdot V_z \cdot B = -q \cdot r \cdot B \quad (3)$$

$$F_z = q \cdot V_\varphi \cdot B = -q \cdot r \cdot \varphi \cdot B \quad (4)$$

Момент сили V_φ , відносно осі Z , $M_\varphi = r \cdot F_\varphi = q \cdot r^2 \cdot B$, $d[\vec{r} \cdot \vec{F}_\varphi] = 0$

Таким чином, рівняння (1) набуде вигляду

$$\frac{d(mr^2 \dot{\varphi})}{dt} = e \cdot r \cdot r \cdot B$$

Проінтегрувавши це рівняння за часом, отримаємо

$$m \cdot r^2 \cdot \varphi + C = \frac{1}{2} e r^2 B \quad (5)$$

де C - постійна інтегрування, яка визначається з початкових умов.

Радіус катода r_k - величина мала, тому на початку руху електрона радіус $r = r_k$ теж малий. Тому права частина рівняння (5) та перший член його лівої частин теж дуже малий. Тоді постійну інтегрування C з визначеною точністю можна прирівняти до нуля: $C = 0$. Рівняння (5) набуде при цьому вигляду

Таким чином, кутова швидкість обертання електронів лінійно залежить від B і при даній індукції магнітного поля є величиною постійною.

Перейдемо до вивчення руху електрона вздовж радіуса. Робота сил електричного поля, що завершується при переміщенні електрона від катода до точки з різницею потенціалів U .

$$A = eU \quad (7)$$

Магнітне поле роботи не здійснює. Тому робота, яка виражена співвідношенням (7), дорівнює кінетичній енергії електрона (за умови, що початкова швидкість електрона дорівнює нулю):

$$eU = \frac{mV^2}{2} = \frac{m}{2} \cdot (V_r^2 + V_j^2) = \frac{m}{2} \cdot [r^2(\dot{\varphi})^2] = \frac{m}{2} \cdot \left[x^2 + \left(\frac{r \cdot e \cdot B}{2 \cdot m} \right)^2 \right]$$

Це рівняння визначає радіальний рух електрона.

Далі розглянемо траєкторію електронів, що вилетіли з катода при анодній напрузі U_a . У відсутності магнітного поля (рис. 4) траєкторія прямолінійна та направлена вздовж радіуса. При слабкому полі траєкторія трохи змінюється, але електрон все-таки досягає анода. При збільшенні магнітного поля траєкторія змінюється настільки, що стає дотичною до аноду. Це поле називається критичним. При нулі $B_{кр}$ електрон зовсім не попадає на анод і повертається до катода. Знайдемо величину $B_{кр}$ із співвідношення (8), відмітивши, що у цьому випадку радіальна швидкість електрона r при $r = r_a$, перетворюється в нуль:

$$B_{кр} = O \cdot I_{кр}, \quad (8)$$

де коефіцієнт пропорційності: $O = 2,36 \cdot 10^{-2} \text{ Тл/м}^2$, $I_{кр} = 0,85 \cdot I_a$

$$U_a = \frac{e \cdot B_{кр}^2 \cdot r_a^2}{8m} \quad (9)$$

$$\frac{e}{m} = \frac{8 \cdot U_a}{B_{кр}^2 \cdot r_a^2}, \quad (10)$$

де $r_a = 4,5 \text{ мм}$ - радіус анода

Формула (10) дозволяє вирахувати e/m , якщо при заданому U_a знайдено таке значення магнітного поля (або навпаки, при заданому $B_{кр}$ таке значення U_a), при якому електрони перестають попадати на анод.

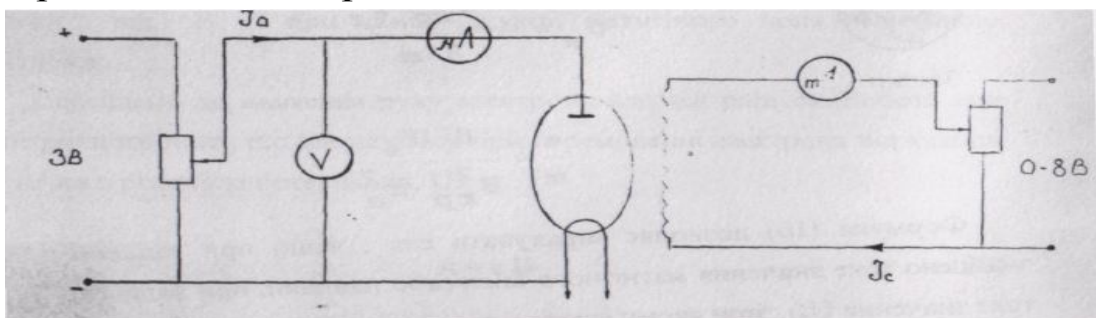
Досі можна було припустити, що всі електрони покидають катод з швидкістю, яка дорівнює нулю. Як виходить з (10) у цьому випадку при $V < V_w$ всі електрони без винятку попадали б на анод, а при $V > V_{кр}$ всі вони повертались би на катод, не досягнувши анода. Анодний струм I_a зі збільшенням магнітного поля змінювався б при цьому так, як це зображено на (рис. 5) пунктирною лінією.

В дійсності електрони, які вилітають з катоду, мають різні початкові швидкості. Тому критичні умови для різних електронів досягаються при різних значеннях V . Крива (В) набуває внаслідок цього вигляду суцільної лінії (5).

В даній роботі для визначення e/m використовується двохелектродна лампа з циліндричним немагнітним анодом. Радіус анода $r = 4,5$ мм.

Опис лабораторної установки.

Принципова електрична схема:



Анодний струм I_a регулюється потенціометром (7). Струм I_c через котушку індуктивності (2) регулюється потенціометром (5). Анодна напруга на діоді вимірюється вольтметром (6). Живлення нитки розжарення катода підключено безпосередньо на панелі.

Хід роботи.

а) До клем (6) підключити вольтметр, резистори (5) і (7) встановити в крайнє ліве положення, що забезпечує мінімальне значення струму в діоді та соленоїді.

Ввімкнути живлення електричного кола тумблером, розташованим з правого боку на панелі.

б) Повертаючи ручку резистора (7) праворуч, встановити анодний струм $I_a = 60$ мА. Змінюючи резистором (5) струм в котушці соленоїда, зняти залежність $I_a = f(I_c)$.

Дослід проробити для 3-х значень I_a . Результати вимірів занести до таблиці

$I_{a1}=60 \text{ мА}$	I_a				U_{a1}
	I_c				
$I_{a2}=80 \text{ мА}$	I_a				U_{a2}
	I_c				
$I_{a3}=100 \text{ мА}$	I_a				U_{a3}
	I_c				

Побудувати графіки залежностей $I_a = f(I_c)$.

Контрольні питання

1. Дати визначення сили Лоренца.
2. Чи виконує роботу сила Лоренца.
3. Записати рівняння руху електрона в електричному і магнітному полях.
4. Записати закон повного струму.

Теоретичні відомості

На електричний заряд, що рухається в магнітному полі, діє сила, перпендикулярна як до швидкості заряду, так і до ліній магнітної індукції. **Сила Лоренца** – сила, з якою зовнішнє магнітне поле діє на рухому заряджену частинку.

$$\vec{F} \approx \vec{B}$$

$$\vec{F} \approx \vec{v}$$

$$\vec{F} \approx q$$

$$\vec{F}_l = \frac{\vec{F}_A}{N}$$

$$\vec{F}_l = Bq\vec{v} \sin \alpha \text{ - сила Лоренца}$$

Сила Лоренца - сила, з якою, в рамках класичної фізики, електромагнітне поле діє на точкову заряджену частинку. Іноді силою Лоренца називають силу, що діє на рухомий із швидкістю заряд лише з боку магнітного поля, нерідко ж повну силу - з боку

електромагнітного поля взагалі, інакше кажучи, з боку електричного і магнітного полів. Виражається в СІ як:

$$F = q(E + [v \times B])$$

Сила Лоренца не виконує роботу, тому що вона перпендикулярна до швидкості руху зарядженої частинки, яка рухається в магнітному полі. Робота виконується у замкненому контурі.

Рівняння руху електрона в електричному і магнітному полях:

$$A = U_g; U_g = \frac{mV^2}{2} \Rightarrow V = \sqrt{\frac{U_g \cdot 2}{m}} \text{ (електричне поле)}$$

$$W_k = \frac{mV^2}{2}$$

$$F_g = \frac{mV^2}{R}; B_g V = \frac{mV^2}{R}; B_g = \frac{mV}{R} \Rightarrow U = \frac{B_g R}{m} \text{ (магнітне поле)}$$

Закон повного струму: Введення поняття про магнітну проникність речовини дає змогу всі формули, добуті раніше для магнітного поля у вакуумі, застосувати і для магнітного поля в речовині, замінивши в них магнітну сталу μ_0 магнітною проникністю μ_a . Про таку можливість свідчить повна аналогія формул:

$$B_0 = \mu_0 H$$

$$B = \mu_a H$$

Ця обставина разом з поняттям про напруженість магнітного поля є основою для іншого формулювання закону повного струму.

У формулі:

$$\int_l B_l dl = \mu_0 \sum I$$

Замість μ_0 запишемо μ_a , а замість магнітної індукції підставимо рівнозначну величину:

$$B_l = H_l \mu_a, \text{ дістанемо:}$$

$$\boxed{\int H_l dl = \sum I} \quad (192)$$

Останнє рівняння виражає **закон повного струму**:

Циркуляція вектора напруженості магнітного поля по замкненому контуру дорівнює повному струмові, що пронизує поверхню, обмежену цим контуром.

