

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Сумський державний університет**

Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Іван ПРОЦЕНКО

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**на здобуття освітнього ступеня магістр**

зі спеціальності 171 – Електроніка

освітньо-наукової програми «Електронні інформаційні системи»

на тему: **НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ: ТЕОРЕТИЧНА ОЦІНКА І**

**ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ**

Здобувача групи ЕП.м-11н Костяна Максима Олексійовича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Керівник, професор кафедри  
електроніки, загальної та прикладної  
фізики, д.ф.-м.н., професор

Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ

**Суми – 2023**

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики  
Спеціальність 171 – Електроніка, освітньо-наукова програма  
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав. кафедри ЕЗПФ  
І.Ю. Проценко  
«03» травня 2023 року

**ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

**Костяна Максима Олексійовича**

Тема роботи **НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ: ТЕОРЕТИЧНА ОЦІНКА І  
ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ**

затверджена наказом по університету від «26» квітня 2023 р., № 0426-VI \_\_\_\_\_

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 24 травня 2023 року \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета) Напівпровідникові діоди – це електроперетворювальний напівпровідниковий прилад з одним електричним переходом та двома виводами. У залежності від області використання розрізняють випрямляючі, універсальні (високоомні), імпульсні, надвисокочастотні, тунельні обернені діоди, варікапи, стабілітрони, фото - та світлодіоди. За типом переходу розрізняють площинні та точкові діоди. Площинні діоди мають  $p-n$ - перехід, лінійні розміри якого, що визначають площу переходу, значно перевищують його товщину. До точкових належать діоди, лінійні розміри переходу яких менші товщини запірного шару. Широке використання діодів обумовило актуальність тематики роботи. Мета роботи полягала у вивченні конструктивно-технологічних особливостей та фізики процесів в напівпровідникових діодах різного функціонального призначення і типоміналів, розрахунку параметрів діодів на основі одновимірної діодної моделі, порівнянні результатів вимірювань та розрахунків.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)

1. У літературному огляді розглянути питання конструкції, класифікації та фізичних процесів в напівпровідникових діодах різних типономіналів.

2. Описати методикку вимірювань та розрахунку параметрів.

3. Навести результати експериментальних досліджень і розрахунків, їх обробки, порівняння та висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайд № 1. Актуальність і мета роботи.

Слайди № 2-5. Класифікація, конструкції, технології виготовлення напівпровідникових діодів.

Слайди 6-7. Техніка вимірювань параметрів та робочих характеристик.

Слайди 8-10. Теоретична одновимірна діодна модель. Результати розрахунків, порівняння результатів.

Слайд №11. Висновки.

Слайд №12. Публікації, висновки.

6. Дата видачі завдання 03.05.2023 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 07.05.2023 р.	<i>вик.</i>
2.	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 21.05.2023 р.	<i>вик.</i>
3.	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи.	до 24.05.2023 р.	<i>вик.</i>
4.	Попередній захист роботи	25.05.2023 р., онлайн	<i>вик.</i>
5.	Захист кваліфікаційної роботи	30.05.2023 р., 10-05 – 13-00 онлайн	

Здобувач вищої освіти

Костян М.О.

Науковий керівник

Однодворець Л.В.

## АНОТАЦІЯ

**Обсяг роботи:** 33 сторінки, 11 рисунків, 1 таблиця, 30 використаних джерел.

**Актуальність теми роботи.** Актуальність роботи обумовлена широким використанням напівпровідникових діодів різного функціонального призначення: випрямних, імпульсних, високочастотних і надвисокочастотних діодів, діодів Шотткі, стабілітронів, варикапів, світло випромінюючих та фотодіодів, а також їх перевагами перед електронними двоелектродними лампами: економія енергії для одержання носіїв струму, мініатюрність, висока надійність і тривалий ресурс роботи.

**Мета роботи** полягала у вивченні конструктивно-технологічних особливостей та фізики процесів в напівпровідникових діодах різного функціонального призначення і типоміналів, розрахунку параметрів діодів на основі одновимірної діодної моделі, порівнянні результатів вимірювань та розрахунків.

**Методи:** використання лабораторного стенду для вимірювань параметрів і характеристик діодів різного функціонального призначення і типоміналу; розрахунковий метод на основі одновимірної діодної моделі.

### **Отримані результати:**

1. Розглянуто фізичні основи функціонування, класифікацію, особливості конструкцій, робочі параметри і характеристики та переваги напівпровідникових діодів різних типоміналів та функціонального призначення.

2. Порівняння експериментальних і розрахункових даних для промислового діода типу КД268А показало, що відхилення між цими даними становить від 5,4 до 47,0% в інтервалі зміни прямої напруги від 0 до 3 В, що може бути пояснено тим, що одновимірна модель діода не враховує деякі фізичні ефекти, такі як ефекти поверхневої генерації і рекомбінації носіїв заряду, рівень інжекції та явище теплоперенесення, які впливають на параметри напівпровідникової структури.

3. Аналіз вольт-амперних характеристик діодів Шотткі типу Д237Б та імпульсного діода типу КД522А показує, що характер залежності прямої гілки ВАХ для діодів відрізняються: експоненціальна залежність і діапазон прямого струму 0-10 мА (діод Шотткі) та гілка, яка має максимум і мінімум та діапазон прямого струму 0 - 0,15 А (імпульсний діод).

**Рекомендації щодо використання:** розрахункові результати, отримані в кваліфікаційній роботі можуть бути використані для прогнозу параметрів напівпровідникових діодів різних типів при проектуванні електронних систем.

**Апробація:** Результати роботи опубліковані в 2-х тезах доповідей в Матеріалах Міжнародних конференцій “Фізика, електроніка, електотехніка. ФЕЕ” (2021, 2023 рр.).

**Ключові слова:** напівпровідниковий діод, вольт-амперні характеристики, прогнозування параметрів, одновимірна діодна модель.

<b>АНОТАЦІЯ</b> .....	4
<b>ЗМІСТ</b> .....	5
<b>РОЗДІЛ 1 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ, КЛАСИФІКАЦІЯ І СИСТЕМА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДІВ</b> .....	6
1.1 Загальна інформація.....	6
1.2 Робочі характеристики і параметри випрямляючих діодів.....	13
1.3 Імпульсні діоди і перехідні процеси в них.....	14
1.4 Тунельні і обернені діоди.....	18
1.5 Діоди Шотткі.....	20
<b>РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ</b> .....	21
2.1 Методика і техніка експерименту.....	21
2.2 Результати вимірювань та розрахунків.....	23
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	29
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	30

## РОЗДІЛ 1

# ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ, КЛАСИФІКАЦІЯ І СИСТЕМА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДІВ

### 1.1 Загальна інформація

У даному розділі магістерської роботи буде представлена загальна інформація про напівпровідникові діоди, які є електроперетворювальними пристроями з одним електричним переходом та двома виводами [1]. Діод є першим електронним пристроєм, який буде розглянуто, і він відіграє важливу роль у сучасних електронних системах. Напівпровідниковий діод є найпростішим з напівпровідникових пристроїв, проте має широкий спектр застосувань.

