

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МАТЕМАТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра прикладної фізики і наноматеріалів

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему: «ЕЛЕКТРО-ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ
КОНТАКТУ МЕТАЛ-НАПІВПРОВІДНИК НА МЕЖІ
РОЗДІЛУ Cu-Si»

Виконав: студент _____ 2 _____ курсу, групи _____ 8.1058
спеціальності _____ 105 прикладна фізика та наноматеріали
освітньої програми _____ прикладна фізика

М. І. Андраш

(ініціали та прізвище)

доцент кафедри прикладної фізики і
наноматеріалів, доцент, к. ф.-м. н.

Керівник

Яновський О. С.

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

Рецензент

доцент кафедри фізики твердого тіла, доцент,
к. ф.-м. н. Ананьїна О. Ю.

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

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет математичний

Кафедра прикладної фізики і наноматеріалів

Рівень вищої освіти магістр

Спеціальність 105 прикладна фізика та наноматеріали

(шифр і назва)

Освітня програма прикладна фізика

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
прикладної фізики і
наноматеріалів,
д.т.н., професор

Міщенко В.Г.

(підпис)

« 30 » травня 2019 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Андраш Миколі Івановичу

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема роботи Електро-фізичні властивості контакту метал-напівпровідник на межі розділу Cu-Si

керівник роботи Яновський Олександр Сергійович, к. ф.-м. н., доцент
(прізвище, ім'я та по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від « 29 » травня 2019 року № 811 – С

2. Строк подання студентом роботи 02.12.2019

3. Вихідні дані до роботи 1. Постановка задачі.
2. Перелік літератури.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Літературний огляд.

2. Випрямляючі та не випрямляючі властивості контакту метал-напівпровідник.

3. Дослідження властивостей на межі розділу Cu-Si.

4. Результати та їх обговорення.

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

Презентація

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 30.05.2019**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка плану роботи.	03.06.2019	
2.	Збір та обробка літературних даних.	22.06.2019	
3.	Контакт метал-напівпровідник.	15.10.2019	
4.	Експериментальна частина: виготовлення контакту Cu-Si та вимірювання ВАХ.	04.11.2019	
5.	Оформлення результатів, їх обговорення. Висновки до роботи.	02.12.19	
6.	Нормоконтроль кваліфікаційної роботи.	16.12.19	
7.	Захист кваліфікаційної роботи.	14.01.2019	

Студент _____
(підпис)М. І. Андраш
(ініціали та прізвище)Керівник роботи _____
(підпис)О. С. Яновський
(ініціали та прізвище)**Нормоконтроль пройдено**Нормоконтролер _____
(підпис)Н. І. Тихонська
(ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра «Електро-фізичні властивості контакту метал-напівпровідник на межі розділу Cu-Si»: 74 с. , 25 рис., 12 табл., 30 джерел.

МЕЖА РОЗДІЛУ МЕТАЛ-НАПІВПРОВІДНИК, ВИПРЯМЛЯЮЧИЙ КОНТАКТ, ОМІЧНИЙ КОНТАКТ, БАР'ЄР ШОТТКІ, ДІОДНА ТЕОРІЯ, ДИФУЗІЙНА ТЕОРІЯ, БАР'ЄР МОТТА.

Об'єкт дослідження – електро-фізичні властивості контакту метала з напівпровідником.

Мета роботи – визначення оптимальних технологічних режимів виготовлення контактів Cu-Si для отримання запірною або антизапірною типу контакту.

Методи дослідження – хімічна обробка, вакуумне напилення, відпал.

Проаналізовано та порівняно результати експериментальних та теоретичних даних. Визначено які фактори впливають на електро-фізичні властивості межі розділу контакту.

SUMMARY

Master's Qualification Thesis "Electrical and Physical Properties of Metal-semiconductor Contact on Cu-Si Interface": 74 pages, 25 figures, 12 tables, 30 references.

METAL-SEMICONDUCTOR INTERFACE, RECTIFIER CONTACT, OHMIC CONTACT, SCHOTTKY BARRIER, DIODE THEORY, DIFFUSION THEORY, MOTT BARRIER.

The object of study is the electrical and physical properties of metal-semiconductor contact.

The aim of the study is to determine the optimum technological modes of Cu-Si contacts formation in order to obtain the ohmic or rectifier type of the contact.

The methods of study are chemical treatment, vacuum deposition, annealing.

Results of experimental and theoretical data are analyzed and compared. The factors that influence the electrical and physical properties of the metal-semiconductor interface are determined.

ЗМІСТ

Завдання на кваліфікаційну роботу.....	2
Реферат	4
Summary	5
Вступ.....	8
1 Літературний огляд	10
1.1 Метали та їх електро-фізичні властивості на прикладі міді та алюмінію	10
1.2 Напівпровідники, електрофізичні властивості кремнію	12
1.3 Рівні Фермі для металу та напівпровідника	16
1.4 Контакт метал-напівпровідник, його електричні властивості.....	17
1.4.1 Бар'єр Шотткі	19
1.4.2 Випрямлення на бар'єрі Шотткі	20
1.4.3 Омічний контакт	22
1.5 Створення контакту метал-напівпровідник	22
1.6 Висновки з літературних джерел та постановка задачі.....	23
2 Контакт метал-напівпровідник	25
2.1 Випрямляючі та невикористані контакти	25
2.2 Фізичний заперний шар	33
2.3 Діодна теорія випрямлення.....	36
2.4 Дифузійна теорія	40
2.5 Хімічний заперний шар	43
3 Створення випрямляючих та омічних контактів	45
3.1 Контакт Al-Si	45

3.2 Контакт Cu-Si	56
4 Експериментальне дослідження властивостей контакту Cu-Si.....	62
4.1 Хімічна обробка Si підкладки пред напиленням Cu.....	62
4.2 Обговорення результатів.....	70
Висновки.....	71
Перелік посилань	72

ВСТУП

Контакт метал-напівпровідник (КМН), що виявляє як омічні, так і випрямляючі властивості є важливим багатofункціональним фізичним елементом напівпровідникової електроніки.

Основний недолік КМН є їх велика чутливість до впливів конструктивно-технологічних і кліматичних факторів. Але це дозволяє розробити найбільш оптимальні конструктивно-технологічні засоби для виготовлення більш високоякісних КМН приладів.

Об'єктом кваліфікаційної роботи є технологія виготовлення контакту метал-напівпровідник та його електро-фізичні властивості на межі розділу Cu-Si.

Предметом кваліфікаційної роботи є дослідження вольт-амперної характеристики (ВАХ) контакту метала та напівпровідника n-типу провідності.

Мета кваліфікаційної роботи полягає у визначенні оптимальних технологічних режимів виготовлення контактів Cu-Si для отримання запірною або антизапірною типу контакту.

Новизною даної теми кваліфікаційної роботи є широке застосування контакту метал-напівпровідник в радіоелектроніці, обчислювальній техніці та інших областях сучасної електронної техніки.

Хотілося б підкреслити те, що методів напилення тонких плівок, які можна було б використовувати у всіх або в більшості випадків, практично не існує. Для кожного приладу або мікросхеми потрібні плівки із специфічними фізичними і хімічними властивостями, що досягаються особливим способом. Розробка оптимального методу створення заданої комбінації плівка-підкладка часто продовжується протягом ряду років.

Матеріал кваліфікаційної роботи викладено у чотирьох частинах: літературний огляд, контакт метал-напівпровідник, експериментальне дослідження властивостей контакту Cu-Si, створення випрямляючих та омічних контактів.

Результатом проведеної роботи є досягнення умов, при яких контакт метал-напівпровідник проявляє випрямляючі або омічні властивості на межі розділу Cu-Si.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Метали та їх електро-фізичні властивості на прикладі міді та алюмінію

Метали є провідними речовинами через наявність у своїй структурі багатьох вільних електронів.

До металів належать ті елементи, в атомах яких на зовнішньому електронному рівні перебуває невелике (від одного до чотирьох) число електронів, які атоми можуть легко віддавати.

Серед основних загальних фізичних властивостей металів можна виділити:

- кристалічна структура;
- висока теплопровідність та електропровідність;
- зменшення електроопору з ростом температури.

Мідь – це пластичний (ковкий) метал червоно-золотистого кольору, який є гарним провідником тепла та струму.

До фізичних властивостей міді відносяться:

- Температура плавлення – 1084°C ;
- Температура кипіння – 2560°C ;
- Густина – 8890 кг/м^3 ;
- Питома теплоємність – $385 \text{ кг}\cdot\text{Дж}$;
- Температурний коефіцієнт лінійного розширення – $17\cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$;
- Питомий електричний опір – $1,68 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- Теплопровідність – $390 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}$;
- Питома електрична провідність – 58 МОм/м .

Використовується у електротехніці для виготовлення різних струмопровідних частин електротехнічної апаратури. Є матеріалом

теплообмінників, холодильної та хімічної апаратури. Широко застосовується в гальванотехніці для нанесення мідних покриттів та одержання тонкостінних виробів складної форми.

Алюміній – це легкий парамагнетичний метал сріблясто-білого кольору, що легко піддається, литтю та механічній обробці. Має наступні фізичні властивості:

- Температура плавлення – 660°C ;
- Температура кипіння – 2518°C ;
- Густина – 2698 кг/м^3 ;
- Питома теплоємність – $880\text{ кг}\cdot\text{Дж}$;
- Температурний коефіцієнт лінійного розширення – $23\cdot 10^{-6}\text{ К}^{-1}$;
- Питомий електричний опір – $2,7\cdot 10^{-8}\text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- Теплопровідність – $237\text{ Вт/К}\cdot\text{м}$;
- Питома електрична провідність – 38 МОм/м .

Алюміній та ряд сплавів на його основі знаходять застосування в електротехніці завдяки гарній електропровідності, корозійній стійкості. Використовується для виготовлення проводів, їх екранування і навіть в мікроелектроніці при виготовленні провідників у чіпах.

Електропровідність алюмінія поступається міді на третину, при цьому алюміній має незаперечну перевагу – він легше. Щоб пропускати струм такої ж сили, що і мідний, алюмінієвий дріт повинен бути по перетину в півтора рази більше мідного, але все одно матиме вдвічі меншу вагу, яка є важливим параметром високовольтних ліній електропередач, що здійснюють доставку електроенергії на великі відстані.

Мідь та алюміній – є одними з головних конструкційних матеріалів сучасної цивілізації. Ці метали мають різноманітне застосування в багатьох галузях, особливо в електротехніці завдяки своїм електрофізичним властивостям. Тому без сумніву можна сказати, що ці провідники є найкращими та незамінними.

1.2 Напівпровідники, електрофізичні властивості кремнію

Напівпровідники це речовини, що займають по величині питомої провідності проміжне положення між провідниками (металами) та діелектриками.

Ці матеріали мають в собі властивості провідника, та властивості діелектрика. Разом з тим вони володіють рядом специфічних властивостей, що різко відрізняють їх від провідників і діелектриків, основним з яких є сильна залежність питомої провідності від впливу зовнішніх факторів (температури, світла, електричного поля тощо).

Провідне місце серед напівпровідникових матеріалів, які використовуються у напівпровідниковій електроніці, займають кремній, германій та арсенід галію (GaAs).

Власними напівпровідниками або напівпровідниками і-типу є чисті напівпровідники, що не містять домішок.

Домішковими напівпровідникам називаються напівпровідники, що містять домішки, валентність яких відрізняється від валентності основних атомів. Вони підрозділяються на електронні й діркові.

Власні напівпровідники мають кристалічну структуру, що характеризується періодичним розташуванням атомів у вузлах просторової кристалічної ґратки. У такій ґратці кожен атом взаємно пов'язаний із чотирма сусідніми атомами ковалентними зв'язками, у результаті яких відбувається усупільнення валентних електронів й утворення стійких електронних оболонок, що складаються з восьми електронів. При температурі абсолютного нуля всі валентні електрони перебувають у ковалентних зв'язках, отже, вільні носії заряду відсутні, і напівпровідник подібний до діелектрика. При підвищенні температури або при опроміненні напівпровідника світловою енергією, валентний електрон може вийти з ковалентного зв'язку і стати вільним носієм електричного заряду. При цьому ковалентний зв'язок стає дефектним, у ньому

утвориться вільне (вакантне) місце, що може зайняти один з валентних електронів сусіднього зв'язку, у результаті чого вакантне місце переміститься до іншої пари атомів. Переміщення вакантного місця усередині кристалічної ґратки можна розглядати як переміщення деякого фіктивного позитивного заряду, величина якого дорівнює заряду електрона. Такий позитивний заряд прийнято називати діркою.

Процес виникнення вільних електронів і дірок, обумовлений розривом ковалентних зв'язків, називається тепловою генерацією носіїв заряду. Його характеризують швидкістю генерації (G), що визначає кількість пар носіїв заряду, що виникають в одиницю часу в одиниці об'єму напівпровідника.

Швидкість генерації тим більше, чим вище температура й чим менша енергія, яка затрачується на розрив ковалентних зв'язків. Утворені в результаті генерації електрони і дірки, перебувають в стані хаотичного теплового руху деякий час, середнє значення якого називається часом життя носіїв заряду. Електрони і дірки зустрічаються один з одним, у результаті чого відбувається відновлення ковалентних зв'язків. Цей процес називається рекомбінацією носіїв заряду й характеризується швидкістю рекомбінації (R), що визначає кількість пар носіїв заряду, що зникають в одиницю часу в одиниці об'єму. Добуток швидкості генерації на час життя носіїв заряду визначає їхню концентрацію, тобто кількість електронів і дірок в одиниці об'єму. При незмінній температурі генераційно – рекомбінаційні процеси перебувають у динамічній рівновазі, тобто в одиницю часу народжується й зникає однакова кількість носіїв заряду ($R = G$). Ця умова називається законом рівноваги мас, а такий стан називається рівноважним.

У рівноважному стані у власному напівпровіднику встановлюються рівноважні концентрації електронів і дірок, які позначають n_i та p_i .

Оскільки електрони і дірки генеруються парами, то виконується умова ($n_i = p_i$). При цьому напівпровідник залишається електрично

нейтральним, тому що сумарний негативний заряд електронів компенсується сумарним позитивним зарядом дірок.

Електронний напівпровідник, або напівпровідник n-типу (негативний), це напівпровідник, кристалічна ґратка якого, крім основних (чотирьох валентних) атомів утримує домішкові п'ятивалентні атоми, які називають донорами. У такій кристалічній ґратці чотири валентних електрони домішкового атома зайняті в ковалентних зв'язках, а п'ятий зайвий електрон не може вступити в нормальний ковалентний зв'язок і легко відокремлюється від домішкового атома, стаючи вільним носієм заряду.

Домішковий атом перетворюється в позитивний іон. При кімнатній температурі практично всі домішкові атоми виявляються іонізованими.

Поряд з іонізацією домішкових атомів в електронному напівпровіднику відбувається теплова генерація, у результаті якої утворюються вільні електрони та дірки, однак концентрація виникаючих у результаті генерації електронів і дірок значно менша за концентрацію вільних електронів, що утворюються при іонізації домішкових атомів, тому що енергія, необхідна для розриву ковалентних зв'язків, істотно більша енергії, затраченої на іонізацію домішкових атомів.

