

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

Кафедра електроніки,  
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота бакалавра

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
P-N-ПЕРЕХОДУ ЗАСОБАМИ МОДЕЛЮВАННЯ В LabVIEW**

Студент гр. ЕП-61

М.Ю. Суровицький

Науковий керівник,  
к.ф.-м.н., старший викладач

А.М. Вітренко

Завідувач кафедри ЕЗПФ,  
д.ф.-м.н., професор

І.Ю. Проценко



## РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи бакалавра – розробити віртуальний стенд для дослідження засобами моделювання вольт-амперної характеристики *p-n*-переходу.

В якості математичної моделі використовується аналітичний вираз для величини струму через ідеалізований *p-n*-перехід, який називається рівнянням Шоклі. Віртуальний стенд для дослідження вольт-амперної характеристики *p-n*-переходу створюється в середовище LabVIEW.

Побудовано вольт-амперну характеристику *p-n*-переходу: 1) у найпростішому випадку безрозмірних величин сили струму та напруги; 2) при абсолютній температурі 300 К та зворотному струму насичення в 1 мкА.

Робота викладена на 26 сторінках, зокрема містить 11 рисунків, список цитованої літератури із 11 джерел.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ВОЛЬТ-АМПЕРНА ХАРАКТЕРИСТИКА, *P-N*-ПЕРЕХІД, РІВНЯННЯ ШОКЛІ, LABVIEW, ВІРТУАЛЬНИЙ СТЕНД.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	5
<b>РОЗДІЛ 1. НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ ТА ПРИЛАДИ</b> .....	6
1.1. Поняття електроніки та її напрямки.....	6
1.2. Напівпровідникові матеріали .....	7
1.3. Властивості <i>p-n</i> -переходу та його вольт-амперна характеристика.....	9
1.4. Методи вимірювання вольт-амперних характеристик напівпровідникових приладів .....	15
<b>РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДІОДА. МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ. РОЗРОБКА ВІРТУАЛЬНОГО СТЕНДА</b> .....	19
2.1. Математична модель діода. Методика моделювання.....	19
2.2. Розробка віртуального стенда.....	20
2.3. Вдосконалення віртуального стенда.....	21
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	24
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	25

## ВСТУП

Найважливіші електронні прилади, які використовуються в даний час, створені з напівпровідникових матеріалів [1]. Це діоди, транзистори, тиристори, термістори, фотогальванічні елементи, фототранзистори, фоторезистори, лазери й інтегральні схеми. Діоди найбільш широко використовуються в схемах для перетворення змінної напруги в постійну (наприклад, в джерелах живлення постійного струму). Вони також застосовуються в схемах множення, зсуву, обмеження і регулювання напруги.

На сьогоднішній день напівпровідникові прилади отримали широке розповсюдження і використовуються майже у всіх галузях техніки [2]. Якість, ціна та надійність роботи напівпровідникових приладів залежать від технологічного процесу їх виготовлення. Одним з найбільш важливих етапів при цьому являється контроль якості, який полягає у вимірюванні вольт-амперної характеристики кожного напівпровідникового приладу на відповідність технічним умовам.

Вольт-амперна характеристика – залежність струму, що протікає через прилад, від напруги на цьому приладі. Виражається графічно, може бути лінійною і нелінійною. В залежності від цього прилади поділяються на лінійні і нелінійні [3].

Мета роботи – розробити в LabVIEW віртуальний стенд для дослідження засобами моделювання вольт-амперної характеристики *p-n*-переходу.

Для моделювання використовується функціональна залежність сили струму  $I$  через *p-n*-перехід від прикладеної напруги  $U$ .

## РОЗДІЛ 1. НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ ТА ПРИЛАДИ

### 1.1. Поняття електроніки та її напрямки

Електроніка – це область науки і техніки, яка вивчає [4,5]:

- 1) фізичні явища в приладах, принцип дії яких оснований на зміні концентрації та переміщені заряджених часток у вакуумі, газі та твердих тілах;
- 2) електричні параметри і характеристики, властивості названих видів приладів, а також режими роботи електричних кіл, які включають такі прилади;
- 3) властивості комплексних електронних систем.

Перший напрямок називається фізичною електронікою, а другий і третій – прикладною. Прикладна електроніка поділяється на:

- радіоелектроніку, яка обслуговує усі види зв'язку (радіомовлення, телебачення, радіолокацію, радіоуправління та ін.);
- промислову електроніку, яка обслуговує різні види техніки електронними пристроями вимірювання, контролю, керування, регулювання та захисту, а також електронні системи перетворення струму;
- ядерну електроніку, яка пов'язана з процесами отримання, вивчення та використання елементарних часток;
- біологічну електроніку, яка обслуговує електронними пристроями біологічні дослідження, в тому числі медичні (медична електроніка);
- оптоелектроніку – новий напрямок в науці і техніці, який поєднує в собі можливості оптики і електроніки;
- комп'ютерну електроніку і т. п.

У наш час прогрес майже в усіх галузях науки і техніки зумовлений досягненнями електроніки (особливо мікроелектроніки) і її використанням у цих галузях. Тому знання основ електроніки необхідні інженерові будь-якого фаху і особливо з фахів «Електронні інформаційні системи».

Широке використання електроніки в різних галузях науки і техніки зумовлене такими властивостями електронних пристроїв [4]:

- 1) висока чутливість (низькій поріг входних величин, при якому електронний пристрій починає працювати);
- 2) велика швидкодія електронних пристроїв;
- 3) універсальність (в електричну енергію, на зміні якої основана дія всіх видів електронних приладів, відносно легко перетворюються інші види енергії: механічна, теплова, акустична, атомна та ін.);
- 4) можливість мініатюризації електронних пристроїв.