На сьогодні існує кілька типів напівпровідникових діодів, таких як вакуумні трубки, термоелектронні діоди та найпоширеніший тип - кристалічні напівпровідникові діоди з р–n-переходом, які з'єднані з двома електричними клемми [2]. Вакуумна трубка діоду складається з двох електродів: катода та пластини, і дозволяє протікання електронів тільки в одному напрямку - від катода до пластини. Кристалічний напівпровідниковий діод використовується найчастіше і представляє собою кристалічний шматок напівпровідникового матеріалу з р–n-переходом, який має дві електричні клемми.

Основна функція діода полягає в тому, що він дозволяє пропускати електричний струм тільки в одному напрямку, відомому як прямий напрям, і блокує його в протилежному напрямку, відомому як зворотний напрям. Ця односпрямована поведінка діода дозволяє використовувати його для перетворення змінного струму

Змінний струм може бути перетворений на постійний струм за допомогою діода, що називається випрямлячем. Коли діод пропускає струм у прямому напрямку, він майже не має опору і допускає плин струму. У зворотному напрямку діод блокує струм і має великий опір.

Властивості напівпровідникових діодів залежать від типу та матеріалу, використаного для виготовлення р–n-переходу. Діоди можуть мати різний напруговий поріг, при якому вони починають пропускати струм у прямому напрямку. Крім того, діоди можуть мати різний максимальний струм, який вони можуть витримувати перед пошкодженням.

Напівпровідникові діоди використовуються в багатьох сферах, включаючи електроніку, телекомунікації, енергетику, освітлення та медицину. Вони використовуються як ключові елементи в електричних ланцюгах, фільтрах, модуляторах, детекторах та багатьох інших пристроях.

У сучасному світі постійно розробляються нові типи і варіації напівпровідникових діодів для поліпшення їхніх характеристик і розширення можливостей їх застосування. Наприклад, є світлодіоди (LED), які випромінюють світло при проходженні струму через них, та фотодіоди, які здатні виявляти світло і перетворювати його на електричний сигнал.

Напівпровідники є важливими компонентами в сучасній електроніці. Одним із найважливіших типів напівпровідникових пристроїв є транзистори. Транзистори дозволяють керувати електричним струмом та використовуються для підсилення сигналів, комутації та створення логічних елементів. Інтегральні схеми, які містять велику кількість транзисторів на одному чіпі, дозволяють створювати потужні обчислювальні пристрої.

Крім транзисторів, існують інші типи напівпровідникових пристроїв, такі як фотодіоди, тиристри, тунельні діоди, Шотткі діоди та багато інших. Кожен з них має свої унікальні властивості та застосування. Напівпровідники також використовуються в сонячних батареях (зазвичай виготовляються з напівпровідникових матеріалів, зокрема кремній) для перетворення сонячної енергії на електричний струм. Коли сонячне світло потрапляє на сонячну батарею, напівпровідникові матеріали генерують електричний струм.

У зв'язку зі зростанням інтересу до відновлювальних джерел енергії та зеленої технології, напівпровідники грають важливу роль у розвитку сонячної енергетики, електромобілів, енергоефективних освітлювальних систем та інших пристроїв, що допомагають зменшити негативний вплив на



навколишнє середовище.

Застосування напівпровідникових матеріалів широко поширене в електронних пристроях, таких як телевізори, мобільні телефони, комп'ютери, планшети, пристрої зв'язку, медична апаратура та багато інших. Вони також використовуються в промислових секторах, включаючи автомобілебудування, аерокосмічну промисловість, виробництво напівпровідникових приладів та інше.

Для стабілізації параметрів напівпровідникових діодів при змінних умовах, таких як вологість, атмосферний тиск, забруднення та температура, діоди розміщують в спеціальних корпусах з металево-керамічним або металевоскляним виглядом. Це дозволяє ефективно відводити випромінювану теплоту. Для різних типів діодів застосовуються різні методи охолодження, включаючи використання радіаторів.

Для випрямлення високої напруги часто використовують послідовне з'єднання діодів у випрямляючі стовпи або блоки, що мають уніфіковані корпуси та позначаються літерою "Ц". Це дозволяє досягти потрібних характеристик випрямлення.

ВАХ кремнієвих та германієвих діодів відрізняються одна від однієї (рис. 1.1) [4]. Оскільки ширина забороненої зони ( $E_g$ ) у кремнію більша, ніж у германію, то зворотний струм германієвого діода більший, ніж кремнієвого, при однаковій конструкції і потужності. В зв'язку з більшим  $I_{зв}$  у германієвих діодів більш ймовірний пробій у кремнієвих – лавинний. Для області малих значень  $U_{np}$  рівняння теоретичної ВАХ при використанні перших двох членів розкладення в ряд Тейлора функції  $\exp(U_{np} / \varphi_T)$  набуває вигляду [4]

$$I_{np} = I_S \frac{U_{np}}{\varphi_T} . \quad (1.1)$$

Із співвідношення (1.1) випливає, що крутизна прямої вітки ВАХ  $S = \frac{dI_{np}}{dU_{np}}$

пропорційна до зворотного струму. Тому у германієвих діодів крутизна характеристики при малих  $U_{np}$  більша. Крім того, оскільки зворотний струм кремнієвого діода менший, його прямий струм дорівнюючий германієвого діода, досягається при більших прямих напругах. Тому потужність, що розсіється при однакових струмах, в германієвих діодів менша, ніж в кремнієвих [5].

Струм насичення і струм генерації діодів істотно залежать від температури навколишнього середовища. Для струму насичення справедлива при температурі  $T$  співвідношення [4]:

$$I_s(T) = I_s(T_0)e^{(T-T_0)/a} , \tag{1.2}$$

де  $I_s(T_0)$ - струм насичення при температурі  $T_0$ ;

$a=0,09$  1/К – для германію;  $a=0,13$  1/К – для кремнію [4]

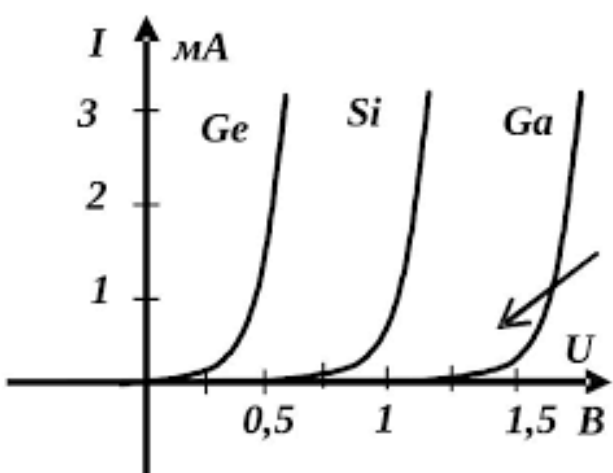


Рис. 1.1. ВАХ кремнієвих та германієвих випрямляючих діодів [5]

Для приблизної оцінки можна вважати, що при зростанні температури на  $10^\circ\text{C}$  зворотний струм германієвих діодів зростає вдвічі, а кремнієвих – в 2,5 рази. Незважаючи на те, що швидкість зростання  $I_{зв}$  кремнієвих діодів із

збільшенням температури більша, абсолютний приріст струму германієвих приладів нагріванні на одну й ту ж саму температуру значно більший. Ця обставина призводить до того, що при збільшенні температури значення зворотної напруги, при якій відбувається тепловий пробій германієвих діодів, зменшується. В кремнієвих діодах, навпаки, із зростанням температури пробій напруги лавинного пробою збільшується.

