

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки, загальної та
прикладної фізики

Кваліфікаційна робота бакалавра
**НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ В ІНТЕГРОВАНІЙ
МІКРОЕЛЕКТРОНІЦІ: ОСНОВИ РОБОТИ ТА
КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ**

Студент гр.ЕП-71

М.О. Костян

Науковий керівник,
д-р фіз.-мат. наук, професор

Л.В. Олександров

Завідувач кафедри ЕЗПФ,
д-р фіз.-мат. наук, професор

І.Ю.Проценко

Суми 2021

РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи полягала у вивченні конструктивно-технологічних особливостей та фізики процесів в напівпровідникових діодах різного функціонального призначення і типоміналів.

У роботі розглянуті конструктивно-технологічні та фізичні особливості напівпровідникових діодів різного функціонального призначення: випрямних, імпульсних, високочастотних і надвисокочастотних діодів, діодів Шоттки, стабілітронів, варикапів, світловипромінюючих та фотодіодів. Показано, що напівпровідниковий діод має переваги перед електронними двоелектродними лампами: економія енергії для одержання носіїв струму, мініатюрність, висока надійність і тривалий ресурс роботи. Недоліками діодів є погіршення їх роботи з підвищенням температури і вологості.

Проведені вимірювання вольт-амперних характеристик напівпровідникових (германієвих і кремнієвих) діодів, які показали, що при зростанні робочої напруги: від 0 до 1,6 В (пряма напруга) струм діода змінюється від 0,45 до 0,55 мА; від 0 до 15 В (зворотна напруга) – від 0 до 16 мкА.

Робота викладена на 27 сторінках, зокрема містить 10 рисунків, 2 таблиці та список цитованої літератури із 15 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ ДІОД, ДІОД ШОТТКІ, СВІТЛОВИПРОМІНЮЮЧИЙ ДІОД, ВОЛЬТ-АМПЕРНА ХАРАКТЕРИСТИКА.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
Розділ 1. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ, КЛАСИФІКАЦІЯ І СИСТЕМА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДІВ	6
1.1. Загальна інформація.....	6
1.2. Робочі параметри і характеристики випрямляючих діодів	7
1.3 Діоди універсального призначення	10
1.4. Імпульсні діоди і перехідні процеси в них.....	12
1.5 Тунельні і обернені діоди.....	13
1.6 Діоди Шотткі.....	16
Розділ 2. ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДІОДІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ	19
2.1. Випрямні діоди.....	19
2.2. Стабілітрони, варикапи, світло діоди та фотодіоди.....	20
Розділ 3. РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ТА ТЕХНІКА ВИМІРЮВАНЬ	22
ВИСНОВКИ	25
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	26

ВСТУП

Електроніка як галузь техніки розвивається виключно швидкими темпами. На початку 60-х років ХХ ст. із електроніки виділилась самостійна галузь – мікроелектроніка, головною ознакою якої є комплексна інтеграція електро – радіоелементів на кристалі й платі.

Проектування приладів і систем на основі напівпровідникових джерел світла достатньо складний процес. Ринок світлодіодної продукції тепер перебуває на стадії формування і через деякий час він стане прозорим та упорядкованим, що сприятиме не тільки економічному, але й технічному прогресу. Це означає, що ефективність використання енергії стане одним з найважливіших критеріїв критичного оцінювання виробу. За останні роки світлодіоди на основі органічних матеріалів стали новими конкурентоспроможними пристроями завдяки простій технології виготовлення, низькій напрузі живлення, високій яскравості. Крім того, органічні матеріали характеризуються екологічністю та дешевизною. З використанням органічних матеріалів у технології світлодіодів стає можливим створення пристроїв відображення інформації та освітлення різноманітних конфігурацій на гнучких та прозорих основах.

Основними параметрами органічних світловипромінювальних діодів (OLED) є спектр випромінювання, яскравість, напруга живлення, довговічність тощо. Пошук та синтез нових високоефективних світловипромінювальних в синій області спектра матеріалів залишається актуальним завданням.

Мета кваліфікаційної роботи полягала у вивченні конструктивно-технологічних особливостей та фізики процесів в діодах різного функціонального призначення і типоміналів.

Результати роботи представлені і обговорені на Науково-технічній конференції «Фізика, електроніка, електротехніка, ФЕЕ-2021» (м.Суми).

Розділ 1. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ, КЛАСИФІКАЦІЯ І СИСТЕМА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДІВ

1.1 Загальна інформація

Напівпровідникові діоди – це електронні прилади з одним електричним переходом та двома виводами.

У залежності від області використання розрізняють випрямляючі, універсальні (високоомні), імпульсні, надвисокочастотні, тунельні обернені діоди, варикапи, 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 [1].

Система позначень діодів, прямий струм яких не перевищує 10А, згідно з ДСТУ має 6 елементів.

Перший елемент – літера або цифра, яка визначає вихідний матеріал виготовлення. При цьому літера вживається для приладів, які призначено до використання в пристроях широкого вжитку, а цифра – для діодів в пристроях спеціального вжитку. Наприклад, Г або І германій або сполуки, К або 2 кремній або його сполуки, А або 3 сполуки галію.

Другий елемент – літера, яка визначає підклас приладу. Наприклад, Д - випрямляючий, імпульсний або універсальний діод, С- стабілітрони, В – варикапи, ФД - фотодіоди, Л – світлодіоди, И(І) - тунельні або обернені діоди. Третій елемент – цифра від 1 до 9, що вказує на призначення приладу.

Четвертий та п'ятий елемент (від 01 до 99) - порядковий номер розробки. Шостий елемент – літера від А до Я - вказує на параметричну групу технологічного типу.

Таблиця 1.1- Система умовних позначень напівпровідникових діодів

Елемент позначення	Напруга стабілізації, В		
	$U_{cm} < 19В$	$10В < U_{cm} < 99В$	$100В < U_{cm} < 199В$
Третій елемент: $P_{max} \leq 0,3Вт$ $0,3Вт < P_{max} \leq 5Вт$ $5Вт < P_{max} \leq 25Вт$	1 4 7	2 5 8	3 6 9
Четвертий та п'ятий елементи	Від 01 до 99 (четвертий елемент вказує на ціле число, а п'ятий – на десяті частки напруги стабілізації)	Від 10 до 99 (означають номінальну напругу стабілізації в вольтах)	Від 00 до 99 (означають різницю між напругою стабілізації та 100В)

Стабілітрони мають свою особливу систему позначень, яка відрізняється від попередньої третім, четвертим та п'ятим елементами згідно з таблицею 1.1.

