

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні  
Кафедра електроніки, інформаційних систем та програмного  
забезпечення

**Пояснювальна записка**

до кваліфікаційної роботи

рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ перший бакалаврський \_\_\_\_\_  
(другий магістерський рівень)

на тему \_\_\_\_\_ Вдосконалення технології виготовлення силового тиристора с  
термодинамічною стійкістю на 2800 В та 1000 А. \_\_\_\_\_

Виконав: студент (ка) IV курсу, групи 6.1530-з

Воробйова В. С.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Напряму підготовки \_\_\_\_\_

(шифр)

Спеціальності \_\_\_\_\_ 153 \_\_\_\_\_

Мікро- та наносистемна техніка

(назва)

Керівник \_\_\_\_\_ професор, доцент, к.т.н. \_\_\_\_\_

Ніконова З. А.

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

Рецензент \_\_\_\_\_

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

м. Запоріжжя - 2024 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні**

Рівень вищої освіти перший бакалаврський  
(перший (бакалаврський) рівень, другий (магістерський) рівень)  
Напрямок підготовки 153  
(шифр)  
Спеціальність Мікро- та наносистемна техніка  
(назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри ЕІСПЗ  
Критська Т.В.

“ 25 ” травня 20 24 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Воробйова Валентина Сергіївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Вдосконалення технології виготовлення силового тиристора с термодинамічною стійкістю на 2800 В та 1000 А.

керівник проекту (роботи) Ніконова Зоя Андрійовна

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “26” грудня 2023 року №2212-с

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 20 травня 2024 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Імпульсна напруга в закритому стані 2800 В, Ударний струм у відкритому стані 1000 А

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Дослідження технологічних особливостей силових тиристорів. Технологія виготовлення силового тиристора с термодинамічною стійкістю на 2800 В та 1000А. Охорона праці та техногенна безпека

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Технологічний процес виготовлення силового тиристора. Технологічний процес дифузії бора. Технологічний процес формування структури і конструкції тиристора

## 6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
<i>I</i>	<i>Ніконова З. А., професор</i>	
<i>II</i>	<i>Ніконова З. А., професор</i>	
<i>III</i>	<i>Ніконова З. А., професор</i>	

7. Дата видачі завдання 27.12.2023 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
<i>1</i>	<i>Дослідження технологій виготовлення та конструкцій тиристорів</i>	<i>18.02.2024</i>	
<i>2</i>	<i>Моделювання складових струмів тиристора при включенні зовнішніх напруг</i>	<i>10.03.2024</i>	
<i>3</i>	<i>Технологічне моделювання впровадження домішки при формуванні структури тиристора</i>	<i>18.03.2024</i>	
<i>4</i>	<i>Розробка технологічного процесу дифузії фосфору і бору</i>	<i>14.04.2024</i>	
<i>5</i>	<i>Розробка технологічного процесу формування структури і конструкції тиристора</i>	<i>24.04.2024</i>	
<i>6</i>	<i>Охорона праці та техногенна безпека</i>	<i>28.04.2024</i>	
<i>7</i>	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	<i>20.05.2024</i>	
<i>8</i>	<i>Рецензування, нормоконтроль, підписання роботи</i>	<i>25.05.2024</i>	
<i>9</i>	<i>Оприлюднений захист магістерської роботи</i>	<i>31.05.2024</i>	

Студент

( підпис )

*Воробйова В. С.*  
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

( підпис )

*Ніконова З. А.*  
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

( підпис )

*Верьовкін Л. Л.*  
(прізвище та ініціали)

## Реферат

Дипломна робота містить 72 сторінки, 22 рисунка, 9 таблиць, 10 джерел літератури.

Об'єкт дослідження – технологічний процес виготовлення силових тиристорів

Мета роботи – розробка технологічного процесу виготовлення силового тиристора з термодинамічною стійкістю на 2800 В та 1000 А.

Завдання роботи – вдосконалити технологічний процес механічної обробки кремнієвих пластин; розробити технологічний процес дифузії бора і фосфору; розробити технологічний процес фотолітографії; розробити технологічний процес формування структури і конструкції тиристора.

Методика досліджень – аналітичний огляд сучасних технологічних процесів виготовлення напівпровідникових приладів.

Короткий виклад результатів досліджень – вдосконалена технологія виготовлення силового тиристора з термодинамічною стійкістю на 2800 В та 1000 А відповідає технологічним процесам виробництва силових напівпровідникових приладів, а також методам контролю, які використовуються при виготовленні напівпровідникових приладів.

Результати впроваджень – результати розробки рекомендовано для впровадження у навчальний процес при вивченні дисципліни «Технології мікро- та наносистемної техніки».

Прогнозні пропозиції – рекомендується подальша доробка технології впровадження домішок в структуру кремнієвої структури.

ТЕХНОЛОГІЯ, ОБРОБКА, ДИФУЗИЯ, ФОТОЛІТОГРАФІЯ, ТРАВЛЕННЯ, СТРУКТУРА, ПЛАСТИНА

Дипломну роботу виконано на кафедрі електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення з 12.02.2024 р. по 10.05.2024 р.

## Зміст

	Стор.
Вступ .....	6
1 Дослідження технологічних особливостей силових тиристорів .....	8
1.1 Основні особливості і класифікація тиристорів.....	8
1.2 Структура і вольт-амперна характеристика тиристора .....	9
1.3 Технологія виготовлення та конструкції тиристорів .....	14
1.4 Моделювання складових струмів тиристора при включенні зовнішніх напруг .....	19
1.5 Дифузійний метод вибіркового введення домішок в монокристал напівпровідника .....	24
2 Технологія виготовлення силового тиристора с термодинамічною стійкістю на 2800 В та 1000 А .....	29
2.1 Механічна обробка .....	31
2.2 Технологічне моделювання впровадження домішки при формуванні структури тиристора .....	34
2.2.3 Технологічний процес дифузії бора .....	40
2.3 Технологічний процес першої фотолітографії .....	41
2.4 Технологічний процес дифузії фосфору і бору з сторони управляючого електроду .....	43
2.5 Технологічний процес другої фотолітографії .....	44
2.5 Технологічний процес металізації .....	46
2.6 Технологічний процес формування структури і конструкції тиристора .....	49
3 Охорона праці та техногенна безпека .....	59
3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів .....	59
3.2 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробни-	

чих факторів .....	61
3.3 Виробнича санітарія .....	62
3.4 Електробезпека .....	67
3.5 Пожежна безпека. Техногенна безпека .....	68
Висновки та рекомендації .....	71
Перелік посилань .....	72

## Вступ

Життя сучасного суспільства не можливо представити без електронних пристроїв всілякого типу. Переважна кількість електроніки заснована на використанні різних напівпровідникових приладів. Важливим класом цих елементів є силові напівпровідникові прилади, які використовуються в різних високочотних ланцюгах, пристроях великої потужності і в іншому електричному силовому устаткуванні.

Унікальним в рамках України виробництвом володіє завод ТОВ "Елемент-Перетворювач". Відпрацьовані і відлагоджені технологічні процеси дають можливість випускати високоякісні силові напівпровідникові прилади різних типів.

Тиристри отримали широке застосування в радіо- та електротехніці у якості швидкодіючих перемикаючих пристроїв. Вони використовуються при конструюванні генераторів імпульсів різної форми, у схемах випрямлячів, для регулювання потужності змінного струму. Тиристри є напівпровідниковими аналогами лампових тиратронів.

Тиристор – напівпровідниковий прилад, структура якого містить три або більше електронно-діркових переходів. Основне використання триністорів (тиристорів з трьома електричними виводами: анодом, катодом і управляючим електродом) – управління потужним навантаженням за допомогою слабого сигналу, який подається на управляючий електрод.

Основу тиристора складає чотиришарова n-p-n-p структура. Крайні n і p області називають емітерами, і вони, подібно емітеру біполярного транзистора, містять підвищену концентрацію домішок, тобто леговані більше, ніж внутрішні області. Внутрішні області називають відповідно n-базою і p-базою. Вони, подібні базі біполярного транзистора, мають малу ширину. Електрод, що здійснює контакт із n-емітером, вважають катодом, а з p-емітером – анодом.

Актуальна розробка силового тиристора с термодинамічною стійкістю на 2800 В та 1000 А, призначеного для роботи в колах постійного і змінного струму частотою до 500 Гц, якв можуть застосовуватися в різних перетворювачах електроенергії, в безконтактній комутаційній і регулюючій апаратурі.



## 1 Дослідження технологічних особливостей силових тиристорів

### 1.1 Основні особливості і класифікація тиристорів

Тиристор - напівпровідниковий прилад із двома стійкими статичними станами, який має три або більше р-n переходів і може бути переключений із закритого стану у відкритий та навпаки [1].

З погляду застосування тиристор – це напівпровідниковий ключ, тобто прилад, основне призначення якого складається в замиканні та розмиканні кола навантаження за допомогою зовнішніх сигналів.

Аналогічно транзисторному ключу тиристор має два статичних стани: закритий, або стан низької провідності, і відкритий, або стан високої провідності. У кожному із двох статичних станів тиристор може перебувати як завгодно довго. Перехід з одного стану в другий відбувається відносно швидко під впливом короткочасного зовнішнього сигналу.

Тиристиори класифікують по наступним ознаках: по кількості виводів, по виду вихідної ВАХ, по способах вимикання та керування і по інших ознаках [1].

По кількості виводів розрізняють:

- діодні тиристиори (диністори), які мають тільки два виводи (анод і катод);
- тріодні тиристиори, які мають три виводи (два основних і один управління): анод, катод і електрод управління;
- чотирьохелектродні (тетродні) тиристиори, які мають чотири виводи (два вхідних і два вихідних), і т.д.

По виду вихідної ВАХ розрізняють:

- тиристиори, які не проводять у зворотному напрямку;
- тиристиори, які проводять у зворотному напрямку (тиристиори зі зворотною провідністю, або тиристиори - діоди);

- симетричні (двохпровідні тиристори, симістори або тріаки), які можуть переключатися у відкритий стан в обидва напрямки

По способу вимкнення виділяють тиристори, які вимикаються тільки у вихідному анодному колі та тиристори які вимикаються по вхідному колу управління.

По способу управління розрізняють тиристори, фототиристори і опто-тиристори. Перші керуються (відмикаються) зовнішнім електричним сигналом по електроду управління. Фототиристор керується зовнішнім оптичним сигналом, оптотиристор – внутрішнім оптичним сигналом (випромінювач та фототиристор складають в оптотиристорі єдину конструкцію).

## 1.2 Структура і вольт-амперна характеристика тиристора

При конструюванні тиристорів у першу чергу вибирають геометрію р-п-р-п структури та матеріал, виходячи з призначення приладу.

Висока напруга перемикавання забезпечується використанням вихідних матеріалів з високим питомим опором. Сильнострумові керовані вентилі повинні мати великі площі переходів та конструкцію, що забезпечує добрий тепловідвід.

Виготовляються тиристори зазвичай із кремнію, хоча в принципі можуть бути виготовлені з германію. Однак унаслідок низької напруги перемикавання та малого опору в закритому стані германієві прилади широкого поширення не отримали [2].

Щоб перевести тиристор у відкритий стан, необхідне накопичування надлишкового негативного заряду електронів у п-базі та надлишкового позитивному заряду дірок у р-базі. Здійснюється це шляхом збільшення рівня інжекції через переходи емітера при збільшенні напруги на тиристорі до величини напруги переключення. Однак той же самий ефект можна одержати,

якщо в однієї з баз мається контакт (рис. 1.1 а), який називають електродом управління.

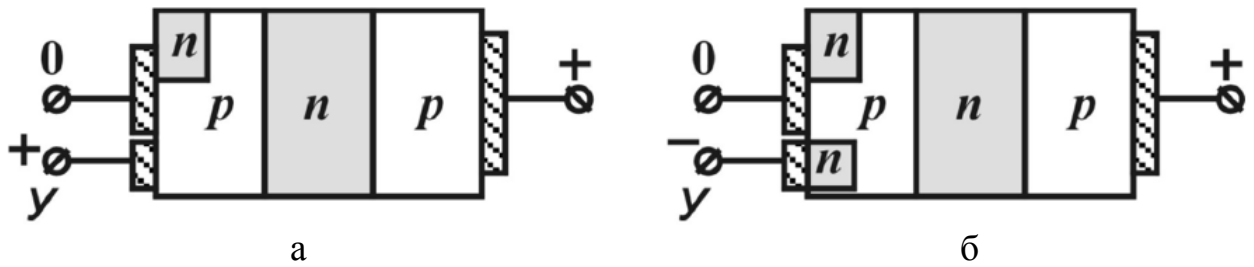


Рисунок 1.1 - Структура тріодних тиристорів з контактом без випрямлення - електродом управління (а), та із додатковою n-областю під електродом управління (б)

При подачі на управляючий електрод напруги такої полярності, щоб прилягаючий до цієї бази перехід емітера був ввімкнений у прямому напрямку, можна збільшити інжекцію з n-емітера, що приведе до накопичування надлишкових зарядів у базових областях тиристора і до переключення його у відкритий стан при загальній напрузі на тиристорі меншій ніж напруга переключення  $U_{пер}$ . Іншими словами, при подачі на електрод управління напруги можна змінювати струм емітера і регулювати значення коефіцієнта передачі струму емітера однієї з транзисторних структур, що обумовить збільшення сумарного коефіцієнта передачі всієї тиристорної структури та переключення її у відкритий стан.

Тріодний тиристор (триністор) - це тиристор, який має два основні виводи анод і катод та один вивід управління. Для зручності управління тиристором відповідний електрод роблять у більш тонкої бази, тому що коефіцієнтом передачі струму емітера такої структури легше керувати, чим коефіцієнтом передачі транзистора з товстою базою. Контакт для управління можна зробити і з додатковим p-n переходом (рис. 1.1 б). При певній полярності напруги на управляючому електроді через додатковий перехід буде відбуватися інжекція неосновних носіїв та їхнє накопичування у відповідній базі, що також приведе до переключення тиристора у відкритий стан.

Вольт-амперна характеристика триністора (сімейство характеристик при різних струмах управління приладу) зображена на рисунку 1.2 [3].

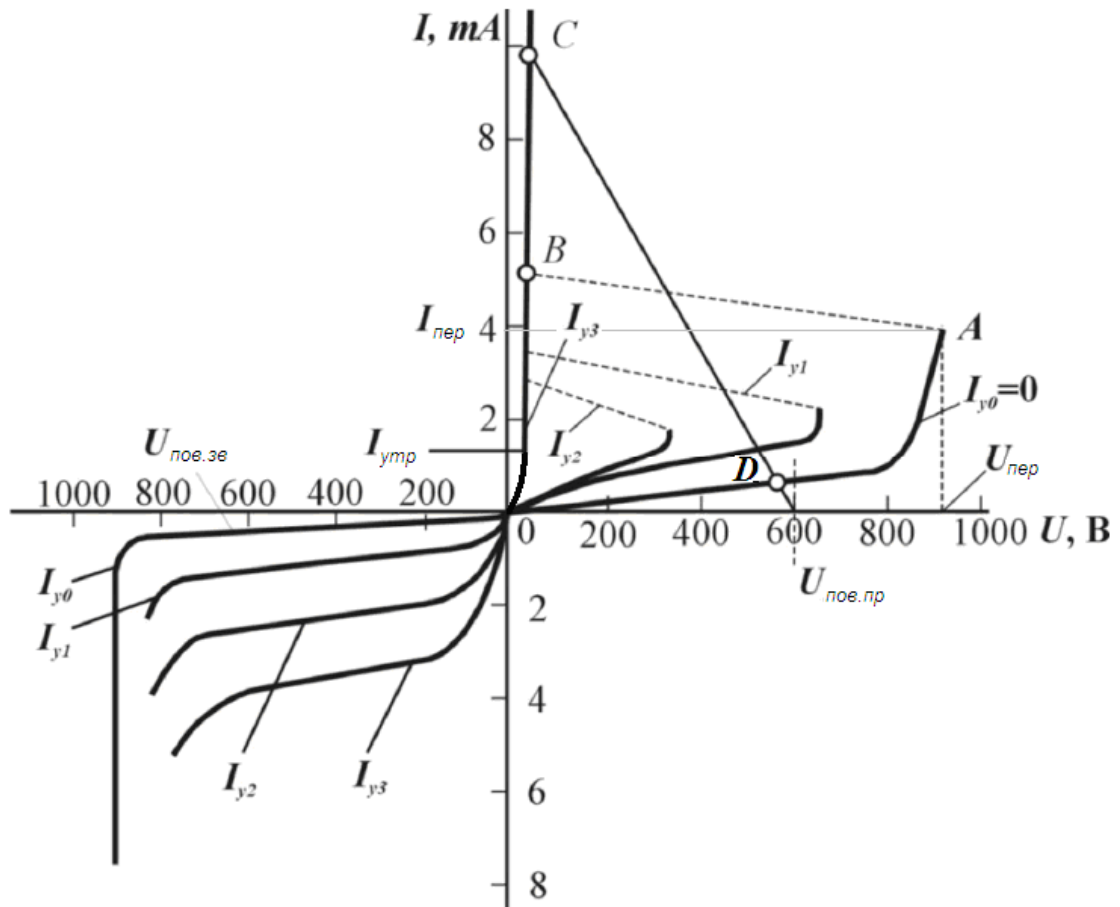


Рисунок 1.2 - Сімейство вольт-амперних характеристик тріодного тиристора

Зворотна гілка ВАХ відповідає такій полярності напруги, коли до анода прикладається негативна відповідно катода напруга.

При розімкнутому колі керування або відсутності в ньому струму зворотна характеристика тиристора аналогічна зворотній характеристиці напівпровідникового діода. У робочому діапазоні напруг від нуля до максимальної робочої, яка називається зворотною повторювальною напругою  $U_{повт.зв.мах}$  (складає кілька сотень вольт), через прилад протікає дуже малий, порядку часток міліампера, струм, тобто тиристор має дуже великий електричний опір. Якщо до електроду управління УЕ прикласти позитивну відносно катода напругу, то в колі керування буде протікати струм  $I_y$ , при цьому струм у зворотному напрямку збільшиться, хоча і незначно. В міру збільшення  $I_y$  зростає

струм через тиристор. Сімейство зворотних характеристик тиристора (рис. 1.2) дуже схоже на сімейство вихідних характеристик транзистора, включеного за схемою із спільним емітером, але з малим коефіцієнтом передачі струму.

Пряма гілка тиристора при розімкнутому колі керування зображена в першому квадранті системи координат. Вона відповідає такій полярності напруги, коли до анода прикладена позитивна відносно катода напруга.

Робочим діапазоном, як і у випадку зворотної характеристики, є діапазон від нуля до максимальної прямої повторювальної напруги  $U_{повт.пр.мах}$ . Характеристика має три області. Перша область – від початку координат до точки  $A$  аналогічна зворотній гілці ВАХ р-п переходу. Друга від точки  $A$  до точки  $B$  – відповідає хитливому стану, коли тиристор навіть при незначному перевищенні напруги переключення  $U_{пер}$ , переходить у стан з малим опором (точка  $B$ ). Ця область зветься ділянкою з негативним диференціальним опором. На відміну від ділянки характеристики з позитивним опором, на якому збільшення струму супроводжується збільшенням напруги, на ділянці негативного диференціального опору збільшення струму відбувається при зниженні напруги. Третя область характеристики – від точки  $B$  до точки  $C$  область високої провідності або малого опору, вона аналогічна прямої гілці характеристики напівпровідникового діода. Цей стан називається також відкритим або провідним, а стан з високим опором - закритим або непровідним.

