

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроніки**  
(повна назва інституту/факультету)

**Кафедра мікроелектроніки**  
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

В.о.завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ **Анатолій ОРЛОВ**  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 р.

**Дипломна робота**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**за спеціальністю 153 Мікро-та наносистемна техніка**  
(код і назва)

на тему: Діод Шотткі на основі переходу Au-Si

Виконав: студент 4 курсу, групи ДП-71  
(шифр групи)

Шкапа Антон Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник Волхова Тетяна Любомирівна

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант з нормоконтролю

доц., к.ф.-м.н., с.н.с.

Георгій СВІЧНИКОВ

Консультант з інформаційних питань доц., к.т.н., Юрій ДІДЕНКО

Рецензент \_\_\_\_\_

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає  
запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Київ – 2021 року

## Завдання на дипломну роботу

### Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут/факультет Факультет електроніки  
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) 153 Мікро-та наносистемна техніка  
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри

Анатолій ОРЛОВ

(підпис) (ініціали, прізвище)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.

### ЗАВДАННЯ на дипломний проект (роботу) студенту

Шкапі Антону Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Діод Шотткі на основі переходу Au-Si

керівник проекту (роботи) к.т.н. Волхова Т.Л.,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом проекту (роботи)

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Діод Шотткі з товщиною шару Au 24нм, 39нм та 42нм. Контактна площа Au для всіх зразків становить 1мм<sup>2</sup>.

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) 1) Огляд основних електрофізичних параметрів, що характерні для діодів Шотткі; 2) Аналіз механізмів струмопроходження для гетероструктур з бар'єром Шотткі; 3) Вивчення теоретичних засад формування бар'єрів Шотткі

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Презентація

6. Консультанти розділів проекту (роботи)<sup>1\*</sup>

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 01.02.2021

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Підпис керівника
1	Огляд основних електрофізичних параметрів діоду Шотткі	Лютий 2021	
2	Теоретичний огляд	Березень 2021	
3	Вимірювання ВАХ одержаних зразків	Квітень 2021	
4	Обробка експериментальних результатів	Травень 2021	
5	Оформлення дипломної роботи	Травень 2021	

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

А.С. Шкапа

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Т.Л. Волхова

(ініціали, прізвище)

\_\_\_\_\_

## ЗМІСТ

Вступ.....	7
Розділ 1. Опис Діодів Шотткі .....	8
1.1. Загальний опис. ....	8
1.2. Ідеальні бар'єри Шотткі .....	10
1.3. Реальні бар'єри Шотткі: роль контактних зарядів .....	11
1.4. Вимірювання висоти потенціального бар'єру .....	16
Розділ 2. Технологія промислового виготовлення діодів Шотткі .....	21
2.1 Загальний опис технології.....	21
2.2 Процес виготовлення .....	23
Розділ 3. Опис використаного програмного забезпечення.....	28
3.1 MathCad 15 .....	28
3.2 Можливості обраного програмного пакету.....	29
3.3 Причини вибору .....	30
Розділ 4. Експериментальна частина.....	34
4.1 Досліджувана структура.....	34
4.2 Метод одержання ВАХ.....	35
4.3 Отримані ВАХ досліджуваних зразків .....	36
4.4 Розрахунок параметрів .....	42
Основні результати та висновки.....	48
Список використаних літературних джерел .....	49

## РЕФЕРАТ

Роботу викладено на 50 сторінках, вона містить 4 розділи, 27 ілюстрацій, 6 таблиць та 22 джерела в переліку посилань.

Об'єктом дослідження є діод Шотткі на основі контакту Au/Si та його основні електрофізичні параметри.

Предмет роботи – дослідження електрофізичних параметрів діодів Шотткі із контактом Au/Si та огляд теоретичних засад формування бар'єру Шотткі на контактні метал-напівпровідник.

Мета роботи – розрахунок електрофізичних параметрів діода Шотткі на основі контакту Au-Si та порівняння трьох, виготовлених промисловим методом, діодів для визначення доцільності використання тієї чи іншої товщини контакту металу (Au).

В першому розділі подаються основи описання контактів типу метал-напівпровідник, методики формування бар'єру Шотткі за різних модифікацій обраних матеріалів та методи струмопроходження через такі контакти.

В другому розділі описано основні засади формування структур діодів Шотткі та їх схемотехнічне використання в парі з біполярними транзисторами для зняття паразитного заряду. Також описано покрокове формування діоду Шотткі на планарному транзисторі для утворення структури із «затискачем» Шотткі.

В третьому розділі розглянуто використане для розрахунків програмне забезпечення у вигляді пакету MathCad. Його переваги та функціональні можливості. Також було розглянуто причини вибору саме цього пакету.

В четвертому розділі наведено розрахункову частину дослідження, надано відповідні таблиці та графіки, отримані з експериментальних даних.

## ABSTRACT

The work is presented on 50 pages, it contains 4 sections, 27 illustrations, 6 tables and 22 sources in the list of references.

The object of the study is the Schottky diode based on the Au / Si contact and its basic electrophysical parameters.

The subject of the work is the study of the electrophysical parameters of Schottky diodes with Au / Si contact and the review of the theoretical foundations of the formation of the Schottky barrier at the metal-semiconductor contact.

The purpose of the work is to calculate the electrophysical parameters of the Schottky diode based on the Au-Si contact and to compare three diodes made by the industrial method to determine the feasibility of using a particular thickness of the metal contact (Au).

The first section provides the basics of describing metal-semiconductor contacts, methods of forming a Schottky barrier with different modifications of selected materials and methods of current flow through such contacts.

The second section describes the basic principles of forming the structures of Schottky diodes and their circuit use in pair with bipolar transistors to remove the parasitic charge. The stepwise formation of a Schottky diode on a planar transistor to form a structure with a Schottky "clamp" is also described.

The third section discusses the software used for calculations in the form of the MathCad package. Its advantages and functionality. The reasons for choosing this package were also considered.

The fourth section presents the calculated part of the study, provides the relevant tables and graphs obtained from experimental data.

## ВСТУП

Явище формування бар'єру Шотткі на межі розділу метал-напівпровідник активно вивчалось протягом трьох десятиліть. Значною мірою ці дослідження намагалися з'ясувати, як рівень Фермі на межі розділу досягає свого кінцевого положення в забороненій зоні напівпровідника, коли напівпровідник і метал контактують. До недавнього часу стабілізація рівня Фермі та пов'язаний з цим вигин границі енергетичної зони в області заряду поверхневого простору напівпровідника розглядалися як наслідки власних поверхневих станів на межі розділу напівпровідник-вакуум. Однак протягом останніх кількох років експериментальні дослідження контактів метал-напівпровідник, проведені в умовах надвисокого вакууму, показали, що зовнішні особливості, які виникають при взаємодії між металом і напівпровідником, домінують в електронних властивостях цього контакту[1].

Метою цієї роботи є розрахунок електрофізичних параметрів діода Шотткі на основі контакту Au-Si. Розрахунок параметрів діода по ВАХ потрібен для того, щоб зрозуміти наскільки "вдалим" з точки зору характеристик вдалося виготовити досліджуваний діод. Тому що є певні вимоги, наприклад якщо висота бар'єру буде низькою, то діод буде мати погані випрямні властивості.

Також в роботі розглянуто загальноприйняті концепції формування бар'єру Шотткі, вказано широкий спектр надвисоких вакуумних методів, доступних зараз для зондування контактів метал-напівпровідник на атомній шкалі, та оцінено сучасний стан знань про електронну та хімічну структуру контакту метал-напівпровідник за результатами надвисоких вакуумних досліджень, проведених в останні роки.

Вибір саме золота, а не більш дешевих аналогів, як алюміній, зумовлене гарною дослідницькою базою. Характеристики цього металу добре досліджені, що спрощує аналіз. Також золото має адгезію до Si та SiO<sub>2</sub>.

## РОЗДІЛ 1. ОПИС ДЮДІВ ШОТТКІ

### 1.1. Загальний опис.

Найважливішою характеристикою межі розділу метал-напівпровідник є природа потенційного бар'єру між рівнем Фермі в металі та краєм смуги напівпровідника більшості носіїв на цій межі розділу. Кілька типових прикладів проілюстровано на рис. 1. Цей потенційний бар'єр має центральне значення при визначенні характеристик напівпровідникових приладів, оскільки для електричних контактів напівпровідників необхідні контакти метал-напівпровідник, і, залежно від висоти бар'єру, такі контакти виявляють помірний опір потоку струму в будь-якому напрямку у великому діапазоні температур ( низький або негативний бар'єрний "омічний" контакт) або низький опір потоку струму в одному напрямку і високий опір потоку струму в протилежному напрямку (високий бар'єр "випрямного" контакту).

Випрямлення на напівпровідникових контактах – явище, про яке повідомлялося ще в 1870-х роках. Прогрес у розумінні контактного випрямлення було частково затримано, оскільки чистота та кристалічна досконалість напівпровідникових кристалів були недостатніми для того, щоб відрізнити об'ємні та контактні ефекти. Лише в 1930-х роках можна було продемонструвати, що внутрішня частина напівпровідника не відігравала безпосередньої ролі в процесі випрямлення [1]. Більше того, великі високочисті напівпровідникові монокристали були доступні лише в кінці 1940-х – на початку 1950-х років, коли для зростання напівпровідників використовувалася техніка витягування [2,3] та дробова перекристалізація [4], а також методи багаторазового уточнення [5] та очищення напівпровідникової зони [6] для очищення напівпровідників.

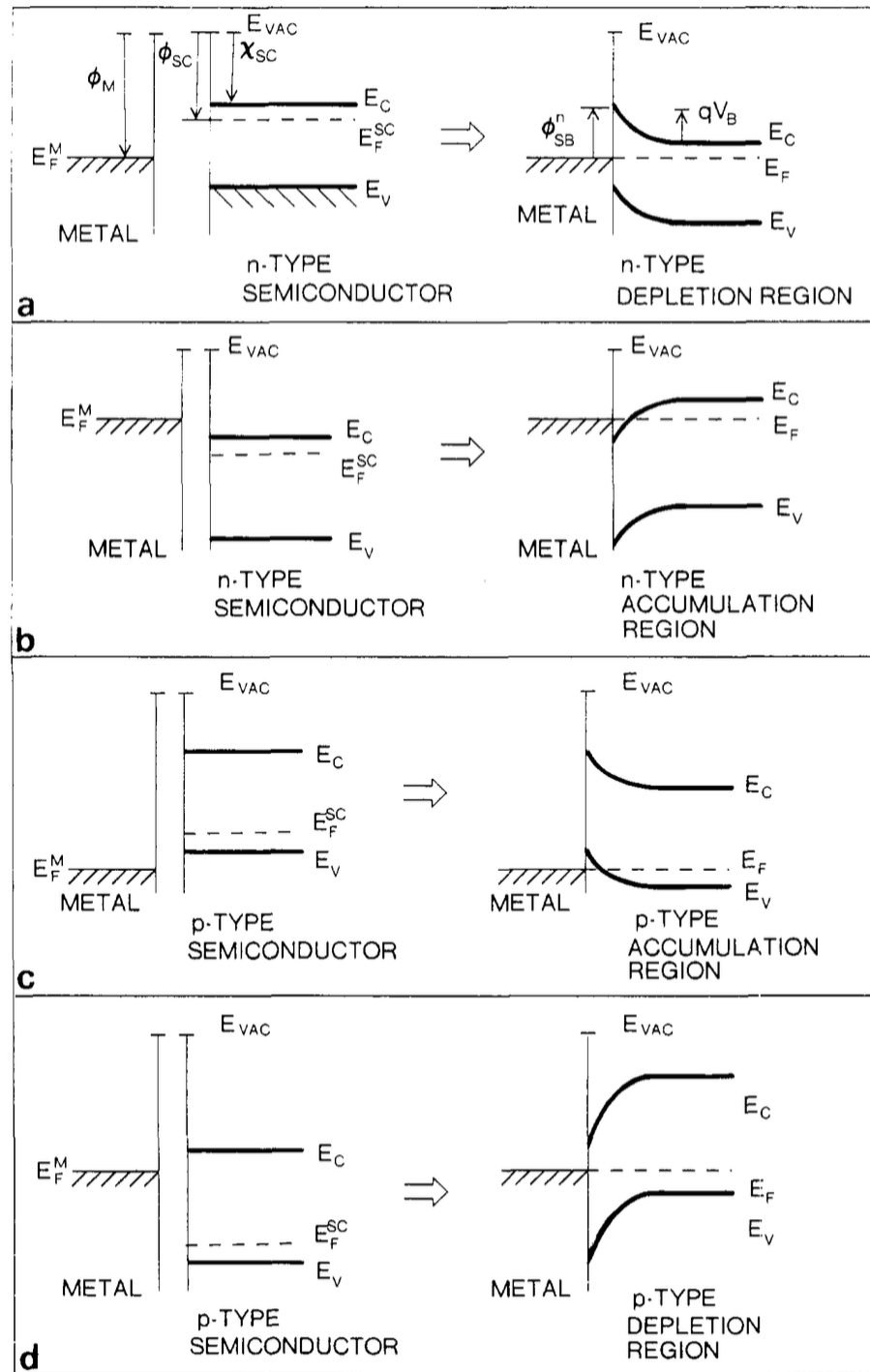


Рисунок 1.1 – Схематична діаграма вигинання границі енергетичної зони до і після контакту метал-напівпровідник для (a) металу з високою робочою функцією та напівпровідника типу n, (b) металу із низькою робочою функцією та напівпровідника типу n, (c) металу із високою функцією роботи та напівпровідника типу p, (d) металу із низькою робочою функцією та напівпровідника типу p [1]

## 1.2. Ідеальні бар'єри Шоттки

Рисунок 1 ілюструє схему згинання границі енергетичної зони для металів з високою та низькою робочою функцією на поверхнях напівпровідників n- та p-типу. Наприклад, для високоефективної функції металу та напівпровідника типу n на рис. 1а, електрони переходять від напівпровідника до металу після контакту, виснажуючи характерну область поверхні в напівпровіднику електронів. При суміщенні двох рівнів Фермі  $E_F^M$  та  $E_F^{SC}$  утворюється подвійний шар із падінням напруги  $qU_B$ , рівним різниці контактних потенціалів між металом та внутрішньою частиною напівпровідника. Подвійний шар складається з області поверхневого простору заряду, зазвичай товщиною  $10^{-4}$ - $10^{-6}$  см, та індукованого заряду на поверхні металу. Область збіднення n-типу на рис. 1а – шар високої стійкості. Таким чином, напруга, прикладена до цього переходу, буде падати переважно по всій області поверхневого заряду.