Система позначень діодів має два або три елементи. Перший елемент – літера Д. Другий елемент – цифра, що вказує на класифікаційну групу діодів. Третій елемент – літера, що характеризує різновид діода в даній групі [2].

1.2 Робочі параметри і характеристики випрямляючих діодів

Випрямляючі діоди (ВД) призначені для випрямлення змінного струму і складають найбільш поширений підклас діодів. В залежності від значення середнього випрямленого струму розрізняють [1, 3]:

ВД малої потужності ($I_{сеп} \leq 0,3А$; третій елемент позначень – 1);

ВД середньої потужності ($0,3\text{A} < I_{\text{всер}} \leq 10\text{A}$; третій елемент позначень2);

ВД силової ($I_{\text{всер}} > 10\text{A}$).

Робочі частоти ВД малої та середньої потужності, не перевищують 20 кГц, силові діоди працюють на частоті 50Гц.

Оскільки допустима густина струму через *p-n*- перехід $j_{np,фч} \leq 2\text{A} / \text{мм}^2$, то для одержання названих значень $I_{\text{всер}}$ використовуються площинні *p-n*- переходи, виготовлені сплавним або дифузійним способом. Велика ємність таких переходів не впливає істотно на роботу ВД у названому діапазоні частот.

Параметри випрямляючих діодів :

- постійна напруга U_{np} , яка відповідає постійному струму I_{np} ;
- постійний зворотній струм $I_{зв}$, який відповідає постійній напрузі $U_{зв}$;
- прямий R_{np} та зворотний $R_{зв}$ опори діода при даних U_{np} та $U_{зв}$;
- диференційний опір діода $r_g = dU / dI$;
- максимально допустима зворотна напруга $U_{зв \text{ max}}$;
- максимально допустимий прямий струм $I_{np \text{ сер max}}$.

Для стабілізації параметрів випрямного діода під впливом вологості, атмосферного тиску, забруднення, зміни температури діоди поміщають в металево-керамічний або металево-скляний корпус, який забезпечує ефективне відведення теплоти. У випрямному діоді малої потужності тепло розсіюється безпосередньо корпусом. У випрямних діодів середньої потужності тепло відводиться масивним гвинтом, за допомогою якого діод прикріплюється до радіатора. З метою запобігання електричного контакту між діодом і корпусом застосовуються різноманітні ізоляційні прокладки, а також шайби з високою теплопровідністю. Для силових діодів потрібне примусове повітряне або охолодження, яке здійснюється спеціальними радіаторами.

Згадані діоди здатні випрямляти змінний струм порівняно невисокої напруги (до 500-700В). З метою випрямлення більш високої напруги використовують послідовне з'єднання діодів в спеціальних випрямляючих

стовпах та блоках, що виготовляються в уніфікованих корпусах і мають елемент позначення - літеру Ц.

ВАХ кремнієвих та германієвих діодів відрізняються одна від одної (рис. 1.1). Оскільки ширина ЗЗ у кремнію більша, ніж у германію, то зворотний струм германієвого діода більший, ніж кремнієвого, при однаковій конструкції і потужності. В зв'язку з більшим $I_{зс}$ у германієвих діодів більш ймовірний пробій у кремнієвих – лавинний [1, 4].

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.

Струм насичення і струм генерації діодів істотно залежать від температури навколишнього середовища. Для струму насичення справедлива при температурі T рівність

$$I_s(T) = I_s(T_0)e^{(T-T_0)}, \quad (1.2)$$

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

При зростанні температури на 10°C зворотний струм германієвих діодів зростає в 2 рази, а кремнієвих – в 2,5 рази. Для збереження працездатності германієвого діода його температура не повинна перевищувати $+85^\circ\text{C}$. Кремнієві діоди можуть працювати при температурі до $+150^\circ\text{C}$. 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, що пояснюється тим, що в кремнію з підвищенням температури зростає теплове розсіювання носіїв, зменшується довжина їх вільного пробігу.

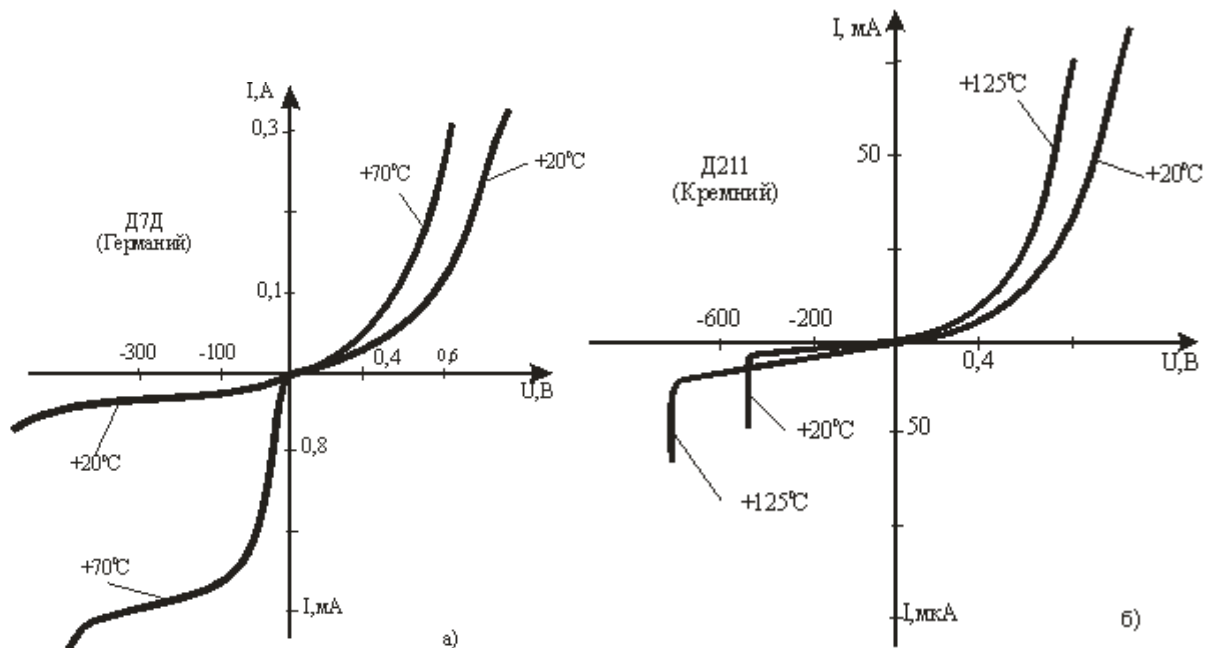


Рис.1.1. ВАХ випрямляючих діодів. Адаптовано із роботи [5]