У тих випадках, коли напруженість магнітного поля має однакове значення по всьому контуру, а вибраний контур збігається з лінією магнітної індукції рівняння (192) має простіший вигляд:

$$Hl = \sum I$$

а для котушок:

$$Hl = IN$$

Якщо контур містить кілька ділянок з різними значеннями напруженості поля (H_1, H_2, \dots, H_n) , але в межах кожної ділянки напруженість не змінюється, то рівняння (194) можна записати так:

$$\sum_1^n H_n l_n = \sum_1^n I_n N_n \quad (195)$$

де n – номер ділянки контуру.

У такому виразі закон повного струму нагадує другий закон Кірхгофа і застосовується при розрахунку магнітних кіл.

Повний струм – це алгебраїчна сума струмів, які проникають в поверхню, обмежену замкнутим контуром. За законом повного струму сила намагнічення (НС) F_m вздовж замкнутого контуру дорівнює повному струмові:

1. Напруженість (А/м) магнітного поля в точці, яка розміщена на відстані R від прямолінійного прямокутника, $H = I / (2\pi R)$.

Магнітна індукція $B = \mu_0 \mu \frac{I}{2\pi R}$

2. Напруженість в середині провідника в точці, яка знаходиться від осі на відстані a $H = \frac{I}{2\pi R^2}$. Якщо $a = R$, то напруженість на поверхні такого провідника $H = I / (2 \pi R)$, Де R – радіус циліндричного провідника, м.

3. Напруженість магнітного поля в центрі кільцевого провідника $H = I / (2R) = I / d$, Де R – радіус кільця, м.

4. Напруженість магнітного поля в середині кільцевої котушки

$$H = I_w / (2\pi R_x), \text{ де } R_x - \text{радіус від центру кільцевої котушки до}$$

точки, яку ми шукаємо. Магнітна індукція $B = \mu_0 \mu H = \mu_0 \mu \frac{I_w}{2\pi R_x}$

5. Напруженість магнітного поля на середній магнітній лінії кільцевої (тороїдальної) котушки $H = I_w / l$, Де I – струм в обмотці

катушки, A ; w – число витків катушки; l – довжина середньої магнітної лінії катушки. Магнітна індукція $B = \mu_a H = \mu_a \frac{I_w}{l}$. Магнітний потік $\Phi = BS = \mu_a$. Де S – площа поперечного перерізу катушки.

6. Напруженість магнітного поля на вісі циліндричної катушки в будь-якій її точці $H = \frac{I_w}{2l} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

«Фізичні параметри біполярного транзистора».

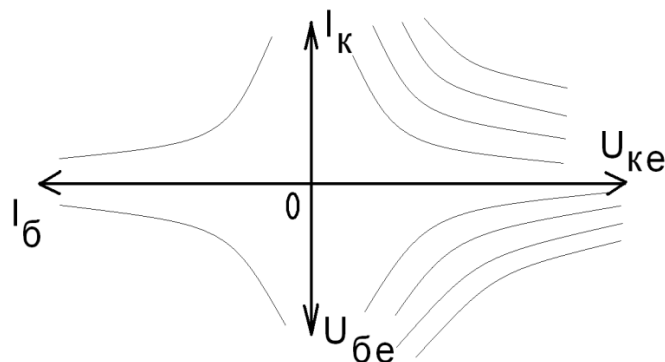
Мета роботи. Вивчити будову та принцип дії біполярного транзистора, зняти вхідні та вихідні статичні характеристики $p-n-p$ транзистора.

Прилади та обладнання. Два джерела живлення постійної напруги 0 - 15 В, що регулюються вольтметром з межею 0,5 В, мікроамперметр з межами 50 та 250 мкА та міліамперметр на 10 та 50 мА, транзистор $p-n-p$ структури типу МП-20 А. дільник напруги.

Опис експериментальної установки. Схема для вимірювання вольт-амперних характеристик транзистора представлена на рис.6.

Порядок виконання роботи.

1. Зняти залежність $I_k (U_{ке})$ при $I_b = \text{const}$, I_b встановити 20, 50, 100, 120 мкА.
2. Зняти залежність $U_{бе} (U_{ке})$ при $I_b = \text{const}$. Провести вимірювання при струмах бази, вказаних у п. 1.
3. На основі отриманих сімейств характеристик побудувати графіки $I_k (I_b)$ і $I_b (U_{бе})$.
4. Побудувати характеристичні криві у чотирьох квадрантах.



Фізичні параметри біполярного транзистора

$I_{\bar{6}} =$ A				$I_{\bar{6}} =$ A		
$U_{ке}, В$	$I_{к}, А$	$U_{бе,В}$		$U_{ке}, В$	$I_{к}, А$	$U_{бе,В}$
$I_{\bar{6}} =$, A				$I_{\bar{6}} =$, A		
$U_{ке}, В$	$I_{к}, А$	$U_{бе,В}$		$U_{ке}, В$	$I_{к}, А$	$U_{бе,В}$

Контрольні питання

1. Що називається напівпровідниками ?
2. Особливості n та p провідності.
3. Будова транзистора та принцип роботи.
4. Для чого використовуються транзистори?

Додаткові теоретичні відомості

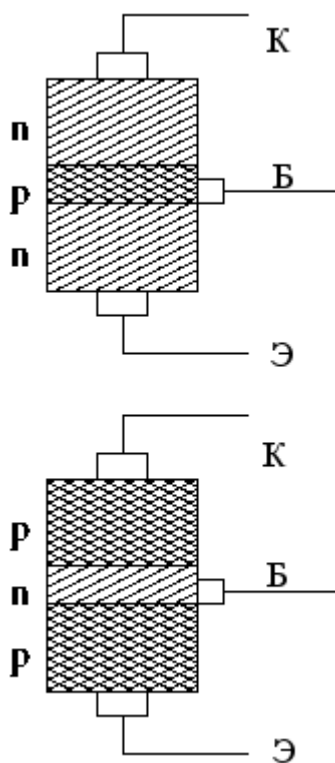
Напівпровідник — матеріал, електропровідність якого має проміжне значення між провідностями провідника та діелектрика. Відрізняються від провідників сильною залежністю питомої провідності від концентрації домішок, температури і різних видів випромінювання. Основною властивістю цих матеріалів є збільшення електричної провідності з ростом температури. Напівпровідниками є речовини, ширина забороненої зони яких складає порядку декількох електронвольт (eV). Наприклад, алмаз можна віднести до широкозонних напівпровідників, а арсенід індію — до вузькозонних. До числа напівпровідників належать багато простих речовин хімічних елементів (германій, кремній, селен, телур, арсен та інші), величезна кількість сплавів і хімічних сполук (арсенід галію та ін.).

В **напівпровіднику р-типу** концентрація дірок набагато перевищує концентрацію електронів. В напівпровіднику n-типу концентрація електронів набагато перевищує концентрацію дірок. Якщо між двома такими напівпровідниками встановити контакт, то виникне дифузійний струм — носії заряду, хаотично рухаючись перетікатимуть із тієї області, де їх більше у ту область, де їх менше. При такій дифузії електрони та дірки переносять із собою заряд. Як наслідок, область на границі стане зарядженою. Та область у напівпровіднику р-типу, яка примикає до границі розділу, отримає додатковий негативний заряд, принесений електронами, а погранична область в напівпровіднику n-типу отримає позитивний заряд, принесений дірками. Таким чином, границя розділу буде оточена двома областями просторового заряду протилежного знаку. Електричне поле, яке виникає внаслідок утворення областей просторового заряду, спричиняє дрейфовий струм у напрямку, протилежному дифузійному струму. Врешті-решт, між дифузійним і дрейфовим струмами встановлюється динамічна рівновага і перетікання зарядів припиняється. Якщо прикласти зовнішню напругу таким чином, щоб створене нею електричне поле було направленим в протилежному напрямку до напрямку електричного поля між областями просторового заряду, то динамічна рівновага

порушується, і дифузійний струм переважатиме дрейфовий струм, швидко наростаючи з підвищенням напруги. Таке під'єднання напруги до р-n переходу називається прямим зміщенням.

Якщо ж зовнішня напруга прикладена так, що створене нею поле є такого ж напрямку, що і поле між областями просторового заряду, то це призводить лише до збільшення областей просторового заряду, а струм через р-n перехід не проходить. Таке під'єднання напруги до р-n переходу називається зворотним зміщенням. На властивостях р-n переходів ґрунтується робота численних напівпровідникових приладів: діодів, транзисторів, сонячних елементів, світлодіодів тощо.

Транзистор — напівпровідниковий елемент електронної техніки, який дозволяє керувати струмом, що протікає через нього, за допомогою прикладеної до додаткового електрода напруги.



Транзистори є основними елементами сучасної електроніки. Зазвичай вони застосовуються в підсилювачах і логічних електронних схемах. У мікросхемах в єдиний функціональний блок об'єднані тисячі й мільйони окремих транзисторів. За будовою та принципом дії транзистори поділяють на два великі класи: біполярні транзистори й польові транзистори. До кожного з цих класів входять численні типи транзисторів, що відрізняються за будовою і характеристиками. В біполярному транзисторі носії заряду рухаються від емітера через тонку базу до колектора. База відділена від емітера й колектора р-n переходами. Струм протікає через транзистор лише тоді, коли носії заряду інжектуються з емітера в базу через р-n перехід. В базі вони є неосновними носіями заряду й легко проникають через інший р-n перехід між базою й колектором, прискорюючись при цьому. В самій базі носії заряду рухаються за рахунок дифузійного механізму, тож база повинна бути досить тонкою. Управління струмом між емітером і колектором здійснюється зміною напруги між базою і емітером, від

якої залежать умови інжекції носіїв заряду в базу. В польовому транзисторі струм протікає від витoku до стоку через канал під затвором. Канал існує в легovanому напівпровіднику в проміжку між затвором і нелегованою підкладкою, в якій немає носіїв заряду, й вона не може проводити струм. Безпосередньо під затвором існує область збіднення, в якій теж немає носіїв заряду завдяки утворенню між легованим напівпровідником і металевим затвором контакту Шотткі. Таким чином ширина каналу обмежена простором між підкладкою та областю збіднення. Прикладена до затвору напруга збільшує чи зменшує ширину області збіднення, а тим самим ширину каналу, контролюючи струм. Корпуси транзисторів виготовляються з металу, кераміки або пластику. Для транзисторів великої потужності необхідно додаткове охолодження.

