

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ
ЗАПОРІЗЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

З.А. Ніконова
О.Ю.Небеснюк
А.О.Ніконова

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

**ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ДИСЦИПЛІНИ
«КОМПОНЕНТИ ТА МАТЕРІАЛИ
МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ»
Для студентів освітнього рівня «Магістр» за спеціальністю 176
«Мікро- та наносистемна техніка»**

Обговорено та ухвалено на засіданні
кафедри електроніки, інформаційних систем та
програмного забезпечення
Протокол №1 від 28.08.23

Запоріжжя
2023

Ніконова З.А., Небеснюк О.Ю., Ніконова А.О. «Компоненти та матеріали мікроелектронних пристроїв»: методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт для здобувачів ступеня вищої освіти магістра спеціальності 176 «Мікро – та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікроелектронні інформаційні системи». Запоріжжя : ЗНУ, 2023. 48с.

У методичних рекомендаціях систематизовано методологічні аспекти теорії і практики досліджень, виконання розрахунків параметрів та характеристик пасивних і активних інтегральних компонентів у галузі 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації».

Послідовність та логічність викладення матеріалу в методичних рекомендаціях розкриваються в повному обсязі з дисципліни «Компоненти та матеріали мікроелектронних пристроїв», передбаченої навчальним планом підготовки здобувачів.

За кожним лабораторним завданням у методичних рекомендаціях наведено теоретичний матеріал, порядок виконання, схеми та прилади, розрахункові формули, практичні приклади виконання, варіанти завдань, контрольні запитання.

Рекомендовано для здобувачів ступеня вищої освіти магістра спеціальності 176 «Мікро – та наносистемна техніка» за освітньою програмою «Мікроелектронні інформаційні системи».

ЗМІСТ

ВСТУП

1. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

- 1.1 Теоретичні відомості
- 1.2 Приклад розрахунку резисторів
- 1.3 Порядок виконання роботи
- 1.4 Порядок складання звіту
- 1.6 Контрольні запитання

2. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

- 2.1 Теоретичні відомості
- 2.2 Приклад розрахунку
- 2.3 Порядок виконання роботи
- 2.4 Порядок складання звіту
- 2.5 Контрольні запитання, написати висновок та захистити роботу.

3. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

- 3.1 Теоретичні відомості
- 3.2 Приклад виконання
- 3.3 Порядок виконання роботи
- 3.4 Порядок складання звіту
- 3.5 Контрольні запитання

4. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

- 4.1 Теоретичні відомості
- 4.2 Приклад виконання
- 4.3 Порядок проведення
- 4.4 Порядок складання звіту
- 4.5 Контрольні запитання

5. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

- 5.1 Теоретичні відомості

5.2 Зміст завдання

5.3 Порядок виконання роботи

5.4 Порядок складання звіту

5.5 Контрольні запитання

6. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

6.1 Теоретичні відомості Зміст завдання

6.2 Зміст завдання

6.3 Порядок виконання роботи

6.4 Порядок складання звіту

6.5 Контрольні запитання

7. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

7.1 Теоретичні відомості Зміст завдання

7.2 Зміст завдання

7.3 Порядок виконання роботи

7.4 Порядок складання звіту

7.5 Контрольні запитання

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

ВСТУП

Україна, як і кожна сучасна європейська держава, в структуру основних принципів розвитку суспільства включає питання використання інтегральних елементів у різних приладах та пристроях мікроелектроніки.

Розвиток новітніх технологій пред'являє зростаючі вимоги до фахівців зі спеціальності 176 «Мікро – та наносистемна техніка», їхнього творчого розвитку, умінню знаходити найбільш раціональні технологічні та конструктивні рішення, доведення існуючих наукових відкриттів до практичної реалізації.

Надані завдання з лабораторних робіт спрямовані на: поглиблення знань з теоретичних основ та набуття практичного досвіду щодо вирішення конкретних науково – дослідних задач при розробці приладів мікро- та наносистемної техніки та мікроелектронних інформаційних систем, які задовольняють потреби суспільства у їх виробництві; вироблення навичок проведення досліджень, впровадження їх результатів у практику діяльності організацій, оволодіння традиційними та сучасними інноваційними методами їх проведення; оволодіння фізичними процесами мікро- та наноелектронних систем, приладів й компонентів з використанням сучасних експериментальних методів та обладнання; використання інформаційних ресурсів, бази даних і знань з урахуванням вітчизняного й закордонного досвідів.

Мета викладання дисципліни «Компоненти та матеріали мікроелектронних пристроїв» навчити студентів визначати розрахунковим шляхом основні параметри компонентів і матеріалів мікро – та наносистемної техніки; розвинути уміння про будову, види конструкцій та призначення основних видів пасивних та активних інтегральних компонентів; підбирати та досліджувати необхідні електронні компоненти та матеріали для практичного використання при виконанні дипломних проектів та проєктуванні мікроелектронних пристроїв.

Завданням дисципліни є набуття знань щодо впливу хімічного складу, структури, зовнішніх факторів, технології виготовлення і обробки на властивості матеріалів та компонентів мікро- та наносистемної техніки; володіння: методами та програмними продуктами розрахунку параметрів та вдосконалення їх функціональних можливостей при різних умовах роботи; основними способами та видами методик дослідження характеристик та технологічних особливостей виготовлення; уміння аналізувати, моделювати та критично оцінювати отримані результати.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент **зможє**:

- Збирати необхідну інформацію, використовуючи науково-технічну літературу, бази даних та інші джерела, аналізувати і оцінювати її.
- Забезпечувати якість виробництва; обирати технології, що гарантують отримання необхідних характеристик твердотільних пристроїв; застосовувати сучасні методи контролю мікро- та наносистемної техніки.
- Досліджувати процеси у мікро- та нанoeлектронних системах, приладах й компонентах з використанням сучасних експериментальних методів та обладнання, здійснювати статистичну обробку та аналіз результатів експериментів.
- Проводити випробування, експериментальні та теоретичні дослідження властивостей матеріалів, наноструктур та технологій, компонентів та пристроїв мікро- та наносистемної техніки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ РЕЗИСТОРІВ ТА РОЗРАХУНОК ЇХ ПАРАМЕТРІВ

Мета: вибрати матеріал та технологію для виготовлення інтегральних резисторів та дослідити його характеристики.

Завдання роботи: за допомогою вакуумної лабораторної установки отримати навички виготовлення тестової структури інтегрального резистора і розрахувати їх параметри.

1.1 Теоретичні відомості

Класифікація резисторів

- за характером змінення опору;
- за способом монтажу;
- за способом захисту;
- за матеріалом резистивного елементу;
- за призначенням.

Тонкоплівковий резистор

Тонкоплівкові резистори являються елементами гібридних тонкоплівкових мікросхем, а також узгоджувачими елементами в мікрозбірках, де вони присутні у вигляді резистивних матриць (резистивних „збірок”) на окремій мініатюрній підкладці.

Кожна марка резистивних сплавів характеризується заданими значеннями питомого опору R [Ом], допустимою питомою потужністю розсіювання P_0 [Вт/см²], температурним коефіцієнтом опору α [K⁻¹] і коефіцієнтом старіння $g_{ст}$. У довіднику обирається тип тонкоплівкового резистора.

1.2 Приклад розрахунку резисторів :

1. Визначаємо діапазон p_0 , у якому можна вести розрахунок:

$$0,02R_{\max} < p_0 < R_{\min} \Rightarrow 15 < p_0 < 500 \quad (1.1)$$

2. Відносна температурна похибка:

$$\gamma_{RT} = \alpha_R (T^0_{\max} \text{ C} - 20) \quad (1.2)$$

$$\gamma_{RT} = 0,0002(150 - 20) = 0,026$$

3. Відносна похибка старіння:

$$\gamma_{Rsc} = \frac{S \cdot t_{\text{тєкци}}}{t_{\text{випр}} \cdot 100} = \frac{0,5 \cdot 5000}{1000 \cdot 100} = 0,025, \quad (1.3)$$

де $t_{\text{випр}}$ – час випробування, за який визначено коефіцієнт старіння S ;
 $t_{\text{випр}} = 1000$ годин.

4. Відносна похибка контактування:

$$\gamma_{Rk} = 0,01 - 0,03 \Rightarrow \gamma_{Rk} = 0,01. \quad (1.4)$$

5. Відносна похибка форми:

$$\gamma_{k\phi} = \gamma_R - \gamma_{Po} - \gamma_{RT} - \gamma_{Rk} - \gamma_{Rsc} \quad (1.5)$$

$$\gamma_{k\phi} = 0,25 - 0,1 - 0,026 - 0,025 - 0,01 = 0,039$$

6. Розрахуємо коефіцієнт форми резистора:

$$K\phi = \frac{R_H}{P_0} = 0,50/500 = 1,9 \quad (1.6)$$

7. Знаходимо ширину резистора по міцності:

$$b_{\min p} = \sqrt{\frac{P_H \cdot \rho_0}{P_O \cdot R_H}}$$

$$b_{\min p} = \sqrt{\frac{1,41 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{500}{450}} = 0,0086(\text{мм}) \quad (1.7)$$

8. Визначаємо основний розмір по заданій точності:

$$b_{\min \gamma} = \frac{\Delta b + (\Delta l / K\phi)}{\gamma_{K\phi}}$$

$$b_{\min \gamma} = \frac{0,02 + 0,02/1,9}{0,039} = 0,78(\text{мм}), \quad (1.8)$$

де $\Delta l = \Delta b = 0,02$.

9. Вибір основного розміру:

$$b > \{b_{\min p}, b_{\min \gamma}\} \Rightarrow b = 0,78 \text{мм}. \quad (1.9)$$

10. Визначення довжини резисторів:

$$l = b \cdot K\phi = 0,78 \cdot 1,9 = 1,48(\text{мм}). \quad (1.10)$$

11. Перевірка проведених розрахунків:

$$R_p = \rho_0 \cdot \frac{l}{b} = 500 \cdot \frac{1,48}{0,78} = 0,500 \text{Ом} \Rightarrow \quad (1.11)$$

розрахунок виконано точно.

1.3 Порядок виконання роботи

1. Хід виконання лабораторної роботи описано нижче в додатку 1.

Лабораторна робота № 1.
**БУДОВА ТА РОБОТА ВАКУУМНОГО УНІВЕРСАЛЬНОГО
ПОСТУ ВУП-5М**

Мета роботи: ознайомлення з загальною будовою, принципом роботи та технологічними можливостями установки ВУП-5М; набуття практичних навичок щодо експлуатації установки.

1.1. Теоретичні відомості

1.1.1. Призначення

Вакуумний універсальний пост ВУП-5М призначений для обробки поверхні зразків та отримання плівок різноманітними методами вакуумних технологій (магнетронного, резистивного, іонно-плазмового, електронно-променевого, лазерного розпилення) для проведення наукових досліджень, а також для підготовки об'єктів що досліджуються методами електронної мікроскопії, або інших аналітичних досліджень.