Висота бар'єру залежить від різниці в термоелектричній робочій функції, і в цій простій моделі очікується

$$\phi_{SB} = \phi_M - \phi_{SC} \quad (1.1)$$

Відповідно до цієї моделі потенціал  $\phi$  всередині напівпровідника задовольняє рівняння Пуассона:

$$\nabla^2 \phi(x) = -4\pi\rho(x)/\epsilon_S \quad (1.2)$$

В рівнянні (1.2),  $\rho$  – щільність заряду в області поверхневого простору шириною  $w$ ,  $x$  позначає вісь координат, нормальну до межі розділу метал-напівпровідник, а  $\epsilon_S$  – статична діелектрична проникність напівпровідника. Використовуючи різке наближення, що  $\rho \approx qN$ , об'ємна концентрація іонізованих домішок в області поверхневого заряду для  $x < w$  та  $d\phi/dx = 0$  для  $x > w$  [8] отримуємо :

$$U = q\phi(x) = \begin{cases} -\frac{2\pi Nq(x-w)^2}{\epsilon_S} + U_0, & 0 < x < w \\ U_0, & x > w \end{cases} \quad (1.3)$$

Та ширина збідненого шару:

$$w = \left( \frac{\epsilon_S (U - U_0)^{\frac{1}{2}}}{2\pi Nq} \right) \quad (1.4)$$

Таким чином, різкий перехід метал-напівпровідник призводить до області згинання параболічної смуги. Аналогічні висновки можна зробити з рис. 1b-1d. Як би там не було, рисунки 1b і 1c відрізняються тим, що області накопичення не створюють бар'єру для транспортування основних носіїв заряду через контакт.

### 1.3. Реальні бар'єри Шотткі: роль контактних зарядів

Звичайна картина формування бар'єру Шотткі, описана рівнянням. (1.1) і проілюстрована на рис. 1, на жаль, не описує поведінку контактів метал-напівпровідник загалом. У багатьох випадках висота бар'єру для певного контакту типу метал-напівпровідник виявляє лише слабку залежність від робочої функції (або інших об'ємних властивостей) металу. Йоффе виявив, що різниці контактних потенціалів та контактні опори для різноманітних видів контактів метал-напівпровідник погано корелюють з теоріями Шотткі, Мотта та Давідова [9]. Мерхоф не виявив кореляції між бар'єрами випрямлення для різних металів на Si і Ge та різницею їх робочих функцій [10]. Для контактів метал-Si бар'єри практично не залежали від функції металоконструкцій. Крім того, той самий метал давав

випрямлення як для матеріалів типу n, так і p. Дійсно, бар'єри спостерігалися навіть між двома кристалами Ge типу n або двома типами p-типу [11].

На рис. 2, висота бар'єру  $\phi_{SB}$  [12-13] нанесена на графік порівняно з функцією виходу з металу  $\phi_M$  [14] для різних металів на Si-типі, розщепленому у вакуумі (суцільні кола). Лінії вказують діапазон значень бар'єру для хімічно травленої поверхні. Функції металообробки представляють вибрані останні значення, отримані методами фотоемісії [14]. Для деяких металів ці значення суттєво відрізняються від значень, отриманих менш чіткими процедурами [15]. Діагональна лінія представляє графік  $\phi_{SB} = \phi_M - \chi_{Si}$ , де  $\chi_{Si} = 4.05$  eV [16].

Точки даних на рис. 2 демонструють набагато слабшу залежність  $\phi_{SB}$  від  $\phi_M$ , ніж очікувалося від рівняння. (1.1). Крім того, діапазон бар'єрів, отриманих хімічним травленням, проти розщеплення вказує на важливість поверхневих умов у визначенні висоти бар'єру Шоттки.

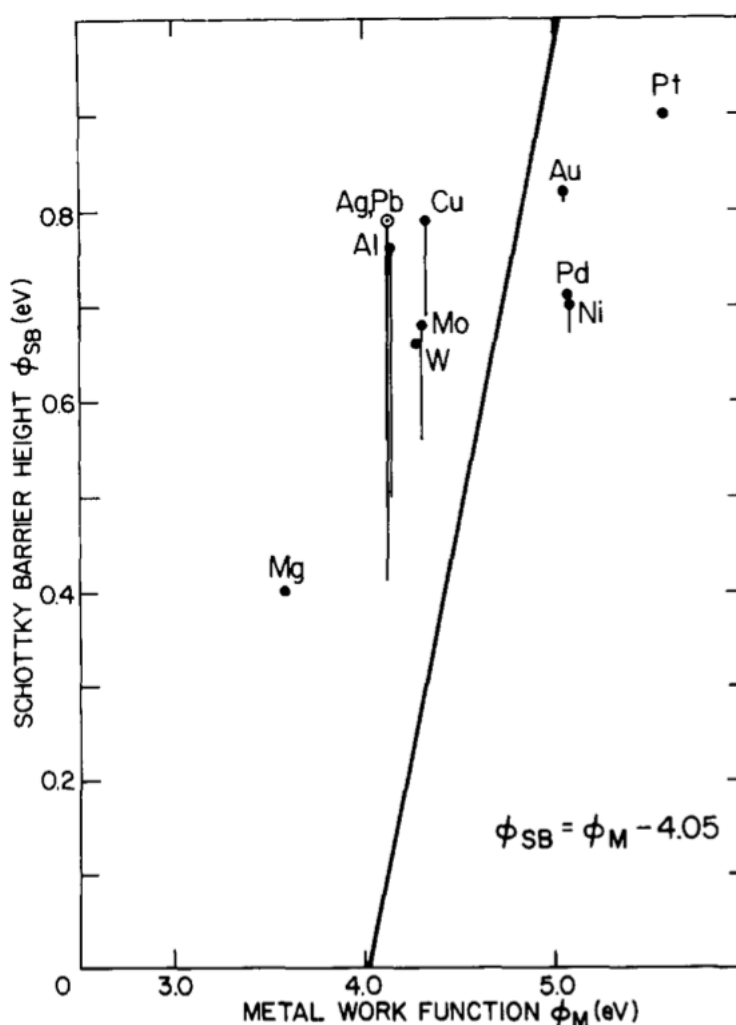


Рисунок 1.2 – Ділянка висоти бар'єру  $\phi_{SB}$  [12-13] як функції функції роботи виходу з металу  $\phi_M$  [14] для металів на n-типу Si. Кола є висотою бар'єру для розщеплення Si та вертикальними лініями, що охоплюють діапазон значень бар'єру для хімічно підготовленої поверхні після старіння. Діагональна лінія являє собою графік  $\phi_{SB} = \phi_M - \chi_{Si}$ , де  $\chi_{Si} = 4.05$  eV [16].  $\phi_M$  відбираються останні значення, отримані методами фотоemisії [1]

Неможливість використання рівняння (1.1) для опису спостережуваних висот бар'єра Шотткі було інтерпретовано в 1947 р. Бардіном, який запропонував, що локалізовані поверхневі стани можуть накопичувати заряд на межі розділу і тим самим містити різницю потенціалів контакту між металом і напівпровідником [17]. Ці стани можуть бути невід'ємними для поверхні напівпровідників, отриманих Таммом і Шоклі, з енергіями в зазорі зон між провідною і валентною зоною. Крім того, Бардін зазначав, що "поверхневі стани можуть також виникати внаслідок поверхневих недосконалостей, сторонніх атомів тощо". [17] – тобто від будь-якої функції, яка змінює потенціал на контакті.

Наявність напівпровідникових поверхневих станів у зазорі призводить до вигину смуги на межі розділу напівпровідник-вакуум, як показано на рис. 3а. Для напівпровідника n-типу на рис. 3а, ці стани є акцепторними, і напівпровідник у рівновазі демонструє вигин смуги вгору (від'ємну), коли поверхневий рівень Фермі рухається до  $E_{SS}$ . Для напівпровідника p-типу з донорно-подібними поверхневими станами напівпровідник у рівновазі буде мати вигин у смугі захисту, коли поверхневий рівень Фермі рухається до  $E_{SS}$ .

Якщо щільність  $Q_{SS}$  цих поверхневих станів досить висока, контакт з металом не помітно змінює положення рівня Фермі на поверхні (і, отже,  $qU_B$ ). Цей результат вказаний на рис. 3б, де більша частина різниці контактних потенціалів  $\phi_M - \phi_{SC}$  потрапляє через тонку дипольну область на межі розділу. Заряд передається металу в основному від високої щільності поверхневих станів, а не від області поверхневого заряду напівпровідника. Результатом є ємнісний шар із негативним

зарядом на стороні металу та позитивним зарядом на стороні напівпровідника. Замість  $\phi_M - \chi_{SC}$ , висота бар'єру становить:

$$\phi_{SB} = qU_B + E_C - E_F = \phi_M - \chi_{SC} - \Delta\chi \quad (1.5)$$

де  $\Delta\chi$  залежить від положення  $E_{SS}$  в ширині забороненої зони. Таким чином, згинання смуги  $qU_B$  і висота бар'єру  $\phi_{SB}$  відносно не залежать від типу металевого контакту. Кажуть, що поверхневий рівень Фермі "закріплений" в зазорі за рахунок власних поверхневих станів. Це звичайне зображення результуючого контакту показано на рис. 3в. Передбачається, що область диполя є досить тонкою, щоб вільно заряди тунелювали між металом і напівпровідником. Оскільки інтерфейс зображений як атомно різкий, дипольний потенціал  $\Delta\chi$  не відображається явно, але має на увазі в розбіжності між  $\phi_M - \phi_{SC}$  і  $\phi_{SB}$ .

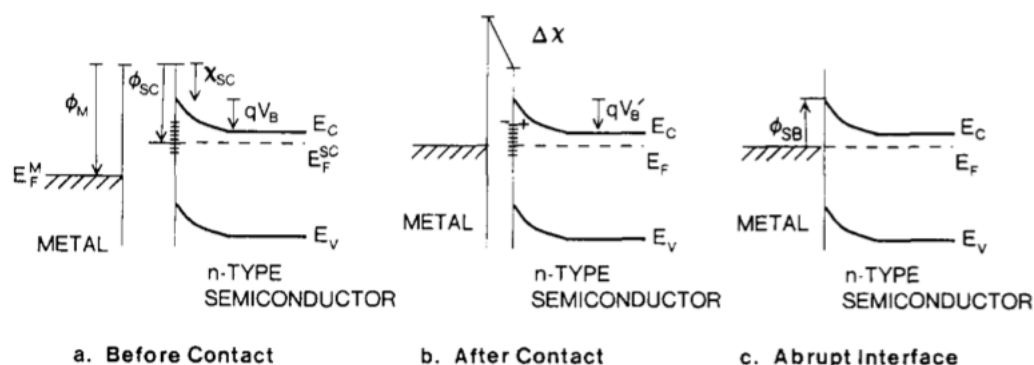


Рисунок 1.3 – Принципова діаграма енергетичної смуги металу та напівпровідника з високою щільністю поверхневих станів: (а) до контакту, (б) після контакту та (с), як зображено умовно з контактом диполя, не показано [1]

Вимірювання польових ефектів Шоклі та Пірсона [18] були, мабуть, самим раннім експериментальним підтвердженням існування локалізованих станів на поверхні напівпровідника або межі розділу. Їх експеримент схематично показаний на рис. 4. Він полягав у контролі поверхневої провідності шару Si, оскільки область заряду поверхневого простору була упередженою. Розглянемо напівпровідник n-типу, показаний на рис. 4а. Коли польова пластина позитивна, негативний заряд, індукований на напівпровіднику, складається з додавання еделектронів в зоні

провідності (рис. 4b). З прикладеної напруги, відомої ємності та відомої рухливості електронів можна розрахувати очікувану зміну поверхневої провідності. Локалізовані стани на поверхні напівпровідника зменшують прогнозований ефект (рис. 4c). Оскільки поверхнева провідність виявляла лише слабку залежність від прикладеного зміщення, Шоклі та Пірсон продемонстрували наявність високої щільності заряду, іммобілізованого на поверхні Si, використаному в експериментах.

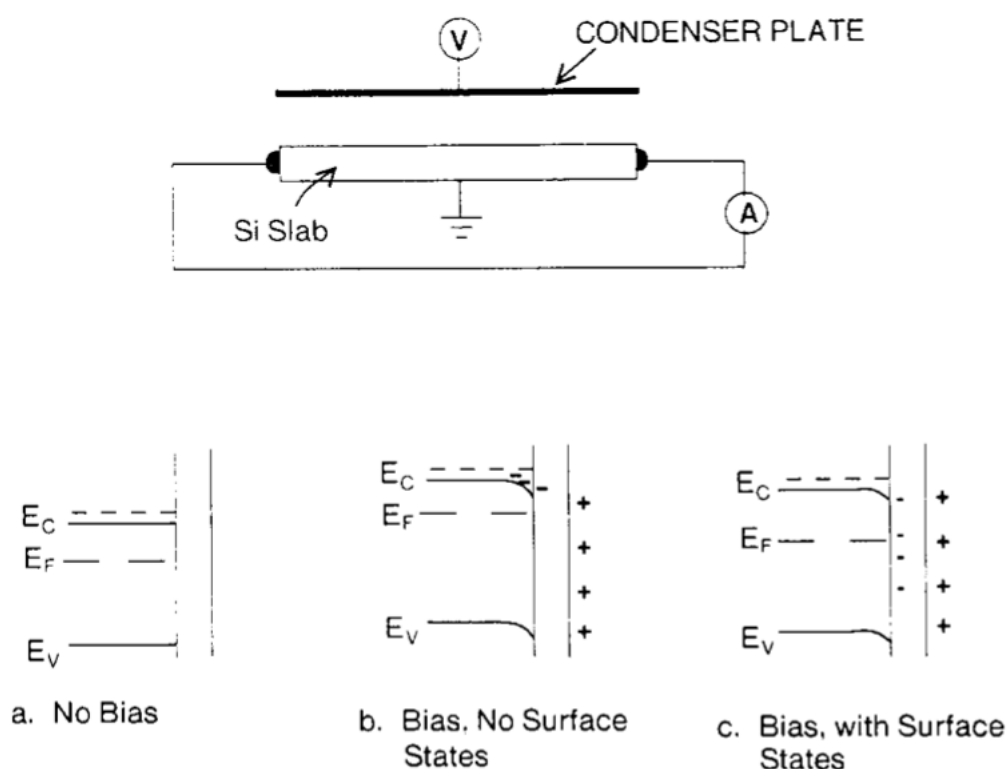


Рисунок 1.4 – Експериментальна конфігурація для вимірювання ефекту поля Шоклі та Пірсона [43]. Поверхневу провідність плити Si, виміряну за допомогою A, контролюють як функцію зміщення затвора V. Без поверхневих станів провідність в області заряду поверхневого простору зростає. Наявність поверхневих станів зменшує цей ефект поля