Транзистори монтуються на друкованих платах за технологією «через отвір», або за технологією поверхневого монтажу. При технології «через отвір», виводи транзисторів вставляються в попередньо просвердлені в платі отвори. Корпуси транзисторів стандартизовані, але послідовність виводів ні, вона залежить від виробника. Транзистор має два основні застосування: у якості підсилювача та у якості перемикача.

Підсилювальні властивості транзистора зв'язані з його здатністю контролювати великий струм між двома електродами за допомогою малого струму між двома іншими електродами. Таким чином малі зміни величини сигналу в одному електричному колі можуть відтворюватися з більшою амплітудою в іншому колі.

Використання транзистора у якості перемикача пов'язане з тим, що приклавши відповідну напругу до одного з його виводів, можна зменшити практично до нуля струм між двома іншими виводами, що називають запиранням транзистора. Цю властивість використовують для побудови логічних вентилів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

«Зняття вольт-амперної характеристики напівпровідникового діоду»

Мета роботи: вивчення напівпровідників та їх властивостей; застосування напівпровідникових діодів.

Теоретична частина. Усі речовини за їх електропровідними властивостями поділяються на три групи: провідники, напівпровідники та ізолятори.

Провідники - це метали та їх сплави.

Ізолятори (діелектрики) - це мінерали, неорганічні аморфні тіла, синтетичні сполуки, полімери тощо.

Напівпровідники - це деякі хімічні елементи, окиси металів, хімічні сполуки.

В напівпровідниках можливі два механізми (типи) електропровідності: *електронний*, що здійснюється рухом електронів, звільнених з хімічних зв'язків і *дірковий*, обумовлений рухом дірок (вакансій хімічних зв'язків).

Напівпровідники, провідність яких зумовлена надлишковими електронами, називаються *електронними* або *напівпровідниками n-типу*.

Напівпровідники, провідність яких викликана наявністю дірок, називаються *дірковими* або *напівпровідниками p-типу*.

Розглянемо напівпровідник, що складається з двох частин, одна з яких має провідність **n**-типу, а друга **p**-типу (рис. 1). У **p**-області основними носіями є дірки, а в **n**-області - електрони. І **n**-, і **p**-області до утворення контакту між ними були, в цілому, електронейтральними. При утворенні контакту внаслідок дифузії та взаємного електричного притягання певна кількість вільних електронів **n**-області перейде в **p**-область, де є незайняті валентні рівні (дірки). Електрони займуть частину цих рівнів поблизу контакту. Дірки, в свою чергу, дифундуватимуть з **p**-області в **n**-область, де будуть рекомбінувати з вільними електронами. Завдяки цим процесам концентрація вільних електронів і дірок поблизу контакту значно зменшиться.

Поряд з цим, **n**-область поблизу контакту зарядиться позитивно, бо: по-перше, вона втратила частину своїх вільних електронів; по-друге, до неї перейшла частина дірок з **p**-області. Аналогічно, **p**-область поблизу контакту зарядиться негативно. Електричне поле, що виникне при цьому, перешкоджатиме подальшій дифузії носіїв заряду. В області контакту встановиться динамічна рівновага.

Таким чином, на межі контакту **n**- і **p**-напівпровідників виникає **p-n**-перехід (рис.2), який має великий опір, бо він збіднений на носії заряду. Шар, що перешкоджає дифузії носіїв заряду, називається запираючим. Його товщина залежить від концентрації носіїв заряду в областях напівпровідника.

Якщо до **p-n**-переходу прикласти різницю потенціалів у такому напрямі, як показано на рис. 3, тобто до **p**-області подати позитивний потенціал, а до **n**-області негативний, то під дією зовнішнього поля вільні носії заряду рухатимуться до **p-n**-переходу; концентрація їх на переході зросте і через напівпровідник піде значний струм.

Якщо ж різницю потенціалів прикласти в протилежному напрямі (рис. 4), то ширина **p-n**-переходу зросте, бо носії заряду будуть відходити від контактної області. У цьому випадку опір переходу буде великим, а струм у колі - незначним.

Напрямок, в якому **p-n**-перехід пропускає струм, називається прямим або напрямом провідності.

Протилежний напрям називають зворотнім або запірним.

Таким чином, прилади, в яких створено **p-n**-перехід, пропускають струм лише у прямому напрямі. У зворотному напрямі струм дуже малий. Такі прилади називають діодами і вони використовуються для випрямлення струмів в електро- і радіотехніці. Промисловість випускає, в основному, кременеві і германієві точкові та площинні діоди.

Для діодів введені позначення, які складаються з букв і цифр (наприклад Д7Ж): Д - означає тип приладу - діод; 7 - вказує тип приладу та його застосування, Ж – різновидність приладу.

Найважливіші параметри діодів такі:

1. Найбільше значення зворотної напруги $U_{зв}$, яка може бути прикладена до діода у зворотному напрямі.

2. Прямий струм $I_{пр}$ – величина максимального струму через діод при прямому ввімкненні.

3. Найбільше значення зворотного струму $I_{зв.макс}$ – величина максимального струму через діод у зворотному напрямі (коли до нього прикладено зворотну напругу).

4. Пробивна напруга $U_{проб.}$ - напруга на діоді, при якій відношення зміни напруги до зміни струму дорівнює нулю. Перевищення цього значення приводить до різкого збільшення зворотного струму і руйнування діода.

5. Найбільша амплітуда струму при перехідних процесах $I_{перех.макс.}$ - найбільше значення амплітуди струму через діод, яка не спричиняє його пошкодження протягом секунди.

6. Найбільша амплітуда випрямленого струму $I_{випр.макс.}$ – найбільше значення амплітуди струму через діод.

7. Прокідна ємність $C_{пр}$ - статична ємність між електродами діода. Основною характеристикою діода є вольт-амперна характеристика, яка показує залежність величини струму, що проходить через діод, від величини прикладеної напруги.

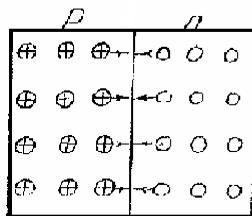


рис. 1

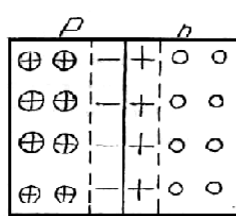


рис. 2

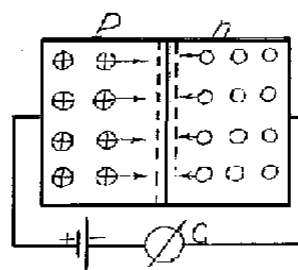


рис. 3

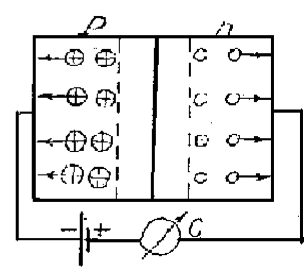
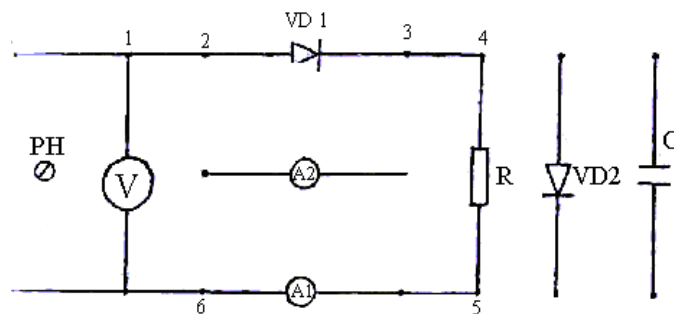


рис. 4



Опис лабораторної установки і методика дослідження

Схема установки для дослідження *p-n* переходу зображена на рис.5

Постійна напруга змінюється регулятором напруги РН від 0 до 8 В, а вимірюється вольтметром ($U_{\text{ном}}=10$ В). Міліамперметр A_1 ($I_{\text{ном}}=50$ мА) використовується в завданні 1 для вимірювання прямого струму *p-p*-переходу, а мікроамперметр A_2 ($I_{\text{ном}}=100$ мкА) - в завданні 2 для вимірювання зворотного струму діода. У роботі досліджується *p-n* переходи світло діода VD1 і германієвого діода VD2. При проходженні прямого струму світлодіод випромінює світло. У завданнях 1 і 2 досліджується його вольт-амперна характеристика при прямому і зворотному вмиканнях.

Виконання роботи

Завдання 1. Дослідження *p-p*-переходу при прямому вмиканні діода.

1. Зібрати схему (рис.5). Під'єднати до клем (5) і (6) міліамперметр A_1 і з'єднати з клемою (1) і (2), а також (3) і (4). Регулятор напруги РН встановити в крайнє положення, обертаючи проти годинникової стрілки.

2. Включити живлення. Змінюючи напруги через 1 В (від 0 до 8 В) вимірювати силу струму в ланцюгу.

3. Результати вимірювань занести в таблицю 1. Відключити електроживлення.

4. Використовуючи отримані дані, вирахувати напругу U_d на *p-n*-переході за формулою:

де U - вхідна напруга; $U_k = I_0 R$ - напруга на резисторі.