Якщо через коло управління пропустити струм  $I_y$ , то напруга переключення зменшується. Якщо збільшувати цей струм далі, то, починаючи з деякого значення (струмом управління-випрямлення), ділянка характеристики з негативним опором зникає, ВАХ спрямляється і стає схожою на пряму характеристику напівпровідникового діода. У результаті при струмі управління, який перевищує струм управління-випрямлення, прилад завжди має малий опір. Якщо урахувати, що робоча напруга вибирається менше максимальної напруги переключення  $U_{пер}$ , що досягається при  $I_y = 0$ , а струм управління, як правило, значно більше струму управління-випрямлення, то при відсутності

струму управління тиристор знаходиться в закритому стані і пряма і зворотна гілки його статичної характеристики аналогічні зворотній характеристиці напівпровідникового діода.

Особливістю тиристора, як і інших приладів, з негативним зворотним опором, є те, що він, переключений у стан з малим опором, буде знаходитися в цьому стані як завгодно довго навіть при знятті сигналу управління. Ця властивість дозволяє вмикати тиристор за допомогою коротких імпульсів струму і тим самим значно знизити витрати енергії на управління тиристором. Для того щоб вимкнути тиристор, тобто перевести його з провідного стану в закритий, необхідно шляхом зменшення напруги в колі навантаження знизити струм до деякого малого значення, який має порядок струму управління-випрямлення та називається струмом утримання [3].

Тиристори виготовляються тими ж методами дифузії, сплавлення і дифузії та методом планарної технології. В даний час застосовуються дифузійно-сплавний та планарний методи. Вибір методу впливає на параметри приладу. Так, для виготовлення швидкодіючих приладів найзручнішою є схема подвійної дифузії і сплавлення. В цьому випадку отримують тонку базу та малий час життя неосновних носіїв. Однак при цьому отримують порівняно низькі напруги перемикавання та високий опір відкритого приладу.

Висока напруга перемикавання та низький опір відкритого приладу отримують при виготовленні структури методом подвійної двосторонньої дифузії. Емітерні області при цьому методі це дифузійні шари, сильно насичені домішками, що обумовлює низький опір відкритого приладу. Центральний перехід – це різкий перехід між дифузійним шаром та шаром вихідного матеріалу з малою концентрацією домішок та високим питомим опором. Такий перехід володіє високою пробивною напругою і підвищеною напругою перемикавання. Метод подвійної дифузії застосовується і при виготовленні планарних приладів (рис. 1.3).

Обидва емітери в планарному приладі розташовані в одній площині. Межі р-п переходів закриті від навколишнього середовища оксидною плів-

кою. Це забезпечує дуже малі зворотні струми переходів та високу стабільність параметрів.

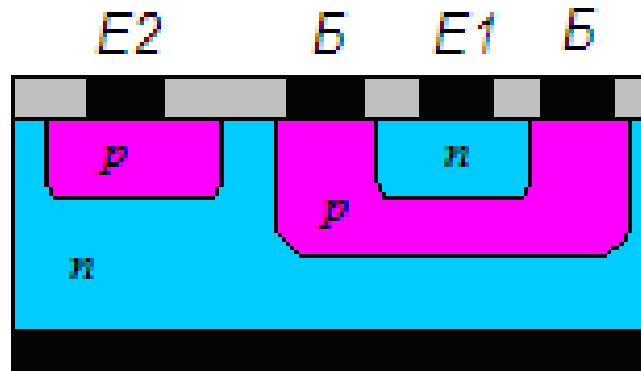


Рисунок 1.3 – Планарна структура тиристора

### 1.3 Технологія виготовлення та конструкції тиристорів

Виготовлення структури різної провідності може бути реалізовано дифузією, сплавленням, вирощуванням напівпровідникових плівок. Найбільшого поширення при отриманні багатошарових структур отримала дифузійна технологія. Після очищення монокристала кремнію товщиною до 0,7 мм і до 70 мм (для силових приладів середньої потужності) проводиться дифузійний процес внесення домішки р-типу. При виготовленні тиристорів повторною дифузією впроваджують домішки n-типу. При виготовленні багатошарових структур має виконуватися певна відповідність між донорами атомів  $N_D$  і домішкою (рис. 1.4) [1].

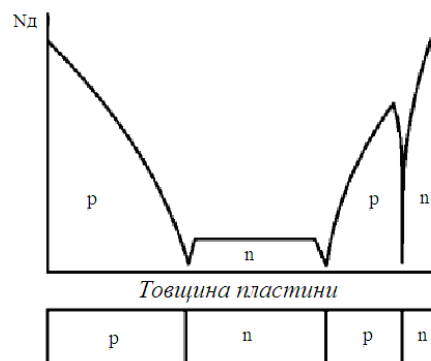


Рисунок 1.4 - Розподіл концентрацій домішок при виготовленні багатошарових структур

Для підвищення граничної напруги приладів емітерний перехід шунтується конструктивно малим опором. На кремнієву шайбу приладу для відведення теплоти напаяють вольфрамовий диск, по периметру якого знімається фаска. Зняття фаски під певним кутом до площини кремнієвої шайби забезпечує зменшення напруженості електричного поля на р-n переходах у місцях виходу їх на бічну поверхню.

Конструкція силових напівпровідникових приладів повинна забезпечувати зручність їх використання, експлуатаційну надійність, мінімальні масу і габаритні розміри, надійну герметичність корпусу, ефективний електричний і тепловий контакт між окремими елементами, надійне з'єднання з охолоджувачами. Важливим показником конструкції приладів при їх використанні в силових пристроях є зручність їх з'єднання між собою.

Конструктивне виконання силових напівпровідникових приладів має забезпечувати просте і надійне з'єднання з охолоджувачем.

За видом конструкції корпусу всі силові напівпровідникові прилади поділяються на штирові, з плоскою підставою, Таблеткові та виконані спільно з системою охолодження. На рисунку 1.5 наведена конструкція штирового приладу.

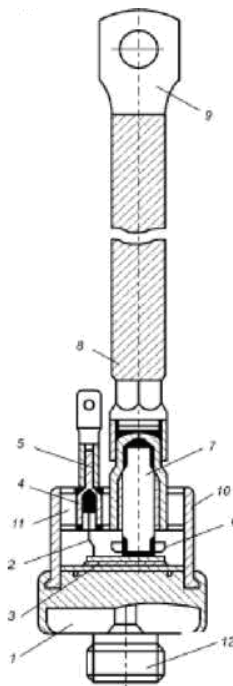


Рисунок 1.5 - Конструкція тиристора штирового типу



До основи корпусу 1 припаяний елемент, який складається з кремнієвої пластини 3, поміщеної між двома вольфрамовими дисками. На верхньому вольфрамовому диску є отвір, який служить для розміщення молібденової пластини, до якої припаяний внутрішній керуючий вивід 2, з'єднаний через ізольовану сталеву втулку 4 з наконечником керуючого електрода 5. До верхнього вольфрамового диска припаяна чашечка 6, в яку припаяний внутрішній гнучкий вивід 7, з'єднаний усередині сталеві втулки з силовим зовнішнім гнучким виводом 8, з наконечником 9. В основі є кільцева виточка, в яку безпосередньо перед установкою корпусу 10 закладається кільцева фторопластова прокладка, що разом з завальцюванням стику кришки і підставки забезпечує необхідну ступінь герметизації. Вивід катодного і керуючого електродів здійснюють через металеву скляну кришку 11. Основу корпусу виготовляють спільно з нарізним болтом 12, який нагвинчують на охолоджувач-радіатор.

На рисунку 1.6 наведена конструкція таблеткового тиристора з охолоджувачем.

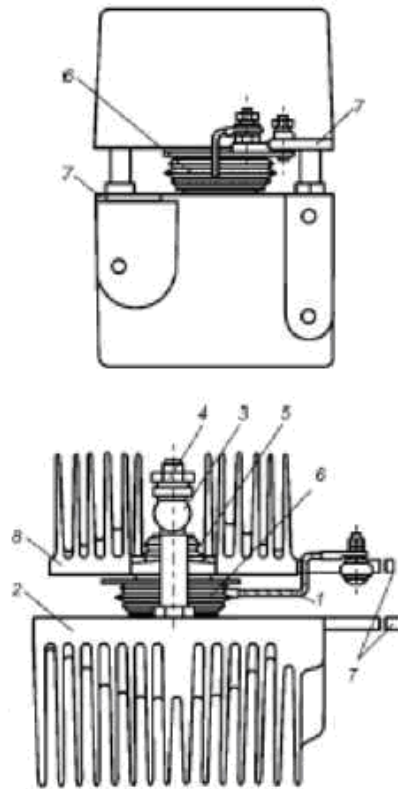


Рисунок 1.6 - Конструкція тиристора таблеткового типу

Тиристор виконаний у вигляді таблетки 6 в гофрованому керамічному корпусі, який забезпечує захист напівпровідникового елемента від забруднень і механічних пошкоджень. Керуючий електрод 1 тиристора виведений на бічну поверхню корпусу. Таблетковий прилад поміщений між двома охолоджувачами 2 і 8 таким чином, що торцеві металеві поверхні тиристора стикаються з охолоджувачами, створюючи електричний і тепловий контакт. Необхідне прикладене зусилля таблетки до охолоджувача забезпечується тарілочастими пружинами 4 і передається через траверсу 3 на ізолятор 5 і далі на верхній охолоджувач 8. Під'єднання тиристора до електричного кола проводиться за допомогою струмопровідних пластин 7. Іноді для кращого контакту тиристора з охолоджувачами між ними поміщається тонка прокладка з м'якого струмопровідного матеріалу (індію, олова та ін.). Електричні втрати, що виникають в приладі при проходженні через нього струму, зумовлюють виділення теплоти, яка відводиться за допомогою охолоджувачів. Якість охолоджувача характеризується опором. Тепловий опір показує, на скільки градусів температура поверхні охолоджувача, що стикається з приладом, більше температури охолоджуючого агента при відведенні охолоджувачем від приладу одиниці потужності. Чим менше тепловий опір охолоджувача, тим більшу потужність можна відвести від приладу, тим більше граничний струм приладу.

Найбільшого поширення набули два способи охолодження: повітряне, яке у свою чергу може бути природним і примусовим, і водяне. При природному повітряному охолодженні теплопередача здійснюється за рахунок теплопровідності через граничний шар повітря, що стикається з поверхнею охолоджувача, і подальшої вільної конвекції, а також за рахунок променистого обміну. Теплопередача при примусовому повітряному охолодженні здійснюється в основному за рахунок вимушеної конвекції. При повітряному охолодженні застосовуються охолоджувачі, що мають розвинену за рахунок ребер поверхню (рис. 1.6). Матеріалами для охолоджувачів служать мідь і алюміній. В наш час все частіше застосовуються алюмінієві охолоджувачі, що ма-

ють меншу масу і вартість. Однак через значну електрохімічну різницю потенціалів «мідь - алюміній» виникає (особливо у вологому середовищі) корозія алюмінію, що викликає зростання електричного і теплового опорів контакту між приладом і охолоджувачем. Для усунення цього недоліку поверхню охолоджувача, до якої прилягає підстава приладу, покривають спеціальним складом, що виключає корозію. Крім того, для відведення струму тут використовують мідний пластинчастий вивід, який прокладають між приладом і охолоджувачем. Для більш повного використання приладів таблеткових конструкцій застосовують двостороннє охолодження, при якому охолоджувачі встановлюють на обох підкладках приладу. В цьому випадку потрібно суворе дотримання правил монтажу приладу спільно з охолоджувачами, так щоб поверхня дотику таблетки з охолоджувачами була найбільшою.

При монтажі приладів штирового типу на охолоджувачах повинен забезпечуватися певний закручуючий момент, що досягається застосуванням спеціальних моментних ключів. Величина необхідного закручуючого моменту зазвичай наводиться в інформаційних матеріалах підприємств-виробників. При меншому закручуючому моменті зростає тепловий опір всієї системи, що, природно, призводить до зниження допустимого струму навантаження приладу. Необхідний закручуючий момент болта повинен бути також вказано для приладів притискної конструкції (наприклад тиристора таблеткової конструкції).

У разі примусового повітряного охолодження тепловий опір охолоджувача залежить від швидкості руху охолоджуючого повітря. При обдуванні приладів з ребристими охолоджувачами напрямок потоку повітря має бути строго паралельним ребрам охолоджувача (допускається відхилення на  $10^\circ$ ). В іншому випадку ефективність охолодження різко знижується і як наслідок цього зменшується допустимий струм навантаження приладу.

Водяне охолодження є більш ефективним порівняно з повітряним. Підвищені вимоги до води, застосовуваної як охолоджуючий агент (питомий електричний опір води не повинен бути меншим певного значення та ін.),

ускладнення конструкції вентиляльних блоків за рахунок штуцерів і гумових шлангів, а також пристроїв, що забезпечують примусову циркуляцію води, ускладнюють застосування водяного охолодження.

#### 1.4 Моделювання складових струмів тиристора при включенні зовнішніх напруг

Тиристор є чотиришаровою напівпровідниковою структурою типу р-п-р-п з трьома р-п переходами, в якій  $p_1$ -слой виконує функцію анода, а  $n_2$ -слой – катода. Управляючий електрод зв'язаний з  $p_2$ -слоєм структури. Основний матеріал у виробництві тиристорів – кремній. Чотиришарова структура зазвичай створюється за дифузійною технологією. Вихідним матеріалом є кремнієва пластина n-типа товщиною 70-600 мкм (залежно від типу тиристора). Спочатку методом дифузії акцепторної домішки з обох боків пластини створюють транзисторну структуру типу  $p_1-p_1-p_2$ . Потім після локальної обробки поверхні  $p_2$ -слоя вносять донорну домішку до  $p_2$ -слою для здобуття четвертого  $n_2$ -слоя [3].

Для моделювання процесів, які протікають в тиристорі, представимо його у вигляді структури, яка представлена на рисунку 1.7. Розгляд проведемо за допомогою вольт-амперної характеристики тиристора (рис. 1.2) при включенні зовнішньої напруги відповідно до рисунку 1.7. Призначення моделювання – визначення технологічних параметрів дифузійного внесення домішок в пластину кремнію для формування структури силового тиристора.

Розглянемо зворотну гілку вольт-амперної характеристики тиристора, яка знімається при струмі управління  $I_y = 0$ . Зворотній напрузі тиристора ( $U_{\text{пов.зв}} < 0$ ,  $U_{\text{ак}} < 0$ ) відповідає підключення зовнішньої напруги негативним полюсом до анода і позитивним – до катода. Полярність напруги на тиристорі і його розподіл по переходах структури показані на рисунку 1.7 без дужок.

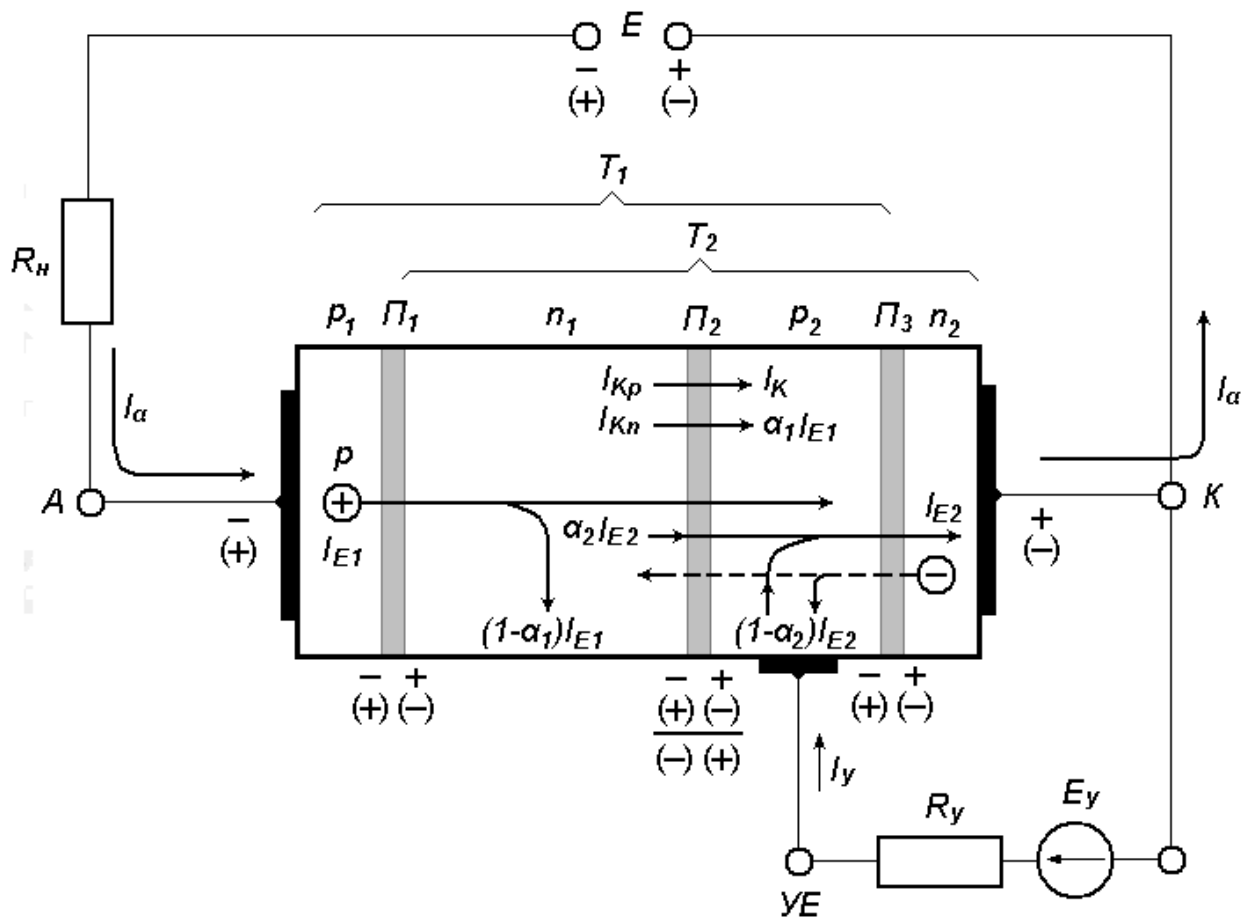


Рисунок 1.7 – Складові струмів в тиристорі при включенні зовнішніх напруг

Зворотна напруга прикладена до тиристора викликає зсув середнього переходу П<sub>2</sub> в прямому напрямі, а двох крайніх переходів П<sub>1</sub> і П<sub>3</sub> – в зворотному. Перехід П<sub>2</sub> відкритий, і падіння напруги на ньому мало. Тому можна передбачити, що зворотна напруга  $U_{\text{пов.зв}}$  розподіляється головним чином по переходах П<sub>1</sub> і П<sub>3</sub>.

Проте в процесі виготовлення тиристора концентрація домішки в p<sub>2</sub>- і n<sub>2</sub>-шлях забезпечується досить високою в порівнянні з концентрацією в p<sub>1</sub>- і n<sub>1</sub>-шлях і перехід П<sub>3</sub> виходить вузьким. З додатком зворотної напруги перехід П<sub>3</sub> вступає в режим електричного пробоя при напрузі, істотно меншій робочій напрузі  $U_{\text{пов.зв}}$ . Зворотна напруга, по суті, прикладається до переходу П<sub>1</sub>, тобто зворотна гілка вольт-амперної характеристики тиристора (рис. 1.2) є зворотною гілкою вольт-амперної характеристики переходу П<sub>1</sub>.

Таким чином, здатність тиристора витримувати зворотну напругу покладається на р-n перехід  $\Pi_1$ .

Проаналізуємо поведінку тиристора при підведенні до нього напруги в прямому напрямі ( $E > 0, U_{AK} > 0$ ). Полярність зовнішньої напруги на тиристорі і переходах структури показана на рисунку 1.7 в дужках. Крайні переходи  $\Pi_1, \Pi_3$  зміщуються в прямому напрямі, а середній перехід  $\Pi_2$  – в зворотному. У зв'язку з цим напруга на приладі виявляється прикладеною практично до переходу  $\Pi_2$ . Спочатку розглянемо випадок відсутності струму управління ( $I_y = 0$ ).