Це пояснюється тим, що в кремнію з підвищенням температури зростає теплове розсіювання рухомих носіїв, зменшується довжина їх вільного пробігу, і для того, щоб електрон на протязі меншого шляху набув кінетичної енергії, достатньої для іонізації нейтральних атомів, треба мати більше прискорююче поле [9].

При підвищенні температури кремнію збільшується кінетична енергія рухомих носіїв заряду, що призводить до більшої частоти зіткнень між носіями заряду та нейтральними атомами матеріалу. Ці зіткнення сприяють тепловому розсіюванню енергії, оскільки частина енергії передається атомам матеріалу у вигляді тепла.

При збільшенні температури також зменшується довжина вільного пробігу носіїв заряду. Вільний пробіг - це середня відстань, яку пройде носій заряду без зіткнень з іншими частинками. Підвищення температури спричинює більшу кількість випадкових зіткнень з атомами матеріалу, що зменшує довжину вільного пробігу. Для того, щоб електрон набув достатньої кінетичної енергії для іонізації нейтральних атомів, потрібне прискорююче поле. З підвищенням температури кремнію зменшується кінетична енергія рухомих носіїв, тому для збереження необхідного рівня іонізації потрібне більше прискорююче поле. Такі фізичні властивості кремнію при підвищенні температури мають важливе значення для розуміння та проектування транзисторів, діодів та інших електронних компонентів.

Схема однополуперіодного випрямляча з активним навантаженням показана на рис. 1.2. В цій схемі струм через діод та опір загрузки протікає тільки за час дії половини періоду змінної напруги  $U_2$ . Як видно з рис. 1.2 такий струм має пульсуючий характер і протікає в одному напрямку,

змінюючись по величині від максимального значення  $I_{2m}$  до нуля [12].

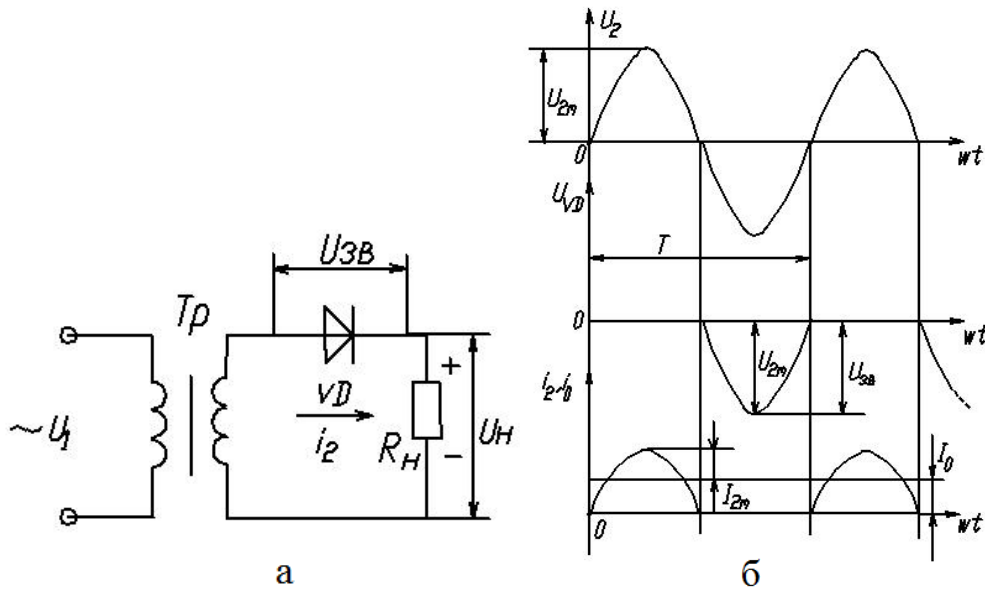


Рис. 1.2. Схема однополуперіодного випрямляча. Адаптовано із роботи [12]

Показана на рис.1.2,  $\delta$  постійна складова випрямленого струму  $I_0$  представляє собою значення струму, який тече за період через опір навантаження  $R_H$ .

Постійну складову випрямленої напруги  $U_0$  на опорі  $R_H$  можна знайти за законом Ома [4]:

$$U_0 = I_0 R_H = 0,318 I_{2m} R_H, \quad (1.3)$$

де  $I_{2m} R_H = U_{2m}$ ,

$$\text{тоді } U_0 = 0,318 U_{2m} = \frac{U_{2m}}{\pi}.$$

Якщо замінити  $U_{2m} = \sqrt{2} U_2$ , отримаємо

$$U_0 = \frac{\sqrt{2} U_2}{\pi} \approx 0,45 U_2 \quad (1.4)$$

На основі схеми можна зробити висновок, що у від'ємний напівперіод

діод знаходиться під напругою, яка діє на затискачах вторинної обмотки трансформатора, тому найбільша зворотна напруга, прикладена до діоду [4]:

$$U_{зв} = U_{2m} = 3,14 U_0 \quad (1.5)$$

Підбираючи діод для роботи в однонапівперіодній схемі, необхідно враховувати наступне

$$U_{зв. доп.} \geq U_{зв} = 3,14 U_0 \quad (1.6)$$

де  $U_{зв. доп.}$  –максимально допустима зворотна напруга вибраного діода [4].

Якщо нерівність (1.6) не виконується, необхідно або взяти діод з більш високою допустимою напругою, або включити декілька однотипних діодів послідовно. Кількість послідовно з'єднаних діодів розраховується з формули

$$k = U_{зв}/U_{зв. доп.}, \quad (1.7)$$

при цьому струм

$$I_{сер} \leq I_{сер. доп.} \geq I_0 \quad (1.8)$$

Якщо нерівність (1.8) не виконується, то необхідно підібрати діод з більш високим значенням  $I_{сер. доп.}$  або включити декілька однотипних діодів паралельно один з одним.

Кількість діодів розраховують з формули [4]

$$m = I_0/I_{сер. доп} \quad (1.9)$$

## 1.2 Діоди універсального призначення

До універсальних (високочастотних) діодів належать одноперехідні

напівпровідникові прилади, що застосовують для випрямлення, модуляції, детектування та нелінійних перетворювань електричних сигналів, частота яких не перевищує 1000 МГц.

При прямому включенні діода ємність  $C_{диф}$  зашунтована малим диференціальним опором  $r_{g_{np}}$  і можна вважати  $Z_{np} = r_1 + r_{g_{np}}$ . При зворотному включенні діода великий диференціальний опір  $r_{g_{зв}}$  зашунтований ємністю  $C_{бар}$ , і тому високих частотах  $Z_{зв} = r_1 + 1/j\omega C_{бар}$ .

Тоді  $Z_{np} = r_1 + r_{g_{np}}$ ;  $Z_{зв} = \sqrt{r_1^2 + 1/\omega^2 C_{бар}^2}$ , і умовою односторонньої провідності є  $\sqrt{r_1^2 + 1/\omega^2 C_{бар}^2} \gg r_1 + r_{g_{np}}$ , або

$$\frac{1}{\omega C_{бар}} \gg r_{g_{np}} \sqrt{1 + \frac{2r_1}{r_{g_{np}}}}. \quad (1.10)$$

Виконання цієї умови можливе при зменшенні ємності *p-n*-переходу. Це стає можливим при застосуванні точково-контактного або мікросплавного способів його виготовлення. Тому універсальні діоди – це здебільшого точкові або мікросплавні діоди. Останні розраховані на більші допустимі струми і мають кращі характеристики при зворотному включенні.