Прилад може бути застосований для досліджень у фізиці, хімії, біології, медицині та інших галузях науки і техніки.

1.1.2. Технічна характеристика приладу ВУП-5М

Прилад призначений для експлуатації в стаціонарних лабораторних умовах при температурі навколишнього середовища від 15 до 25 °С і відносній вологості не більше 80 %. Наявність у приміщенні агресивних парів не припустима.

Живлення приладу здійснюється від трифазної мережі змінного струму напругою 220/380 В, частотою 50 Гц.

Маса приладу, кг, не більше 300.

Габаритні розміри, мм, не більше:

довжина – 540;

ширина – 910;

висота – 1550.

Споживана потужність без приставок, кВт, не більш 1,9.
Максимальна споживана потужність, кВт, не більше 5.

1.1.3. Основні параметри і характеристики

Залишковий тиск у робочому об'ємі при охолодженні пастки рідким азотом $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па ($1,0 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.).

Залишковий тиск у робочому об'ємі при охолодженні пастки водою $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па ($1,0 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.).

Струм напруження випарників 200 А.

Температура столика для нагріву об'єктів 1100 °С.

Температура столика для охолодження об'єктів мінус 160 °С.

Напруга на виході високовольтного випрямляча ($7 \pm 0,35$) кВ.

Максимальний струм тліючого розряду 50 мА.

Максимальна напруга на виході високовольтного випрямляча джерела живлення магнетрона не менше 0,9 кВ.

Максимальний струм магнетрона не менше 300 мА.

Температура в районі підкладки пристрою для осадження плівок не менше 300 °С.

Час нагрівання не більше 30 хв.

Час зміни підкладок не більше 7 с, швидкість обертання підкладок не менше $0,5 \text{ с}^{-1}$.

Заслінка пристрою зміни підкладок забезпечує перекриття потоку випарюваної речовини від випарника до підкладок.

Пристрій дискретного випаровування забезпечує подачу на випарник в процесі випаровування подрібненої речовини.

За допомогою пульта управління забезпечується вихід в робочий режим вакуумної системи з холодного стану і комутація вакуумної системи під час роботи.

1.1.4. Склад приладу ВУП-5М

У повний комплект приладу входить пост вакуумний універсальний ВУП-5М з пристроями і приставками:

1. Приставка для магнетронного розпилення.
2. Блок живлення магнетрона.
3. Пристрій для термічного випаровування з резистивних випарників.
4. Пристрій для випаровування вугілля.
5. Електронний випарник.

6. Пристрій для іонної обробки об'єктів і двостороннього полірування.
7. Пристрій для нагріву столика об'єктів.
8. Пристрій для повороту і нахилу об'єктів.
9. Пристрій для приварки катодів.
10. Система напуску повітря в РО.
11. Датчик індикатора товщини покриття, що напилюється.
12. Пристрій для осадження плівок.
13. Автоматична система напуску газу.
14. Комплект пристроїв для інтерференційного лазерного контролю товщини плівки.
15. Іонізатор з обмежуючим екраном.
16. Дозуючий пристрій.
17. Система захисних екранів.

1.1.5. Будова і робота приладу ВУП-5М

Прилад виконаний в одній стійці (рис. 1), в якій розміщені: робочий об'єм РО 2, призначений для препарування об'єктів; вакуумна система, призначена для отримання необхідного розрідження в робочому об'ємі; блоки живлення пристроїв і приставок та пульти керування 3.

Стойка розділена перегородкою на дві частини, в одній з яких 1 розміщена вакуумна система з електромагнітними клапанами для її комутації, перетворювачі ПМТ-4М або МПТ-2, ПМИ-2 для контролю вакууму й автоматичного управління вакуумною системою, вентиль п'єзоелектричний і балон з аргоном. В іншій частині стійки 4 розміщені блоки живлення пристроїв і приставок та трансформатори напруги випарників.

Для зручності монтажу, профілактичних і ремонтних робіт передбачені знімні задні і бічні щитки, а попереду

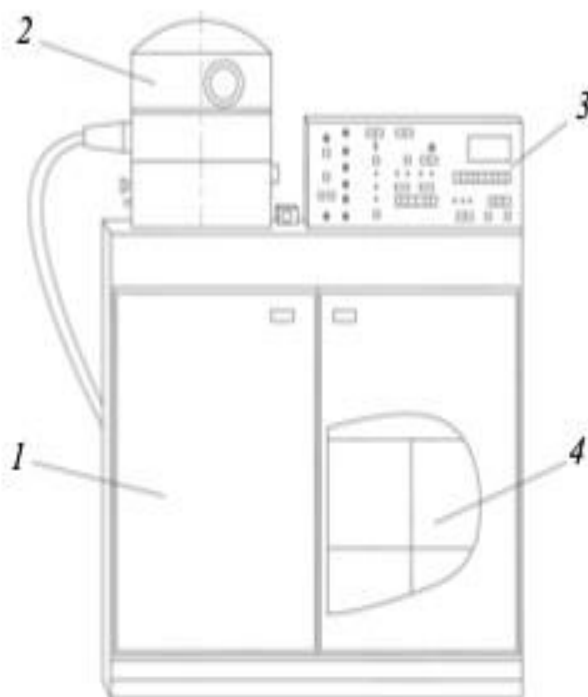


Рис. 1. Загальний вигляд пристрою ВУП-5М

відкриваються двері обох частин, а також легкознімні плати управління приладом, зібрані в єдиній касеті.

На стійці розміщені робочий об'єм (РО) 2 і пульти управління 3, касета з друкованими платами, РО з пристроями і приставками мають електричний зв'язок через джгути і кабелі, які прокладені в обох частинах стійки.

Операції з підготовки об'єктів проводяться в робочому об'ємі при залишковому тиску $1,3 \cdot 10^{-2} \dots 1,3 \cdot 10^{-4}$ Па. Для отримання такого тиску розроблена класична вакуумна система із застосуванням механічного насоса для отримання попереднього вакууму і промасленого високовакуумного насоса.

Вакуумна система може працювати в ручному й автоматичному режимах, тобто комутація вакуумної системи при відкачці високовакуумного об'єму до тиску $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па може проводитися під керівництвом оператора або без його втручання.

Схема вакуумної комутації ВУП-5М наведена на рис. 2.

Для підготовки до дослідження застосовуються відповідні пристрої та приставки. Ці пристрої та приставки встановлюються в робочому об'ємі в залежності від вибору методики підготовки об'єктів. Кожен з пристроїв має закінчену конструкцію і легко замінюється іншим. Всі

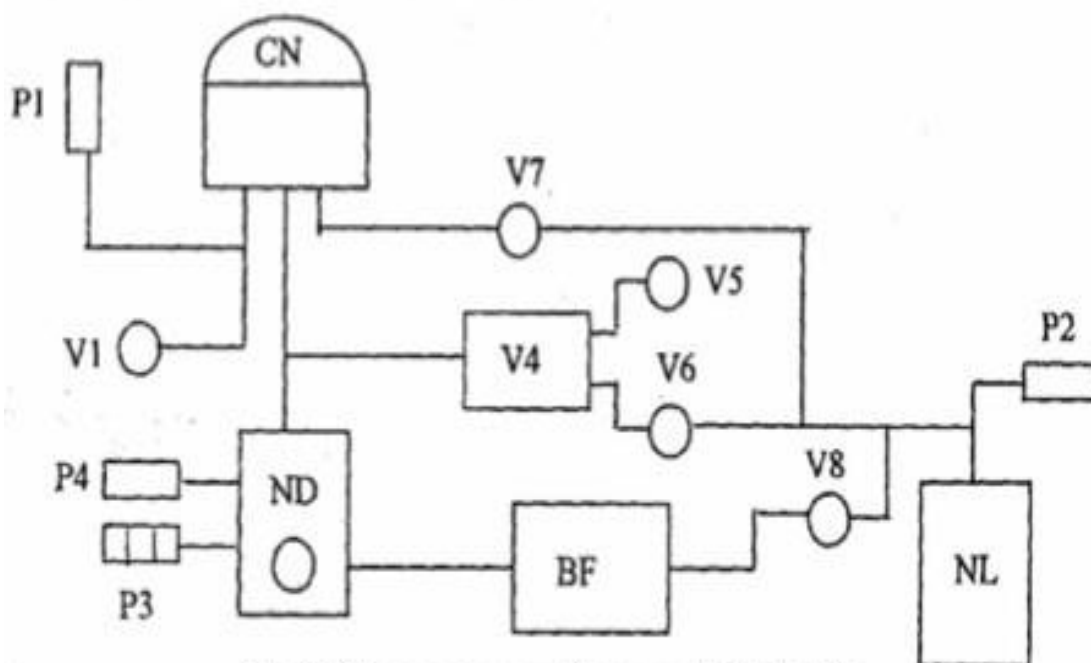


Рис. 2. Схема вакуумної комутації ВУП-5М:

CN – робочий об'єм; ND – насос дифузійний; NL – насос форвакуумний;
BF – балон форвакуумний; V1...V8 – клапани комутації вакуумної системи;
P1, P2, P4 – датчики терморпарні ПМТ-2; P3 – датчик іонізаційний ПМИ-2

операції з підготовки об'єкта контролюються за допомогою індикаторних приладів та інших методів контролю.

Основними операціями з підготовки об'єктів можна назвати **магнетронне розпилення**, **термічне випаровування** речовин за допомогою резистивних та електронних випарників, а також іонну обробку об'єктів.

1.1.6. Робочий об'єм

У робочому об'ємі (РО) проводяться всі операції з підготовки об'єкта до дослідження. Робочий об'єм складається з основи і ковпака (рис. 3).