Аналіз процесів в тиристорі при  $U_{AK} > 0$  зручно проводити, скориставшись двохранзисторною аналогією. За наявності на тиристорі напруги в прямому напрямі його можна представити у вигляді двох транзисторів типів р-n-p і n-p-n: транзистора  $T_1$  типа р<sub>1</sub>-n<sub>1</sub>-р<sub>2</sub> і транзистора  $T_2$  типа n<sub>2</sub>-р<sub>2</sub>-n<sub>1</sub> (рис.1.7). Емітерним переходом для першого транзистора є перехід  $\Pi_1$ , для другого транзистора  $T_2$  – перехід  $\Pi_3$ . Перехід  $\Pi_2$  служить загальним колекторним переходом обох транзисторів. При цьому полярність напруги на переходах відповідає тій, яка потрібна для роботи обох транзисторів в підсилювальному режимі: емітерні переходи зміщені в прямому напрямі, а колекторний – в зворотному.

Представивши тиристор у вигляді поєднання транзистора  $T_1$ , з коефіцієнтом передачі струму  $\alpha_1$  і струмом емітера  $I_{E1}$  і транзистора  $T_2$  з коефіцієнтом передачі струму  $\alpha_2$  і струмом емітера  $I_{E2}$ , неважко змоделювати складові струму в приладі (рис. 1.7). Складова  $(1 - \alpha_1)I_{E1}$  – це струм бази транзистора  $T_1$ , складова  $\alpha_1 I_{E1}$  – струм колектора цього транзистора. Струми транзистора  $T_1$  обумовлені головним чином рухом дірок через n<sub>1</sub>-базу. У транзисторі  $T_2$  струм переноситься в основному електронами (пунктирні лінії на рисунку 1.7). Його складові (показані на рисунку 1.7 суцільними лініями) є:  $(1 - \alpha_2)I_{E2}$  - струм бази  $\alpha_2 I_{E2}$  – струм колектора. Оскільки колекторний перехід зміщений у зворотному напрямі, через нього протікають також складові, які обумовлені неосновними носіями заряду: дірки n<sub>1</sub>-області створюють струм  $I_{Kp}$ , електро-

ни  $p_2$ -області – струм  $I_{Kn}$ . Струми  $I_{Kp}$  і  $I_{Kn}$  утворюють сумарний струм  $I_K$  (рис. 1.7).

Одним з чинників, які впливають на пряму гілку вольт-амперної характеристики тиристора, є залежність коефіцієнтів  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  від струму. Більше значення коефіцієнта  $\alpha_2$  в порівнянні з  $\alpha_1$  пояснюється меншою товщиною  $p_2$ -бази в порівнянні з  $n_1$ -базой (рис. 1.7). У зв'язку з цим  $n_1$ -базу часто називають товстою, а  $p_2$ -базу – тонкою. Необхідна залежність коефіцієнтів  $\alpha$  від струму створюється в процесі виготовлення приладів. Так, наприклад, широко застосовується шунтування переходу  $\Pi_3$ , яке наводить до зменшення ефективності емітера транзистора  $T_2$  і коефіцієнта  $\alpha_2$  в області малих струмів.

На початковій ділянці  $0 - D$ , який відповідає малим значенням прямої напруги  $U$ , струм  $I$  малий. Коефіцієнти  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  близькі до нуля. Близькі до нуля що також складові струмів  $\alpha_1 I_{E1}$  і  $\alpha_2 I_{E2}$  переходу  $\Pi_2$ . Струм через перехід  $\Pi_2$ , а отже, і струм через тиристор  $I$  дорівнюватиме струму  $I_K$ , тобто в даному випадку буде визначатися зворотним (тепловим) струмом  $I_{K0}$  переходу  $\Pi_2$ . Таким чином, початкова ділянка  $0 - D$  прямої гілки вольт-амперною характеристики тиристора є зворотною гілкою вольт-амперної характеристики  $p$ - $p$  переходу  $\Pi_2$ , зміщеного в зворотному напрямі.

У міру зростання анодної напруги, а отже, і напруги на колекторному переході збільшуються струм  $I_K$  і анодний струм через тиристор. Причина зростання струму  $I_K$  зв'язана із збільшенням струму витоку по поверхні переходу і збільшенням в ньому носіїв заряду. Збільшення струму через прилад супроводиться підвищенням коефіцієнтів  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$ . З деякого значення струму  $I$  необхідно враховувати складові струмів транзисторів  $\alpha_1 I_{E1}$  і  $\alpha_2 I_{E2}$ , які протікають через колекторний перехід. Унаслідок того що підвищення напруги  $U$  наводить до підвищення струму  $I_K$ , а також складових  $\alpha_1 I_{E1}$ ,  $\alpha_2 I_{E2}$ , на вольт-амперній характеристиці з'являється ділянка  $D - A$  з сильнішою залежністю струму  $I$  від напруги  $U$ .

Точка  $A$  є граничною, в якій створюються умови для відмикання тиристора. Напруга на приладі в точці  $A$  називається напругою перемикавання  $U_{пер}$ .

Розглянемо детальніше процес переходу тиристора із замкнутого стану у відкритий (ділянка А – В). Зменшується напруги на переході  $\Pi_2$  і тиристорі. Дія внутрішнього позитивного зворотного зв'язку в приладі приводить до того що процес має стрибкоподібний характер.

Причиною переходу тиристора із закритого стану у відкрите є підвищення ролі складових  $\alpha_1 I_{E1}$  і  $\alpha_2 I_{E2}$  і відповідно їх суми  $(\alpha_1 + \alpha_2) I$  в струмі через перехід  $\Pi_2$  в порівнянні із струмом  $I_K$ . У міру наближення до точки А збільшення струму через прилад відбувається головним чином за рахунок складових  $\alpha_1 I_{E1}$  і  $\alpha_2 I_{E2}$ , а не за рахунок збільшення струму  $I_K = I_{K0}$ , який викликається підвищенням напруги на переході  $\Pi_2$ . У точці А роль складових  $\alpha_1 I_{E1}$  і  $\alpha_2 I_{E2}$  і їх суми  $(\alpha_1 + \alpha_2) I$  настільки значна в балансі складових струмів, які протікають через перехід  $\Pi_2$ , що подальше збільшення струму  $I$  можливо лише за рахунок зменшення струму  $I_K$ , а отже, зменшення напруги, яка обумовлює цей струм на переході  $\Pi_2$  і тиристорі  $U_a$  (відмикання приладу).

Зменшення напруги на переході пояснюється тим, що збільшення складових струмів  $\alpha_1 I_{E1}$  і  $\alpha_2 I_{E2}$  через перехід  $\Pi_2$ , викликає збільшення потоку електронів в  $n_1$ -базу і дірках в  $p_2$ -базу і відповідно появі в базах надлишкових носіїв заряду, які знижують потенційний бар'єр колекторного переходу. Одночасно з цим надлишкові носії заряду в базах знижують потенційні бар'єри емітерних переходів  $\Pi_1$  і  $\Pi_3$ , викликаючи додаткову інжекцію носіїв заряду. Це наводить до ще більшого зростання коефіцієнтів  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  і заповненню носіями зарядів обох баз тиристора. У приладі діє внутрішній позитивний зворотний зв'язок, який наводить до лавиноподібного розвитку процесу його відмикання.

Ділянка В – С відповідає відкритому стану тиристора. У точці В напруга на переході  $\Pi_2$  дорівнює нулю, струм  $I_K = 0$ , сума коефіцієнтів  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ . Струм через перехід  $\Pi_2$  дорівнює сумі складових  $\alpha_1 I_{E1}$  і  $\alpha_2 I_{E2}$ . Напруга на приладі  $U$  в точці В дорівнює сумі напруги на переходах  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$ , зміщених в прямому напрямі.



При переміщенні по кривій від точки В до точки С струм через тиристор зростає, що збільшує коефіцієнти  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$ , а також їх суму ( $\alpha_1 + \alpha_2 > 1$ ). Баланс складових струмів через колекторний перехід досягається зміною полярності напруги на переході  $\Pi_2$  («переполюсовка» колекторного переходу на рисунку 1.7), унаслідок чого струм  $I_K$  змінює напрям. Іншими словами, колекторний перехід під дією надлишкових зарядів - дірок в  $p_2$ -базі і електронах в  $n_1$ -базі, створюваних потоками носіїв відповідно першого і другого транзисторів, переводиться в провідний стан, забезпечуючи зустрічну інжекцію носіїв заряду (струм  $I_K$  тепер вже не є зворотним струмом колекторного переходу  $\Pi_2$ ).

Таким чином, колекторний струм  $I_K$  грає істотну роль в роботі тиристора, забезпечуючи баланс складових струмів через колекторний перехід. Необхідна величина  $I_K$  встановлюється завдяки зміні напруги на колекторному переході під дією зарядів, які нагромаджуються в базах тиристора.

На ділянці В – С все три р-п переходи приладу знаходяться під прямою напругою зсуву. Напруга на переходах  $\Pi_1$ ,  $\Pi_3$  протилежні по знаку до напруги на переході  $\Pi_2$ . У зв'язку з цим падіння напруги на приладі (0,75 – 1,5 В) приблизно дорівнює падінню напруги на одному переході (як в діоді). Збільшення падіння напруги на тиристорі при русі по кривій від точки В до точки С пояснюється підвищенням напруги на переходах і зростанням падінням напруги в шарах напівпровідникової структури з збільшенням струму.

### 1.5 Дифузійний метод вибіркового введення домішок в монокристал напівпровідника

Одним з найбільш використовуваних методів вибіркового введення домішок в монокристал напівпровідника є дифузійний метод (або метод дифузії в твердій фазі), розроблений у 1956 році, який дозволяє досягати високої точності розподілу домішки.

Метод дифузії полягає в тому, що домішка контактує з поверхнею монокристала напівпровідника. Потім монокристал розігрівається, унаслідок чого атоми домішки проникають всередину монокристала і заміщають атоми напівпровідника, "вибиті" зі своїх місць унаслідок теплової взаємодії.

Для того, щоб атоми домішки продифундували в ґрати кристала, його слід нагрівати. Розглядаючи температуру як теплову вібрацію, можна передбачити, що ґрати струшуються настільки сильно, що деякі атоми покидають свої місця і заміщаються іншими. Якщо поблизу виявиться атом домішки з приблизно тими ж розміром і валентністю, то він може замінити атом, який покинув вузол ґрат. Атом домішки заміщає атом вихідного елемента. Такий процес називається дифузією заміщення (дифузією по вакансіях).

Атоми домішки стрибають по вузлах ґрат стохастично на всіх напрямках. Допустимо, що цей випадковий процес почався в якийсь одній області з деякою концентрацією атомів домішки; тоді кількість атомів, здатних повернутися в область з вищою концентрацією домішки, буде менше числа атомів, здатних потрапити в область з нижчою концентрацією. Таким образом, рух домішки буде в цілому направлений у бік зниження її концентрації. Але для руху домішки в кристалі потрібний, аби на дорозі атома домішки зустрічалися вакансії. Значить, швидкість дифузії заміщення залежить від швидкості виникнення вакансій в ґратах.

Але атом домішки може знайти собі місце в кристалі і не заміщаючи атом вихідного елемента. Це так зване міжвузля. При високих температурах атоми домішки можуть перестрибувати з одного міжвузля на інше, пересуваючись таким чином по ґратах кристала. Це рух називається дифузією впровадження. Дифузія впровадження має набагато більшу швидкість поширення, чим дифузія заміщення, оскільки міжвузля, як правило, вільні, а для здійснення заміщення доводиться чекати утворення вакансій [1].

У кристалічній решітці може мати місце комбінація вказаних видів дифузії. Деяка доля домішки здійснює дифузію впровадження, а решта частина - дифузію заміщення. Аби побудувати модель процесу дифузії впровадження,

яка узгоджується з експериментальними даними, будемо вважати, що цей процес може початися від вузла ґрат або міжвузля і кінчитися теж як на вузлі ґрат, так і на міжвузлі, але рух атома йде лише по міжвузлю.

Всі донори і акцептори, вживані зазвичай для кремнію, дифундують по вакансіях. По міжвузлю дифундують золото, залізо, мідь і літій. Залізо, мідь і літій зазвичай небажані, але золото навмисно вводять процесом дифузії в структуру кремнію. Атоми золота дифундують по міжвузлю, але більшість з них зупиняється у вузлах ґрат, утворюючи домішку заміщення. Атоми золота не дуже личать до ґрат кремнію. Вони утворюють в ній щось подібне до неоднорідності. Оскільки рекомбінація електронно-діркової пари легше відбувається поблизу неоднорідності, остільки атоми золота є причиною збільшення швидкості рекомбінації і відповідного зменшення середнього часу життя рухливих носіїв заряду. Атоми золота зменшують час життя носіїв і через це збільшують швидкість перемикання. З багатьох причин вживання золота для збільшення швидкості перемикання приладів витиснене іншими методами. Зараз для збільшення швидкості перемикання приладів застосовується модифікація геометрії приладів, техніка їх виготовлення і проектування схем.

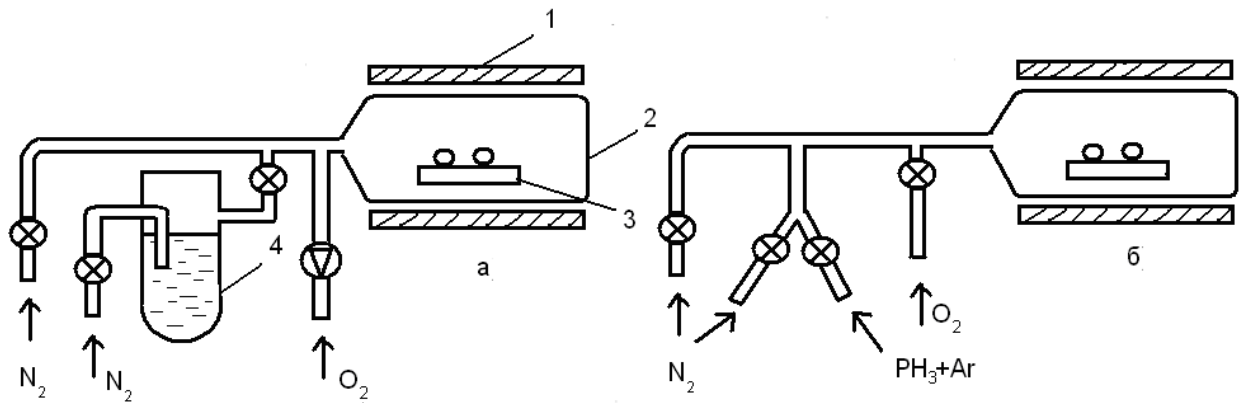
Розроблено багато різних способів проведення дифузії. Найбільш широкое застосування знайшов спосіб дифузії домішок в кремній в потоці газу – носія ( спосіб відкритої труби ).

Як джерело дифузантив можуть використовуватися рідкі або газоподібні речовини. Схема установки показана на рисунку 1.8.

Для випаровування рідкого джерела домішки достатньо підтримувати його температуру в інтервалі 20 – 40 °С. Найбільш широке застосування знайшли галогеніди бору і фосфору. Наприклад, трихлористий фосфор  $\text{PCl}_3$  оксохлорид фосфору  $\text{POCl}_3$  і трибромистий бор  $\text{BBr}_3$ .

В кварцеву трубу направляються три потоки газу: основний потік азоту зі швидкістю  $1000 \text{ см}^3/\text{хв}$ , слабкий потік  $10 \text{ см}^3/\text{хв}$  такого ж газу, який попередньо проходить через рідкий дифузанти і слабкий потік кисню  $15 \text{ см}^3/\text{хв}$ . При

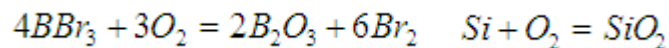
використанні рідких джерел наявність кисню в складі газу – носія має принципове значення, бо приводить до одержання оксидів домішки.



1 – трубчатая піч; 2 – кварцова труба; 3 – підкладки; 4 – посудина з рідким джерелом домішки

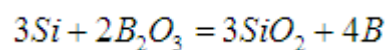
Рисунок 1.8 - Схема установки дифузії в потоці газу – носія для рідких ( а ) і газоподібних ( б ) джерел домішки

Так, для  $BBr_3$  в зоні дифузії проходять такі хімічні реакції:



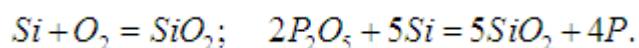
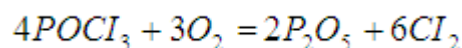
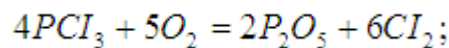
При взаємодії тонкої плівки  $SiO_2$  з  $B_2O_3$  утворюється сполука типу  $mB_2O_3 \cdot nSiO_2$  (боросилікатне скло).

На поверхні Si при реакції



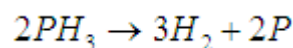
проходить виділення дифундуючого в Si елементарного бору.

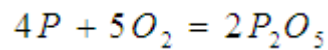
Аналогічні реакції проходять для сполук  $PCl_3$  і  $POCl_3$ , які використовують для дифузії фосфору в кремній:



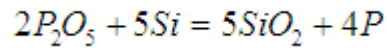
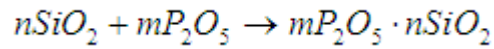
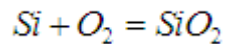
При використанні газоподібних джерел застосовують, як правило, гідриди домішок, наприклад: фосфін  $PH_3$ , діборан  $B_2H_6$ , арсин  $AsH_3$ .

В атмосфері реакційної камери відбувається розкладання фосфіну при температурі вище  $440^\circ C$  і утворення оксиду фосфору:





На поверхні кремнію проходять реакції



Позитивною особливістю такої дифузії є можливість досить просто регулювати поверхневу концентрацію в широких границях, змінюючи склад гідридів в інертному газі.

Метою роботи являється вдосконалення технологічного процесу виготовлення силового тиристора з термодинамічною стійкістю на 2800 В та 1000 А.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- вдосконалити технологічний процес механічної обробки кремнієвих пластин;
- вдосконалити технологічний процес дифузії бора і фосфору;
- вдосконалити технологічний процес фотолітографії;
- вдосконалити технологічний процес формування структури і конструкції тиристора.

## 2 Технологія виготовлення силового тиристора з термодинамічною стійкістю на 2800 В та 1000 А

Вихідний напівпровідниковий матеріал для тиристорів повинен мати велику ширину забороненої зони. Тиристиори (як і інші напівпровідникові прилади) на основі широкозонного напівпровідника мають:

- більше значення максимальної робочої температури, а отже, і максимально допустимої щільності струму у відкритому стані;
- за інших рівних умов пробивна напруга вища, що дає можливість робити тиристиори з великим значенням напруги включення і максимально допустимої зворотної напруги;
- за інших рівних умов значно менший зворотний струм через р-п переходи, зміщені у зворотному напрямі (наприклад  $I_{КБ0}$ ), що обумовлює меншу потужність, яка розсіюється в тиристорі при закритому його стані і при зворотній напрузі;
- менше значення коефіцієнта передачі струму емітера транзисторних структур, складових тиристора, при малих струмах (сильніше впливає рекомбінація носіїв заряду в емітерних переходах) забезпечує різку залежність сумарного коефіцієнта передачі струму тиристора і жорсткішу характеристику його перемикачання.

Тому в масовому виробництві тиристиори роблять доки лише з кремнію. Ведуться розробки тиристорів з арсеніду галію і інших з'єднань, які мають велику ширину забороненої зони. Основний метод формування структур тиристорів на основі кремнію – послідовна дифузія різних домішок з використанням планарної технології [4].