Універсальні діоди, зазвичай, виготовляються за допомогою точково-контактного або мікросплавного методів, що дозволяє зменшити ємність *p-n*-переходу. Це стає можливим через зменшення розмірів переходу і підвищення його допустимого струму. Такі діоди мають кращі характеристики при зворотному включенні.

Вольт-амперна характеристика (ВАХ) універсального діода не має ділянки насичення на зворотній гілці. Це може пояснюватися нагріванням, яке виникає через недостатній відвод тепла, а також ударною іонізацією, яка виникає через неоднорідність електричного поля у переході. Ці явища можуть призводити до виникнення нестабільності та небажаних ефектів у роботі діода.

До параметрів універсальних діодів відносяться, зокрема, ємність діодів при заданій зворотній напрузі, а також діапазон робочих частот і температур.

### 1.3 Імпульсні діоди

Імпульсні діоди використовують як ключові елементи в пристроях імпульсної техніки. За конструкцією і характеристиками вони нагадують

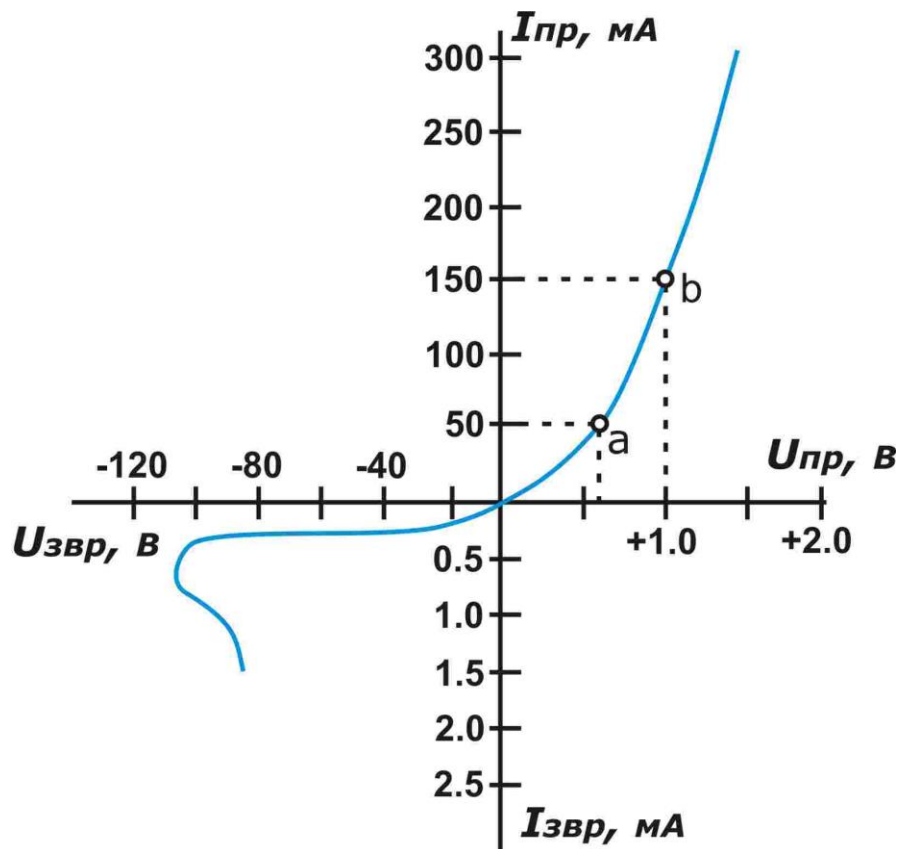


Рис. 1.3. ВАХ універсального діода [11]

універсальні діоди. Крім високочастотних властивостей (мінімальної ємність  $C_{бар}$ ), ці діоди повинні мати мінімальну тривалість перехідних процесів у момент вмикання та вимикання [12].

Розглянемо ці фізичні процеси (рис.1.4 та 1.5) при високому рівні інжекції. При включенні прямого струму  $I_{пр_i}$  в момент  $t_1$  у базі діода поступово нарастає надлишкова концентрація неосновних нерівноважних

носіїв заряду (рис 1.4,в). В початковий момент внаслідок малої кількості цих носіїв електропровідність приладу незначна (опір бази великий), і пряма напруга на діоді буде завищеною (як падіння напруги опір бази діода при протіканні  $I_{np_i}$ ). В міру накопичення неосновних носіїв (інжекції) опір бази поступово зменшується, і напруга на діоді  $U_{np}$  також зменшується до усталеного значення  $U_{np_{уст}}$ . Час  $t_{уст} = t_4 - t_1$  називається часом установлення прямого опору. Якщо тепер переключити діод, тобто  $U_{np}$  замінити на запірну  $U_{зв}$  в момент  $t_5$  (рис.1.5,а), то зворотний струм  $I_{зв}$  різко зростає до значення  $I_{зв_{max}}$  (рис.1.5,б) внаслідок того, що опір бази не може зрости миттєво [13].

Це у стані прямого включення діода поля  $p$ - $n$ - переходу виштовхує дірки з  $n$ - області бази, створюючи дрейфовий струм. Безпосередньо після моменту переключення  $t_5$  ефективність екстракції стає значно вищою (за рахунок зменшення дифузійного струму), і не рівноважні дірки розсмоктуються з бази, збільшуючи її опір (рис.1.5,в). Розсмоктуванню неосновних носіїв з бази сприяє й рекомбінація дірок з електронами. Це процес проходить впродовж часу відновлення зворотного опору бази  $t_{від} = t_8 - t_5$  до того моменту, поки струм  $I_{зв}$  не зменшиться до рівноважного усталеного значення  $I_{зв_{уст}}$ , яке відповідає великому опору включеного в зворотному напрямі  $p$ - $n$ - переходу і збідненої на носіїв бази [14].

Швидкодія імпульсних діодів збільшується за допомогою введення спеціальних легуючих домішок, які зменшують середню тривалість життя неосновних носіїв. Такими домішками до НП  $n$ - типу є, наприклад, золото. Іншим способом зменшення часу відновлення зворотного опору бази є використання бази з нерівномірною концентрацією домішок. Це можна здійснити, наприклад, за допомогою дифузії акцепторів до НП  $n$ -типу. На рисунку 1.6 показано розподіл різниці концентрацій акцепторів і донорів і створення  $p$ - $n$ - переходу у НП [15]. З рисунка видно, що концентрація



домішок в базі при наближенні до  $p$ - $n$ - переходу зменшується, тому нерівномірною буде й концентрація основних носіїв – електронів.