#### 1.4. Вимірювання висоти потенціального бар'єру

Найбільш очевидним методом вимірювання контактного випрямлення є техніка J–U. З теорії термоелектронної емісійно-дифузійної дифузії [19] пряма J–U характеристика поверхні розділу метал – напівпровідник задана [8]

$$J = A^{**}T^2 \exp(-q\phi_{SB}/k_B T) \left[ \exp\left(\frac{qU}{k_B T}\right) - 1 \right] \quad (1.6)$$

Де  $A^{**} = f_p f_Q A^* / (1 + f_p f_Q v_R / v_D)$ ,  $f_p$  – ймовірність випромінювання електронів над потенційним максимумом напівпровідника в метал без електронного оптико-фононного зворотного розсіювання,  $f_Q$  – відношення загального потоку струму з урахуванням тунелювання та квантово-механічного відбиття до потоку струму, нехтуючи цими ефектами,  $v_R$  і  $v_D$  – швидкість рекомбінації та ефективна швидкість дифузії, відповідно пов'язані з термоемісійним випромінюванням,  $A^* = m^* / m_0 (120 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{K}^2)$ ,  $m^*$  і  $m_0$  – ефективна маса та маса вільних електронів відповідно  $\phi_{SB}$  – висота напівпровідникового бар'єру, а  $U$  – прикладена напруга. У прямому напрямку з  $U > 2k_B T / q$ ,  $A^{**}$  може бути апроксимовано  $A^*$ , і  $\phi_{SB}$  складається з висоти бар'єру, екстрапольованої до нульового поля,  $\phi_{SB0}$ , мінус доданок  $\Delta\phi$  через комбіновані ефекти прикладеного електричного поля та сили зображення [8]. Цей ефект дає

$$\phi_{SB} = \phi_{SB0} - \Delta\phi = \phi_{SB0} - \left( \frac{q^3 E}{4\pi\epsilon_S} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.7)$$

На рис. 5 показано потенціал зображення, накладений на застосований градієнт потенціалу, та ефективне опускання бар'єру для напівпровідника-металу контакту типу n та прикладеного електричного поля  $E$ . Ефективне зниження  $\Delta\phi = 2qEx_m$ , де  $x_m = \left( \frac{q}{16\pi\epsilon_S E} \right)^{\frac{1}{2}}$  визначено на рис. 5. Оскільки більша частина прикладеної

напруги падає через область виснаження контакту, яка, залежно від  $N$  і  $\epsilon_s$ , має ширину  $<1000\text{Å}$ , напруги лише у вольт можуть створювати градієнти поля  $10^5\text{В/см}$  або вище. Так, наприклад,  $\Delta\phi = 0,03\text{eВ}$  з  $\epsilon_s = 16\epsilon_0$  (наприклад, Ge) та  $E = 10^5\text{В/см}$ . Хоча корекція  $\Delta\phi$ , як правило, не велика, вона тим не менше впливає на характеристики J-U, віддалені від  $U=0$ . З рівняння (1.6), щільність прямого струму, екстрапольована логарифмічно до нульового прикладеного прямого зміщення, має перетин в

$$J_s = A^{**}T^2 \exp(-q\phi_{SB0}/k_B T) \quad (1.8)$$

Таким чином, бар'єр можна витягнути з графіку  $\ln J$  проти прикладеної прямої напруги, як показано на рис. 6. Нахил кривої J-U на рис. 6 також дає "фактор ідеальності" контакту, визначений [8]

$$n \equiv \frac{q}{k_B T} \frac{\partial U}{\partial(\ln J)} = \left(1 + \frac{\partial \Delta\phi}{\partial U} + \frac{k_B T}{q} \frac{\partial(\ln A^{**})}{\partial U}\right) \quad (1.9)$$

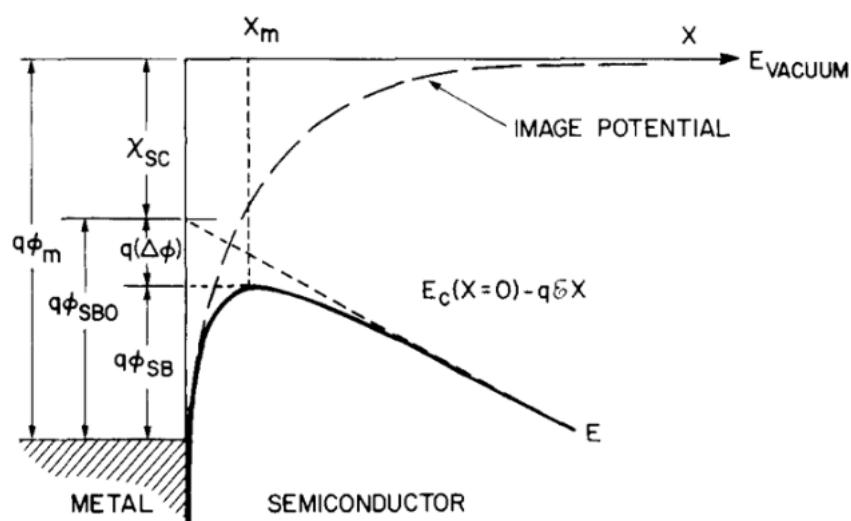


Рисунок 1.5 – Принципова діаграма енергетичної смуги між металевою поверхнею та напівпровідником. Робота виходу з металу –  $\phi_M$ . Спорідненість електрона до напівпровідника дорівнює  $\chi_{SC}$ . Ефективні бар'єри знизилися з  $\phi_{SB0}$  до  $\phi_{SB}$ , коли до контакту застосовується електричне поле [8]

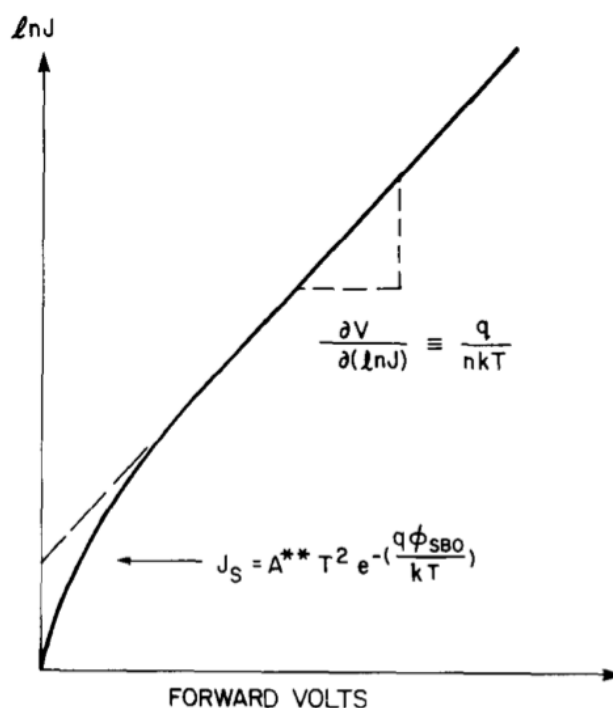


Рисунок 1.6 – Пряма струмова щільність  $J$  порівняно із застосованою напругою для контакту метал-напівпровідник [1]

Загалом, вторинний і третій член у (1.9) набагато менше одиниці, так що  $n = 1$ . Різні фізичні процеси можуть сприяти  $n$  значенням, відмінним від одиниці. Сюди входять тунелювання крізь бар'єр, проміжні шари з новими діелектричними та транспортними властивостями [1], а також рекомбінація або захоплення в станах поблизу межі розділу та в напівпровідниковій смужі зон. Приблизна форма рівняння (6), який явно містить  $n$

$$J = A^{**} T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{SB0}}{k_B T}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{nk_B T}\right) - 1\right] \quad (1.10)$$

Екстраполяція  $\ln J$  до нульової прикладеної напруги з метою отримання  $\phi_{SB}$  не є надійною процедурою для  $n$  значень, що суттєво відрізняються від одного [20]. Рівняння (1.6) можна використовувати для вилучення  $\phi_{SB0}$  із зворотного струму за

умови, що струми генерації-рекомбінації в області збіднення є малими порівняно зі струмом емісії Шотткі. Другим методом визначення висоти бар'єру Шотткі є методика ємність-напруга. Тут ємність збідненого шару можна визначити, накладаючи змінну напругу на зміщення постійного струму через напівпровідник. Це створює заряди одного знаку на металі, заряди протилежного знаку в напівпровіднику та модуляцію ширини шару виснаження. Оскільки область заряду поверхневого простору має ефективний імпеданс  $R + 1/i\omega C$ , ємність шару виснаження  $C$  і квадратуру провідності напівпровідника  $1/R$  можна розділити методами блокування [20]. Ця процедура також має перевагу зменшення зворотного шуму від землі. Ємність збідненого шару на межі розділу складає  $C = \epsilon_S \Omega / w$ , де  $\Omega$  – площа контакту. За рівнянням (1.4),

$$C = \Omega [2\pi Nq\epsilon_S / (V_B - V)]^{\frac{1}{2}} \quad (1.11)$$

і в міру збільшення зворотного зміщення  $w$  збільшується, тоді як  $C$  зменшується. Як результат, графік  $C^{-2}$  проти прикладеної напруги дає пряму лінію з нахилом

$$\frac{d(C^{-2})}{dV} = 1/(2\pi Nq\epsilon_S \Omega^2) \quad (1.12)$$

як показано на рис. 7. Відсікання напруги цієї лінії  $V_B$  є вигином енергетичної зони в області поверхневого заряду. Тоді висота бар'єру Шотткі для напівпровідників n-типу  $\phi_{SB}^n$  дорівнює

$$\phi_{SB}^n = qV_B + qV_n - \Delta\phi \quad (1.13)$$

де  $\Delta\phi$  – виправлення сили зображення, а об'єм  $V_n = (E_c - E_F)_{bulk}$  визначений на рис. 1 і може бути отриманий, якщо відомі щільність легування структури та ефективна маса. Як визначено рівнянням (1.12), нахил рис. 7 дає щільність носія у внутрішній частині області збіднення. З вимірювання  $C$  і  $dC/dV$  можна отримати  $d(C(V)^{-2})/dV$  і  $w(V)$ , щоб отримати профіль легування області поверхневого заряду напівпровідника.

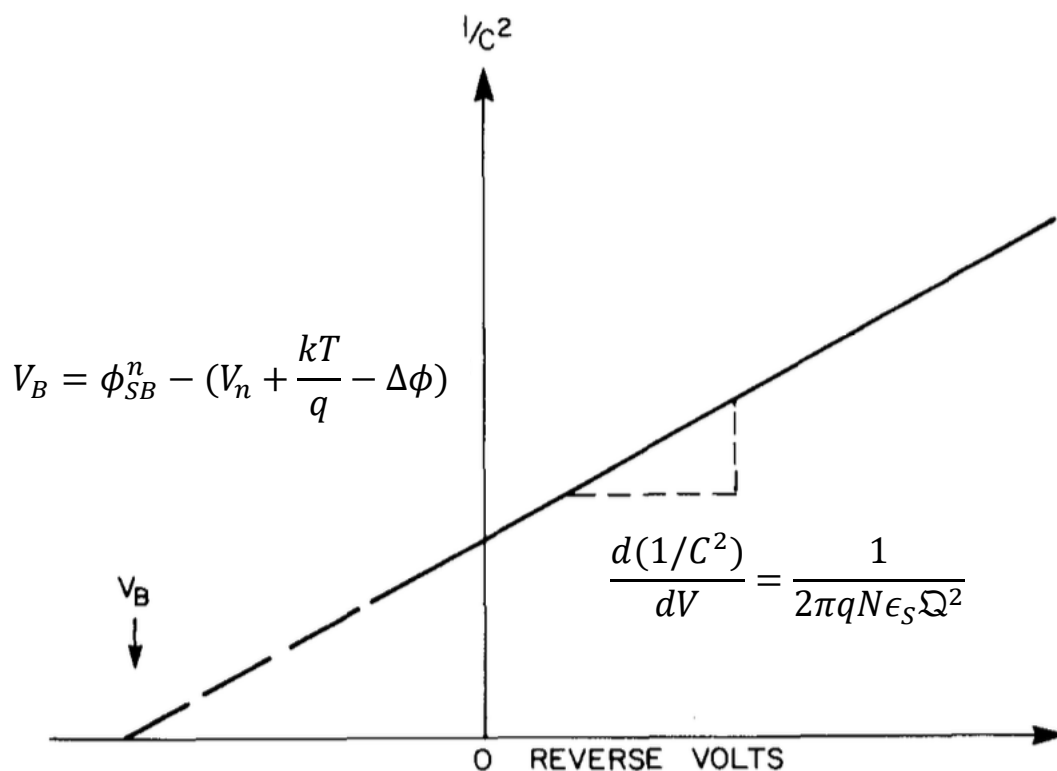


Рисунок 1.7 – Графік  $1/C^2$  проти  $V$  для ідеального контакту метал-напівпровідник. Перетин напруги  $V_B$  дорівнює згину смуги в області поверхневого заряду і пов'язаний з висотою бар'єру Шотткі  $\phi_{SB}^n$ , як зазначено [1]

## РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЯ ПРОМИСЛОВОГО ВИГОТОВЛЕННЯ ДІОДІВ ШОТТКІ

### 2.1 Загальний опис технології

Розглянуто метод виготовлення діода, при якому на етапі процесу між підкладкою і шаром полікремнію розміщується шар оксиду. Оксидний шар дозволяє використовувати процес сухого травлення до кінцевої точки, що, в свою чергу, дозволяє домогтися ефективнішої мініатюризації схеми у порівнянні з процесами рідинного травлення. В результаті утворюється більш ідеальний бар'єр Шотткі між анодом з силіциду металу і підкладкою, з відповідним поліпшенням коефіцієнта не ідеальності діода. Крім того, оксидний шар усуває проблеми вирівнювання маски Шотткі і додатково покращує робочі характеристики діодів за рахунок виключення паразитних діодних переходів. Процес може бути реалізований з мінімальним відхиленням від інших основних процесів, які використовуються для виготовлення подібних схем[21].