Дірковим напівпровідником p-типу називається напівпровідник, кристалічна ґратка якого утримує домішкові трьохвалентні атоми, які називають акцепторами. У такій кристалічній ґратці один з ковалентних зв'язків залишається незаповненим. Вільний зв'язок домішкового атома може заповнити електрон, що покинув один із сусідніх зв'язків. При цьому домішковий атом перетворюється в негативний іон, а на тому місці, звідки пішов електрон, виникає дірка.

Таким чином, напівпровідники мають свої специфічні властивості, які відрізняються від металів та діелектриків, але без сумніву мають істотний вплив для створення контактів.

Кремній – напівпровідниковий матеріал, з гранецентрованою кубічною граткою типу алмазу, крихкі кристали якого мають темно-сірий колір зі смолистим блиском.

Займає проміжне значення електропровідності між металами та діелектриками.

Вільний кремній може бути в аморфному і кристалічному стані.

Аморфний кремній це бурий порошок, а кристалічний кремній має сірий колір і металевий блиск. Кремній має наступні фізичні властивості:

- Густина – 2330 кг/м³;
- Температура плавлення – 1415°C;
- Температура кипіння – 2620°C.

Кристалічний кремній – непрямозонний напівпровідник з шириною забороненої зони 1,12 еВ.

Електричного струму чистий кремній майже зовсім не проводить. Електрична провідність кремнію сильно залежить від присутності домішок донорів та акцепторів.

Якщо переважають донори, то основними носіями заряду в кремнії є електрони, якщо акцептори, то носії – дірки. Такий кремній є напівпровідником n-типу і р-типу, відповідно.

Аморфний кремній за своїми властивостями належить до аморфних напівпровідників.

Кремній дуже зручний з огляду на технологію виготовлення напівпровідникових пристроїв електроніки, є основним її елементом.

Очищений від домішок, кремній використовується як підкладка, в області провідності різних типів, шари діоксиду кремнію використовуються як ізолятори.

1.3 Рівні Фермі для металу та напівпровідника

Рівні Фермі (електрохімічні потенціали) будь-яких двох твердих тіл при їх контакті в тепловій рівновазі повинні бути рівні.

Різниця між енергією Фермі і рівнем вакууму, називається роботою виходу.

Метал і напівпровідник можуть мати різні роботи виходу. Коли два матеріали приводяться в контакт, електрони будуть перетікати з матеріалу з меншою роботою виходу в матеріал з більшою роботою виходу до досягнення рівноваги рівнів Фермі. В результаті, матеріал з більш низькою роботою виходу придбає невеликий позитивний заряд, в той час як матеріал з більш високою роботою виходу стане негативно зарядженим. Утворений електростатичний потенціал називається контактною різницею потенціалів (КРП).

Контактний потенціал утворюється між будь-якими двома твердими речовинами і є основною причиною випрямлення в діодах. Вбудоване поле є причиною вигину границь зон в напівпровіднику поблизу переходу. У більшості металів не відбувається помітного вигину зон через малу довжину екранування, таку, що електричне поле поширюється тільки на невелику відстань за межі розділу.

В рамках класичного уявлення для того, щоб подолати потенційний бар'єр, носії в напівпровіднику повинні отримати достатньо енергії для стрибка від рівня Фермі до верхньої частини вигину зони провідності.

Необхідна для подолання бар'єру енергія дорівнює сумі вбудованого потенціалу і зміщення між рівнем Фермі і зоною провідності.

Процес, коли носій отримує енергію для подолання бар'єру за рахунок теплової енергії, називається термоелектронної емісією.

Не менш важливим процесом в реальних контактах є квантово-механічне тунелювання. Квазікласичне наближення описує простий випадок тунелювання, при якому ймовірність проникнення через бар'єр

обернено пропорційна експоненті добутку висоти бар'єру і його товщини [1]. У випадку контактів, товщина задається шириною області просторового заряду (ОПЗ), яка є пропорційною глибині проникнення в напівпровідник вбудованого поля.

ОПЗ може бути обчислена шляхом вирішення рівняння Пуассона з врахуванням наявності домішок в напівпровіднику.

У загальному випадку метал для контакту вибирається з врахуванням властивостей провідності, хімічної інертності, термічної стабільності, електричної стабільності та низького рівня термічних напружень. Потім збільшують густину легування під контактом, щоб зменшити ширину області бар'єру.

До напівпровідників з більш низькими ефективними масами носіїв заряду легше створити омичний контакт, так як коефіцієнт тунелювання експоненціально залежить від маси носія заряду. Крім того, напівпровідники з меншою шириною забороненої зони легше утворюють омичні контакти, бо їх спорідненість до електрону, та висота потенційного бар'єру, як правило, нижче.

1.4 Контакт метал-напівпровідник, його електричні властивості

Перші дослідження властивостей контакту метал-напівпровідник приписують Брауну, який в 1874 р. вивчав залежність повного контактного опору від полярності прикладеної напруги [2]. Пікард, в 1906 р. отримав патент на точково-контактний детектор на основі кремнію, а в 1907 р. про випрямляючі властивості діодів, отриманих напиленням металу на напівпровідник, повідомив Пірс [3].

Високий інтерес до контактів метал-напівпровідник викликаний їх широким використанням в напівпровідниковій технології. Успіхи в даній

галузі обумовлені головним чином теоретичними працями Шотткі, Мотта, Бардіна, Кроуелла, експериментальними роботами Гудмена, Канга, Міда, Коулі та інших [3].

У випадку, якщо робота виходу електрона з металу ($q\Phi_m$) більша ніж з напівпровідника ($q\Phi_s$) n-типу і менша роботи виходу з напівпровідника p-типу, то формується випрямляючий контакт метал-напівпровідник.

У випадку, якщо робота виходу електрона з металу менша ніж з напівпровідника n-типу і більша роботи виходу з напівпровідника p-типу, то формується омичний контакт метал-напівпровідник (див. рис. 1.1).

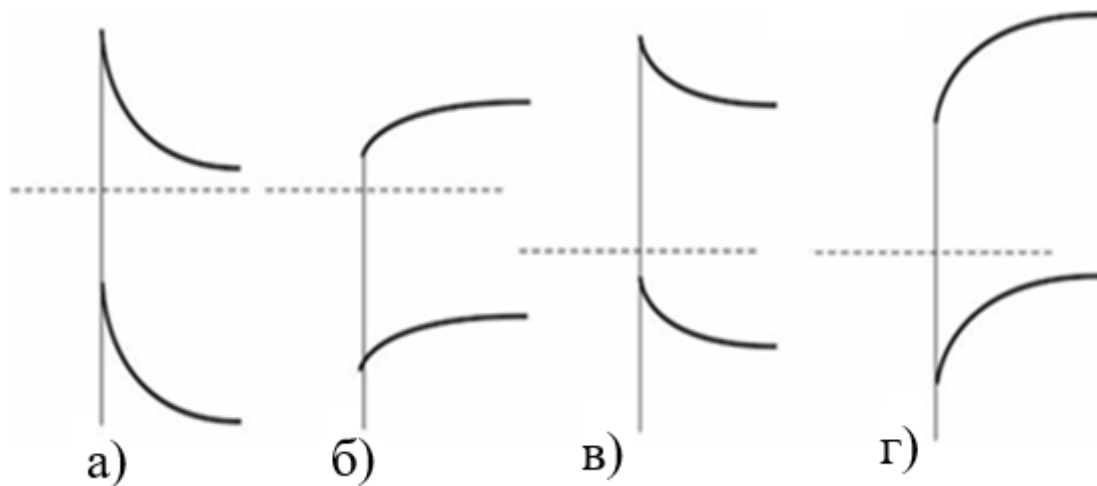


Рисунок 1.1 – Зонна діаграма: n-тип напівпровідника, а) $q\Phi_m > q\Phi_s$;

б) $q\Phi_m < q\Phi_s$; p-тип напівпровідника, в) $q\Phi_m > q\Phi_s$; г) $q\Phi_m < q\Phi_s$

У випадку, коли на поверхні напівпровідника існує велика густина поверхневих станів, висота бар'єра визначається властивостями поверхні напівпровідника і не залежить від роботи виходу металу [3].

Формування контакту метал-напівпровідник може вважатися однією з найбільш простих операцій напівпровідникової технології.

Відома велика кількість способів осадження металевих шарів на поверхні напівпровідника [3-7]. У той же час, властивості контакту метал-

напівпровідник істотно залежать від умов і застосовуваного методу напилення [3-9]. При цьому складність формування ідеального розділу між металом та напівпровідником залишається основною проблемою технології діодів Шотткі. У зв'язку з цим теоретичні моделі, що описують властивості контактів, зазнають суттєвих змін в залежності від факторів, що обумовлюють властивості межі розділу.

1.4.1 Бар'єр Шотткі

Робота виходу з металу більше ніж робота виходу з напівпровідника n-типу, та робота виходу з металу менше ніж із напівпровідника p-типу – це випрямляючий контакт метал-напівпровідник.

Для напівпровідника n-типу, при контакті з металом, формується потенційний бар'єр (бар'єр Шотткі). Потік носіїв з металу перевершує термоемісійний струм електронів із напівпровідника. При встановленні рівноваги, приповерхневий шар напівпровідника збагачується електронами, що призводить до вигину зон, і формує потенційну яму для електронів. У цій потенційній ямі утворюється шар з надлишковою концентрацією електронів, який носить назву збагачений шар. В умовах рівноваги потенційні бар'єри для електронів в об'ємі напівпровідника і в металі відсутні, тому дифузійні струми з металу і об'єму напівпровідника компенсують один одного.

У разі контакту металу з напівпровідником p-типу провідності, (рівень Фермі в металі вище, ніж в напівпровіднику) електрони з металу заповнюють вільні стани в валентній зоні напівпровідника, при цьому напівпровідник заряджається негативно. Для виконання умов збагачення, рівень Фермі в металі повинен лежати нижче, ніж в напівпровіднику. В результаті цього пов'язані електрони з валентної зони переходять в метал, і приповерхнева область напівпровідника збагачується дірками.

1.4.2 Випрямлення на бар'єрі Шотткі

Шотткі вважав, що дифузія та дрейф електронів обмежують струм в області бар'єру, на основі чого була припущена основна дифузійна теорія.

При не дуже низьких температурах найбільш імовірним механізмом протікання струму є термоелектронна емісія.

Термоелектронною емісією є подолання електронами потенційного бар'єру за рахунок теплової енергії [8-10].

Внаслідок розподілу електронів за швидкостями, (по енергії) навіть при середній температурі деякі носії набувають енергії, достатньої для подолання потенційного бар'єру. В умовах рівноваги термоемісійний струм електронів з напівпровідника в метал компенсується зворотнім струмом з металу в напівпровідник, а також струмом неосновних носіїв.

Якщо до металу прикладається негативний потенціал (по відношенню до напівпровідника), до контакту підводиться зовнішнє поле, що збігається по напрямку з полем ОПЗ. Під дією цього поля електрони витісняються ще глибше в напівпровідник, тоді товщина збідненої області збільшується, і підвищується потенційний бар'єр. При цьому стає складним рух електронів через межу розділу. У зворотній полярності напруги можливий струм неосновних носіїв (в даному випадку дірок) з напівпровідника в метал. В силу малої концентрації неосновних носіїв заряду, струм цих носіїв порівняно малий. До порівняно високих значень напруги величина цього струму практично не змінюється [3,11]. Таку полярність напруги називають зворотнім зміщенням діода.

У випадку позитивної полярності напруги на металі по відношенню до напівпровідника, зміщення називається прямим. У цьому випадку зовнішнє електричне поле призводить до зниження потенційного бар'єру. Енергія зовнішнього поля стає близькою за величиною до висоти бар'єру Шотткі. При такій напрузі енергетичні зони в напівпровіднику стають

прямими, а така напруга, при якому відбувається випрямлення, називають напругою плоских зон.

При випрямленні зон, потенційні бар'єри для носіїв зникають, а механізм термоелектронної емісії перестає грати істотну роль в протіканні струму. Основний внесок дають дифузія і дрейф електронів в зовнішньому полі, тобто опір шарів напівпровідника.

Залежність струму від напруги при цьому лінійна (див. рис. 1.2).

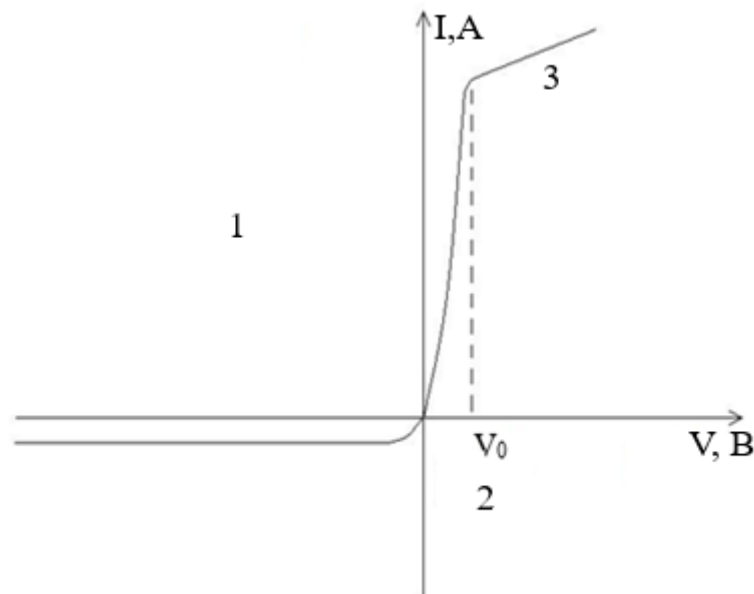


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення вольт-амперної характеристики ідеального діода Шотткі: 1 – область зворотнього зміщення ; 2 – область прямого зміщення ; 3 – лінійна область V_0

Напруга, що збігається з висотою потенційного бар'єра, приблизно відповідає точці перегину вольт-амперної характеристики (ВАХ) ідеального контакту метал-напівпровідник з бар'єром Шотткі. Визначення точки перегину – це один із способів оцінки висоти потенційного бар'єру в діодах Шотткі [3]. Але досягнення ідеального контакту, в реальних умовах, має певні труднощі, пов'язані з наявністю поверхневих станів у напівпровіднику.

1.4.3 Омічний контакт

Коли робота виходу електронів з металу менша ніж з напівпровідника n-типу та більша ніж робота з напівпровідника p-типу, утворюється омічний контакт метал-напівпровідник.

Омічними називають контакти, опір яких не залежить від величини і напрямку струму. Іншими словами, це контакти, які мають практично лінійну вольт-амперну характеристику.

Омічні контакти забезпечують з'єднання напівпровідника з металевими струмопровідними елементами напівпровідникових приладів.

Крім лінійності вольт-амперної характеристики, такі контакти повинні мати малий опір і забезпечувати відсутність інжекції носіїв з металів в напівпровідник. Ці умови виконуються шляхом введення між напівпровідником робочої області кристала і металом напівпровідника з підвищеною концентрацією домішки. Метал вибирають так, щоб забезпечити малу контактну різницю потенціалів. Одним із способів отримання омічних контактів є введення в метал домішки, якою легований напівпровідник.