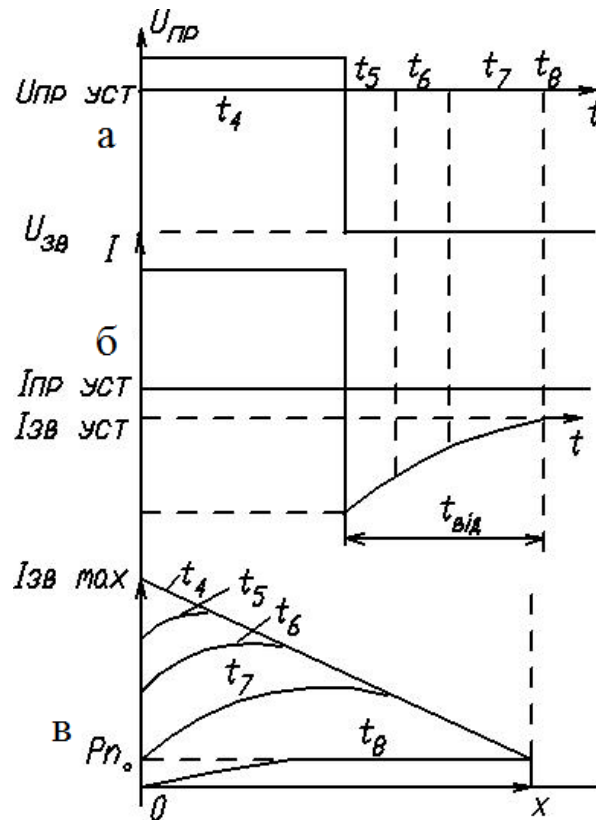


Рис. 1.5. Перехідні процеси в діоді при вимиканні [14]

Внаслідок цього електрони дифундують в бік  $p$ - $n$ - переходу, залишаючи за собою некомпенсований заряд позитивних іонів. В базі виникає електричне поле  $E_0$ , спрямоване в бік переходу. Під дією цього поля дірки, інжектовані до бази при вмиканні діода в прямому напрямі, накопичуються біля межі  $p$ - $n$ - переходу. При переключенні діода з прямого напрямку на зворотний ці дірки під дією поля  $p$ - $n$ - переходу швидко виходять з бази до емітера, і час відновлення зворотного опору зменшується. Діоди з такою технологією виготовлення називаються діодами з накопиченням заряду [16]. Досить ефективним шляхом збільшення швидкодії імпульсних діодів є використання в них бар'єрів Шоттки. Як відомо, в таких діодах зовсім відсутня інжекція [15].

Основні спеціальні параметри імпульсних діодів: імпульсна пряма

напруга  $U_{np_i}$  при даному імпульсі прямого струму; час усталення прямої напруги  $t_{уст}$ ; час відновлення зворотного опору  $t_{від}$ . Останній параметр зашифровано в третьому елементі позначення діода [15]. Більшість імпульсних діодів має металево-скляне або скляне конструктивне оформлення [14].

#### 1.4 Тунельні і обернені діоди

Тунельні діоди – це напівпровідникові прилади, у яких на прямій гілці ВАХ є ділянка негативного диференційного опору, що з фізичної точки зору обумовлено тунельним проходженням електрона через  $p$ - $n$ - перехід [14].

На рис.1.7 наведена енергетичні діаграми для тунельного діода, на яких рівні валентної зони і зони провідності заштриховані. При відсутності зовнішньої напруги (рис.1.7,а) рівень Фермі всієї системи однаковий ( $W_{\phi_n} = W_{\phi_p}$ ). Тунельний перехід електронів неможливий, струм дорівнює нулю. При підведенні прямої напруги рівні Фермі зміщуються на величину  $W = qU_{np}$  (рис.1.7,б), і напроти частини енергетичних рівнів, зайнятих електронами в  $n$ - області (подвійна штриховка), утворюються вільні рівні в  $p$ -області [14].

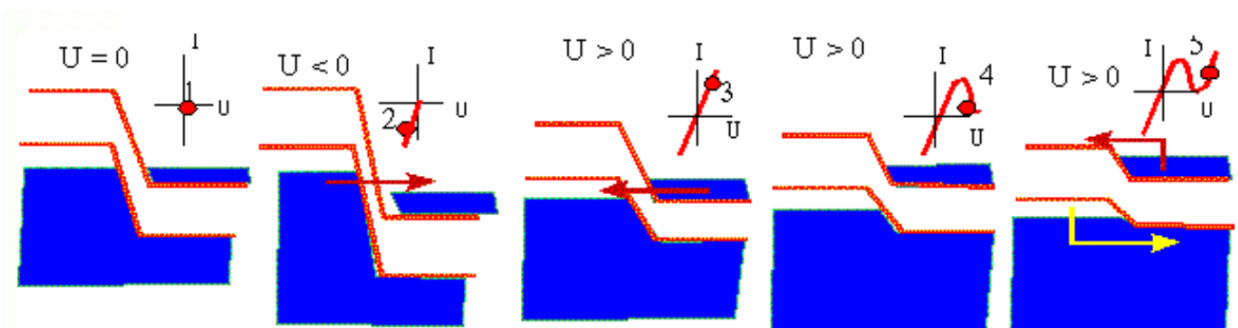


Рис.1.7. Енергетичні діаграми тунельного діода [14]

$p$ - $n$ - переходи тунельних діодів одержують методом сплавлення Ge та GaAs. Те що стосується обернених діодів, то їх провідність внаслідок тунельного ефекту при зворотній напрузі значно більша, ніж при прямій. На енергетичній діаграмі рівні Фермі збігаються з краями ЗП і ВЗ (рис.1.8).

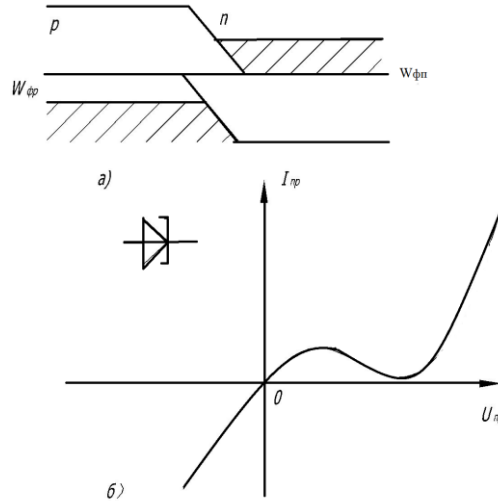


Рис.1.8. Енергетична діаграма (а) та ВАХ (б) оберненого діода [12]

При включенні таких діодів в зворотному напрямі тунельні електрони з ВЗ  $p$ -області переходять на вільні рівні ЗП  $n$ - області, і через  $p$ - $n$ - перехід тече великий зворотний струм. Мала інерційність внаслідок тунельного ефекту і велика крутизна характеристики зумовлюють використання обернених діодів в детекторах і змішувачах діапазону надвисоких частот [13].

### 1.5 Діоди Шотткі

Діод Шотткі (ДШ) – це напівпровідниковий діод високої швидкодії, сформований на основі контакту метал-напівпровідник. Два різних матеріали, які використовуються для створення контакту, забезпечують термостабільність параметрів ДШ. Головною вимогою до діодів Шотткі, що працюють у змішувачах НВЧ- діапазону, є стійкість до вигорання [10, 14].