У напівпровідникових схемах використання діодів з бар'єром Шотткі є популярним засобом запобігання насичення транзисторів. Діод з бар'єром Шотткі підтримує низьку напругу на переході база-колектор, тим самим запобігаючи прямому зміщенню цього переходу і насиченню транзистора. В результаті виходить схема напівпровідникового транзистора відома як транзистор з «затискачем» Шотткі.

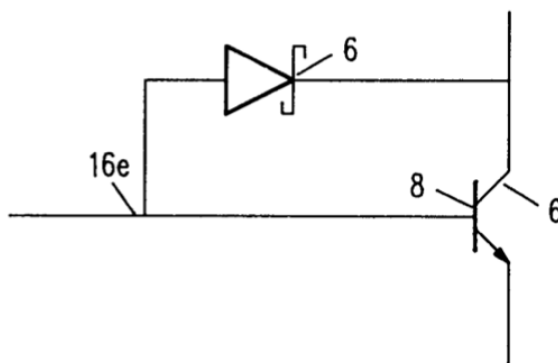


Рисунок 2.1 – Схематичне позначення транзистора із «затискачем» Шотткі [21]

Ефективність затиску Шотткі обмежена коефіцієнтом не ідеальності бар'єрного переходу. Типовий діод Шотткі формується шляхом нанесення металевого шару на слабологований кремній матеріал N-типу. Нерівності на поверхні матеріалу N-типу викликають дефекти контакту метал-напівпровідник з N-типу. Ці дефекти в контакті металу з кремнієм N-типу вносять свій вагомий внесок в неідеальність одержаних структур[21].

У типових процесах виготовлення шар  $\alpha$ -Si, нанесений на поверхню напівпровідника, витравлюють в бажаному місці, щоб оголити монокристалічний кремній N-типу. Через постійні зменшення розмірів напівпровідникових ланцюгів, площа бар'єрного діода  $i$ , отже, площа, яку необхідно витравити, продовжує зменшуватися в розмірах. Обмежена площа травлення в сучасних схемах виключає використання процесу вологого травлення, і необхідно використовувати процес сухого травлення[21].

І  $\alpha$ -Si, що підлягає травленню, і легований кремній, що лежить під ним, має однаковий хімічний склад. Таким чином, в типовому процесі травлення неможливо визначити де закінчується  $\alpha$ -Si, за допомогою детектування кінцевої точки, і починається монокристалічний кремній N-типу, який лежить під ним. Тому використовується процес травлення за часом, при якому травлення триває протягом періоду, необхідного для стравлювання  $\alpha$ -Si, розрахованого по товщині цього матеріалу[21].

Цей, синхронізований за часом, процес травлення сприяє утворенню неоднорідностей на поверхні кремнієвої області N-типу. По-перше, процес травлення за часом є не до кінця точним, і процес травлення інколи поширюється за межі поверхні монокристалічного Si. По-друге, процес сухого травлення пов'язаний з деяким механічним розпиленням через бомбардування молекулами газу. Ця дія може викликати пошкодження структури монокристалічного Si, коли ця область піддається впливу газу. Виникаючі нерівності поверхні негативно позначаються на ідеальності бар'єру[21].

У кращому варіанті виготовлення, шар оксидного матеріалу поміщається між поверхнею монокристалічної напівпровідникової області N-типу і  $\alpha$ -Si, під час

процесу виготовлення. Оксидний матеріал має хімічний склад, відмінний від складу шару  $\alpha$ -Si або області монокристалічного кремнію N-типу. Цей факт дозволяє замінити процес травлення за часом, на процес травлення до кінцевої точки. В процесі травлення до кінцевої точки концентрація газів, складових плазмового газу, який використовується для травлення, відстежується шляхом аналізу спектра плазми. Таким чином, можна сказати, коли плазмовий газ протравлює через один матеріал і вступає в контакт з іншим. Помістивши оксидний шар між хімічно ідентичними матеріалами, які являють собою  $\alpha$ -Si, і монокристалічну область N-типу, можна ідентифікувати точки, в яких починається і закінчується травлення  $\alpha$ -Si і в яких починається травлення оксиду. Потім для видалення оксиду можна використовувати процес хімічного травлення плавиковою кислотою. Плавикова кислота не протравляє нижню область кремнію N-типу. Тим самим запобігаючи надмірному розтягненню монокристалічного кремнію N-типу. Крім того, виключається пошкодження поверхні області монокристалічного кремнію N-типу через іонне бомбардування під час травлення. Добутий в результаті діод з бар'єром Шотткі має поліпшений коефіцієнт не ідеальності, що, в свою чергу, покращує характеристики виготовленого пристрою[21].

## 2.2 Процес виготовлення

Технологію виготовлення планарного діоду Шотткі буде показано на прикладі структури, де в якості металу використовується титан. Такий діод формується на вже створеному планарному біполярному транзисторі, тому початкова структура і є не просто напівпровідниковою підкладкою, в звичному розумінні цього поняття.

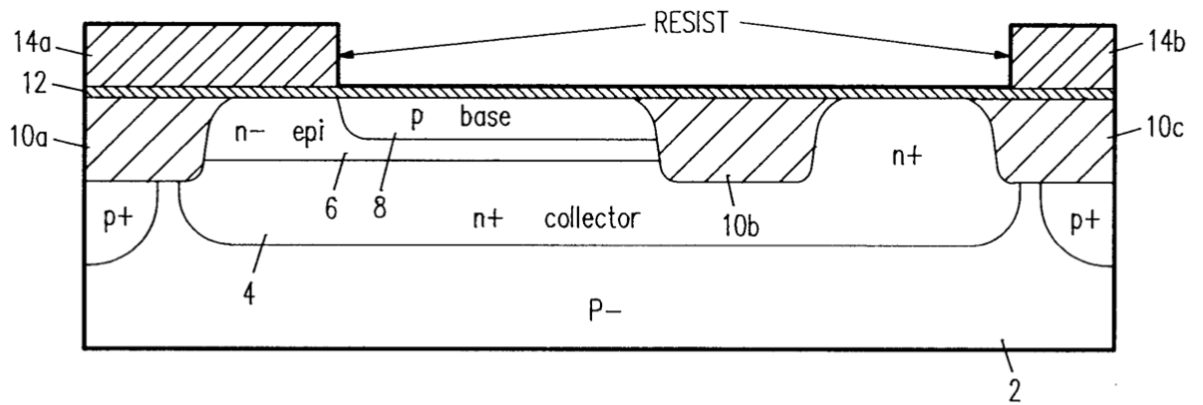


Рисунок. 2.2 – Кремнієва підкладка, оброблена стандартними способами, на яку були нанесені оксидний шар і маска, відповідно до необхідної форми [21]

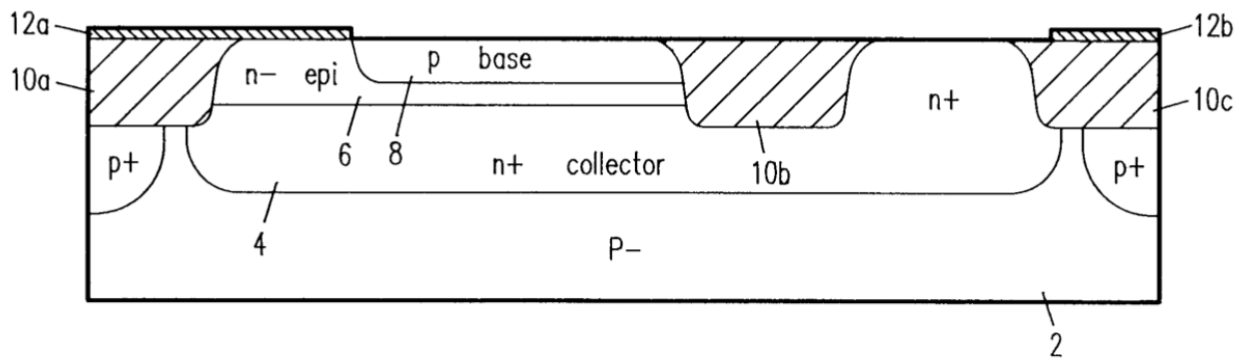


Рисунок 2.3 – Кремнієва підкладка, на якій оксидний шар був вибірково протравлений [21]

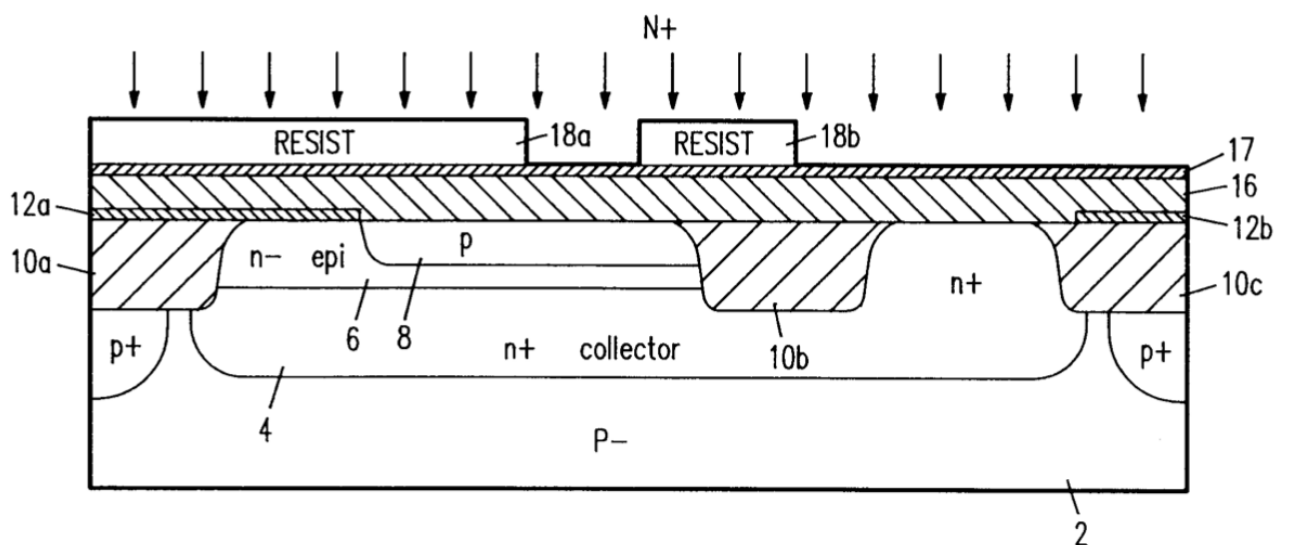


Рисунок 2.4 – Кремнієва підкладка, на яку нанесено шар полікремнію та маска імплантату поверх нього [21]

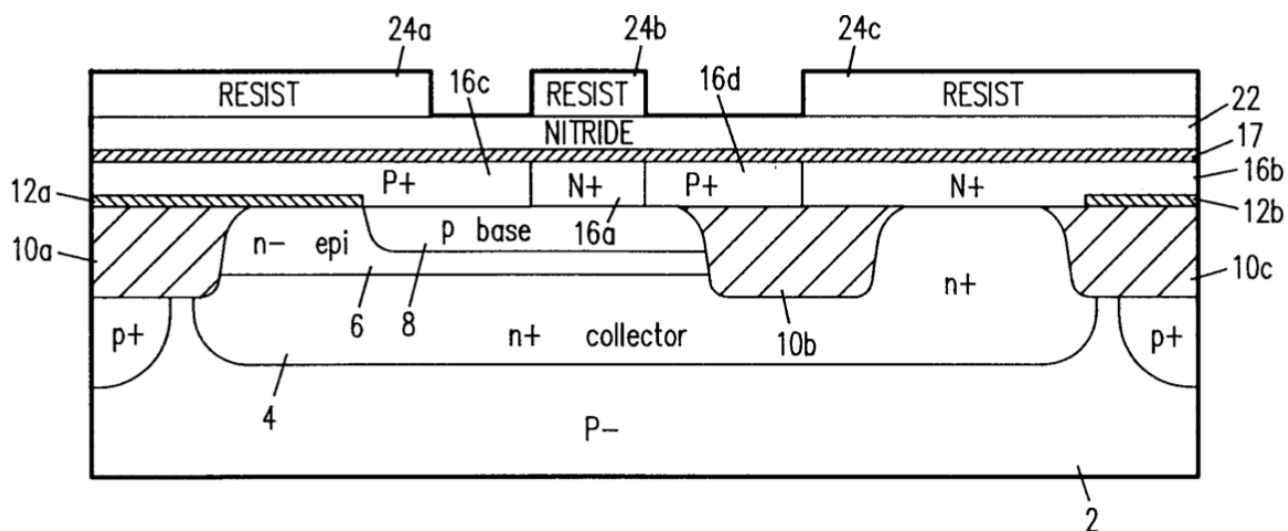


Рисунок 2.5 – Кремнієва підкладка, на якій вирощено шар нітриду кремнію в якості маски окислення [21]

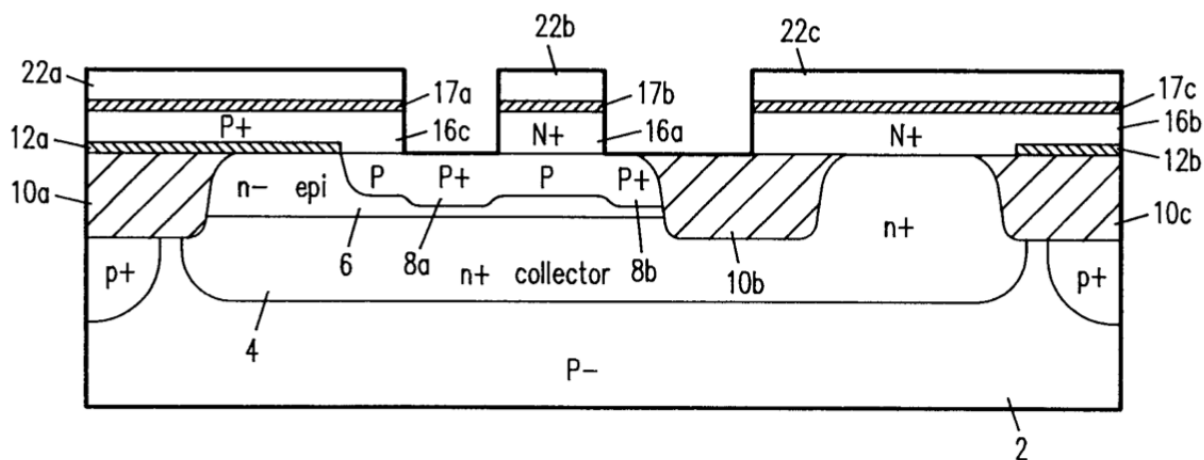


Рисунок 2.6 – Кремнієва підкладка після імплантації P і видалення маски [21]