Електроніка взаємодіє з багатьма розділами фізики, такими як: електродинаміка, оптика, класична і квантова механіка, фізика твердого тіла – а також з хімією, кристалографією, металургією та тощо. Використання результатів цих галузей знань, з одного боку, ставить перед іншими науками нові завдання, чим забезпечує їх подальший розвиток, а з іншої – створює нові електронні прилади та пристрої і тим самим дає змогу використовувати нові засоби і методи дослідження. Практичне завдання електроніки полягає в розробці електронних приладів і пристроїв, що виконують різні функції в системах управління, обчислювальній техніці, системах перетворення і передачі інформації, енергетичних пристроях тощо [5].

## **1.2. Напівпровідникові матеріали**

Основною причиною вивчення напівпровідників є виробництво напівпровідникових приладів [6]. Напівпровідники – великий клас речовин, що за величиною питомого опору або провідності посідають проміжне місце між провідниками та діелектриками. Характерною рисою напівпровідників є збільшення провідності з підвищенням температури, саме це їх відрізняє від провідників (металів). Причиною температурної залежності є те, що зі зростанням температури тепловий рух руйнує зв'язок електронів у кристалічній решітці, при цьому частина електронів вивільняється і стає носіями заряду. Зв'язок електронів у кристалічній ґратці напівпровідника, окрім теплового руху, можуть розірвати різні зовнішні впливи: світло, сильне електричне поле, потік

швидких частинок тощо. Крім відмінної температурної залежності провідності напівпровідники відрізняються від металів також і вираженою залежністю провідності від концентрації домішок та різноманітного електромагнітного випромінювання. Власне тому напівпровідники характеризуються високою чутливістю електричної провідності до зовнішнього впливу, а також до концентрації домішок і дефектів в кристалічних ґратках, бо зазвичай енергія активації електронів, що знаходяться поблизу дефектів або домішок, набагато менша, ніж в ідеальному кристалі даного напівпровідника.

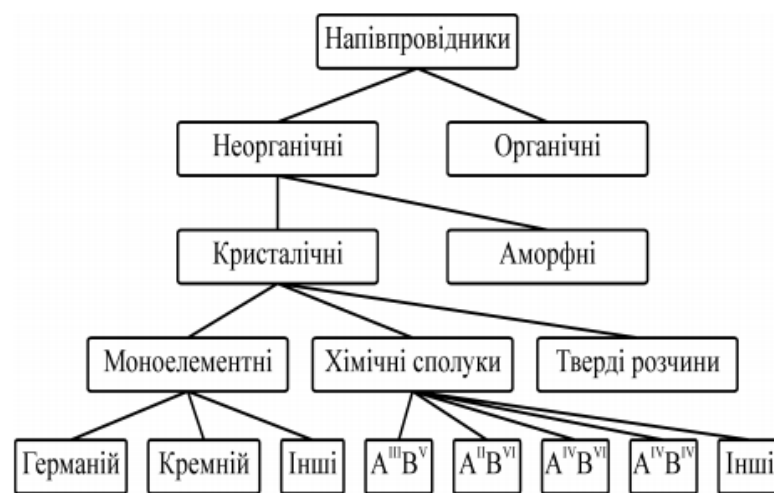


Рисунок 1.1 – Класифікація напівпровідникових матеріалів за складом і властивостям [6]

Можливість у великих межах змінювати електричну провідність напівпровідникових матеріалів електричним та магнітним полем, підвищенням або зниженням температури, внесенням домішок і т.п. є основою їх величезних та усяляких застосувань. За хімічним складом розрізняють неорганічні й органічні напівпровідникові матеріали (рис. 1.1), а за будовою – кристалічні, аморфні та рідинні. Найбільше практичне застосування знаходять неорганічні кристалічні напівпровідники, які у свою чергу розділяються на кілька основних груп (рис. 1.1) [6].



### 1.3. Властивості $p$ - $n$ -переходу та його вольт-амперна характеристика

Електрони у напівпровідників з донорними домішками називаються основними носіями зарядів, а дірки – неосновними. Якщо два напівпровідники з різними типами провідності привести до контакту, то на межі їх поділу буде мати місце різниця концентрації вільних носіїв зарядів одного знаку (рис. 1.2а), тобто  $p_p \gg p_n$  і  $n_n \gg n_p$  [4].

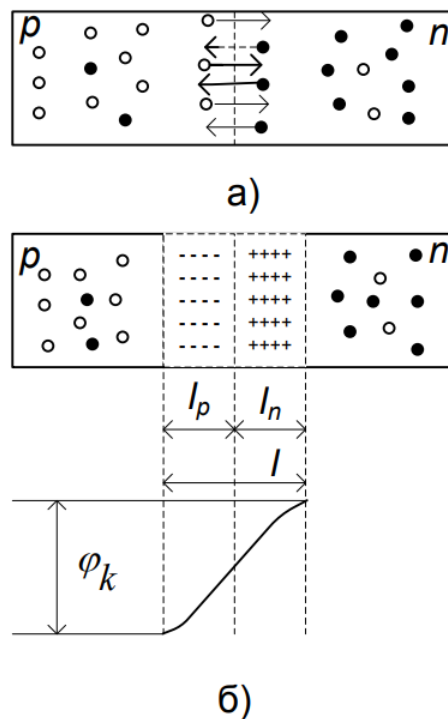


Рисунок 1.2 – Контакт двох напівпровідників з різним типом провідності (а), потенціальний бар'єр в електронно-дірковому переході (б) [4]

За рахунок явища дифузії електрони із області  $n$ , де їх концентрація більша, будуть рухатися в  $p$ -область, де їх концентрація менша, і рекомбінувати з дірками. Дірки із області  $p$ , навпаки, будуть переміщуватися в  $n$ -область і рекомбінувати там з електронами. В наслідку таких рухів на межі поділу напівпровідників в області  $n$  залишаються йони з позитивним зарядом (атоми 5-ти валентних домішок, які втратили електрон), а в  $p$ -області – від'ємно заряджені йони акцепторних домішок, які отримали електрон. Відмітимо, що йони