1.3 Діоди універсального призначення

Діоди універсального призначення – це високочастотні одноперехідні напівпровідникові прилади, які використовують для випрямлення, модуляції, детектування та інших нелінійних перетворювань електричних сигналів з частотою вище 10^3 МГц.

У ряді потужних перетворювальних установок вимоги до середнього значення прямого струму, зворотної напруги перевищують номінальне значення параметрів існуючих діодів. У цих випадках завдання вирішується паралельним або послідовним з'єднанням діодів. Паралельне з'єднання діодів застосовують у тому випадку, коли потрібно отримати прямий струм, більший граничного струму одного діода. Але якщо діоди одного типу просто з'єднати паралельно, то внаслідок неспівпадання прямих гілок ВАХ вони виявляться різному навантаженими і, в деяких прямих струм буде більше граничного. Для вирівнювання струмів використовують діоди з малим розходженням прямих гілок ВАХ або послідовно з діодами включають зрівняльні резистори з опором

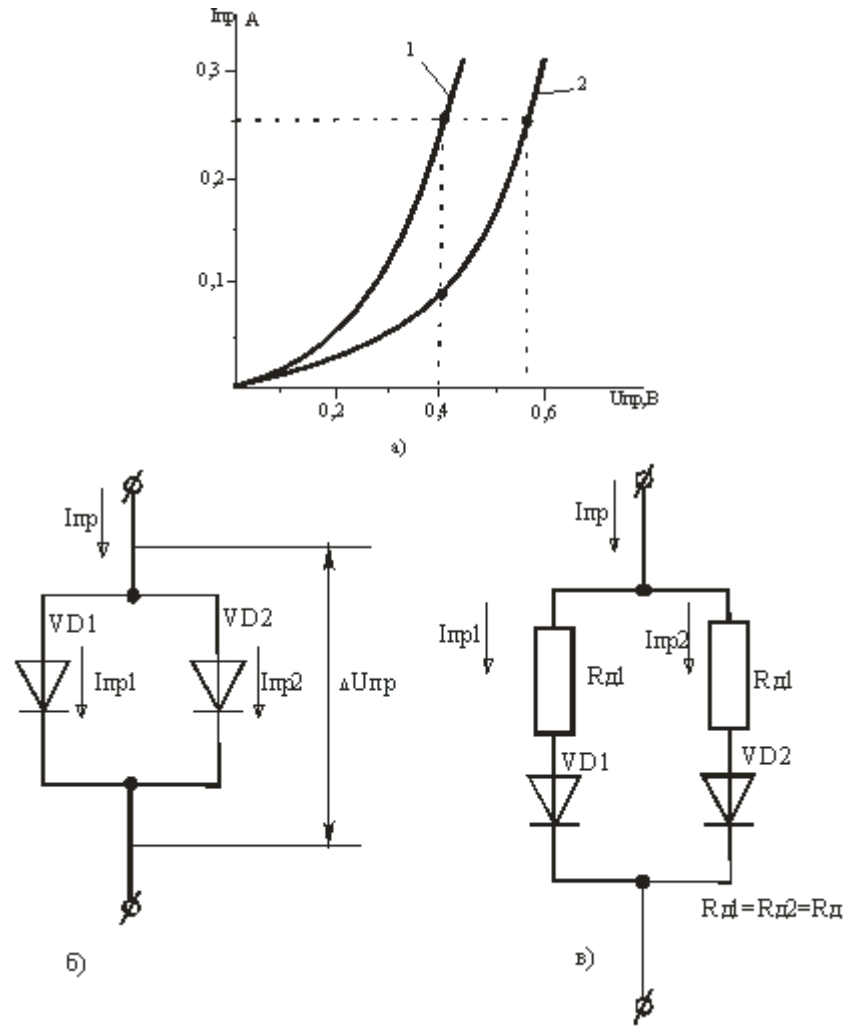


Рис.1.2. Паралельне з'єднання випрямних діодів. Із роботи [6]

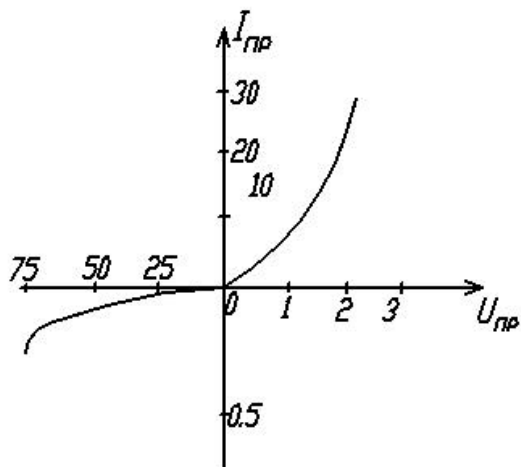


Рис.1.3. ВАХ універсального діода. Із роботи [6]

в одиниці Ом. Іноді включають додаткові резистори (рис. 1.2, в) з опором, у кілька разів більшим, ніж пряме опір діодів, для того щоб струм у кожному діоді визначався головним чином опором R_d , тобто $R_d \gg R_{пр\text{ вл}}$.

Вольт-амперна характеристика універсального діода (рис.1.3) не має ділянки насичення на зворотній вітці. Це пояснюється, зокрема, нагріванням внаслідок незадовільного відводу тепла і ударною іонізацією, що викликається неоднорідністю електричного поля у переході. До параметрів універсальних діодів відносять ємність діодів при заданій зворотній напрузі, а також діапазон робочих частот і температур [6].