Для розрахунку технологічних параметрів виготовлення структури тиристора необхідно розглянути види дифузії, можливі в кремнії, закони, яким підкоряється процес дифузії, поведінку коефіцієнта дифузії, а також питання розчинності домішок в кремнії, вирішити рівняння дифузії (другий закон Фіка) в двох спеціальних випадках і розглянути способи розрахунку дифузій-

них шарів. Блок-схема типового технологічного процесу виготовлення силового тиристора представлена на рисунку 2.1

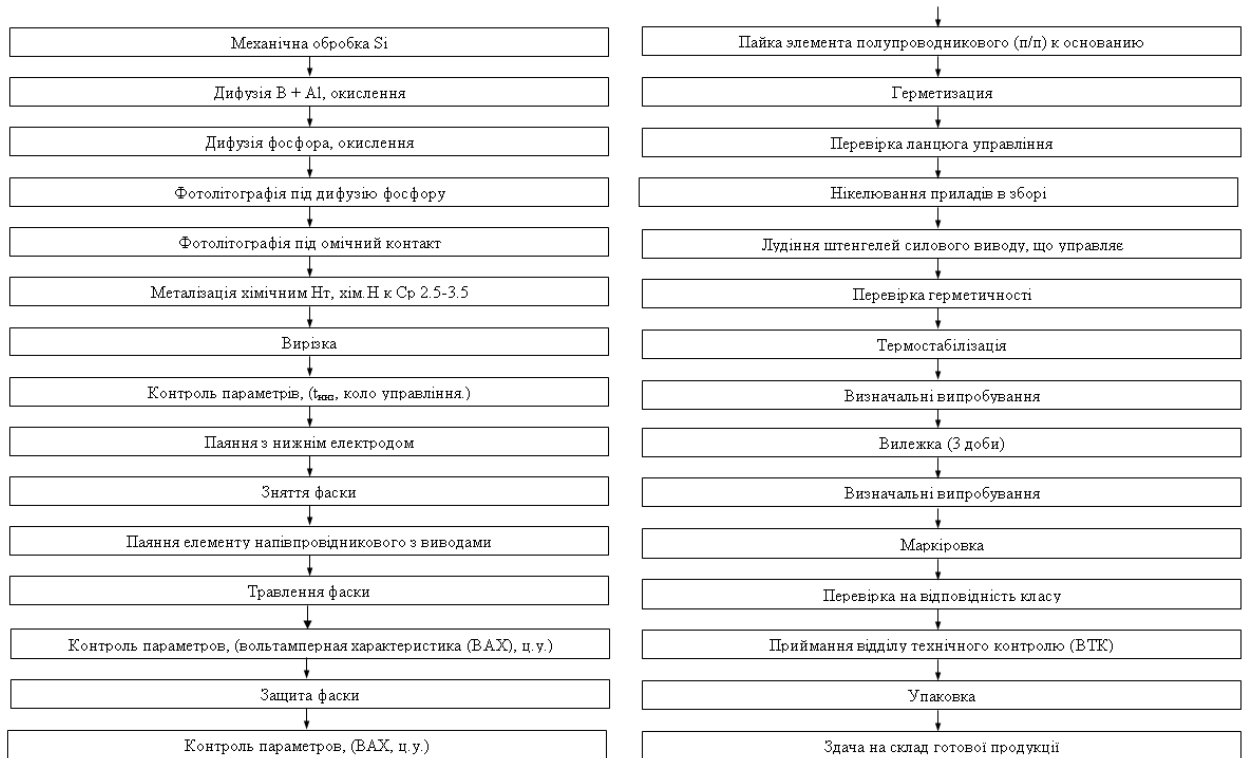


Рисунок 2.1 - Технологічний процес виготовлення силового тиристора

Тиристор призначений для роботи в колах постійного і змінного струму частотою до 500 Гц і може застосовуватися в різних перетворювачах електроенергії, в безконтактній комутаційній і регулюючій апаратурі. Загальна характеристика силового тиристора з термодинамічною стійкістю на 2800 В та 1000 А представлена в таблиці 2.1.

## 2.1 Механічна обробка

Механічна обробка пов'язана з високою крихкістю напівпровідникових матеріалів. Тому основним способом їх механічної обробки є обробка з використанням абразивів як в зв'язаному стані (алмазні диски і шліфувальні апарати), так і у вільному (абразивні суспензії і алмазні пасти) [5].

Таблиця 2.1 – Характеристики силового тиристора с термодинамічною стійкістю на 2800 В та 1000 А

Максимальний струм у відкритому стані при температурі корпусу 85 °С, А	63,80
Імпульсна напруга в закритому стані, яка повторюється, і імпульсна зворотна напруга, яка повторюється, В	100...2800
Імпульсна напруга у відкритому стані, В	1.65
Відмикаючий постійний струм управління при 25 °С, мА	150
Відмикаюча постійна напруга при 25 °С, В	4.0
Критична швидкість наростання струму у відкритому стані, А/мкс	125
Критична швидкість наростання напруги в закритому стані, В/мкс	1000
Ударний струм у відкритому стані, А	1350
Температура переходу, °С	50...125
Габарити	
Висота, мм	57
Різьблення	M10
Розмір "під ключ"	22
Маса	48 г

Фізична суть механізму руйнування крихкого напівпровідникового матеріалу при обробці, вільним абразивом полягає в тому, що частинки абразивного матеріалу, вдавлюючись в поверхню оброблюваного напівпровідникового матеріалу, викликають утворення в ній мікротріщин. Ці мікротріщини в процесі обробки збільшуються і розповсюджуються углиб від поверхні. Подальша обробка приводить до створення мережі тріщин, які, змикаючись, викликають сколення окремих ділянок напівпровідникового матеріалу. Частина, що відкололася, видаляють з поверхні початкового зразка. Таким чином відбувається пошарове видалення матеріалу і здійснюється механічна обробка початкового зразка.

Обробка напівпровідникових матеріалів вільним абразивом проводиться з використанням різних абразивних суспензій, складовою частиною яких є рідина. Наявність рідини сприяє процесу механічної обробки напівп-



ровідникових матеріалів; оскільки абразивний порошок знаходиться в рідині в завислому стані і рівномірно розподілений в ній.


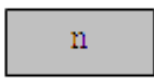
Фізична суть процесу механічної обробки зв'язаним абразивом, полягає в тому, що при обробці зв'язаним абразивом до руйнування під дією нормальної сили, направленої перпендикулярно до поверхні (випадок обробки вільним абразивом), додається руйнування оброблюваного матеріалу за рахунок зрізу мікровиступів поверхні закріпленим зерном абразиву під дією зсувної сили, направленої уздовж поверхні пластини.

При обробці вільним абразивом ударна сила направлена всередину оброблюваного напівпровідникового матеріалу, і абразивні зерна викликають сильне руйнування поверхневого шару. При обробці зв'язаним абразивом основна частина зусиль направлена не всередину зразка, а уздовж його поверхні, що викликає меншу глибину руйнування початкового матеріалу при тій же товщині видаленого шару. Рідина при обробці зв'язаним абразивом використовується лише для охолодження ріжучого інструменту і оброблюваного напівпровідникового матеріалу.

Двостороннє шліфування проводять на верстатах, які мають два шліфувальники. Оброблювані напівпровідникові пластини розташовуються в спеціальних гніздах сепараторів, які разом з пластинами розміщують між двома шліфувальниками. Нижній шліфувальник зазвичай нерухомий, а верхній вільно самовстановлюється при обертанні. Пластини, завантажені в гніздах сепаратора, здійснюють складний рух, який складається з обертання шліфувального круга, обертання сепаратора і обертання самої пластини усередині гнізда сепаратора. Такий рух дає можливість знімати шар матеріалу рівномірно зі всієї поверхні пластини з високою точністю. Абразивна суспензія подається через верхній шліфувальник і рівномірно обволакує напівпровідникову пластину з усіх боків. При роботі верстата абразивні зерна перекочуються по верхній і нижній поверхнях пластини, створюючи певний тиск, який приводить до виколювання мікрочастинок напівпровідникового матеріалу. Шліфована поверхня оброблюваних пластин має матову фактуру і скла-

дається з великої кількості кратероподібних виколувань. Розміри виколувань знаходяться в прямій залежності від розміру зерен абразиву, тиску на них шліфувальника і швидкості шліфування. Технологічний процес механічної обробки представлений в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 – Технологічний процес механічної обробки

	Найменування операції	Параметри	Режими	Матеріали
	Шліфування кремнію по утворюючій (верстат круглошліфувальний 36161)	$\varnothing 45_{-0.20}$		Кремній марки Б-45/45.5 б
	Приклеювання графітової планки. Наклеювання та обламування. Різання монокристалів на пластини (напівавтомат TS-23) Відмивання від мастики	$h_{\text{різки}} = 0.53_{-0.03} \text{ мм}$	Швидкість подачі 25-30 мм/хв  Кип'ячення Промивання водою $T = (60 - 70) ^\circ\text{C}$	Епоксидний компаунд  Електрокорунд 14А  5 мл на 1 л $\text{H}_2\text{O}$ миючий засіб "Каштан" $\rho \geq 2 \text{ МОм}$
	Двостороннє шліфування (AL-2)	$h_{\text{шліф}} = 0.38_{-0.03} \text{ мм}$ непаралельність – 0.03 мм	Швидкість обертання 40 об/хв.	Мікропорошок F400
	УЗМ (ультразвукове миття) (ванна ультразвукова УЗВ-17м, генератор УЗГ-10У) Сушка	Візуальний контроль, задири, подряпини	$T = (70-80)^\circ\text{C}$ $t = 5 \text{ хвилини.}$ 2 рази	Миючий засіб "Каштан" 5 мл на 1 л $\text{H}_2\text{O}$ $\rho \geq 2 \text{ МОм}$

## 2.2 Впровадження домішок в структуру тиристора методом дифузії

Метод дифузії полягає в тому, що домішка наводиться в зіткнення з поверхнею монокристала кремнію. Потім монокристал розігрівається, унаслідок чого атоми домішки проникають всередину монокристала і заміщають атоми кремнію, «витушені» зі своїх місць [6].

### 2.2.1 Технологічне моделювання впровадження домішки при формуванні структури тиристора

Процес дифузії домішки в напівпровідникових кристалах описується двома законами Фіка.

Перший закон Фіка показує, що процес дифузії домішок в монокристалах напівпровідника, який має кубічну кристалічну решітку, носить ізотропний характер і записується у вигляді рівняння:

$$j = -D \nabla N, \quad (2.1)$$

де  $j$  - щільність струму атомів домішки, яка вимірюється числом атомів, що проходять через одиничний майданчик за одиницю часу;  $D$  - коефіцієнт дифузії;  $\nabla$  - градієнтний оператор;  $N$  - концентрація атомів, які дифундують в одиниці об'єму.

Таким чином, перший закон Фіка свідчить, що щільність струму атомів домішки, які дифундують углиб монокристала напівпровідника, пропорційна градієнту концентрації. При цьому коефіцієнтом пропорційності є коефіцієнт дифузії. В практичних розрахунках параметрів дифузійних шарів зазвичай користуються одновимірними моделями. У цьому випадку перший закон Фіка набуває вигляду:

$$J = -D \frac{\partial N}{\partial x} \quad (2.2)$$

Розглянемо дифузія домішки зліва направо в пластині круглого перетину (рис. 2.1).

При кімнатній температурі глибина дифузії мала. При підвищенні температури приблизно до 1000 °С за декілька годин досягається значна глибина дифузії. Отже, управління швидкістю дифузії зводиться до управління температурою і часом. На рисунку 2.2 показаний розподіл домішки в атомах на 1 см як функція глибини (відстань від поверхні пластини) при певному часі дифузії. Величина  $dx$  - відстань між площиною перетину 1 і площиною перетину 2.

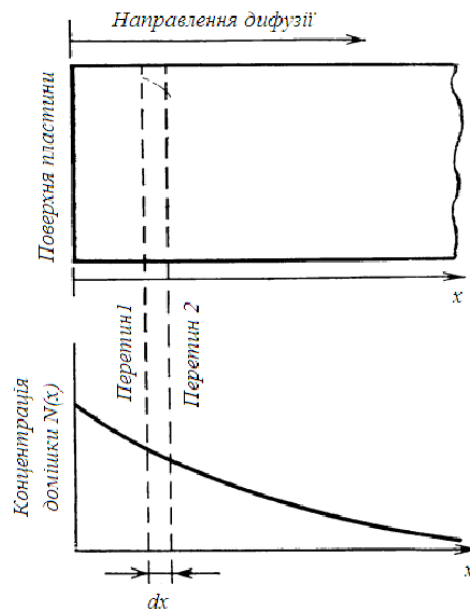


Рисунок 2.2 - Дифузія домішки в пластину кремнію

Для розрахунку параметрів дифузії другий закон Фіка переважніший ніж перший. Його можна вивести з першого закону, переходячи до безперервного аргументу і використовуючи рисунок 2.1. Число часток на одиницю площі між перетинами 1 і 2 буде дорівнює  $Ndx$ . Якщо розглядати  $N$  як функцію часу і відстані від поверхні, то

$$\text{швидкість накопичення часток} = \frac{dN}{dt} dx \quad (2.3)$$

Швидкість накопичення часток також є різниця потоків через перетини 1 і 2. Якщо вхідний потік через 1 рівний  $J$ , а вихідний

$$J + \frac{dJ}{dx} dx, \quad (2.4)$$

то сумарний потік через ділянку між двома площинами буде

$$J - \left( J + \frac{dJ}{dx} dx \right) = -\frac{dJ}{dx} dx \quad (2.5)$$

Підставимо (2.2) у (2.5):

$$-\frac{dJ}{dx} dx = -\frac{d}{dx} \left( -D \frac{dN}{dx} \right) dx = D \frac{d^2 N}{dx^2} dx,$$

що також як і (2.3) дорівнює швидкості накопичення часток. Тоді

$$\frac{dN}{dt} dx = D \frac{d^2 N}{dx^2} dx$$

$$\frac{dN}{dt} = D \frac{d^2 N}{dx^2} \quad (2.6)$$

Другий закон Фіка: швидкість зміни концентрації домішки з часом пропорційна другій похідній від цієї концентрації по відстані. Рівняння (2.6) є лінійним рівнянням другого порядку в приватних похідних, в якому множник  $D$  при деяких обмеженнях можна вважати постійним. Вирішення цього рівняння за певних граничних умов дає вирази концентрації домішки як функції двох змінних – часу дифузії і відстані від поверхні пластини.

Особливу увагу слід приділити коефіцієнту дифузії  $D$ , який входить як коефіцієнт пропорційності в перше і друге рівняння Фіка.

Коефіцієнт дифузії пов'язаний з температурою процесу залежністю:

$$D(T) = D_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right), \quad (2.7)$$

де  $E$  - температура в Кельвінах;  $D_0$  і  $R$  постійні;  $\Delta E$  - енергія активації для дифузії домішки в кристалі, яка є величиною постійною для даного типу кристала і даної домішки.

Логарифмуючи (2.7), отримаємо:

$$\ln D(T) = \left(\frac{1}{T}\right) \left(-\frac{\Delta E}{R}\right) + \ln D_0. \quad (2.8)$$

Звідси видно, що залежність

$$\ln D(T) = f\left(\frac{1}{T}\right)$$

має лінійний характер з коефіцієнтом пропорційності

$$-\frac{\Delta E}{R}.$$

Дана залежність представляє великий практичний інтерес, оскільки дозволяє легко визначити коефіцієнти дифузії для домішок, дифундуючих по вакансіях, залежно від температури. Графіки вказаної залежності для найважливіших домішок в кремнії представлені на рисунку 2.3.

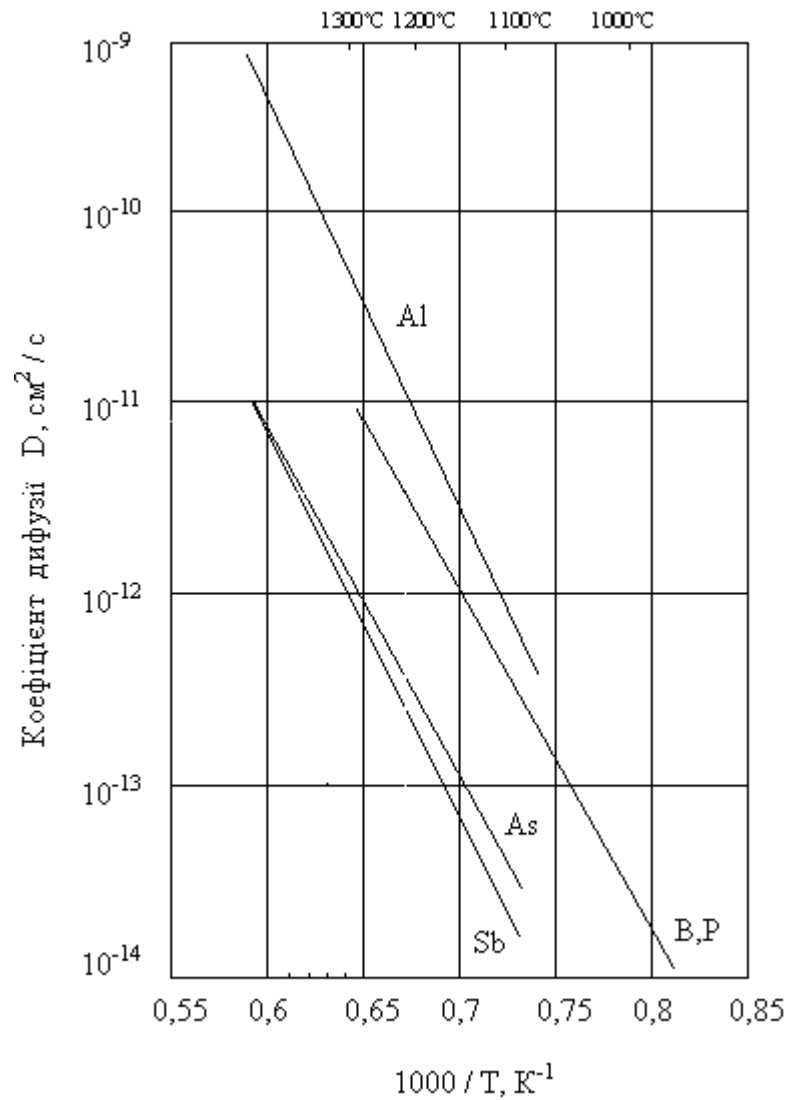


Рисунок 2.3 - Залежність коефіцієнта дифузії для домішок, що дифундують по вакансіях, від величини, зворотної температури

У напівпровідниковому виробництві зазвичай застосовують різні методи дифузії, проте всі вони можуть бути розділені на два класи. У першому випадку поверхнева концентрація атомів домішки зменшується в ході процесу дифузії (обмежене джерело), а в другому - поверхнева концентрація залишається постійною протягом всього часу проведення операції (необмежене джерело). При цьому вирішення другого закону Фіка будуть різними.

Для першого випадку вирішенням рівняння (2.6) буде функція Гауса:

$$N(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (2.9)$$

де  $Q$  - кількість атомів домішок, нанесених на поверхню пластин перед початком дифузії (атом/см<sup>2</sup>).

У другому - вирішенням рівняння (2.6) є додаткова функція помилок:

$$N(x,t) = N_0 \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (2.10)$$

де  $N_0$  - поверхнева концентрація атомів дифундууючої домішки;  $\operatorname{erfc}$  - функція добре вивчена в математичній статистиці (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 - Значення функції доповнення інтеграла помилок

Z	erfc Z	Z	erfc Z	Z	erfc Z
0		1,00	0,15730	2,00	0,00468
0,10	1,00000	1,10	0,11980	2,10	0,00298
0,20	0,88754	1,20	0,08969	2,20	0,00186
0,30	0,77730	1,30	0,06599	2,30	0,00114
0,40	0,67137	1,40	0,04772	2,40	0,000689
0,50	0,57161	1,50	0,03390	2,50	0,000407
0,60	0,47950	1,60	0,02365	2,60	0,000236
0,70	0,39614	1,70	0,01621	2,70	0,000134
0,80	0,32220	1,80	0,01091	2,80	0,000075
0,90	0,25790	1,90	0,00721	2,90	0,000041
				3,00	0,000022

При розрахунках зручно користуватися графіками, приведеними на рисунку 2.4, проте при цьому декілька зменшується точність обчислень.