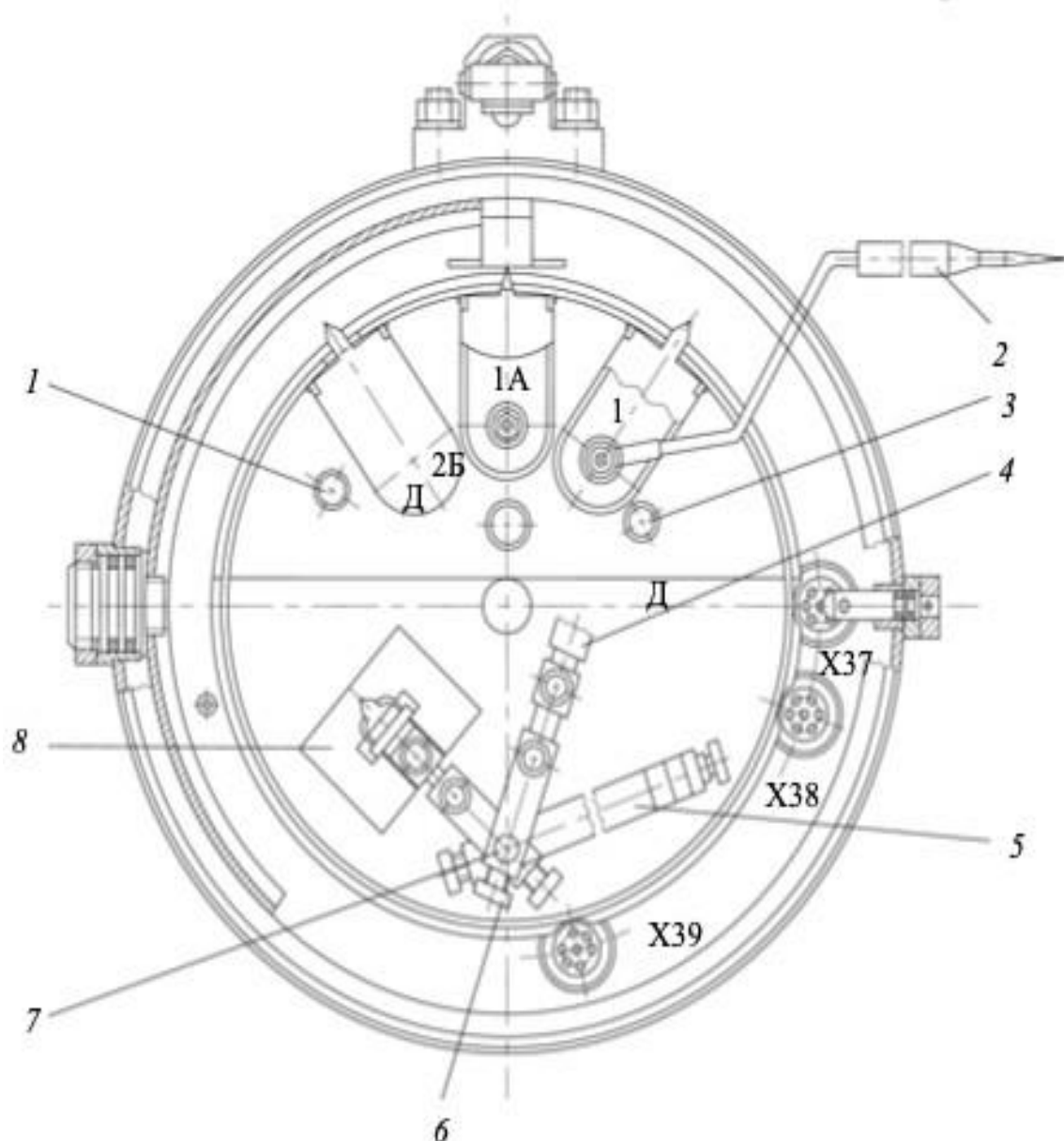


Рис. 3. Робочий об'єм:

1, 3 – гнізда для установки дозатора; 2 – олівець зварювального пристрою;
4 – датчик; 5 – утримувач; 6 – гвинт; 7 – стійка; 8 – панель для приварювання катодів

На основі розташовані роз'єми Х37, Х38, Х39 для приєднання живлення пристрою іонного травлення, пристроїв нагрівання об'єктів, пристрою осадження плівок і для з'єднання датчиків індикаторів товщини; високовольтний вхід Х36 для живлення пристрою іонного травлення та електронного випарника; контакт "4" роз'єму Х38 для живлення столика повороту об'єктів при напилені; контакт "1" для підключення випарників і контакти "2А" і "2Б" для живлення катодів електронних гармат, або як друге джерело живлення резистивних випарників.

Основа РО встановлена на стійці, що пов'язана з вакуумною системою з'єднувальним фланцем. В основі є також прохідні отвори для введення рухливих ручок керування пристроями і приставками, а також оптичний вхід.

1.2. Установки, прилади та матеріали

Для виконання лабораторної роботи використовується установка вакуумний універсальний пост ВУП-5М; додатковий вакуумметр типу ВИТ-3; універсальний мультиметр.

1.3. Порядок виконання роботи

1.3.1. Ознайомитися з будовою та принципом роботи установки ВУП-5М.

1.3.2. Ознайомитися з процесом створення вакууму у робочому об'ємі.

1.3.3. Підготувати установку ВУП-5М до роботи:

- 1) увімкнути загальний рубильник живлення 380 В;
- 2) подати воду до системи охолодження дифузійного насосу;
- 3) натиснути кнопку "СЕТЬ" на пульті керування;
- 4) натиснути кнопку "НФ" (насос форвакуумний), при цьому він повинен увімкнутися і запрацювати;
- 5) після досягнення вакууму $1,5 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст. на форвакуумному насосі (за показником вакууму по датчику "Д2") натиснути кнопку "ВФ" для попереднього відкачування буферного балона і дифузійного насоса;
- 6) після досягнення вакууму $1,5 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст у буферному балоні (за показником вакууму по датчику "Д4") увімкнути дифузійний насос, натиснувши кнопку "НД" на пульті керування.
- 7) після прогріву дифузійного насоса (не менше 45 хвилин) прилад готовий до подальшої роботи.

На основі розташовані роз'єми Х37, Х38, Х39 для приєднання живлення пристрою іонного травлення, пристроїв нагрівання об'єктів, пристрою осадження плівок і для з'єднання датчиків індикаторів товщини; високовольтний вхід Х36 для живлення пристрою іонного травлення та електронного випарника; контакт "4" роз'єму Х38 для живлення столика повороту об'єктів при напилені; контакт "1" для підключення випарників і контакти "2А" і "2Б" для живлення катодів електронних гармат, або як друге джерело живлення резистивних випарників.

Основа РО встановлена на стійці, що пов'язана з вакуумною системою з'єднувальним фланцем. В основі є також прохідні отвори для введення рухливих ручок керування пристроями і приставками, а також оптичний вхід.

1.2. Установки, прилади та матеріали

Для виконання лабораторної роботи використовується установка вакуумний універсальний пост ВУП-5М; додатковий вакуумметр типу ВИТ-3; універсальний мультиметр.

1.3. Порядок виконання роботи

1.3.1. Ознайомитися з будовою та принципом роботи установки ВУП-5М.

1.3.2. Ознайомитися з процесом створення вакууму у робочому об'ємі.

1.3.3. Підготувати установку ВУП-5М до роботи:

- 1) увімкнути загальний рубильник живлення 380 В;
- 2) подати воду до системи охолодження дифузійного насосу;
- 3) натиснути кнопку "СЕТЬ" на пульті керування;
- 4) натиснути кнопку "НФ" (насос форвакуумний), при цьому він повинен увімкнутися і запрацювати;
- 5) після досягнення вакууму $1,5 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст. на форвакуумному насосі (за показником вакууму по датчику "Д2") натиснути кнопку "ВФ" для попереднього відкачування буферного балона і дифузійного насоса;
- 6) після досягнення вакууму $1,5 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст у буферному балоні (за показником вакууму по датчику "Д4") увімкнути дифузійний насос, натиснувши кнопку "НД" на пульті керування.
- 7) після прогріву дифузійного насоса (не менше 45 хвилин) прилад готовий до подальшої роботи.

1.3.4. Відкачати робочий об'єм на високий вакуум. Для цього слід виконати наступне:

- 1) натиснути кнопку "ПВ" для попереднього відкачування РО;
- 2) після досягнення вакууму $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст у робочому об'ємі (за показником вакууму по датчику "Д1") натиснути кнопку "ВФ", а потім, після спрацювання клапанів, натиснути кнопку "ВВ".

1.3.5. За допомогою вакуумметра виміряти вакуум у робочому об'ємі.

1.3.6. Виключити прилад ВУП-5М:

- 1) закрити ковпак на робочому об'ємі;
- 2) відкачати робочий об'єм на високий вакуум;
- 3) натиснути кнопку "СТОП" на пульті керування;
- 4) дочекатися охолодження дифузійного насосу (загориться індикатор "СТОП");
- 5) відключити форнасос, віджавши кнопку "НФ";
- 6) віджати кнопку "СЕТЬ";
- 7) відключити рубильник 380 В;
- 8) перекрити подачу води на охолодження дифузійного насосу.

Зауваження. Практична робота на установці ВУП-5М та окремих пристроях, вмикання і вимикання проводиться в повній відповідності до технічного опису й інструкції по експлуатації та виконанням правил техніки безпеки при обов'язковій присутності оператора.

1.4. Порядок оформлення звіту

1. Коротко описати будову, технічні можливості та призначення установки ВУП-5М.

2. Описати процес виходу на стан роботи (порядок включення і виключення приладу).

3. Описати основні контрольні прилади та органи керування.

1.5. Контрольні питання

1. Дайте характеристику приладу ВУП-5М.
2. Наведіть основні технічні характеристики приладу ВУП-5М.
3. Проаналізуйте процес створення вакууму в робочому об'ємі.
4. Проаналізуйте основні методи розпилення, які реалізовані в приладі ВУП-5М.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОРІДНОСТІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР

Мета: вибрати матеріал та технологію для виготовлення пасивних компонентів мікроелектронних пристроїв.

Завдання роботи: за допомогою вакуумної лабораторної установки отримати навички підготовки тестової напівпровідникової структури для виготовлення пасивних компонентів мікроелектронних пристроїв, дослідити її однорідність.

2.1 Теоретичні відомості

Технологія виготовлення пасивних компонентів включає:

- Обґрунтування методики;
- Вибір матеріалу ;
- Вибір обладнання;
- Визначення вихідних параметрів;
- Програмні результати.

За допомогою лабораторної вакуумної установки підготувати напівпровідникову структуру, обрати методику та дослідити однорідність структури, результати занести в таблицю, розрахувати параметри.

2.2 Приклад розрахунку полягає у наступному:

1. Знаходиться оптимальне значення питомого поверхневого опору

$$R_{\text{ср}} = R_0.$$

$$R_1, R_2, \dots, R_m, (R_0), R_{m+1} \dots R_N$$

$$R_i = R_0 \frac{\ell_i}{a_i} \quad (2.1)$$

Сумарну площину резисторів можна показати сумарним числом квадратів, яке зводиться до \min .

$$S = R_0 \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{R_i} \right)^2 + \frac{1}{R_0} \sum_{i=m+1}^N R_i \rightarrow \min. \quad (2.2)$$

2. Вибір марки резистивного сплаву визначається за значенням R_0 .
Оптимальне значення $R_{сл}$:

$$R_0 = \sqrt{\frac{\sum_1^N R_i}{\sum_{R_i} \left(\frac{1}{R_i} \right)}} \quad (2.3)$$

3. Потужність P_i , розсіювану резистором, можна визначити:
Для резисторів 1-ї групи:

$$P_i = P_0 \cdot S_i = P_0 a_i \cdot l_i = P_0 \frac{R_0}{R_i} \cdot a_i^2, \quad (2.4)$$

для резисторів 2-ї групи:

$$P_i = P_0 \cdot S_i = P_0 a_i l_i = P_0 \frac{R_i}{R_0} \cdot a_i^2. \quad (2.5)$$

⇒ нові значення критичних розмірів з увагою на потужність розсіювання.