1.4 Імпульсні діоди і перехідні процеси в них

Імпульсні діоди використовують як ключові елементи в електронних системах імпульсної техніки. Ці діоди повинні мати мінімальну тривалість перехідних процесів у момент вмикання та вимикання. Перехідні процеси у діодах існують завжди і особливо виявляються при роботі з імпульсами малої тривалості або миттєвими перепадами напруг і струмів. Вони пов'язані з процесами накопичення та розсмоктування носіїв у базі діода. 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 [7].

Досить ефективним шляхом збільшення швидкодії імпульсних діодів є використання в них бар'єрів Шотткі. Як відомо, в таких діодах зовсім відсутня інжекція. Основні спеціальні параметри імпульсних діодів: імпульсна пряма напруга U_{np} 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 [7, 8]. Більшість імпульсних діодів має металево-скляне або скляне конструктивне оформлення.

1.5 Тунельні і обернені діоди

Тунельні діоди – діоди, які мають на прямій вітці своєї вольт-амперної характеристики ділянку з негативним диференціальним опором внаслідок тунельного ефекту, тобто у тунельному проникненні електрона через p - n -перехід, коли електрон з ВЗ однієї області прямо потрапляє до ЗП іншої області. Це стає можливим, якщо товщина переходу дуже мала (менша 150 \AA) і якщо енергетичним рівням, заповненим електронами в одній області, відповідають такі ж вільні дозволені рівні в сусідній області. Ці умови в p - n -переходах з НП, які мають високу концентрацію домішок ($10^{19} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$). Товщина p - n -переходів в цьому випадку має порядок 10^{-6} см , що зумовлює високу напруженість електричного поля переходу і забезпечує ймовірність тунельного ефекту. В таких НП атоми домішок внаслідок малої відстані взаємодіють між собою, і їх рівні розщеплюються в зони, які прилягають в НП p -типу до ВЗ, а в НП n -типу до ЗП. Такі напівпровідники називаються виродженими, оскільки в них рівні Фермі розташовані в ЗП n -області і в ВЗ p -області [9]. Вигляд ВАХ тунельного діода можна пояснити за допомогою електричних діаграм (рис.1.4). На діаграмах рівні ВЗ та ЗП напівпровідників, що заповнені електронами, заштриховані.

При зовнішній напрузі $U = 0$ рівень Фермі всієї системи однаковий ($W_{\phi_n} = W_{\phi_p}$). Напроти зайнятих електронами рівнів p -області розміщуються зайняті рівні n -області. Тунельний перехід електронів неможливий, струм дорівнює нулю. Під дією прямої U_{np} рівні Фермі зміщуються на величину $W = qU_{np}$, і напроти частини енергетичних рівнів, зайнятих електронами в n -області (подвійна штриховка), опиняться вільні рівні в p -області [9].

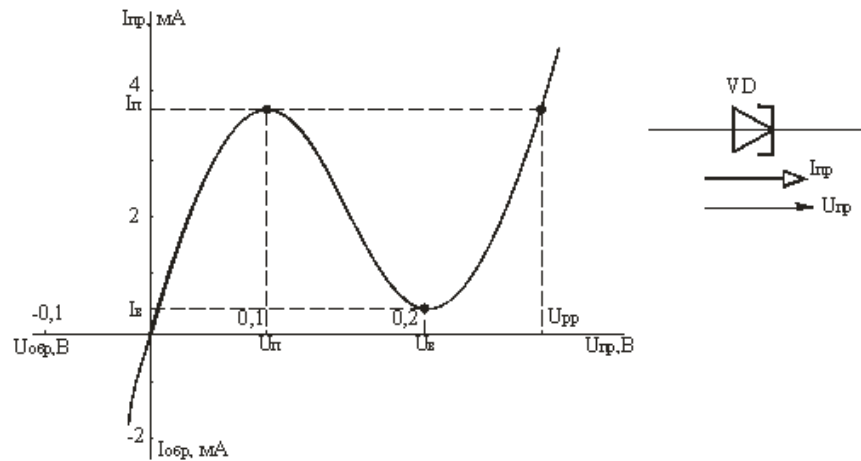


Рис.1.4. ВАХ та умовне позначення тунельного діода. Адаптовано із роботи [9]

Внаслідок цього відбувається тунельний перехід електронів з n - області до p - області і протікає прямий тунельний струм, величина якого пропорційна площі перекриття вільних енергетичних рівнів ВЗ p -області і заповнених енергетичних рівнів ЗП n -області. Тунельний струм зростатиме до тих пір, поки перекриття не стане максимальним. Подальше зростання прямої напруги зменшує площу перекриття відповідних рівнів, і тунельний струм зменшується. При певній прямій напрузі зайняті електронами енергетичні рівні ЗП n - області стануть напроти енергетичних рівнів ЗЗ p -області. Тунельний перехід електронів в цьому випадку стане неможливим, і тунельний струм припиниться. У той же час при прямих напругах в діоді відбувається інжекція носіїв, що зумовлює протікання через нього дифузійного струму, який при напрузі $U > U_s$ стає більшим, ніж тунельний струм. Якщо діод включити в зворотному напрямі, то рівні Фермі зміщуються так, як показано на рисунку 1.7 ж, і з'являється можливість тунельного переходу електронів із заповнених рівнів ВЗ p - області на вільні рівні ЗП n -області. Це приводить до протікання через діод великого зворотного тунельного струму.

p - n - переходи тунельних діодів одержуються здебільшого способом сплавлення з германію, арсеніду галію та антимоніду галію. Оскільки для виготовлення таких діодів використовуються вироджені НП, які за характером

провідності наближаються до металів, то робоча температура приладів досягає 400°C . Недоліком тунельних діодів є мала потужність з причини низьких робочих напруг (десяті частки вольт) і малих площ переходу. За своїх призначенням тунельні діоди діляться на підсилювальні (третій елемент позначення – 1), генераторні (2), перемикальні (3).

На основі тунельних діодів створюють підсилювачі, генератори, змішувачі у діапазоні хвиль аж до міліметрових. На тунельних діодах створюють і різноманітні імпульсні пристрої: тригери, мультивібратори з дуже малим часом переключення.