Результат занести до таблиці 1

Знайти прямий опір *p-n*-переходу R_{np} для всіх значень вхідної напруги за формулою: $R_{i0} = \frac{U_{i0}}{I_0}$

Результати занести до таблиці 1

Таблиця 1

№ п.п.	U	I_0	R	U_k	U_d	R_{np}
1.						
2.						
3.						

4.						
5.						
6.						
7.						
8.						

5. За отриманими даними побудувати графік залежності $I_0 = f(U_0)$, $R_{np} = f(U_0)$.

Завдання 2. Дослідження p - n -переходу при зворотному включенні діода.

1. В схемі (рис.5) під'єднати до клем (5) і(6) мікроамперметр A_2 і, змінивши напрям струму в p - n -переході, для чого з'єднати провідниками клеми (1) і (3); (2) і (4). РН встановити в нульовому положенні. Ввімкнути живлення, збільшуючи вхідну напругу через 1 В (від 0 до 8 В) вимірювати силу зворотного струму $I_{зв}$. Результати занести до таблиці 2. Вимкнути живлення. Розібрати схему.

2. Використовуючи отримані дані, знайти значення зворотного опору p - n -переходу $R_{зв}$. для всіх значень вхідної напруги і занести до таблиці 2. Так як $R_{зв} \gg R$, то $R_{зв} \approx U / I_{зв}$

Таблиця 2

№ п.п.	U	$I_{зв}$	$R_{зв}$
1.			
2.			
3.			
4.			

3. Побудувати графік залежності $I_{зв} = f(U)$, $R_{зв} = f(U)$.

Контрольні питання

1. Поясніть механізм електронної провідності напівпровідника?
2. Поясніть механізм діркової провідності напівпровідника.
3. Що таке вольт-амперна характеристика діода?
4. Які конструктивні особливості точкових і площинних діодів?

Додаткові теоретичні відомості

Напівпровідники характеризуються як властивостями провідників, так і діелектриків. У напівпровідникових кристалах атоми встановлюють ковалентні зв'язки (тобто, один електрон в кристалі кремнію, як і алмазу, пов'язаний двома атомами), електронам необхідний рівень внутрішньої енергії для вивільнення з атома ($1,76 \cdot 10^{-19}$ Дж проти $11,2 \cdot 10^{-19}$ Дж, чим і характеризується відмінність між напівпровідниками і діелектриками). Ця енергія з'являється в них при підвищенні температури (наприклад, при кімнатній температурі рівень енергії теплового руху атомів дорівнює $0,4 \cdot 10^{-19}$ Дж), і окремі атоми отримують енергію для відриву електрона від атома. Із зростанням температури число вільних електронів і дірок збільшується, тому в напівпровіднику, що не містить домішок, питомий опір зменшується. Умовно прийнято вважати напівпровідниками елементи з енергією зв'язку електронів меншою ніж 1,5-2 еВ. Електронно-дірковий механізм провідності проявляється у власних (тобто без домішок) напівпровідників. Він називається власною електричною провідністю напівпровідників.

Під час розриву зв'язку між електроном і ядром з'являється вільне місце в електронній оболонці атома. Це обумовлює перехід електрона з іншого атома на атом з вільним місцем. На атом, звідки перейшов електрон, входить інший електрон з іншого атома і т. д. Це обумовлюється ковалентними зв'язками атомів. Таким чином, відбувається переміщення позитивного заряду без переміщення самого атома. Цей умовний позитивний заряд називають діркою. Зазвичай рухливість дірок у напівпровіднику нижче рухливості електронів. **Вольт-амперною характеристикою**, скорочено ВАХ матеріалу чи пристрою називається залежність струму в ньому від прикладеної напруги.

Вольт-амперну характеристику можна визначити також як залежність падіння напруги на пристрої від струму, що в ньому протікає.

Вольт-амперна характеристика зображується зазвичай у вигляді графіка, в якому напруга відкладається вздовж осі абсцис, а струм вздовж осі ординат. Для матеріалів вольт-амперна характеристика часто

приводиться у вигляді залежності густини струму від напруженості прикладеного поля.

Діод являє собою двохелектродний напівпровідниковий прилад, який має один р-п-перехід. Один вивід (анод) підключений до області напівпровідника р-типу, а другий (катод) до області провідністю п-типу. При підключенні напруги додатної полярності до аноду, а від'ємної до катода перехід зміщується в прямому напрямку і діод відкривається. Через нього починає протікати електричний струм. При зміні полярності діод закривається і струм через нього не проходить.

Діоди поділяють на точкові і площинні. Точкові діоди мають р-п-перехід з малою товщиною і площиною, тому розраховані на малі струми і невеликі напруги, але завдяки малим розмірам переходу вони мають малу власну ємність, що дозволяє використовувати їх в широкому діапазоні частот. Плоскі діоди мають дуже велику площину і товщину р-п-переходу, що дозволяє їх застосовувати для кіл низьких частот при наявності значного струму і великої напруги.

Для багатьох матеріалів, зокрема для провідників і напівпровідників, вольт-амперна характеристика має лінійну ділянку при малих напругах. В цьому діапазоні прикладеної напруги справедливий закон Ома, який стверджує, що струм пропорційний напрузі. При виконанні закону Ома струм у пристрої протікає однаково в обидва боки, в залежності від полярності прикладеної напруги.

Проте така поведінка не має універсального характеру. Наприклад, струм у вакуумному діоді суттєво нелінійний навіть при дуже малих напругах між анодом і катодом. Це явище зумовлене тим, що випромінені нагрітим катодом електрони створюють у просторі між анодом і катодом негативно-заряджену хмару, яка перешкоджає новим електронам покидати катод. У таких випадках говорять про виникнення області просторового заряду, і залежність струму від напруги описується законом Чайлда. Аналогічні області просторового заряду виникають також у діелектриках, провідність яких у дуже сильних електричних полях зумовлена інжектованими електронами.

Здебільшого струм зростає при зростанні прикладеної напруги. Але й це не є універсальним законом. Наприклад, пристрій, який називається резонансним тунельним діодом, пропускає лише електрони з певною визначеною енергією. Таких електронів мало й при малих напругах, і при великих напругах. Тому при збільшенні напруги струм через резонансний тунельний діод спочатку зростає, а потім, коли електрони мають надто велику енергію, падає. Ділянки ВАХ, на яких струм спадає із підвищенням напруги, називаються областями негативної диференційної провідності. Вони дуже цікаві для практичного використання, бо на них можна побудувати, наприклад, генератори автоколивань. Негативну диференційну провідність при високих напругах мають також деякі напівпровідники.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

«Дослідження залежності опору напівпровідників від температури».

Мета роботи: Дослідним шляхом встановити закон зміни опору напівпровідника при його нагріванні, визначити ширину забороненої зони і концентрацію зарядів у напівпровіднику при різній температурі.

Прилади та матеріали: Експериментальна установка, яка має досліджуваний термоопір, термостат з нагрівачем і стабілізатор струму. Джерело постійної напруги ($U=16\text{В}$). Міліамперметр постійного струму ($I_{\text{max}}=200\text{мА}$). Цифровий вольтметр або мультиметр для вимірювання постійної напруги ($U_{\text{max}}=20\text{В}$).

Короткі теоретичні відомості: *Напівпровідники* - це речовини, які за своєю електропровідністю, мають проміжне місце між провідниками першого роду і діелектриками. На відміну від металів вони мають від'ємний температурний коефіцієнт опору (в певних температурних інтервалах).

Основною відмінністю напівпровідників від металів є значна залежність їх провідності (опору) від зовнішніх факторів (освітленість, механічні деформації, опромінення рентгенівськими та радіоактивними променями, дія магнітного поля тощо). На величину електропровідності

напівпровідників суттєво впливає наявність домішок. Величина питомого опору напівпровідників лежить в межах від 10^{-5} до 10^{-8} Ом·м.

До напівпровідників належать деякі хімічні елементи (кремній, германій, селен, бор, телур), а також окиси (CuO), сульфідів (CdS, PbS, ZnS), телуриди (HgTe, CdTe), фосфіди (GaP, InP, ZnP₂) тощо.

Існують напівпровідники із електронною та дірковою провідністю. У напівпровідниковій техніці використовуються напівпровідники, в яких носіями заряду є електрони хімічного зв'язку (вірніше їх відсутність), вони мають р-тип провідності і електрони провідності n-типу.

Приклади, дія яких ґрунтується на значній залежності опору напівпровідників від температури, називаються термісторами або термоопорами.

Термістори - об'ємні опори, що виготовляють з напівпровідникових матеріалів. Вони мають від'ємний коефіцієнт опору, який у багато разів перевищує температурний коефіцієнт опору металів. Термістори можуть бути найрізноманітніших розмірів і форми, а також мають різні термічні та електричні властивості, високу механічну міцність.

Залежність опору напівпровідників від температури у значних інтервалах описується виразом:

$$R = Ae^{\Delta E / 2kT} \quad (1)$$

де А - константа, К - стала Больцмана, Е - енергія активації (висота енергетичного бар'єру).

Під *енергією активації* розуміють енергію, яку необхідно затратити, щоб перевести електрон із зв'язаного стану у вільний.

Зменшення опору з ростом температури пояснюється тим, що при збільшенні температури збільшується число носіїв заряду, тобто збільшується концентрація вільних електронів. Графік залежності опору напівпровідників від температури в координатах $\ln R = f(1/T)$ являє собою пряму лінію, тангенс нахилу якої до осі $1/T$ (вісь Ох) дорівнює:

$$\operatorname{tg} \varphi = \Delta E / 2k \quad (2)$$

Звідси *енергія активації* визначається як

$$E = 2kTg\varphi \quad (3)$$

Концентрація електронів в зоні провідності напівпровідника змінюється від температури по експотенціальному закону

$$n = n_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (4)$$

де n - концентрація електронів провідності при температурі T ,

n_0 - концентрація електронів провідності при $T \rightarrow \infty$

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К- постійна Больцмана, ΔE - ширина забороненої зони.