Для резисторів 1-ї групи:

$$l_i = \sqrt{\frac{P_i R_i}{P_0 R_0}}. \quad (2.6)$$

для резисторів 2-ї групи:

$$a_i = \sqrt{\frac{P_i R_0}{P_0 R_i}}. \quad (2.7)$$

Температурна похибка

$$\gamma_{t0} = \alpha |t^0_{пред} - t^0_{ком}| \max \quad (2.8)$$

$$\gamma_{max} = \frac{\Delta l}{l_i} + \frac{\Delta \alpha}{\alpha_i} + \gamma_{R_0}$$

$$\frac{R_i}{R_0} = \frac{l_i}{\alpha_i} \Rightarrow \quad (2.10)$$

⇒ нові значення критичних розмірів.

Для резисторів 1-ї групи:

$$l_i = \frac{\left(\Delta\alpha \cdot \frac{R_i}{R_0} + \Delta l \right)}{\left(\gamma_{техн} - \gamma_{Ro} \right)} \quad (2.11)$$

Для резисторів 2-ї групи:

$$\alpha_i = \frac{\left(\Delta\alpha \cdot \frac{R_0}{R_i} + \Delta l \right)}{\left(\gamma_{техн} - \gamma_{Ro} \right)} \quad (2.12)$$

4. Розрахунок великих розмірів:

Для резисторів 1-ї групи:

$$l_i = \frac{R_i}{R_0} \cdot \alpha_i \quad (2.13)$$

Для резисторів 2-ї групи:

$$\alpha_i = \frac{R_0}{R_i} \cdot l_i \quad (2.14)$$

2.3 Порядок виконання роботи

Порядок виконання, інструкція та режими роботи на вакуумній установці описано в додатку до лабораторної роботи 1.

2.4 Порядок складання звіту

Після виконання написати висновок, відповіді на контрольні запитання та захистити роботу.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ КОНДЕНСАТОРІВ

Мета: вибрати матеріал для виготовлення інтегральних конденсаторів та дослідити їх характеристики.

Завдання роботи: за допомогою вакуумної лабораторної установки отримати навички виготовлення тестової структури інтегрального конденсатора та розрахувати його параметри.

3.1 Теоретичні відомості

Конденсатор на основі р-п-переходу – це напівпровідниковий пристрій, дія якого основана на використанні залежності ємності від зворотної напруги. Параметри конденсаторів: - бар'єрна і дифузійна ємність; - добротність конденсатора; - температурний коефіцієнт; - залежність зворотної напруги від ємності р-п-переходу .

3.2 Приклад розрахунку конденсаторів:

1. Товщина збідненого шару:

$$W = \left[\frac{2\varepsilon \varepsilon_0 U}{qN_a} \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

де $N_a = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ – концентрація акцепторів;
 U - зворотня напруга;

$$W = \left[\frac{2 \cdot 8.849 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \cdot 5}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{16}} \right]^{1/2} =$$
$$= \left[\frac{1061.88 \cdot 10^{-12}}{1.6 \cdot 10^{-3}} \right]^{1/2} = 25.72 \cdot 10^{-4} \text{ (м)}$$

Ємність конденсатора з площею обкладинок $A = 129 \text{ мм}^2$.

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{W} \quad (3.2)$$

$$C = \frac{1,06 \cdot 10^{-10} \cdot 129 \cdot 10^{-6}}{25,72 \cdot 10^{-4}} = 5,32 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.}$$

Питома ємність конденсатору з площею р-п-переходу:

$$C_0 = \frac{C}{S}, \quad C_0 = \frac{5,32}{0,25} = 21,28 \text{ Ф} \quad (3.3)$$

Добротність конденсатору:

$$Q = \frac{1}{2\pi f C R_n} \quad (3.4)$$

де f - робоча частота,

R_n - об'ємний опір матеріалу напівпровідника.

$$Q = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 5,32 \cdot 10^{-12} \cdot 30} = \frac{1}{10022,88 \cdot 10^{-6}} = 99,7 (\text{Ом}).$$

Температурний коефіцієнт ємності заданого конденсатору:

$$TKE = \frac{1}{3} \left[2TK(\varepsilon_n) - \frac{\Delta\varphi_0}{\Delta\varphi_0 - U} TK(\Delta\varphi) \right] \quad (3.5)$$

де $TK(\varepsilon_n) \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$,
 $TK(\Delta\varphi) \approx -6 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$,
 $\Delta\varphi_0 = 0,7 \text{ В.}$

$$TKE = \frac{1}{3} \left[2 \cdot 2 \cdot 10^{-4} - \frac{0,7}{0,7 - 5} \cdot (-6 \cdot 10^{-3}) \right] =$$

$$= \frac{1}{3} \left[4 \cdot 10^{-4} \cdot 0,103 \cdot (-6 \cdot 10^{-3}) \right] =$$

$$= \frac{1}{3} [4 \cdot 10^{-4} - 0,98 \cdot 10^{-3}] = -1,007$$

Знаходимо залежність ємності р-п-переходу від зворотної напруги:

$$C_U = C_0 \left[\frac{\Phi_K}{\Phi_K + U} \right]^{1/2}, \quad (3.6)$$

де C_U – ємність при зворотній напрузі $U = 5$ В,
 $C_0 = 21,28$ Ф,
 $\Phi_K = 0,7$ В – контактний потенціал типу конденсатора.

$$C_U = 21,28 \cdot 10^{-12} \left[\frac{0,7}{0,7 + 5} \right]^{1/2} = (21,28 \cdot 0,122^{1/2}) = 7,46 \text{ (нФ)}.$$

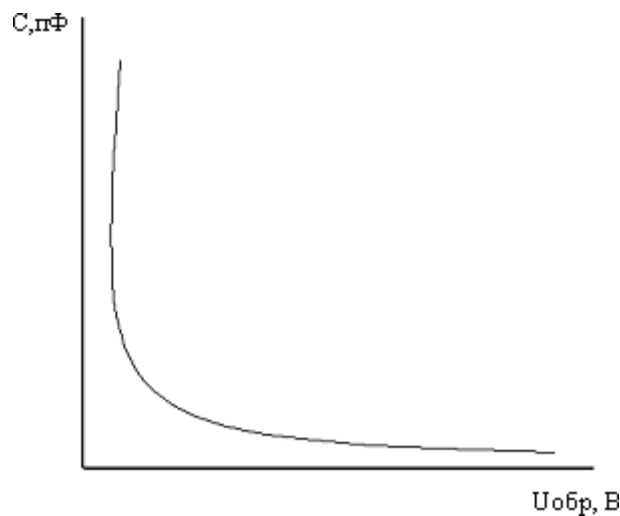


Рисунок 3.1 - ВФХ конденсатору на основі р-п-переходу

3.3 Порядок виконання

Порядок виконання, інструкція та режими роботи на вакуумній установці описано в додатку до лабораторної роботи 1.

3.4 Порядок складання звіту

Після виконання написати висновок, відповіді на контрольні запитання та захистити роботу.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4

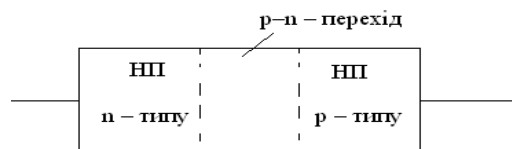
ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ПРОХОДЖЕННЯ СТРУМУ В УНІВЕРСАЛЬНИХ ДІОДАХ

Мета : визначити механізм проходження струму в універсальних діодах при їх прямому та зворотному включенні.

Завдання роботи: дослідження статичних характеристик універсальних діодів з різною шириною бази.

4.1 Теоретичні відомості

Основою напівпровідникових випрямляючих діодів є плоский електронно-дірковий р-п перехід. Випрямні властивості діода можна охарактеризувати опором у прямому та зворотному напрямках його зміщення.



Електронно-дірковий перехід неможливо виготовити простим з'єднанням пластин n- та р-типу, оскільки при цьому не вдається уникнути проміжного шару повітря, окислів або поверхових забруднень.

Ці переходи одержують вправленням або дифузією відповідних домішків у пластини монокристала напівпровідника, а також шляхом зростання р-п-переходу з розплаву напівпровідника з регульованою кількістю домішок.

Щоб розпочати виконання роботи необхідно спочатку отримати допуск, відповівши на три запитання (рис.4.1). У разі вірних відповідей студент матиме змогу перейти до виконання поставленої задачі.

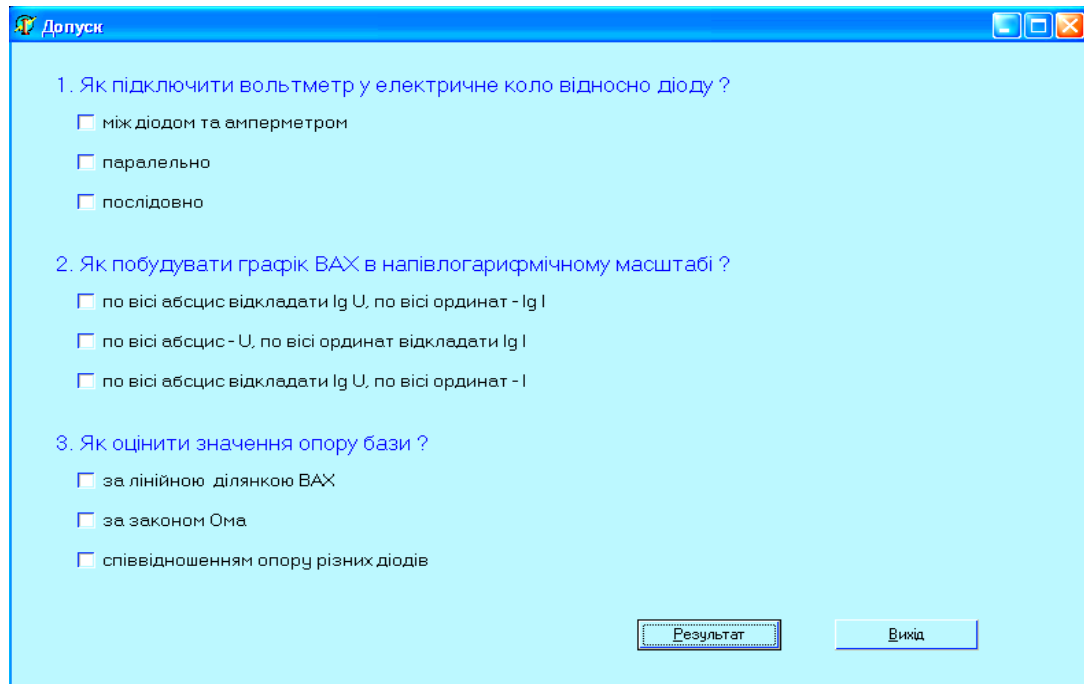


Рисунок 4.1 – Стартове вікно програми для отримання допуску

4.2 Приклад розрахунку

Першочергово на екрані з'являється вікно введення початкових параметрів певної напівпровідникової структури (рис4.2).