Частковим випадком тунельних діодів є обернені діоди, у яких внаслідок тунельного ефекту провідність при зворотних напругах значно більша, ніж при прямих. *P-n*- переходи обернених діодів створюються напівпровідниками, що мають дещо меншу концентрацію домішок, і тому їх рівні Фермі збігаються з краями ЗП і ВЗ (рис.1.5,а). 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.

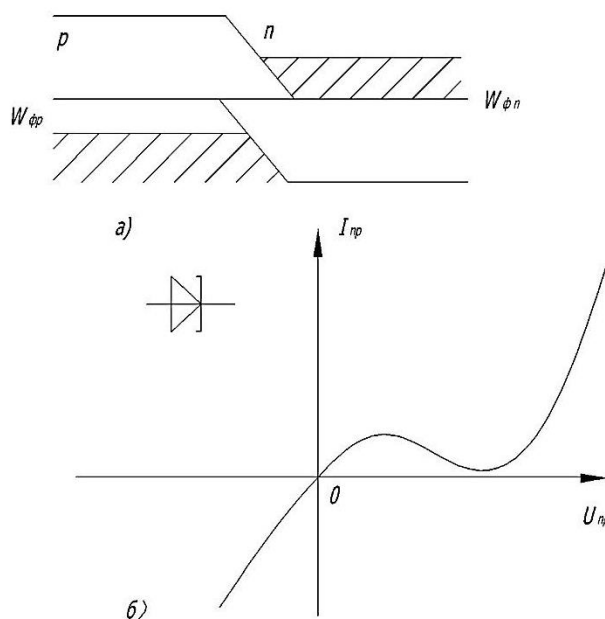


Рис.1.8. Енергетична діаграма (а) та ВАХ (б) оберненого діода.

Адаптовано із роботи [9]

При прямому включенні діодів перекриття зон не здійснюється, тунельний ефект не відбувається, і прямий струм визначається лише дифузійним струмом. ВАХ оберненого діода показана на рисунку 1.5,б. Саме її форма дала назву даним діодам.

Мала інерційність внаслідок тунельного ефекту і велика крутизна характеристики зумовлюють використання обернених діодів в детекторах і змішувачах діапазону надвисоких частот.

1.6 Діоди Шотткі

У зв'язку зі швидким розвитком технології інтегрованих мікросхем створено діоди Шотткі з практично ідеальними характеристиками. Проте раніше в інтегрованих мікросхемах застосування ДШ стримувалось. Це було пов'язано з тим, що за зворотного зміщення в діодах виникали значні струми просочування, а напруга пробою була менша, ніж напруга р-п-переходів. Ці проблеми спричиняли крайові ефекти (рис. 1.6, а), які виникали по периметру металевого контакту в конструкції діода. Щоб уникнути крайового ефекту, були розроблені конструкції ДШ з розширеною металізацією, яка перекривала ізолювальний діелектричний шар SiO_2 на деяку відстань від контакту з напівпровідником [4, 8].

Подальше удосконалення конструкцій ДШ привело до створення навколо контакту метал-напівпровідник захисного кільця р- типу (рис. 1.6, б). Напруга пробою збільшилась від 5 до 27 В, її збільшенню слугують конструкції з використанням захисного кільця і додаткового електрода (рис. 1.6, в), на який подають негативну напругу. В таких структурах напруга пробою близька до напруги пробою р-п-переходу. Були розроблені ДШ із захисним кільцем і трьома бар'єрами, ДШ із двома захисними кільцями та ін. Основними недоліками розглянутих конструкцій слід вважати зменшення швидкості

перемикання ДШ, спричинене інжекцією неосновних носіїв заряду із р- кільця, збільшення ємності діода, ускладнення технологічних процесів.

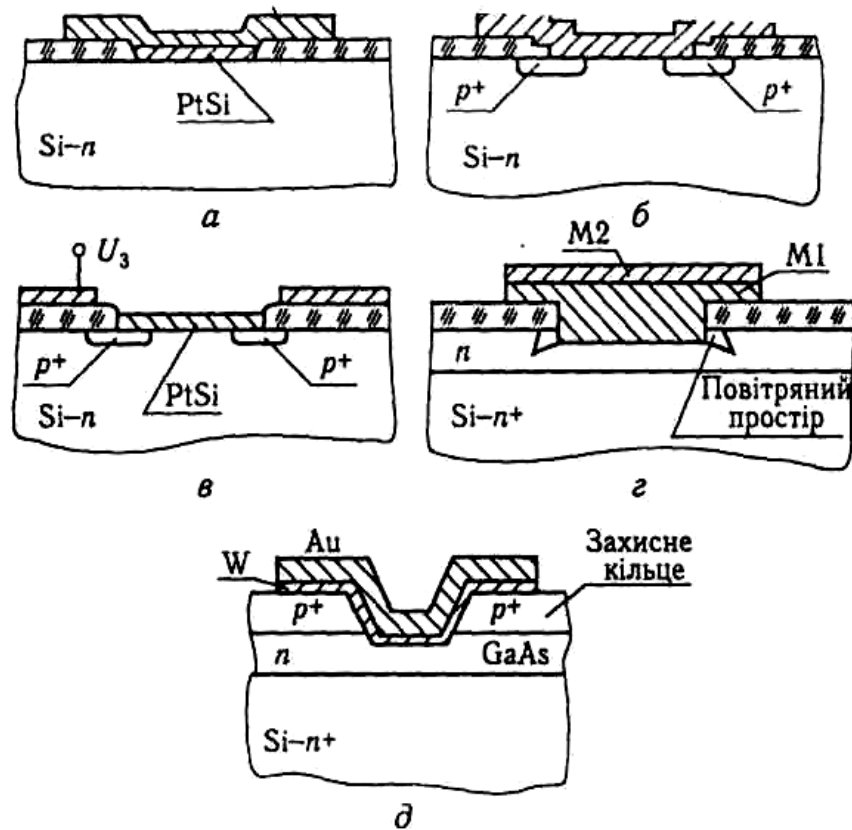


Рис.1.6. Структури діодів Шотткі. Адаптовано із роботи [1]

Структура ДШ, зображена на рис. 1.6, г, не має перелічених недоліків. Контакт металу з напівпровідником здійснюється в спеціальному заглибленні в шарі n-типу. Для таких конструкцій діодів висота потенціального бар'єра $U_{\text{мн}}$ зменшується, зменшується бар'єрна ємність $C_{\text{ш}}$ і опір $r_{\text{с}}$. Коефіцієнт не ідеальності наближається до одиниці. 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. Діоди Шотткі формуються на основі GaAs [1, 13, 14].