нерухомі. Отже, в результаті дифузії основних носіїв заряду виникає граничний шар  $l$  (електронно-дірковий,  $p$ - $n$ -перехід), один бік якого заряджений від'ємно (область  $p$ ), а інший – додатно (область  $n$ ). Різниця потенціалів (напруга), створена такими зарядами називається контактною різницею потенціалів або потенціальним бар'єром  $\varphi_k$  (рис.1.2б). Цей бар'єр спричиняє гальмівну дію для основних і пришвидшуючу – для неосновних носіїв зарядів. У разі відсутності зовнішнього електричного поля внутрішнє поле переходу забезпечує рівність потоків носіїв (одного знаку) зарядів в обох напрямках, тобто рівність нулю сумарного струму через  $p$ - $n$  перехід. Електрони, що приходять до  $p$ - $n$  переходу з боку  $n$  області, відштовхуються від'ємними іонами, а дірки  $p$  області – позитивними іонами. Таким чином,  $p$ - $n$ -перехід це область на межі поділу двох напівпровідників з різними типами провідності, яка має відповідної ширини область збіднену рухомими носіями зарядів, володіє потенціальним бар'єром і значним внутрішнім опором [4].

Якщо концентрація домішок в  $p$  і  $n$  областях різна, то  $p$ - $n$  перехід буде більш глибоко проникати в ту область, концентрація домішок в якій менше, тобто  $l_n \neq l_p$ . Значення потенціального бар'єру  $\varphi_k$  визначається співвідношенням концентрації однойменних зарядів з обох боків  $p$ - $n$ -переходу і знаходиться за формулою [4]

$$\varphi_k = \varphi_T \ln \left( \frac{p_p}{p_n} \right) = \varphi_T \ln \left( \frac{n_n}{n_p} \right), \quad (1.1)$$

де  $\varphi_T = KT / q$  – тепловий потенціал;

$K$  – стала Больцмана ( $1,380662 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);

$T$  – температура за шкалою Кельвіна;

$q$  – заряд електрона ( $1,6021892 \cdot 10^{-19}$  Кл).

Якщо  $T = 293$  К (кімнатна температура),  $\varphi_T = 0,026$  еВ.

Потенціальний бар'єр  $\varphi_k$  силіцієвих напівпровідників має величину  $\varphi_{k(Si)} = 0,7 \div 0,8$  еВ, для германієвих –  $\varphi_{k(Ge)} = 0,3 \div 0,4$  еВ, а їх ширина – долі мкм.

Якщо до  $p$ - $n$ -переходу підвести зовнішню напругу, полярність якої направлена назустріч контактній різниці потенціалів  $p$ - $n$ -переходу (рис. 1.3а), то дірки області  $p$ , відштовхуючись від додатного потенціалу зовнішнього джерела, зміщуються до  $p$ - $n$ -переходу [4]. Це приводить до часткової їх рекомбінації з негативними іонами акцепторного домішку і звуження  $p$ - $n$ -переходу з боку області  $p$ . Аналогічно, електрони області  $n$ , зміщуючись під впливом від'ємного полюсу зовнішньої напруги до  $p$ - $n$ -переходу, рекомбінують з додатними іонами донорного домішку, звужуючи  $p$ - $n$ -перехід з боку області  $n$ . Це приводить до зниження потенціального бар'єру  $p$ - $n$ -переходу і збільшення дифузійних переміщень через нього основних носіїв зарядів. У даному випадку через  $p$ - $n$ -перехід та у зовнішньому колі протікає електричний струм, який називається прямим струмом  $I_{\text{пр}}$   $p$ - $n$ -переходу, а зовнішня напруга з розглянутою полярністю – прямою напругою  $U_{\text{пр}}$ . Значення потенціального бар'єру  $p$ - $n$ -переходу зменшиться на величину прямої напруг  $\varphi_{p-n} = \varphi_k - U_{\text{пр}}$ . Розглянутий процес називають інжекцією носіїв (зарядів). Інкєкція – це перенесення основних носіїв заряду крізь  $p$ - $n$ -перехід у разі зниження його потенціального бар'єру.

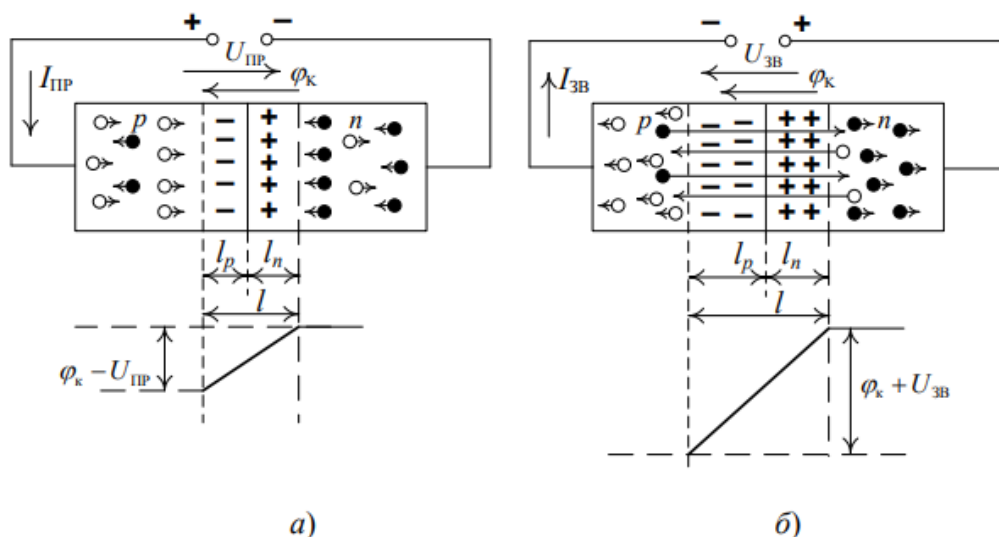


Рисунок 1.3 – Схематичне зображення прямого (а) та зворотного (б) включення  $p$ - $n$ -переходу до зовнішнього джерела живлення [4]

