

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 швидковідновлюючих діодів

Виконав: студент (ка) IV курсу, групи 6.1539-з

Ремиза В. М.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Напряму підготовки _____
(шифр)

Спеціальності 153

Мікро- та наносистемна техніка

(назва)

Керівник доцент, доцент, к.т.н.

Небеснюк О.Ю.

(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

Ремигі Валерію Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Вдосконалення технології виготовлення швидковідновлюючих діодів

керівник проекту (роботи) Небеснюк Оксана Юріївна

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

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

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 10 червня 2024 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Пристрої для виміру вольт-амперних характеристик діодів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Дослідження технологічного маршруту виготовлення самовідновлюваних діодів. Технологічний цикл виготовлення швидковідновлюючих діодів. Вдосконалення методу контролю вольтамперних характеристик. Охорона праці та техногенна безпека.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Блок-схема технологічного процесу виробництва швидковідновлюючого діода. Блок-схема установки автоматизованого вимірювання вольт-амперної характеристики діодної структури. Схема перетворення напруга-струм

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
<i>I</i>	<i>Небеснюк О. Ю., доцент</i>	
<i>II</i>	<i>Небеснюк О. Ю., доцент</i>	
<i>III</i>	<i>Небеснюк О. Ю., доцент</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 особливостей діодів з різким відновленням</i>	<i>20.02.2024</i>	
<i>2</i>	<i>Дослідження технологічного процесу дифузії бору</i>	<i>12.03.2024</i>	
<i>3</i>	<i>Дослідження технологічного процесу фотолітографії</i>	<i>22.03.2024</i>	
<i>4</i>	<i>Дослідження методів контролю при виробництві швидковідновлюючих діодів</i>	<i>14.04.2024</i>	
<i>5</i>	<i>Вдосконалення методу контролю вольтамперних характеристик</i>	<i>27.04.2024</i>	
<i>6</i>	<i>Охорона праці та техногенна безпека</i>	<i>18.05.2024</i>	
<i>7</i>	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	<i>02.06.2024</i>	
<i>8</i>	<i>Рецензування, нормоконтроль, підписання роботи</i>	<i>14.06.2024</i>	
<i>9</i>	<i>Оприлюднений захист магістерської роботи</i>	<i>21.06.2024</i>	

Студент _____ Ремиза В. М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ Небеснюк О. Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено _____ Верьовкін Л.Л.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Реферат

Дипломна робота містить 66 сторінок, 27 рисунків, 2 таблиці, 11 джерел літератури.

Об'єкт дослідження – технологічний процес виготовлення швидкодіючих діодів.

Мета роботи: вдосконалення пристрою контролю вольт-амперних характеристик швидкодіючих діодів на технологічних етапах виготовлення.

Завдання роботи – провести аналіз технології виготовлення швидкодіючих діодів з метою визначення точок контролю електричних параметрів; вдосконалити пристрій виміру електричних параметрів напівпровідникових приладів з метою підвищення точності.

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

Короткий виклад результатів досліджень – вдосконалений пристрій для вимірювання вольт-амперних характеристик складається з керуючого модуля на базі мікроконтролера, ЦАП, схеми перетворення напруга-струм і датчика, який вимірює значення напруги і струму зразка та передає їх на ПЕОМ з програмою в середовищі LabVIEW для обробки і візуалізації даних.

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

Прогнозні пропозиції – Рекомендовано подальше вдосконалення пристрою з метою поліпшення автоматизації процесу виміру електричних параметрів напівпровідникових структур

ТЕХНОЛОГІЯ, ОБРОБКА, ДИФУЗІЯ, ФОТОЛІТОГРАФІЯ, ТРАВЛЕННЯ, СТРУКТУРА, ПЛАСТИНА, СТРУМ, НАПРУГА, МІКРОКОНТРОЛЕР, ДАТЧИК

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 технологічного маршруту виготовлення самовідновлюваних діодів	7
1.1 Особливості діодів з різким відновленням	7
1.2 Механічна обробка напівпровідникових матеріалів	10
1.3 Технохімічні процеси підготовки підкладок.....	13
1.4 Технологія фотолітографії	15
1.4 Отримання структур методом дифузії.....	19
1.5 Складання напівпровідникових діодів.....	23
2 Технологічний цикл виготовлення швидковідновлюючих діодів	26
2.1 Механічна обробка Si	27
2.2 Технологічний процес дифузії бору	31
2.3 Технологічний процес окислення	32
2.4 Технологічний процес фотолітографії	33
2.5 Склопасивація	34
2.6 Технологічний процес металізації	37
2.7 Технологічний процес формування структури і конструкції швидковідновлюючого діода	39
2.8 Методи контролю при виробництві швидковідновлюючих діодів ...	41
2.9 Вдосконалення методу контролю вольтамперних характеристик	45
3 Охорона праці та техногенна безпека	51
3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів	51
3.2 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів	54
3.3 Виробнича санітарія	55
3.4 Електробезпека	57

3.5 Пожежна та техногенна безпека	58
3.6 Розрахунок штучного освітлення лабораторного приміщення	60
Висновки та рекомендації	64
Перелік посилань	65

Вступ

Технологія напівпровідникового виробництва базується в наш час на таких складних прецизійних процесах обробки, як фото- і електронолітографія, оксидування, іонно-плазмове розпилювання, іонна імплантація, дифузія, термокомпресія та ін. До матеріалів, використовуваних у виробництві приладів, висувають високі вимоги за чистотою і досконалістю структури. Для здійснення більшості технологічних операцій використовують унікальне за характеристиками устаткування: оптико-механічне, термічне, іонно-променеве. Процеси здійснюються в спеціальних знепилених приміщеннях із заданими вологістю і температурою.

Технологічний маршрут – це послідовність технологічних операцій обробки напівпровідникових пластин, вживаних для виготовлення даного типу НП або ІМС. Документом, що містить опис маршруту, є маршрутна карта. Вона дозволяє судити про переміщення приладу, що виготовляється, по всіх операціях, указує устаткування, матеріали, трудові нормативи і засоби контролю. Проведення кожної технологічної операції регламентується операційною картою, яка містить опис операції із вказанням технологічних режимів виготовлення структури або приладу і технологічного оснащення. Розглянемо приклад технологічного маршруту виготовлення НП або ІМС.

Діод з різким відновленням (ДРВ) – двоелектродний напівпровідниковий прилад на основі р-n- або р-і-n- структур, функціонування якого базується на феномені швидкої зміни опору від дуже низьких до дуже високих значень при напрузі зворотної полярності, поданій відразу після додатка напруги прямої полярності.

Актуальна розробка швидковідновлюючих діодів, призначених для автоматичного обмеження струму в різних перетворювачах електроенергії, в безконтактній комутаційній і регулюючій апаратурі.

1 Дослідження технологічного маршруту виготовлення самовідновлюваних діодів

1.1 Особливості діодів з різким відновленням

Діод постійного струму, також відомий як струмообмежувальний діод, або струморегулюючий діод, або SRD діод (Step recovery diode - діод з різким відновленням), обмежує струм, який протікає через нього до деякого максимального рівня. Діод постійного струму являє собою двохвивідну версію польового транзистора JFET (junction gate field-effect transistor - польовий транзистор з перехідним затвором). Якщо спробувати збільшити струм, який протікає через цей діод, вище його точки регулювання, він буде просто «стримувати» його, збільшуючи падіння напруги. Для схеми на рисунку 1.1 а, графік залежності струму діода від напруги на ньому спочатку піднімається, а потім вирівнюється в точці регулювання струму, як показано на рисунку 1.1 б [1].

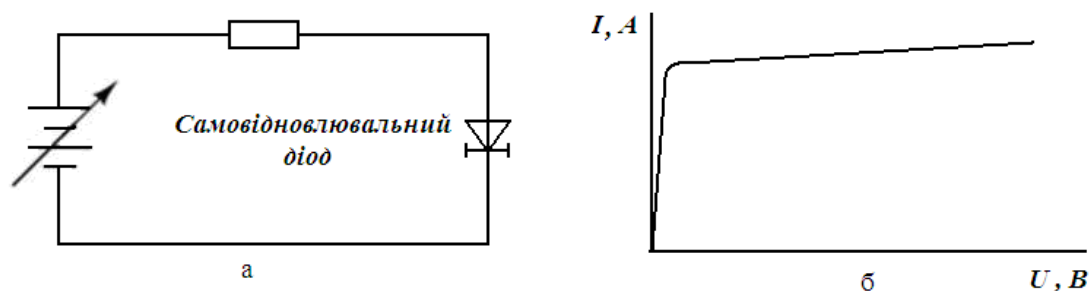


Рисунок 1.1 - Самовідновлювальний діод: а - тестова схема, б - вольт-амперна характеристика

Застосування діодів постійного струму полягає в автоматичному обмеженні струму, який протікає через світлодіод або лазерний діод, в широкому діапазоні напруги живлення, як показано на рисунку 1.2.

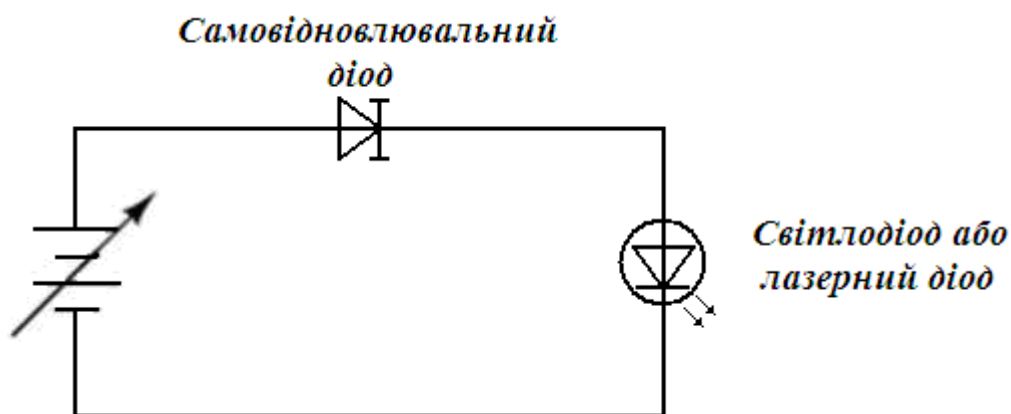


Рисунок 1.2 - Застосування SRD діода (струмообмежувального діода): управління живленням лазерного діода

Звичайно, точка регулювання струмообмежувального (SRD) діода повинна бути обрана так, щоб відповідати оптимальному прямому струму світлодіода або лазерного діода. Це особливо важливо не для світлодіодів, а для лазерних діодів, оскільки звичайні світлодіоди більш терпимі до змін прямого струму.

При подачі пропускну́ї напруги (плюс на аноді (р-область), мінус на катоді (п-область), в діоді протікає струм і накопичуються електрони і дірки, концентрація яких пропорційна струму і часу життя неосновних носіїв заряду.

ДРВ знаходять вживання в пристроях НВЧ електроніки: синтезаторах частот, генераторах, керованих напругою, помножувачах частоти і інших.

Можливе використання таких приладів для загострення фронтів імпульсів, які подаються на вхід електричної схеми. Відновлення зворотного опору ДРВ після розсмоктування неосновних носіїв відбувається істотно швидше, ніж тривалість фронту зміни полярності, унаслідок чого затягнутий фронт вхідного імпульсу коротшає (загострюється). В результаті, форма вихідного імпульсу краще відповідає бажаною прямокутною; при цьому він в цілому зрушується в часі відносно вхідного сигналу.