Призначення і застосування напівпровідникових діодів в сучасній техніці дуже різноманітно і залежить від виду конкретного діода. Діодами називають двохелектродні елементи електричного кола, що володіють односторонньою провідністю струму. У напівпровідникових діодах одностороння провідність обумовлюється застосуванням напівпровідникової структури, що поєднує в собі два шари, один з яких володіє дірковою (p), а інший - електронної (n) електропровідністю.

При використанні напівпровідникових приладів в електронних пристроях для уніфікації їхнього позначення і стандартизації параметрів використовуються системи умовних позначень. Ця система класифікує напівпровідникові прилади за їх призначенням, основними фізичними та електричними параметрами, конструктивно-технологічними властивостями, видах напівпровідникових матеріалів. Система умовних позначень вітчизняних напівпровідникових приладів базується на державних і галузевих стандартах.

Основні терміни, визначення та літерного позначення основних і довідкових параметрів напівпровідникових приладів наведені в стандарті ДСТУ [1, 4, 9]:

25529-82 - Діоди напівпровідникові. Терміни, визначення і літерні позначення параметрів;

19095-73 - Транзистори польові. Терміни, визначення і літерні позначення параметрів;

20003-74 - Транзистори біполярні. Терміни, визначення і літерні позначення параметрів;

20332-84 - Тиристори. Терміни, визначення і літерні позначення параметрів.

Розділ 2. ОСОБЛИВІСТЬ РОБОТИ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДІОДІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

2.1. Випрямні діоди

Випрямним діодом називається напівпровідниковий діод, призначений для перетворення змінного струму в постійний в силових ланцюгах, тобто в джерелах живлення. Випрямні діоди завжди площинні, вони можуть бути германієві або кремнієві. Германієві діоди краще кремнієвих тим, що мають менше пряме падіння напруги. Кремнієві діоди перевершують германієві по діапазону робочих температур, по максимально допустимому зворотному напрузі, а також мають менший зворотний струм. Якщо випрямлений струм більше максимально допустимого прямого струму діода, то в цьому випадку допускається паралельне включення діодів.

Додаткові опору R_d величиною від одиниць до десятків Ом включаються з метою вирівнювання струмів в кожній з гілок. Якщо напруга в ланцюзі перевершує максимально допустимий зворотна напруга діода, то в цьому випадку допускається послідовне включення діодів. Шунтуючі опору величиною 100 кОм включають для вирівнювання падіння напруги на кожному з діодів [5, 8, 9, 13].

Включення випрямних діодів в схемах випрямлячів. Діоди в схемах випрямлячів включаються по одно-і двохполуперіодній схемами. Якщо взяти один діод, то струм в навантаженні буде протікати за одну половину періоду, тому такий випрямляч називається однополуперіодним. Його недолік - малий ККД. Протягом позитивного напівперіоду напруги U_a (+) діоди VD1 і VD4 відкриті, а VD2 і VD3 - закриті. Струм буде протікати по шляху: верхня гілка (+), діод VD1, навантаження, діод VD4, нижня гілка (-). Протягом негативного напівперіоду напруги U_a діоди VD1 і VD4 закриваються, а діоди VD2 і VD3 відкриваються. Струм буде протікати від (+), нижня гілка, діод VD3, навантаження, діод VD2, верхня гілка (-). Тому струм через

навантаження буде протікати в одному і тому ж напрямку за обидва напівперіоду. Схема випрямляча називається двохополоперіодній. Якщо понижуючий трансформатор має середню точку, тобто висновок від середини вторинної обмотки, то двухполоперіодній випрямляч може бути виконаний на двох діодах.

2.2. Стабілітрони, варикапи, світлодіоди та фотодіоди

Стабілітрон – це напівпровідниковий діод, призначений для стабілізації рівня постійної напруги. Класифікують площинні та кремнієві стабілітрони. Принцип дії стабілітрона заснований на тому, що на його вольтамперной характеристиці є ділянка, на якому напруга практично не залежить від величини протікаючого струму [6, 9].

Такою ділянкою є ділянка електричного пробою, за рахунок легуючих добавок у напівпровідник струм електричного пробою може змінюватися в широкому діапазоні, не переходячи в тепловий пробій. Оскільки ділянка електричного пробою - це зворотна напруга, то стабілітрон включається зворотним включенням. При зменшенні вхідної напруги струм через стабілітрон і падіння напруги на R_0 може зменшуватися, а напруги на стабілітроні і на навантаженні залишаться постійними, виходячи з вольтамперной характеристики. При збільшенні вхідної напруги струм через стабілітрон і U_{R0} збільшується, а напруга на навантаженні все одно залишається постійним і рівним напрузі стабілізації.

Світловипромінювальний діод (СД) – це напівпровідниковий пристрій, який випромінює некогерентне світло при пропусканні через нього електричного струму (ефект, відомий як електролюмінесценція). Випромінюване світло традиційних світлодіодів лежить у вузькій ділянці спектру, а його колір залежить від хімічного складу використаного у світлодіоді напівпровідника. Світлодіоди – це малоінерційні напівпровідникові джерела випромінювання, які працюють при прямій напрузі [10, 13].

Матеріали для світлодіодів повинні мати ширину забороненої зони більше 1,7 еВ [11]. Для сучасних світлодіодів застосовують наступні матеріали: фосфід галія GaP та карбід кремнію SiC, а також тверді розчини - GaAlAs, GaAsP. Внесення в напівпровідник фосфору дозволяє одержувати світіння різних кольорів. Крім світлодіодів, які дають видиме світіння, випускаються світлодіоди інфрачервоного випромінювання (ІЧВ) із арсеніду галія GaAs. Їх застосовують у фотореле, різноманітних сенсорах, вони входять до складу оптронів. Існують світлодіоди змінного кольору з двома світловипромінювальними переходами, один із яких має максимум спектральної характеристики в червоній частині спектра, а друга - в зеленій. Колір світіння такого світлодіода залежить від співвідношення струмів через переходи [12, 15].