Так як електропровідність пропорційна концентрації електронів провідності, то залежність питомої електропровідності γ_0 напівпровідників від температури виражається формулою

$$\gamma = \gamma_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (5)$$

де γ_0 - питома електропровідність при $T \rightarrow \infty$

Опір напівпровідника з підвищенням температури зменшується по закону

$$R = R_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (6)$$

де R_0 -опір при $T \rightarrow \infty$

Цю залежність можна використовувати для визначення ширини забороненої зони напівпровідника ΔE .

Прологарифмувати цей вираз по основі e , отримаємо

$$\ln R = \ln R_0 + E / 2kT \quad (7)$$

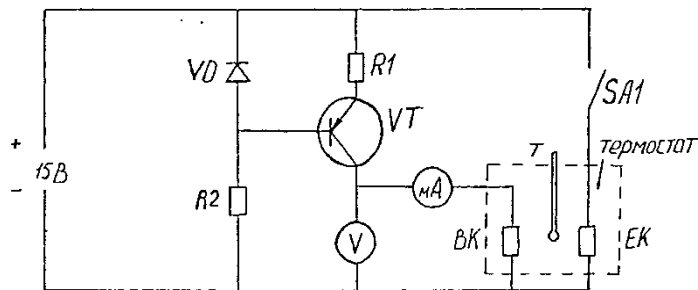
Виразимо k в електрон-вольтах ($1\text{eV}=1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж) $k=0,86 \cdot 10^{-4}\text{eV/K}$

Знайдемо значення $1/2k$; $1/2k=5,8 \cdot 10^{-3}\text{K/eV}$ і підставимо його в (4);

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{5,8 \cdot 10^{-3}}{T} \Delta E \quad (8)$$

Якщо побудувати графік залежності $\ln R = f(5,8 \cdot 10^{-3} / T)$, то він буде представляти собою пряму лінію. Тангенс кута нахилу якої до вісі абсцис рівний ширині зображеної зони ΔE , вираженою в електрон-вольтах:

Схема експериментальної установки



Германієвий напівпровідник ВК поміщений в термостат з нагрівачем ЕК, який підключається до джерела живлення вимикачем SA1.

Величина струму в колі ВК піддержується незмінним стабілізатором при зміні опору ВК, викликаним його нагріванням, стабілізатор струму складається із стабілізатора VD, транзистора VT, транзисторів R₁ і R₂.

Для підключення цифрового вольтметра є клеми.

Порядок виконання роботи

1). Підключити до експериментальної установки (рис.1) цифровий вольтметр ($U_{\max}=20V$).

2) Увімкнути живлення тумблером SA1: Значення початкової температури і напруги на термоопорі ВК занести до табл.1.

Сила струму у колі постійна $I = 16 \text{ mA}$.

Таблиця 1

t, °C	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
I, mA	16									
U ₁ , B										
U ₂ , B										
U _{ср.} B										
R, Ом										

3) Визначити і занести до табл.1 значення падіння напруги U₁ і U₂ на термоопорі при зміні температури через кожні 5 °C. Провести виміри U як при нагріванні термоопору (U₁), так і при його охолодженні (U₂).

Обробка результатів:

1. По даним табл.1 визначити середнє значення падіння напруги $U_{cp} = (U_1 + U_2)/2$ на термопарі і його опір $R = U_{cp} / I$ для всіх значень температури.

Результати занести до табл. 1.

3. Визначити значення $5,8 \cdot 10^{-3} / T \ln R$ для всіх температур. Результати занести до табл. 2.

Таблиця 2

T, K									
$\frac{5,8 \cdot 10^{-3}}{T}, K^{-1}$									
LnR									

По даним табл. 2 побудувати графік залежності $\ln R = f(5,8 \cdot 10^{-3} / T)$.

Контрольні питання

1. Які речовини належать до напівпровідників ?
2. Пояснити власну провідність напівпровідників.
3. Які типи провідності є у напівпровідниках ?
4. Пояснити домішкову провідність напівпровідників (донорна, акцепторна).
5. Як виникає діркова та електрона домішкова провідність напівпровідників?
6. Що називається енергією, активації?
7. Як залежить опір напівпровідників від температури і освітлення?
8. Що таке терморезистори і яке їх застосування ?

Додаткові теоретичні відомості

Напівпровідники, як це й виходить з їхньої назви, за своєю провідністю посідають проміжне місце між провідниками і діелектриками. Якщо значення питомого електричного опору провідників становить приблизно 10^{-8} Ом•м, а діелектриків — від 10^{12} до 10^{20} Ом, то напівпровідників — від 10 до 10^7 Ом•м. З точки зору мікроструктури речовини це

означає, що концентрація вільних заряджених частинок у напівпровідниках набагато менша, ніж у провідниках, і набагато більша, ніж у діелектриках. Наприклад, дуже поширений у техніці напівпровідник германій при кімнатній температурі має приблизно 1020 вільних заряджених частинок у речовині. Здавалося б, велика кількість? Але це в 10 млрд разів менше, ніж у металах.

У процесі вивчення фізичних властивостей напівпровідників, зокрема провідності, виявилось, що в напівпровідників залежність провідності від зовнішніх чинників значно відрізняється від тієї, що спостерігається в металах.

По-перше, якщо опір металів із підвищенням температури збільшується, то опір напівпровідників, навпаки, зменшується. По-друге, опір напівпровідників падає зі збільшенням освітленості, тоді як опір металів від освітленості практично не залежить. По-третє, якщо за наявності домішок метали гірше проводять струм, то введення домішок у напівпровідники, навпаки, різко зменшує опір останніх. Існують і інші, не менш важливі й цікаві відмінності, але про них ви дізнаєтесь пізніше.

Механізм власної провідності напівпровідників.

У напівпровідниковому кристалі серед валентних електронів обов'язково є електрони, кінетична енергія яких настільки велика, що вони можуть залишити зв'язок і стати вільними.

Якщо напівпровідниковий кристал помістити в електричне поле, то вільні електрони почнуть рухатися до позитивного полюса джерела струму і в напівпровіднику виникне електричний струм. Зі збільшенням температури середня кінетична енергія електронів збільшується, у результаті дедалі більше електронів стають вільними. Тому, незважаючи на те що йони внаслідок коливального руху ще більше заважають рухові вільних електронів, опір напівпровідника зменшується. Провідність напівпровідників, зумовлену наявністю в них вільних електронів, називають електронною провідністю, а вільні електрони — електронами провідності.

Коли електрон залишає ковалентний зв'язок одного з атомів, точніше — однієї пари атомів, то цей зв'язок у парі лишається

незайнятим — вільним. Цей вільний зв'язок прийнято називати діркою. Природно, що дірці приписують позитивний заряд.

На вакантне місце може «перестрибнути» електрон від сусіднього зв'язку, і там, у свою чергу, утвориться дірка.

У результаті послідовності таких «стрибків» дірка ніби переміщується по кристалу. (Насправді ж, як ви бачите на рис. 23.3, зв'язані валентні електрони переміщуються у зворотному напрямку!). Провідність напівпровідників, зумовлену «переміщенням» дірок, називають дірковою провідністю.

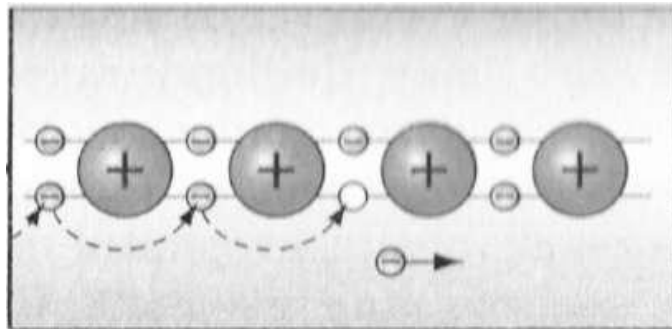


Рис. 23.3

Діркова провідність

Вивчаємо домішкову провідність напівпровідників. До цього було розглянуто електричний струм у чистих напівпровідниках. У таких напівпровідниках кількість вільних електронів і дірок є однаковою.

Проте якщо в чистий напівпровідник додати невелику кількість домішки, то картина дещо зміниться. Наприклад, якщо в чистий розплавлений силіцій додати трохи арсену, то після кристалізації утвориться звичайна кристалічна ґратка силіцію, однак у деяких її вузлах замість атомів Силіцію перебуватимуть атоми Арсену (рис. 23.4).