Після зміни полярності зовнішньої напруги (плюс на катоді, мінус на аноді) ці носії не зникають із структури миттєво, і їх наявність впливає на по-

ведінку приладу. Високий опір, характерний для блокуючої полярності, встановлюється лише після перехідного процесу протікання струму (у зворотному напрямі), обумовленого зустрічним рухом носіїв. Вказаний процес іменується відновленням зворотного опору діода і наводить до переходу останнього з провідного стану в закритий.

Подібна особливість може мати місце в будь-якому діоді, але в ДРВ підбираються відповідний час і інші параметри структури і режиму. Діоди Шоттки функціонувати як ДРВ нездібні, оскільки працюють на основних носіях.

При відповідних рішеннях схемотехніки даний прилад здатний працювати як генератор імпульсів спеціальної форми, особливо коротких вузьких «піків» (рис. 1.3)..

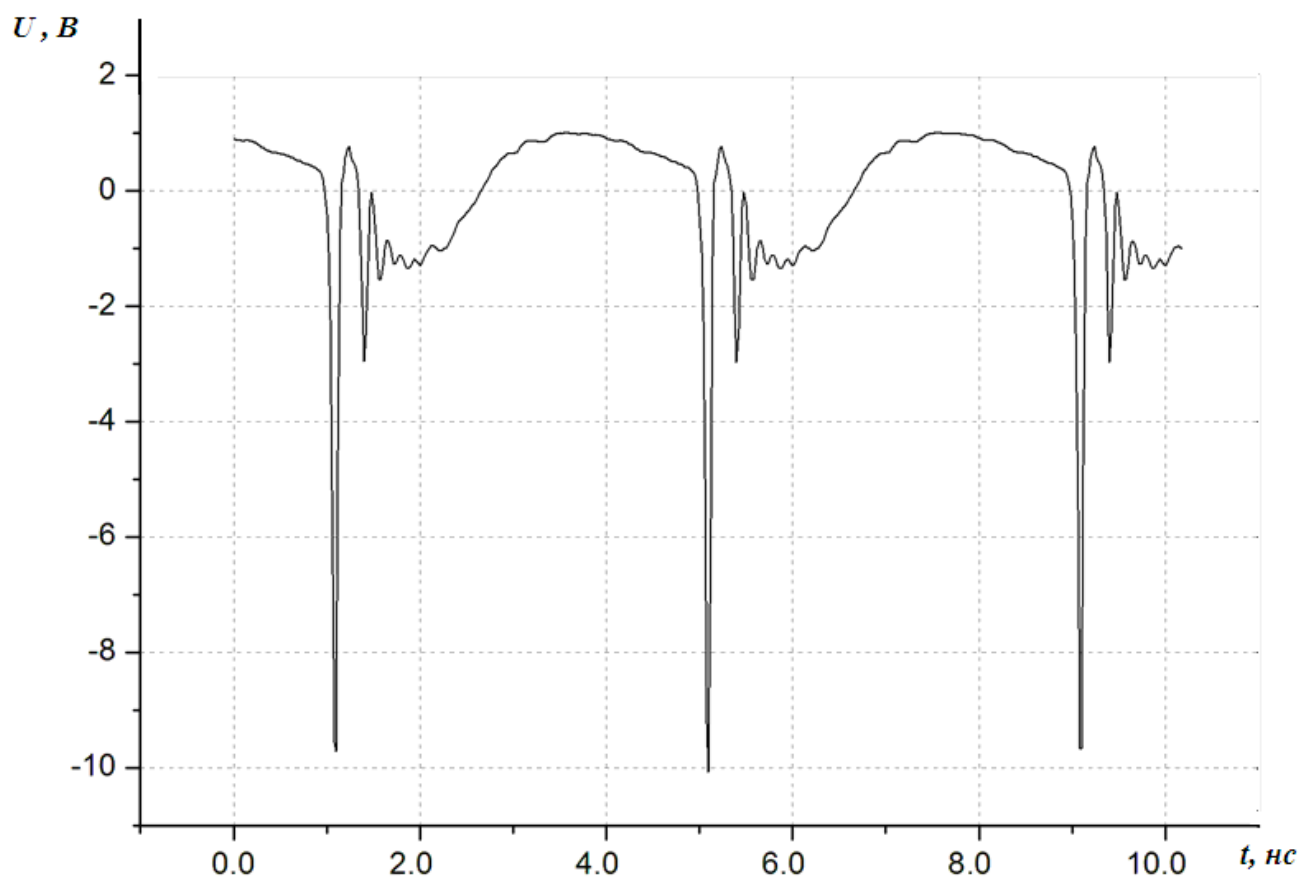


Рисунок 1.3 – Діаграма генератора імпульсів спеціальної форми на основі ДРВ

1.2 Механічна обробка напівпровідникових матеріалів

Для механічної обробки напівпровідникових матеріалів не можуть бути використані звичайні токарні, фрезерні, стругальні і свердлувальні верстати, які широко застосовуються для обробки різних матеріалів. Це пов'язано 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) [2].

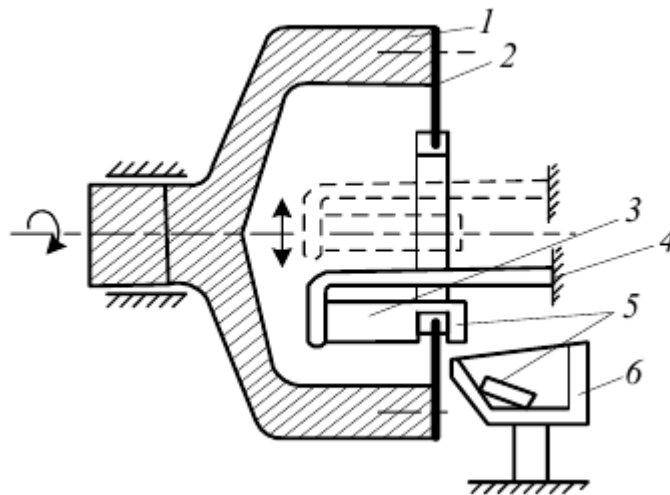
Фізична суть механізму руйнування крихкого напівпровідникового матеріалу при обробці, вільним абразивом полягає в тому, що частинки абразивного матеріалу, вдавлюючись в поверхню оброблюваного напівпровідникового матеріалу, викликають утворення в ній мікротріщин. Ці мікротріщини в процесі обробки збільшуються і розповсюджуються углиб від поверхні. Подальша обробка приводить до створення мережі тріщин, які, змикаючись, викликають сколення окремих ділянок напівпровідникового матеріалу. Частици, що відкололися, 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 напівпровідникових матеріалів; оскільки абразивний порошок знаходиться в рідині в завислому стані і рівномірно розподілений в ній.

Процес різання напівпровідникових злитків на пластини включає розрізання монокристалічного злитка на тонкі (250 - 600 мкм) плоскопаралельні пластини і є початковою операцією в загальному циклі виготовлення напівпровідникових приладів.

Для розрізання монокристалічних злитків на пластини використовують два способи: різання диском з алмазною внутрішньою кромкою; різання металевими полотнами із застосуванням абразиву.

Суть методу різання алмазним диском з внутрішньою ріжучою кромкою полягає в тому, що на шпиндель верстата кріплять алмазний диск і за допомогою спеціальних розтягувальних болтів регулюють його радіальне напруження. Всередину порожнистого шпинделя поміщують утримувач з приклеєним до нього напівпровідниковим злитком. Перед початком весь злиток знаходиться усередині шпинделя, а торцева його частина трохи виступає за кромку площини алмазного диска. При включенні верстата шпиндель із закріпленим на ньому алмазним диском починає обертатися. При повному відрізанні пластини від злитка утримувач відводиться в початкове первинне положення і висувається із шпинделя на довжину, що дорівнює товщині відрізуваної пластини. Після цього процес різання повторюють (рис. 1.4).



1 - шпиндель; 2 - диск з алмазною кромкою; 3 - злиток; 4 - тримач зли-тка; 5 - відрізана пластина; 6 - збірник

Рисунок 1.4 - Схема різання злитка на пластини алмазним диском з внутрішньою ріжучою кромкою

Режим різання вибирають, виходячи з конкретних умов: виду напівп-ровідникового матеріалу, діаметра, товщини відрізуваної пластини, вимог за: класом і чистотою обробки, точністю геометричних розмірів і площинністю та плоскопаралельністю пластини.

Одержані після розрізання злитка напівпровідникові пластини мають ряд порушень, до яких відносяться: наявність механічно порушеного шару, неплоскопаралельність сторін, вигин і великий розкид за товщиною. Тому після проведення процесу різання обов'язковою технологічною операцією є шліфування.

Під процесом шліфування розуміють обробку напівпровідникових пластин на твердих довідних дисках-шліфувальниках абразивними мікропорошками. Шліфувальники зазвичай виготовляють з чавуну, скла, сталі, міді або латуні. Зернистість мікропорошків для шліфування напівпровідникових пластин вибирають від M14 до M5. Процес шліфування дозволяє одержувати 9 - 12-й клас чистоти обробки.

Оброблювані напівпровідникові пластини наклеюють на головку верстата, яка в процесі шліфування обертається навколо своєї осі. Шпіндель шліфувального круга, обертаючись з частотою 15000-18000 об/хв, приходить в контакт з поверхнею пластин. Алмазні зерна шліфувальника, ударяючись з високою швидкістю об пластини, знімають з поверхні напівпровідникового матеріалу мікростружку. Оброблена цим способом напівпровідникова пластинка має специфічний рисунок поверхні, який є сіткою з безлічі пересічних рисок.

Для покращення якості обробки поверхні напівпровідникових пластин і зменшення глибини механічно порушеного шару проводять полірування.

Процес полірування відрізняється від процесу шліфування технологічним режимом, розміром зерна і видом абразиву, а також матеріалом полірувальника. Спільним у цих процесів є вид обробки - одностороння з використанням вільного абразиву.

Процес полірування проводять, як правило, на м'яких полірувальниках, які є жорсткими дисками, обтягнутими м'яким матеріалом: фланеллю, замшею, батистом, фетром, велюром, сукном, шовком і ін. Як абразив використовують мікропорошки (із зернистістю не вище 3 мкм) синтетичного алмазу, оксиду алюмінію, оксиду хрому, діоксиду кремнію або діоксиду цирконію.

Останній етап поліровки має велике значення. Він дає можливість видалити так званий алмазний фон з поверхні напівпровідникових пластин, що виникає на перших двох етапах, і значно зменшити глибину механічно порушеного шару. Останній етап поліровки дозволяє одержати поверхні напівпровідникових пластин з чистотою обробки, що відповідає 13 - 14-му класу.

Електричні параметри готових напівпровідникових приладів істотно залежать від ступеня досконалості поверхні, якості обробки і геометричної форми оброблених напівпровідникових пластин, оскільки недосконалості механічного різання, шліфування і полірування несприятливо позначаються на подальших технологічних процесах: епітаксії, фотолітографії, дифузії і ін. Тому після проведення процесів механічної обробки напівпровідникові пластини піддаються контролю. Оцінювання якості проводять за такими основними критеріями придатності: 1) геометричні розміри і форма напівпровідникових пластин; 2) чистота обробки поверхні пластин; 3) глибина механічно порушеного шару.