Лабораторна робота №1.

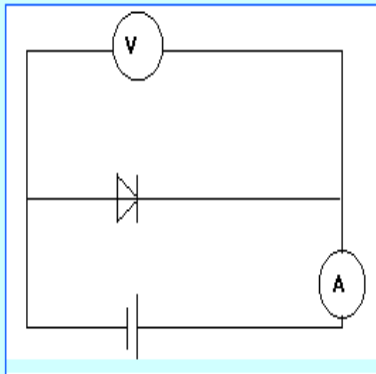
Дослідження вольт-амперної характеристики діода.

Мета роботи: Досліджувати механізм проходження струму у діоді.

Занести кількість діодів:

Занести порядковий номер виданого діоду:

Занести тип діоду:



Електрична схема вимірювання ВАХ

1. Занести вимірювання струму у таблицю при заданій напрузі:

U,В	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
I(D1),А	1e-6	2e-6	3e-6	9e-6	15e-6	23e-6	33e-6	43e-6	53e-6	65e-6	78e-6	89e-6	100e-6	113e-6	125e-6	135e-6
I(D2),А	1e-6	2e-6	3e-6	4e-6	5e-6	10e-6	17e-6	25e-6	35e-6	45e-6	58e-6	69e-6	80e-6	93e-6	105e-6	115e-6
I(D3),А	1e-6	1e-6	2e-6	2e-6	3e-6	5e-6	10e-6	14e-6	20e-6	28e-6	35e-6	44e-6	53e-6	62e-6	73e-6	84e-6
I(D4),А	1e-6	1e-6	1e-6	1e-6	2e-6	3e-6	5e-6	8e-6	13e-6	19e-6	26e-6	33e-6	42e-6	51e-6	60e-6	70e-6

Рисунок 4.2 – Початкові дані для розрахунку

Після введення початкових параметрів програма розраховує необхідні величини і виводить їх у вигляді таблиць та графіків (рис. 4.3).

Для розрахунку струму діода з короткою та довгою базами взяти параметри кремнієвої структури :

T - абсолютна температура в градусах Кельвіна $T_w = 300\text{K}$;

k - постійна Больцмана $k = 1.38 \times 10^{-23}$ Дж/К;

U - пряма напруга діода;

D_p, D_n – коефіцієнти дифузії дірок та електронів ;

$D_p = 12.42 \text{ см}^2/\text{с}$;

$D_n = 21.85 \text{ см}^2/\text{с}$;

L_p, L_n – дифузійна довжина дірок та електронів;

$$L_p = 8,3 \text{ м}^{-6};$$

$$L_n = 10,2 \text{ м}^{-6};$$

W – ширина бази, 0,5мкм;

Заряд електрона $q = 1.6 \times 10^{-19}$ Кл.

4.3 Порядок виконання

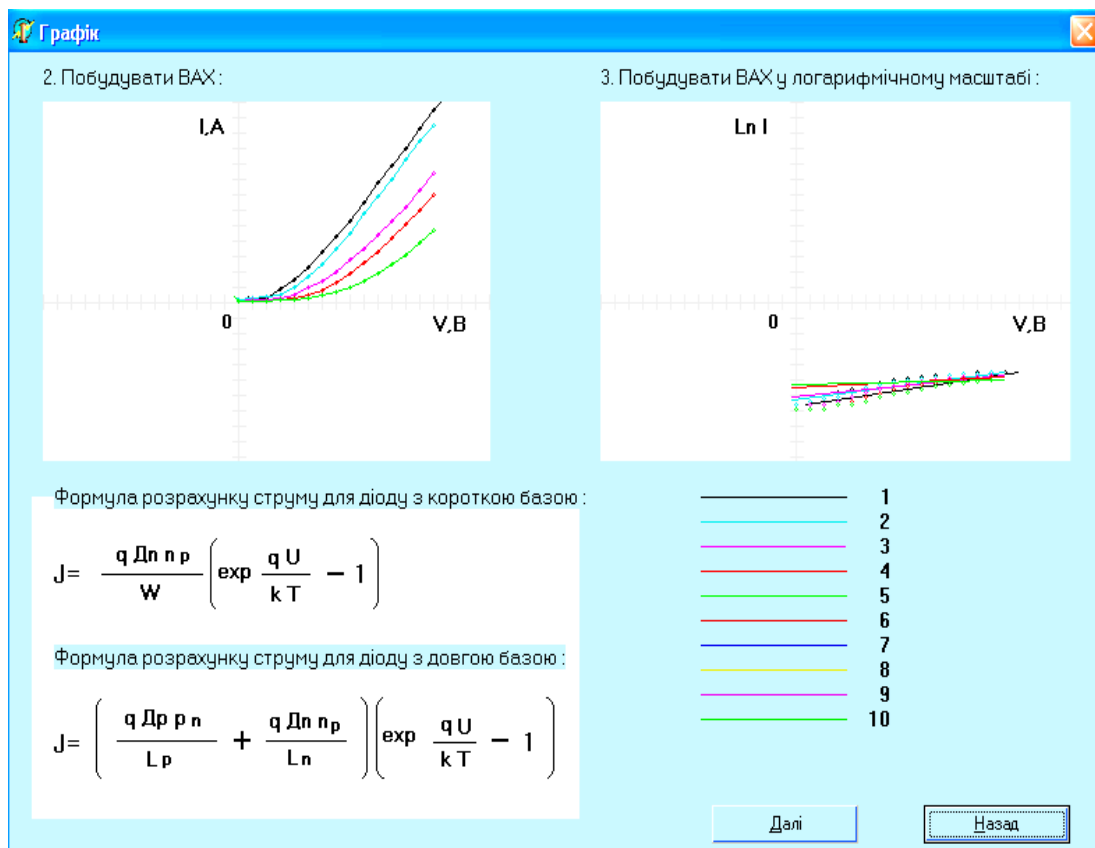


Рисунок 4.3 – Результати розрахунку у вигляді графіків

4.4 Порядок складання звіту

Після виконання написати висновок, відповісти на контрольні запитання та захистити роботу.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА ПАРАМЕТРИ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР

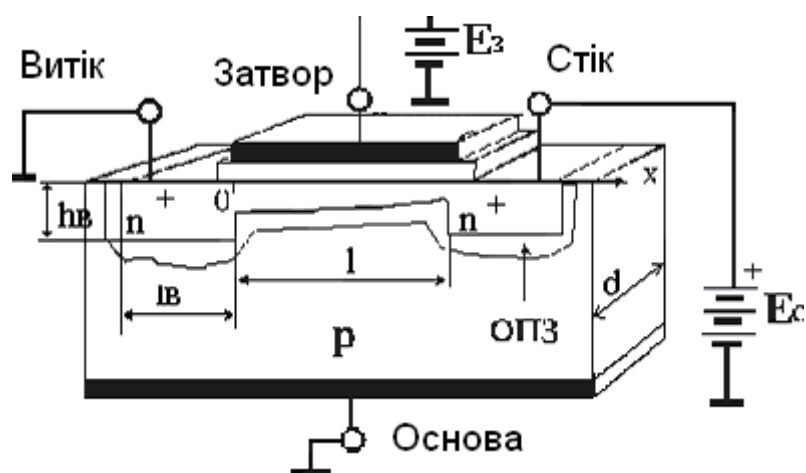
Мета: визначити чинники впливу на параметри транзисторних структур.

Завдання роботи: дослідження статичних характеристик польових транзисторів та їх залежності від зовнішніх чинників.

5.1 Теоретичні відомості

МДН - транзистор - польовий транзистор з ізолюючим затвором, в якому ізоляційний шар поміж кожним металевим затвором та каналом є діелектрик.

Існують два різновиди МДН - транзисторів: з індуктованим каналом і з вбудованим каналом. В МДН - транзисторах з індуктованим каналом провідний канал між сильнолегованими областями витіку і стоку не існує, отже помітний струм стоку з'являється тільки при визначеній полярності та при визначеній величині напруги на затворі відносно витіку, яку називають пороговою напругою [1-5].



5.2 Приклад розрахунку

Лабораторна робота № 5.

Дослідження характеристик польового транзистора з керуючим р-n переходом.

Мета роботи : Ознайомитися з принципом дії польового транзистора та дослідити його характеристики.

Занести кількість транзисторів :

Занести порядковий номер виданого транзистора :

Занести тип транзистора :

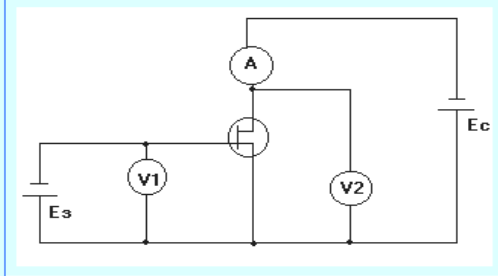


Схема вимірювання характеристик польового транзистора

1. Занести вимірювання струму стоку I_c при заданій напрузі витік-стік $U_{св}$:

$U_{св}, V$	0,1	2,1	4,1	6,1	8,1	10,1	12,1	14,1	16,1	18,1	20,1	22,1	24,1	26,1	28,1	30,0
$I_c(T1), A$	2e-6	3e-6	5e-6	6e-6	8e-6	9e-6	10e-6	13e-6	14e-6	15e-6	16e-6	18e-6	19e-6	20e-6	23e-6	24e-6
$I_c(T2), A$	1e-6	2e-6	3e-6	4e-6	5e-6	6e-6	8e-6	15e-6	18e-6	24e-6	25e-6	27e-6	28e-6	29e-6	31e-6	32e-6
$I_c(T3), A$	2e-6	6e-6	9e-6	12e-6	16e-6	18e-6	21e-6	24e-6	26e-6	28e-6	30e-6	33e-6	35e-6	36e-6	37e-6	38e-6
$I_c(T4), A$	20e-6	22e-6	24e-6	25e-6	26e-6	28e-6	29e-6	31e-6	36e-6	39e-6	45e-6	46e-6	47e-6	48e-6	49e-6	50e-6
$I_c(T5), A$	1e-6	2e-6	4e-6	9e-6	12e-6	13e-6	17e-6	20e-6	23e-6	29e-6	30e-6	31e-6	35e-6	38e-6	40e-6	45e-6

Рисунок 5.1 – Початкові дані для розрахунку

МДН - транзистор - польовий транзистор з ізолюючим затвором, в якому ізоляційний шар поміж кожним металевим затвором та каналом є діелектрик.

Існують два різновиди МДН - транзисторів: з індуцированим каналом і з вбудованим каналом. В МДН - транзисторах з індуцированим каналом провідний канал між сильнолегованими областями витіку і стоку не існує, отже помітний струм стоку з'являється тільки при визначеній полярності та при визначеній величині напруги на затворі відносно витіку, яку називають пороговою напругою [1-5].