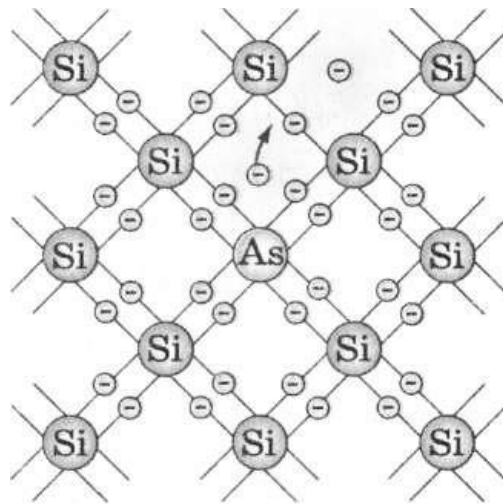


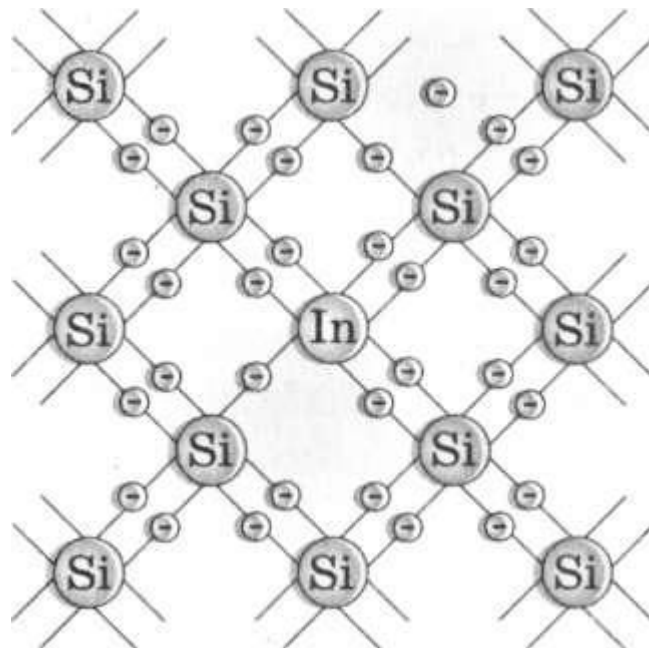
Рис. 23.4

Додавання арсену до чистого розплавленого сіліцію.

Арсен - п'ятивалентний елемент. Чотири валентні електрони атома Арсену утворюють парні електронні зв'язки із сусідніми атомами Силіцію. П'ятому ж валентному електрону зв'язку не вистачить, при цьому він буде так слабо пов'язаний з атомом Арсену, що легко стане вільним. У результаті кожний атом домішки дасть один вільний електрон, а вакантне місце (дірка) при цьому не утвориться. Домішки, атоми яких легко віддають електрони, називаються донорними домішками (від латин. *donare* - дарувати, жертвувати).

Нагадаємо, що крім вільних електронів, які надаються домішками, у напівпровідниках є електрони й дірки, наявність яких спричинена власною провідністю напівпровідників. Отже, у напівпровідниках з донорними домішками кількість вільних електронів значно більша, ніж кількість дірок. Таким чином, основними носіями зарядів у таких напівпровідниках є негативні частинки. Тому напівпровідники з донорними домішками називають напівпровідниками n-типу (від латин. *negativus* — негативний).

Якщо в силіцій додати невелику кількість тривалентного елемента, наприклад Індію, то характер провідності напівпровідника зміниться. Оскільки атом Індію має три валентні електрони, то він може встановити ковалентний зв'язок тільки з трьома сусідніми атомами Силіцію.

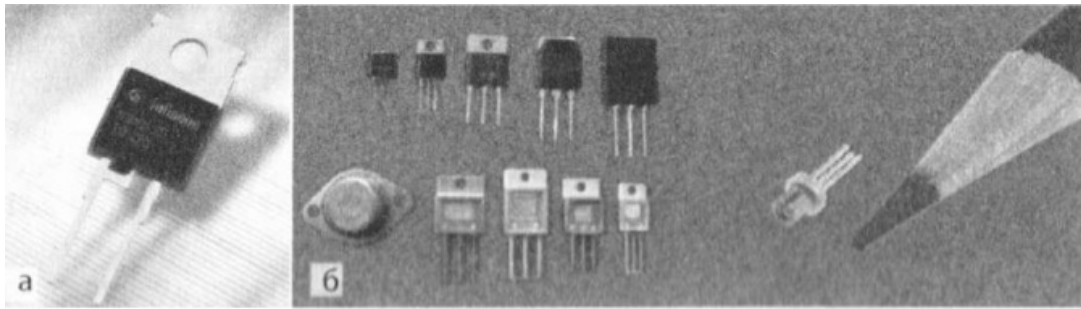


Ковалентний зв'язок.

Для встановлення зв'язку з четвертим атомом електрона не вистачить, і цей відсутній електрон Індій «запозичить» у сусідніх атомів Силіцію. У результаті кожний атом Індію створить одну дірку. Домішки такого роду називаються акцепторними домішками (від латин. acceptor— той, що приймає). У напівпровідниках з акцепторними домішками основними носіями заряду є дірки. Напівпровідники з переважно дірковою провідністю називають напівпровідниками р-типу (від латин. Positivus - позитивний). Оскільки при наявності домішок кількість вільних заряджених частинок збільшується (кожний атом домішки дає вільний електрон або дірку), то провідність напівпровідників з домішками набагато краща, ніж провідність чистих напівпровідників.

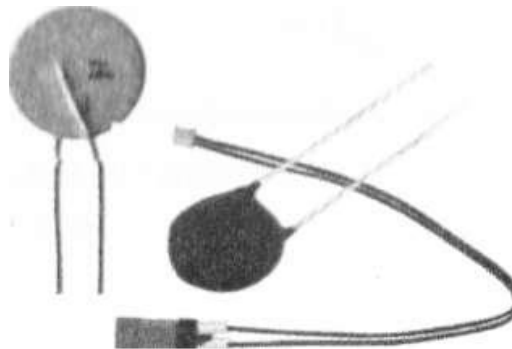
Застосування напівпровідників. Широке застосування напівпровідників зумовлене кількома чинниками. По-перше, властивостями р-переходу — місця контакту двох напівпровідників — р- і n-типу. Саме тут спостерігається ряд цікавих явищ. Наприклад, через такий контакт електричний струм добре проходить в одному напрямку і практично не проходить у протилежному. Це явище отримало назву односторонньої провідності. Властивості р-n-переходу використовують для виготовлення напівпровідникових діодів і транзисторів, без яких не обходиться жодний сучасний електронний

пристрій, а також у сонячних батареях - приладах для безпосереднього перетворення енергії випромінювання Сонця на електричну енергію.



Напівпровідникові діоди і транзистори.

Слід додати, що застосування напівпровідників у техніці майже на 99 % зумовлене саме властивостями р-переходу і що докладніше з цими властивостями ви познайомитеся під час подальшого вивчення фізики. По-друге, опір напівпровідників зменшується зі збільшенням температури, і навпаки. Цю залежність використовують у спеціальних термометрах, які застосовують для вимірювання температури, підтримання сталої температури на автоматичних пристроях.



Автоматичні прилади зі спеціальними термометрами.

По-третє, напівпровідники мають властивість змінювати свій опір залежно від освітленості. Ця властивість використовується у напівпровідникових приладах, які називають фоторезисторами і застосовують для вимірювання освітленості, контролю якості поверхні та ін.



Фоторезистор.

Провідність напівпровідників зумовлена рухом вільних електронів (електронна провідність) і рухом дірок (діркова провідність). У чистому напівпровіднику електричний струм створює однакова кількість вільних електронів і дірок. Таку провідність називають власною провідністю напівпровідників. За наявності домішок провідність напівпровідників різко збільшується. У разі введення в напівпровідник домішки з більшою валентністю (донорної домішки) вільних електронів стає в багато разів більше, ніж дірок. Такі напівпровідники називають напівпровідниками *n-типу*. У випадку введення в напівпровідник домішки з меншою валентністю (акцепторної домішки) дірок стає більше, ніж вільних електронів. Напівпровідники з переважно дірковою провідністю називають напівпровідниками *p-типу*. Напівпровідники широко використовують у техніці, наприклад для виготовлення напівпровідникових діодів і транзисторів, фотоелементів, термісторів, фоторезисторів тощо.

Напівпровідник — матеріал, електропровідність якого має проміжне значення між провідностями провідника та діелектрика. Напівпровідниками є речовини, ширина забороненої зони яких складає порядку декількох електронвольт (eV). Наприклад, алмаз можна віднести до широкозонних напівпровідників, а арсенід індію — до вузькозонних. До числа напівпровідників належать багато простих речовин хімічних елементів (германій, кремній, селен, телур, арсен та інші), величезна кількість сплавів і хімічних сполук (арсенід галію та ін.).

При накладанні на кристал електричного поля електрони у напівпровідниках переміщаються проти поля і створюють електричний струм. Таким чином, зона внаслідок часткового укомплектування електронами стає зоною провідності.

Провідність власних напівпровідників, зумовлена електронами, називається електронною провідністю, або провідністю *n-типу*.

Провідність власних напівпровідників, зумовлена квазічастинками-дірками, називається дірковою провідністю, або провідністю р-типу. Провідність напівпровідників завжди є збудженою, тобто появляється лише під дією зовнішніх факторів (температури, опромінювання, сильних електричних полів і т.д.). У напівпровідників спостерігається два механізми провідності – електронна і діркова. Кількість електронів в зоні провідності дорівнює кількості дірок у валентній зоні, тобто $N_e = N_p$.