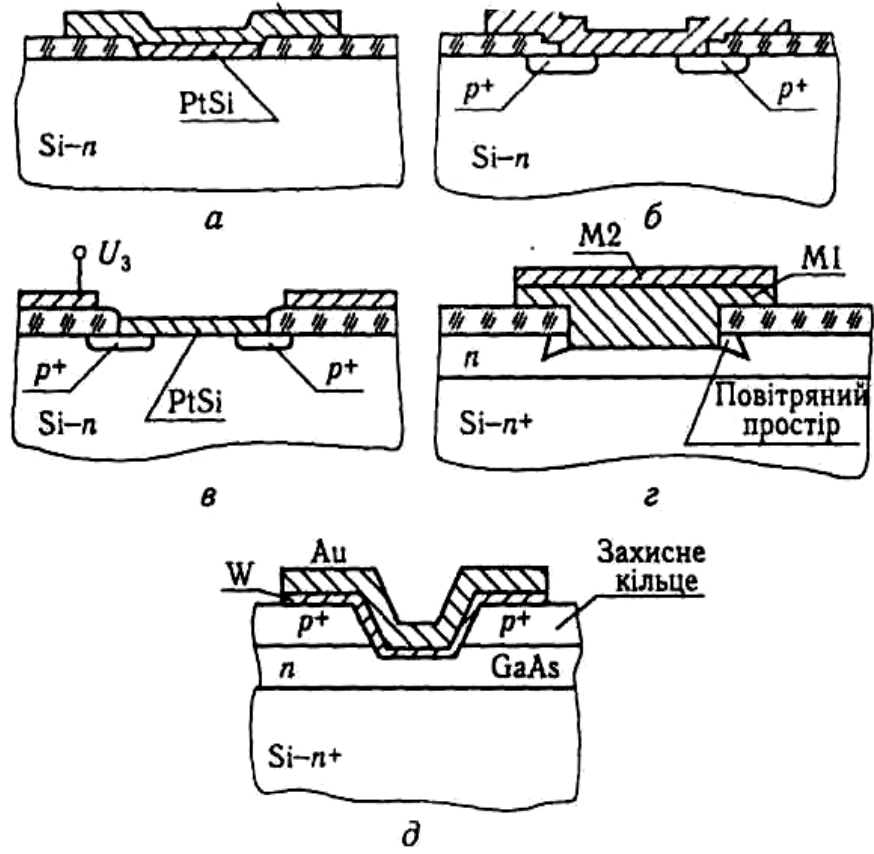


Рис.1.10. Структури діодів Шотткі [14]

## РОЗДІЛ 2

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

#### 2.1 Методика і техніка експерименту

Досліджувались робочі характеристики діодів Д237Б (діод Шотткі) і КД522А (імпульсний діод). До електричної схеми стенду входили: вольтметр М903, амперметр Ц4313, мультиметр. Вимірювання проводились при температурі 23°C [2, 14].

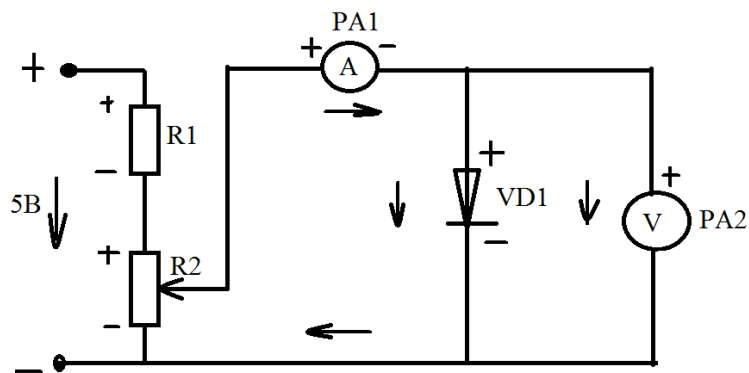


Рис. 2.1. Схема прямого ввімкнення діода

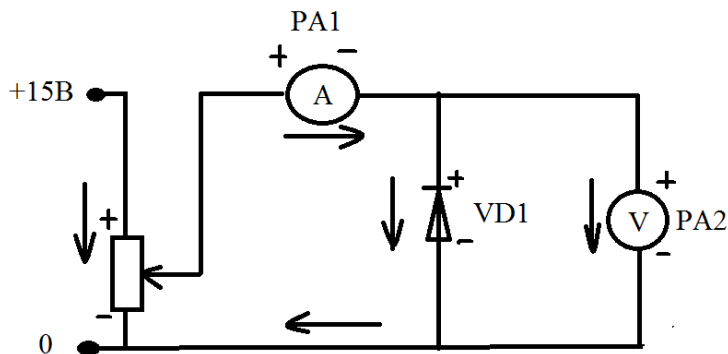


Рис.2.2. Схема зворотнього ввімкнення діода

В своєму складі схеми мають: потенціометр, який необхідний для зміни напруги на діоді, амперметри для вимірювання прямого та зворотнього струмів, вольтметр.

При прямому ввімкненні на анод діода подається додатня напруга 5В, що змінюється за допомогою потенціометра R2. При зміні напруги буде

змінюватись струм діода, який вимірюється амперметром PA1, а падіння напруги – вольтметром PA2.

При зворотньому - від'ємний потенціал напруги 15В, оскільки опір діода при такому ввімкненні набагато більший, ніж при прямому. Показання вольтметра та амперметра знімають по аналогії з попередньою схемою [2].

## 2.2 Результати вимірювань та розрахунків

Проведено розрахунок робочих параметрів імпульсного діода типу Д237Б за одновимірною теоретичною моделлю. р-п перехід в ньому створено методом дифузії акцепторної домішки р-типу (бор) у рівномірно леговану силіцієву пластину n-типу провідності з концентрацією домішки  $1,1 \cdot 10^{21} \text{ ат/м}^3$  так, що виник лінійний перехід з градієнтом концентрації  $k_T = 1 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-2}$ . Товщина областей у напрямі проходження носіїв заряду  $W_n = 1,5 \text{ мкм}$ ,  $W_p = 2 \text{ мкм}$ . Дифузійна довжина дірок в області n-типу  $L_p = 30 \text{ мкм}$ , а дифузійна довжина електронів у області р-типу  $L_n = 20 \text{ мкм}$ . Коефіцієнт дифузії домішок  $D_p = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ , а коефіцієнт дифузії електронів  $D_n = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ . Площа р-п переходу діода  $S = 300 \text{ мкм}^2$ . Порядок розрахунків :

1. Визначимо висоту потенціального бар'єра.
2. Розрахуємо товщину області просторового заряду за умов рівноваги.
3. Розрахуємо максимальну напруженість внутрішнього електричного поля в області просторового заряду.
4. Визначимо товщину області просторового заряду за умов зворотного зміщення переходу. Напруга зворотного зміщення  $U_{RD} = -5 \text{ В}$ .
5. Визначимо питому ємність переходу за відсутності зовнішнього зміщення та умов зворотного зовнішнього зміщення  $U_{RD} = -5 \text{ В}$ .
6. Розрахуємо концентрації надлишкових носіїв заряду, інжекттованих у кожен з областей переходу за умов прямого зміщення  $U_{FD} = +0,6 \text{ В}$ .
7. Розрахуємо повний струм, який проходить крізь діод за умов прямого зміщення  $U_{FD} = +0,6 \text{ В}$  та зворотний струм насичення діода.