1.3 Технохімічні процеси підготовки підкладок

Основними цілями технохімічних процесів підготовки підкладок є: отримання чистої поверхні напівпровідникової пластини; видалення з поверхні напівпровідникової пластини механічно порушеного шару; зняття з напівпровідникової пластини шару початкового матеріалу певної товщини; локальне видалення початкового матеріалу з певних ділянок поверхні підкладки; створення певних електрофізичних властивостей оброблюваної поверхні підкладки; виявлення структурних дефектів кристалічної ґратки початкової підкладки; отримання мезаструктур; осадження гальванічних покриттів [1].

Отримання чистої поверхні напівпровідникових підкладок пов'язане з вимогою неприпустимості будь-яких забруднень при проведенні процесів дифузії, епітаксійного нарощування і ін. Отримання чистої поверхні підкладок пов'язане з великими труднощами і, як правило, досягається прове-

денням комплексу різних технохімічних процесів: промивання у воді, ультразвукове промивання в розчинниках, хімічне або газове травлення і т. п.

Видалення з поверхні підкладки механічно порушеного шару, який утворився в результаті шліфування і полірування з використанням абразивних або алмазних мікропорошків, необхідне для отримання атомарно довершеної структури поверхневого шару, який, у свою чергу, дозволяє створити в підкладці активні структури діода з високими електрофізичними параметрами. Видалення механічно порушеного шару з поверхні підкладок можна здійснювати хімічним і газовим травленням, а також іонноплазмовою і плазмохімічною обробкою.

Зняття з підкладок шару певної товщини проводять для отримання потрібної товщини підкладок, які поступають на подальші технологічні операції. Необхідна товщина підкладок визначається конкретним типом напівпровідникового приладу. Найчастіше для цієї мети використовують хімічне травлення напівпровідникових матеріалів в різних травниках.

Технохімічні процеси дають можливість регулювати і змінювати електрофізичні властивості поверхні оброблюваної напівпровідникової підкладки. До цих властивостей в першу чергу слід віднести зміну поверхневої провідності і швидкості поверхневої рекомбінації. Найефективнішими в цьому випадку є процеси хімічного травлення в різних травниках, іонноплазмової і плазмохімічної обробки [3].

Однією з відповідальних операцій в загальному циклі підготовки підкладок для виготовлення напівпровідникових приладів є операція відмивання, яка складається з двох етапів: знежирення підкладок в органічних розчинниках і промивання в особливо чистій воді.

Знежирення підкладок проводять для видалення органічних фізичних забруднень. Для видалення неполярних органічних забруднень використовують такі розчинники, як толуол, чотирьоххлористий вуглець, фреони, а для видалення полярних органічних забруднень - ацетон, спирти та трихлоретилен. У промисловому виробництві для процесу відмивання підк-

ладки часто використовують різні суміші розчинників, які дозволяють проводити відмивання полярних і неполярних органічних забруднень в одному технологічному циклі знежирення. До таких сумішей відносяться: фреон - хлористий метилен, фреон - ізопропіловий спирт, фреон - ацетон і ін.

Для прискорення процесу знежирення і поліпшення якості відмивання широко використовують ультразвукові ванни.

Процес хімічної обробки напівпровідникових підкладок полягає в розчиненні їх поверхневого шару під дією кислотних або лужних травників. Даний процес є гетерогенним, оскільки взаємодія напівпровідникового матеріалу з травником здійснюється на межі поділу двох різних середовищ: твердого (підкладка) і рідкого (травник). Інша особливість хімічної взаємодії підкладки з травником полягає в тому, що процес травлення підкладки не є рівноважним - об'єм напівпровідникового матеріалу, що видаляється, менший, ніж травника. Надлишок травника і фіксація його температури дозволяють проводити процес хімічної обробки з постійною швидкістю і таким чином точно розрахувати товщину шару напівпровідникового матеріалу, що видаляється.

1.4 Технологія 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 [1].

Суть процесу фотолітографії полягає в тому, що 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) актинічним 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.

«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_2 і Si_3N_4 з метою розкриття «вікон» під дифузію, а також витравлення металевих шарів з метою створення омичних контактів і струмоведучих доріжок складної геометричної форми.

Фоторезистами називають світлочутливі речовини, які змінюють свої властивості, перш за все розчинність, під дією актинічного світла і стійкі до кислотних і лужних травників.

Під актинічним світлом розуміють світлове випромінювання, яке впливає на фоторезист, так, що викликає протікання фотохімічних реакцій і зміну розчинності опромінених ділянок фоторезисту.

Основними критеріями, які необхідно брати до уваги при використанні фоторезистів в технології напівпровідникових приладів, є світлочутливість, роздільна здатність, кислотостійкість, адгезія до підкладки і технологічність.

Для проведення процесів фотолітографії в планарній технології використовують фотошаблони.

Фотошаблон – це плоскопаралельна пластина з прозорого матеріалу, на якій є рисунок, що складається з поєднання прозорих і непрозорих для світла певної довжини хвилі ділянок, які створюють топологію приладу або групи приладів, багато разів повторених в межах робочого поля пластини.

Контактна фотолітографія передбачає процес утворення рисунка на початковій підкладці з фоторезистом. Цей процес включає створення контакту між фотошаблоном і підкладкою, тому і одержав назву контактної фотолітографії.

Технологічний процес контактної фотолітографії подано на рисунку 1.5 і містить такі операції:

- підготовка поверхні початкової підкладки;
- нанесення на підкладку шару фоторезисту;
- перше сушіння фоторезисту – плівкоутворення;
- поєднання рисунка фотошаблону з рисунком на початковій підкладці;
- експонування фоторезисту контактним способом;
- проявлення фоторезисту;
- друге сушіння фоторезисту – полімеризація;
- контроль рельєфу рисунка в плівці фоторезисту;
- травлення підкладки;
- зняття плівки фоторезисту з поверхні підкладки;
- контроль рельєфу рисунка в підкладці.

Підготовка поверхні початкових підкладок здійснює істотний вплив на адгезію фоторезисту до матеріалу підкладки. Чим чистіша поверхня початкової підкладки, тим краще адгезійна здатність фоторезисту. Процес змочування поверхні початкової пластини фоторезистом є основним критерієм і визначальною передумовою для хорошої адгезії. Змочування сильною мірою залежить від стану змочуваної поверхні підкладки, тобто від наявності на ній грязі, пилу, жирових плям, адсорбованих газів, сторонніх домішок і т. п. Видалення перерахованих видів забруднень і особливо відбитків пальців забезпечує чистоту поверхні, поліпшення процесу змочування і, як наслідок, приводить до підвищення адгезійних сил між фоторезистом і підкладкою.

Для нанесення шару фоторезисту на підкладку застосовують різні способи: центрифугування, розпилювання (пульверизація), занурення в розчин фоторезисту, полив і накатування валиком. Ці способи знаходять застосування в різних областях виробництва мікроелектронного приладобудування.

Операція суміщення рисунка фотошаблону з рисунком на початковій пластині в первинному процесі фотолітографії відсутня, оскільки на початковій підкладці ще немає рисунка мікрозображення. Операція поєднання з'яв-

ляється лише в тому випадку, якщо процес фотолітографії повторюється, а рисунок фотошаблону при другій фотолітографії змінюється [2].

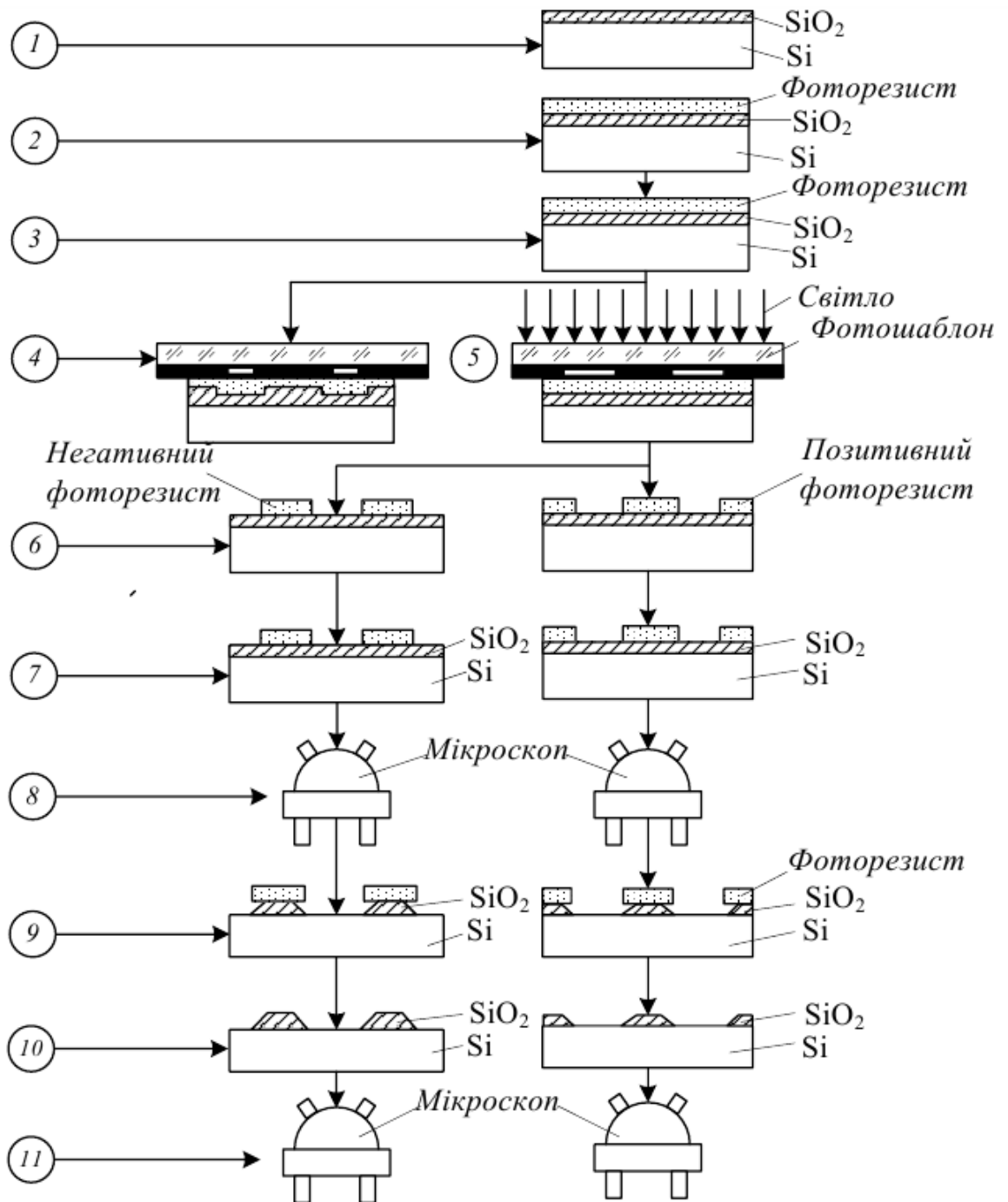


Рисунок 1.5 - Схема процесу контактної фотолітографії

Суть процесу поєднання полягає в тому, щоб рисунок на початковій підкладці, одержаний в процесі першої фотолітографії, сумістити з рисунком на фотошаблоні, який використовується в процесі другої фотолітографії.

Операцію експонування проводять для того, щоб у фоторезисті відбулися фотохімічні реакції, які змінюють початкові властивості фоторезисту.