Поверхнева концентрація атомів домішки не може бути необмежено великою. Вона має верхню межу і характеризується твердою розчинністю. Тверда розчинність - це найвища концентрація елементу, яка може бути досяжна в твердому розчині при даній температурі. На рисунку 2.5 представлені залежності твердих розчинів деяких дифузантив в кремнії від температури.

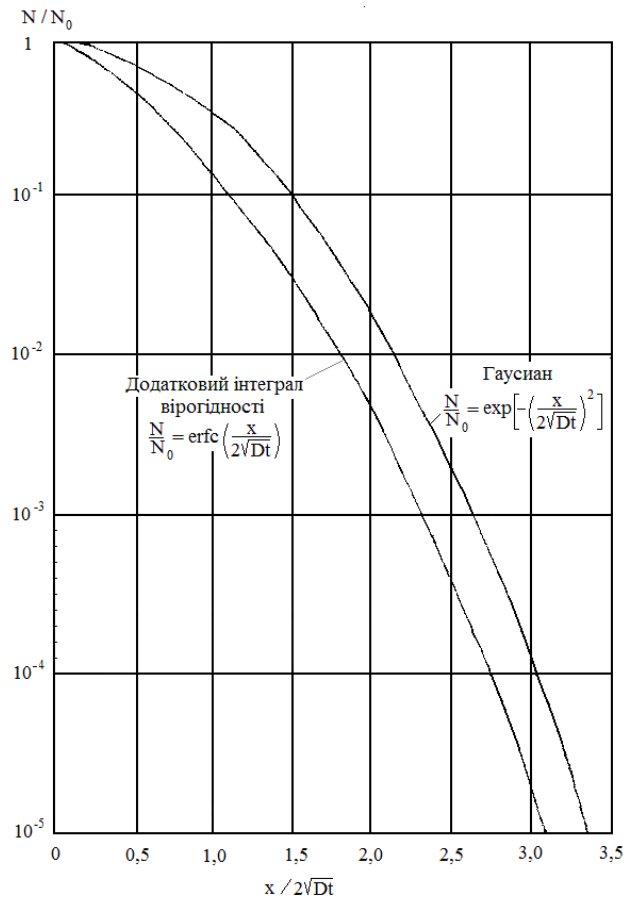


Рисунок 2.4 - Додатковий інтеграл вірогідності і функція нормального розподілу

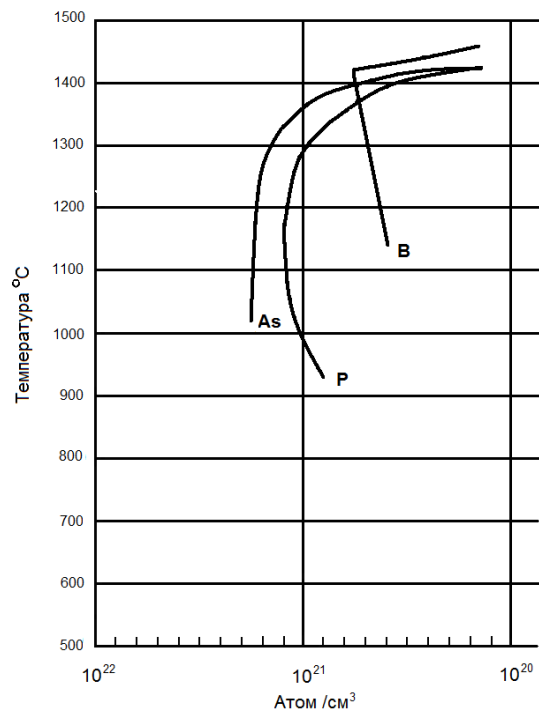


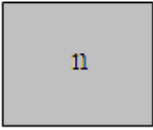
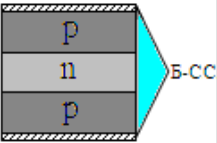
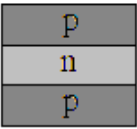
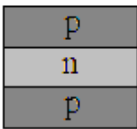
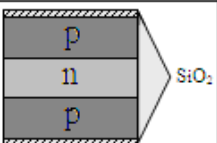
Рисунок 2.5 – Тверда розчинність деяких домішок в кремнії



## 2.2.3 Технологічний процес дифузії бора

Технологічний процес дифузії бора представлений в таблиці 2.4

Таблиця 2.4 – Технологічний процес дифузії бора

Рисунок	Найменування операції	Параметри	Режими	Матеріали
	Підготовка пластин до дифузії		<p><math>t = 20 - 30</math> хв. відмивання до нейтралізації реакції</p> <p>Кипіння <math>t = 10</math> хв.. відмивання до нейтралізації реакції</p> <p>Кипіння <math>t = 10</math> хв. відмивання до нейтралізації реакції</p> <p>УЗМ (після травлення) <math>T_{\text{води}} = (70 - 80)^{\circ}\text{C}</math> <math>t = 5</math> хв. 5 разів</p>	<p>HF</p> <p><math>\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O} = 1:1:7</math></p> <p><math>\text{H}_2\text{O}</math> <math>\rho \geq 18</math> МОм</p> <p><math>\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O} = 1:1:6</math></p> <p><math>\text{H}_2\text{O}</math> <math>\rho \geq 18</math> МОм</p>
	Нанесення джерела (Установка нанесення ОН.1384.00.00)		<p><math>V = (3000 \pm 500)</math> об/хв. <math>t = 3 - 5</math> с <math>n = 3 - 5</math> капель</p>	<p>Джерело <math>\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} - 94</math> мл <math>\text{H}_2\text{O} - 2</math> мл <math>\text{Al}(\text{NO}_3)_3 - 14</math> г 1% р-р <math>\text{H}_3\text{BO}_3</math> 12мл TEOS - 27 мл</p>
	Дифузія В+Al (електропіч СУОМ 1.2 6.1/13.5-И1)	<p><math>\Delta x = 77 \pm 3</math> мкм <math>\rho_p = (36-60)</math> Ом/□</p>	<p>Продування печі <math>T_{\text{загр}} = (625 \pm 25)^{\circ}\text{C}</math> <math>T_{\text{лиф}} = (1250 \pm 2)^{\circ}\text{C}</math> <math>T_{\text{охл}} = (625 \pm 25)^{\circ}\text{C}</math> <math>t = 18 - 21</math> ч</p>	
	Травлення борсилікатного скла (Б-С.С) (бокс 5БП2-ОС)		<p><math>t_{\text{травлення}} = 20</math> хв. відмивання до нейтралізації реакції</p> <p>УЗМ <math>T_{\text{води}} = (70-80)^{\circ}\text{C}</math> <math>t = 5</math> хв. 5 разів</p>	<p>HF витрата 3.5 л на 182 шт. використання HF три рази</p> <p><math>\text{H}_2\text{O}</math> <math>\rho \geq 18</math> МОм</p>
	Підготовка до окислення		<p><math>t = 7</math> хв. відмивання до нейтралізації реакції</p> <p>УЗМ <math>T_{\text{води}} = (70 - 80)^{\circ}\text{C}</math> <math>t = 5</math> хв. 5 разів</p>	<p><math>\text{HCl}:\text{HNO}_3 = 3:1</math></p> <p><math>\text{H}_2\text{O}</math> <math>\rho \geq 18</math> МОм</p>
	Окислення (електропіч СУОМ 1.2 6.1/13.5-И1)	$h_{\text{ок}} = 1.4$ мкм	<p><math>T = (1150 \pm 5)^{\circ}\text{C}</math> <math>t</math> в парах <math>\text{H}_2\text{O} - 6</math> ч <math>t</math> без <math>\text{H}_2\text{O} 1.5</math> ч <math>T_{\text{ост}} = (625 \pm 25)^{\circ}\text{C}</math></p>	

Площу р-п переходів розраховують, виходячи з максимально допустимої щільності струму в статичному режимі через відкритий тиристор 200 А/см<sup>2</sup>. Відповідно максимально допустимі струми у відкритому стані для різних тиристорів мають значення від 40 мА до 1000 А. При цьому напруга у відкритому стані зазвичай не перевершує 2 В.

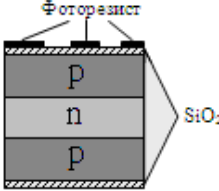
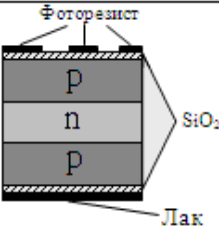
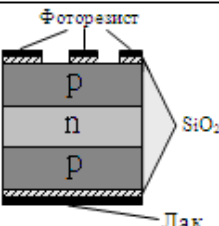
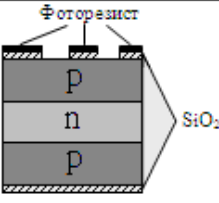
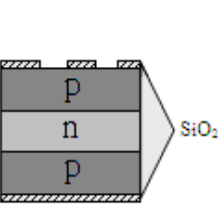
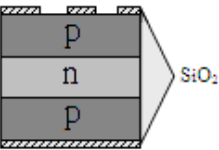
### 2.3 Технологічний процес першої фотолітографії

Фотолітографія - це процес утворення на поверхні підкладки за допомогою світлочутливих матеріалів локальних захисних ділянок плівки (мікророзображення), рельєф яких повторює рисунок топології приладу або схеми, і подальшого перенесення цього мікророзображення на підкладку.

На поверхню спеціально обробленої пластини (підкладки) наносять тонкий шар світлочутливого матеріалу – фоторезисту. Після висихання фоторезисту на початковій підкладці утворюється міцна плівка. Опромінювання цієї плівки фоторезисту через притиснутий до неї фотошаблон (контактний друк) активним світлом приводить до зміни її властивостей. Проявлення і полімеризація плівки фоторезисту дозволяють одержати в ній рельєф потрібного рисунка, тобто відкриті (вільні від плівки фоторезисту) і закриті (з плівкою фоторезисту) ділянки плівки. Рельєф певного рисунка, що утворився в плівці фоторезисту, переносять на підкладку [6].

«Вікна», які утворюються в плівці фоторезисту, дозволяють проводити такі важливі технологічні операції: локальне травлення підкладки з метою видалення шару напівпровідникового матеріалу і створення мезаструктур, видалення захисних діелектричних шарів SiO<sub>2</sub> і Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> з метою розкриття «вікон» під дифузію, а також витравлення металевих шарів з метою створення омичних контактів і струмоведучих доріжок складної геометричної форми. Для проведення процесів фотолітографії в планарній технології використовують фотошаблони. Технологічний процес першої фотолітографії представлений в таблиці 2.5

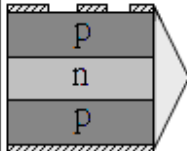
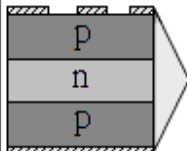
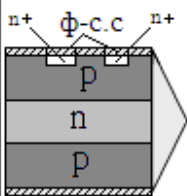
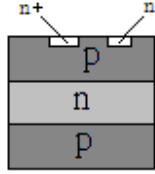
Таблиця 2.5 – Технологічний процес першої фотолітографії

Рисунок	Найменування операції	Параметри	Режими	Матеріали
	Формування рисунка в шарі фоторезиста (лінія фотолітографії)	T140-4 стр/пл	<p>Підготовка пластин  <math>T = (750 \pm 50) ^\circ\text{C}</math>  <math>t = 15 - 20</math> хв.</p> <p>Нанесення (1 стор.)  <math>t_{\text{зал}} = 1.0 - 2.5</math> сек  <math>t_{\text{вр}} = 10 - 25</math> сек  <math>V = 1500 - 2000</math> об/хв.</p> <p>Сушка  <math>T = (90 - 100) ^\circ\text{C}</math>  <math>t = 25 - 40</math> хв.</p> <p>Експонування  <math>t = 10 - 30</math> сек</p> <p>Проявлення  <math>t = 30 - 80</math> сек</p> <p>Дублення  <math>T = (120 - 150) ^\circ\text{C}</math>  <math>t = 30 - 60</math> хв.</p>	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  фоторезист ФП-383  2% р-р(раствор) $\text{Na}_3\text{PO}_4$ (водний) 800 мл. на 100
	Підготовка до травлення (ретушировка)		$t = 5 - 10$ хв. $T = (70 \pm 10) ^\circ\text{C}$ $t = 20 - 25$ хв.	Лак ХВ – 784 розбавлений толуолом 2:1
	Захист зворотної сторони лаком		В'язкість 20 – 25 с $t_{\text{на вод}} = 5 - 10$ хв. $T = (70 \pm 10) ^\circ\text{C}$ $t = 5 - 10$ хв.	Лак ХВ – 784
	Селективне травлення	$\rho = 60 - 80 \text{ Ом}/\square$	$t = 20 - 50$ хв. до скачування р-ра, відмивання до нейтралізації реакції Сушка $T = 75 \pm 10) ^\circ\text{C}$ $t = 10 - 20$ хв.	$\text{NH}_4\text{F} - 300$ г. $\text{HF} - 100$ мл $\text{H}_2\text{O} - 600$ мл 1 л на 3000 пластин
	Зняття лаку (уручну)			Липка стрічка
	Зняття фоторезиста (шафа 2ш-нж)		Кипіння $t = 10$ хв. Промивання  Кипіння $t = 10$ хв. обробка 3 рази через промивання $t = 1.5 - 2$ хв. $T = (75 \pm 10) ^\circ\text{C}$	Діетілфосфамід $\text{H}_2\text{O}$ $\rho \geq 18 \text{ МОм}$  $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ $= 1:2:30$ $\text{H}_2\text{O}$ $\rho \geq 18 \text{ МОм}$

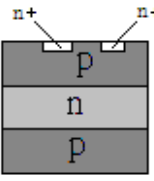
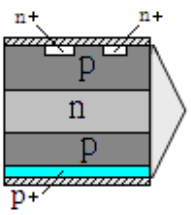
## 2.4 Технологічний процес дифузії фосфору і бору з сторони управляючого електроду

Технологічний процес дифузії фосфору і бору представлено в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Технологічний процес дифузії фосфору і бору

Рисунок	Найменування операції	Параметри	Режими	Матеріали
	Підготовка пластин до дифузії		<p>Кипіння <math>t = 5</math> хв. відмивання до нейтральної реакції</p> <p>Кипіння <math>t = 5</math> хв. відмивання до нейтральної реакції</p> <p>Після кожної промивання УЗМ Завантаження по 70 пластин <math>T_{\text{води}} = (55-70)^{\circ}\text{C}</math> <math>t = 5</math> хв., 3 рази</p>	<p><math>\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O} = 1:1:7</math></p> <p><math>\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O} = 1:1:6</math></p> <p><math>\text{H}_2\text{O}</math> <math>\rho \geq 18 \text{ МОм}</math></p>
	Нанесення дифузанта	Дифузانت наноситься з боку управління	<p><math>V = (3000 \pm 500) \text{ об/хв.}</math> <math>t = 3 - 5 \text{ с}</math> <math>n = 3 - 5 \text{ капель}</math></p>	<p>Джерело <math>\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} - 50 \text{ мл}</math> <math>\text{H}_3\text{PO}_4 - 7 \text{ мл}</math> <math>\text{HNO}_3 - 10 \text{ кап}</math> <math>\text{Al}(\text{NO}_3)_3 - 12 \text{ мл}</math> <math>\text{TЭОС} - 7 \text{ мл}</math> крихта окислу Al</p>
	Загонка домішки (електропіч СУОМ 1.2 6.1/13.5-И1)	$\rho_{\text{n}+} \leq 4.2 \text{ Ом/}\square$	<p><math>T_{\text{зав}} = (625 \pm 25)^{\circ}\text{C}</math> <math>t_{\text{внд}} = 1 \text{ ч}</math> <math>T_{\text{загон}} = (1150 \pm 20)^{\circ}\text{C}</math> <math>t_{\text{зав}} = 1 \text{ ч}</math> <math>T_{\text{охол}} = (625 \pm 25)^{\circ}\text{C}</math> <math>t_{\text{внд}} = 1 \text{ ч}</math> <math>T_{\text{вигр}} = (625 \pm 25)^{\circ}\text{C}</math></p>	
	Стравлювання Фосфорсилікатного скла (Ф-С.С) і оксиду із зворотного боку		<p><math>t = 20 \text{ хв.}</math> відмивання до нейтральної реакції</p> <p>УЗМ <math>T_{\text{води}} = (70-80)^{\circ}\text{C}</math> <math>t = 5 \text{ хв.}</math>, 5 раз</p>	<p>HF расход 3.5 л на 128 шт</p> <p><math>\text{H}_2\text{O}</math> <math>\rho \geq 18 \text{ МОм}</math></p>

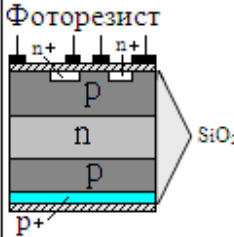
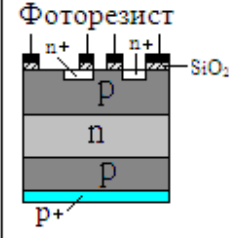
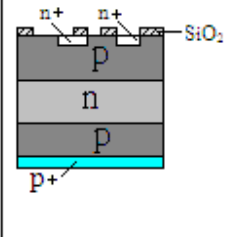
## Продовження таблиці 2.6

Рисунок	Найменування операції	Параметри	Режими	Матеріали
	Підготовка пластин до дифузії		$t = 7$ хв. відмивання до нейтральної реакції  УЗМ $T_{\text{води}} = (70-80)^{\circ}\text{C}$ $t = 5$ хв., 5 разів	$\text{HCl}:\text{HNO}_3 = 3:1$ витрата 3.5 л на 128 шт  $\text{H}_2\text{O}$ $\rho \geq 18$ МОм
	Нанесення дифузанта на зворотну сторону		$V = (3000 \pm 500)$ об/хв. $t = 3 - 5$ с $n = 3 - 5$ крапель	$\text{HBO}_3 - 22$ г. $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} - 300$ мл ТЕОС - 24 мл
	Диффузія В; Р (електропіч СДОМ 125В-15.0)	$\tau_{\text{ннз}} \geq 14$ мкс $\Delta x_n = 20 - 24$ мкм $\rho_{n+} \leq 2.1$ Ом/□ $\rho_{p+} \leq 2.1$ Ом/□	$T_{\text{зав}} = (625 \pm 25)^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{диф}} = (1210 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ $t = 5$ ч $T_{\text{диф}} = (800 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ $t = 4$ ч $T_{\text{выгр}} = (625 \pm 25)^{\circ}\text{C}$	
	Підготовка пластин до окислення			$t = 20$ хв. відмивання до нейтральної реакції  $t = 7$ хв. відмивання до нейтральної реакції  Після кожної промивання УЗМ Завантаження по 70 пластин $T_{\text{води}} = (55-70)^{\circ}\text{C}$ $t = 5$ хв., 3 рази
	Окислення (електропіч СДО 125/4А)		Завантаження при $T_{\text{зав}} = (1015 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ $t$ в парах $\text{H}_2\text{O}$ 2 час $t_{\text{сух}} \text{O}_2 - 1$ час $T_{\text{выгр}} = (625 \pm 25)^{\circ}\text{C}$	