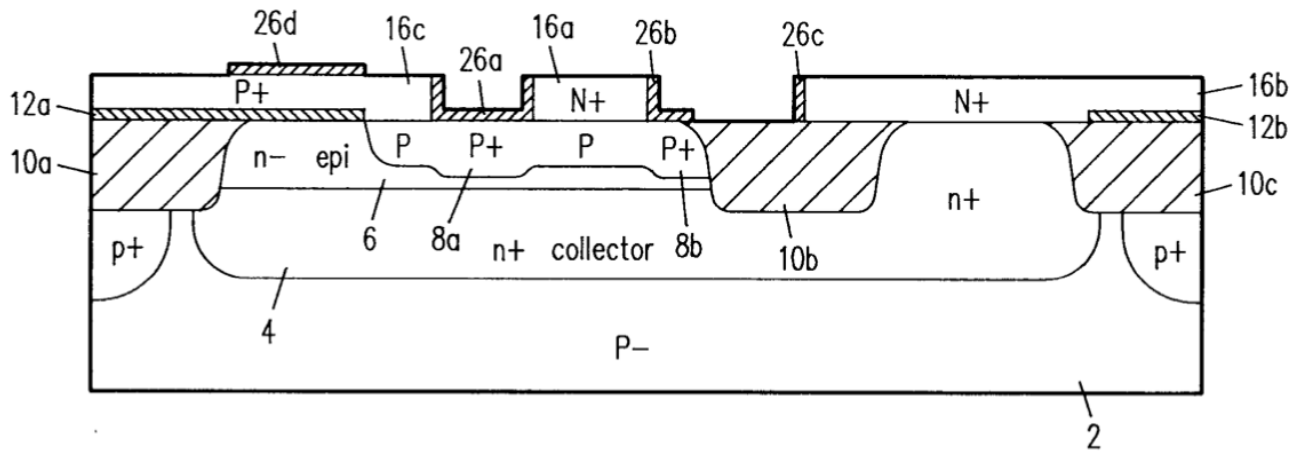


Рисунок 2.7 – кремнієва підкладка, що показує травлення замаскованого нітридного шару і подальший відпал та термічне окислення. Примітка: шар оксиду над областю полікремнію, де буде протравлено контакт Шотткі. Потім видаляється нітрид, що залишився [21]

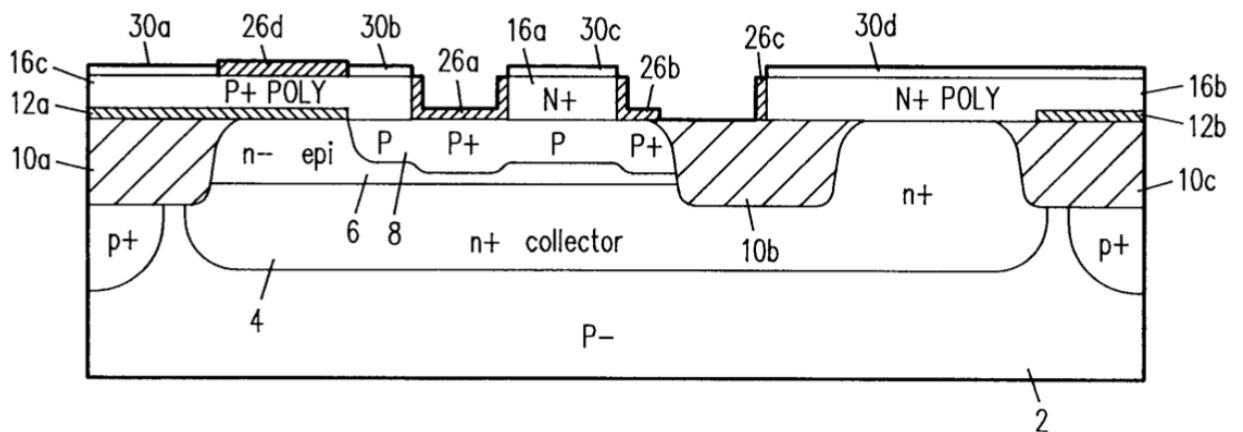


Рисунок 2.8 – кремнієва підкладка, що показує осадження і утворення силіциду титану відповідно до структури даного діоду [21]

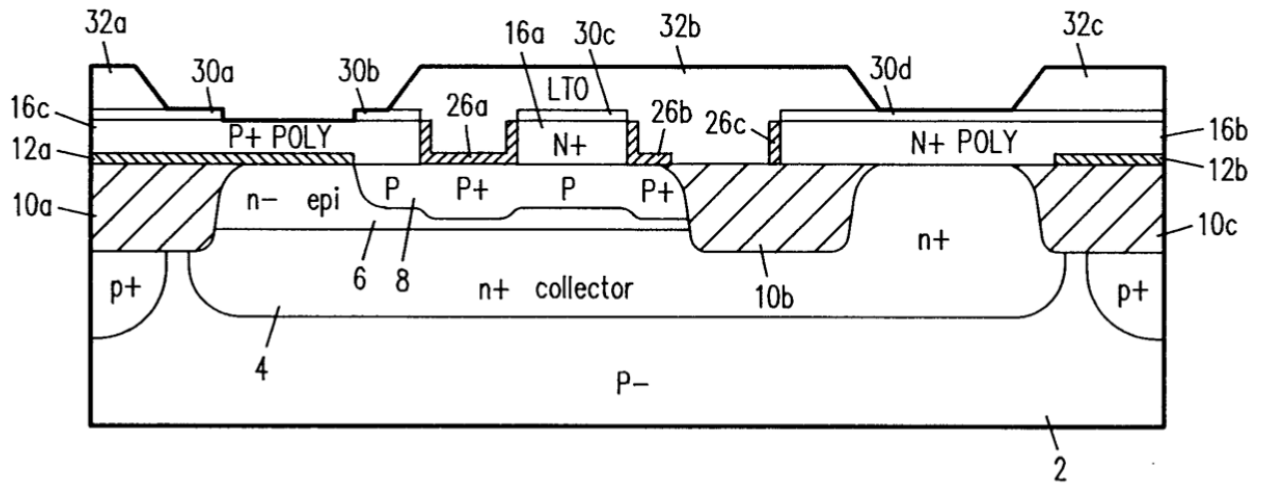


Рисунок 2.9 – Кремнієва підкладка, на якій продемонстровано нанесення низькотемпературного оксиду і травлення LTO з використанням контактної маски [21]

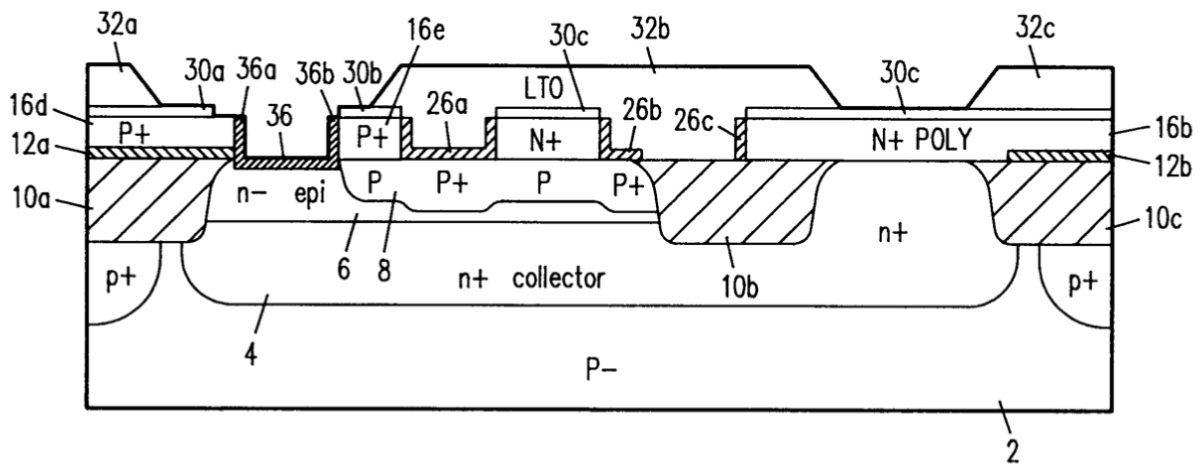


Рисунок 2.10 – Кремнієва підкладка, яка включає діод з бар'єром Шоттки з силіциду титану, сформований відповідно до конструкції, а також показує еквівалент схеми [21]

## РОЗДІЛ 3. ОПИС ВИКОРИСТАНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

### 3.1 MathCad 15

Пакет MathCad – математичний автоматизований автоматизований програмний пакет, створений MathSoft (США), який має високу здатність до виконання розрахункових завдань різних напрямків та складності.

MathCad – це унікальна колекція програм, що містить низку сучасних числових методів комп'ютерної математики. Він включає експерименти, правила та методи математичного обчислення, накопичені в результаті розвитку математики протягом багатьох років.

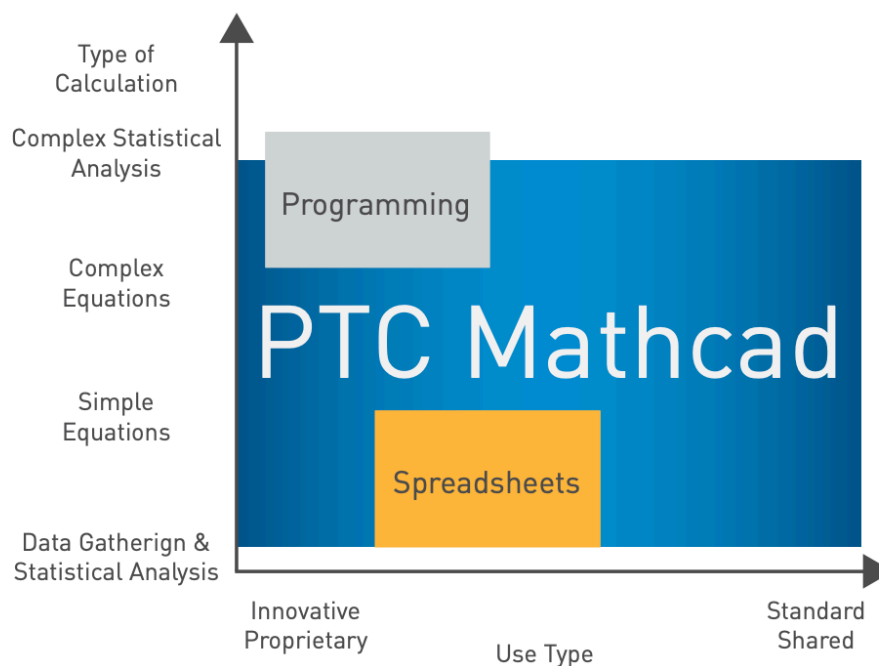


Рисунок 3.1 – Залежність програмного забезпечення від необхідних задач. Як помітно, MathCad є універсальним інструментом для інженерних потреб [22]

### 3.2 Можливості обраного програмного пакету

Оскільки багато нових продуктів є варіантами існуючих конструкцій, важливо захопити та організувати оригінальний аналіз, прив'язаний до цих продуктів, щоб його могли знайти інші. Старі методи обчислення часто призводять до значної переробки, що, в свою чергу, створює триваліші терміни розробки, зв'язує цінні ресурси і в кінцевому підсумку уповільнює весь процес проектування.

Пакет MathCad – це програмний засіб для інженерних та обчислювальних робіт, він призначений для професійних математиків, інженерів – технологів. За допомогою нього можна розв'язувати алгебраїчні та диференціальні рівняння зі змінними та інваріантними параметрами, аналізувати функції та шукати їх екстремуми, будувати таблиці, графіки та інші подібні завдання для аналізу знайдених рішень. Mathcad також має власну мову програмування для вирішення більш комплексних задач.

MathCad – це просто інструмент, який дозволяє зосередитись на поняттях та логіці методів, алгоритмів та позбутися надмірних ручних обчислювальних завдань. Але цей інструмент не можна використовувати як наочний посібник, не розуміючи фізичного значення завдання, яке виконується.

У MathCad математичні рівняння записуються на папері так само, як і на папері. Результати також можна отримати одночасно. Користувач може легко писати коментарі до рівнянь, а також малювати дво- та тривимірні графіки. Однією з переваг MathCad є здатність виконувати складні обчислення. MathCad пропонує безліч можливостей у вирішенні проблеми користувача, підготовці всіх наукових праць, їх форматуванні та покращенні. MathCad може розуміти більше ста систем лінійних та нелінійних рівнянь зі змінними та константами, операцій з матрицями та векторами, алгебраїчних обчислень, інтегралів Лапласа, Фур'є, масивів, простих диференціальних рівнянь, граничних умов, спеціальних похідних диференціальних рівнянь, поліномів. MathCad дозволяє візуалізувати результати наукової роботи за допомогою графіків. Користувач зможе легко зобразити функції у дво- та

тривимірній графіці, різні кольорові види, площини та простір. Вікно довідки MathCad дуже просте у використанні, з його допомогою можливо легко шукати потрібну інформацію з усього представленого каталогу.

Математичне програмне забезпечення надає інженерним командам спільні документи, які пояснюють все, що їм потрібно знати про процес проектування, включаючи текст, інтерактивні математичні розрахунки, графіки та фактичні креслення та моделі. Багаторазові аркуші можна зберігати у декількох форматах, включаючи Microsoft Word, Adobe® PDF, HTML та XML, що полегшує обмін інформацією з різними зацікавленими сторонами, навіть якщо вони використовують різні програми для управління документами, програми моделювання та рішення PDM[22].

Використовуючи стандартні математичні позначення, інтегрований текст та графічні дисплеї, програмне забезпечення для обчислень може автоматично генерувати читабельні документи, які легко зрозуміти вгору і вниз по ланцюгу управління та між різними мультикультурними командами.