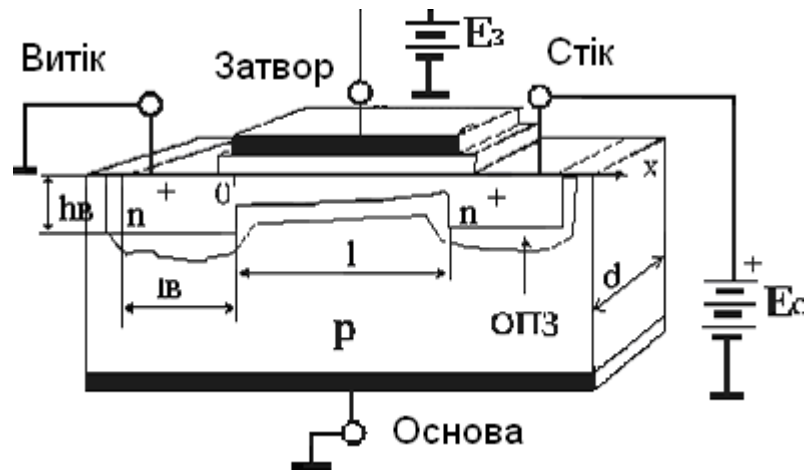


Рисунок 5.2 - МДН транзистор з індукованим n каналом

Розглянемо, як приклад, розрахунок деяких параметрів транзистора.

Вихідні дані:

- Довжина каналу $l = 5 \times 10^{-6}$ м
- Ширина каналу $d = 5 \times 10^{-4}$ м
- Товщина шару діелектрика $d_0 = 1.2 \times 10^{-7}$ м
- Рухливість дірок $\mu_n = 4 \times 10^{-2}$ м²/Вс
- Порогова напруга $U = -1.8$ В
- Напруга на стоці $U = 4$ В
- Напруга на затворі $-5.6 \dots -15.6$ В, шаг 0,5 В
- Діелектрична проникливість $\epsilon = 4$ Ф/м
- Діелектрична постійна $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ Ф/м

Розрахуємо крутизну вольт амперної характеристики $I_c(U_3)$ в області насичення:

$$S_{нас} = \frac{\epsilon \mu_n \epsilon_0 \mu d}{d_0 l} (U_3 - U_n) = 2,1 \cdot 10^{-3} \frac{A}{B} \quad (5.1)$$

Ємність затвору відносно витоку і стоку:

$$C_3 = \frac{\varepsilon_d \varepsilon_0 l d}{d} = 7.38 \cdot 10^{-9} \Phi \quad (5.2)$$

Частотна межа:

$$f_{\max} = \frac{S_{\text{нас}}}{2\pi C_3} = 4,58 \cdot 10^8 \text{ Гц} \quad (5.3)$$

Постійна часу заряду ємності затвору:

$$\tau = \frac{C_3}{S_{\text{нас}}} = 6,25 \cdot 10^{-11} \text{ с} \quad (5.4)$$

Розрахуємо значення струму I_c при значеннях напруги на затворі від -5,6В до -15,6 з шагом 0,5В:

$$I_c = \frac{\varepsilon_d \varepsilon_0 \mu d}{d_0 l} \left(\left(U_z - U_n \right) - \frac{U_c^2}{2} \right) \quad (5.5)$$

5.3 Порядок виконання

Польовий транзистор з керуючим р-п переходом

Польовий транзистор з керуючим р-п переходом являє собою тонку пластину напівпровідникового матеріалу з двома р-п переходами в центральній частині і з омичними контактами по краях.

Чинність цього приладу основана на залежності товщини р-п переходу від доданої до нього напруги. Оскільки збіднений шар майже повністю позбавлений рухомих носіїв заряду, його провідність практично дорівнює нулю. Обмежуючи з бокових сторін струмопровідний канал (напівпровідником пластини), збіднений шар, що утвориться завдяки цьому визначає перетин або ефективну товщину. У залежності від

електропровідності напівпровідника канал може бути n- типу або p- типу [2-4].

Як приклад, розглянемо розрахунок деяких параметрів транзистора.

Вихідні дані:

- Концентрація домішки, $N = 1.5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$
- Рухливість електронів, $\mu_n = 500 \text{ см}^2/\text{В} \times \text{с}$
- Заряд електрона, $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$
- Діелектрична проникливість, $\varepsilon = 11,8$
- Діелектрична постійна, $\varepsilon = 8,85 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$
- Постійна Больцмана $k = 8,62 \times 10^{-5} \text{ еВ}$
- Термін переходу, $t_{\text{пер}} = 0,8 \text{ мкс}$
- Напруга на затворі, $U_3 = 39 \text{ В}$
- Розміри напівпровідникового транзистора:
 - Товщина, $W = 23 \text{ мкм}$
 - Довжина, $l = 12 \text{ мкм}$
 - Ширина, $d = 3 \text{ мкм}$

Розрахуємо опір каналу:

$$R_k = \frac{l}{e \mu_n W d N} = 4.83 \cdot 10^2 \text{ Ом} \quad (5.6)$$

Питомий опір:

$$\rho = e n \mu_n = 3,6 \text{ Ом} \times \text{см} \quad (5.7)$$

Розрахуємо напругу відсічки:

$$U_{\text{від}} = \frac{W^2}{\varepsilon \rho \mu_n l} = 85,4 \text{ В} \quad (5.8)$$

Граничну частоту визначаємо за формулою:

$$f_{гp} = \frac{1}{2\pi t_{пер}} = 2,01 \times 10^5 \text{ Гц} \quad (5.9)$$

Розрахуємо струм стоку при напрузі на стоці 20 В за формулою:

$$I_c = \frac{1}{R_k} \left(U_c + \frac{U_2 + U_3}{U_{омс}} \right) \quad (5.10)$$

Крутизну розрахуємо за формулою:

$$S = \frac{1}{R_k} \left(\frac{1}{3} U_{омс} - U_3 \left(1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{U_3}{U_{омс}}} \right) \right) = \quad (5.11)$$

$$= 6,71 \cdot 10^{-4} \text{ А / В}$$

Розраховуємо струм насичення за формулою:

$$U_{нас} = \frac{1}{R_k} \left(\frac{1}{3} U_{омс} - U_3 \left(1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{U_3}{U_{омс}}} \right) \right) \quad (5.12)$$

Після отримання результатів необхідно побудувати вихідну характеристику приладу, написати висновок та захистити роботу.

5.4 Порядок складання звіту

Після виконання написати висновок, відповісти на контрольні запитання та захистити роботу.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИБАДУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Мета : дослідження і побудова вольт-амперних характеристик приладу спеціального призначення.

Завдання роботи: визначення методики та дослідження характеристик тиристорних структур.

6.1 Теоретичні відомості

Тиристор – це напівпровідниковий пристрій з двома стійкими станами: стан з низькою провідністю та з високою провідністю.

Тиристори знайшли застосування у різноманітних пристроях автоматики і обчислювальній техніці. Вони можуть виконувати функції перетворювача струму будь-якої форми, ключа генератора і як запам'ятовуючий пристрій.

6.2

Зміст завдання

До параметрів тиристора відносяться:

- Повторююча напруга $U_{повт}$ ($\approx 0,75 U_{проб}$);
- $U_{проб} = 3000\text{В}$
- Напруга включення $U_{вкл}$ (від 10 до 2500 В);
- Струм включення $I_{вкл}$;
- Відпираючий струм управління $I_{у\text{ вип.}}$;
- Час затримки t_3 ;
- Час включення $t_{вкл}$;
- Максимально допустима швидкість наростання прямої напруги $(dU/dt)_{max}$;

- Максимально допустима швидкість наростання прямого струму $(dI/dt)_{max}$.

Повторююча напруга визначається за формулою:

$$U_{повн} = k \inf(U_{пер}, U_{проб}), \quad (6.1)$$

де \inf - менше із значень $U_{пер}$ і $U_{проб}$;

$k = 0,8$ для вітчизняних силових пристроїв.

Знаючи $U_{повт}$, можна визначити напругу переключення при max допустимій температурі структури тиристора ($125^{\circ}C$):

$$U_{пер} = \frac{U_{повт}}{0,8}. \quad (6.2)$$

Для визначення товщини підкладки необхідно розрахувати ширину об'ємного заряду $W_{но}$ при напрузі пробою:

$$W_{но} = 0,52 \sqrt{\rho U}, \quad (6.3)$$

де ρ - питомий опір, $21 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Отже: $S_M = 0,1 S_a$ (6.4)

Площа структури $S_{стр}$ з урахуванням шунтировки та зони керування:

$$S_{стр} = S_a + S_{упр} + S_M \quad (6.5)$$

$S_a = 2 \text{ мкм}$; $S_{упр} = 1,6 \text{ мкм}$

Діаметр цієї структури:

$$d = 2 \sqrt{\frac{S_{стр}}{\Gamma}} \quad (6.6)$$

6.3 Порядок виконання роботи

Тиристор має S – образну ВАХ.

$$I = f(E_{np})$$

(6.7)

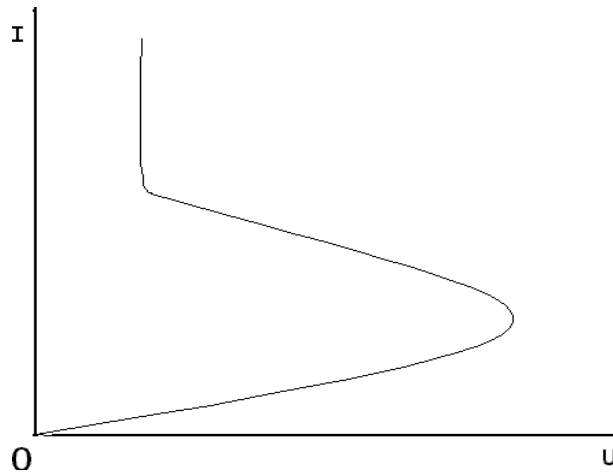


Рисунок 6.1 – Вольт-амперна характеристика тиристора

Розрахунок характеристик проводиться за формулою:

$$U_A = U_1 - U_2 + U_3, \quad (6.8)$$

$$U_1 = 120\text{В}; U_2 = 87\text{В}; U_3 = 95\text{В}.$$

6.4 Порядок складання звіту

Після виконання написати висновок, відповіді на контрольні запитання та захистити роботу.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПРИЛАДІВ

Мета роботи: дослідження і побудова вольт-амперних та світлових характеристик фотодіода

Завдання роботи: визначення методики дослідження фотоелектричних властивостей фотодіодів

7.1 Теоретичні відомості

В області напівпровідника, що утворюють $p - n$ - перехід, протікає так званий фотострум I_{Φ} , пропорційний потужності світлового потоку і збігається за напрямком з струмом протилежно зміщеним переходом. В результаті до зворотного струму переходу додається струм I_{Φ} . Ця частина характеристик називається характеристиками фотодіодного включення підсвіченого $p - n$ - переходу.