## 2.5 Технологічний процес другої фотолітографії

Технологічний процес другої фотолітографії представлений в таблиці

Таблиця 2.7 – Технологічний процес другої фотолітографії

Рисунок	Найменування операції	Параметри	Режими	Матеріали
	Формування шару фоторезиста (лінія фотолітографії)	Зсув рисунка II Ф/П відносно рисунка I Ф/П 0.1 мм	<p>Підготовка пластин  <math>T = (750 \pm 50)^\circ\text{C}</math>  <math>t = 15 - 20</math> хв.</p> <p>Нанесення  <math>t_{\text{зал}} = 1.0 - 2.5</math> сек  <math>t_{\text{вп}} = 10 - 25</math> сек  <math>V = 1500 - 2000</math> об/хв.</p> <p>Сушка  <math>T = (90 - 100)^\circ\text{C}</math>  <math>t = 25 - 40</math> хв.</p> <p>Експонування  <math>t = 10 - 30</math> сек</p> <p>Проявлення  <math>t = 30 - 80</math> сек</p> <p>Дублення  <math>T = (120 - 150)^\circ\text{C}</math>  <math>t = 30 - 60</math> хв.</p>	<p><math>\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}</math></p> <p>фоторезист ФП-383</p> <p>2% р-р <math>\text{Na}_3\text{PO}_4</math> (водний) 800 мл. на 100 – 120 пл.</p>
Підготовка до травлення (регушировка)			$t = 5 - 10$ хв. $T = (70 \pm 10)^\circ\text{C}$ $t = 20 - 25$ хв.	Лак ХВ – 784 розбавлений толуолом 2:1
	Селективне травлення		$t = 30 - 60$ хв.	$\text{NH}_4\text{F} - 300$ г $\text{HF} - 100$ мл $\text{H}_2\text{O} - 600$ мл 1 л на 3000 пластин
	Зняття фоторезиста		<p>Кипіння <math>t = 10</math> хв.</p> <p>Промивання</p> <p>Кипіння <math>t = 10</math> хв. обробка 3 рази</p> <p>через промивання  <math>t = 1.5 - 2</math> хв.  <math>T = (75 \pm 10)^\circ\text{C}</math></p>	<p>Діетілформід</p> <p><math>\text{H}_2\text{O}</math>  <math>\rho \geq 18</math> МОм</p> <p><math>\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 1:2:30</math></p> <p><math>\text{H}_2\text{O}</math>  <math>\rho \geq 18</math> МОм</p>

## 2.5 Технологічний процес металізації

Важливе місце в напівпровідниковій технології займають процеси, пов'язані з нанесенням на поверхні структур тонкоплівкових покриттів і їх видаленням у вакуумі. Ці процеси базуються на молекулярно-кінетичних явищах в розріджених газах. Існує два основні методи осадження тонких плівок: термічним випаровуванням і катодним розпилюванням. При термічному випаровуванні осаджується речовина нагрівається до температури випаровування і його пари конденсуються на підкладці. При катодному розпилюванні осаджується речовина знаходиться при кімнатній температурі і бомбардується низькоенергетичними іонами з плазми газового розряду. Розпилені атоми досягають підкладки і конденсуються на ній. Обидва методи використовують для осадження провідних, резистивних і діелектричних плівок. Якість тонкоплівкових покриттів багато в чому залежить від глибини вакууму в робочій камері і співвідношення потоків молекул залишкового газу і випаровуваної речовини на поверхню підкладок. При термічному випаровуванні елементів і сплавів використовують одностигельні і багатостигельні способи. Удосконаленням катодного розпилювання є метод іонно-плазмового розпилювання і його модифікації, які складають основу технології «сухої» обробки напівпровідникових структур, що дозволяє виключити застосування рідких хімічних травників і розчинників при обробці та фотолітографії тонкоплівкових покриттів. При виготовленні ІМС термічне випаровування і іонно-плазмові процеси використовують для створення омичних переходів, пасивних елементів тонкоплівкових схем, міжелементної ізоляції і комутації. Для оцінювання якості тонкоплівкових покриттів контролюють їх товщину і структуру [7].

Термічне випаровування проводять в глибокому вакуумі, тому технологічний процес в першу чергу визначається конструкцією вакуумного устаткування. На рисунку 2.6 показано схему вакуумної системи напилювальної установки. Вона включає робочу камеру 1 ковпакового типу з об'ємом до 0,5 м<sup>3</sup>, в якій розміщуються напівпровідникові структури 2 на планетарному, карусельному або барабанному утримувачі, випарник 4 і заслінка 3.

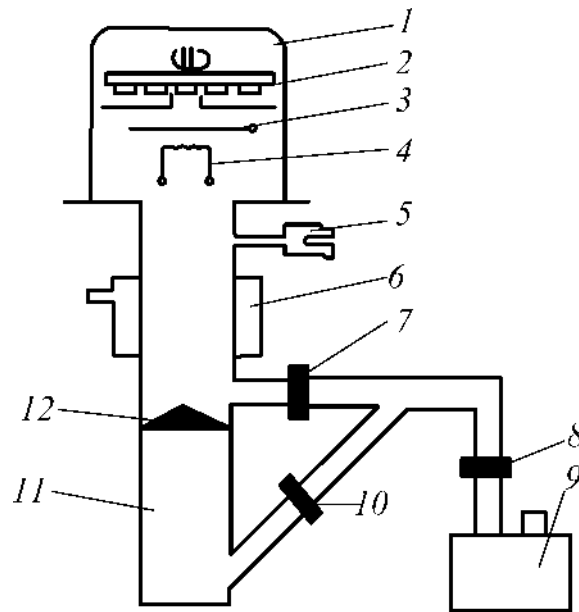


Рисунок 2.7 - Схема вакуумної установки для наплення

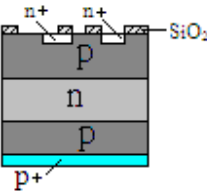
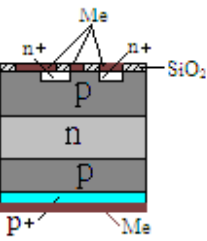
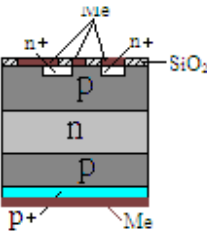
Вимірювання тиску до  $10^{-1}$  Па проводять термопарним манометром, а нижче  $10^{-1}$  Па – іонізаційним, які об'єднані в одному приладі 5.

Попередній вакуум досягається за допомогою форвакуумного насоса 9 установки для наплення при закритому клапані 12 дифузійного насоса 11 і закритому крані 10. Крани 8 і 7 відкриті. Після досягнення тиску  $\sim 10$  Па кран 7 закривають і відкривають кран 10 і клапан 12, внаслідок чого здійснюється відкачування дифузійним насосом. У разі аварійного відключення форвакуумного насоса спрацьовує електромагнітний клапан 8, оберігаючи систему від натікання в неї атмосферного повітря через непрацюючий форвакуумний насос. Для конденсації парів масла і залишкових газів слугує пастка 6, наповнювана рідким азотом. В наш час широко використовують безмасляне відкачування із застосуванням турбомолекулярних і гетеро-іонних насосів, дозволяючи досягати розрідження до  $10^{-9}$  Па.

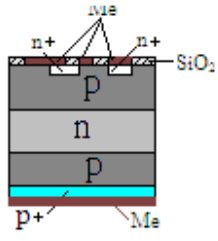
Заслінка 3 відіграє важливу технологічну роль, оскільки дозволяє точно контролювати тривалість процесу осадження покриття і перешкоджає попаданню на підкладки летких забруднень, що містяться у випаровуваній речовині, в початковий момент випаровування. Технологічний процес металізації представлений в таблиці 2.8.



Таблиця 2.8 – Технологічний процес металізації

Рисунок	Найменування операції	Параметри	Режими	Матеріали
	Підготовка до першого хімічного нікелювання		Травлення $t = 1-2$ хв.  УЗМ $T = (60 \pm 10) ^\circ\text{C}$ $t = 5$ хв., 3 рази  Сушка $T = (170 \pm 10) ^\circ\text{C}$ $t = 10-15$ хв.  Активация $t = 15-20$ с	$\text{HCl}:\text{HNO}_3 = 3:1$  $\text{H}_2\text{O}$ $\rho \geq 18$ МОм  $\text{Au} - 0.1$ г/л
	Перше хімічне нікелювання	Візуальний контроль рівномірності розподілу Ni $h = 0.3 - 0.4$ мкм	$T = (85-90) ^\circ\text{C}$ $t = 3$ хв.  $T_{\text{сушки}} = (180 \pm 20) ^\circ\text{C}$ $t = 30$ хв.	Електроліт $\text{NiCl}_2 - 30$ г/л $\text{NH}_4\text{Cl} - 50$ г/л $\text{NaH}_2\text{PO}_4 - 10$ г/л $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 - 60$ г/л $\text{NH}_4\text{OH} - 150$ мл $\text{Ph} - 8-9$
	Вжігання нікелю (пекти вакуумна горизонтальна)		$t = 30$ хв. $T = 450 ^\circ\text{C}$ $p \leq 5 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст	
	Підготовка до II хімічного нікелювання		Травлення $t = 1-2$ хв.  УЗМ $T = (60 \pm 10) ^\circ\text{C}$ $t = 5$ хв., 3 рази  Сушка $T = (170 \pm 10) ^\circ\text{C}$ $t = 10 - 15$ хв.  Активация $t = 15-20$ с	$\text{HCl}:\text{HNO}_3 = 3:1$  $\text{H}_2\text{O}$ $\rho \geq 18$ МОм  $\text{Au} - 1$ г/л
	II хімічне нікелювання (бокс 2БП2-ОС)	$h_{\text{Ni}} = 0.7 - 1$ мкм	$t = 5$ хв. $T = (85-90) ^\circ\text{C}$  $T_{\text{сушки}} = (180-200) ^\circ\text{C}$ $t = 1$ час	Електроліт $\text{NiCl}_2 - 30$ г/л $\text{NH}_4\text{Cl} - 50$ г/л $\text{NaH}_2\text{PO}_4 - 10$ г/л $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 - 60$ г/л $\text{NH}_4\text{OH} - 150$ мл
	Підготовка до кадміювання (стіл монтажний)			Монтажна підвіска

## Продовження таблиці 2.8

Рисунок	Найменування операції	Параметри	Режими	Матеріали
	Кадміювання (комплект устаткування ОМ.1490.0000)	$h_{Cd} = 0.3-0.5$ мкм	$D_k - 2 \text{ А/дм}^2$ $t = 45-90 \text{ сек}$ $T = (18-25) \text{ }^\circ\text{C}$  Промити $T = (60 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$ до нейтральної реакції	$\text{CaSO}_4 - 45-60$ г/л $\text{NaSO}_4 - 40-50$ г/л $\text{H}_2\text{SO}_4 - 20-30$ г/л допоміжна речовина ОП-10 6-8 г/л
	Сріблення	$h_{Ag} = 2.5 - 3.5$ мкм	$D_k - 5 \text{ А/дм}^2$ $t = 8-10 \text{ хв.}$ $T = (18-25) \text{ }^\circ\text{C}$  В ванне улавлювання $D_k - 0.5 \text{ А/дм}^2$ $t = 3-5 \text{ хв.}$ $T = (18-25) \text{ }^\circ\text{C}$  Промыть $T = (60 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$ до нейтральної реакції	Діціаноаргенат калія $\text{K}[\text{Ag}(\text{CN})_2] \approx 74-92$ г/л калій роданистий KCNS – 200 – 250 г/л калій двовуглекислий $\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} - 20-30$ г/л
	Термообробка поверхні		$T = (170 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ $t = 1 \text{ ч}$	

## 2.6 Технологічний процес формування структури і конструкції тиристора

Електронно-діркові переходи тиристорів формують дифузією алюмінію або бору в кристали кремнію з електропровідністю n-типа і дифузією фосфору в кристали кремнію з електропровідністю p-типа.

Необхідну площу p-n переходу розраховують, виходячи із значення допустимого прямого струму тиристора і враховуючи допустиму щільність прямого струму, яка для кремнієвих p-n переходів дорівнює  $200 \text{ А/см}^2$ . Товщина вихідних кристалів кремнію складає 0,2...0,4 мм [1].

Пробій реальних p-n переходів часто відбувається поблизу поверхні напівпровідника, тобто в місцях виходу переходу на поверхню кристала. Для унеможливлення поверхневого пробою товщину дифузійного переходу  $\delta_1$  в місці виходу його на поверхню кристала кремнію, тобто в кільцевій частині

по периферії кристала, бажано зробити більшою в порівнянні з товщиною переходу  $\delta_2$  в центральній частині кристала (рис. 2.8).

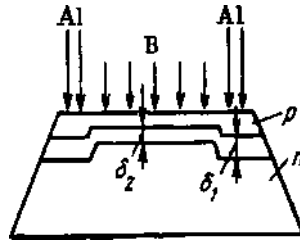


Рисунок 2.8 - Структура тиристора, p-n перехід якого сформований дифузією бору в центральній частині кристала і дифузією алюмінію в кільцевій частині

Досягти цього можна двома способами. По-перше, кільцеву частину переходу можна сформувати дифузією алюмінію, а центральну частину – дифузією бору. Коефіцієнт дифузії алюмінію більше коефіцієнта дифузії бору, а розчинність алюмінію в кремнії менша, ніж бору. Тому градієнт концентрації акцепторної домішки в кільцевій частині виявляється менше, ніж в центральній частині переходу.

Товщина дифузійного переходу залежить від градієнта концентрації домішки і буде більше в кільцевій частині переходу. Пробивна напруга кільцевої частини переходу виявляється при цьому більше пробивної напруги центральної його частини. Пробивна напруга всього діода не залежить від стану поверхні кристала; через меншу кількість дефектів в центральній частині переходу щільність зворотного струму при лавинному пробії буде рівномірно розподілена за всією площею [5].

По-друге, зменшити вірогідність поверхневого пробією можна шляхом зняття фаски по периметру кристала кремнію після створення в ньому p-n переходу. Для зменшення напруженості електричного поля в місці виходу переходу на поверхню кристала і відповідно для збільшення пробивної напруги поверхневого пробією треба шляхом шліфовки країв кристала зняти фаску від сильнолегованої області до слаболегованої (пряма або позитивна

фаска). При такій конфігурації фаски товщина р-n переходу поблизу поверхні кристала збільшиться, що викликане збереженням електричної нейтральності р-n переходу (рис. 2.9).

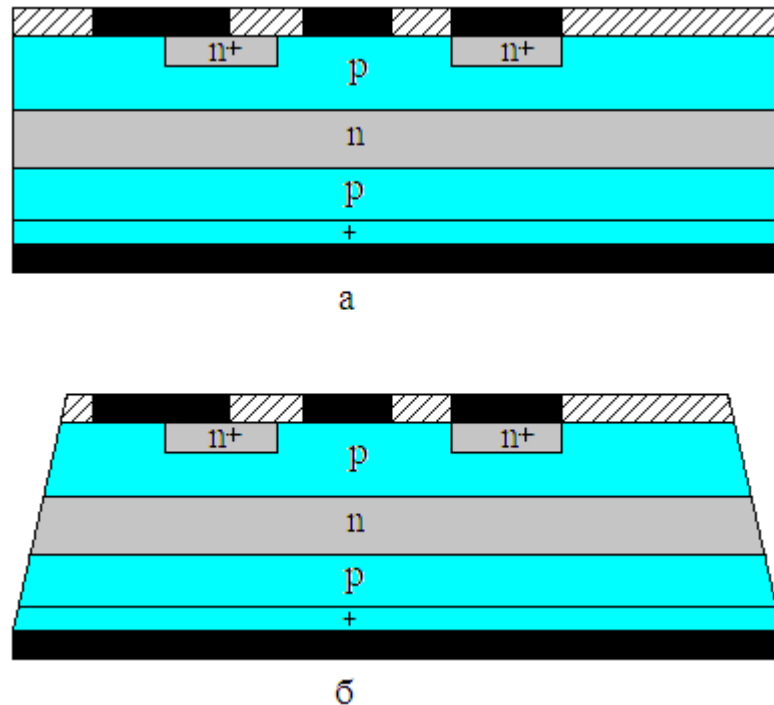
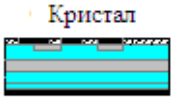
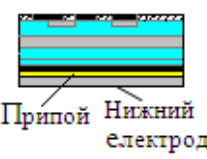
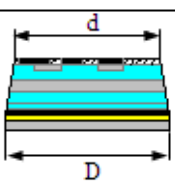
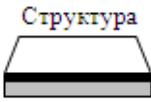


Рисунок 2.9 - Структура р-n переходу в місці виходу його на поверхню кристала без фаски (а) і з позитивною фаскою (б), яка забезпечує збільшення товщини р-n переходу на поверхні кристала

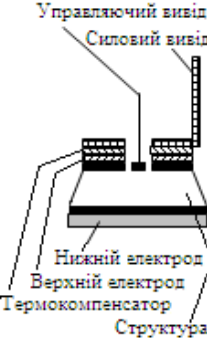
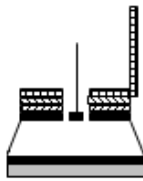
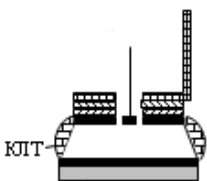
Кристал кремнію з р-n переходом припаюють до мідної підстави (до ніжки корпусу) так, щоб отримати омичний перехід між металом і напівпровідником. Для цього використовують припій з домішкою донора, якщо кристал припаюють до підстави n-областю, і з домішкою акцептора, якщо р-областю. Наявність в припої хімічного елементу, що створює в забороненій зоні кремнію рівні рекомбінаційних пасток, забезпечує зменшення часу життя неосновних носіїв заряду поблизу омичного переходу і прискорення процесу розсмоктування накопичених неосновних носіїв [7].