1.5 Створення контакту метал-напівпровідник

Відтворюваність, надійність виготовлених контактів спирається перш за все на чисту поверхню напівпровідника.

У випадку використання кремнія, природній оксид SiO_2 , який швидко утворюється на поверхні кремнія, робить властивості отриманих контактів чутливими до деталей процесу формування контактів.

Основними кроками в виготовленні контакту є очищення поверхні напівпровідника, осадження контактної металізації, структурування і відпал.

Очищення поверхні може бути виконане травленням, розпиленням, хімічним травленням, реактивним газовим травленням або іонним травленням.

Після очищення поверхні метали осідають шляхом напилення, випаровування або хімічного осадження з парової фази (CVD).

Розпилення є більш швидким і зручним методом осадження металу, ніж випаровування, однак іонне бомбардування з плазми може викликати поверхневі стани або навіть інвертувати тип провідності на поверхні. У зв'язку з цим м'який, але все ще порівняно швидкий CVD найкращий.

Створення необхідної форми контактів здійснюється стандартним фотолітографічним процесом, зокрема, за методом зривної фотолітографії, в процесі якої метал наноситься через отвори в шарі фоторезистора, який потім змивається.

Після осадження, в більшості випадків роблять відпал контактів для зняття внутрішніх механічних напружень, а також для здійснення потрібної твердофазної реакції між металом і напівпровідником.

1.6 Висновки з літературних джерел та постановка задачі

Контакт між металом та напівпровідником має випрямляючі та омичні властивості.

Омичний контакт між металом і напівпровідником характеризується лінійною та симетричною вольт-амперної характеристикою. Якщо вольт-амперна характеристика асиметрична і нелінійна, то контакт в тій чи іншій мірі є випрямляючим – контакт з бар'єром Шотткі, на основі якого створено діод Шотткі.

У фізичній моделі бар'єру Шотткі, випрямлення залежить від різниці між роботою виходу металу і електронного спорідненості напівпровідника.

Однак на практиці, в більшості випадків, реальний контакт метал-напівпровідник не дотримуються точної моделі Шотткі, так як наявність зовнішніх поверхневих станів на межі розділу металу і напівпровідника (плівка та частки оксидів, дефекти кристалічної структури) може зробити поведінку контакту практично не залежну від різниці між роботою виходу металу і електронного спорідненості напівпровідника до електрону.

У виробництві напівпровідникових приладів та інтегральних схем, для створення омичного контакту, підконтактну область напівпровідника додатково сильно легують (наприклад, застосовують підвищене легування донорною домішкою пластин кремнію n-типу при застосуванні алюмінію в якості металу в контакті, сильно легований шар кремнію). При цьому товщина області просторового заряду бар'єра Шотткі стає настільки малою, що через неї можливо тунелювання носіїв заряду [1].

Основним завданням на сьогоднішній день є розробка та вдосконалення методів дослідження властивостей контакту метал-напівпровідник, а також вдосконалення методів отримання випрямляючих та омичних контактів.

2 КОНТАКТ МЕТАЛ-НАПІВПРОВІДНИК

2.1 Випрямляючі та невикривляючі контакти

Розглянемо контакт метала з роботою виходу електронів ($q\Phi_m$) і донорного (електронного) n-типу напівпровідника з роботою виходу ($q\Phi_s$).

Якщо $q\Phi_m > q\Phi_s$, то електрони будуть переходити з напівпровідника в метал, поки рівні Фермі не стануть однаковими (див. рис. 2.1). Контактна різниця потенціалів складає декілька вольт [3].

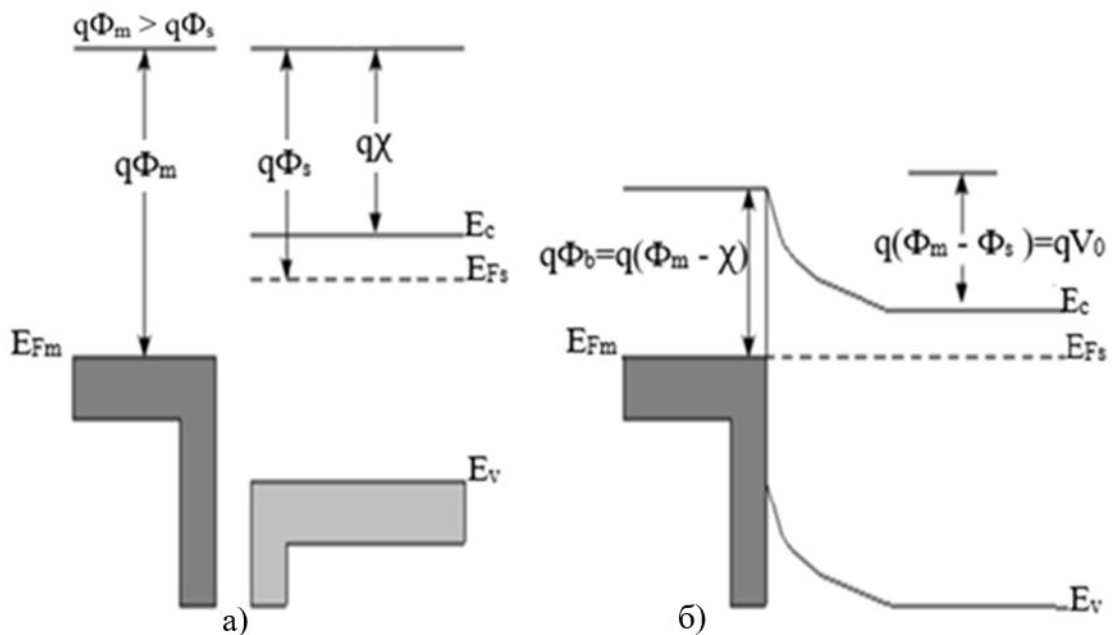


Рисунок 2.1 – Робота виходу електронів контакту метал-напівпровідник: а) до утворення контакту; б) після утворення контакту

Після утворення контакту метал-напівпровідник, виникає контактна різниця потенціалів (V_k), у eV, яка розраховується за допомогою формули (2.1):

$$V_k = q(\Phi_m - \Phi_s), \quad (2.1)$$

де Φ_m – потенціал металу, В;

q – електричний заряд, Кл;

Φ_s – потенціал напівпровідника, В.

Робота виходу електронів з напівпровідника ($q\Phi_s$), у еВ, дорівнює:

$$q\Phi_s = q\chi + (E_{Fs} - E_c), \quad (2.2)$$

де $q\chi$ – робота виходу спорідненого до атома електрона на зону провідності, еВ;

E_{Fs} – енергетичний рівень Фермі для напівпровідника, еВ;

E_c – зона провідності, еВ.

Для одержання контактної різниці потенціалів необхідно, щоб з напівпровідника із одиниці об'єму в метал перейшла кількість електронів n_0 ($\approx 10^{27} \text{ м}^{-3}$).

Концентрація електронів донорів у напівпровідниках N_d ($\approx 10^{24} \text{ м}^{-3}$). Тому тепер електрони повинні перейти із області напівпровідника товщиною d ($\approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$), що набагато більше довжини їх вільного пробігу. Окрім того в напівпровіднику формується досить широка область, збіднена основними носіями заряду.

Електропровідність даного контакту набагато менша, ніж об'єму напівпровідника, а тим більше ніж металу. Такий контакт називається запірним.

Напруженність контактного електричного поля (E_k), у еВ/м:

$$E_k = \frac{V_k}{d}, \quad (2.3)$$

$E_k (\approx 3 \cdot 10^6)$ направлена від напівпровідника в метал, тобто набагато менша від напруженості внутрішнього поля напівпровідника. Тому в області контакту структура енергетичних зон напівпровідника не змінюється, а енергетичні рівні зазнають викривлення, в нашому випадку загинаються вгору.

Упевнимось у викривленні енергетичних зон напівпровідника на такому уявному експерименті. Нехай нам потрібно перемістити електрон через контакт із об'єму напівпровідника в метал. Для цього ми повинні рухати його в напрямку напруженості контактної області E_k , яке буде перешкоджати такому рухові. Дійсно, оскільки заряд електрона від'ємний, на нього діє сила, направлена проти вектора напруженості електричного поля. Отже ми повинні виконати певну роботу, яка викликає зростання потенціальної енергії електрона. А це і означає загинання енергетичних зон вгору.

Нехтуючи товщиною контактної області в металі в одну міжатомну відстань, можемо вважати, що вся контактна область поширюється в напівпровідник. Для визначення товщини контактної області, скористаємось формулою для ємності плоского конденсатора (C), у Ф:

$$C = \frac{q \Delta n S d}{2 V_k} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}, \quad (2.4)$$

де Δn – кількість електронів, що зазнають переходу, m^{-3} ;

S – площа пластин, m^2 ;

ϵ_0 – електрична стала;

ϵ – діелектрична проникненість середовища.

Кількість електронів, які зазнають переходу, дорівнює концентрації донорної домішки (N_d), у m^{-3} :

$$N_d = \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 V_k}{qd^2} \quad (2.5)$$

Знаходимо товщину контактної шару (d) у м:

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 V_k}{qN_d}} \quad (2.6)$$

В рівноважному стані, тобто без зовнішньої напруги, для переходу електронів з напівпровідника в метал потрібно подолати потенційний бар'єр ($q\Phi_b$), у еВ:

$$q\Phi_b = q(\Phi_m - \chi), \quad (2.7)$$

де χ – енергія спорідненого до атома електрона, В/атом.

Для протилежного переходу, тобто переходу електронів з металу до напівпровідника, без зовнішньої напруги, робота виходу (qV_0), у еВ:

$$qV_0 = q(\Phi_m - \Phi_s) \quad (2.8)$$

Потоки електронів однакові, струм через контакт відсутній.

Проаналізуємо поведінку контакту при підключенні зовнішньої напруги. Зворотнє ввімкнення контакту буде тоді, коли напруженість E зовнішнього електричного поля співпадає за напрямком з напруженістю контактної поля E_k , тобто плюс зовнішньої батареї з'єднаний з напівпровідником, а мінус з металом. Всі енергетичні рівні напівпровідника опускаються вниз на величину qV , (див. рис. 2.2).

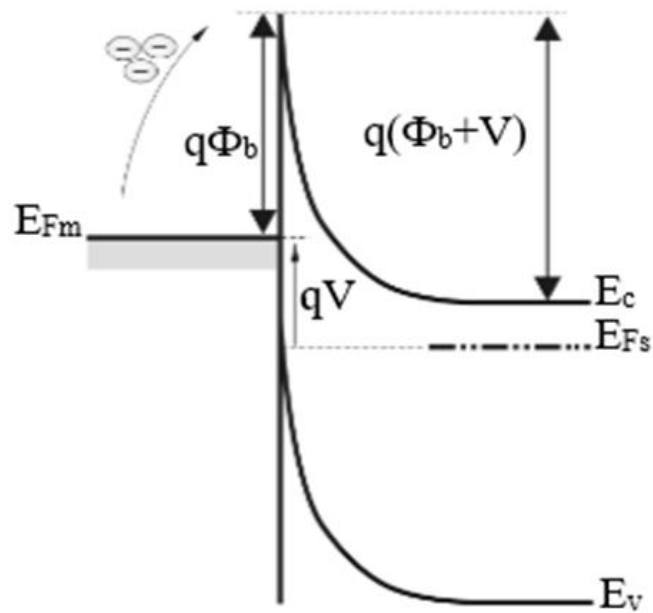


Рисунок 2.2 – Контакт метал напівпровідник при ввімкненні зворотньої зовнішньої напругу

Зростає висота бар'єру для потоку електронів (основних носіїв) з напівпровідника в метал ($q\Phi_b$), у еВ:

$$q\Phi_b = q(V_k + V), \quad (2.9)$$

де V – зовнішня напруга, В.

З формули (2.9) випливає, що зі збільшенням висоти бар'єру, потік електронів з напівпровідника в метал значно зменшується. Потік же електронів з металу в напівпровідник не змінюється, так як для них висота бар'єру залишається qV . Зростає також товщина контактного шару і стає рівною (d_{rv}) у м :

$$d_{rv} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(V_k + V)}{qN_d}}, \quad (2.10)$$

де V – зовнішня напруга, В.

Таким чином, зменшення потоку основних носіїв заряду електронів і розширення збідненого контактного шару вільними носіями заряду, призводить до різкого зменшення електропровідності контакту [12]. Через цей контактний шар протікає невеликий зворотній струм зумовлений неосновними носіями заряду, концентрація яких дуже мала. Величина цього зворотнього струму (I_{rc}), у А:

$$I_{rc} = I_s \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right), \quad (2.11)$$

де I_s – струм насичення, який визначається концентрацією основних носіїв заряду, А;

k – стала Больцмана, Дж/К;

T – температура абсолютного нуля.

При збільшенні зовнішньої напруги V , зворотній струм зростаючи по експоненті швидко виходить на насичення.

Пряме ввімкнення має місце тоді, коли напруженість зовнішнього поля протилежна контактному, тобто напівпровідник з'єднується з мінусом зовнішньої батареї, а метал з плюсом (див. рис. 2.3). Тепер всі енергетичні рівні напівпровідника опускаються вниз на величину (qV). Висота потенціального бар'єру, для основних носіїв заряду з напівпровідника в метал зменшується (див. рис. 2.3) до величини:

$$q\Phi_b = q(V_k - V) \quad (2.12)$$

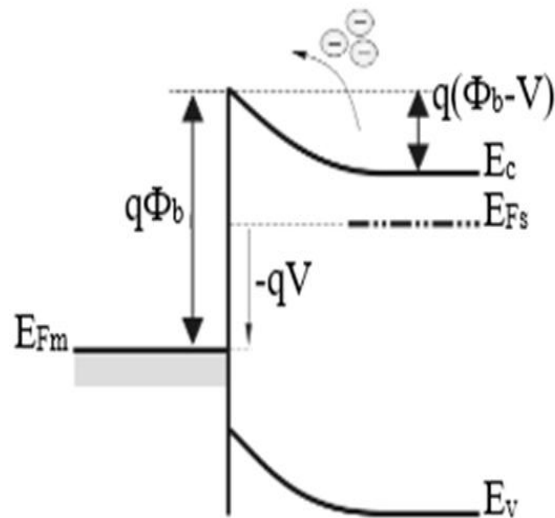


Рисунок 2.3 – Контакт метал напівпровідник при ввімкненні прямої зовнішньої напругу

При зменшенні висоти бар'єру для електронів з напівпровідника швидко зростає прямий струм (I_{fc}), у А:

$$I_{fc} = I_s \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.13)$$

Концентраційного обмеження, як було при зворотньому ввімкненні, немає. При прямому ввімкненні напруги зростає електропровідність, внаслідок зменшення товщини контактного шару (d_{fc}), у м:

$$d_{fc} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(V_k - V)}{qN_d}} \quad (2.14)$$

Таким чином, розглянутий контакт має випрямляючі властивості електропровідності, тобто проводить струм в одному напрямку і практично

не проводить струм в зворотньому). Ця властивість характеризується коефіцієнтом випрямлення (k_r):

$$k_r = \frac{I_{fc}}{I_{rc}} \quad (2.15)$$

Відношення прямого струму до зворотнього, при однаковій зовнішній напрузі, це і є коефіцієнт випрямлення.