Фотодіод – це приймач оптичного випромінювання, який перетворює світловий сигнал в електричний, вольт-амперна характеристика якого залежить від освітленості. Працює в фотогальванічному і фотодіодному режимах. Коли фотон потрапляє на фотодіод, то в фотодіоді відбувається внутрішній фотоефект: фотон збуджує електрон з матеріалу діода, таким чином створюючи пару носіїв заряду: вільний електрон і позитивно заряджену дірку. Якщо поглинання відбувається в області збіднення напівпровідника, ці нові носії виносяться з області її власним електричним полем. Завдяки цьому дірки рухаються до анода, а електрони до катода, і виникає фотострум. Струм фотодіода як діода визначається струмом неосновних носіїв (дрейфовий струм) [13].

Розділ 3. МЕТОДИКА ТА ТЕХНІКА ВИМІРЮВАНЬ

Вимірювання вольт-амперних характеристик діода Шотткі було проведено з використанням лабораторного стенду кафедри електроніки, загальної та прикладної фізики.

Для дослідження було використано діоди типу КД2997В та КД202В при прямому та зворотньому включенні, вольтметр М903, амперметр Ц4313. Вимірювання проводились при температурі $+25^{\circ}\text{C}$. Схема складається з таких елементів: потенціометр, який необхідний для зміни напруги на діоді, амперметри для вимірювання прямого та зворотнього струмів, вольтметр.

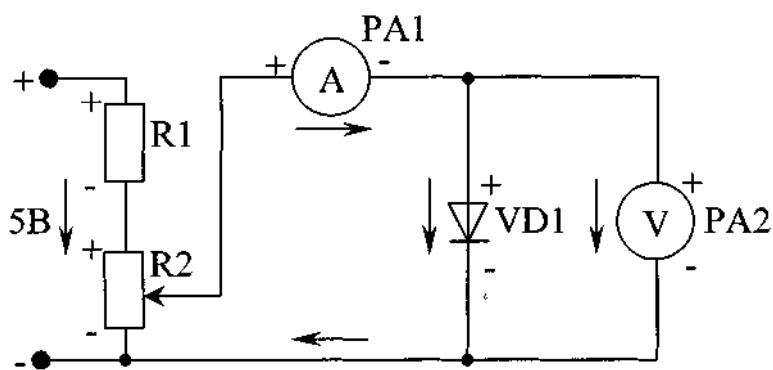


Рис.3.1. Схема прямого ввімкнення діода

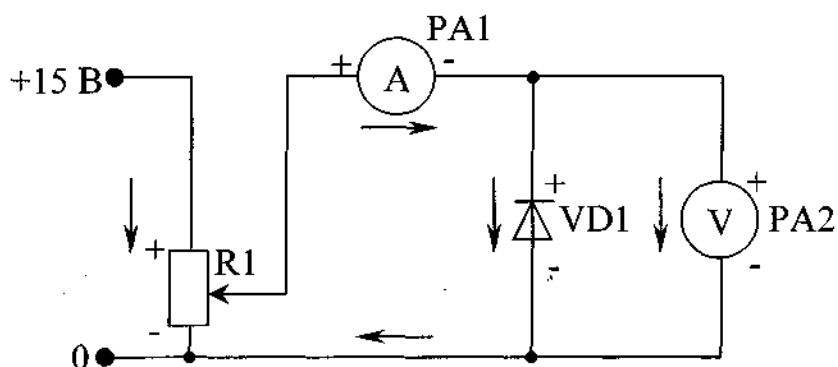


Рис.3.2. Схема зворотнього ввімкнення діода

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 ввімкненні анод подається від'ємний потенціал напруги 15В, так як опір діода при такому ввімкненні набагато більший, ніж при прямому. Показання вольтметра та амперметра знімають по аналогії з попередньою схемою.

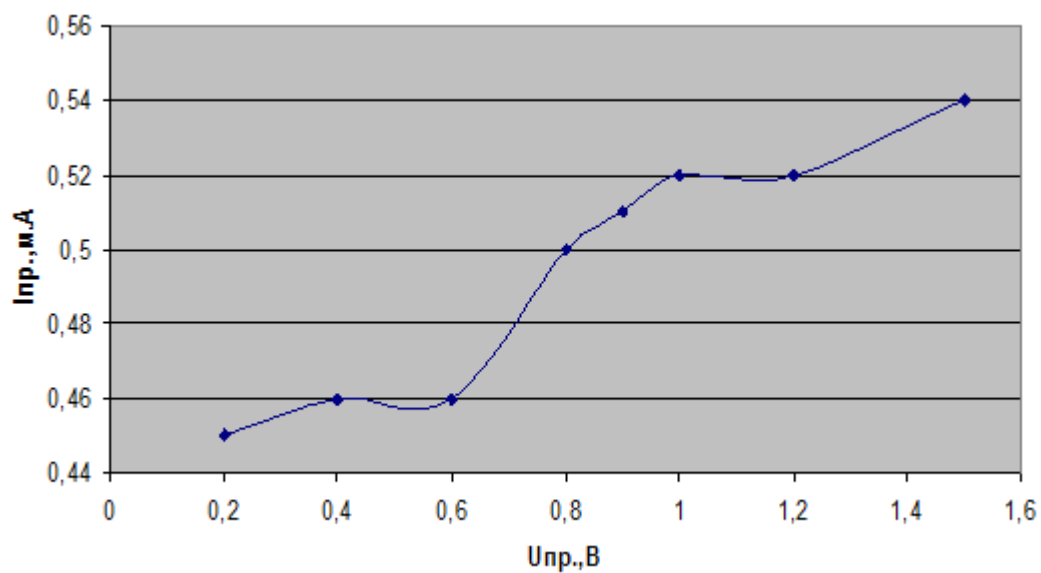
У таблиці 3.1 наведені результати експериментальних вимірювань.