Технологічний процес формування структури і конструкції тиристора представлений в таблиці 2.9

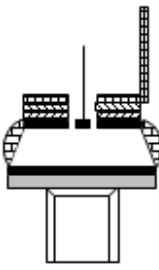
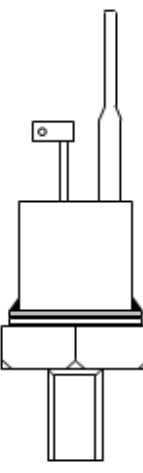
Таблиця 2.9 Технологічний процес формування структури і конструкції тиристора

Рисунок	Найменування операції	Параметри	Режими	Матеріали
	Наклейка пластин		$T = (110-140) \text{ }^{\circ}\text{C}$	Гліфталієвая мастика
	Вирізка	$\varnothing 16_{-0.11} \text{ мм}$		
	Відмивання		Кипіння $t = 25-35 \text{ хв.}$ Сушка фільтрами	диметилформамид
	Підготовка деталей до паяння		$t_{\text{деоксир}} \leq 1 \text{ хв.}$ Промивка до нейтральної реакції $T_{\text{суш}} = (130 \pm 10) \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t = 10 \text{ хв.}$	HCl $\text{H}_2\text{O } \rho \geq 18 \text{ МОм}$
	Паяння з нижнім електродом		Завантаження касети: електродна структура вання припою Паяння: I-III зони $= (520 \pm 10) \text{ }^{\circ}\text{C}$ IV – зона $= (470 \pm 10) \text{ }^{\circ}\text{C}$ $v$ стрічки $= 11-13 \text{ см/сек}$ точка роси $\text{H}_2 \leq -60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ роси азота $\leq -50 \text{ }^{\circ}\text{C}$	ПСр – 2.5 припой $\text{H}_2$ технічний марки А
	Зняття фаски	$D = 16_{-0.11} \text{ мм}$ $d = 13_{-0.27} \text{ мм}$ $R_{\text{сфери}} = 35 \text{ мм}$		Мікропорошок М 14
	УЗМ		$T = 50-70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t = 5 \text{ хв.}, 2 \text{ рази}$ Сушка ІК $T = (120 \pm 10) \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t = 5-10 \text{ хв.}$	$\text{H}_2\text{O } \rho \geq 18 \text{ МОм}$

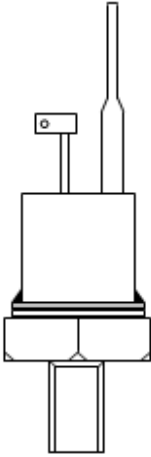
Продовження таблиці 2.9

Рисунок	Найменування операції	Параметри	Режими	Матеріали
	Підготовка елемента п/п до паяння з виводами		$t_{\text{декон.}} \leq 1 \text{ хв.}$ Промивка до нейтральної реакції УЗМ $T_{\text{сушки}} = (130 \pm 10) ^\circ\text{C}$ $t = 10 \text{ хв.}$	HCl H <sub>2</sub> O $\rho \geq 18 \text{ Мом}$
	Паяння виводу		Завантаження: вивід, кільце посер. електрод I зона = $(400 \pm 10) ^\circ\text{C}$ II зона = $(480 \pm 10) ^\circ\text{C}$ III зона = $(760 \pm 10) ^\circ\text{C}$ IV зона = $(820 \pm 10) ^\circ\text{C}$ V зона = $(820 \pm 10) ^\circ\text{C}$ VI зона = $(700 \pm 10) ^\circ\text{C}$ VII зона = $(550 \pm 10) ^\circ\text{C}$ Швидкість руху конвеєрної стрічки 18-20 см/хв.	ПСр-2.5 припой
	Травлення фаски (лінія лужного травлення)	Перевірка ВАХ $U_d = 750 \text{ В}$ $I_{\text{ут}}$ $I_{\text{обр.}} \leq 0.1 \text{ МА}$ перевірка кола управління $I_{\text{упр.}} \leq 135 \text{ МА}$ $U_{\text{упр.}} \leq 3.0 \text{ В}$	Кипіння $t = 4 \text{ хв.}$ Промивка до нейтралізації реакції $T_{\text{води}} = (50 \pm 10) ^\circ\text{C}$ 2-3 рази занурити в розчин і промити в гарячій воді $T_{\text{води}} = (50 \pm 10) ^\circ\text{C}$ і холодній воді $T_{\text{води}} = (18 \pm 20) ^\circ\text{C}$ $t_{\text{суш.}} = 20 \text{ с.}$ у I центрифугі 2-3 рази занурити, сушка $t = 30 \text{ с}$ у II центрифугі, сушка $t = 1 \text{ ч.}$ у печі $T = (130 \pm 10) ^\circ\text{C}$	20 % КОН H <sub>2</sub> O $\rho \geq 18 \text{ МОм}$ H <sub>2</sub> O $\rho \geq 18 \text{ МОм}$ C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> – 5 % розчин H <sub>2</sub> O $\rho \geq 18 \text{ МОм}$ C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ОН
	Захист фаски (камера ламінарна ШБу-14) Піч конвеєрна терморадіаційна АМ.762.000.000 ОМ 827.0000 ОМ. 1447.0000 установка захисту ОМ 1567.0000)	Вимірювання ВАХ $U = 1000 \text{ В}$ $I_{\text{ут}} \leq 0.1 \text{ МА}$	Сушка на повітрі $T = (18-25) ^\circ\text{C}$ , $t = 12 \text{ ч}$ Сушка в печі $T = (70 \pm 10) ^\circ\text{C}$ , $t = 2 \text{ ч}$ $T = (190 \pm 10) ^\circ\text{C}$ $t = 10 \text{ ч}$	Компаунд КЛТ-30

Продовження таблиці 2.9

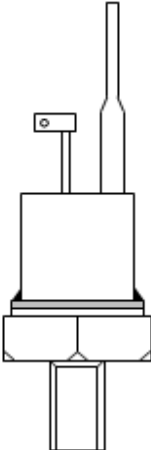
Рисунок	Найменування операції	Параметри	Режими	Матеріали
	Паяння п/п елементу до підстави (електропіч конвекційна водородна ВСКМ – 1.36 0.7/9 x15)		I-III зони 350 °C IV – VIII зони 320 °C IX зона 300 °C V стрічки = 11-13 см/хв. Точка роси H <sub>2</sub> ≤ -60 °C N <sub>2</sub> ≤ -50 °C	Припій ПР-1.5 ПОССУ 61-0.5  Водень технічний А азот газоподібний
	Паяння флюсу на печі ОМ 1037.0000		Т паяння = (230±10)°C Промивка Т <sub>води</sub> = (60-80) °C t = 10-15 хв.  Сушка Т = (110±10) °C t = 15-20 хв.	Припій ПР-1.5 ПОССУ 61-0.5  Н <sub>2</sub> О ρ ≥ 18 МОм
	Герметизація 1. Одягання корпусу  2. Конденсаторна зварка (напівавтомат зварювальний ПРК-4001 ПРК-12001 МТК-8002)  3. Обтиск штенгеля (пресс К2114; К2318; КД2114А; КД2322Э; К100)  4. Проварювання штенгеля силового виводу (машина точкової зварки МТ-1222; МТ6-4002; МТ-1613; МТ-1213)  5. Обтиск штенгеля виводу, що управляє (прес К-100)			

Продовження таблиці 2.9

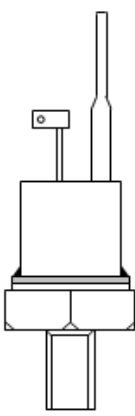
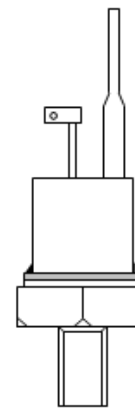
Рисунок	Найменування операції	Параметри	Режими	Матеріали
	<p>6. Обрізання управляючого виводу,</p> <p>7. Проварювання штенгеля управляючого виводу (машина зварювальна МТ-1222У4; МТ1613; МТ-1213)</p> <p>8. Відсічення штенгеля силового виводу і пробивка отвору (прес К2114; К2318; КД2114А)</p> <p>9. Пріварка пелюсток (зварювальний стіл СС-1; СС-7; ССП-5; машина зварювальна ТКМ-7)</p> <p>10. Зачистка задирок (обдирно-шліфувальний верстат 36694)</p>			
	<p>11. Перевірка ВАХ (установка перевірки силового управляючого кола КС 394.0000)</p> <p>12. Перевірка на герметичність (установка перевірки герметичності ОП.1180.00.00)</p>	$U_{пр} - 300 \text{ В}$ $U_{зв.} - 300 \text{ В}$ $I_{випт} \leq 5 \text{ мА}$	$T = (120 \pm 5) \text{ } ^\circ\text{C}$ $t = 1 \text{ хв.}$ промивання $T = (70 \pm 10) \text{ } ^\circ\text{C}$ $t \geq 1 \text{ хв.}$ Сушка $T = (125 \pm 5) \text{ } ^\circ\text{C}$ $t = 30 \text{ хв.}$	Гліцерин $\text{H}_2\text{O}$



Продовження таблиці 2.9

Рисунок	Найменування операції	Параметри	Режими	Матеріали
	Нікелювання приладів			
	1. Монтаж виводів			дріт мідний $\varnothing$ 0.3 – 0.5 мм
	2. Знежирення приладів хімічне	$h_{Ni} = 9$ мкм	$T = (80 \pm 10) ^\circ C$ $t = 7 - 10$ хв.	$Na_3PO_4$ 25-30 г/л $Na_2CO_3$ - 20-25 г/л NaOH- 25-30 г/л
	3. Промивання приладів (ванна ОМ 1377.0000)		$T = (60 \pm 10) ^\circ C$ занурення 5-6 разів	$H_2O$ $\rho \geq 2$ МОм
	4. Знежирення приладів електрохімічне (ванна ОМ 1377.0000)		$T = (80 \pm 10) ^\circ C$ $t = 7 - 10$ хв.	$Na_3PO_4$ 25-30 г/л $Na_2CO_3$ - 20-25 г/л скло рідке натрієве 5-10 г/л речовина допоміжний 3-5 г/л $H_2O$ $\rho \geq 2$ МОм
	5. Промивання приладів (ванна ОМ 1377.0000)		$T = (60 \pm 10) ^\circ C$ занурення 5-6 разів до нейтралізації реакції у холодній $H_2O$	Питна $H_2O$
	6. Декопіювання (Шафа витяжна Ш2-НЖ)		$T = (15 \pm 25) ^\circ C$ $t = 2-5$ хв.	HCl
	7. Хімічна активація (Шафа витяжна Ш2-НЖ)		$T = (15 \pm 25) ^\circ C$ $t = 5-10$ сек	$H_2SO_4$ – 25-50 г/л HCl – 25-50 г/л
8. Промивання приладів (Шафа витяжна Ш2-НЖ)			Питна $H_2O$ $H_2O \rho \geq 2$ МОм	

Продовження таблиці 2.9

Рисунок	Найменування операції	Параметри	Режими	Матеріали
	9. Нікелювання (ванна НО. 1957)		$D_k = 4-4.5 \text{ А/дм}^2$ $T = (65 \pm 60) \text{ }^\circ\text{C}$ $t = 8-10 \text{ хв.}$	$\text{NiSO}_4 - 250-300 \text{ г/л}$ $\text{NiCl}_2 - 80-100 \text{ г/л}$ $\text{H}_3\text{BO}_3 - 30-40 \text{ г/л}$ сахарин – 0.5 г/л водний розчин 1,4 бутандіола - 0.2 мл/л (Ph – 3.5 – 4)
	10. Демонтаж		Промити до нейтра- лізації реакції Сушка: $T = (100 \pm 110) \text{ }^\circ\text{C}$	$\text{H}_2\text{O}$ питна
	Лудіння штенгелей силових виводів, що управляють		$T = (120 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ $t = 1 \text{ хв.}$ Промивання $T = (70 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$ $t \geq 1 \text{ хв.}$ Сушка $T = (125 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$	Глицерин  $\text{H}_2\text{O}$
	2. Лудіння (робоче місце лудильника ЗНП. 996.000)		$T = (280 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$ витримати $t \leq 3 \text{ с}$  Промивання $T = (280 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$ $t = 3 - 5 \text{ хв.}$ Сушка $T = (110 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$ $t = 20-35 \text{ хв.}$	Припій ПОСУ 61-05 флюс безкислотный $\text{ZnCl}_2 - 400 \text{ г}$ $\text{NH}_4\text{Cl} - 100 \text{ г}$ глицерин – 54 г
	Витримка приладів 3 доби			
	Випробування 1. Перевірка зовнішнього вигляду (стіл робочий КС- 4100.00)			
	2. Визначення макси- мально допустимого струму, який діє, у від- критому стані і вимір імпульсної напруги у відкритому стані (УППІ – 4.94.2)			
	3. Перевірка проміжної напруги у відкритому стані (УППІ 4.94.4)			
	4. Визначення класу (УПКСТ – 94-2)			

Вдосконалена технологія виготовлення силового тиристора з термодинамічною стійкістю на 2800 В та 1000 А відповідає технологічним процесам виробництва силових напівпровідникових приладів, а також методам контролю, які використовуються при виготовленні напівпровідникових приладів.

### 3 Охорона праці та техногенна безпека

#### 3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Приміщення, в якому знаходиться робоче місце при розробці технології виготовлення силового тиристора, має такі характеристики: довжина приміщення 6.5 м; ширина приміщення 3.7 м; висота приміщення 3.5 м; число вікон 2; число робочих місць 3; освітлення природне (через бічні вікна) і загальне штучне.

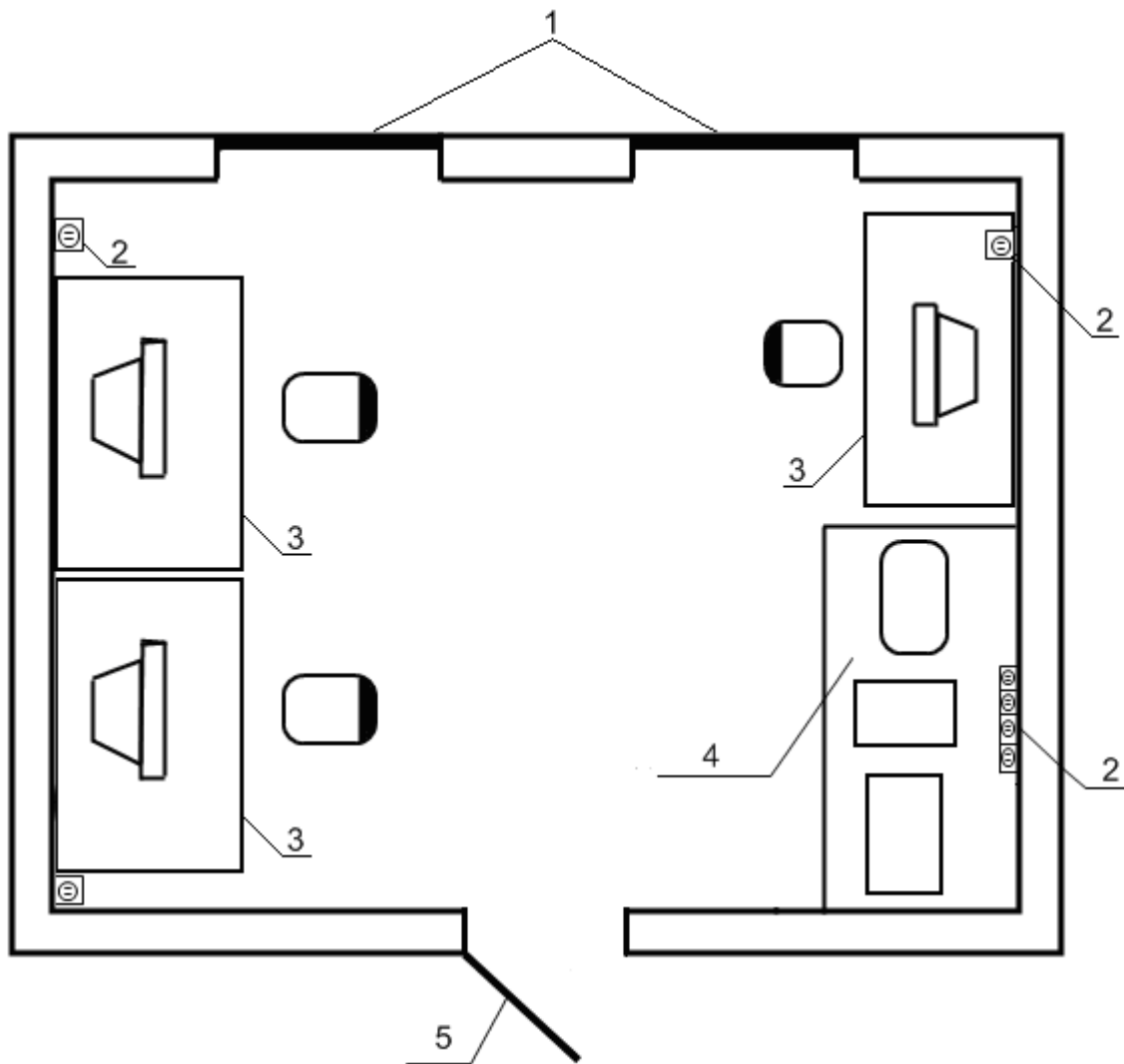
На рисунку 3.1 наведено план розташування робочих місць. На робочому місці розробник піддається впливу наступних несприятливих факторів [8]:

- недостатнє освітлення;
- шум від працюючих машин (комп'ютерів, робочих стендів) На даному робочому місці шум непостійний. Джерелом шуму є робочі стенди. Шум діє на робітника протягом 5 годин;
- електромагнітне випромінювання;
- виділення надлишків теплоти;
- підвищена запиленість.

Розвитку стомлюваності на робочому місці сприяють такі чинники [9]:

- неправильна ергономічна організація робочого місця, нераціональні зони розміщення обладнання по висоті від підлоги, по фронту від осі симетрії;
- характер протікання праці. Трудовий процес організований таким чином, що розробник змушений з перших хвилин робочого дня вирішувати

найбільш складні і трудомісткі задачі, у той час як у перші хвилини роботи функціональна рухливість нервових клітин мозку низька.



- 1 – вікна;
- 2 – розетка;
- 3 – робоче місце;
- 4 – місце для стендів;
- 5 – двері

Рисунок 3.1 – План розташування робочих місць

Важливе значення має чергування праці та відпочинку, зміна одних форм роботи іншими.

Джерела небезпечних та шкідливих чинників на інженера – електронщика [9]:

- рівень шуму в приміщенні протягом робочого дня непостійний. При цьому протягом однієї години діє шум з рівнем звуку 83 дБА, протягом наступних двох годинників  $\frac{3}{4}$  з рівнем звуку 86 дБА, останню годину  $\frac{3}{4}$  81 дБА при тому що норматив повинен бути не більше 70 дБА. Отже, робоче місце по показнику рівня шуму відноситься до класу умов праці 3.2 – шкідливий.

- основним джерелом електромагнітного випромінювання приміщення є персональні комп'ютери.

### 3.2 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів

До засобів захисту відносяться: вентиляція, штучне освітлення, звукоізоляція. Існують нормативи, що визначають комфортні умови і гранично допустимі норми запиленості, температури повітря, шуму, освітленості. У системі заходів, що забезпечують сприятливі умови праці, велике місце відводиться естетичним чинникам: оформлення виробничого інтер'єру, обладнання, застосування музики та інші, які мають певний вплив на організм людини. Важливу роль відіграє забарвлення приміщень, яка повинна бути світлою. З метою запобігання або зменшення впливу на працюючих шкідливих і небезпечних виробничих чинників застосовують засоби колективного та індивідуального захисту.

Засоби колективного захисту [9].

1. Нормалізації повітряного середовища виробничих приміщень і робочих місць (вентиляція, кондиціонування, опалення, автоматичний контроль і сигналізація).

2. Нормалізації освітлення виробничих приміщень і робочих місць (джерела світла, освітлювальні прилади, світлозахисне обладнання, світлофільтри). При недоліку природного освітлення необхідно буде користуватися

штучним. Як джерела світла при штучному освітленні рекомендується застосовувати переважно люмінесцентні лампи типу ЛБ.

3. Захисту від іонізуючих, інфрачервоних, ультрафіолетових, електромагнітних, лазерних, магнітних та електричних полів (огороження, герметизація, знаки безпеки, автоматичний контроль і сигналізація, дистанційне керування тощо).

4. Захисту від шуму, вібрації (огороження, звукоізоляція, віброізоляція). Для зменшення рівня шуму, який перевищує норму в лабораторному приміщенні можна застосовувати оздоблювальні матеріали з шумопоглинаючим ефектом.

5. Захисту від ураження електричним струмом (різні види огороження, захисне заземлення, автоматичне відключення, дистанційне керування).

6. Забезпечення недоступності струмоведучих частин досягається ізолюванням струмопровідних кабелів і проводів.

7. Захисту від дії механічних факторів (огороження, автоматичний контроль і сигналізація, знаки безпеки).

8. Захисту від хімічних факторів (огороження, герметизація, вентиляція та очищення повітря, дистанційне керування, знаки безпеки).

9. Захисту від високих і низьких температур навколишнього середовища (огороження, автоматичний контроль і сигналізація, термоізоляція, дистанційне керування).

### 3.3 Виробнича санітарія

Оскільки у приміщенні присутнє лабораторне устаткування, комп'ютери, шафи та робоча документація, то спостерігається деяка запиленість. За нормою запиленість в приміщенні не повинна перевищувати  $4 \text{ мг/м}^3$ , а в даному приміщенні вона складає  $4,5 \text{ мг/м}^3$ .

Для запобігання дещо підвищеної запиленості рекомендується встановлювати пиловловлювачі, витяжні пристрої, а також проводити вологе при-

бирання лабораторного приміщення, а перед початком і після кожної академічної години навчальних занять, до і після кожного заняття провітрювати приміщення, що забезпечить поліпшення якісного складу повітря.

Раціональне колірне оформлення приміщення направлено на поліпшення санітарно-гігієнічних умов праці, підвищення її продуктивності та безпеки. Забарвлення приміщень впливає на нервову систему людини, його настрої і в кінцевому рахунку на продуктивність праці. Основні виробничі приміщення доцільно офарблювати відповідно до кольору технічних засобів. Освітлення приміщення і устаткування має бути м'яким, без блиску.

Зниження шуму, створюваного на робочих місцях лабораторного приміщення внутрішніми джерелами, а також шуму проникаючого зовні, є дуже важливим завданням. Зниження шуму в джерелі випромінювання можна забезпечити застосуванням пружних прокладок між підставою приладу і опорною поверхнею. Як прокладки використовуються гума, повсть, пробка, різної конструкції амортизатори. Під настільні шумливі апарати можна підкладати м'які килимки з синтетичних матеріалів, а під ніжки столів, на яких вони встановлені, - прокладки з м'якої гуми, повсті, завтовшки 6 - 8 мм. Кріплення прокладок можливе шляхом приклеювання їх до опорних частин [10].