Для контактів метал-напівпровідник k_r не дуже великий, порівнюючи з р-п переходами, і лежить в межах ($10^4 \div 10^5$).

Для виготовлення електричних контактів до напівпровідникових приладів, необхідно формувати не випрямляючі (омічні) контакти, які б не впливали на роботу цих приладів. У випадку омічного контакту робота виходу електронів із напівпровідника більше ніж робота виходу з металу (див. рис. 2.4), [3].

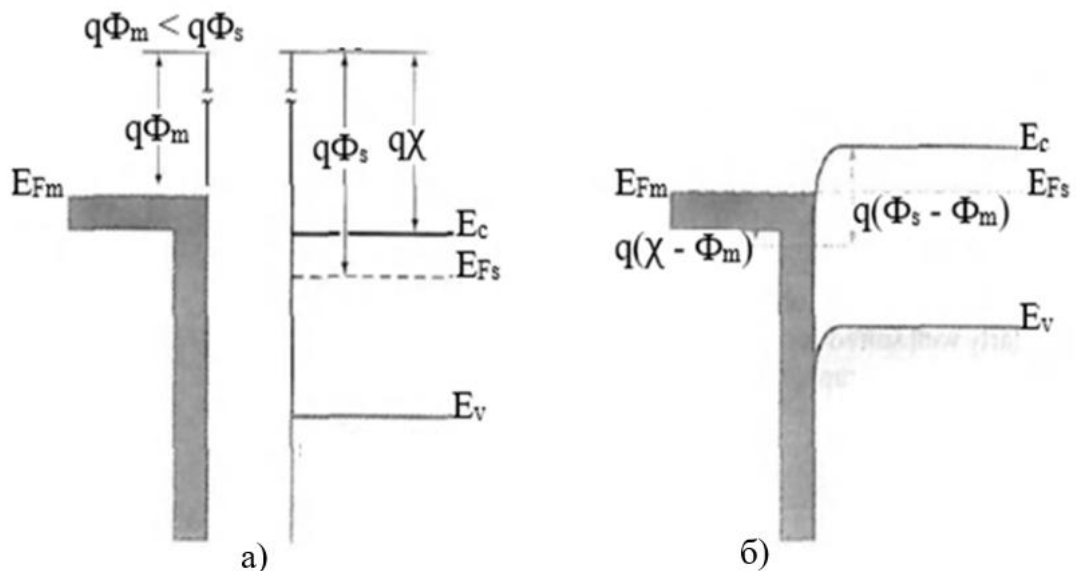


Рисунок 2.4 – Робота виходу електронів контакту метал-напівпровідник: а) до утворення контакту; б) після утворення контакту

2.2 Фізичний запірний шар

Для напівпровідника n-типу, робота виходу з якого ($q\Phi_s$), менша, ніж робота виходу з металу ($q\Phi_m$). Саме цей випадок призводить до виникнення потенційного бар'єру в напівпровіднику, який називається бар'єром Шотткі. Крім того, будемо вважати, що заряджені поверхневі стани відсутні [13].

Якщо метал і напівпровідник електрично з'єднані один з одним, то частина електронів перейде з напівпровідника в метал. Внаслідок такого переходу електронів, в шарі між металом і напівпровідником виникне електричне поле, і енергетичні зони біля поверхні напівпровідника будуть вигнуті. При подальшому зменшуванні товщини вакуумного зазору енергетичний бар'єр, утворений потенціалом цього зазору, стає тунельно-прозорим для електронів, і їм можна знехтувати [1].

Насправді, ідеалізована картина формування бар'єру Шотткі може порушуватися через цілий ряд причин. По-перше, через збереження проміжного шару товщиною близько декількох міжатомних відстаней. По-друге, через наявність поверхневих станів в напівпровіднику. Якщо густина поверхневих станів достатньо велика, то заряд, пов'язаний з ними, може ефективно екранувати в напівпровідник від електричного поля в проміжному шарі [16]. Тому величина заряду в збідненій області і висота бар'єру можуть не залежати від роботи виходу металу. Третя причина, пов'язана з впливом сил зображення (електрони, що наближаються до бар'єра, заряджають поверхню розділу рівним і протилежним за знаком зарядом, який притягує електрон і таким чином змінює профіль потенційного бар'єру, при цьому знижуючи його висоту). Така зміна форми бар'єру відома як ефект Шотткі [14].

Форма потенційного бар'єру залежить від розподілу заряду в збідненій області. Густина об'ємного електричного заряду (ρ) у Кл·м⁻³:

$$\rho = qN_d \quad (2.16)$$

Потенційна енергія (W) у еВ, в області об'ємного заряду задовольняє рівнянню Пуассона:

$$\Delta W = \frac{q\rho}{\epsilon\epsilon_0} \quad (2.17)$$

В одновимірному випадку, коли всі величини залежать тільки від координати x , відлічуваної вглиб напівпровідника, для ідеального бар'єру отримуємо:

$$\frac{d^2W}{dx^2} = \frac{q^2}{\epsilon\epsilon_0} (N_d - n(x)), \quad (2.18)$$

де $n(x)$ – концентрація вільних електронів, m^{-3} .

Розподіл Больцмана для вільних електронів за потенційними енергіями $n(x)$, у m^{-3} :

$$n(x) = N_d \exp\left(-\frac{W(x)}{kT}\right) \quad (2.19)$$

В одиниці об'єму сума позитивних зарядів дорівнює сумі негативних зарядів (умова електронейтральності для напівпровідника):

$$n = N_d + p_n, \quad (2.20)$$

де p_n – концентрація неосновних носіїв (дірок), m^{-3} .

В силу умови електронейтральності, в об'ємі напівпровідника при цьому повний електричний заряд (Q), у Кл, дорівнює нулю:

$$Q = \pm N_d q = 0 \quad (2.21)$$

Ввівши безрозмірну потенційну енергію:

$$w(x) = \frac{W(x)}{kT}, \quad (2.22)$$

та відстань, на яку поширюється дія електричного поля окремого заряду, що містить вільні позитивно і негативно заряджені частинки – дебаєвський радіус екранування (l_D), у м:

$$l_D = \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 kT}{q^2 N_d}} \quad (2.23)$$

З урахуванням (2.22) і (2.23), приведемо рівняння (2.18) до такого виду:

$$\frac{d^2 W}{dx^2} = \frac{1}{l_D^2} (1 - e^{-w(x)}), \quad (2.24)$$

Рівняння (2.18), для ідеального бар'єру, має наступні граничні умови:

$$W(0) = \frac{-q(\Phi_m - \Phi_s)}{kT} = \frac{qV_k}{kT}, \quad (2.25.1)$$

$$W(\infty) = 0, V_k > 0, \quad (2.25.2)$$

Для типових параметрів напівпровідників, при кімнатній температурі, радіус екранування Дебая у багато разів більше постійної ґратки [15].

За умови ($w(0) \gg 1$), якщо знехтувати вигином зон у перехідній області, де концентрації електронів і донорів можна порівняти (так зване наближення повного збіднення), форма бар'єру може бути визначена з рівняння (2.24) без експоненціального доданка (враховувати його необхідно лише в області $w(x) \leq 1$):

$$W(x) \approx \frac{1}{2} \left(\frac{x}{l_D} - \sqrt{\frac{2qV_k}{kT}} \right)^2, \quad (2.26)$$

Одержаний бар'єр параболічної форми відомий як бар'єр Шоткі.

2.3 Діодна теорія випрямлення

Діодна теорія випрямлення відома також під назвою теорія термоелектронної емісії.

У напівпровіднику, де довжина вільного пробігу порівнянна з товщиною збідненого шару, електрони пролітаючи через шар, майже не розсіюються ґраткою. Всі електрони, які мають кінетичну енергію достатню для подолання шару об'ємного заряду, можуть вилетіти із напівпровідника і потрапити в метал.

Теорія термоелектронної емісії була розроблена американським фізиком Бете, який виходив з наступних припущень:

- висота бар'єра значно більше, ніж kT ;

- зіткненнями електронів в збідненому шарі нехтують;
- сили дзеркального зображення не враховується;
- форма профілю бар'єра несуттєва і величина струму залежить виключно від висоти бар'єру.

Розглянемо тісний контакт метал-напівпровідник, виготовлений на основі n-типу напівпровідника. Густина струму ($J_{s \rightarrow m}$), у $\text{Кл} \cdot \text{м}^{-3}$, що обумовлена переходом електронів з напівпровідника n-типу в метал, обчислюється за допомогою стандартного рівняння термоелектронної емісії [10]:

$$J_{s \rightarrow m} = qn \left(\frac{kT}{2\pi m^*} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{m^* v_{0x}^2}{2kT} \right), \quad (2.27)$$

де v_{0x} – мінімальна швидкість електрона у напрямку x;

m^* – ефективна маса електрона.

Мінімальна швидкість електрона в напрямку x, необхідна для подолання бар'єру, визначається рівнянням:

$$\frac{1}{2} m^* v_{0x}^2 = q(V_D - V), \quad (2.28)$$

де V_D – дифузійний потенціал, eВ.

Визначимо концентрацію вільних електронів (n), у м^{-3} , за допомогою виразу:

$$n = 2 \left(\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right) \exp\left(-\frac{qV_n}{kT} \right), \quad (2.29)$$

де h – стала Планка, $\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$;

V_n – напруга концентрації електронів, В.

З (2.27), (2.28) і (2.29), для густини струму, обумовленої переходом електронів з напівпровідника в метал отримуємо вираз:

$$J_{s \rightarrow m} = \frac{4\pi q m^* k^2 T^2}{h^3} \exp\left(-\frac{\Phi_b - qV}{kT}\right), \quad (2.30.1)$$

$$J_{s \rightarrow m} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right), \quad (2.30.2)$$

де A^* – постійна Річардсона для термоелектронної емісії, $A \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$.

Висота бар'єру для електронів, які переходять з металу в напівпровідник, залишається незмінною і отже, величина струму з напівпровідника в метал не залежить від прикладеної напруги [17]. Ця величина повинна бути еквівалентна величині струму, що протікає з металу в напівпровідник, при термодинамічній рівновазі, ($V = 0$). Тоді густина струму, який протікає з напівпровідника в метал, при ($V = 0$), визначається рівнянням:

$$J_{m \rightarrow s} = -A^* T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_b}{kT}\right) \quad (2.31)$$

Із суми рівнянь (2.30.1), (2.30.2) та (2.31) маємо вираз для загальної густини струму:

$$J = A^* T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right], \quad (2.32.1)$$

$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.32.2)$$

Густина насичення струму (J_s), у Кл·м⁻³:

$$J_s = A^* T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_b}{kT}\right) \quad (2.33)$$

Висота бар'єру зменшується через дію сили зображення. Це зниження висоти бар'єру на величину Δ залежить від прикладеної напруги, ($\Delta\Phi_b$), у еВ визначається формулою:

$$\Delta\Phi_b = q \left[\left(\frac{q^3 N_d}{8\pi^2 \epsilon_s^3} \right) \left(V_D \pm V - \frac{kT}{q} \right) \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.34)$$

Знаки плюс та мінус відповідають прямому і зворотньому напрямкам відповідно. Тому, ефективну висоту бар'єру (Φ_{be}), у еВ, яку повинні подолати електрони, можна записати у вигляді:

$$\Phi_{be} = \Phi_b - \Delta\Phi_b \quad (2.35)$$

Залежність ефективної висоти бар'єру від напруги змінює характер проходження струму. Тоді густина протікання струму, у випрямляючому контакті визначається формулою:

$$J = A^* T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_b - \Delta\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right], \quad (2.36.1)$$

$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right], \quad (2.36.2)$$

Густина струму насичення:

$$J_s = A^* T^2 \exp\left(\frac{\Phi_b - \Delta\Phi_b}{kT}\right) \quad (2.37)$$

Залежність густини струму від прямої напруги, за умови ($V \gg kT$) описується рівнянням:

$$J_s = A^* T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_b - \Delta\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right], \quad (2.38.1)$$

$$J_s \approx A^* T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{\eta kT}\right) \quad (2.38.2)$$

де η – коефіцієнт ідеальності.

Таким чином, за допомогою стандартного рівняння для термоелектронної емісії було встановлено величину густини струму в залежності від прикладеної напруги.

2.4 Дифузійна теорія

У напівпровіднику, де довжина вільного пробігу електрона менше товщини шару об'ємного заряду, при проходженні струму через збіднену область напівпровідника, рух електронів підкоряється звичайним процесам дифузії і дрейфу в електричному полі потенційного бар'єру. При цьому дифузійна теорія виходить з наступних припущень:

- висота бар'єру значно більше, ніж kT ;
- враховується вплив зіткнення електронів в збідненому шарі;

- величина струму не впливає на концентрацію носіїв при $x = 0$ та $x = W$;
- домішкова концентрація в напівпровіднику не вироджена.

Залежність густини струму від локального поля і градієнта концентрації електронів в напівпровіднику n-типу, дозволяє визначити цю густину струму за формулою [10]:

$$J = q \left[n(x) \mu E + D_n \frac{\partial n}{\partial x} \right], \quad (2.39.1)$$

$$J = q D_n \left[- \frac{q n(x)}{kT} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial n}{\partial x} \right] \quad (2.39.2)$$

де μ – рухливість електронів;

D_n – коефіцієнт дифузії концентрації носіїв заряду, m^2/s .

При стаціонарних умовах густина струму не залежить від x . Використовуючи інтегруючий множник:

$$\exp \left[- \frac{qV(x)}{kT} \right], \quad (2.40)$$

рівняння (2.39.2) можна проінтегрувати:

$$J \int_0^W \exp \left[- \frac{qV(x)}{kT} \right] = q D_n \left\{ n(x) \exp \left[- \frac{qV(x)}{kT} \right] \right\}, \quad (2.41)$$

при цьому є наступні граничні умови:

$$qV(0) = -q(V_n + V_D) = -\Phi_b, \quad (2.42.1)$$

$$qV(W) = -q(V_n + V), \quad (2.42.2)$$

$$n(0) = N_c \exp\left[-\frac{E_c(0) - E_F}{kT}\right] = N_c \exp\left(-\frac{\Phi_b}{kT}\right), \quad (2.42.3)$$

$$n(W) = n = N_c \exp\left(-\frac{qV_n}{kT}\right), \quad (2.42.4)$$

де N_c – ефективна густина станів в зоні провідності, m^{-3} .

Враховуючи граничні умови та рівняння (2.41), отримуємо густина струму:

$$J = \frac{qN_c D_n \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]}{\int_0^W \exp\left[-\frac{qV(x)}{kT}\right] \partial x} \quad (2.43)$$

Для бар'єрів Шоткі, де не враховується вплив сили дзеркального зображення, розподіл потенціалу ($qV(x)$), у еВ, виражається за допомогою формули:

$$qV(x) = \frac{q^2 N_d}{\mu_s} \left(Wx - \frac{x^2}{2} \right) - \Phi_b, \quad (2.44)$$

де μ_s – рухливість електронів напівпровідника.