При контактному експонуванні світло проходить через фотошаблон і потрапляє на шар фоторезисту. Отже, зародження елементів рисунка в плівці фоторезисту буде залежати від оптичної щільності темних і світлих ділянок рисунка фотошаблону, від коефіцієнтів заломлення скляної основи фотошаблону і коефіцієнта віддзеркалення металізованого шару, різкості і рівності краю елемента рисунка на фотошаблоні.

Операція проявлення плівки фоторезисту після її експонування полягає в обробці підкладки з плівкою в спеціальних розчинах з метою видалення з поверхні підкладки певних ділянок плівки фоторезисту: опромінених - для позитивних і неопромінених - для негативних фоторезистів.

Операцію травлення підкладки проводять з метою перенесення зображення рисунка з плівки фоторезисту на підкладку. Перенесення зображення здійснюється методом хімічного травлення локальних ділянок підкладки через відкриті місця в масці, роль якої виконує плівка фоторезисту заданого рельєфу. Процес вибіркового травлення матеріалу підкладки є завершальною стадією формування топології рисунка в циклі фотолітографії.

Операція зняття плівки фоторезисту з поверхні підкладки є завершальною в загальному циклі процесу фотолітографії. Для видалення плівки фоторезисту з поверхні підкладки використовують фізико-хімічні методи, що базуються на попередньому набуханні плівки фоторезисту в розчинниках і кислотах і механічному видаленні набухлого фоторезисту з поверхні підкладки.

1.4 Отримання структур методом дифузії

Дифузія легуючих домішок до напівпровідникових кристалів є основним технологічним методом створення електрично гетерогенних структур при виготовленні різних типів мікроелектронних засобів. Для проведення дифузії напівпровідникову пластину поміщають в нагріту до високої темпе-

ратури кварцову трубу дифузійної печі. Через трубу пропускають пари легуючої домішки, які адсорбуються на поверхні пластини і дифундують в кристалічну ґратку напівпровідника [3].

Особливості дифузії в планарній технології полягають в тому, що домішку вводять в напівпровідникову пластину локально в обмежені захисною маскою вікна, а сам процес здійснюють в дві стадії: попередня загонка потрібної кількості домішки і подальший розгін на необхідну глибину і до необхідного рівня концентрації. Важливими технологічними чинниками є способи проведення дифузії і види дифузантів.

Дифузія домішкових атомів в твердому тілі відбувається внаслідок хаотичного теплового руху у напрямку зменшення їх концентрації. Мікроскопічне переміщення атомів відбувається або за вакансіями, або за міжвузловинами. Дифузія основних легуючих домішок в напівпровідниках здійснюється, як правило, за вакансіями, тоді як інших домішок - за міжвузловинами. У напівпровідниковій технології найбільший інтерес викликають два випадки розподілу домішкових атомів.

1. Якщо дифузія йде із джерела з обмеженим вмістом домішки, що знаходиться в початковий момент в нескінченно тонкому поверхневому шарі, то профіль розподілу концентрації має вигляд

$$C(x,t) = \frac{N}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right), \quad (1.1)$$

де N - щільність атомів домішки під одиницею площі поверхні, незмінна у будь-який момент дифузії, ат/см²; x - глибина, відповідна даній концентрації, см; D - коефіцієнт дифузії домішки, см /с; t - тривалість дифузії, с.

2. Якщо дифузія йде із джерела з постійною поверхневою концентрацією домішкових атомів C_0 , то розподіл має вигляд

$$C(x,t) = C_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}. \quad (1.2)$$

Дифузію проводять в порівняно обмеженому діапазоні температур. Для кремнію, наприклад, цей діапазон 1100 - 1300 °С або з урахуванням процесу

загонки при двостадійній дифузії 1000 - 1300 °С. Нижче за 1000 °С значення коефіцієнтів дифузії дуже малі і глибина дифузії незначна. Вище 1300 °С якість дифузійних шарів незадовільна через порушення поверхні пластин під дією температури. Якщо в ізольований об'єм помістити пластину напівпровідника і домішковий елемент і нагрівати їх до деякої температури, то внаслідок сублімації або випаровування домішкового елементу в об'ємі незабаром встановиться певний парціальний тиск його пари. Молекули пари адсорбуються всіма поверхнями, у тому числі і поверхнею пластини, і при достатньо великій температурі дифундують углиб. У загальному випадку рівноважна концентрація пропорційна тиску пари, тому управління поверхневою концентрацією домішки здійснюють шляхом контролю тиску пари. Якщо рівновага на поверхні досягається за час, менший, ніж тривалість дифузії, то поверхнева концентрація залишається сталою. Тому в більшості випадків розподіл домішки при дифузії з газової фази описується функцією доповнення до інтеграла помилок.

Дифузійні процеси проводять в закритій або відкритій трубі. Термін «відкрита труба» обумовлений тим, що вихідний кінець дифузійної труби сполучається з атмосферою (рис. 1.6, а - в, д). Через нього в зону дифузії завантажують кремнієві пластини 1. Щоб звести до мінімуму забруднення з атмосфери, над виходом труби 2 встановлюють витяжну систему. Вхідний кінець дифузійної труби 3 слугує для введення газу-носія (азоту, аргону або кисню). Термін «закрита труба» відноситься до дифузії в герметизованій ампулі (рис. 1.6, г). Пластини напівпровідника 1 і джерело дифузанта 4 завантажують в кварцову ампулу 6, яку вакуумують, герметизують і поміщають в дифузійну піч 5.

Дифузанта 4 або наносять на поверхню пластини (рис. 1.6, д), або вводять у вигляді пари або газу в газ-носії (рис. 1.6, а). На рисунку 1.6, б показана схема двозонної печі, вживаної в основному для дифузії з твердих джерел дифузанта методом відкритої труби, а на рисунку 1.6, в - схема методу

боксу. В останньому методі пластини і джерело домішки знаходяться в напі-
вгерметичному контейнері в однозонній печі.

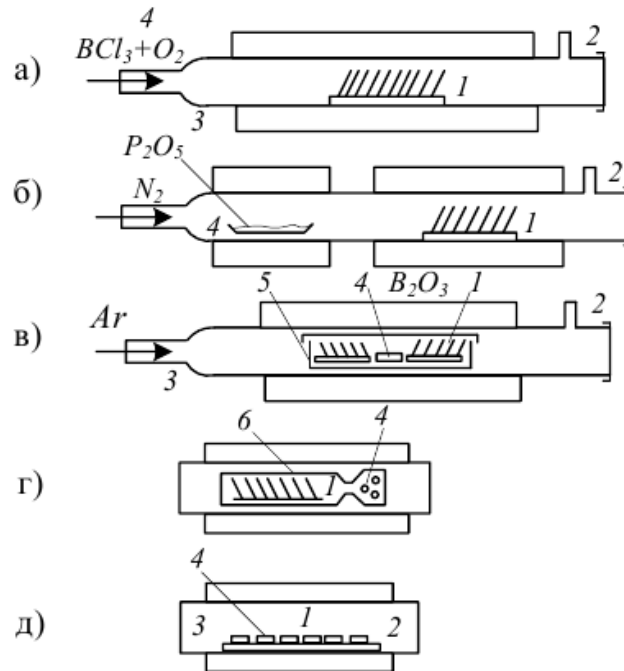


Рисунок 1.6 - Варіанти проведення дифузії

На рисунку 1.7, а представлені температурні залежності коефіцієнтів
дифузії В, Al, Р і As в кремнії. На рис. 1.7, б представлені температурні за-
лежності коефіцієнтів дифузії S, Se, Sri, Mg і Zn в GaAs.

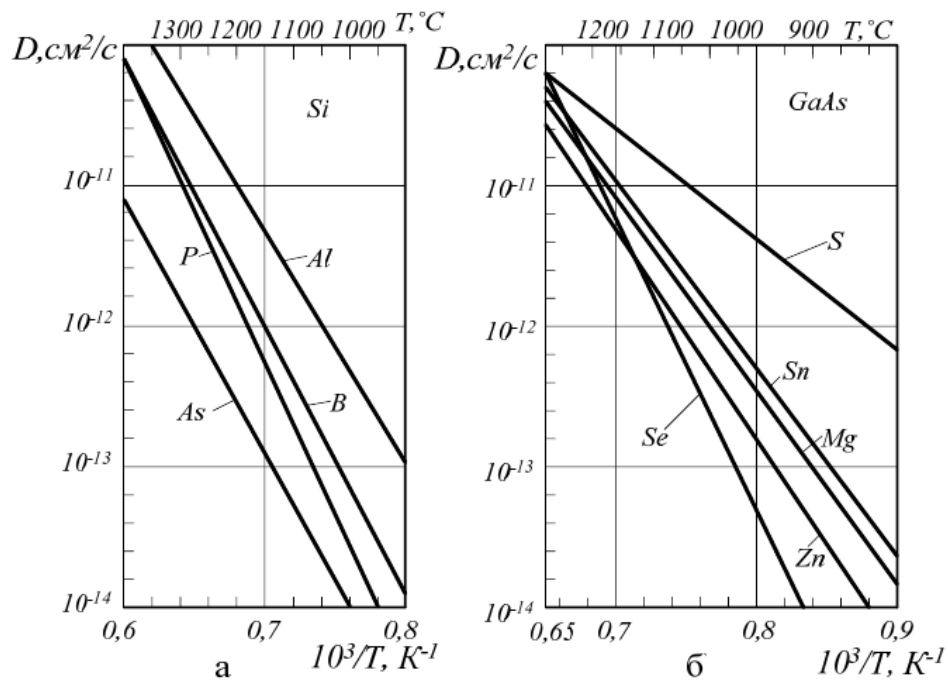


Рисунок 1.7 - Залежність коефіцієнтів дифузії домішок в кремнії (а) і
арсеніді галію (б) від температури

1.5 Складання напівпровідникових діодів

Від якості складальних операцій значною мірою залежать стабільність електричних параметрів і надійність готових виробів.

Етап складання починається після завершення групової обробки напівпровідникових пластин за планерною технологією і розділення їх на окремі елементи (кристали). Ці кристали можуть мати просту (діодну або транзисторну) структуру або містити складну інтегральну мікросхему (з великою кількістю активних і пасивних елементів) і поступати на складання дискретних, гібридних або монолітних композицій [3].

Складність процесу складання полягає в тому, що кожен клас дискретних приладів має свої конструктивні особливості, які потребують цілком певних складальних операцій і режимів їх проведення.

Процес складання містить три основні технологічні операції: приєднання кристала до основи корпусу, приєднання струмоведучих виводів до активних і пасивних елементів напівпровідникового кристала і внутрішніх елементів корпусу, герметизація кристала від зовнішнього середовища.

Приєднання кристала ІМС до основи корпусу проводять за допомогою процесів паяння, припавлення з використанням евтектичних сплавів і приклеювання.

Основною вимогою до операції приєднання кристала є створення з'єднання кристал - основа корпусу, що має високу механічну міцність, хорошу електро- і теплопровідність.

Паяння - процес з'єднання двох різних деталей без їх розплавлення за допомогою третього компоненту - припою. Особливістю процесу паяння є те, що припій при утворенні паяного з'єднання знаходиться в рідкому стані, а з'єднувані деталі - в твердому.

Процес приєднання кристала паянням поділяють на низькотемпературний (до 400 °С) і високотемпературний (вище 400 °С). Як низькотемпературні припої використовують сплави на основі свинцю і олова з добавками (до 2%) сурми або вісмуту. Добавка сурми або вісмуту в олов'яно-свинцевий

припій дозволяє уникнути появи «олов'яної чуми» в готових ІМС при їх експлуатації і тривалому зберіганні. Високотемпературні припої виготовляють на основі срібла (ПСр-45, ПСр-72 та ін.).