У напівпровідниках, що містять домішку, електропровідність складається із власної й домішкової. Провідність, викликана присутністю в кристалі напівпровідника домішок з атомів з іншою валентністю називається домішковою. Домішки, що викликають у напівпровіднику збільшення вільних електронів, називаються донорними, а викликаючи збільшення дірок - акцепторними. Різна дія домішкових атомів пояснюється в такий спосіб. Припустимо, що в кристал германія (Ge_{44}) атоми якого мають 4 валентних електрона, уведено п'ятивалентний миш'як As_{5+} . У цьому випадку атоми миш'яку своїми 4-я з п'яти валентних електронів вступають у зв'язок. 5-й валентний електрон миш'яку виявиться не зв'язаним, тобто стає вільним електроном. Напівпровідники, електропровідність яких підвищилася завдяки утвору надлишку вільних електронів при введенні домішки, називаються напівпровідниками з електронною провідністю (напівпровідник n-типу), а домішка донорною, (що віддає електрон). Уведення в 4-х валентний напівпровідник 3-х валентного елемента, наприклад (In_{3+}) індію приводить, навпаки, до надлишку дірок над вільними електронами. У цьому випадку ковалентні зв'язки не будуть повністю завершені дірки, що утворюються, можуть переміщатися по кристалу, створюючи діркову провідність. Напівпровідники, електропровідність яких обумовлена в основному рухом дірок, називається напівпровідниками з дірковою провідністю або напівпровідниками р-типу, а домішка - акцепторною (захоплюючи електрон з ковалентного зв'язку або з валентної зони). Енергетичні рівні цих домішок називаються акцепторними рівнями - розташовані над валентною зоною. Енергетичні рівні донорних домішок називаються донорними рівнями та розташовані під нижнім

рівнем зони провідності. У домішкових напівпровідниках носії заряду бувають основними (електрони в провіднику n-типу) і не основними (дірки в напівпровіднику p-типу).

Енергія активації - характерний параметр процесів, зокрема хімічних реакцій, кінетика яких описується рівнянням Арреніуса. $k = Ae^{-E_a/RT}$, де E_a - енергія активації, R - газова стала, T - температура, A - певний передекспоненційний множник, який слабо залежить від температури. Енергія активації описує потенціальний бар'єр, який повинен подолати частинки для того, щоб реакція відбулася. При підвищенні температури, доля частинок із кінетичною енергією, достатньою для подолання бар'єру, збільшується.

Енергія активації вимірюється зазвичай у кДж/моль або ккал/моль.

В фізиці закон Арреніуса частіше записують у вигляді $k = Ae^{-E_a/k_B T}$, де k_B - стала Больцмана. При такому записі енергія активації записується в розрахунку на одну частинку і має розмірність енергії. Найчастіше її значення приводиться в електронвольтах.

Характерна риса напівпровідників — зростання електропровідності зі зростанням температури; при низьких температурах електропровідність мала. При температурі, близькій до абсолютного нуля напівпровідники мають властивості ізоляторів. Кремній, наприклад, при низькій температурі погано проводить електричний струм, але під впливом світла, тепла чи напруги електропровідність зростає.

Терморезистор, термістор — напівпровідниковий резистор, активний електричний опір якого залежить від температури; терморезистори випускаються у вигляді стрижнів, трубок, дисків, шайб і бусинок; розміри варіюються від декількох мкм до декількох см; на їх основі розроблені системи і пристрої дистанційного та централізованого вимірювання і регулювання температури, протипожежної сигналізації та теплового контролю, температурної компенсації різних елементів електричного кола, вимірювання вакууму та швидкості руху рідин і газів та ін. Терморезисторами також називають термометри, в яких температура визначається за

змінюю електричного опору. Терморезистори мають місце у системах дистанційного і централізованого вимірювання, у регулюванні температури системи теплового контролю машин та правових механізмів, схемі температурної компенсації, схемі виміру потужності ВЧ. Терморезистори знаходять використання у промисловій електроніці і побутовій апаратурі: рефрижераторах, автомобілях, електронагрівальних приладах, телевізорах, системах центрального опалення й ін. У телевізорах часто використовуються терморезистори з позитивним ТКС для розмагнічування кінескопа. Вперше, де застосовувалися терморезистори – це датчики для виміру чи регулювання температури. Терморезистори широко використовують у різних пристроях у ролі датчиків температури. Після відповідної модифікації їх можна використовувати в електронних пристроях зволікання з досить широким інтервалом часів затримки, як конденсатори чи котушки індуктивності в низькочастотних генераторах, для захисту від викидів напруги в ємкостях, індуктивних чи резистивних схемах, як обмежувачі струму, напруги, для вимірювань тиску газу чи теплопровідності. Отже, терморезистори знаходять застосування в багатьох областях.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

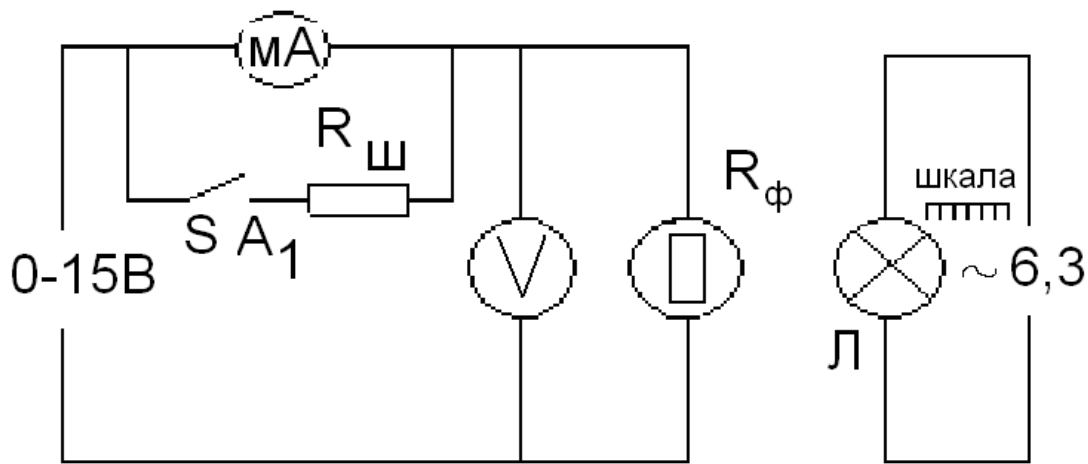
«Внутрішній фотоефект у напівпровідниках».

Мета роботи: експериментально встановити залежність опору напівпровідника від величини падаючого на нього потоку електромагнітного випромінювання та визначити чутливість фото резистора.

Прилади та обладнання: напівпровідниковий фото резистор ФСД-Г2, джерело світла (лампа), мікроамперметр та вольтметр постійного струму, джерело, що регулюється, постійної напруги (0-15В) , джерело напруги (6,3В).

Методика експерименту.

Схема лабораторної установки показана на рис.1.



Світло від лампочки накаливання Л падає на фото резистор, змінюючи його опір. За допомогою вольтметра вимірюється напруга на фоторезисторі, яка може змінюватись від 0 до 15В. Мікроамперметр вимірює силу струму, що проходить через фоторезистор. При збільшенні падаючого світлового потоку опір шунта $R_{ш}$ підключається тумблером SA_1 і максимальний струм, що вимірюється, становить $I_{max}=5$ мА. При відключенні $I_{max}=I$ мА. Падаючий світловий потік Φ_p можна зменшувати, збільшуючи відстань від лампи до фото резистора. Його величина розраховується

$$\Phi_n = \frac{I \cdot S}{r^2} \cos \alpha,$$

де I - сила світла лампи, $S=28$ mm²—площа світлочутливого шару фото резистору, $\alpha=0$ – кут між напрямком світлового потоку та нормальною до світлочутливої поверхні, r – відстань між лампами до фото резистора визначається по шкалі.

Можна визначити величину падаючого світлового потоку

$$\Phi_n = \frac{I \cdot S}{r^2} \cdot \cos \alpha = \frac{0,43 \cdot 28 \cdot 10^{-6}}{r^2} = 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{r^2}$$

Отже, падаючий світловий потік змінюється обернено пропорційно квадрату відстані к від фоторезистора до лампи накаливання.

Порядок виконання роботи.

1. Встановити вимірювання сили струму $I_{max}=5$ мА. Включити живлення фото резистора та лампи, встановити напругу 10 В.

Визначити силу струму при мінімальній відстані r . Збільшуючи r через 1 см зняти залежність I (Φ_n) (при $U = \text{const}$) та побудувати графіки залежності $I=f(\Phi_n)$.

Таблиця 1

№	$r(\text{m})$	$I(\text{A})$	$U(\text{B})$	R_Φ	Φ_n
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

2. Обчислити опір фоторезистора R_Φ ($R_\Phi = U/I_\Phi$) для всіх значень сили струму та побудувати графік залежності $R_\Phi = f(\Phi_n)$.

3. Установити лампу біля фоторезистора ($r=1$ см). Змінюючи вхідну напругу через I В, зняти залежність I (U) при $\Phi = \text{const}$ (табл. 2) та побудувати графік залежності $I=f(U)$.

Таблиця 2

№	$r(\text{m})$	$U(\text{B})$	$I(\text{A})$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Контрольні питання.

1. Що називається фотоефектом?
2. Рівняння Планка та Ейнштейна
3. Як залежить опір від світлового потоку?
4. Від чого залежить сила струму фоторезистора?
5. Де застосовуються фоторезистори?

Додаткові теоретичні відомості

Фотоефект – це явище «звільнення» електронів твердого тіла від зв'язків усередині атома під дією електромагнітного випромінювання.

Електрони, що вилітають із речовини при зовнішньому фотоефекті, називаються «фотоелектронами», а електричний струм, який утворюється ними при упорядкованому русі у зовнішньому електричному полі, називається «фотострумом».

Види фотоефекту:

1) **зовнішній фотоефект** (фотоелектронна емісія) - випромінювання електронів з поверхні твердого тіла під дією світла, гамма - випромінювання і т. і. (відкритий Г. Герцем у 1887, пояснений Ейнштейном);

2) **внутрішній фотоефект** – перерозподіл електронів за енергетичними станами в твердих та рідких напівпровідниках та діелектриках, який спричиняється світлом. Він проявляється у зміні концентрації носіїв струму у середовищі і призводить до виникнення фотопровідності;

3) **вентильний фотоефект** - збудження світлом ЕРС на межі поділу метал - напівпровідник або між різнорідними напівпровідниками. При вентильному фотоефекті фотоелектрони виходять через поверхню поділу з одного тіла в інше.