Таблиця 3.1. Результати вимірювань

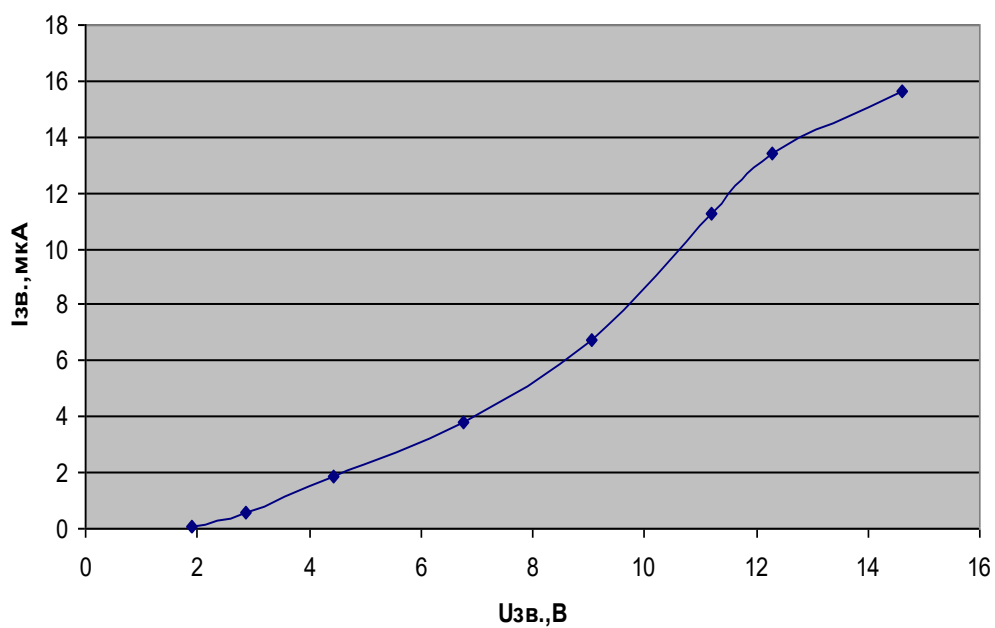
Пряме ввімкнення							
$U_{пр}, В$	0,55	0,54	0,52	0,52	0,51	0,5	0,47
$I_{пр}, МА$	1,5	1,2	1	0,9	0,8	0,8	0,6
$R_{пр}, Ом$	0,36	0,36	0,43	0,52	0,56	0,625	0,58
Зворотнє ввімкнення							
$U_{зв}, В$	15,63	13,44	11,25	9,06	6,76	4,43	3,78
$I_{зв}, МА$	14,6	12,3	11,2	11	10,3	9,06	6,76
$R_{зв}, Ом$	1,07	1,09	1,04	0,82	0,65	0,48	0,55

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 зворотньому напрямі – висота потенціального бар'єру зростає, відповідно збільшиться область просторового заряду. Через контакт проходитиме лише зворотній струм термічно збуджених електронів металу в прискорювальному полі контактного шару.



а



б

Рис.3.3. Вольт-амперна характеристика діоду Шотткі типу КД2997Б:
 а - при прямому ввімкненні; б - при зворотньому ввімкненні

ВИСНОВКИ

1. У ході виконання кваліфікаційної роботи бакалавра розглянуті основні типи, конструкції, складові та характеристики випромінювачів, докладно розглянуті світлодіодні випромінювачі, їх спектральні характеристики, електричні та ергономічні параметри, можливості синтезу складної спектральної характеристики шляхом використання декількох компонентів.

2. Розглянуті конструктивно-технологічні та фізичні особливості напівпровідникових діодів різного функціонального призначення: випрямних, імпульсних, високочастотних і надвисокочастотних діодів, діодів Шоттки, стабілітронів, варикапів, світло випромінюючих та фотодіодів.

3. Показано, що напівпровідниковий діод – це напівпровідниковий прилад з одним випрямним електричним переходом і двома зовнішніми виводами, в якому сила зворотного струму практично змінюється при зміні напруги. Напівпровідниковий діод має переваги перед електронними двоелектродними лампами: економія енергії для одержання носіїв струму, мініатюрність, висока надійність і тривалий ресурс роботи. Недоліками діодів є погіршення їх роботи з підвищенням температури і вологості.

4. Проведені вимірювання вольт-амперних характеристик діодів Шоттки показують, що при зростанні робочої напруги: від 0 до 1,6 В (пряма напруга) струм діода змінюється від 0,45 до 0,55 мА; від 0 до 15 В (зворотна напруга) – від 0 до 16 мкА, що є характерним для діодів такого типу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Прищепа М.М., Погребняк В.П. Мікроелектроніка. -Частина 1. Елементи мікроелектроніки - Київ: Вища школа, 2004. - 432 с.
2. Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В. Електроніка і мікросхемотехніка. - Т.1. Елементна база електронних пристроїв. - Київ: Обереги, 2000. - 300 с.
3. Стахів П.Г., Коруд В.І., Гамола О.Є. Основи електро-ніки:функціональні елементи та їх застосування. - Львів: Новий світ, 2003. - 128 с.
4. Якименко Ю.І. Мікропроцесорна техніка: Підручник. – К.: ІВЦ Політехніка-Кондор, 2004. – 235 с.
5. Омельчук В.В., Гладич І.К. Електроніка та мікросхемотехніка: Навч. посібник. – Житомир: ЖРІВЕ, 2004. – 356 с.
6. Крилик Л.В., Селецька О.О. Матеріали електронної техніки: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 120 с.
7. Матеріали і компоненти функціональної електроніки: навчальний посібник (електронне видання) / Л.В. Однорець, І.М. Пазуха. – Суми: Сумський державний університет, 2020. – 196 с.
8. Матвієнко М.П. Основи електроніки: підручник. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2017. – 364 с.
9. Матвійків М.Д., Когут В.М., Матвійків О.В. Елементна база електронних апаратів. – Львів: Вид-во НТУ «Львівська політехніка», 2018. – 428 с.
10. 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.
11. Kathleen M. Vaeth. OLED-Display Technology // Information Display, № 6. – 2003. – P. 12 – 17.
12. Gu Xu. Fighting OLED Degradation // Information Display, № 6, 2003. – P. 18- 21.

13. Шликов В.В. Мікропроцесорна техніка: Практикум [Електронний ресурс / В.В. Шликов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,1 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 144 с.
14. Трунов О. М. Датчики та сенсори робототехнічних систем. – 2020. – Миколаїв: ЧНУ. – 39 с.
15. Гончаренко О.М., Баранов О.О., Костян М.О., Лободюк О.С., Однодворець 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.