В мікроелектронних засобах, у яких розмір контактних площадок складає декілька десятків мікрметрів, процес приєднання виводів є однією з найтрудомісткіших технологічних операцій.

Приєднувати виводи можна як до чистих кристалів напівпровідника, так і до контактних площадок, покритих шаром напиленого золота або алюмінію. При використанні чистих поверхонь кристала збільшується перехідний опір контакту і погіршуються електричні параметри приладів.

Після того, як напівпровідниковий кристал орієнтований і закріплений на основі корпусу і до його контактних площадок приєднані виводи, його необхідно захищати від впливу навколишнього середовища, тобто створювати навколо нього герметичну та механічно міцну оболонку. Така оболонка може бути створена або під'єднанням до основи корпусу спеціальної кришки (балона), яка нагріває напівпровідниковий кристал та ізолює його від навколишнього середовища, або обволіканням основи корпусу, з розташованим на ньому напівпровідниковим кристалом пластмасою, яка також відокремлює кристал від навколишнього середовища. Для герметичного з'єднання основи корпусу з кришкою або балоном (дискретний варіант напівпровідникових приладів) широко використовують паяння, електроконтактне та холодне зварювання, а для герметизації кристала на тримачі - заливання, обволікання і пресування пластмасою.

Паяння застосовують для герметизації як дискретних приладів, так і ІМС. Найбільше використання цей процес знайшов при складанні і герметизації корпусів діодів і транзисторів. Елементи конструкції корпусів містять окремі вузли і блоки, отримані на базі процесів паяння: металу з металом, металу з керамікою і металу зі склом.

Технологічна схема виготовлення напівпровідникових діодів представлена на рисунку 1.8.

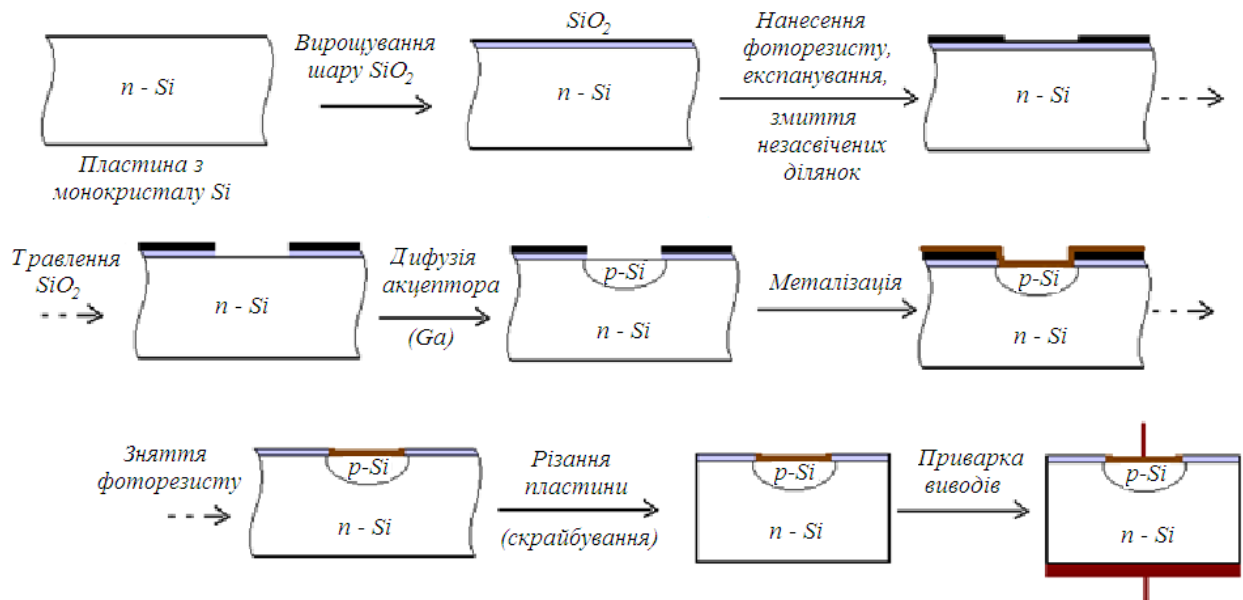


Рисунок 1.8 - Основні етапи технології виготовлення напівпровідникових діодів

Метою роботи являється вдосконалення пристрою контролю вольт-амперних характеристик швидковідновлюючих діодів на технологічних етапах виготовлення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз технології виготовлення швидковідновлюючих діодів з метою визначення точок контролю електричних параметрів;
- вдосконалити пристрій виміру електричних параметрів напівпровідникових приладів з метою підвищення точності.

2 Технологічний цикл виготовлення швидковідновлюючих діодів

Швидковідновлюючі діоди являють собою площинні р-n переходи, виготовлені методом дифузії. Особливості: низька втрата потужності; висока ефективність; низьке пряме падіння напруги; високий струм; швидка комутація; висока можливість перенапруження; висока надійність [4]. Технічні характеристики швидковідновлюючого діода представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики швидковідновлюючого діода

Матеріал:	Si
Тип корпусу:	DO-204
Максимальна постійна зворотна напруга, В:	1000
Максимальна імпульсна зворотна напруга, В:	1200
Максимальний прямий (випрямлений за напівперіод) струм, А:	1
Максимально допустимий прямий імпульсний струм, А:	30
Максимальний зворотний струм, мкА 25гр:	5
Максимальна пряма напруга, В:	1,7
Максимальний час зворотного відновлення, мкс:	0,075
Робоча температура, С:	-50°...+150°

Існує 4 типи кремнію: технічний (дуже велика кількість домішок інших матеріалів), полікристалічний, монокристалічний кремній сонячної якості (для сонячних батарей), монокристалічний кремній електронної якості (найбільш чистий кремній для виготовлення мікросхем. Кількість домішок не більше 0.0000001%). Про відмінності між зазначеними типами кремнію написано в [3].

Спочатку одержують технічний кремній, потім очищуючи його отримують полікристалічний кремній сонячної, або електронної якості. З полікристалічного кремнію вирощують кристали монокристалічного кремнію [5].

Вирощування кристалів монокристалічного кремнію виконують за методом Чохральського. Створення розплаву кремнію у методі Чохральського відбувається за допомогою індукційної плавки, коли резервуар (тигель) з по-

дрібненим полікристалічним кремнієм поміщають у потужне змінне електромагнітне поле, створене котушкою-індуктором. Змінне електромагнітне поле наводить у кремнії вихрові струми, які розігрівають його, що приводить до розплавлення матеріалу. Подібним чином одержують розплави металів.

Злиток монокристалічного кремнію високої чистоти, одержаний шляхом вирощування за методом Чохральського, механічним способом доводять до однакового діаметру по всій довжині та розрізають на тонкі кремнієві пластини (підкладки), діаметр яких дорівнює діаметру злитку (300, або 450 мм), а товщина складає 0,775 мм для 300 мм пластин та 0,925 мм для 450 мм пластин. Процес розрізання кристалу на пластини відбувається за допомогою надтонких (діаметр 100-200 мкм) металічних тросів з абразивним покриттям (мікроскопічними діамантовими крихтами) [].

Після розрізання поверхня пластини покрита мікронерівностями, які згладжуються шляхом шліфування та полірування.

Блок-схема технологічного процесу виробництва швидковідновлюючого діода представлена на рисунку 2.1.

2.1 Механічна обробка Si

Механічна обробка є одним з важливих технологічних процесів. При виготовленні швидковідновлюючого діода має місце наступні операції механічної обробки.

- 1) Шліфування кристалів по утворюючій.
- 2) Відклеювання центруючих накладок.
- 3) Шліфування базового і ортогонального зрізів.
- 5) Травлення монокристалів кремнію.
- 6) Приклеювання графітової накладки.
- 7) Різання монокристалів на пластини.
- 8) Очищення пластин.
- 9) Контроль.



Рисунок 2.1 - Блок-схема технологічного процесу виробництва швидко-відновлюючого діода

- 10) Двостороннє шліфування.
- 11) Промивання.
- 13) Сушка.
- 14) Контроль.

Напівпровідникові матеріали поступають на ділянку механічної обробки у вигляді злитків (рис. 2.2)



Рисунок 2.2 – Злитки Si і готові пластини

Шліфування монокристалів по утворюючій необхідне для вирівнювання їх бічної поверхні і здобуття надалі пластин рівного діаметру. Ведеться на універсальних або спеціальних круго-шліфувальних верстатах 3А12, 3Б12 або 312М діамантовим шліфувальним кругом. Заздалегідь до торців злитка наклеїчною мастикою наклеюються центри. При шліфуванні злиток охолоджується водою. Після шліфування центруючі накладки відклеюють [4].

Для забезпечення правильної обробки в подальших техпроцесах на злитку формуються базовий і ортогональний зрізи, які зазвичай паралельні одній з кристалографічних площин.

Після цих операцій на поверхні монокристала утворюється порушений шар завглибшки до 250 мкм. Для його зняття кристали піддають операції хімічного травлення.

Для подальшої операції – різання монокристала на пластини, його приклеюють до графітової планки і наклеюють монокристал на облямовування.

Для розділення злитка на пластини застосовується різання діамантовим диском з внутрішньою ріжучою кромкою. Для цього використовується установка Ts-23. Швидкість подачі диска 25-30 мм/хв. Товщина пластин необхідних для виробництва даного приладу $0.39_{-0.03}$ мм. Наступною операцією є відмивання пластин.

Після даних операцій проводиться вибірковий контроль погрішності форми пластин (неплоскосність, непаралельність і товщина). Допустима погрішність 30 мкм. Пластина монокристала після попередніх операцій не володіє необхідними розмірами, формою і глибиною порушеного шару. Для виправлення наявних в пластині дефектів її піддають двосторонній шліфовці. Для цього використовується верстат А1-2. Головною конструктивною особливістю вживаного верстата є планетарний механізм, що забезпечує планетарний рух сепараторів з вкладеними в їх отвори кремнієвими пластинами, між тими, що верхнім і нижнім шліфують. Швидкість обертання плит 40 об/хв. Розмір абразивного зерна на даній операції 18 мкм. Товщина пластин після шліфування $0.27_{-0.03}$ мкм [6].

Далі пластини піддають ультразвукового миття (УЗМ) з метою позбавлення від залишків абразиву і інших забруднюючих матеріалів. Після УЗМ пластини сушаться.

Завершальною операцією механічної обробки є контроль. Контролюється товщина пластини. Так само проводяться візуальний контроль її поверхні. Пластини, що мають подряпини піддають відшліфовці уручну. Пластини, що мають тріщини бракують. Готова пластина (рис. 2.3) поступає на наступний технологічний цикл.

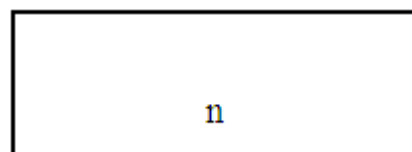


Рисунок 2.3 – Пластина Si n-типу провідності

Швидковідновлюючий діод являє собою площинний р-п перехід, тому наступною операцією технологічного циклу є впровадження домішки р-типу в пластину Si.

2.2 Технологічний процес дифузії бору

Для виготовлення р-п переходів використовується дифузія домішкових атомів, який вводяться в кристалічну решітку для зміни її електрофізичних властивостей.

Спочатку процесу проводиться переддифузійне відмивання. Воно складається з 3-х стадій.