Висота потенціального бар'єра визначається за умов, що р-п перехід виникає в тому місці пластини, де концентрація акцепторної домішки дорівнюватиме концентрації донорної домішки в пластині:  $N = 1,1 \cdot 10^{21}$  ат/м<sup>3</sup>. Оскільки у формулу потрібно підставляти концентрації легуючих домішок, що містяться в межах ОПЗ р-п переходу, а концентраційний профіль у межах переходу лінійний, то можемо погодитись на однакову концентрацію домішок з обох боків переходу:  $N = 1,1 \cdot 10^{21}$  ат/м<sup>3</sup>. Отже,

$$U_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}, \quad (2.1)$$

$$U_0 = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19}} \ln \left( \frac{1,1 \cdot 10^{21}}{1,5 \cdot 10^{16}} \right)^2 = 0,02589 \cdot 22,4 = 0,58 \text{ В.}$$

2. Товщину області просторового заряду можемо визначити за формулою :

$$l_0 = \left( U_0 \frac{12 \varepsilon \varepsilon_0}{q k_T} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2.2)$$

$$l_0 = \left( 0,58 \frac{12 \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{28}} \right)^{\frac{1}{3}} = \left( 461,4 \cdot 10^{-21} \right)^{\frac{1}{3}} = 7,73 \cdot 10^{-7} = 0,77 \text{ мкм}$$

3. Максимальна напруженість електричного поля буде на «металургійній» межі переходу (при  $x=0$ ) і може бути розрахована за формулою :

$$\xi(0) = -q \frac{k_T x_p^2}{2 \varepsilon \varepsilon_0} = -q \frac{k_T \left( \frac{l_0}{2} \right)^2}{2 \varepsilon \varepsilon_0}, \quad (2.3)$$

$$\xi(0) = -1,602 \cdot 10^{-19} \frac{1 \cdot 10^{28} (0,386 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = -1,13 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

4. Згідно з формулою маємо:

$$l = l_0 \left( 1 - \frac{U}{U_0} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2.4)$$

$$l = 0,773 \left( 1 + \frac{5}{0,58} \right)^{\frac{1}{3}} = 1,64 \text{ мкм.}$$

5. Знаходимо значення питомої ємності за умов рівноваги і зовнішнього зміщення

$$C_{joo} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{l_0}; \quad (2.5)$$

$$C_{joo} = \frac{12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{0,77 \cdot 10^{-6}} = 138 \cdot 10^{-6} \frac{\Phi}{\text{м}} = 1,38 \cdot 10^{-4} \frac{n\Phi}{\text{мкм}^2}$$

$$C_{jo} = \frac{12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{1,64 \cdot 10^{-6}} = 0,65 \cdot 10^{-4} \frac{n\Phi}{\text{мкм}^2}.$$

6. Концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду визначимо за формулами :

$$p'_n(x_n) = p_{no} \left[ \exp\left(\frac{U_{FD}}{U_T}\right) - 1 \right]; \quad (2.6)$$

$$n'_p(-x_p) = n_{po} \left[ \exp\left(\frac{U_{FD}}{U_T}\right) - 1 \right]. \quad (2.7)$$

Концентрації неосновних носіїв заряду в кожній з областей за умов рівноваги  $p_{no}$  та  $n_{po}$  визначимо за законом діючих мас на межі «металургійного» переходу:



$$p_{no} n_{no} = n_i^2, \quad (2.8)$$

$$p_{no} = \frac{(1,5 \cdot 10^{16})^2}{1,1 \cdot 10^{21}} = 2,04 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}.$$

Концентрація неосновних електронів  $n_{po}$  в області р- типу буде такою:

$$n_{po} = 2,04 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}.$$

хоча в напрямі контактів ця величина зменшуватиметься. Для лінійного переходу концентрація надлишкових носіїв заряду, інжекттованих у протилежні області переходу, будуть приблизно однакові, тому

$$p'_n(x_n) \approx n'_p(-x_p) \quad (2.9)$$

$$p'_n(x_n) \approx 2,04 \cdot 10^{11} \left[ \exp\left(\frac{0,6}{0,026}\right) - 1 \right] = 2,15 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}.$$

7. У діода, що розглядається, обидві області будуть тонкими ( $W_n \ll L_p; W_p \ll L_n$ ), тому для розрахунку повного струму скористаємося формулою:

$$I_{FD} = S_q \left( \frac{D_p p_{no}}{L_p} \text{cth} \frac{W_n}{L_p} + \frac{D_n n_{po}}{L_n} \text{cth} \frac{W_p}{L_n} \right) \left[ \exp\left(\frac{U_{FD}}{U_T}\right) - 1 \right], \quad (2.10)$$

$$I_{FD} = 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 300 \cdot 10^{-12} \left( \frac{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 2,04 \cdot 10^{11}}{30 \cdot 10^{-6}} \text{cth} \frac{1,5 \cdot 10^{-6}}{30 \cdot 10^{-6}} + \frac{3,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2,04 \cdot 10^{11}}{20 \cdot 10^{-6}} \text{cth} \frac{2 \cdot 10^{-6}}{20 \cdot 10^{-6}} \right) \cdot \left[ \exp\left(\frac{0,6}{0,026}\right) - 1 \right] = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ А}.$$

Зворотний струм насичення діода розрахуємо за формулою :

$$I_S = -qS \left( \frac{D_p p_{no}}{L_p} \operatorname{cth} \frac{W_n}{L_p} + \frac{D_n n_{po}}{L_n} \operatorname{cth} \frac{W_p}{L_n} \right), \quad (2.11)$$

$$I_S = -1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 300 \cdot 10^{-12} \left( \frac{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 2,04 \cdot 10^{11}}{30 \cdot 10^{-6}} \operatorname{cth} \frac{1,5 \cdot 10^{-6}}{30 \cdot 10^{-6}} + \frac{3,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2,04 \cdot 10^{11}}{20 \cdot 10^{-6}} \operatorname{cth} \frac{2 \cdot 10^{-6}}{20 \cdot 10^{-6}} \right) = -2,1 \cdot 10^{-14} \text{ A}$$

Таблиця 2.1

## Результати вимірювань ВАХ діоду типу КД2997Б

U <sub>пр.</sub> , В	0,425	0,44	0,455	0,46	0,47	0,48	0,49	0,49	0,50	0,51	0,52
I <sub>пр.</sub> , мА	1	2	3	4	5	6	8	9	11	13	15
U <sub>зв.</sub> , В	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I <sub>зв.</sub> , мА	0,07	0,09	0,1	0,17	0,22	0,31	0,46	0,52	0,59	0,66	0,72