### 3.3 Причини вибору

Правильне програмне забезпечення для обчислень може бути потужним інструментом, який дозволяє інженерним командам легше вирішувати проблеми, генерувати ідеї, ділитися важливими даними та ловити помилки, перш ніж вони матимуть великі наслідки.

Дослідження дизайну розробки та аналіз компромісів – це найкращі практики, які допомагають інженерам швидше робити кращий вибір дизайну, знаючи, що вони оцінили всі найкращі варіанти. Використовуючи математичні моделі для встановлення обмежень продуктивності та кривих компромісу, інженери можуть швидко визначити дизайнерське рішення, яке найбільш ефективно відповідає вимогам продукту. Добре задокументоване дослідження або аналіз повинні дати зрозуміти, чому запропонована конструкція пропонує найкращий компроміс між продуктивністю та вартістю, і надати рецензентам високу впевненість у тому, що

кращого рішення не було пропущено. Програмне забезпечення для обчислень також може підвищити точність і, отже, ефективність роботи окремих інженерів та інженерних груп.

Стандартизуючи спосіб вирішення та документування розрахунків, організації можуть зробити цінну інженерну інформацію видимою та доступною для ключових людей у всій організації. Це полегшує перевірку розрахунків іншого інженера, повторне використання розрахунків без необхідності їх переписувати, отримувати схвалення керівництва та іншим чином ефективніше співпрацювати.

Окрім внутрішнього сприяння передачі знань, програмне забезпечення для математичного обчислення полегшує організаціям звітування перед регуляторними органами та клієнтами, відповідальними за аудит процесів якості постачальників[22].

Використовуючи програмне забезпечення для математичного розрахунку, інженери-електроніки можуть передбачити ефективність конструкцій.

Програмне забезпечення для обчислення може бути використано на самому початку для визначення відповідних фізичних розмірів та параметрів для таких речей, як значення компонентів, параметри схеми та відгуки та властивості сигналу перед тим, як розпочати фазу детального проектування та моделювання. На відміну від електронних таблиць, які потребують складних формул для перетворення вимірювань, програмне забезпечення для математичного обчислення забезпечує вбудоване перетворення одиниць та інтелектуальність одиниць.

Електронні таблиці та мови програмування по суті приховують логіку інженерних рішень, що значно ускладнює швидку та належну перевірку складної роботи. При застосуванні застарілих методів розрахунку помилки частіше з'являються в проекті, коли витрати на переробку помножуються в геометричній прогресії. Або ще гірше, помилки можуть потрапити в кінцевий продукт. Очевидно, що навіть чесні помилки представляють серйозний ризик для більшості організацій, що займаються розробкою продуктів, і програмне забезпечення для обчислень робить набагато кращу роботу, зводить їх до мінімуму.

Електронним таблицям не вистачає засобів управління та документації, необхідних для належної простежуваності. З іншого боку, програмне забезпечення для обчислень спрощує та впорядковує документацію, що є критично важливою для спілкування та дотримання ділових стандартів та стандартів забезпечення якості. Вся інженерна інформація знаходиться в одному місці з відповідними анотаціями: Розрахунки, методи та значення можуть обмінюватися, як компанія вважає за потрібне, широкому колу учасників поза інженерним підрозділом[22].

Експерт з електронних таблиць Раймонд Панько зазначає, що «кожне дослідження, яке намагалося виміряти помилки, без винятку, виявляло їх із такою швидкістю, яка була б неприйнятною в будь-якій організації». Рік Батлер, аудитор, який пише та широко говорить про характер електронних таблиць, схильний до помилок, погоджується, стверджуючи, що розробники електронних таблиць пропускають більше 80% власних помилок, а зовнішні тестери – більше 50 % проектної логіки та 34 % помилки програми[22].

Даний програмний пакет є достатньо простим та зрозумілим для використання. Розрахунок електрофізичних параметрів діодів Шотткі – задача складна. Саме тому в нагоді стає програмний комплекс, що дозволяє концентруватися саме на розрахунках та аналізі отриманих результатів, а не на методології розв'язування задачі. Це допомагає ефективно розподіляти затрачений час для виконання розрахунків.

Не менш важливим є універсальність MathCad – в одному і тому ж середовищі можна вести всі необхідні записи, розв'язувати рівняння та будувати графіки як функцій, так і по розрахованим дискретним точкам з перспективою подальшого аналізу та апроксимації.

Так, користуючись однією програмою стало можливим розрахувати електрофізичні параметри діоду Шотткі з контактом Au-Si та відразу ж побудувати вольт-амперні характеристики, за якими можна провести аналіз якості структури та доцільності її використання в електроніці.

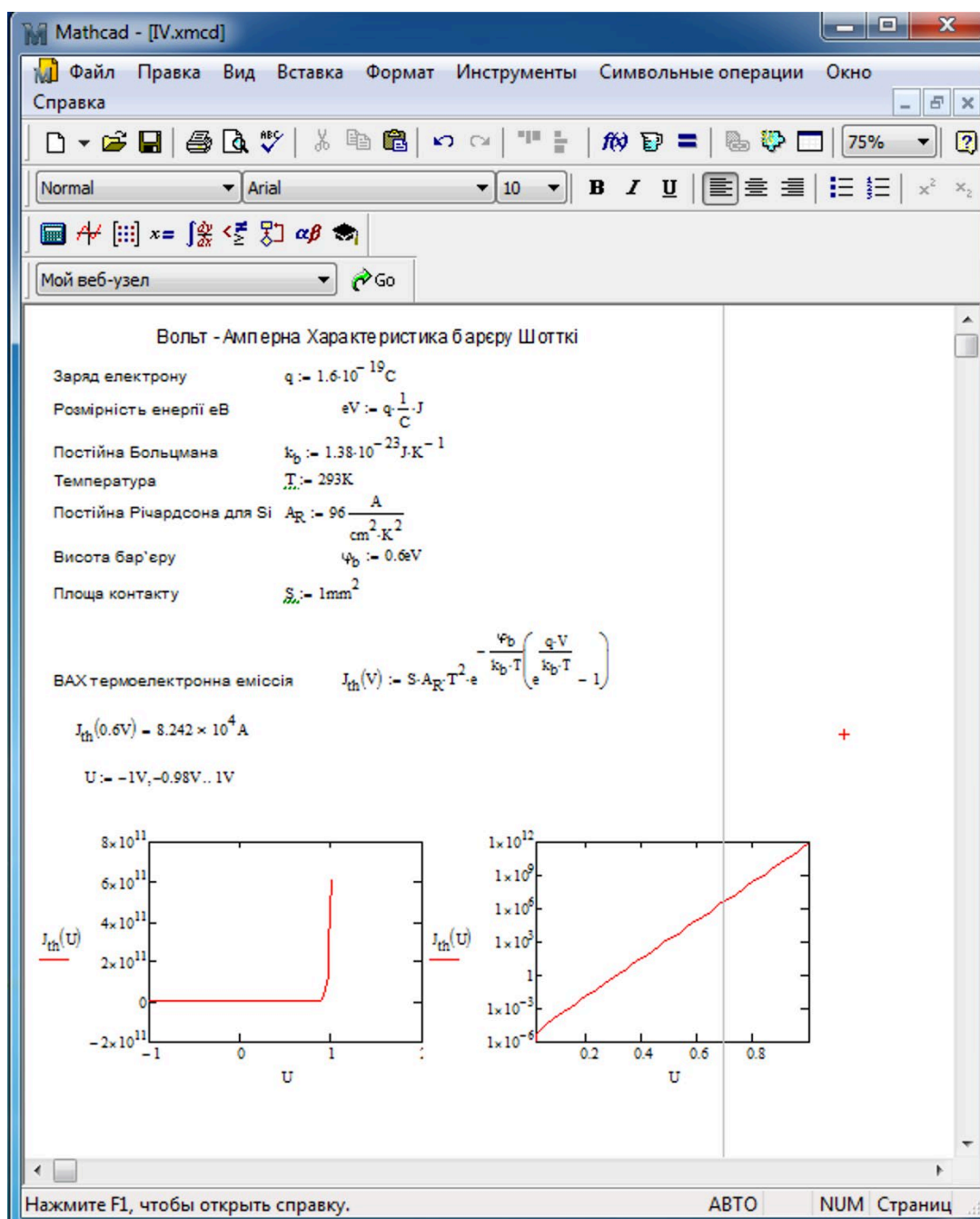


Рисунок 3.2 – Приклад використання пакету MathCad для аналізу струмопроходження в структурі Шоттки за допомогою термоелектронної емісії

## РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

### 4.1 Досліджувана структура

Переді мною постала задача дослідження досить класичної структури діоду Шотткі. Ця робота стала першим етапом для дослідження можливих модифікацій структури переходу Au-Si, концентрація домішок в кремнії  $N_D = 10^{16} \text{cm}^{-3}$ . Досліджувана структура представлена на рис. 20.

Кожна розробка нових конструкцій приладів неодмінно починається з етапу дослідження типової структури, без внесених значних змін. Такий стартовий огляд у подальшому є опорним для порівняння витрачених зусиль та коштів на доробки з отриманою вихідною ефективністю. Далі ця конструкція буде покроково ускладнюватися та досліджуватися.



Рисунок 4.1 – Структура діода Шотткі, який було досліджено

На подальших етапах розробки під шар золота планується імплантувати наноточки Au для підвищення плазмон-поляритонного резонансу, що в свою чергу підвищує ефективність генерації потоку електронів, для збільшення струму через діод, та швидкодію отриманого приладу.

Шар Au утворено методом вакуумного напилення, з використання маски, оскільки для утворення випрямного контакту не потрібно робити його на всю площу пластини Si. Для подальшого дослідження було створено 3 структури, що відрізняються саме товщиною шару золота. Це було досягнуто за допомогою

випаровування, в камері вакуумної установки, різного об'єму вихідного матеріалу, а саме – Au.

Нижня частина отриманого діоду, утворена з шару Al, оскільки цей метал дозволяє створити гарний та досить дешевий омичний контакт.

#### 4.2 Метод одержання ВАХ

Для дослідження отриманих, методом вакуумного напилення, структур діодів, а саме отримання ВАХ, було зроблено конструкцію, що включає в себе пару притискних контактів, один з яких є точковим – він притискається до контактного вікна з шаром Au. В ролі іншого контакту виступає плоский тримач, виготовлений з Cu, задля отримання високої провідності, хорошого контакту, та мінімального впливу вимірювального обладнання на електро-фізичні характеристики. Вказана конструкція зображена на рис.21.

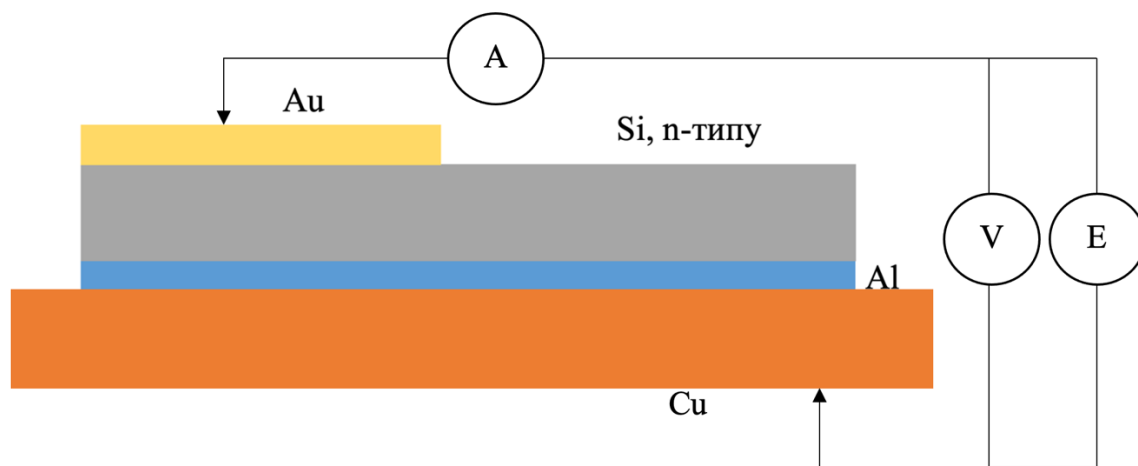


Рисунок 4.2 – Конструкція вимірювального стенду

Для отримання ВАХ, крім зразка та контактів, потрібні вимірювальні прилади, вольтметр V та амперметр А. Також потрібне джерело живлення E, яке можна вручну керувати, для отримання потрібної залежності.

Звісно ж, представлена конструкція вимірювального стенду зазнає невеликих змін у залежності від етапу вимірювання ВАХ. Відмінності необхідні для зняття окремо прямої та зворотної гілки.

## 4.3 Отримані ВАХ досліджуваних зразків

Як було вказано, для дослідження було отримано 3 зразки, які відрізняються товщиною шару золотого контакту, для більшої наглядності отриманих результатів.