Підставивши (2.44) в (2.43), виражаючи W через суму ($V_D + V$), отримаємо густина струму у такому вигляді:

$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right], \quad (2.45)$$

звідки густина струму насичен визначається за формулою:

$$J_s = \frac{q^2 D_n N_c}{kT} \left[\frac{8\pi q N_d}{\mu_s} (V_D - V) \right]^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{\Phi_b}{kT}\right) \quad (2.46)$$

Порівнюючи (2.38.1), (2.38.2) та (2.46), бачимо, що густина струму насичення для дифузійної теорії змінюється сильніше від напруги, але менш чутлива до температури в порівнянні із густиною струму насичення для теорії термоелектронної емісії [17].

2.5 Хімічний запірний шар

Крім фізичного запірного шару, яким є бар'єр Шоттки, існує також хімічний запірний шар, пов'язаний з наявністю на поверхні напівпровідника слабо легованого тонкого шару. Цей тип контакту був досліджений Н. Моттом, який розглядав його у зв'язку з вивченням діодів на основі оксидних сполучень.

У випадку бар'єра Мотта напівпровідник характеризується різкою зміною рівня легування, від низького значення, біля границі розділу, до високого, на дуже близькій відстані від поверхні, яке набагато менше радіуса Дебая. Так як довжина слабо легованої області дуже мала, то електричне поле в ній можна вважати постійним [18].

Припустимо, що силові лінії не проходять в сильно леговану область, так як, концентрація донорів в ній дуже велика. Густина струму у випадку бар'єра Мотта має вигляд:

$$J = J_M \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right], \quad (2.47)$$

густина насичення струму Мотта визначається за формулою:

$$J_M = \frac{q^2 D_n N_c (\Phi_0 - V) \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right)}{W_d kT \left[1 - \exp\left(\frac{-q(\Phi_0 - V)}{kT}\right) \right]} \quad (2.48)$$

де W_d – потенційна енергія товщини контактного шару, еВ:

Φ_0 – межа розділу контакту, В.

Густина струму насичення бар'єра Мотта має більшу залежність від прикладеної напруги, ніж бар'єр Шоткі. Але струм насичення Шоткі і Мотта, втрачають свій фізичний зміст при наближенні прямої напруги до нуля. На практиці, якщо б пряма напруга, прикладена до діода, дорівнювала б нулю, то біля переходу бар'єр був би відсутній, і через контакт протікали б великі струми, обмежені тільки послідовним опором напівпровідника.

3 СТВОРЕННЯ ВИПРЯМЛЯЮЧИХ ТА ОМІЧНИХ КОНТАКТІВ

3.1 Контакт Al-Si

В останні роки основна увага розробників інтегральних мікросхем концентрується на розвитку КМОН технології (комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник), та БіКМОН (біполярна комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник), на вдосконаленні та розробці нових видів мікропроцесорів, на інтенсивному розвитку ІС (інтегральна схема), на розробці та освоєнні технології багат шарових тривимірних НВІС (надвелика інтегральна схема).

Розробки ІС супроводжуються безперервним збільшенням числа використовуваних шарів і числа шаблонів, зменшенням глибини залягання р-п переходів, товщини ліній і товщини підзатворного діелектрика. Однак освоєння промислового випуску НВІС з елементами субмікронних розмірів неможливе без кардинального вирішення проблеми металізації в них. Справа в тому, що з підвищенням ступеня інтеграції ІС, роль металізації різко зростає. Інтеграція займає все більшу площу і впливає на основні параметри схем (площа кристалів, швидкодія, показник якості, стійкість, надійність та ін.).

Якщо зі зменшенням розмірів, швидкодія логічних елементів зростає, то швидкодія міжз'єднань системи металізації знижується. Зниження швидкодії відбувається через зменшення поперечного перерізу провідників між з'єднань, і відповідного збільшення погонного опору, а також через зменшення відстані між сусідніми провідниками, заповненого діелектриком, і відповідного збільшення електричної ємності.

Починаючи з деякого рівня інтеграції ІС, затримки сигналів в міжз'єднаннях можуть перевищувати затримки в найлогічніших елементах. Зі зменшенням поперечного перерізу провідників міжз'єднань, з'являється і

ряд інших проблем. Знижується електроміграційна стійкість провідників, значно ускладнюються технологічні прийоми травлення при створенні малюнка провідників з відтвореними розмірами та ін.

Істотний вплив на параметри напівпровідникових приладів з субмікронними розмірами та ІС, з високою ступінню інтеграції, надають омичні контакти. Зі зменшенням розмірів елементів ІС, при розробленому рівні технології контактів, значно підвищується перехідний опір омичних контактів. Через зменшення глибини залягання р-n-переходів виникла проблема створення непроникаючих контактів.

На даний час єдиним рішенням при створенні металізації НВІС є багаторівнева система металізації [19].

При формуванні багаторівневих систем виникають проблеми забезпечення планарності, та надійності металізації. Наявність багатьох специфічних проблем в технології створення ефективних систем металізації НВІС зумовило інтенсивні дослідження в даному напрямку, як за кордоном, так і в нашій країні. На даний час розроблені універсальні підходи до створення як окремих елементів, так і металізації НВІС в цілому. Можна виділити шість основних елементів багаторівневої металізації НВІС:

- контактна система металізації;
- провідникові міжз'єднання;
- шари міжрівневого діелектрика;
- міжрівневі контакти;
- шар пасивації;
- контактні площадки.

Контактна система металізації являє собою омичні та випрямляючі контакти з кремнієм. Провідникові між з'єднання – це провідники багаторівневої системи металізації. Міжрівневий діелектрик – матеріал, що електрично розділяє провідникові з'єднання різних рівнів.

Міжрівневі контакти це локальні контакти між провідниками сусідніх рівнів, виконані в шарах міжрівневого діелектрика. Шар пасивації являє собою діелектричний шар, що захищає провідники верхнього рівня між з'єднань. Контактні площадки – розташовані у периферії кристала, біля ділянки верхнього рівня розводки, забезпечують електричний зв'язок металевої розводки з зовнішніми з'єднаннями.

В історії розвитку міжз'єднань кремнієвих інтегральних схем можна виділити три основні етапи. На першому етапі, металізація ІС була одношаровою, де основу її становив алюміній. На наступному етапі, металізація стала містити різні матеріали і стала багатошаровою. З'явився розподіл її шарів за функціональним призначенням.

Алюміній як і раніше залишався основою комутуючої розводки. На третьому етапі відбулася заміна алюмінія на мідь, що спричинило ускладнення структури металізації і призвело до суттєвих змін в технологічному процесі формування. Останні два етапи характеризуються поступовим зростанням числа рівнів розводки.

Не випадково, що алюміній тривалий час залишався одночасно і контактним матеріалом до напівпровідника, і матеріалом міжз'єднань. Він має багато переваг:

- низький питомий опір (2,65 мкОм·см);
- висока адгезія до діелектриків;
- досить висока корозійна стійкість, завдяки його пасивуючому оксиду;
- утворює низькоомні не випрямляючі контакти з $p^+ - Si$ та $n^+ - Si$;
- Є елементом III групи періодичної системи і дуже мало розчинюється в кремнії, утворюючи в його забороненій зоні тільки дрібні акцепторні енергетичні рівні.

Однак зі зменшенням розмірів елементів ІС чітко проявилися і недоліки, властиві алюмінію як контактному матеріалу. Ці недоліки

визначаються перш за все характером фізико-хімічної взаємодії з Si та SiO₂. Основними з них є:

- активна взаємодія з кремнієм в області контактного вікна при термообробці;
- висока схильність термоміграції та електроміграції.

При зменшенні розмірів елементів ІС було встановлено, що причиною постійних відмов ІС з одношаровою алюмінієвою металізацією стало закорочування р-п-переходів в результаті термообробки. Селективне видалення плівки алюмінію з поверхні підкладки в області контактного вікна після термообробки при 470°C, протягом 30 хв, виявляє катастрофічне погіршення морфологічної досконалості міжфазної границі контакту у вигляді появи глибоких порожнин в кремнії, що показує РЕМ-мікрофотографія (див. рис. 3.1)

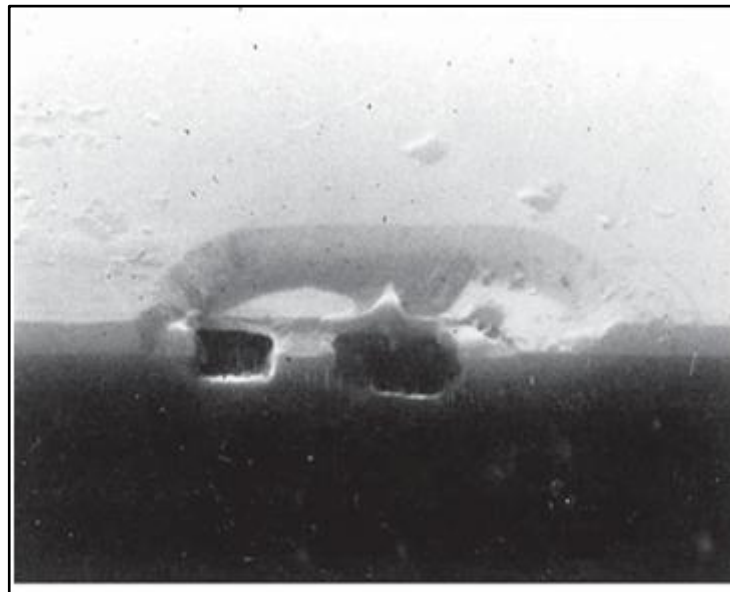


Рисунок 3.1 – РЕМ-мікрофотографія морфології поверхні ІС в області контактного вікна після термообробки при 470°C, протягом 30 хвилин і видалення плівки алюмінію

Система Al-Si має діаграму фазових рівноваг евтектичного типу [20] (див. рис. 3.2).

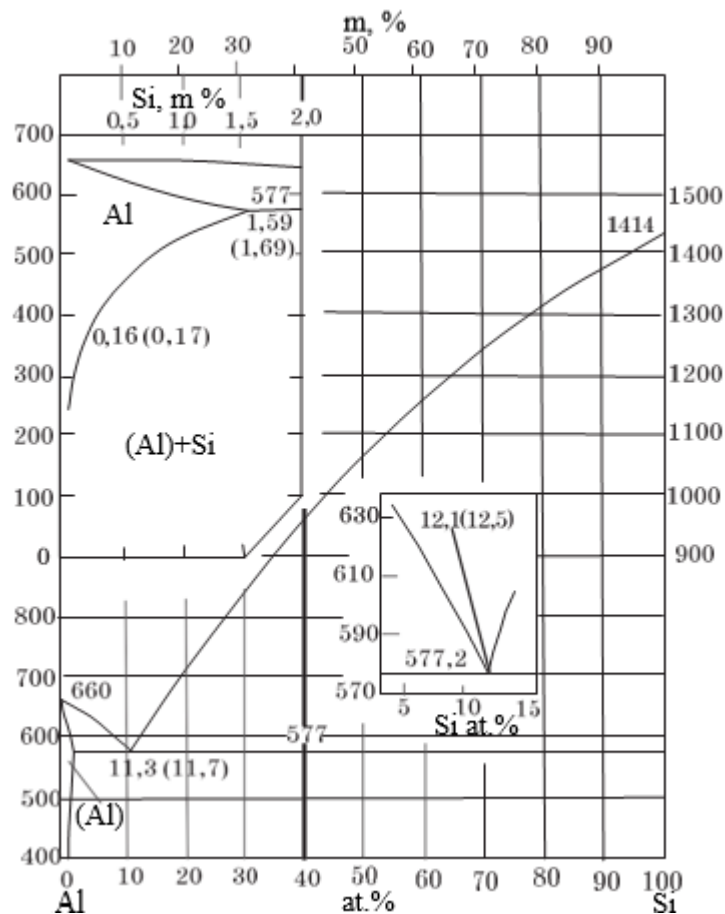


Рисунок 3.2 – Діаграма стану системи Al-Si

Al практично не розчинюється в Si в той час, коли в алюмінії може розчинитися до 1,65 % кремнія. Евтектика плавиться при температурі 577°C. Наслідком такого характеру взаємодії в системі є процес розчинення кремнія з підкладки в плівці алюмінія при відносно низьких температурах, тобто алюміній травить кремній.

Експериментально встановлено, що виникнення проколів р-п-переходів пов'язано із зазначеними вакансійними пустотами, що утворюються як результат неоднорідного розчинення кремнія в алюмінії.

Ці пустоти заповнюються алюмінієм з розчиненим у ньому кремнієм можуть призвести до короткого замикання p-n-переходів (див. рис. 3.3).

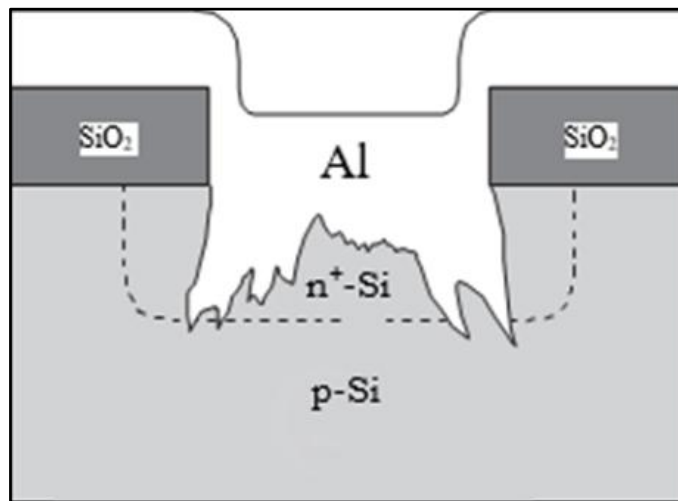


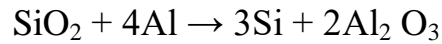
Рисунок 3.3 – Розчинення кремнія алюмінієвою плівкою

Встановлено, що глибина проникнення алюмінія вглиб кремнія, що оцінюється за глибиною пустот в локальних місцях області контакту, практично не змінюється в діапазоні 300-500°C і становить 40-90 нм [21].

У діапазоні температур 500-577°C відбувається різке зростання глибини проникнення до 1,25-1,45 мкм. Настільки неоднорідне розчинення кремнію і заповнення утворених пустот алюмінієм, а також різке зростання глибини проникнення алюмінію вглиб кремнію в діапазоні 500-577°C, викликані появою рідкої фази, яку проявляє кремній, хоча температура термообробки нижче, ніж температура плавлення евтектики [22]. На це вказує те, що кількість розчиненого в алюмінії кремнію значно перевищує ту кількість, яка повинна розчинитися згідно діаграм фазових рівноваг в алюмінії при вказаній температурі термообробки.