- 1) Обробка в HF і подальша УЗМ.
- 2) Відмивання в розчині $\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O} = 1:1:6$.
- 3) Відмивання в розчині $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O} = 1:1:6$.

Після обробки розчинами пластини піддаються УЗМ.

Необхідно так само підготувати посуд для приготування джерела дифузії і оснащення для її проведення.

Для проведення процесу дифузії готують дифузанти [6]. Необхідно строго дотримувати пропорції речовин, рівномірність змішування і час витримки. Джерелом фосфору є наступна суміш:

$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ – 84 мл	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ – 564 мл
HNO_3 – 6 мл	H_3PO_4 – 60 мл
H_2O – 60 мл	
ТЕОС – 210 мл	

Час витримки даної суміші 8 годин.

Джерелом бору є наступна суміш:

$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ – 611мл
H_2O – 91 мл
1% р-р H_3BO_3 39 мл
Тетраетоксисилан (ТЕОС) – 169 мл

Витримка даної суміші 24 години.

Нанесення дифузанта на поверхню пластини здійснюється центрифугуванням. Для даного приладу на кожную сторону свій дифузанти наноситься один раз. Швидкість центрифуги для дифузанта п-типу 3000 об/хв, для р-типу 2000 об/мин. Час обертання центрифуги 3-5 с.

Після нанесення дифузанта пластини сушать, використовуючи шафу ІЧ сушки. Висушені пластини встановлюють в кварцовий човник після пересипання крихтою алюмінію. Далі йде підготовка дифузійної печі: продування, розігрівши [7].

У процесі використовується дифузійна піч СУОМ 1.2.6.1/13.5-И1. Човники з пластинами завантажують в робочу зону печі. Температура печі при завантаженні $(625 \pm 25) ^\circ\text{C}$. Після цього піч виводять на режим $(1250 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Час витримки для даного приладу складає 23 години.

Після закінчення витримки піч відключають. Після охолодження пластини вивантажують. Температура вивантаження $(625 \pm 25) ^\circ\text{C}$.

Контрольованими параметрами після дифузії є глибина дифузії, поверхневий опір, час життя неосновних носіїв заряду, і вибірково тип провідності.

Для швидковідновлюючого діода глибина дифузії складає (70 ± 5) мкм для p⁺-p типу і (40 ± 5) мкм для n⁺ типу (рис. 2.4).

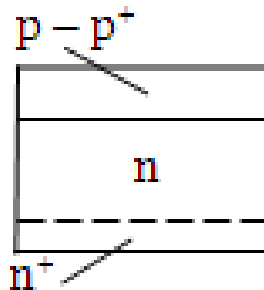


Рисунок 2.4 – Пластина Si після процесу дифузії

2.3 Технологічний процес окислення

Для утворення плівки захисного оксиду кремнію пластини піддають окисленню [6].

Для підготовки пластин до окислення їх спочатку промивають в розчині $\text{HCl}:\text{HNO}_3 = 3:1$ у перебігу семи хвилин. Потім пластини промивають у воді до нейтральної реакції і піддають УЗМ.

Окислення виробляють в електропечі СДО 125/4А. Завантаження пластин відбувається при $T = (1015 \pm 5) ^\circ\text{C}$ і проходить в парах H_2O у перебігу двох годинників, потім в сухому O_2 у продовж 1 години. Після цього піч вимикають і при температурі $(625 \pm 25) ^\circ\text{C}$ вивантажують (рис.2.5).



Рисунок 2.5 – Пластина Si після процесу окислення

2.4 Технологічний процес фотолітографії

Фотолітографія – процес утворення на поверхні пластини за допомогою світлочутливих матеріалів локальних захисних ділянок, рельєф яких повторює малюнок топології приладу [6].

Перша операція фотолітографії – підготовка пластин. Пластини обробляють розчином спирту 15-20 хвилин при температурі $(750 \pm 50) ^\circ\text{C}$, для видалення забрудненості.

Далі на пластини наноситься шар фоторезисту. У даному приладі використовується позитивний фоторезист ФП-383. Нанесення здійснюють центрифугуванням при наступних режимах: швидкість центрифуги 1500-2000 об/хв, час роботи центрифуги 10-25 с, час розкручування 1-2.5 с.

Після нанесення пластини з фоторезистом сушать. Сушка проводиться при наступних режимах: температура $(90-100) ^\circ\text{C}$, час сушки 25-30 хвилин.

На наступному етапі пластини поєднують з фотошаблоном і експонують. Час експонування 10-30 секунд.

Після експонування фоторезист проявляють у 2% водному розчині Na_2PO_4 . Дана операція призначена для видалення засвічених ділянок фоторезисту. Час прояву 30-80 с.

На наступній операції фоторезист піддають дубленню. Дублення відбувається 30-60 хвилин при температурі (120-150) $^{\circ}\text{C}$. Для видалення оксиду кремнію з відкритих ділянок на наступній операції виробляють селективне травлення пластин. Травлення виконують в розчині $\text{NH}_4\text{F}:\text{HF}:\text{H}_2\text{O} = 3:1:6$ у продовж (20-50) хвилин. Травлення виконують в боксі 5БП2-02.

Останньою операцією фотолітографії є зняття фоторезисту. Операція виробляється в шафі 2Ш-НХ. Спочатку пластину обробляють в діетилформаміді, доведеному до кипіння. Потім, після промивання в деіонізованій воді її поміщають в розчин $\text{H}_2\text{SO}_4 = 1:1$ і кип'ятять 10 хвилин. На останній стадії пластини сушать (рис. 2.6).

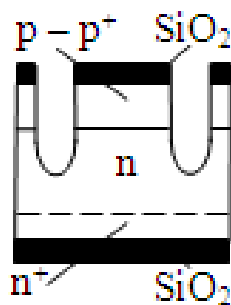


Рисунок 2.5 – Пластина після процесу 1 фотолітографії

2.5 Склопасивація

Унаслідок не повної герметичності пластмасового корпусу використання для захисту p-n переходів традиційних матеріалів – кремнійорганічних компаундів, лаків і емалей, в даному випадку, вельми проблематично. Тому використовується багатокомпонентне безлужне скло [8].

Застосовуються:

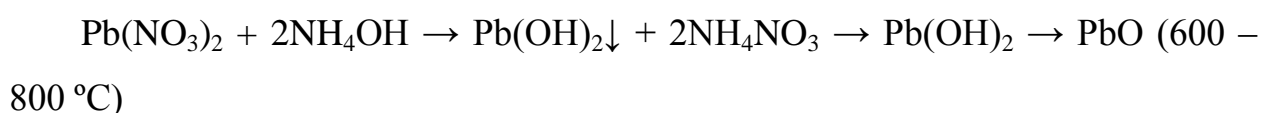
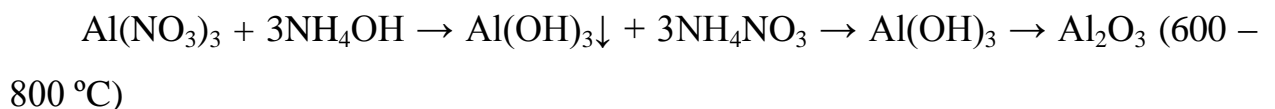
- бромсилікатні стекла (оксид цинку, оксид Si, оксид B, оксид Al, оксид Cd – плівка 1- 20 мкм);

- алюмосилікатні стекла (SiO_2 і Al_2O_3 з добавками BaO , CaO , Na_2O . 3 – 15 мкм);
- халькогенідні стекла (потрійні композиції As-S-Tl , As-Se-Tl ≥ 3 мкм);
- свинцево-силікатні стекла (PbO , SiO_2 і Al_2O_3 3 мкм).

Способи приготування скла: розплав свинцево-силікатного скла дуже агресивний і в процесі варки роз'їдає навіть платинові тиглі, тому їх варять частіше у високоглиноземних тиглях. Температура варива 1400 – 1500°C протягом 2 - 3 годин, а оскільки свинцеві стекла при вариві можуть відновлюватися, то процес ведуть в окислювальній атмосфері.

Для приготування скла використовується 3 розчини: солей Pb і Al у воді, TEOSa у етанолі і 25% розчин аміаку. При зливанні розчинів утворюється гель гідроокисів Pb , Al , і Si , який випадає в осад. Осад висушується і потім прожарюється в окислювальному середовищі, що перешкоджає відновленню металів.

Що відбуваються при приготуванні склоречовини способом розчину, хімічні реакції можна представити в наступному вигляді:



Методи нанесення скла.

Відомо декілька методів нанесення склопорошку на захищену поверхню при склопассивації напівпровідникових елементів: метод трафаретного друку, осадження з рідкої суспензії центрифугуванням, намазування, нанесення склофоторезиста, нанесення за допомогою катодфороза [4].

Метод трафаретного друку полягає в продавлюванні особливо приготованої склопасти через отвори трафарету на підкладку, яка стримується на наочному столику за допомогою вакууму. Процес вимагає вживання пасти складного складу, спеціального устаткування і точної оснастки.

Осадження з рідкої суспензії стела центрифугуванням полягає в тому, що напівпровідникова пластина розташовується на обертальному столику центрифуги і на цю пластинку наноситься необхідна доза суспензії склопорошку, яка покриває поверхню пластини.

Метод намазування найбільш примітивний і поширений як лабораторний процес.

Нанесення скла з використанням фоторезисту полягає в наступному. У розчин фоторезисту вводиться певна кількість дрібнодисперсного порошку. Приготований таким чином склофоторезист наноситься на поверхню напівпровідникової пластини одним з відомих способів. Після експонування малюнка, непотрібні частини його вимиваються при прояві.

Кожен метод має свої достоїнства і недоліки.

Існують три цикли високотемпературної обробки.

I – при 600 °С. Потрібний для випалювання зв'язків речовини і спікання склопорошку, для чого треба видалення зв'язків речовини, залишків рідкої фази суспензії необхідно для того, щоб при робочих температурах на елементах не виникали великі струми витоки, які можуть привести до виходу приладу з строю.

II – при $\approx 900^\circ\text{C}$. Необхідно для розплаву скломаси і здобуття рівномірного суцільного шару скла на поверхні напівпровідникового елемента, що покривається. Нерівномірне покриття негативно позначається на механічних властивостях покриття.

III – при $\approx 600^\circ\text{C}$. Відпал. Являється найбільш важливою в технології пасивації операцією і необхідний для стабілізації шару оплавленого скла, тобто зняття механічної напруги. Порушення циклу відпалу зазвичай викликає зайву крихкість пластин кремнію і наводить до утворення мікротріщин на кордоні розділу Si-скло під час подальших обробок.

Важливими складовими, які впливають на режим оплавлення, є первинний склад скла, розмір його зерна в порошок, метод напилення, в'язкість розплаву (рис. 2.6).

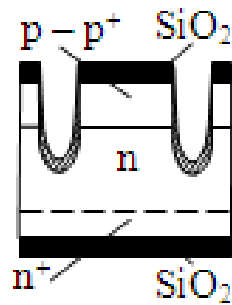


Рисунок 2.6 – Пластина після процесу склопасивації свинцево-силікатним склом

2.6 Технологічний процес металізації

Технологічний процес металізації призначений для створення омичного контакту структури з електричними виводами прилади і полягає в створенні на структурі металевої плівки в області анода і катода [6].

Перша операція металізації – підготовка пластини до хімічного нікелювання. Операція виробляється в боксі 25П2-ОС. Пластини занурюють в розчин NH_4F , HCl і Au (0.1 г/л) на 20-60 секунд. Золото вступає як активатор. Воно покращує якість осадження нікелю.