При прямому зміщенні переходу в області значень струмів і напруг, відповідних першому квадранту вольтамперної характеристики, що виникає під дією світла фотострум віднімається з дифузійного струму переходу і ця частина вольтамперних характеристик відповідає меншим значенням струму в порівнянні з неосвітленим переходом. Вольт-амперні характеристики освітленого переходу в четвертому квадранті є характеристиками напівпровідникового фотоелемента, що є джерелом електричної енергії.

Фотодіод- напівпровідниковий прилад, який може працювати у 2-х режимах.

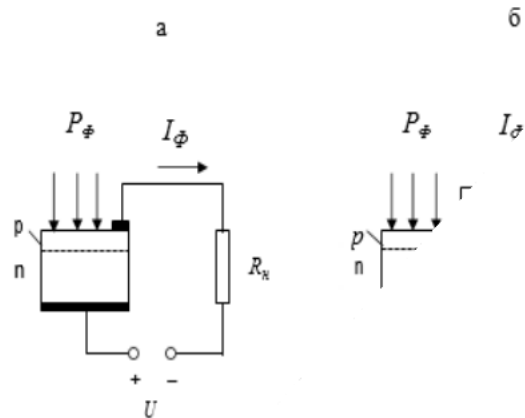


Рис. 2.1. Фотод

Вольтамперну характеристику освітленого переходу можна представити у вигляді:

$$I(U) = I_0 \left(\exp \frac{qU}{kT} - 1 \right) - I_\Phi = I_0 \left(\exp \frac{U}{\varphi_T} - 1 \right) - I_\Phi, \quad (3.1)$$

$$I_\Phi = q \frac{P_\Phi}{h\nu} \eta \delta, \quad (3.2)$$

тут P_Φ - потужність падаючого оптичного випромінювання, $h\nu$ - енергія фотонів на заданій довжині хвилі оптичного випромінювання, η - квантова ефективність, що характеризує відношення числа, які генеруються в одиницю

часу електронно-діркових пар до загальної кількості падаючих фотонів $P_{\phi} h\nu$, δ - коефіцієнт збирання носіїв заряду, що визначає число пар носіїв зарядів, що не рекомбінують в товщі і на поверхні напівпровідника і досягають замикаючого шару ($\delta \leq 1$).

При розрахунках квантової ефективності необхідно враховувати поглинання оптичного випромінювання в напівпровідниковій структурі, яке загальному випадку можна оцінити за допомогою співвідношення:

$$\beta = (1 - R)[1 - \exp(-\alpha_0 W_1)], \quad (7.3)$$

в цьому співвідношенні R - коефіцієнт відбиття світлового потоку від поверхні активної структури фотодіода, α_0 - коефіцієнт поглинання випромінювання світла в напівпровіднику, що характеризує зменшення інтенсивності світлового потоку на одиниці довжини і має розмірність $см^{-1}$, W_1 - товщина області поглинання світла в структурі фотодіода.

Падаюче на діодну структуру світло, затухаючи в напівпровіднику за експоненціальним законом в залежності від значення коефіцієнта поглинання α_0 , викликає появу порушених світловим потоком носіїв заряду. При зменшенні коефіцієнта відбиття від поверхні кристала і збільшенні товщини області поглинання світла підвищується квантова ефективність фотодіода. При цьому слід враховувати, що час дифузії носіїв заряду до переходу і час дрейфу їх в поле переходом визначають інерційні властивості фотодіода. Як показує аналіз, найкраще співвідношення між квантовою ефективністю і швидкодією фотодіода досягається за умови $W_1 \approx 1/\alpha_0$.

Використання формули (7.3) для визначення квантової ефективності фотодіода вимагає знання оптичних характеристик використаного напівпровідника, що залежать від конкретної структури фотодіода і технології виготовлення. У зв'язку з цим при проведенні розрахунків можна обмежитися результатами теоретичних досліджень і випробувань типових фотодіодних

структур, які в розрахунковій роботі розглядаються в якості вихідних даних. Ці дані представлені на рис.7.2 у вигляді залежності квантової ефективності від довжини хвилі.

Розрахунок вольтамперних характеристик фотодіода пов'язаний з визначенням складової зворотного струму переходу I_0 . Це струм неосвітленого фотодіода при зворотному зміщенні переходу, який залежить від площі переходу, ступеня легування матеріалу (p_{n0} і n_{p0}) і параметрів напівпровідника (D_p , D_n , L_p і L_n). При ширині p - і n - областей переходу $W_n \gg W_p$ величину струму I_0 , можна визначити із співвідношення:

$$I_0 = qS \left(\frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n} \right), \quad (3.4)$$

в якому p_{n0} і n_{p0} - концентрації неосновних носіїв в p - і n - областях в рівноважному стані переходу,

$$p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D}, \quad n_{p0} = \frac{n_i^2}{N_A}, \quad (3.5)$$

n_i - концентрація носіїв у власному напівпровіднику, N_D і N_A - концентрації донорної і акцепторної домішок, L_n і L_p - дифузійні довжини електронів і дірок, D_n і D_p - коефіцієнти дифузії електронів і дірок.

Величину температурного потенціалу у формулі (7.1) $\phi_T = kT/q$ ($q = 1,6 \times 10^{-19}$ Кл - заряд електрона) можна визначати за наближеною формулою $\phi_T \approx T/11600$ В, в якій температура T виражена в одиницях К. При розрахунках приймається значення $T = 300$ К, при цьому $\phi_T \approx 0,026$ В.

Вольтамперні характеристики фотодіода за своїм виглядом аналогічні вихідним характеристикам транзистора в схемі із загальною базою. Світловий потік виконує роль емітера, інжектуються носії заряду в напівпровідникову структуру, які дифундують потім до переходу, що виконує роль колектора транзистора. При модуляції світлового потоку на

навантажувальних резисторах в ланцюзі фотодіода створюється падіння напруги, пропорційне модулюючому сигналу. Ця властивість фотодіода дозволяє використовувати його в якості приймачів світлового опромінювання в кінцевих пристроях ліній оптичного зв'язку і вимірювати енергетичні параметри світлових потоків.

Значення струмів і напруг, відповідних частині вольтамперної характеристики фотодіода, розташованої в четвертому квадранті, відповідає нагоді, коли освітлений $p - n$ - перехід є джерелом електричної енергії. У режимі холостого ходу, коли $I(U)=0$, визначають значення ЕРС

$$U_{xx} = \varphi_T \ln \left(\frac{I_\Phi}{I_0} + 1 \right) \quad (3.6)$$

напівпровідникового фотоелемента, напруга на зажимах якого при $I_\Phi \gg I_0$ росте зі збільшенням потужності світлового потоку згідно логарифмічного закону.

Зв'язок фотоструму освітленого світлом напівпровідникового діода з потужністю світлового потоку зазвичай висловлюють через монохроматичну (Спектральну) чутливість приладу $s_\Phi(\lambda) = I_\Phi P_\Phi(\lambda)$ на заданній довжині хвилі λ :

$$s_\Phi(\lambda) = \delta \eta \frac{q}{hc} \lambda. \quad (3.7)$$

Межа чутливості в області великих довжин хвиль визначається шириною забороненої зони напівпровідникового матеріалу ΔE_g . Порогова довжина хвилі (червона межа фотоефекту), виражена в мікрометрах,

$$\lambda_{cp} = 1,24 / \Delta E_g, \quad (3.8)$$

обчислюється з простого співвідношення 3.8, в цьому наближеному чисельному співвідношенні ширина забороненої зони виражена в еВ. У роботі необхідно обчислити порогові довжини хвиль для напівпровідникових матеріалів (кремнію, германію та арсеніду галію), виходячи з даних по

ширині забороненої зони для обраних у варіанті завдання напівпровідників. В області коротких хвиль максимальну чутливість для розглянутих фотодіодів можна наближено визначити за співвідношенням:

$$s\Phi_{\text{макс}} \approx 0,8 \lambda_{\text{зр}} \approx \Delta E_g^{-1}, \quad (3.9)$$

(тут $s\Phi_{\text{макс}}$, А/Вт; $\lambda_{\text{зр}}$, мкм; ΔE_g , еВ). У цій області довжин хвиль зменшення чутливості фотодіода, яке пояснюється зменшенням довжини поглинання світла поблизу поверхні і зростанням втрат за рахунок поверхневої рекомбінації порушених світловим потоком носіїв заряду.

При проведенні розрахунків слід скористатися наближеними співвідношеннями для оцінки енергії квантів і потужності світлового випромінювання $h\nu = \frac{1,986}{\lambda} 10^{-19}$ Дж, $h\nu = \frac{1,24}{\lambda}$ эВ (тут довжина хвилі λ виражена мікромтрах). При визначенні інтенсивності світлового потоку необхідно враховувати співвідношення між використовуваними одиницями вимірювань потужності: $1 \text{ лм} = 10^{-7} \text{ Вт}$.

7.2 Зміст завдання

I. Для кожного з варіантів роботи задаються параметри діодної структури, необхідні для проведення розрахунків (Таблицю 7.1):

- напівпровідниковий матеріал-германій, кремній і арсенід галія;
- дифузійні довжини електронів і дірок L_n и L_p в см;
- концентрації донорів і акцепторів N_D и N_A см⁻³;
- площа переходу $S_{\text{пер}}$ в см² ;
- довжини хвиль світлового випромінювання λ в мкм,
- значення інтенсивності світлового потоку в лм.

II. За формулою (7.1) проводиться розрахунок вольтамперної характеристики діода при відсутності освітленості ($P\Phi = 0$) для заданих в табл.

7.1 напівпровідникових матеріалів.

III. За формулою 7.2 визначаються величини фотоструму при значеннях інтенсивності світлового потоку, зазначених у варіанті розрахунку. Квантова ефективність фотоефекту на заданих довжинах хвиль враховується відповідно даними, представленими на рис. 7.2. При розрахунках використовується значення коефіцієнта збирання носіїв 1, що обґрунтовується оптимальною конструкцією фотодіода, при якій найбільш ефективно поглинання в базі монохроматичного світлового випромінювання.

IV. Відповідно до формули (7.1) проводиться розрахунок і побудова вольтамперних характеристик фотодіода при його різній освітленості для значень світлового потоку, зазначених в табл. 7.1.

V. За формулою (7.6) проводиться розрахунок і побудова залежності напруги холостого ходу від освітленості р-п - переходу для значення температури $T = 300 \text{ K}$, при якій величина температурного потенціалу ϕ_T наближено дорівнює $0,025 \text{ В}$. Розрахунок проводиться для зазначених в табл. 7.1 матеріалів діодної структури і довжин хвиль оптичного випромінювання.