Якщо змінити полярність зовнішнього джерела напруги на протилежну (у даному разі напругу будемо називати зворотною  $U_{зв}$ ), то основні носії зарядів (дірки області  $p$  і електрони області  $n$ ) будуть притягуватись до відповідних полюсів зовнішнього джерела напруги (рис. 1.3б). Це приведе до розширення  $p$ - $n$ -переходу і збільшення його потенціального бар'єру на величину зовнішньої напруги  $\varphi_{p-n} = \varphi_k + U_{зв}$ . Неосновні носії зарядів (електрони області  $p$  і дірки області  $n$ ) будуть відштовхуватись від полюсів зовнішнього джерела напруги і зміщуватися до  $p$ - $n$ -переходу. Поле  $p$ - $n$ -переходу чинить на неосновні носії заряду притягальну дію, а тому вони цим полем (дрейфовим способом) будуть переміщуватись через  $p$ - $n$ -перехід і зумовлювати через нього і у зовнішньому колі струм, який називається зворотним струмом  $I_{зв}$   $p$ - $n$ -переходу [4].

Явище переміщення носіїв заряду через перехід під дією напруги (електричного поля) називається екстракцією. Таким чином, зворотний струм є струмом неосновних носіїв, які, як відомо, в основному виникають під дією температури. Тому зворотний струм ще називають тепловим. Для визначення Величина струму через  $p$ - $n$ -перехід визначається рівнянням [4]

$$I_{p-n} = I_0 \left( e^{\frac{\pm U_{зв}}{\varphi_T}} - 1 \right), \quad (1.2)$$

де  $I_0$  – зворотній струм насичення;

$U_{зв}$  – зовнішня напруга, що прикладена до  $p$ - $n$  переходу;

“+” – відповідає прямій зовнішній напрузі;

“–” – відповідає зворотній зовнішній напрузі;

$\varphi_T$  – тепловий потенціал;

$e = 2,718$  – основа натуральних логарифмів.

Зв'язок між струмом і напругою  $I = f(U)$  називається вольт-амперною характеристикою (ВАХ)  $p$ - $n$ -переходу.

На рис 1.4 приведена ВАХ  $p$ - $n$ -переходу, побудована згідно виразу (1.2). Прямий струм  $p$ - $n$ -переходу утворюють основні носії заряду, а зворотний – неосновні. Через те, що концентрація основних носіїв заряду на декілька порядків перевищує концентрацію неосновних носіїв, прямий струм на декілька порядків більший ніж зворотній. Цим зумовлюється вентильна властивість (одностороння провідність)  $p$ - $n$ -переходу.

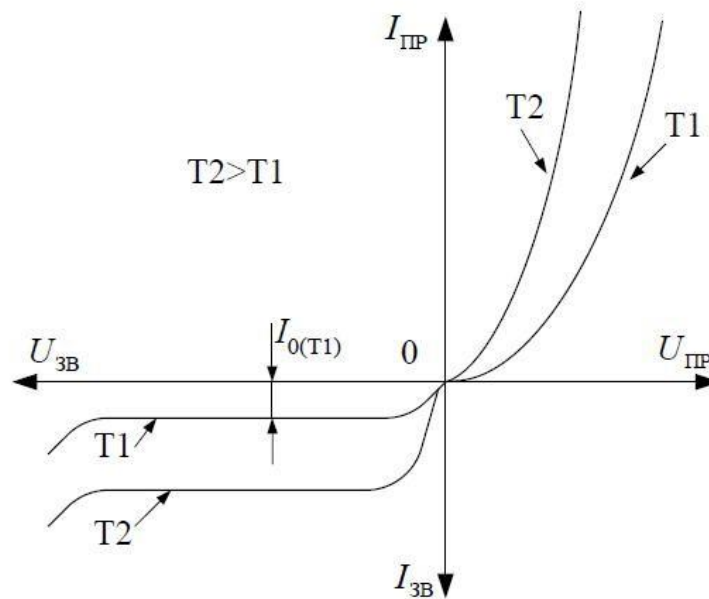


Рисунок 1.4 – Вольт-амперна характеристика  $p$ - $n$ -переходу [4]

При прямих напругах порядку 0,1 В можна знехтувати одиницею у виразі (1.2). Якщо  $U_{пр} = 0,1$  В, то при кімнатній температурі

$$e^{\frac{U_{пр}}{\varphi_T}} = e^{\frac{0,1}{0,025}} \approx 55 \gg 1.$$

При зворотних напругах порядку 0,1 В можна знехтувати доданком  $e^{\frac{U_{зв}}{\varphi_T}}$ , з огляду на те, що для робочого діапазону зворотних струмів  $|\varphi_T| \ll |U_{зв}|$ . Наприклад, якщо  $U_{зв} = 0,1$  В, то

$$e^{\frac{U_{зв}}{\varphi_T}} = e^{\frac{-0,1}{0,025}} \approx 0,018 \ll 1.$$

Отже, для практичних якісних розрахунків приймають:

$$I_{\text{пр}} = I_0 e^{\frac{U}{\Phi_T}} \quad (1.3)$$

$$I_{\text{зв}} = -I_0 \quad (1.4)$$

Прямий і зворотний струми залежать від температури.

За деякої напруги  $U_{\text{зв}} = U_{\text{проб}}$  у реальному переході відбувається пробій. Це явище полягає у різкому збільшенні зворотного струму. Розрізняють електричні (оборотні) пробої – лавинний, тунельний і поверхневий, і неелектричний (необоротний) пробій – тепловий. Останній пробій спричинений явищем самоперегріву НП, є аварійним, виникає при порушенні режиму охолодження та призводить до руйнування переходу (його властивості одnobічної провідності).