Потім пластини без промивання занурюють в електроліт наступного складу:

NiCl – 30 г/л

NH_4Cl – 50 г/л

NaH_2PO_2 – 10 г/л

$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ – 60 г/л

Змішаний з лимонною кислотою.

Обробка ведеться при температурі $(85-90)^\circ\text{C}$ у течії 5 хвилин. Потім пластини сушать 30 хвилин при температурі $(180\pm 20)^\circ\text{C}$.

На наступній операції виконують вжигання нікелю. Для цього використовують вакуумну горизонтальну піч. Температура процесу $(450\pm 10)^\circ\text{C}$. Час вжигання – 30 хвилин.

Після першої металізації пластини піддають електронному опроміненню. Ця операція необхідна для створення в кристалі пасток, які зменшують час життя ННЗ. Перед опроміненням пластини обробляють в царській горілці. Потім пластини поміщають в спеціальні касети і вони поступають на опромінення електронами з енергією 5-10 МеВ, дозою $(5-7) \cdot 10^4$ ел/см²

Після опромінення пластини піддають 2-ій металізації.

Спочатку проводять 2-е нікелювання, так само, як і перше. Потім пластини готують до кадміювання. Для цього їх знежирюють в розчині Na_3PO_4 і ОП-10 і обробляють в активаторі $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O} = 1:1$ протягом 2-5 хвилин. Для кадміювання використовують розчин електроліту

CdSO_4 – 45-60 г/л

Na_2SO_4 – 40-50 г/л

H_2SO_4 – 20-30 г/л

Допоміжний засіб ОП-10 6-8 г/л

Щільність струму в електроліті 2А/дм²

Після кадміювання пластини піддають срібленню. Розчин електроліту має наступний склад:

$\text{K}[\text{Ag}(\text{CN})_2]$ – 74-92 г/л

KCNC – 200-250 г/л

$(\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ – 20-30 г/л

Щільність струму 0.5 А/дм²

Після цих процесів пластини піддають термообробці $T=180 - 200^\circ\text{C}$ протягом 1 години (рис. 2.7).

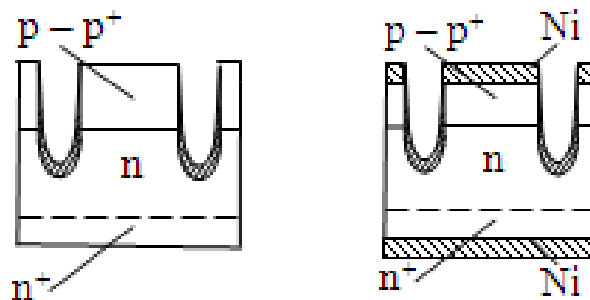


Рисунок 2.7 – Пластина після процесу 2 фотолітографії і металізації

2.7 Технологічний процес формування структури і конструкції швидковідновлюючого діода

1. Виконується розділення пластин на структури. Для цього пластини наклеюють на скло гліфталієвою мастикою, і після застигання піддають вирізці. Після вирізки пластини відмивають в діметілформаміді і сушать [8].

При підготовці деталей до паяння їх обробляють в HCl і промивають в деіонізованій воді.

2. Після цього до структури припаюють електрод. Для здійснення даної операції використовується воднева піч, припій Cr-2.5, водень технічний, марки А. Після паяння структури піддають операції зняття фаски. Ця операція необхідна для зменшення витоку струму по поверхні, в порушеному шарі. Далі структури промивають у воді і сушать.

3. Після обробки в HCl і УЗМ виконується операція паяння виводу аналогічно операції паяння нижнього електроду.

4. На наступних операціях виконується травлення фаски в 20% розчині КОН і захист фаски в КЛТ-30. Після обох процесів проводять контроль ВАХ.

5. Виконується паяння елемента до підстави (рис.2.8). Використовується електропіч конвеерная воднева ВСКМ 1.36 0.7/9.

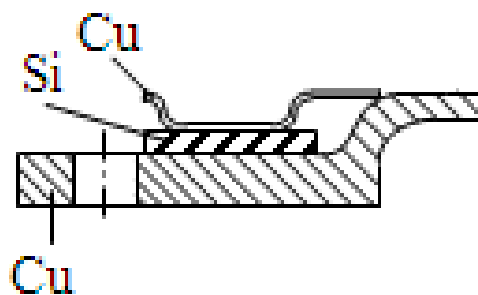


Рисунок 2.8 – Паяння арматури

6. Наступним етапом збірки приладу є герметизація (рис. 2.9). Після одягання корпусу його зварюють. Для цього використовується конденсаторна зварка на зварювальному напівавтоматі ПРК12001. Після зварки слідує обтиск штангелю під пресом.

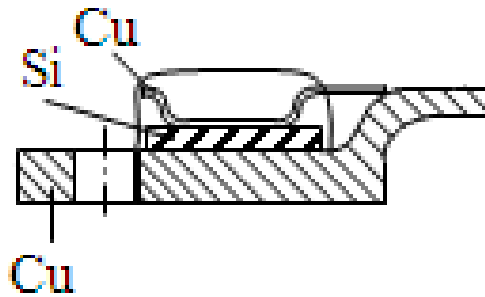


Рисунок 2.9 – Герметизація компаундом

7. На наступній операції виробляється проварювання штангеля виводу. Для цього застосовують машину точкової зварки серії МТ.

8. На наступному у виводі пробивається отвір (прес КД 2114А) (рис. 2.10).

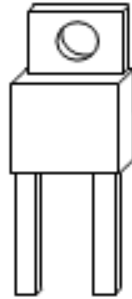


Рисунок 2.10 – Готовий швидковідновлюючий діод

9. Після цих операцій прилади перевіряють на герметичність (бульбашковий метод), і передають прилади на нікелювання, яке необхідно для захисту пристроїв від дії зовнішнього середовища.

10. На останньому етапі виготовлення приладів їх піддають серії випробувань: привласнення струмономіналу, перевірка класу (ВАХ), часу життя ННЗ, часу зворотного відновлення, і інших електрофізичних параметрів.

11. Після цих випробувань прилади йдуть на маркування, а далі на перевірку ОТК.

12. Завершальною операцією виробництва швидковідновлюючих діодів є упаковка і здача на склад готової продукції.

2.8 Методи контролю при виробництві швидковідновлюючих діодів

В процесі виготовлення напівпровідникових приладів на всіх стадіях техпроцеса виробу проходять через велику кількість операцій контролю, призначених як визначення правильності проведення процесів і для відбракування приладів, які мають дефекти, невідповідні вимогам до продукції, що випускається [6].

Можна виділити такі етапи контролю.

1) Контроль в процесі механічної обробки. Тут контролюються наступні параметри: неплоскостність, непаралельність і товщина пластин.

2) Контроль в процесі дифузії. Контрольованими параметрами після дифузії є глибина дифузії, поверхневий опір, час життя неосновних носіїв заряду, товщина оксиду, і вибірково тип провідності.

4) Контроль в процесі металізації. Тут контролюють товщину металевого покриття.

5) Контроль в процесі збірки. На цьому етапі контролюють герметичність, зовнішній вигляд і ВАХ приладу.

1) Контроль в процесі механічної обробки.

Контроль неплоскостності (прогин), непаралельності (клин) і товщину пластин контролюють за допомогою мікрометричних приладів. Стан шліфованою поверхонь напівпровідникових пластин і кристалів, а також бічних граней кристалів після різання контролюють візуально неозброєним оком або під мікроскопом.

2) Контроль параметрів після дифузії.

Контроль глибини дифузії. Глибина проникнення домішки Δx визначається методом кульового шліфа. При цьому мають місце наступні операції.

1. Пластину закріплюють на столику за допомогою пластиліну.

2. Піднімають столик до зіткнення з кулькою.

3. Наносять на кульку суспензію мікропорошку.

4. Включають установку і знімають шліф 20-30 сек. (ширина лунки 3.5-6мм).
5. Вимикають установку.
6. Промивають пластину.
7. Сушать на фільтрувальному папері.
8. Змочують 1% розчином CuSO_4 шліф для "прояву" n і p області (n – область червона, p – темно-сіра)
9. Промивають і сушать пластину.
10. Кладуть пластину на столик мікроскопа і вимірюють довжину хорди h (рис. 2.11) при збільшенні мікроскопа 2x або 4x кілька разів, потім беруть середнє арифметичне значення свідчень.
11. По таблиці визначають глибину проникнення дифузанта.

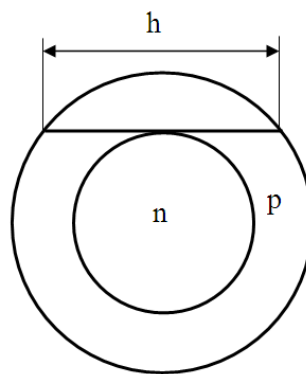


Рисунок 2.11 – Визначення глибини проникнення дифузанта в кремній

Контроль поверхневого опору. Для виміру поверхневого опору дифузійних шарів використовується чотирьохзондовий метод.

Устаткування для виміру: цифровий вимірник питомого опору (ЦВПО).

Струм протікає через крайні зонди в межах дифузійного шару Поверхневий опір шару визначається по формулі:

$$R_s = 4.53 U/I, \quad (2.1)$$

де R_s – поверхневий опір, Ом; U – падіння напруги на ділянці шару між внутрішніми зондами, мВ; I – струм зовнішніх зондів, мА; 4.53 – поправочний коефіцієнт.

Вимір часу життя неосновних носіїв заряду. Для виміру часу життя неосновних носіїв заряду (ННЗ) використовується метод dU/dt . На структуру подається напруга, що зростає з певною швидкістю. Наростання відбувається до U_0 (рис. 2.12, а). Під час наростання напруги на структурі спостерігається сплеск струму, обумовлений зарядною ємністю р-п переходу. Після того, як напруга на структурі стає постійною, деякий час в ланцюзі протікає струм, що перевершує струм витoku в стаціонарному режимі. Зменшення струму від I_0 до I_{yt} відбувається по експоненціальному закону з певним часом спаду, званим час життя ННЗ (рис. 2.12, б). Для виміру часу життя ННЗ використовують прилад ИВ-100.

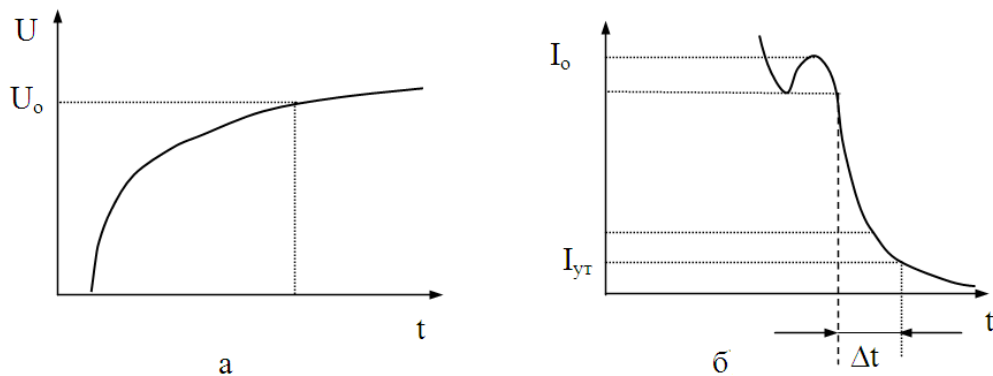
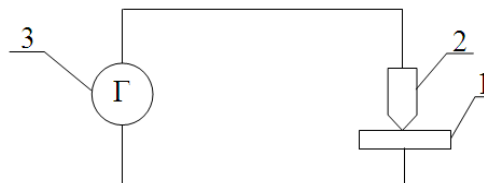


Рисунок 2.12 – Метод dU/dt : а - зростання напруги, б - час життя ННЗ

Контроль типу провідності н/п матеріалів. Тип провідності структур і матеріалів визначається по знаку термоелектрорушійної сили, яка виникає за наявності градієнта температури між точковим зондом і зразком.