Таблиця 4.1 Виміряна ВАХ для зразка №1 (товщина Au – 39 нм)

U, В	I, мкА	U, В	I, мкА	U, В	I, мкА
-3.5	-0.9	0.2	0.03	3.4	1.25
-3.4	-0.85	0.35	0.035	3.45	1.5
-3.2	-0.8	0.5	0.04	3.5	1.75
-3.05	-0.77	0.6	0.05	3.55	1.8
-2.85	-0.75	0.75	0.1		
-2.75	-0.73	0.9	0.12		
-2.6	-0.7	1.05	0.13		
-2.5	-0.6	1.15	0.16		
-2.4	-0.55	1.3	0.18		
-2.25	-0.53	1.45	0.2		
-2.15	-0.51	1.6	0.22		
-1.9	-0.47	1.75	0.24		
-1.8	-0.43	1.85	0.25		
-1.65	-0.4	2	0.26		
-1.55	-0.3	2.15	0.27		
-1.4	-0.27	2.25	0.29		
-1.25	-0.25	2.45	0.31		
-1.1	-0.24	2.55	0.35		
-1	-0.2	2.7	0.39		
-0.85	-0.16	2.8	0.42		
-0.75	-0.12	2.9	0.5		

Продовження таблиці 4.1

-0.6	-0.1	3	0.6		
-0.45	-0.07	3.05	0.7		
-0.3	-0.05	3.1	0.76		
-0.2	-0.03	3.15	0.85		
-0.1	-0.03	3.25	0.95		
0	0	3.3	1.05		
0.1	0	3.35	1.17		

Таблиця 4.2 Виміряна ВАХ для зразка №2 (товщина Au – 24 нм)

U, В	I, мкА	U, В	I, мкА
-3.5	-0.3	0.75	0.03
-3.4	-0.27	0.9	0.035
-3.2	-0.25	1.05	0.04
-3.05	-0.24	1.15	0.045
-2.85	-0.22	1.3	0.05
-2.75	-0.2	1.45	0.06
-2.6	-0.19	1.6	0.12
-2.5	-0.18	1.75	0.24
-2.4	-0.17	1.85	0.3
-2.25	-0.16	2	0.4
-2.15	-0.15	2.15	0.5
-1.9	-0.14	2.25	0.7
-1.8	-0.13	2.45	0.8
-1.65	-0.12	2.55	1.2
-1.55	-0.11	2.7	1.5
-1.4	-0.1		
-1.25	-0.1		
-1.1	-0.1		

Продовження таблиці 4.2

-1	-0.1		
-0.85	-0.1		
-0.75	-0.1		
-0.6	-0.04		
-0.45	-0.04		
-0.3	-0.04		
-0.2	-0.03		
-0.1	-0.02		
0	0		
0.1	0		
0.2	0		
0.35	0.01		
0.5	0.02		
0.6	0.02		

Таблиця 4.3 Виміряна ВАХ для зразка №3 (товщина Au – 42 нм)

U, В	I, мкА	U, В	I, мкА	U, В	I, мкА
-3.5	-0.2	0.2	0	3.4	0.95
-3.4	-0.19	0.35	0.01	3.45	1.12
-3.2	-0.18	0.5	0.02	3.5	1.23
-3.05	-0.17	0.6	0.02	3.55	1.35
-2.85	-0.15	0.75	0.03		
-2.75	-0.14	0.9	0.035		
-2.6	-0.13	1.05	0.04		
-2.5	-0.12	1.15	0.045		
-2.4	-0.11	1.3	0.045		
-2.25	-0.11	1.45	0.045		
-2.15	-0.11	1.6	0.05		

Продовження таблиці 4.3

-1.9	-0.1	1.75	0.06		
-1.8	-0.09	1.85	0.09		
-1.65	-0.08	2	0.12		
-1.55	-0.07	2.15	0.15		
-1.4	-0.06	2.25	0.15		
-1.25	-0.06	2.45	0.17		
-1.1	-0.06	2.55	0.17		
-1	-0.06	2.7	0.19		
-0.85	-0.06	2.8	0.23		
-0.75	-0.06	2.9	0.25		
-0.6	-0.04	3	0.3		
-0.45	-0.04	3.05	0.45		
-0.3	-0.04	3.1	0.6		
-0.2	-0.03	3.15	0.65		
-0.1	-0.02	3.25	0.7		
0	0	3.3	0.8		
0.1	0	3.35	0.85		

З отриманих даних було побудовано ВАХ для подальшої роботи з ними в полі розрахунків.

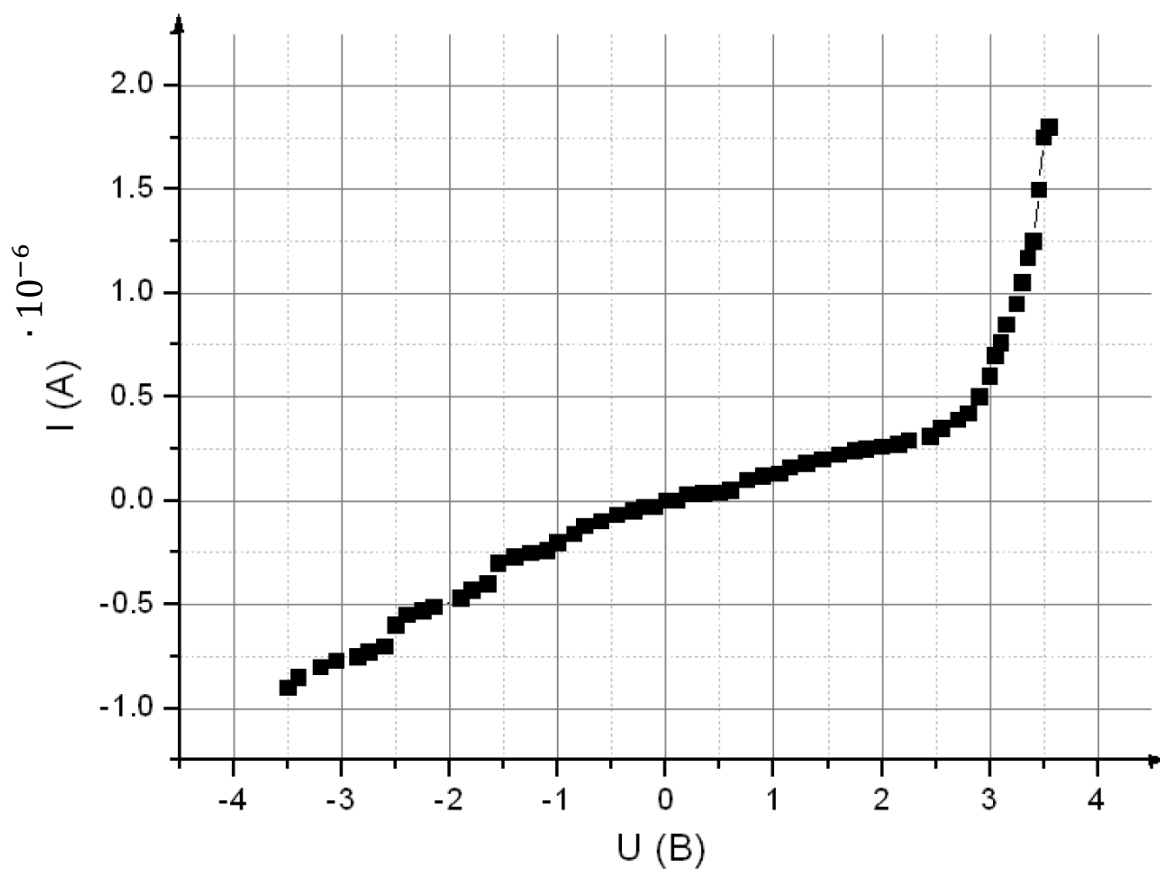


Рисунок 4.3 – ВАХ для зразка №1

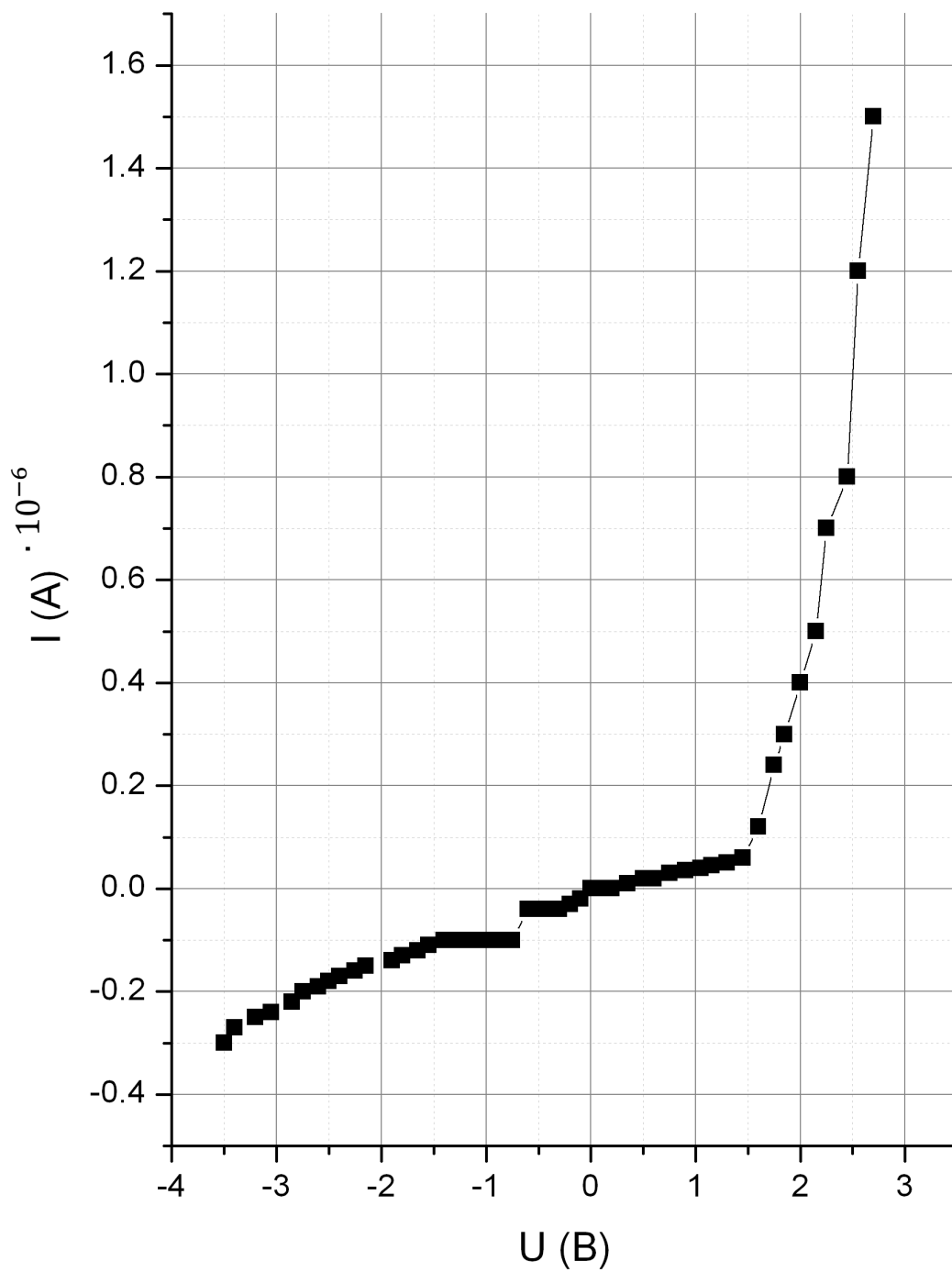


Рисунок 4.4 – ВАХ для зразка №2

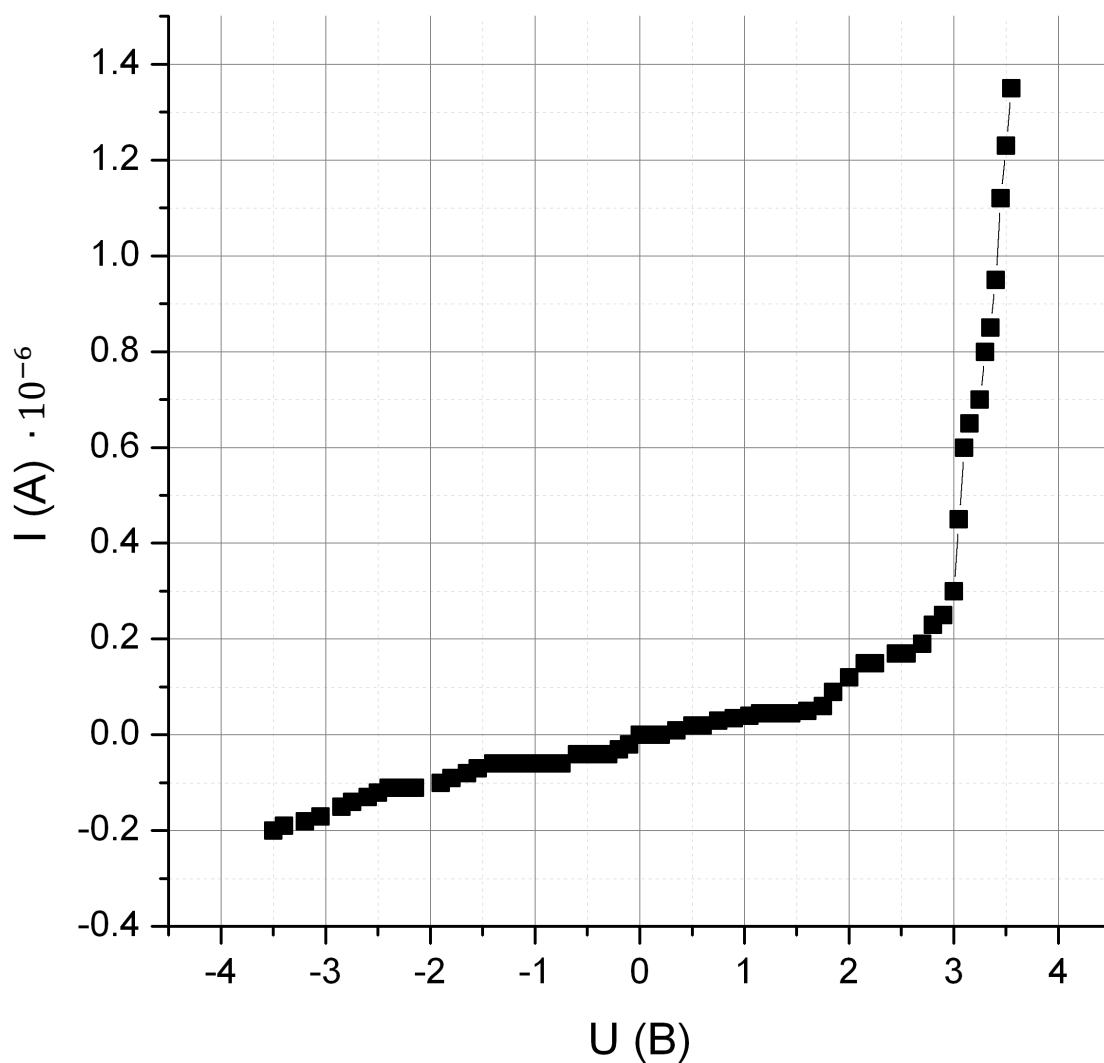


Рисунок 4.5 – ВАХ для зразка №3

#### 4.4 Розрахунок параметрів

Для початку потрібно розрахувати так званий фактор ідеальності  $n$ , який є мірою того, наскільки точно залежність діоду накладається на ВАХ ідеального діода.

$$n = \frac{q}{kT} \cdot \frac{\partial U}{\partial (\ln I)} \quad (4.1)$$

Оскільки експериментальні ВАХ були зняти у вигляді точок, потрібно перебудувати їх з логарифмічними значеннями по струму  $I$ . Відповідні залежності для подальших розрахунків подані на рис. 25-27.