Однією з причин появи рідкої фази при зниженій температурі можуть стати локальні осередки з температурою вище 577°C, необхідної для появи рідкої фази. Зазначені локальні осередки можуть утворитися в

результаті сильної ізотермічної реакції між алюмінієм і залишковим природнім оксидом кремнію:



За рахунок ізотермічної реакції звільняється енергія 220 кДж на 1 моль реагуючого оксиду. Перед процесом нанесення плівки алюмінія, проводиться операція видалення природного оксиду. Однак, як показали дослідження, на поверхні кремнію все ж таки є залишковий квазі-оксид SiO_x , неоднорідний за товщиною (0,4-3 нм), та своїм властивостям [23]. Зазначений шар утворюється в результаті неконтрольованого швидкого реокислення кремнію під дією атмосферного повітря, в результаті чого в ньому міститься досить велика кількість неконтрольованих домішок [24]. Все це призводить до того, що при термообробці на різних ділянках кремнієвої поверхні інтенсивність взаємодії плівки алюмінію із залишковим оксидом виявляється різною, викликаючи локальні осередки, з температурою вище за температуру евтектики.

Експериментально встановлено, що зародження пустот починається по краях контактних вікон, тобто там, де утворюється більша кількість залишкового оксиду. Другою причиною появи рідкої фази є розмірні ефекти в тонких плівках, обумовлені помітним внеском поверхневої енергії в процеси фазових переходів. Важливим моментом цих ефектів є те, що поява рідкої фази можлива при температурі нижче очікуваної температури плавлення розглянутого матеріалу, тобто для системи Al-Si її поява можлива при температурі нижче евтектичної (577°C). Пустоти виникають на краях контактних вікон. Дані ділянки мають підвищену поверхневу енергію, тому, з одного боку, саме на цих ділянках появу рідкої фази слід очікувати в першу чергу. З іншого боку, по тій самій умові, зазначені ділянки є стоком для всіляких кристалічних дефектів

кремнію, місцем локальної концентрації механічної напруги. Тому саме на цих ділянках слід очікувати найбільші глибинні проплавлення кремнію.

Особливо, проблема неоднорідного розчинення кремнію і заповнення утворених порожнеч алюмінієм, проявляється в структурах ІС із дрібно залягаючими р-n-переходами і контактними вікнами, виконаними за технологією повного емітера [21].

Суть цієї технології в наступному. У замаскованому шарі SiO_2 розкриваються контактні вікна до кремнію, площею $1-2 \text{ мкм}^2$, і через ці вікна проводиться операція іонної імплантації в результаті якої легована область практично збігається з геометрією контактного вікна (див. рис. 3.4, а).

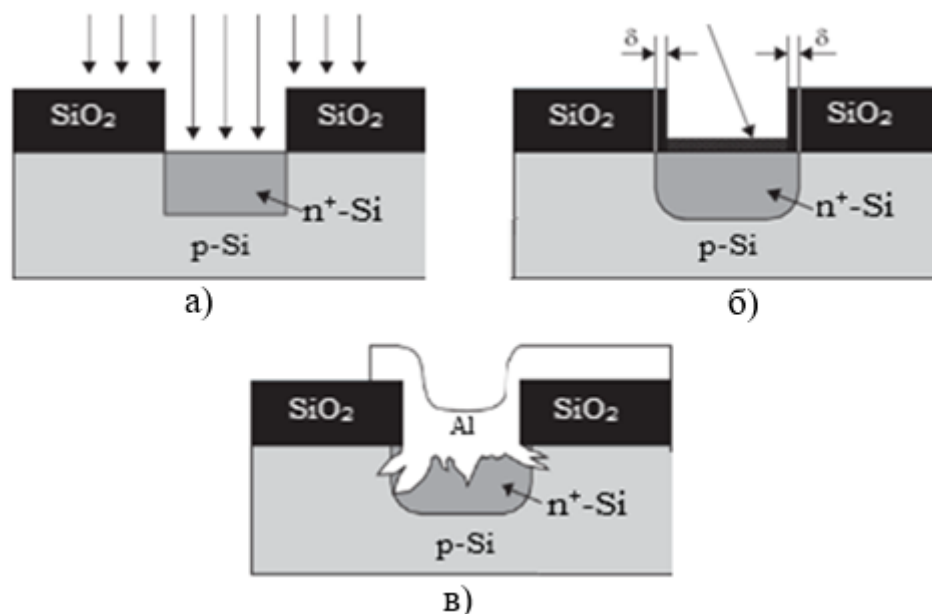


Рисунок 3.4 – Технологія виготовлення між'єднань біполярних транзисторів з повним емітером

На стадії активації домішок, яка проводиться шляхом відпалу в дифузійній трубці, проходить певний перерозподіл (дифузія) легуючої домішки, в результаті якого бокова границя р-n-переходу, наприклад емітер-база, зміщується від краю вікна під маску SiO_2 на незначну

величину δ (див. рис. 3.4, б). Однак це створює умови для формування контакту до активної області транзистора в тих же контактних вікнах в замаскованих SiO_2 , через які здійснювалося легування.

Перед нанесенням шару металізації проводиться операція промивання вікна, видалення з поверхні кремнія, у вікні утвореного в результаті активаційного відпалу, тонкого шару легованого скла, що здійснюється в слабких розчинах неорганічних розчинників.

Використання алюмінію в якості матеріалу, що забезпечує контакт з кремнієм, в цій технології стикається з тим, що при подальшому процесу термообробки відбувається закорочування р-n-переходів в горизонтальному напрямку, де відстань до р-n-переходу виявляється незначною (див. рис. 3.4, в).

Уникнути термообробки ІС після формування металізації виявляється неможливим з декількох причин. Першою причиною є те, що термообробка необхідна для формування власне самого контакту.

Практично неможливо отримати поверхню контактного вікна, повністю вільну від природного оксиду кремнію через процес швидкого реокислення. У зв'язку з цим слід також зазначити, що на ідеально очищеній поверхні, яка завдяки своїй чистоті має максимально можливу для неї поверхневою енергією, не менше інтенсивно відбувається адсорбція і всіляких інших домішок. З цієї причини навіть при максимально чистих умовах зберігання, на міжфазній границі метал-напівпровідник завжди виявляються домішки. Оскільки саме стан міжфазної границі визначає електрофізичні параметри контакту метал-напівпровідник [25]. Навіть невелика кількість домішок робить істотний вплив на якість контакту.

Таким чином, термообробка в процесі або після нанесення металу необхідна для розчинення приповерхневого забрудненого шару кремнія в контактному вікні.

Є ряд шляхів вирішення проблеми активної взаємодії алюмінія з кремнієм в процесі термообробки. Один з них – це використання методів швидкого термічного відпалу, при якому температура виявляється досить високою, щоб утворилася рідка фаза, але тривалість мала, щоб відбулося інтенсивне розчинення кремнію в алюмінії і виникли проплавлення (див. рис. 3.5).

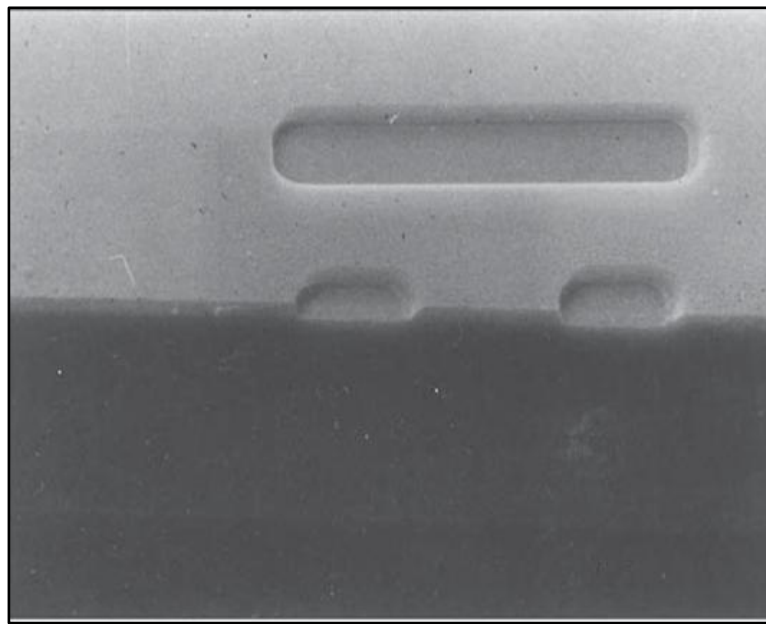


Рисунок 3.5 – РЕМ-мікрофотографія морфології поверхні ІС в області контактного вікна після швидкого термічного відпалу та видалення плівки алюмінія

РЕМ-мікрофотографія демонструє область контактного вікна після швидкого відпалу і селективного видалення алюмінія. Поверхня кремнія в контактному вікні є рівною і не має проплавлення, що виникають при тривалих термічних діях.

Недоліком цього шляху, є те, що термічна обробка, в результаті якої ймовірно виникнення проплавлення, також потрібне на наступних операціях технологічного процесу, які вже не пов'язаних з формуванням металізації. Інший шлях вирішення проблеми взаємодії між алюмінієм і

кремнієм можливе використання в якості матеріалу міжз'єднань алюмінія, легованого кремнієм до концентрації, в межах існування області твердого розчину [21]. Цей спосіб дозволяє трохи знизити активність взаємодії між алюмінієм і кремнієм, проте не усуває самої взаємодії. В результаті, спостерігається підвищення температури взаємодії, але збільшення глибини проникнення алюмінія в кремній з ростом температури зберігається. Проте, даний шлях на деякий час продовжив існування одношарової алюмінієвої металізації. Перший етап розвитку системи міжз'єднань ІС [29].

Важливо відзначити, що поступово до кінця першого етапу розвитку сформувався комплекс параметрів, за якими висуваються вимоги до системи металізації ІС. Основними серед них є:

- питомий контактний опір контакту до p^+ і n^+ -типам кремнія;
- питомий опір міжз'єднань і величина затримки сигналу RC-ланцюгом;
- схильність до електроміграції;
- термічна стабільність.

В умовах зменшення розмірів елементів задовольнити зростаючим вимогам за вказаними параметрами одношарова система металізації не змогла. При наявності одного з найнижчих питомих опорів, недоліками одношарової алюмінієвою металізації є [26]:

- досить висока схильність до електроміграції;
- сильно розрізняються значення контактного опору до p^+ та n^+ -типу кремнія (40 і 400 мкОм·см відповідно), що обумовлено додатковим підлегуванням p^+ -області і компенсацією легованих домішок в n^+ -області, оскільки алюміній є акцепторною домішкою в кремній;
- низька термічна стабільність.

Спроби замінити алюміній іншим матеріалом, наприклад легованим полікремнієм, мали лише тимчасовий успіх.

Стало ясно, що задоволення вимог до всього комплексу параметрів можливо тільки при використанні матеріалів з різними специфічними властивостями і розподілу функцій цих матеріалів в складі системи металізації [30].

3.2 Контакт Cu-Si

Головні переваги міді як матеріалу міжз'єднань перед алюмінієм це:

- більш низький питомий опір (1,68 мкОм·см), що за оцінками дає 40% виграшу у величині RC – затримки [27];
- більш висока термічна стабільність і істотно менша схильність до електроміграції .

Однак разом із перевагами мідь має і небажані властивості:

- мідь є небезпечною домішкою для кремнієвої технології, в кремнії є швидко дифундуючою домішкою і утворює глибокі енергетичні рівні в забороненій зоні кремнію [28]. Ці рівні є пастками захоплення, які катастрофічно впливають на швидкодію напівпровідникового приладу;
- мідь швидко дифундує і в багатьох інших матеріалах, включаючи SiO₂. Тому при використанні міді приймаються серйозні запобіжні заходи до потрапляння цієї домішки у напівпровідник.

Перший рівень багатошарової багаторівневої системи металізації, з мідними міжз'єднаннями, повністю відповідає першому рівню багатошарової алюмінієвої металізації.

Принципова відмінність технології мідної металізації від алюмінієвої складається в способі формування самих провідників. Якщо в алюмінієвій металізації провідники формуються, шляхом прямої фотолітографії, то в

мідній металізації спочатку осідає шар внутрішньорівневого діелектрика (див. рис. 3.6).

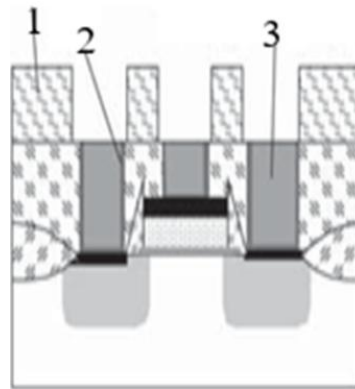


Рисунок 3.6 – Схема формування багатошаровою системи металізації на основі міді – перша стадія: 1 – внутрішньорівневий діелектрик; 2 – ДБШ; 3 – вольфрамова пробка

У цьому шарі за допомогою фотолітографії і процесу сухого травлення створюються траншеї, малюнок яких відповідає майбутнім мідним провідникам. Далі послідовно наносяться тонкий ДБШ (дифузний бар'єрний шар) методом конформного осадження і шар міді одним з методів, що дозволяють без пустот заповнити зазначені траншеї.

Після цього проводиться операція планарізації, в процесі якої мідь і ДБШ видаляються з відкритої поверхні діелектрика і залишаються тільки всередині траншей, в результаті чого виникають мідні провідники, з усіх боків крім верху, оточені ізолюючим діелектриком. Даний прийом формування мідних провідників отримав назву «damascene» (прикрашати рисою) за аналогією з візерунками, створюваними рисою золота на виробках з дамаської сталі (див. рис. 3.7).

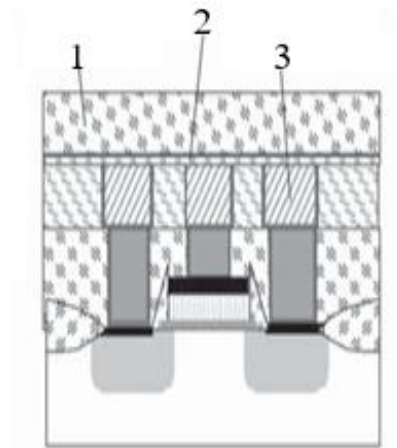


Рисунок 3.7 – Схема формування багатошаровою системи металізації на основі міді – друга стадія: 1 – міжрівневий діелектрик; 2 – діелектричний ДБШ; 3 – перший рівень мідних міжз'єднань

Важливо звернути увагу, що на відміну від алюмінієвого, мідний провідник з усіх боків обов'язково повинен бути оточений ДБШ. Це необхідно для запобігання дифузії міді в діелектрик і далі в напівпровідник, оскільки при наявності верхніх шарів дифузія міді стає аномальною.

Технологічно легко оточити мідний провідник шляхом конформного осадження, що проводить ДБС на дно і бічні стінки траншей і контактних колодязів (див. рис. 3.8).

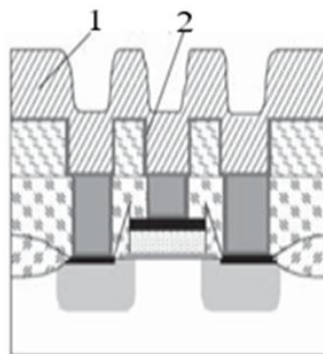


Рисунок 3.8 – Схема формування багатошаровою системи металізації на основі міді – третя стадія: 1 – шар міді ; 2 – ДБШ

Однак і верх мідних між'єднань також необхідно захистити дифузійним бар'єрним шаром, але це важко зробити за допомогою традиційних провідних ДБШ, щоб не закоротити між'єднання між собою.