Тепловий пробій зумовлюється підвищенням кількості носіїв заряду в  $p$ - $n$ -переході в результаті їх термогенерації, якщо відведення від переходу в навколишній простір в одиницю часу тепла буде меншим ніж його збільшення під дією струму. Це приводить до перегріву  $p$ - $n$ -переходу та його розплавлення. Такий пробій є незворотним [4].

Лавинний пробій утворюється лавинним збільшенням носіїв заряду при ударній йонізації атомів швидкими носіями. Сутність його полягає у тому, що неосновні носії заряду під впливом зворотної напруги пришвидшуються полем  $p$ - $n$ -переходу і при русі у ньому зіштовхуються з атомами кристалічної ґратки напівпровідника. При належній напруженості електричного поля вони мають достатньо енергії для вибивання валентних електронів з атомів германію або силіцію, що призводить до появи додаткових пар носіїв заряду – електронів та дірок. Останні також пришвидшуються і при зіткненні з атомами виникають додаткові носії заряду. Такий процес може відбуватись у відносно широких  $p$ - $n$ -переходах і носить лавинний характер. Збільшення струму переходу (збільшення рухомих зарядів в  $p$ - $n$ -переході) приводить до зменшення його опору, внаслідок

чого напруга на  $p$ - $n$ -переході залишається практично незмінною при зростанні струму. Цей процес буде зворотнім, якщо зростання струму не спричинить накопиченню тепла в  $p$ - $n$ -переході. У разі порушення рівноваги між накопиченням тепла в  $p$ - $n$ -переході і його віддачею в навколишній простір настає тепловий пробій [4].

Тунельний пробій обумовлений явищем безпосереднього відриву валентних електронів від атомів кристалічної решітки в наслідок дії сильного електричного поля. Створені при цьому додаткові електрони та дірки підвищують електричний струм через  $p$ - $n$ -перехід. Тунельний пробій виникає у відносно вузьких  $p$ - $n$ -переходах, в яких при порівняно невеликих напругах має місце висока напруженість електричного поля [4].

#### **1.4. Методи вимірювання вольт-амперних характеристик напівпровідникових приладів**

Розглянемо класифікацію методів вимірювання ВАХ напівпровідникових приладів [2]. У загальному вигляді ці методи поділяють на два великі класи:

- статичні (або безперервні) методи;
- динамічні (або імпульсні).

Статичні методи вимірювання ВАХ передбачають подачу на досліджуваний напівпровідниковий прилад електричних вимірювальних впливів, які безперервно змінюються в часі. Динамічні методи передбачають подачу на досліджуваний напівпровідниковий прилад коротких імпульсів, під час дії яких вимірюється відгук приладу. Імпульсним також вважається метод, коли при вимірюванні ВАХ задається постійний режим спокою напівпровідникового приладу, в якому знаходиться прилад в моменти відсутності вимірювальних впливів. У цьому випадку впливовий сигнал має форму імпульсів і одночасно є безперервним у часі.

В залежності від стану напівпровідникового приладу під час вимірювань ВАХ виділяють ізотермічні та ізодинамічні методи. Ізотермічними називають вимірювання, при яких температура приладу підтримується приблизно на

однаковому рівні. Основна їх мета – запобігання безперервного зростання температури приладу внаслідок їх власного розігріву, що сприяє зменшенню теплових спотворень ВАХ і може істотно збільшити точність результатів. Як правило, ізотермічні вимірювання ВАХ здійснюються при застосуванні імпульсних методів. Ізодинамічне вимірювання проводяться таким чином, щоб заряд, обумовлений ефектом захоплення носіїв на паразитних енергетичних рівнях напівпровідника, в процесі вимірювання ВАХ залишався незмінним. Основна мета ізодинамічних вимірювань - підвищення точності вимірювання ВАХ шляхом запобігання або стабілізації ефекту захоплення носіїв. Як правило, ізодинамічний стан приладу в процесі вимірювання його ВАХ підтримується завдяки використанню імпульсних методів із застосуванням дуже малої тривалості імпульсів (від 200 нс до 2 мкс). Залежно від інерційності вимірювальних засобів, а також швидкості і характеру поданих впливів методи вимірювання ВАХ поділяються на: статичні; динамічні і квазістатичні; а також здійснювані вручну або автоматично.

Статичними являються ручні вимірювання, а також автоматичні вимірювання при дуже низькій швидкості безперервної зміни заданих значень ЕРС (струму) або при великій тривалості сходинок в разі їх ступінчасто – безперервного зміни [7]. Статичні вимірювання забезпечують високу точність через відсутність складової похибки, обумовленої зміною вимірюваної величини в час вимірювання (динамічної похибки), але вимагають досить великого часу на вимірювання ВАХ. Однак при виборі способу вимірювання необхідно враховувати особливість напівпровідникового приладу як об'єкта вимірювання. Вона полягає в тому, що навіть при незмінних значеннях прикладеного до неї ЕРС або струму його вимірювальні струми і напруги змінюються в часі за рахунок зміни температури кристала, яка залежить від розсіювання кристалом потужності. При великому часі вимірювання, що властиве статичним способам вимірювання, зміна температури кристала є значною і призводить до великих спотворень вимірюваної ВАХ. Зменшення температурної складової похибки вимірювання досягається при динамічному вимірюванні ВАХ шляхом



збільшення швидкості безперервного періодичної зміни струму керованих генераторів та підвищення швидкодії вимірювальних засобів, тобто зменшення їх часу вимірювання або інерційності. При цьому за рахунок теплової інерційності напівпровідникового приладу температура кристала не встигає суттєво змінитися за час одного виміру, а після декількох періодів вимірювання задаються впливів (після прогріву напівпровідникового приладу) у кристалі встановлюється деяка середня практично постійна температура. Зменшення похибки вимірювання, пов'язаної з необхідним малим часом вимірювання струмів і напруг напівпровідникового приладу, забезпечується усередненням результатів багаторазового вимірювання по заданому числу періодів зміни ЕРС або струмів. Переваги динамічного способу вимірювання практично зберігаються і при квазістатичному вимірі ВАХ. У цьому режимі використовується ступінчасто-безперервною зміна заданих значень ЕРС або струму з мінімальною тривалістю сходінки, яка визначається часом вимірювання вимірювального приладу і затримкою вимірювання на час встановлення перехідних процесів в схемі вимірювання.