Таблиця 4.4 Обраховані значення для побудови залежності  $\ln(I)$  від  $U$  для зразка №1

$U, B$	$\ln(I)$
2.45	-1.17118
2.55	-1.04982
2.7	-0.94161
2.8	-0.8675
2.9	-0.69315
3	-0.51083
3.05	-0.35667
3.1	-0.27444
3.15	-0.16252
3.25	-0.05129
3.3	0.04879
3.35	0.157
3.4	0.22314
3.45	0.40547
3.5	0.55962
3.55	0.58779

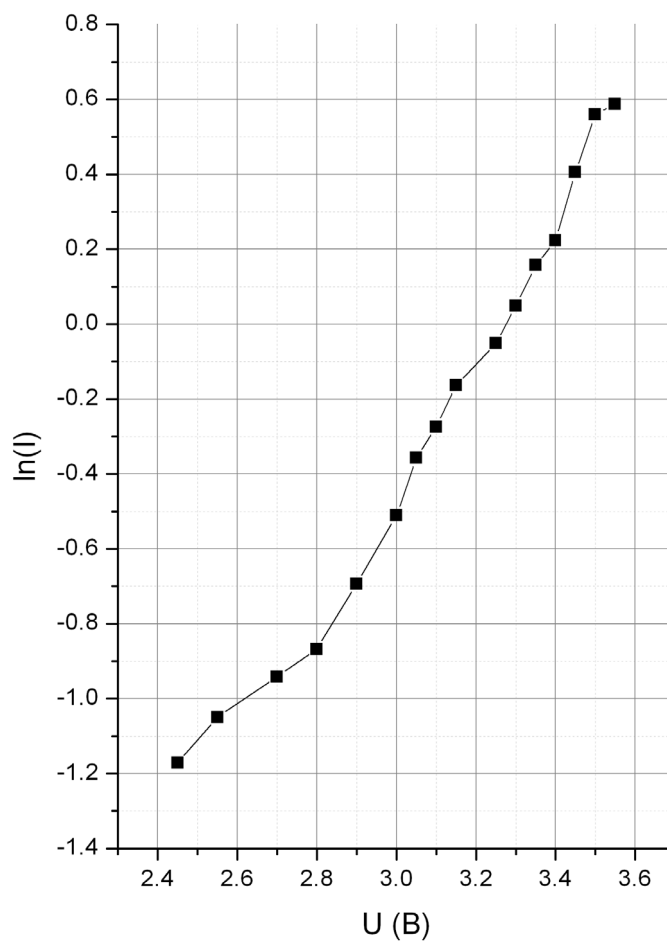


Рисунок 4.6 – ВАХ з логарифмічними значеннями по  $I$  для зразка №1

Таблиця 4.5 Обраховані значення для побудови залежності  $\ln(I)$  від  $U$  для зразка №2

$U, B$	$\ln(I)$
1.45	-2.81341
1.6	-2.12026
1.75	-1.42712
1.85	-1.20397
2	-0.91629
2.15	-0.69315
2.25	-0.35667
2.45	-0.10314
2.55	0.18232
2.7	0.50547

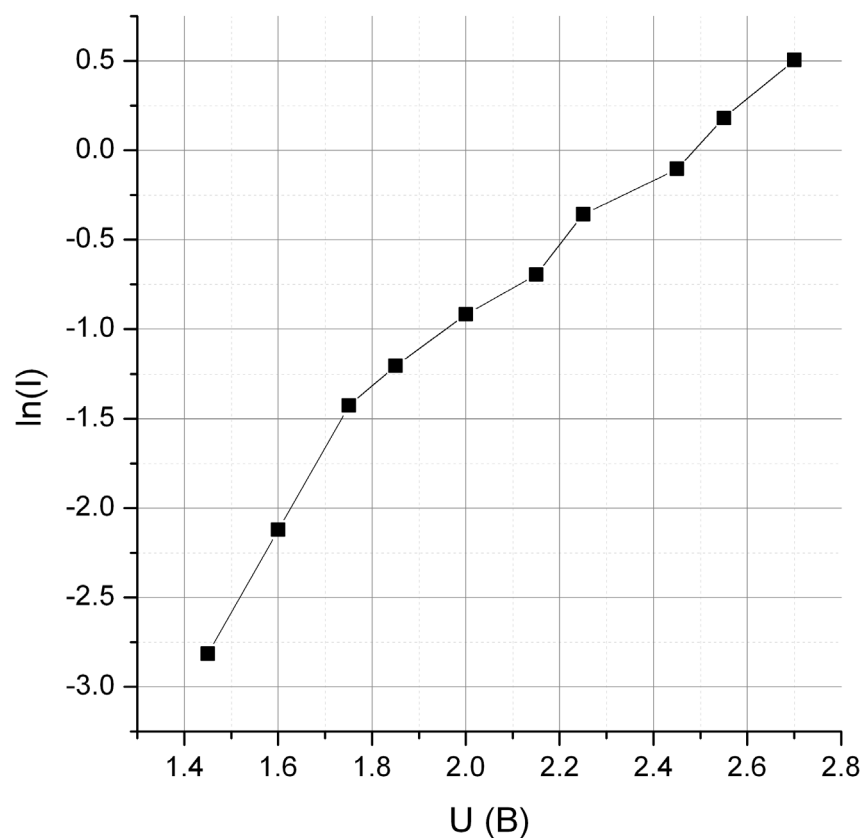


Рисунок 4.7 – ВАХ з логарифмічними значеннями по  $I$  для зразка №2

Таблиця 4.6 Обраховані значення для побудови залежності  $\ln(I)$  від  $U$  для зразка №3

U, B	ln(I)
2.55	-1.77196
2.7	-1.66073
2.8	-1.46968
2.9	-1.38629
3	-1.20397
3.05	-1.02034
3.1	-0.87451
3.15	-0.55941
3.25	-0.3451
3.3	-0.22314

## Продовження таблиці 4.6

3.35	-0.16252
3.4	-0.05129
3.45	0.11333
3.5	0.20701
3.55	0.3001

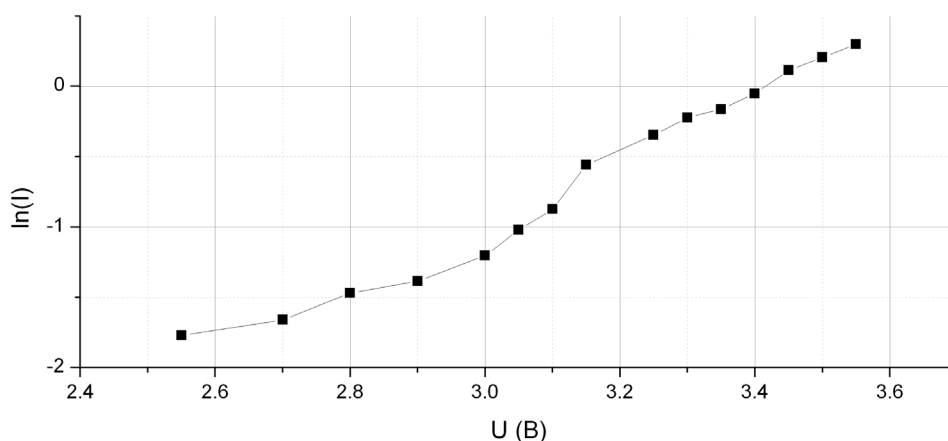


Рисунок 4.8 – ВАХ з логарифмічними значеннями по I для зразка №3

З отриманих залежностей 14-16, можна графічно визначити коефіцієнт не ідеальності  $n$ , як кут нахилу усередненого значення кривої до вісі  $x$ .

Таким чином для зразка №1  $n=2.12$ , для зразка №2  $n=0.91$ , а для зразка №3  $n=0.45$ .

Для розрахунку висоти потенціального бар'єру  $\phi_B$  для кожного з діодів, потрібно скористатися формулою (3.1), та (3.2).

$$\phi_B = \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{AST^2}{I_S} \right) \quad (4.2)$$

Де  $n$  – коефіцієнт не ідеальності,  $k$  – постійна Больцмана,  $q$  – елементарний заряд,  $I_S$  – струм насичення, визначений із (3.1),  $A$  – постійна Річардсона зі значенням  $112 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$ , а  $S$  – площа отриманого золотого контакту  $0.01 \text{ cm}^2$ .

Отже в результаті обрахунків отримано наступні значення  $\phi_B$ : для зразка №1 –  $\phi_B = 1.39\text{eV}$ , для зразка №2 –  $\phi_B = 0.6\text{eV}$ , а для зразка №3 –  $\phi_B = 0.31\text{eV}$ .

Виходячи з отриманих результатів, можна зробити висновки про правильність підбору товщини шару Au для використання в діодах Шотткі. Серед наявних зразків, найбільш наближеним до ідеальної структури є зразок №2, як по коефіцієнту не ідеальності, він досить близький до 1, так і по висоті бар'єру Шотткі  $\phi_B$ .

Зразки №1 та №3 показують, наскільки структура Шотткі є чутливою до зміни товщини шару Au. Зміна до 39нм внесла значні зміни як до висоти бар'єра, так і до коефіцієнта не ідеальності. Проте отриманий діод все ще знаходиться в рамках структур з бар'єром Шотткі.

А ось останній зразок, з найбільш товстим контактом Au, в результаті обрахунків, отримав найбільш провокативні значення основних параметрів. Можна сказати, що структура №3 є найменш якісною і не рекомендована до використання чи подальших модифікацій.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В роботі було розглянуто основні характеристики контакту типу бар'єр Шотткі як для ідеалізованої моделі, так і для реальних структур, а також загальноприйняті концепції формування цього бар'єру.

Було наведено модельні описи струмопроходження через межу контакту метал-напівпровідник та проаналізовано механізми утворення потенціального бар'єру на контакті метал-напівпровідник.. Розглянуто їх характерні особливості та наведено вольт-амперні характеристики.

В ході роботи було розібрано принцип формування структур діодів Шотткі, на прикладі транзистора із «затискачем» Шотткі.

За допомогою виготовлених трьох реальних структур, вдалося отримати результати у вигляді електрофізичних параметрів діодів, а саме – коефіцієнт не ідеальності та висота потенціального бар'єру.

За результатами аналізу одержаних даних можна зробити висновок про те, що для найкращих результатів, при використанні у електричних схемах, товщина шару золотого контакту має знаходитися в околі значення 20нм, оскільки саме за таких товщин реальна, вироблена структура, наближається, за своїми характеристиками та виглядом, до ідеального діоду Шотткі. Це ж в свою чергу вказує на високу ефективність отриманого зразку №2, у порівнянні з іншими.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. L.J. Brillson The structure and properties of metal-semiconductor interfaces / L.J. Brillson // Surface Science Reports. – 1982. – Vol 2. – P.123-326.
2. G.K. Teal Growth of germanium single crystals / G.K. Teal, J.B. Little // Physical Review. – 1950. – Vol. 78. – P. 647.
3. G.K.Teal Electron Devices / G.K.Teal // IEEE Trans. – 1976. – Vol. 23. – P. 621p.
4. R.N. Hall, Recrystallization Purification of Germanium // Physical Review – 1950. – Vol. 78. – P. 645.
5. W.G. Pfann Segregation of two solutes, with particular reference to semiconductors / W.G. Pfann, J. Metals // Physical Review. – 1952. – Vol 4. – P. 861.
6. P.H. Keck та M.J.E. Golay Crystallization of silicon from a floating liquid zone / P.H. Keck, M.J.E. Golay // Physical Review. – 1953. – Vol 89. – P. 1297.
7. A.H. Wilson The theory of electronic semi-conductors / A.H. Wilson // Proceedings Royal Society of London. – 1931. – Vol A133. – P. 458.
8. S.M.Sze Physics of Semiconductor Devices 2nd ed / S.M.Sze // Wiley-Interscience. – 1981. – ch. 5.
9. A.V. Joffe Electrical resistance of the contact between a semiconductor and a metal / A.V. Joffe // J. Phys.USSR. – 1946. – Vol 10. – P. 49.
10. W.E. Myerhof Contact potential difference in silicon crystal rectifiers / W.E. Myerhof // Physical Review. – 1947. – Vol. 71. – P. 727.
11. R. Benzer Ge-Ge Contacts / R. Benzer // Physical Review. – 1947. – Vol 71. – P. 141.
12. C.R. Crowell Attenuation length measurements of hot electrons in metal films / C.R. Crowell, W.G. Spitzer, L.E. Howarth, E.E. LaBate // Physical Review. – 1962. – Vol 127. – P. 2006.

13. A.G. Milnes Semiconductor Devices and Integrated Electronics / A.G. Milnes // Academic Press. – 1980. – P. 99.
14. H.B. Michaelson The work function of the elements and its periodicity / H.B. Michaelson // J. Appl. Phys. – 1977. – Vol 48. – P. 4729.
15. V.S. Fomenko Handbook of Thermionic Properties / V.S. Fomenko // Plenum Press Data Division. – 1966.
16. F.G. Allen Comparison of the photoelectric properties of cleaved, heated, and sputtered silicon surfaces / F.G. Allen, G.W. Gobeli // J. Appl. Phys. – 1964. – Vol 35. – P. 597.
17. J. Bardeen Surface states and rectification at a metal semi-conductor contact / J. Bardeen // Physical Review. – 1947. – Vol 71. – P. 717.
18. W. Shockley Modulation of conductance of thin films of semi-conductors by surface charges / W. Shockley, G.L. Pearson // Physical Review. – 1948. – Vol 74. – P. 232.
19. C.R. Crowell Current transport in metal-semiconductor barriers / C.R. Crowell, S.M. Sze // Solid-State Electron. – 1966. – Vol 9. – P. 1035.
20. M.P. Shaw Handbook on Semiconductors / M.P. Shaw // Device Physics. – 1981. – Vol. 4. – ch. 1.
21. Fabrication process for Schottky barrier diodes on a substrate: пат. EP0490236 Німеччина: H01L21/329 / McFarlane Brian, Marazita Frank, Readdie John. - № 91120753.8; заявл. 03.12.1991; опубл. 17.06.1992, Бюл. № 92/25. – 17с.
22. PTC inc. Making Better Decisions, Faster: How Electrical Engineers Are Improving Efficiency with Engineering Calculation Software / PTC inc. // PTC Mathcad Electrical Engineering-WP. – 2013. – Vol. 613.