Таким чином, для зниження шуму, створюваного на робочих місцях внутрішніми джерелами, а також шуму, що проникає з зовні необхідно: послабити шум самих джерел (застосування екранів, звукоізолюючих кожухів);

- знизити ефект сумарної дії відбитих звукових хвиль (звукопоглинаючі поверхні конструкцій);
- застосовувати раціональне розташування обладнання;
- використовувати архітектурно-планувальні і технологічні рішення ізоляцій джерел шуму.

Температура в приміщеннях є одним з провідних чинників, що визначають метеорологічні умови виробничого середовища. Високі температури надають негативну дію на здоров'я людини. Робота в умовах високої темпе-



ратури супроводжується інтенсивним потовиділенням, що приводить до обезводнення організму, втрати мінеральних солей і водорозчинних вітамінів, викликає серйозні і стійкі зміни в діяльності серцево-судинної системи, збільшує частоту дихання [10].

При низькій температурі висока відносна вологість збільшує тепловтрати організму в результаті інтенсивного поглинання водяними парами енергії випромінювання людини. Це веде до переохолодження організму – гіпотермії. Низька вологість викликає пересихання слизових оболонок дихальних шляхів.

В приміщенні нормована температура повітря повинна складати в теплий період 22-24°C (в холодний період 21-23°C), відносна вологість 40-60 %, швидкість руху повітря 0,1-0,2 м/с.

Фактичні параметри: температура – 18-24 °C, відносна вологість 45-60%, швидкість руху повітря 0,15-0,2 м/с.

У приміщеннях, обладнаних ПЕВМ, повинна проводитися щоденне, вологе прибирання і систематичне провітрювання після кожної години роботи на ПЕВМ. Рівні позитивних і негативних аероіонів в повітрі приміщень, де розташовані ПЕВМ, повинні відповідати санітарно-епідеміологічним нормативам, що діють.

Світло є природною умовою життя людини, необхідною для збереження здоров'я і високої продуктивності праці, і заснованим на роботі зорового аналізатора. Недостатнє освітлення робочого місця утрудняє тривалу роботу, викликає підвищене стомлення і сприяє розвитку короткозорості. Дуже низькі рівні освітленості викликають апатію, сонливість, а в деяких випадках сприяють розвитку відчуття тривоги. Таким чином буде доцільно зробити розрахунок фактичної освітленості приміщення [10].

Для освітленості приміщення з розмірами  $A = 6,5$  м,  $B = 3,7$  м та виствою  $H = 3,5$  м використовуються 2 світильники ОДР з двома люмінесцентними лампами типу ЛБ - 40. Коефіцієнти віддзеркалення світлового потоку від стелі, стін і підлоги відповідно рівні  $p_{nom} = 70\%$ ,  $p_{cm} = 50\%$ ,

$p_{\text{пола}} = 10\%$ . Затінювання робочих місць немає. Висота зв'язу світильника  $h_c = 0$ , висота робочої поверхні над рівнем підлоги  $h_p = 0.8$  м.

Нормативна величина освітленості для відеоплейних терміналів складає  $E_n = 400$  лк.

При перевірці відповідності освітленості в приміщенні нормативному рівню, коли відома кількість світильників, ламп, їх тип і потужність. фактичну освітленість в приміщенні визначаємо по формулі:

$$E_{\phi} = \frac{N \cdot F \cdot n \cdot \eta}{S \cdot z \cdot k_z}, \text{ (лк)} \quad (3.1)$$

де  $N = 2$  – число світильників, шт.;  $F = 3120$  лм – світловий потік лампи;  $n = 2$  – число ламп в світильнику;  $S$  - площа освітлюваного приміщення;  $z = 1,1$  – коефіцієнт нерівномірності освітлення для люмінесцентних ламп (відношення  $E_{\text{ср}} / E_{\text{мин}}$ );  $k_z = 1,5$  – коефіцієнт запас, що враховує зниження освітленості із-за забруднення і старіння лампи;  $\eta$  – коефіцієнт використання освітлювальної установки.

Для визначення  $\eta$  необхідно знати тип світильника, індекс приміщення і коефіцієнт віддзеркалення світлового потоку від стелі, стін і підлоги. Оскільки тип світильника і коефіцієнти віддзеркалення світлового потоку відомі, то для знаходження  $\eta$  необхідно визначити значення індексу приміщення  $i$ .

$$i = \frac{A \cdot B}{h_n \cdot (A + B)} \quad (3.2)$$

де  $A$  і  $B$  - відповідно довжина і ширина приміщення в м;

$h_n$  - висота від робочої поверхні до світильника, визначається висотою приміщення ( $H$ , м) і висотою умовної робочої поверхні ( $h_p = 0.8$  м) по формулі:

$$h_n = H - h_c - h_p = 3.5 - 0 - 0.8 = 2.7 \text{ (м)} \quad (3.3)$$

Підставляємо набуте значення у формулу (3.2) і знаходимо індекс приміщення:

$$i = \frac{6.5 \cdot 3.7}{2.7 \cdot (65 + 3.7)} = \frac{24.05}{27.54} = 0.87$$

Підставляємо всі знайдені величини в формулу (3.1):

$$E_{\phi} = \frac{2 \cdot 3120 \cdot 2 \cdot 0.89}{6.5 \cdot 3.7 \cdot 1.1 \cdot 1.5} = \frac{11107.2}{39.6825} = 279.9, \text{ (лк)}$$

Оскільки отримана величина  $E_{\phi} < E_n$  для досягнення нормативної освітленості необхідно або збільшити кількість світильників, або збільшити потужність ламп. Порахуємо міру збільшення  $W$ :

$$W = \frac{E_n}{E_{\phi}} = \frac{400}{279.9} = 1.42 \text{ разів}$$

Тепер можна обчислити необхідну кількість світильників:

$$N_1 = N \cdot W = 2 \cdot 1.43 = 2.84 \text{ шт.}$$

Збільшимо кількість світильників до 3 штук. Тоді

$$E_{\phi} = \frac{5 \cdot 3120 \cdot 2 \cdot 0.89}{6.5 \cdot 3.7 \cdot 1.1 \cdot 1.5} = \frac{27768}{39.6825} = 699.7, \text{ (лк)}$$

Таким чином, при збільшенні кількості світильників на три штуки фактична освітленість  $E_{\phi}$  практично відповідає нормативному значенню освітленості  $E_n = 400$  лк.

Такий же ефект може бути отриманий при заміні лампи з великим світловим потоком. Порахуємо необхідний світловий потік лампи:

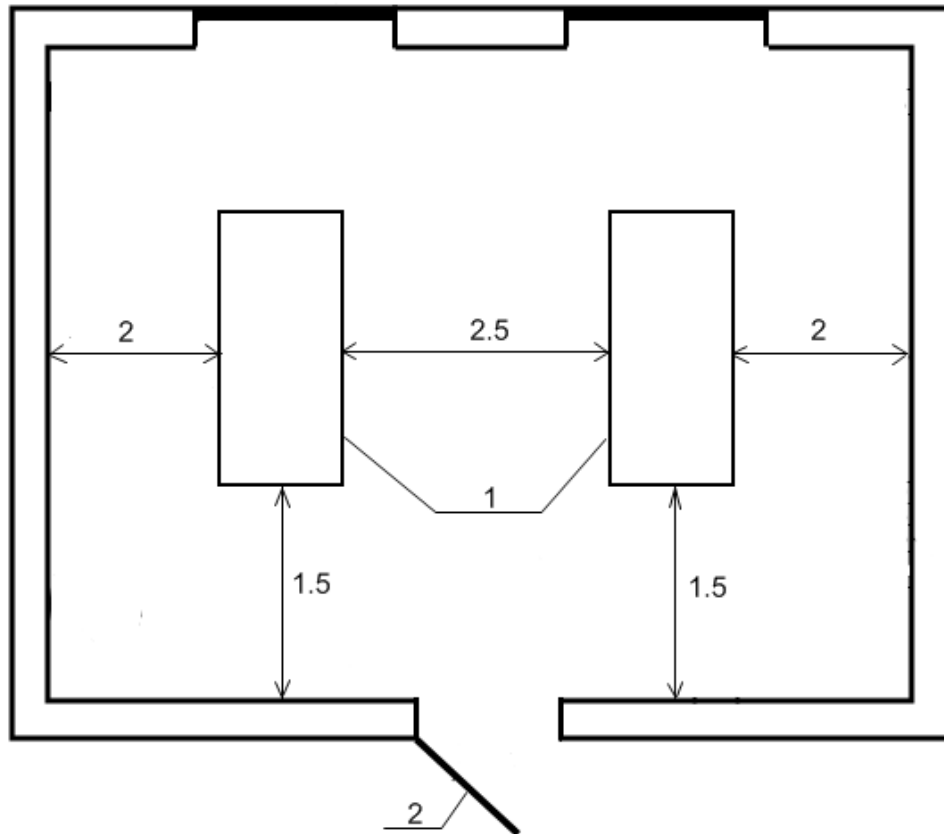
$$F_1 = F \cdot W = 3120 \cdot 1.42 = 4430.4, \text{ (лм)}$$

Так, якщо всі лампи типа ЛБ-40 в приміщенні замінити на лампи типа ЛТБ-65 з  $F=3980$  лм  $E_{\phi}$  буде рівне:

$$E_{\phi} = \frac{2 \cdot 3980 \cdot 2 \cdot 0.89}{6.5 \cdot 3.7 \cdot 1.1 \cdot 1.5} = \frac{14168.8}{39.6825} = 357, \text{ (лк)}$$

Таким чином, в цьому випадку фактична освітленість також практично відповідатиме нормативному значенню.

На рисунку 3.2 представлена схема розташування двох світильників, в кожному з яких знаходиться по дві лампи типу ЛТБ-65.



1 – світильник;

2 – двері

Рисунок 3.2 – План розташування світильників в лабораторному приміщенні

### 3.4 Електробезпека

Електричні установки, до яких відноситься практично все обладнання ЕОМ, представляють для людини велику потенційну небезпеку, тому що в процесі експлуатації або проведенні профілактичних робіт людина може торкнутися частин, що знаходяться під напругою. Специфічна небезпека електроустановок: струмоведучі провідники, корпуси стійок ЕОМ і іншого устаткування, що опинилося під напругою в результаті пошкодження (пробою) ізоляції, не подають будь-яких сигналів, які попереджають людину про небезпеку.

зпеку. Реакція людини на електричний струм виникає лише при протіканні останнього через тіло людини. Виключно важливе значення для запобігання електротравматизма має правильна організація обслуговування діючих електроустановок, проведення ремонтних, монтажних і профілактичних робіт. При цьому під правильною організацією розуміється строге виконання ряду організаційних і технічних заходів і засобів, встановлених діючими "Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів і правила техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів" (ПТЕ і ПТБ споживачів) і "Правила установки електроустановок" (ПУЕ) Залежно від категорії приміщення необхідно вжити певних заходів, що забезпечують достатню електробезпеку при експлуатації і ремонті електроустановок. Так, в приміщеннях з підвищеною небезпекою електроінструменти, переносні світильники повинні бути виконані з подвійною ізоляцією або напруга живлення їх не повинна перевищувати 42 В. В особливо небезпечних приміщеннях напруга живлення переносних світильників не повинна перевищувати 12 В [10].

Щоб захистити людину від ураження електричним струмом, захисне заземлення має задовольняти ряду вимог, викладених у ПУЕ і ДСТУ 12.1.030 - 81 "ССБТ. Електробезпека. Захисне заземлення. Занулення ». Ці вимоги залежать від напруги електроустановок та потужності джерела живлення. В електроустановках змінного струму напругою до 1000 В у мережі з ізолюваною нейтраллю або ізолюваним виводом джерела однофазного струму опір заземлювального пристрою не повинен перевищувати 4 Ом.

Важливо відзначити, що якщо занулений корпус одночасно заземлений, то це тільки покращує умови безпеки, тому що забезпечує додаткове заземлення нульового захисного дроту.

### 3.5 Пожежна безпека. Техногенна безпека

Виробництво напівпровідникових приладів, згідно ДБН В.1.1–7–2002, відноситься до категорії Б, оскільки це виробництво зв'язане із застосуванням речовин спирту і ацетону з температурою спалаху пари від 28 до 60°C горючих газів. Для зниження пожежної небезпеки використовують обмежену кількість матеріалів які обертаються в процесі, зберігаються, здатні горіти.

Характерними причинами виникнення пожеж в лабораторії є необережне поводження з вогнем, порушення технологічних процесів, неправильні електропроводки і устаткування, неправильне користування електричними приладами і ін. Для лабораторії встановлена категорія пожежної небезпеки В.

Основні будівельні конструкції будівлі, в якій знаходиться ділянка, виконані з тих, що не згорають і важко згорають матеріалів, що цегельних і виштукатурюють. Отже, вогнестійкість будівлі має 2 рівень. Для евакуації людей на випадок пожежі, згідно ДБН В.1.1–7–2002, в лабораторії є два евакуаційні виходи, розташованих в протилежних кінцях приміщення ділянки. Ширина дверей і сходів рівна 1,6 м, що відповідає нормі.

Відстань від найбільш видаленого робочого місця до найближчого виходу – 15 м. Швидкість пересування людей при евакуації – 16 м/мін [9].

Згідно правилами влаштування електроустановок ПВЕ, будівля, в якій знаходиться ділянка по заходах захисту від блискавок, відноситься до категорії 3 і захищається від прямих ударів блискавок, і від замету високих потенціалів через землю, тобто підземні металеві комунікації приєднуються при введенні в об'єкт, що захищається, до заземлювачів електроустаткування. Отже, грозозахист заснований на стержневих громовідводах.

Для попередження пожеж на ділянці необхідно створити строгий протипожежний режим. Створюється загально об'єктова і лабораторна інструкція по ПБ, проводиться первинний протипожежний інструктаж на робочому місці; створюється план протипожежних заходів і евакуації людей на випадок пожежі.

Як вогнегасні речовини можна застосовувати воду, вуглекислоту, хімічну і повітряно-механічну піну. Для гасіння вогнищ усередині будівлі на

майданчиках сходових кліток, в коридорах і отворі встановлюють пожежні крани, які розміщені в шафах, де знаходиться і рукав з протипожежним стволом. Для гасіння пожеж електроустановок використовується вуглекислий вогнегасник ОУ-2, в кількості двох вогнегасників на приміщення. Існують пожежна електрична сигналізація, яка забезпечує прямий зв'язок пожежної охорони з охоронним об'єктом. У даній будівлі застосовують звукову систему сигналізації. При появі сигналу сповіщення про пожежу співробітники лабораторії № 216 організовано без паніки покидають лабораторію і, залежно від місця спалаху, слідує або вліво через лабораторний корпус для виходу на вулицю Добролюбова, або управо для виходу на вулицю 40 років Радянської України (рис. 3.3).

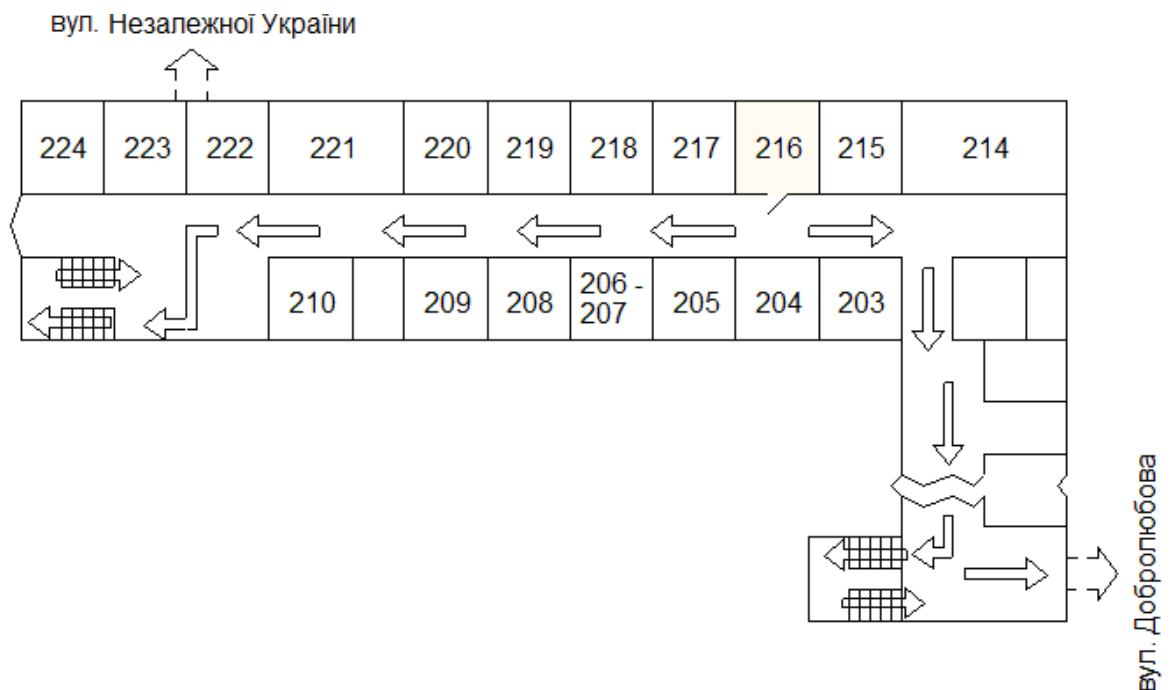


Рисунок 3.3 – План евакуації при пожежі із аудиторії № 216

## Висновки та рекомендації

1. Вдосконалено технологічний процес механічної обробки кремнієвих пластин. основним способом механічної обробки обрані технології з використанням абразивів як в зв'язаному стані (алмазні диски і шліфувальні апарати), так і у вільному (абразивні суспензії і алмазні пасти)..

2. Вдосконалено технологічні процеси: дифузії бора і перша фотолітографія для формування р-області з сторони нижнього електрода; дифузії бора і фосфору і друга фотолітографія для формування р- і n<sup>+</sup>-області з сторони управляючого електрода.

3. Вдосконалено технологічний процес формування структури і конструкції тиристора. Обрана конструкція тиристора штирового типу.

Результати розробки рекомендовано для впровадження у навчальний процес при вивченні дисципліни «Технології мікро- та наносистемної техніки».



## Перелік посилань

1. Андрущак Г.О., Козярьський І.П., Майструк Е.В. Промислова електроніка: навчальний посібник. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2021. 120 с.
2. Колонтаєвський .П., Сосков А.Г. Електроніка і мікросхемо техніка: підручник. Київ : Каравела, 2009. 287 с.
3. Бойко В.І. та ін. Схемотехніка електронних систем. Кн. 1. Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої: підручник. Київ : Вища школа, 2004.344 с.
4. Стахів П.Г., Коруд В.І., Гамола О.Є. та ін. Основи електроніки з елементами мікроелектроніки: навчальний посібник. Львів : Магнолія плюс, 2005. 265 с.
5. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка і мікросхемотехніка: теорія і практикум. Навчальний посібник. Київ : Каравела, 2004. 278 с.
6. Павлов С.М., Войцеховська О.В. Технологія мікроелектронних засобів : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2017. 169 с.
7. Дубов Є.В, Лободзінська Р.Ф., Мізерний В.М. Проектування мікросхем та гібридних інтегральних схем. Вінниця : ВДТУ, 2000. 137 с.
8. Кожемякін Г.Б., Рижков В.Г., Белоконь К.В. Охорона праці та техногенна безпека: методичні вказівки до виконання розділу магістерських робіт для студентів ЗДІА всіх спеціальностей денної та заочної форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 48 с.
9. Ткачук К.Н. Охорона праці і довкілля в радіоелектронній промисловості. Київ : Вища шк., 1988. 240 с.
10. Горобець А.І. Степаненко А.І. Охорона праці в радіоелектронній промисловості. Київ : Техніка, 1987. 345 с.