Рисунок 1.5 – Класифікацій методів вимірювання ВАХ [2]

Можливо також вимірювання ВАХ в імпульсному квазістатичному режимі, коли в паузах між вимірами значення ЕРС або струму керованих генераторів приймають нульові значення, як і вимірювані значення струму і напруги. Такий режим вимірювання використовується для вимірювання ВАХ і параметрів потужних напівпровідникових приладів [7]. На рисунку 1.5 схема класифікацій методів вимірювання ВАХ напівпровідників. Найбільш перспективним для контролю напівпровідників є розробка і впровадження автоматизованих методів і засобів вимірювання ВАХ, а саме імпульсних ізотермічних та ізодинамічних із математичною обробкою результатів [2].

## РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДІОДА. МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ. РОЗРОБКА ВІРТУАЛЬНОГО СТЕНДА

### 2.1. Математична модель. Методика моделювання

Вольт-амперну характеристику ідеального діода можна описати рівнянням Шоклі:

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (2.1)$$

де  $I$  – сила струму;

$I_0$  – сила струму насичення при зворотній напрузі;

$U$  – напруга;

$k$  – стала Больцмана;

$T$  – температура.

Для спрощення математичної моделі в рівнянні (2.1) поділимо його ліву і праву частину на  $I_0$ , тоді отримуємо:

$$\frac{I}{I_0} = \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1.$$

Нехай

$$y = \frac{I}{I_0}, \quad x = \frac{eU}{kT}.$$

Тоді:

$$y = \exp(x) - 1 = e^x - 1. \quad (2.2)$$

Рівняння (2.2) використовується для побудови в середовищі LabVIEW вольт-амперної характеристики  $p$ - $n$ -переходу.

Приклади дослідження параметрів і характеристик напівпровідникових приладів, фізичних явищ в електричних ланцюгах із застосуванням інтернет-технологій можна знайти в [7,8].

## 2.2. Розробка віртуального стенда

Для розробки віртуального стенда будемо використовувати програму LabVIEW.

На рис. 2.1 представлена панель віртуального стенда для дослідження вольт-амперної характеристики  $p$ - $n$ -переходу.

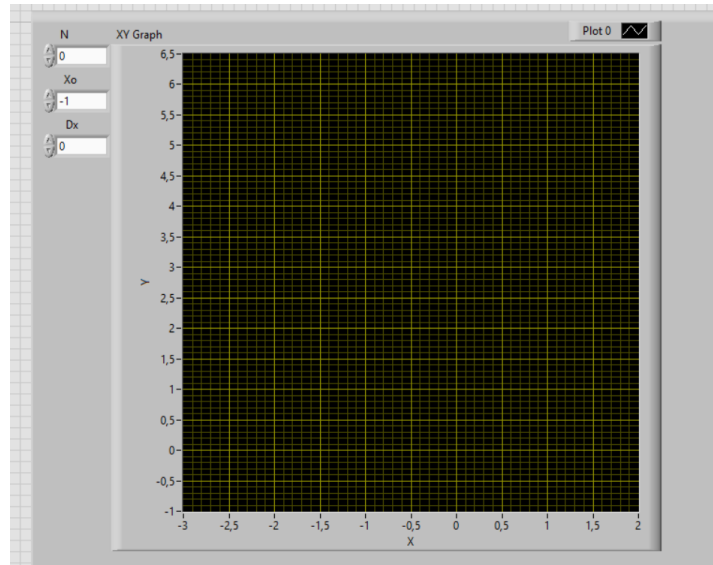


Рисунок 2.1 – Панель віртуального стенда

На даній панелі знаходиться «панель керування», яка має поля вводу параметрів для системи:  $N$  – кількість вузлів,  $X_0$  – початкове значення,  $Dx$  – крок дискретизації, а також екран для графічного відображення вольт-амперної характеристики.

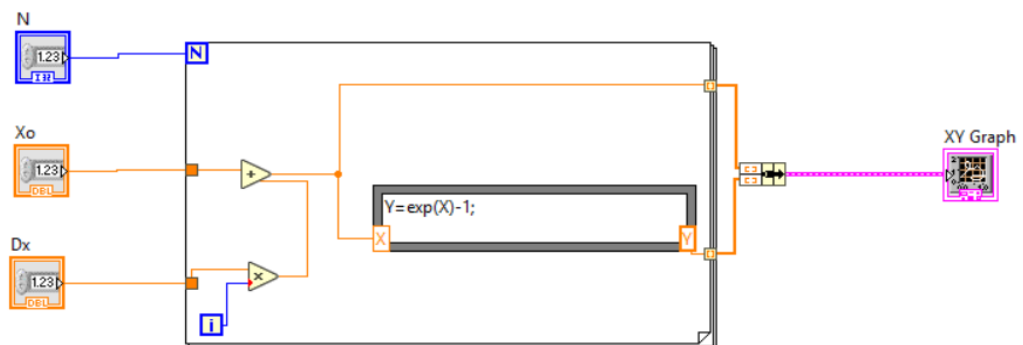


Рисунок 2.2 – Блок-діаграма віртуального стенда

Блок-діаграма даного стенда зображена на рис. 2.2. Використовується цикл For Loop, який виконує підпрограму  $n$  разів, де  $n$  – це значення, підключене до терміналу підрахунку  $N$ . Термінал ітерації ( $i$ ) забезпечує поточну кількість ітерацій циклу, яка знаходиться в діапазоні від 0 до  $n-1$ . Також застосовується структура Formula Node – зручний текстовий вузол, який можна використовувати для виконання складних математичних операцій з використанням синтаксичної структури мови C++. І математичні функції: додавання і множення. Для введення параметрів використовується Numeric Control, для графічного відображення – XY Graph [9,10].