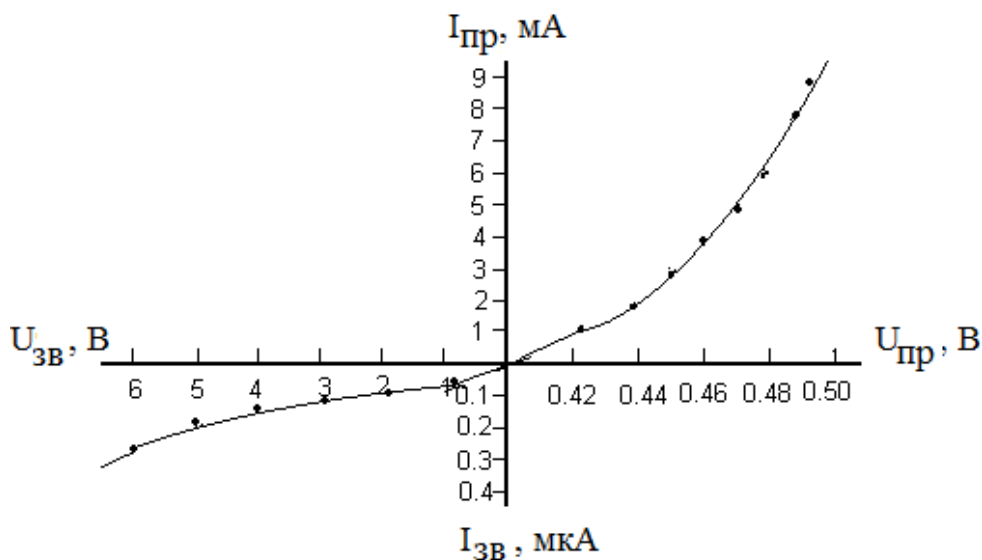


Рис.2.3. Вольт-амперна характеристика діоду типу КД2997Б

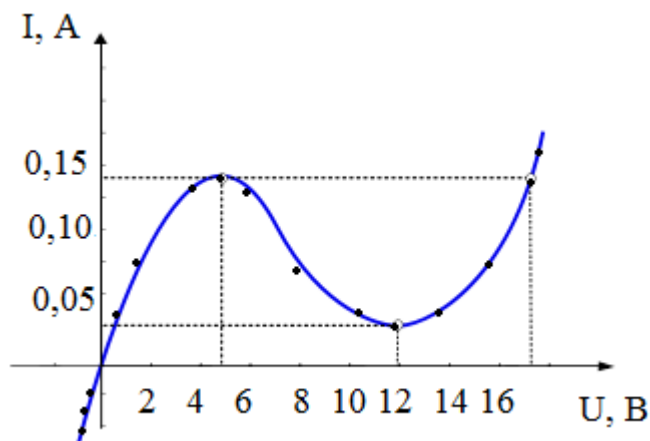


Рис.2.4. Вольт-амперна характеристика діоду типу КД522А

При прямому ввімкненні зовнішня напруга  $U$  підключена до контакту у прямому напрямі, висота потенціального бар'єра знизиться і потік електронів з напівпровідника стане набагато більшим. Внаслідок зменшення опору збільшується прямий струм  $I_{пр}$ . Якщо напруга  $U$  ввімкнена у зворотному напрямі – висота потенціального бар'єру зросте (Таблиця 2.1).

На рис.2.3 і 2.4 наведені вольт-амперні характеристики діоді Шотткі типу Д237Б та імпульсного діода типу КД522А. Характер залежності прямої гілки ВАХ для діодів відрізняються: експоненціальна залежність і діапазон прямого струму 0-10 мА (діод Шотткі) та гілка, яка має максимум і мінімум та діапазон прямого струму 0 - 0,15 А (імпульсний діод).

Порівнявши розрахункові і експериментальні значення повного прямого струму виявлено, що відхилення між розрахунковими і експериментальними даними, величина якого складає від 5,4 до 47,0 % в інтервалі зміни прямої напруги від 0 до 3В.

## ВИСНОВКИ

1. Розглянуто фізичні основи функціонування, класифікацію, особливості конструкцій, робочі параметри і характеристики та переваги напівпровідникових діодів різних типоміналів та функціонального призначення.

2. Проведено експериментальне дослідження вольт-амперної характеристики промислового діода типу КД268А. Отримано, що при зростанні прямого струму від 0 до 0,8 мА значення прямої напруги зростає від 0 до 3 В, а при зростанні зворотнього струму від 0 до 0,14 мкА величина зворотної напруги змінюється від 0 до 1,4 В.

3. Порівняння експериментальних і розрахункових даних для промислового діода типу КД268А показало, що відхилення між цими даними становить від 5,4 до 47,0% в інтервалі зміни прямої напруги від 0 до 3 В, що може бути пояснено тим, що одновимірною моделлю діода не враховує деякі фізичні ефекти, такі як ефекти поверхневої генерації і рекомбінації носіїв заряду, рівень інжекції та явище теплопереносу, які впливають на параметри напівпровідникової структури.

4. Установлено, що в мікроелектронних пристроях визначальну роль відіграють явища переносу рухливих носіїв заряду і кінетичні явища, причиною яких є те, що рухливі носії заряду переносять масу, заряд, енергію тощо під час свого переміщення.

5. Показано, що робочі параметри випрямляючих діодів залежать від температури навколишнього середовища: при збільшенні температури значення зворотної напруги, при якій відбувається пробій, в залежності від матеріалу, збільшується або зменшується.

6. Аналіз вольт-амперних характеристик діодів Шотткі типу Д237Б та імпульсного діода типу КД522А показує, що характер залежності прямої гілки ВАХ для діодів відрізняються: експоненціальна залежність і діапазон прямого струму 0-10 мА (діод Шотткі) та гілка, яка має максимум і мінімум та діапазон прямого струму 0 - 0,15 А (імпульсний діод).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Прищепя М.М., Погребняк В.П. Мікроелектроніка. -Частина 1. Елементи мікроелектроніки - Київ: Вища школа, 2004. - 432 с.
2. Стахів П.Г., Коруд В.І., Гамола О.Є. Основи електро-ніки:функціональні елементи та їх застосування. - Львів: Новий світ, 2003. - 128 с.
3. Якименко Ю.І. Мікропроцесорна техніка: Підручник. – К.: ІВЦ Політехніка- Кондор, 2004. – 235 с.
4. Крилик Л.В., Селецька О.О. Матеріали електронної техніки: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 120 с.
5. Матеріали і компоненти функціональної електроніки: навчальний посібник (електронне видання) / Л.В. Одноворець, І.М. Пазуха. – Суми: Сумський державний університет, 2020. – 196 с.
6. Матвієнко М.П. Основи електроніки: підручник. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2017. – 364 с.
7. Матвійків М.Д., Когут В.М., Матвійків О.В. Елементна база електронних апаратів. – Львів: Вид-во НТУ «Львівська політехніка», 2018. – 428 с.
8. Doo-Hwan You, Ju-Hyun Lee, Seong-Sik Park, Sin-Doo Lee. Antiferroelectric LCD with one polarizer in a reflective configuration // Information Display, №4. – 2000, P. 277 – 281.
9. Kathleen M. Vaeth. OLED-Display Technology // Information Display, № 6. – 2003. – P. 12 – 17.
10. Gu Xu. Fighting OLED Degradation // Information Display, № 6, 2003. – P. 18- 21.
11. Шликов В.В. Мікропроцесорна техніка: Практикум [Електронний ресурс / В.В. Шликов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 144 с.
12. Трунов О. М. Датчики та сенсори робототехнічних систем. – 2020. – Миколаїв: ЧНУ. – 39 с.
13. Гончаренко О.М., Баранов О.О., Костян М.О., Лободюк О.С., Одноворець Л.В. Оптиелектронні компоненти сучасних волоконно-

оптичних ліній зв'язку / Програма і матеріали Міжнародної науково-технічної конференції студентів і молодих вчених «Фізика, електроніки, електротехніка. ФЕЕ-2021». – 2021. – С. 65-66.

14. Костян М.О., Лободюк О.С., Однодворець Л.В. Діоди Шотткі як швидкодіючі компоненти електронних систем / Програма і матеріали Міжнародної науково-технічної конференції студентів і молодих вчених «Фізика, електроніки, електротехніка. ФЕЕ-2023». – 2023. – С. 50.