7.3 Приклад виконання роботи

VI. Для виконання роботи до цих напівпровідникових матеріалів за формулами (7.8) і (7.9) розраховуються граничні довжини хвиль оптичного випромінювання і максимальні значення чутливості фотодіодів, результати розрахунків має бути поданій у вигляді таблиці.

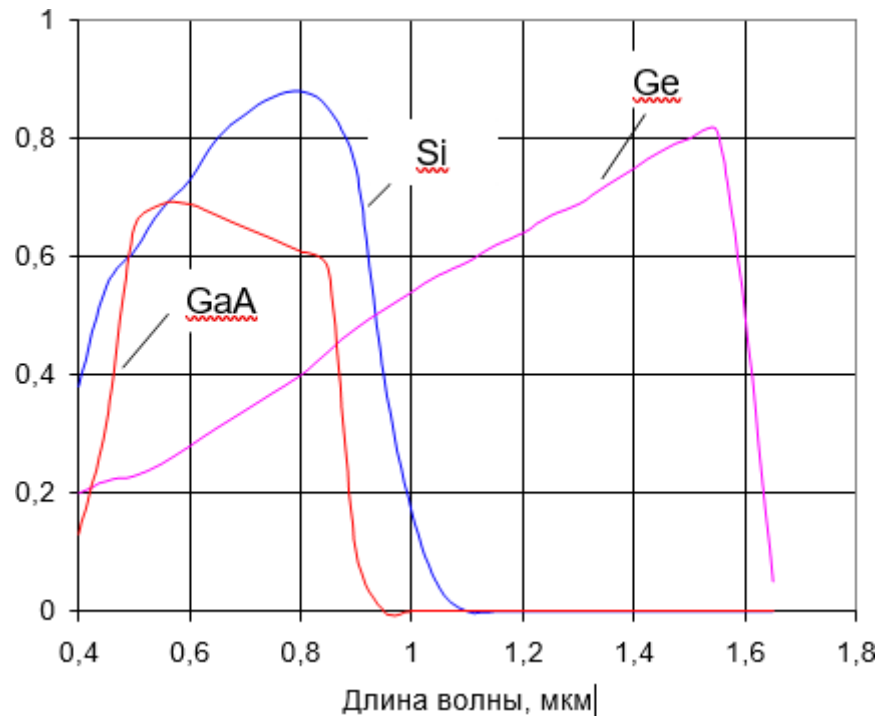


Рисунок 7.2. - Характеристики спектральної чутливості фотоприймачів для різних матеріалів діодних структур

Таблиця 7.1. Вихідні дані для проведення розрахунків

№ варі- анту	$L_p, L_n,$		$N_A,$ $\times 10^{16}$ см^{-3}	$N_D,$ $\times 10^{14}$ см^{-3}	$S_{nep},$ $\times 10^{-4}$ см^2	$\lambda,$ МКМ	$\Phi,$ $\times 10^{-3}$ ЛМ
	Si, Ge $\times 10^{-2}$ см	GaAs $\times 10^{-4}$ см					
1	0,4	1,0	1,0	2,0	1,0	0,4	0; 1; 2
2	0,45	1,5	2,5	3,0	2,0	0,45	0; 3; 4
3	0,5	2,0	3,0	4,0	3,0	0,5	0; 4; 8
4	0,55	2,5	3,5	5,0	4,0	0,55	0; 3; 6
5	0,6	3,0	4,0	6,0	5,0	0,6	0; 5; 10
6	0,65	3,5	4,5	7,0	6,0	0,65	0; 6; 9
7	0,7	4,0	5,0	8,0	7,0	0,7	0; 6; 12
8	0,75	4,5	6,5	9,0	8,0	0,75	0; 7; 14
9	0,8	5,0	7,0	10,0	9,0	0,8	0; 7; 12
10	0,85	5,5	7,5	20,0	10,0	0,85	0; 8; 16
11	0,9	6,0	8,0	30,0	20,0	0,9	0; 9; 18
12	0,95	6,5	8,5	40,0	40,0	0,4	0; 10; 20
13	1,0	7,0	9,0	50,0	50,0	0,45	0; 12; 24
14	1,02	7,5	9,5	60,0	60,0	0,5	0; 13; 26
15	1,05	8,0	10,0	70,0	80,0	0,55	0; 14; 28
16	0,65	3,5	4,5	15	8,5	0,6	0; 15; 30
17	0,7	4,0	5,0	8	9,0	0,65	0; 16; 32
18	0,75	4,5	5,5	9	9,5	0,7	0; 17; 34
19	0,8	5,0	6,0	10	10,0	0,75	0; 18; 36
20	0,85	5,5	6,5	15	10,5	0,8	0; 20; 40
21	0,9	6,0	7,0	20	11,0	0,85	0; 10; 20
22	0,95	6,5	7,5	30	11,5	0,9	0; 12; 24
23	1,0	7,0	8,0	40	12,0	0,59	0; 13; 26
24	0,55	2,5	3,5	15	12,5	0,64	0; 14; 28
25	0,6	3,0	4,0	10	13,0	0,4	0; 15; 30

7.4 Порядок складання звіту

Після виконання написати висновок, відповіді на контрольні запитання запитання та захистити роботу.

7.5 Контрольні питання

1. Пояснити механізм формування струму через освітлений р-n -перехід і дати визначення ефекту генерації фото-ЕРС.
2. За яких припущеннях отримано співвідношення (2.1), яке описує вольтамперну характеристику фотодіода.
3. Від яких параметрів напівпровідників і світлового потоку залежить чутливість фотоприймача на основі р-n - переходу.
4. В якій частині вольтамперної характеристики реалізується режим перетворення енергії оптичного випромінювання в електричну енергію.
5. Пояснити, за яких умов фотоелемент видає максимальну вихідну потужність.

Рекомендована література

Основна:

1. Ніконова А.О., Небеснюк О.Ю., Ніконова З.А. Компоненти та матеріали електронної техніки. Конспект лекцій. Електронний ресурс. Запоріжжя: ЗНУ. 2022, 80с.
2. Ніконова А.О., Небеснюк О.Ю., Ніконова З.А. Компоненти та матеріали мікроелектронних пристроїв. Метод. рекомендації до виконання лабораторних робіт. Електронний ресурс. Запоріжжя: ЗНУ, 2023., 51с.
3. Попик Ю.В. Фізика напівпровідників : підруч. для студ. вищ. навч. закл. затв. МОНУ. Ужгород : ТОВ "ІВА", 2014., 820с.
4. Фізика і технологія тонких плівок та наносистем. Матеріали XI Міжнародної конференції: У 2т. – Т.2. / За заг. ред. заслуженого діяча науки і техніки України, д.х.н., проф.Фреїка Д.М. Івано-Франківськ: Видавничо-дизайнерський відділ ЦІТ Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2007. 276с. URL: <http://lib.pnu.edu.ua/files/zbirnyky/fiztpn-2009-2.pdf>
5. Калинушкін Є.П., Федоркова Н.М., Синиціна Ю.П. Тонкоплівкові матеріали та технології, їх одержання: Навч. посібник. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2009. 175 с.
http://lib.pnu.edu.ua:8080/bitstream/123456789/4727/1/%D0%A4%D0%A2%D0%A2%D0%9F_I.pdf
6. Прокопів В. В. Матеріали електронної техніки: навчальний посібник. Івано-Франківськ: Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2009. 288 с.
Проценко І.Ю., Шумакова Н.І., Овчаренко Ю.М. Фізика твердого тіла: Навчальний посібник. Суми: Вид-во СумДУ, 2002. 76с.
<http://studfile.net/preview/14973846/>

Додаткова:

1. Небеснюк О.Ю., Ніконова З.А. Функціональна електроніка : Конспект лекцій. Запоріжжя : ЗДІА, 2002.
2. Ніконова З.А., Небеснюк О.Ю. Твердотіла електроніка : Для студ. напрямку "Електроніка" ЗДІА : Конспект лекцій. Запоріжжя : ЗДІА, 2002.
3. Ніконова З.А., Швець Є.Я. Біомедична електроніка : Навч. посібник для вnz. Запоріжжя : ЗДІА, 2003.
4. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум : Навч. пос. Київ : Каравела, 2003.
5. Панасенко М.В., Сенько Є.В., Юрченко М.М. Електроніка і мікросхемотехніка : Аналогові та імпульсні пристрої : Підручник для вnz. Харків : ФОЛІО, 2002.

6. Поп С.С., Шароді І.С. Фізична електроніка : Розділи: емісійні явища. Методи діагностики поверхні. Навчальний посібник. Львів : Євросвіт, 2001.
7. Алмазні плівки та плівки споріднених матеріалів //Сбірник тез 12-го Міжнародної конференції «Тонкі плівки в електроніці». Харків: ННЦ ХФТІ, 2001. 342с.
8. Charles P. Poole, Frank J. Owens. Introduction to Nanotechnology. (John Wiley & Sons). 2003.
Harald Ibach. Physics of Surfaces and Interfaces. (Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006).
9. А.Я. Шик, Л.Г. Бакуева, С.Ф. Мусихин, С.А. Рыков. Физика низкоразмерных систем. Наука. СПб. 2001.
10. Nanotechnology and Nanoelectronics. Edd. By W. R. Fahrner. (Springer, NY, 2005).
11. Wang; Liya (Ann Arbor, MI), Xu; Chuanjing (Ann Arbor, MI), Miller; John M. (Ann Arbor, MI). Composite material and electrodes made therefrom. United States Patent 7,326,494, Wang , et al. - February 5, 2008.
12. Barker; Jeremy (Shepton-Under-Wychwood, GB), Saidi; M. Yazid (Henderson, NV), Kelley; Tracy E. (Tuscon, AZ). Electrodes comprising mixed active particles. United States Patent 7,041,239. Barker , et al. May 9, 2006

Інформаційні ресурси:

1. Швець Є.А., Червоний І.Ф., Головка О.П. Матеріали електронної техніки: навчальний посібник . Запоріжжя, ЗДІА, 2011. 278с. URL : <https://inlnk.ru/emaX9> (дата звернення 31.08.2021)
2. Крилик, Л. В. Матеріали електронної техніки : навчальний посібник / Л. В. Крилик, О. О. Селецька. Вінниця : ВНТУ, 2017. 120 с.
http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/IRVC/2021/Krilik_2017_120.pdf (дата звернення 31.08.2021)
3. Конспект лекцій з дисципліни "Матеріалознавство та матеріали електронних апаратів" (частина 1) / Уклад.: Фурманова Н.І., Фарафонов О.Ю. Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. 62 с.
<http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/1734/1/M05927.pdf> (дата звернення 31.08.2021)
4. Подопрігора Н.В., Садовий М.І., Трифонова О.М Фізика твердого тіла. Навчальний посібник. Кропивницький : РВВ КДПУ ім. В. Винниченка, 2013с. <https://core.ac.uk/download/pdf/83099871.pdf>
Проценко І.Ю. Технологія та фізика тонких металевих плівок. Суми: Вид-во СумДУ, 2000. 148с.