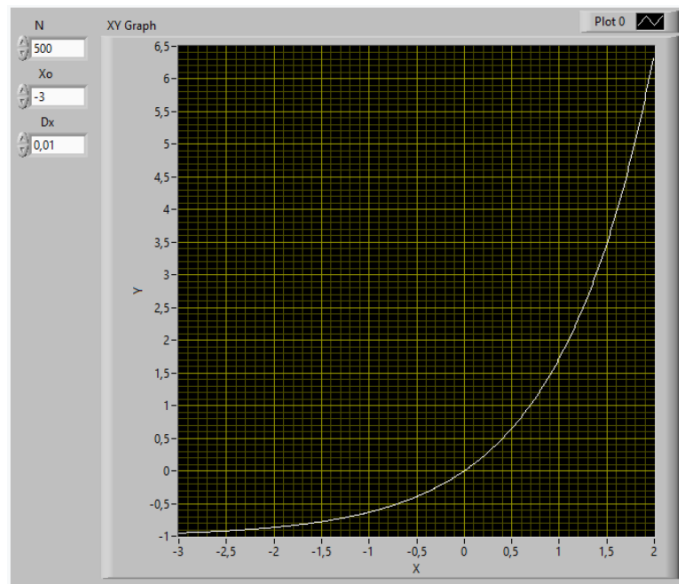


Рисунок 2.3 – Графік вольт-амперної характеристики

В результаті було отримано графік вольт-амперної характеристики, який зображений на рисунку 2.3.

### 2.3. Вдосконалення віртуального стенда

Для вдосконалення найпростішого віртуального стенда побудови вольт-амперної характеристики, в якій аргумент  $x$  і функція  $y$  – безрозмірні величини, потрібно реалізувати формулу (2.1). Для цього треба визначити параметр  $I_0$  –

силу струму насичення при зворотній напрузі. Він може приймати значення в широких межах і залежить, зокрема, від матеріалу та температури.

Після реалізації формули 2.1 блок-діаграма віртуального стенда матиме такий вигляд, як на рисунку 2.4.

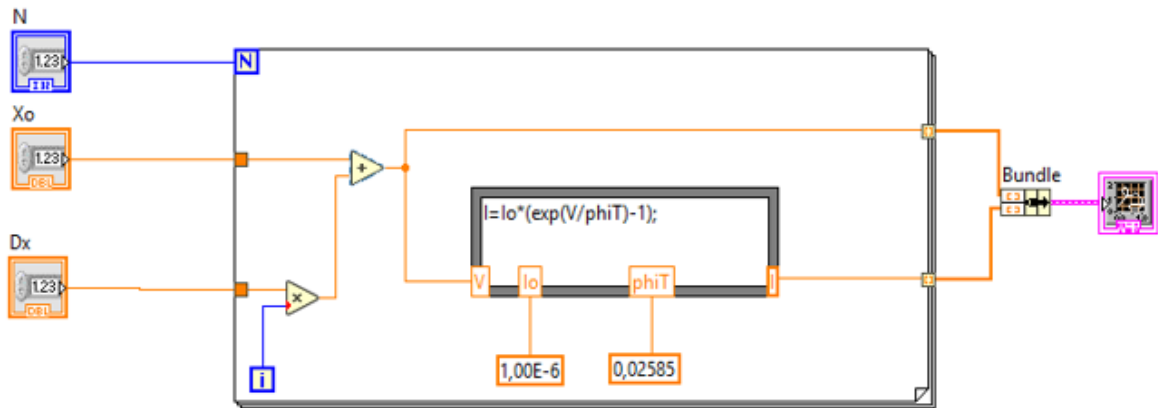


Рисунок 2.4 – Блок-діаграма вдосконаленого віртуального стенда

В блок-діаграмі використовується цикл For Loop, в якому в структурі Formula Node реалізована формула 2.1. Задаються такі параметри:  $I_0 = 1$  мкА – сила струму насичення при зворотній напрузі;  $\phi_T = 0,02585$  В – тепловий потенціал. Значення  $I_0$  взяте з літературного джерела [11], значення  $\phi_T$  розраховане для абсолютної температури 300 К (тобто 27 °С).

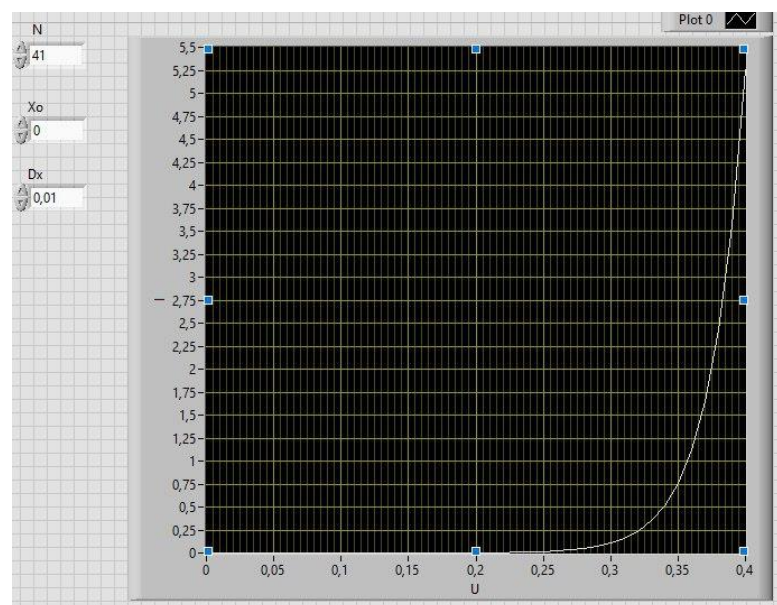


Рисунок 2.5 – Графік вольт-амперної характеристики для прямого струму

В результаті графіки вольт-амперної характеристики  $p-n$ -переходу матимуть вигляд як на рисунку 2.5 (для прямого струму) і на рисунку 2.6 (для зворотного струму).