Теоретичне пояснення явища фотоефекту дав Альберт Ейнштейн, за що отримав Нобелівську премію. Ейнштейн використав гіпотезу Макса Планка про те, що світло випромінюється порціями (квантами) із енергією, пропорційною частоті. Припустивши, що світло і поглинається такими ж порціями, він зміг пояснити

залежність швидкості вибитих електронів від довжини хвилі опромінення.

Квантова природа світла визначає світловий потік фотонів (квантів). Кожен фотон має масу, імпульс і дискретну енергію тільки при швидкості світла.

Енергія фотона по Планку визначається так званою формулою Планка:

Рівняння Планка має вигляд: $E_{\phi} = h\nu$

h - стала Планка

ν - частота світла

Енергію фотона речовина повністю поглинає або повністю випромінює. Ця величина неділима. **Енергія фотона по Ейнштейну:**

$$E_{\phi} = m_{\phi}c^2$$

$$h\nu = m_{\phi}c^2$$

m_{ϕ} — це маса фотона, що визначається формулою: $m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}$

$$\lambda = \frac{1}{T}$$

$$\lambda = cT = c \frac{1}{\nu}$$

ν — частота світла, визначається за формулою: $\nu = \frac{c}{\lambda}$

Імпульс фотона можна визначити:

$$p_{\phi} = m_{\phi}c = \frac{h\nu}{c^2}c = \frac{h\nu}{c}$$

$$p_{\phi} = \frac{h\nu}{c} - \text{імпульс фотона.}$$

$$h\nu = \frac{mv^2}{2} + A,$$

де ν — частота світла, h — стала Планка, m — маса електрона, v — його швидкість, A — робота виходу.

Це рівняння називається **рівнянням Ейнштейна**. Робота Ейнштейна мала велике значення для розвитку ідей квантової механіки взагалі та квантової оптики зокрема.

Для виконання повного фотоефекту енергія фотона $h\nu$ поглинається електроном, що дає йому можливість виконати роботу

виходу за межі речовини та надати йому енергію, необхідну для проходження від катода до анода.

Червона границя фотоефекту. Мінімальна умова при якій може відбутися фотоефект: $\lambda \nu = A_{\text{вих}}$

$\nu_2 = \frac{A_{\text{вих}}}{h}$ - умова, при якій енергії фотона достатньо, щоб виконати роботу виходу.

Причина фотопровідності - збільшення концентрації носіїв заряду (електронів) у зоні провідності і дірок у валентній зоні. Світлочутливий шар напівпровідникового матеріалу в таких опорах поміщений між двома струмопровідними електродами. Під впливом світлового потоку електричний опір шару змінюється. У залежності від застосовуваного шару напівпровідникового матеріалу фотоопору підрозділяються на сірко-свинцеве, сірко-кадмієве, сірко-вісмутове і полікристалічні селено-кадмієві. При певному освітленні опір фотоелемента зменшується, а, отже, сила струму в колі зростає, досягаючи значення, достатнього для роботи якого-небудь пристрою (схематично показано у вигляді деякого опору навантаження).

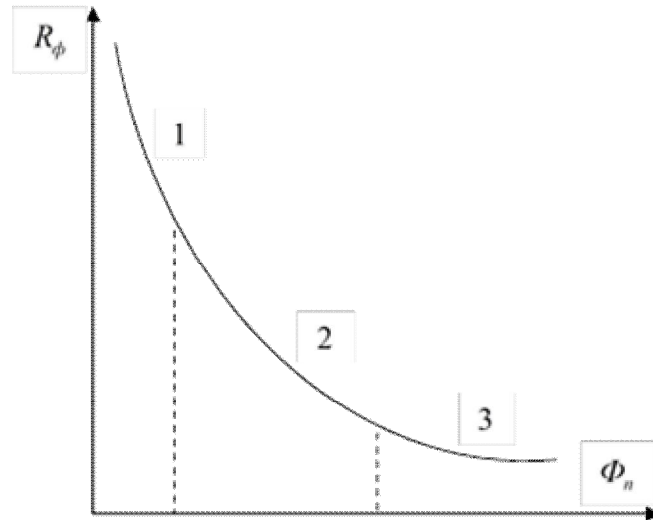
Завдяки простоті і надійності, високій чутливості і малим розмірам фоторезистори знаходять широке застосування в приладобудуванні і технології виробництва. Їх використовують як фотоелектричні перетворювачі вимірювальних пристроїв, фотоелектричні реле, регулятори і т.п. Фотоелектричні реле на основі фоторезисторів використовуються для захисту від травмування рук робітників, обслуговуючих штампувальні преси з електропневматичним управлінням, в охоронних пристроях для захисту ділянок території від проникнення сторонніх осіб, для контролю розмірів, кольору і якості поверхні різних виробів, для лічби деталей на конвеєрі і т.п.

Оскільки експериментально квантовий вихід визначити складно, інтегральну чутливість визначають як відношення величини відносної зміни опору фоторезистора до приросту потоку енергії випромінювання, що викликав цю зміну:

$$\eta = \frac{\Delta R_{\phi}}{R_{\phi} \cdot \Delta \Phi_n}$$

де R_Φ - опір чутливого шару фоторезистора під час опромінювання його потоком Φ_n (визначається для середнього значення потоку в проміжку $\Delta\Phi_n$).

На малюнку показано залежність $R_\Phi(\Phi_n)$:



Оскільки залежність R_Φ від Φ_n нелінійна, то інтегральну чутливість η фоторезистора, як правило, визначають на різних ділянках залежності, наприклад, на ділянках 1, 2, 3.

Фоторезисторами називають напівпровідникові прилади, провідність яких змінюється під дією світла. Основним елементом фоторезистора є у першому випадку монокристал, а в другому - тонка плівка напівпровідникового матеріалу.

Якщо фоторезистор включений послідовно з джерелом напруги і не освітлений, то в його колі буде протікати темновий струм

$I_m = E / (R_m + R_n)$, де E - е.р.с. джерела живлення; R_m - величина електричного опору фоторезистора в темряві, звана темного опору; R_n - опір навантаження.

При висвітленні фоторезистора енергія фотонів витрачається на переклад електронів в зону провідності. Кількість вільних електронно-діркових пар зростає, опір фоторезистора падає і через нього тече світловий струм:

$$I_c = E / (R_c + R_n).$$

Різниця між світловим і темновим струмами дає значення струму I_Φ , що отримав назву первинного фотоструму провідності

$$I_\Phi = I_c - I_m.$$

Коли променистий потік малий, первинний фотострум провідності практично безінерційний і змінюється прямо пропорційно величині променистого потоку, що падає на фоторезистор. У міру зростання величини променистого потоку збільшується число електронів провідності. Рухаючись всередині речовини, електрони зіштовхуються з атомами, іонізують їх і створюють додатковий потік електричних зарядів, що отримав назву вторинного фотоструму провідності. Збільшення числа іонізованих атомів гальмує рух електронів провідності. У результаті цієї зміни фотоструму запізнюються у часі щодо змін світлового потоку, що визначає деяку інерційність фоторезистора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики : в 3 т. Москва : Наука, 1974. Т 1. 336 с. URL : http://alexandr4784.narod.ru/zsm_1.html (дата звернения 26.05.2021).
2. Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики : в 3 т. Москва : Наука, 1972. Т 2. 368 с. URL : <https://www.twirpx.com/file/109500/> (дата звернения 26.05.2021).
3. Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики : в 3 т. Москва : Наука, 1970. Т 3. 500 с. URL : http://alexandr4784.narod.ru/zsm_3.html (дата звернения 26.05.2021).
4. Савельев И. В. Курс общей физики : в 3 т. Москва : Наука, 1982. Т 2. URL : https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/org_structura/library/resurvsy/per_vokursnik/irit/fiz/osnovn/2.pdf (дата звернения 28.05.2021).
5. Савельев И. В. Курс общей физики : в 3 т. Москва : Наука, 1970. Т 3. URL : <http://ftechedu.ru/1sem/books/fiz/Savelyev-fizika-t3.pdf> (дата звернения 28.05.2021).
6. Калашников С. Г. Электричество. Москва : Наука, 1986. 576 с.
7. Сивухин Д. В. Общий курс физики : в 5 т. Москва, 1979. 520 с. Т. 1. URL : http://4ipho.ru/data/documents/Sivuhin_I.pdf (дата звернения 28.05.2021).
8. Сивухин Д. В. Общий курс физики : в 5 т. Москва : Наука, 1975. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. 519 с.
9. Сивухин Д. В. Общий курс физики : в 5 т. Москва : Наука, 1977. Т. 3. Электричество. 688 с.
10. Сивухин Д. В. Общий курс физики : в 5 т. 3-е изд. Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2005. Т. 4. Оптика. 792 с. URL : https://drive.google.com/file/d/1Zd4yKtdBWicdcDjkNlrd3__a8unonFIh/view (дата звернения 28.05.2021).
11. Матвеев А. Н. Электродинамика. Москва : Высшая школа, 1980. 383 с.
12. Епифанов Г. И., Мома Ю. А. Твердотельная электроника. Москва : Высшая школа, 1986. 304 с.
13. Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности. Москва : Наука, 1988. 432 с.
14. Чертов А. Г. Единицы физических величин. Москва : Высшая школа, 1977. 287 с.

Навчальне видання

ФІЗИКА

Модуль 4 “Напівпровідники в електричному колі”

Методичні рекомендації

Укладачі: **Вахоніна** Лариса Володимирівна
Мардзявко Віталій Анатолійович,
Руденко Андрій Юрійович

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк.3,0.

Тираж 50 прим. Зам № _____

Надруковано у видавничому відділі

Миколаївського національного аграрного університету

54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №4490 від 20.02.2013 р.