Найбільш простим варіантом вирішення зазначеної проблеми є нанесення тонкого діелектричного ДБШ по всій поверхні. Головним для цього шару є його дифузійно-бар'єрні властивості по відношенню до міді. Діелектрична проникненість цього матеріалу може бути досить високою, у порівнянні з міжрівневим або внутрішньорівневим діелектриком, оскільки товщина даного шару мала і не вносить помітного внеску в паразитну ємність і, як наслідок, в RC-затримку сигналу.

Наступним етапом є створення другого рівня між'єднання. Для цього наноситься шар міжрівневого діелектрика, і в ньому, за допомогою фотолітографії і сухого травлення вскриваються міжрівневі контактні вікна-колодязі. Далі послідовно осідають конформний ДБШ і мідний НШ (напівспокійний шар), що заповнюють перехідні вікна (див. рис. 3.9). Далі проводиться операція планаризації, в результаті якої мідний шар і ДБШ видаляються з поверхні СМУД, і залишаються мідні пробки, оточені ДБШ (див. рис. 3.10).

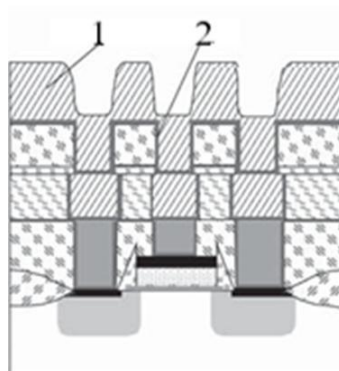


Рисунок 3.9 – Схема формування багатошаровою системи металізації на основі міді – четверта стадія: 1 – шар міді; 2 – ДБШ

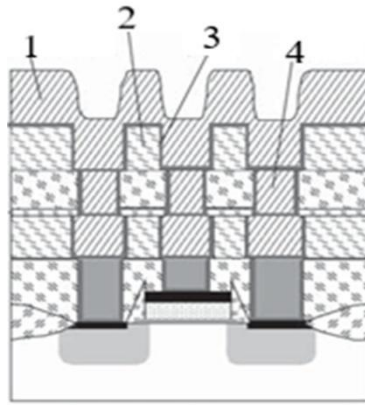


Рисунок 3.10 – Схема формування багатошаровою системи металізації на основі міді – п'ята стадія: 1 – шар міді; 2 – внутрішньорівневий діелектрик; 3 – ДБШ; 4 – мідна пробка

Після цього осідає шар внутрішньорівневого діелектрика, в якому витравляються траншеї, і на поверхню конформно наноситься ДБШ. Траншеї, покриті ДБШ, електрохімічно заповнюються міддю. Після чого проводиться планарізація рельєфу, і мідні між'єднання другого рівня захищені зверху тонким діелектричним ДБШ (див. рис. 3.11).

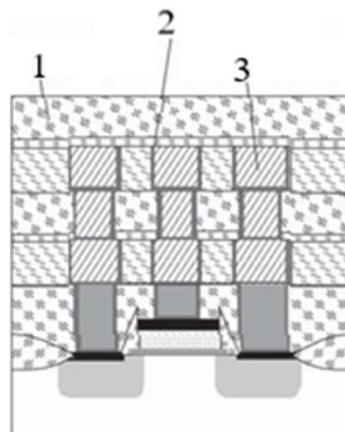


Рисунок 3.11 – Схема формування багатошаровою системи металізації на основі міді – шоста стадія: 1 – міжрівневий діелектрик; 2 – діелектричний ДБШ; 3 – другий рівень мідних між'єднань

Наявні вище рівні між'єднаннь мають таку ж структуру, тому описаний комплекс операцій для формування другого рівня повторюється в залежності від кількості рівнів металізації. Характерною особливістю формування другого і наступних рівнів є те, що міддю заповнюються і траншеї, і міжрівневі контактні колодязі. Дана технологія називається «dual damascene» (подвійне прикрашення рискою).

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОНТАКТУ Cu-Si

4.1 Хімічна обробка Si підкладки пред напиленням Cu

Було проведено три досліди по напиленню міді на кремнієві підкладки n-типу провідності.

Перед завантаженням в робочу камеру вакуумної установки ВУП-5М (див. рис. 4.1) кремнієві підкладки пройшли дві стадії хімічного очищення:



Рисунок 4.1 – Вакуумна установка ВУП-5М

1. Очистка зразків у 33% розчину перекисю водню, який має бути доведений до температури кипіння. Час очистки в перекисю 15 хвилин. Ця стадія дозволяє видалити з поверхні органічні забруднення.

2. Очистка зразків у 15% розчину фтористоводневої кислоти. Час очистки в кислоті 10 хвилин. Ця стадія дозволяє частково видалити з

поверхні плівку окислу, яка негативно впливає на адгезію металеві плівки та електро-фізичні властивості контакту. Очищення кислотою проводиться перед самим завантаженням у вакуумну установку, щоб зменшити можливість повторного окислення.

Після завантаження у робочий об'єм кремнієвих підкладок, камеру відкачали до рівня високого вакууму, після чого підкладки пройшли стадію очищення нагріванням, що дозволило видалити плівку окислу, яка залишилася після хімічної очистки.

Підкладки нагрівалися до різних температур: 300°C, 500°C і 650°C, щоб визначити оптимальну температуру нагріву.

Напилення електролітичної міді у всіх трьох дослідах відбувалося при температурі 200°C, бо саме ця температура рекомендована у технічній документації вакуумної установки ВУП-5М.

Напилення проводилося масочним способом з використанням фторопластових та слюдяних масок, в залежності від температури нагріву. Час напилення складав три хвилини.

Після охолодження зразка робоча камера розгерметизувалась. Маємо кремнієву пластину з напиленими мідними контактами (див. рис. 4.2).



Рисунок 4.2 – Кремнієвий зразок з напиленими мідними контактами

Усі контакти на зразку відрізняються площею, через нещільне прилягання маски. Щоб виключити вплив крайових ефектів на форму ВАХ, на

пластині візуальним способом обиралися два найбільш якісні та найбільш схожі за розміром контакти і вимірювалися вольтамперні характеристики.

Зняті сімейства вольтамперних характеристик напилених контактів дали наступні результати:

Дослід №1: Температура нагріву підкладки 300°C.

Таблиця 4.1 – Прямий струм через контакт № 1

I,мА	0,003	0,024	0,04	0,055	0,07	0,093	0,133	0,19	0,31
V,В	0,001	0,005	0,006	0,008	0,009	0,01	0,011	0,012	0,0122
I,мА	0,438	0,725	0,846	0,954	1,009	1,101	1,402	1,699	2,000
V,В	0,0123	0,0128	0,013	0,0131	0,0132	0,0134	0,0136	0,014	0,0145

Таблиця 4.2 – Зворотній струм через контакт № 1

I,мА	-0,002	-0,004	-0,006	-0,01	-0,012	-0,015	-0,017	-0,019	-0,027
V,В	-0,001	-0,015	-0,002	-0,003	-0,003	-0,004	-0,004	-0,005	-0,007
I,мА	-0,028	-0,033	-0,036	-0,039	-0,043	-0,048	-0,05	-0,054	-0,062
V,В	-0,008	-0,009	-0,01	-0,012	-0,014	-0,016	-0,017	-0,019	-0,024

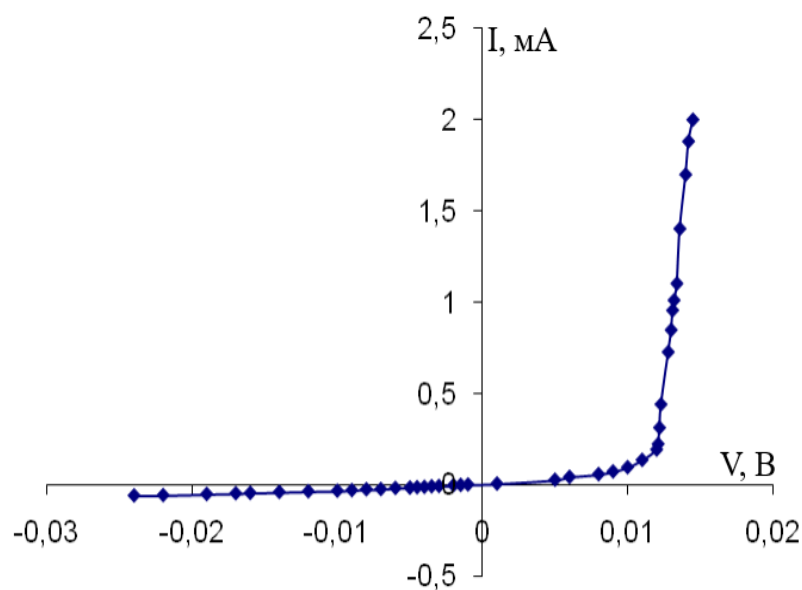


Рисунок 4.3 – ВАХ контакту № 1

Таблиця 4.3 – Прямий струм через контакт № 2

I,мА	0,022	0,042	0,068	0,098	0,133	0,205
V,В	0,003	0,005	0,006	0,007	0,0074	0,0078
I,мА	0,406	0,642	0,984	1,568	1,774	2,000
V,В	0,008	0,0083	0,0088	0,0093	0,0096	0,01

Таблиця 4.4 – Зворотній струм через контакт № 2

I,мА	-0,002	-0,004	-0,007	-0,008	-0,009	-0,01	-0,024
V,В	-0,001	-0,0015	-0,002	-0,0025	-0,003	-0,004	-0,005
I,мА	-0,035	-0,037	-0,045	-0,056	-0,07	-0,096	-0,132
V,В	-0,007	-0,008	-0,01	-0,011	-0,013	-0,018	-0,030

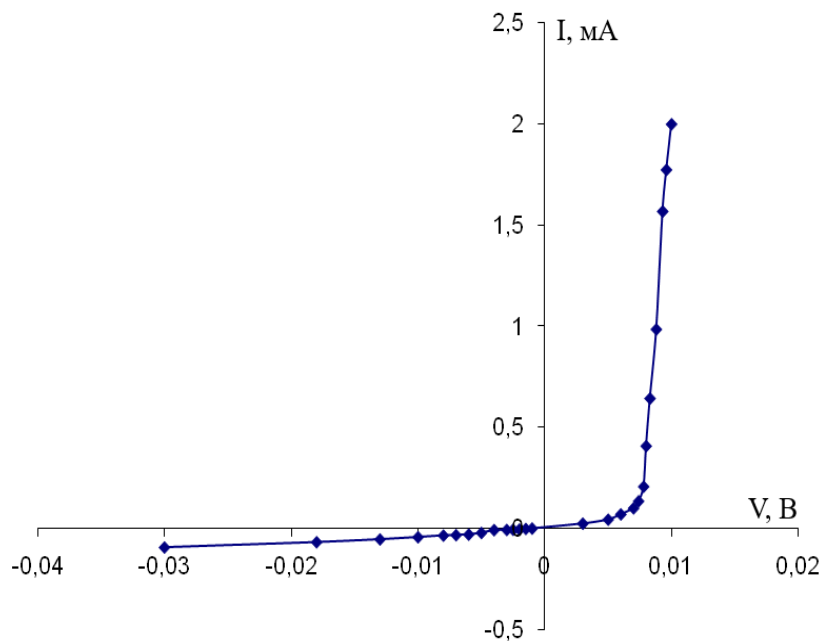


Рисунок 4.4 – ВАХ контакту № 2

Зняті сімейства вольт-амперних характеристик для контакту № 1 і № 2 та побудовані їх залежності. При температурі відпалу підкладки 300°C, ВАХ для обох контактів своїм видом підтверджує випрямляючі властивості контакту на межі розділу Cu-Si.

Дослід №2: Температура нагріву підкладки 500°C.

Таблиця 4.5 — Прямий струм через контакт № 1

I,мА	0,031	0,055	0,101	0,133	0,207	0,272
V,В	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,01
I,мА	0,659	0,754	0,804	1,021	1,109	1,139
V,В	0,092	0,112	0,133	0,169	0,187	0,192

Таблиця 4.6 – Зворотній струм через контакт № 1

I,мА	-0,002	-0,042	-0,091	-0,155	-0,225	-0,342
V,В	-0,002	-0,003	-0,004	-0,009	-0,016	-0,033
I,мА	-0,677	-0,777	-0,911	-1,177	-1,562	-1,88
V,В	-0,074	-0,093	-0,119	-0,175	-0,259	-0,331

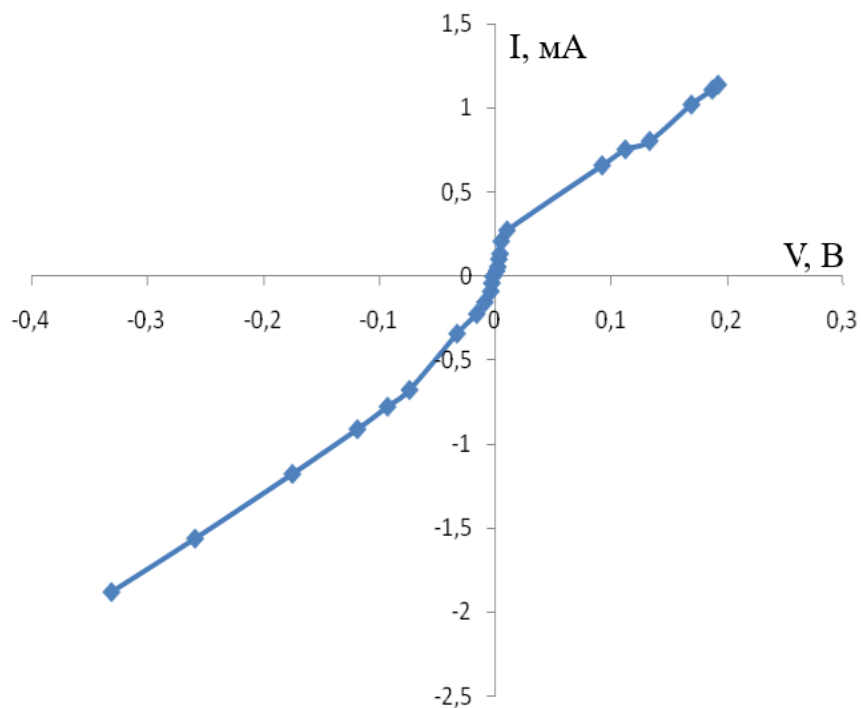


Рисунок 4.5 – ВАХ контакту № 1

Таблиця 4.7 – Прямий струм через контакт № 2

I,мА	0,029	0,051	0,111	0,113	0,195	0,252
V,В	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,01
I,мА	0,619	0,724	0,809	1,025	1,119	1,139
V,В	0,082	0,102	0,113	0,169	0,19	0,192

Таблиця 4.8 – Зворотній струм через контакт № 2

I,мА	-0,002	-0,032	-0,081	-0,145	-0,222	-0,332
V,В	-0,002	-0,003	-0,005	-0,007	-0,015	-0,023
I,мА	-0,677	-0,767	-0,921	-1,167	-1,52	-1,58
V,В	-0,064	-0,083	-0,129	-0,185	-0,229	-0,231

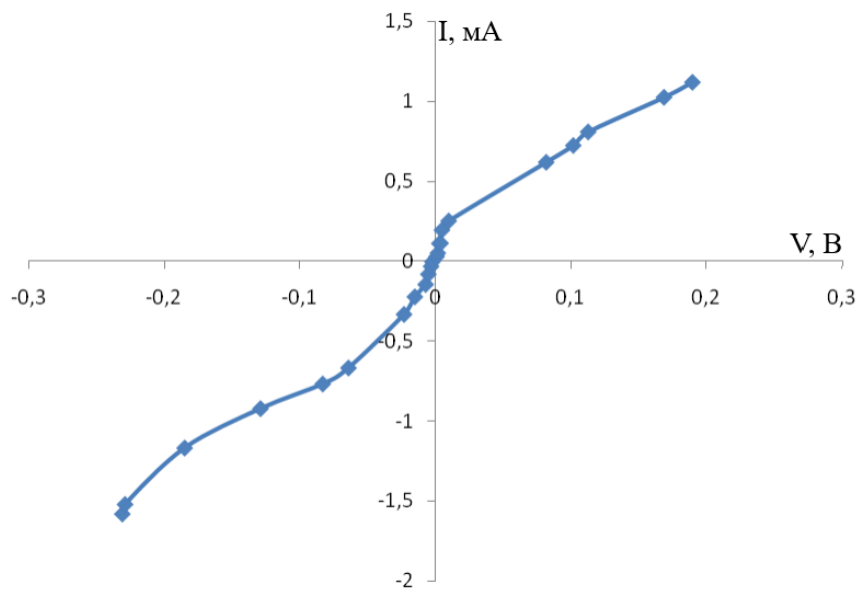


Рисунок 4.6 – ВАХ контакту № 2

У досліді № 2 ВАХ контакту має інший вигляд на відміну від ВАХ у досліді № 1. Підвищення температури відпалу з 300°C до 500°C зумовило формування контакту близького до омичного. На рисунках 4.5 та 4.6 бачимо зміну кривої залежності струму від напруги після підвищення температури.