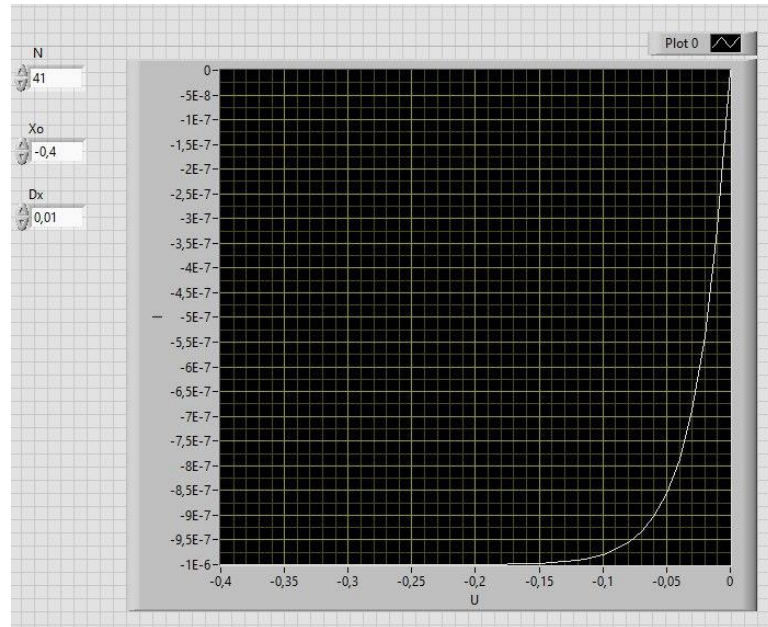


Рисунок 2.6 – Графік вольт-амперної характеристики для зворотного струму

При прямому підключенні сила струму через  $p-n$ -перехід стрімко зростає. При напрузі 0,4 В вона дорівнює вже близько 5 А. При зворотному підключенні  $p-n$ -переходу сила струму швидко виходить на насичення. При напрузі  $-0,2$  В вона вже дорівнює струму насичення 1 мкА.

## ВИСНОВКИ

1. Здійснено літературний огляд за темою роботи, в якому приводяться класифікація напівпровідникових матеріалів за складом і властивостям; властивості  $p$ - $n$ -переходу та його вольт-амперна характеристика, методи вимірювання вольт-амперних характеристик напівпровідникових приладів.
2. Використано математичну модель вольт-амперної характеристики ідеалізованого  $p$ - $n$ -переходу (рівняння Шоклі), яку подано у вигляді найпростішої функціональної залежності виду  $y = e^x - 1$ , де  $x$  і  $y$  – безрозмірні величини.
3. В середовищі LabVIEW створено віртуальний стенд для побудови графіків функції  $y(x)$ , що репрезентує вольт-амперні характеристики ідеального діода. Отримано конкретний графік.
4. На основі рівняння Шоклі побудовано вольт-амперну характеристику  $p$ - $n$ -переходу при абсолютній температурі 300 К та зворотному струму насичення 1 мкА. Показано: а) при прямому підключенні сила струму через  $p$ - $n$ -перехід стрімко зростає і при напрузі 0,4 В вже дорівнює близько 5 А; б) при зворотному підключенні  $p$ - $n$ -переходу сила струму швидко виходить на насичення і при напрузі  $-0,2$  В вже дорівнює струму насичення 1 мкА.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Монк С., Шерц П. Электроника. Теория и практика. – 4-е изд. : Пер. с англ. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2018. – 1168 с.
2. Ермоленко Е.А. Классификация методов измерения вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2014. – № 2-3. — С. 3-11.
3. Вольтамперные характеристики полупроводников [Электронный ресурс] // Школа для электрика : электротехника и электроника. – URL : <http://electricalschool.info/electronica/1006-voltampernye-kharakteristiki.html> (дата звернення : 17.04.2020).
4. Победаш К.К. Комп'ютерна електроніка [Електронний ресурс]: навч. посіб. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 364 с.
5. Чешко І. В. Вступ до спеціальності «Електроніка» : навч. посіб. – Суми : Сумський державний університет, 2017. – 148 с.
6. Поплавко Ю.М., Ільченко В.І., Воронов С.А., Якименко Ю.І. Фізичне матеріалознавство. Ч. IV. Напівпровідники : навч. посіб. – Київ : видавництво «Політехніка» Національного Технічного університету України, 2010. – 342 с.
7. Глинченко А.С., Егоров Н.М., Комаров В.А., Сарафанов А.В. Исследование параметров и характеристик полупроводниковых приборов с применением интернет-технологий : учеб. пособие. – Москв.: ДМК Пресс, 2014. – 352 с.
8. Дектерев М.Л., Комаров В.А., Преснякова Г.О., Сарафанов А.В., Суковатый А.Г., Худоногов Д.Ю., Володина Д.Н., Трухин А.А. Исследования физических явлений в электрических цепях с применением интернет-технологий : учеб. пособие. – Москва : ДМК Пресс, 2015. – 432 с.
9. Бутырин П.А., Васьковская Т.А., Каратаев В.В., Материкин С.В. Автоматизация физических исследований и эксперимента : компьютерные

измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7. – 2-е изд. – Москва : ДМК Пресс, 2012. – 265 с.

10.Белиовская Л.Г. Узнайте, как программировать на LabVIEW. – Москва : ДМК Пресс, 2014. – 140 с.

11.Kasap S.O. Principles of Electronic Materials and Devices. – 4th ed. – New York, NY: McGraw-Hill Education, 2018. – 992 p.