Дослід № 3: Температура нагріву підкладки 650°C.

Таблиця 4.9 – Прямий струм через контакт № 1

I,мА	0,023	0,056	0,076	0,099	0,133	0,213
V,В	0,003	0,009	0,013	0,017	0,022	0,032
I,мА	0,213	0,386	1,034	1,464	1,688	2,000
V,В	0,032	0,05	0,09	0,116	0,126	0,14

Таблиця 4.10 – Зворотній струм через контакт № 1

I,мА	-0,051	-0,078	-0,101	-0,124	-0,154	-0,228
V,В	-0,003	-0,009	-0,013	-0,017	-0,022	-0,032
I,мА	-0,228	-0,383	-1,103	-1,580	-1,853	-2,000
V,В	-0,032	-0,049	-0,093	-0,115	-0,125	-0,178

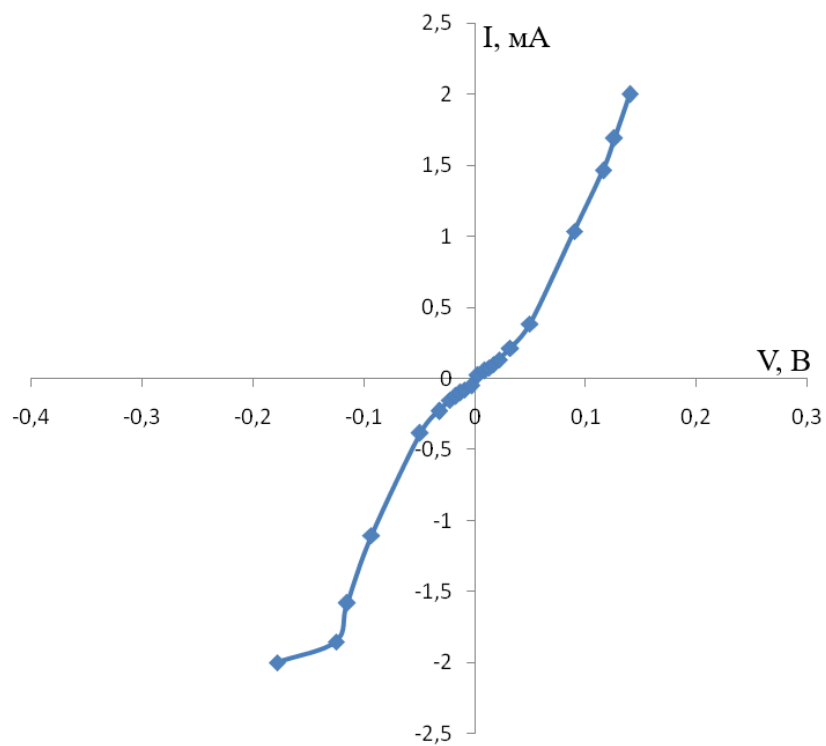


Рисунок 4.7 – ВАХ контакту № 1

Таблиця 3.11 – Прямий струм через контакт № 2

I,мА	0,016	0,045	0,092	0,124	0,177	0,321
V,В	0,002	0,005	0,012	0,016	0,022	0,037
I,мА	0,321	0,414	0,872	1,133	1,704	2,000
V,В	0,037	0,045	0,074	0,087	0,133	0,146

Таблиця 3.12 – Зворотний струм через контакт №2

I,мА	-0,1	-0,052	-0,097	-0,131	-0,189	-0,319
V,В	-0,002	-0,005	-0,012	-0,016	-0,023	-0,036
I,мА	-0,319	-0,41	-0,922	-1,127	-1,725	-2,000
V,В	-0,036	-0,044	-0,076	-0,087	-0,113	-0,128

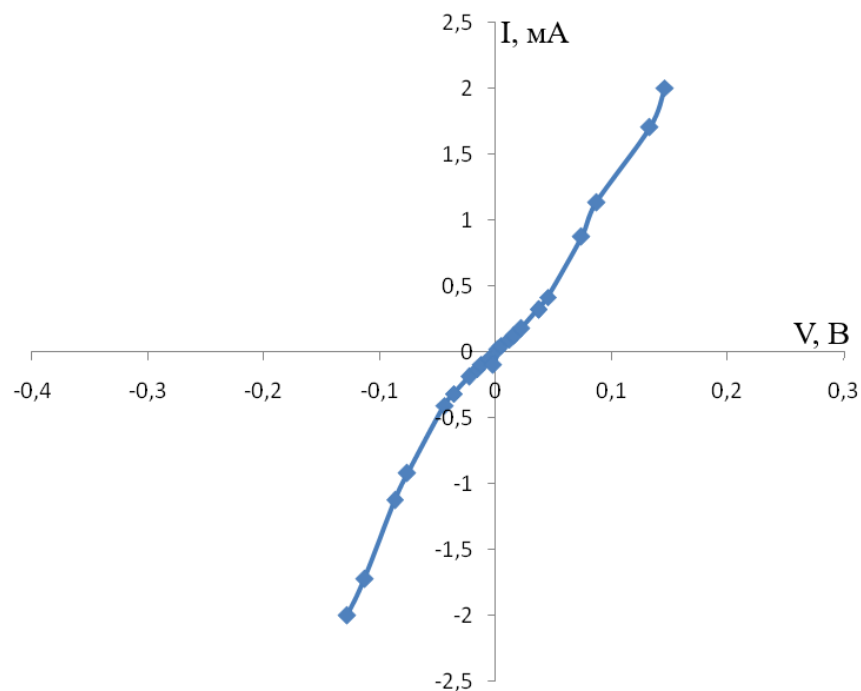


Рисунок 4.8 – ВАХ контакту № 2

Нагрів Si підкладки до 650°C сформував контакт ще більш близький до омичного ніж у попередньому досліді, що відображається видом ВАХ на рисунках 4.7 та 4.8.

4.2 Обговорення результатів

Аналізуючи результати даних дослідів було виявлено, що при нагріванні у високому вакуумі поліпшуються невикривляючі властивості за рахунок видалення з поверхні адсорбованих атомів, іонів і молекул, оскільки вони займають ті місця, які повинні були б займати атоми кремнію в шарі на поверхні. Через це погіршуються електричні характеристики і параметри контактів.

Також можна припустити що в результаті нагріву також частково зникають дефекти та недосконалості поверхні.

Провівши аналіз отриманих вольтамперних характеристик було встановлено, що під час виконання експериментальної частини вдалося знайти найбільш оптимальний метод отримання невикривляючих контактів на межі розділу Cu-Si. Технологія метода складається з трьох етапів:

1. Очистка зразків у розчинах перекису водню та фтористоводневої кислоти, причому перекис водню має бути доведений до температури кипіння. Час очистки в перекису 15 хвилин, а в кислоті 10. Очищення кислотою проводиться перед самою завантаження у вакуумну камеру, щоб зменшити можливість повторного окислення.

2. Зразок після відкачки камери до рівня високого вакууму слід нагрівати до 650°C , тому що саме при такій температурі с очищеної поверхні може бути остаточно видалений адсорбовані атоми кисню та інші забрудники поверхні.

3. Напилення плівки починається після відкачування з камери газових часток, які, через геометрію вакуумної камери, можуть потрапити на зразок з оточуючих стінок та деталей. Процес напилення має відбуватися при температурі 200°C та не менш ніж три хвилини.

Використовуючи саме цей метод був отриманий невикривляючий контакт на межі розділу Cu-Si.

ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської роботи було отримано контакт метал-напівпровідник Cu-Si за наступними технологічними етапами:

- очистка зразків протягом 15 хвилин у розчинах перекису водню та фтористоводневої кислоти, доведеному до температури кипіння.

- відпал зразків після відкачки камери до рівня високого вакууму при 300°C, 500°C, 650°C відповідно.

- напилення міді при температурі підкладки 200°C не менш ніж три хвилини.

Аналіз ВАХ отриманих контактів показав, що при температурі відпалу 300°C формується випрямляючий контакт, а при температурі 500°C та 650°C формується контакт близький до омичного.

Таким чином, в залежності від технологічних умов контакт Cu-Si можна сформувати як випрямляючий, так і омичний.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Том 3. Квантовая механика (нерелятивистская теория). 4-е изд., испр. М.: Наука, 1989. С. 223.
2. S. M. Sze and K. K. Ng, "Physics of Semiconductor Devices," 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York, 2007.
3. Родерик Э. Х. Контакты металл-полупроводник. М., Радио и связь, 1982. 208 с.
4. Технология СБИС / под ред. С. Зи. М.: Мир, 1986. Т. 2. 453 с.
5. Технология тонких плёнок. Т.1 / под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. Сов. Радио, 1977. 664 с.
6. Concepts in Spin Electronics / Ed. by S. Maekawa. New York: Oxford University Press, 2006. 398 p.
7. Курносов. А. И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / М. Высш. Шк., 1986. 368 с.
8. Стриха. В. И. Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки (физика, технология применение) / В.И. Стриха, Е.В. Бузанева, И.А. Радзиевский . Москва: Сов. Радио, 1974. 248 с.
9. Инжекционная электролюминесценция в квантово-размерных структурах InGaAs/GaAs с контактом металл/полупроводник и металл/окисел/полупроводник / М.В. Дорохин, П.Б. Демина, Н.В. Байдусь, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, М.М. Прокофьева. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2010. В. 5. С. 34-39.
10. Зи. С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. М.: Мир, 1984. Т. 1. 456 с.

11. Analysis of nonideal Schottky and $p-n$ junction diodes. Extraction of parameters from I-V plots / M. Lyakas, R. Zaharia, M. Eizenberg. J. Appl. Phys. 1995. V. 78. P. 5481-5489.
12. Koshkin N. I., Shirkevich M.G. Handbook of Elementary Physics. Moscow: Mir Publishers, 1977. 272 p.
13. Полевые транзисторы на арсениде галлия / ред. Ди Лоренцо Д. В., Канделуола Д. Д. М.: Радио и связь, 1988. 496 с.
14. Махний В. П., Мельник В. В. Фотоэлектрические свойства контакта Ni-ZnSe. Физика и техника полупроводников. Том 29. вып. 8. 1995. С. 1468-1472.
15. Чопра К., Дас С. Тонкопленочные солнечные элементы. Мир, 1986, 435 с.
16. Гуртов В. А. Твердотельная электроника. Москва: Учебное пособие, 2005. С. 45-50.
17. Зыков Г.А., Левандовский В. Г., Паничевская В.И., Панфилова С.В., Чайка Г.Е. Влияние токопрохождение на надежность диодов с барьером Шоттки. Радиотехника и электроника, 1985, т. 30, №11, С. 228-284.
18. Валиев К. А. ,Пашенцев Ю. И., Петров Г.В. Применение контакта метал-полупроводник в электронике. М.: Сов. радио, 1981. 304 с.
19. Pekarik, J., et al., "Enabling RFCMOS solutions for emerging advanced applications", Euro. Gallium Arsenide and Other Semic. Appl. Symp., EGAAS, 2005. p. 29.
20. Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. Справочник В 2 т. М.: Металлургиздат, 1962. 601 с.
21. Достанко А. П., Баранов В. В., Шаталов В. В. Пленочные токопроводящие системы СБИС. Минск.: Выш. шк., 1989. 238 с.
22. Рубцов А. Е. Структурные дефекты компонентов БИС. Обзоры по ЭТ. Сер.6. Материалы, 1982, №4, 897 с.

23. Carriere B., Deville J. P. The early stages of oxygen adsorption on silicon surfaces as seen by electron spectroscopy. *Sur. Sci.*, 1979, V. 80, pp. 278-286.
24. Beechinor J. T., Kelly P. V., O'Connor G. M., Crean G. M. in *Proceedings of the 2nd Int. Sym. on Ultra-clean Processing of Silicon Surfaces (UCPSS'94)*, 1994, Brugge, Belgium, p. 69.
25. Стриха В. И., Бузанева Е. В. *Физические основы надежности контактов металл-полупроводник в интегральной электронике*. М.: Радио и связь, 1987. 256 с.
26. Валиев С. А., Орликовский А. А., Васильев А. Г., Лукичев В. Ф. *Проблемы создания высоконадежных многоуровневых соединений СБИС*. *Микроэлектроника*, 1990, т. 19., вып. 2, С. 116-131.
27. Shacham-Diamand Y., Dubin V., Angyal M. Electroless copper deposition for ULSI. *Thin Solid Films*, 1995, V. 262, pp. 93-103.
28. Зи С. *Физика полупроводниковых приборов*. В 2-х книгах. Кн. 2. Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 495 с.
29. Мьюрарка. Ш. П. *Силициды для СБИС* / Ш. Мьюрарка. Перевод с англ. В. В. Баранова. Под ред. Ю. Д. Чистякова. М.: Мир, 1986. 176 с.
30. Nosack H. H. Electrical mechanical features of the platinum silicide-aluminum reaction. *J. Appl. Phys.*, 1973, V. 44, No 8, pp. 34-74.