Визначення типу провідності структур і матеріалів показано на рисунку 2.13.



- 1 - структура або п/п матеріал;
- 2 - термозонд з нагрівачем;
- 3 - гальванометр

Рисунок 2.13 – Визначення типу провідності за допомогою зонда

3) Контроль товщини металізації.

Для визначення товщини металевого покриття застосовується ряд методів, вибір яких залежить від необхідної точності визначення і металу, вживаного для покриття.

Гравіметричний метод (ДОСТ 9.302-88). Метод заснований на визначення маси покриття зважуванням деталей на аналітичних вагах до і після нанесення покриття або до і після розчинення покриття або основного металу.

Метод застосовують для визначення середньої товщини одношарових покриттів з відомою щільністю на деталях, масу яких можна визначити зважуванням на аналітичних вагах з класом точності не менше 2,0. Відносна погрішність методу $\pm 10\%$.

Середню товщину покриття в мікрометрах визначають по формулі:

$$h_{cp} = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 10^4}{S \cdot \rho}, \quad (2.2)$$

де m_1, m_2 – маса пластини до і після нанесення покриття відповідно, г; S – площа покриття, см^2 ; ρ – щільність матеріалу покриття, г/см^3 .

Кулонометричний метод. Метод заснований на визначенні кількості електрики, необхідної для анодного розчинення покриття на обмеженій ділянці під впливом стабілізованого струму, у відповідному електроліті.

У момент повного розчинення покриття і появи основного металу або металу підшару спостерігається різка зміна – "стрибок" потенціалу, що і є ознакою закінчення виміру.

Метод застосовують для одношарових покриттів завтовшки від 0.2 – 50 мкм. Товщину вимірюють за допомогою кулонометричних товщиметрів різної конструкції. Відносна погрішність методу $\pm 10\%$.

Метод краплі. Метод заснований на розчиненні покриття відповідним розчином, який наноситься на поверхню краплями і витримуємо в перебігу певного проміжку часу.

Метод застосовують для одношарових і багатошарових покриттів (пошарово). При проведенні виміру на поверхні покриття з крапельниці наносять одну краплю розчину, витримують час, і досуха видаляють фільтрувальним папером. Потім наносять другу краплю і повторюють до розчинення покриття. Товщину покриття h в мікрометрах обчислюють за формулою

$$h = h_k \cdot (n - 0.5), \quad (2.3)$$

де h_k - товщина покриття, що знімається однією краплею розчину за певний час, мкм; n – кількість крапель, витрачених на розчинення покриття.

Відносна погрішність методу $\pm 30\%$.

Метод вихрових струмів. Метод заснований на реєстрації взаємодії магнітного поля перетворювача з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться цим перетворювачем в деталі і залежних від електрофізичних і геометричних параметрів основного металу і покриття.

Метод застосовують для неелектричних покриттів на не феромагнітних металах і електропровідних покриттів на не феромагнітних металах.

4) Контроль в процесі виготовлення напівпровідникового елемента і збірки приладу.

В процесі виготовлення напівпровідникового елемента після вирізки структур контролюється їх діаметр за допомогою мікроскопа; після герметизації контролюють герметичність приладу бульбашковим методом.

2.9 Вдосконалення методу контролю вольтамперних характеристик

На багатьох етапах виготовлення напівпровідникового елемента контролюють вольтамперні характеристики (ВАХ) приладу. Ця операція виконується після травлення фаски, після її захисту і на визначальних операціях. При вимірі ВАХ використовується стандартна вимірювальна апаратура: вольтметри, амперметри, осцилографи. Перевірка ВАХ необхідна для перевірки відповідності електрофізичних параметрів приладів заданим технічним умовам і правильності виконання техпроцесів [5].

При неавтоматизованих вимірюваннях, вольт-амперну характеристику отримують задаючи значення напруги на діоді джерелом напруги та міряючи струм, який протікає через структуру діода. Такі вимірювання забирають багато часу, а також обмежені за мінімальним значенням заданої напруги.

Для більш точних вимірювань використовуються аналогові (наприклад, Л2-54) чи цифрові (серії Л2-61, Л2-76 чи Л2-82) вимірювачі параметрів напівпровідникових пристроїв. Однак вони не дозволяють візуалізувати характеристику.

Для повноцінної графічної побудови ВАХ нелінійних компонентів використовуються характерографи, засновані на осцилографічному методі побудови ВАХ [4]. Дані пристрої є дорогими і громіздкими для лабораторного застосування.

Запропонована установка, яка дозволяє автоматизовано вимірювати вольт-амперні характеристики напівпровідникових пристроїв. За мету ставилася розробка автономної та автоматизованої системи невисокої вартості для вимірювання ВАХ напівпровідникових пристроїв із широким діапазоном.

Експериментальний макет складається з мікроконтролера STM32F401RE, цифро-аналогового перетворювача AD5624, схеми перетворення напруга-струм, вимірювача струму і напруги INA226 та ноутбука із середовищем LabVIEW. Блок-схему зображено на рисунку 2.14.

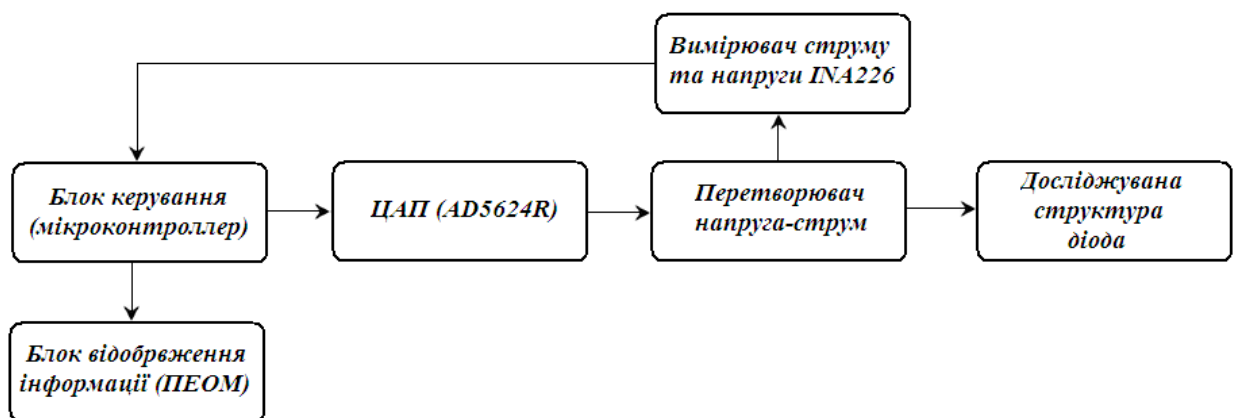


Рисунок 2.14 – Блок-схема установки автоматизованого вимірювання вольт-амперної характеристики діодної структури

Цифровий код подається на вхід ЦАП, що відповідає певному значенню напруги на його виході. Схемою перетворення напруга-струм забезпечується протікання струму скрізь досліджувану структуру діода, що відповідає напрузі на виході ЦАП. Струм і напруга діодної структури вимірюються датчиком ША226. Отримані значення передаються на ПЕОМ, де відбувається їх обробка і візуалізація в середовищі LabVIEW.

Цифрове значення напруги від мікроконтролера передається на ЦАП AD5624R по інтерфейсу SPI.

AD5624R - 12 бітний чотирьохканальний ЦАП з вбудованою опорною напругою 2,5 В [5]. Напруга на виході визначається за формулою :

$$U_{вих} = 2 \cdot \left(\frac{\text{Вхідний_код}}{4096} \right)$$

Забезпечується точність керування напругою 1,2 мВ. При одночасному використанні двох каналів ЦАП, досягнуто збільшення роздільної здатності до 12 мкВ.

Схема перетворення напруга-струм зображена на рисунку 2.15.

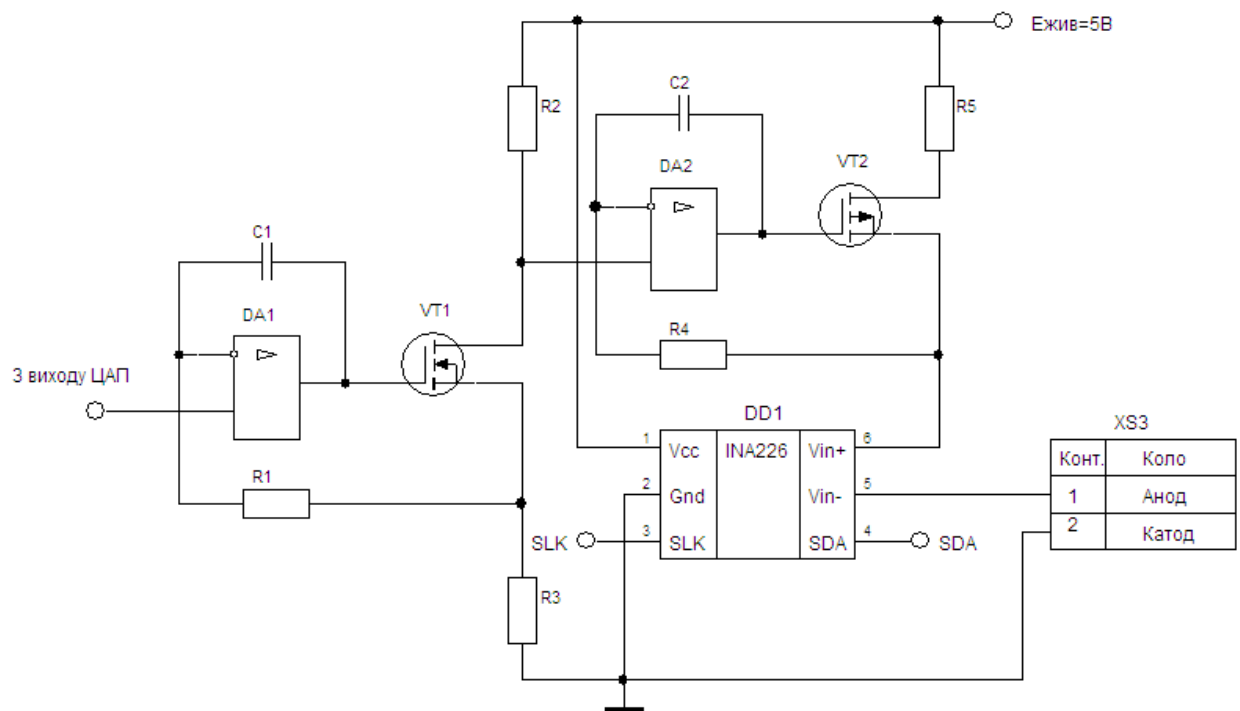


Рисунок 2.15 - Схема перетворення напруга-струм

В схемі використано 2 прецизійні операційні підсилювачі: AD8510 та OP97. Перший має малу напругу зміщення - до 400 мкВ [5] і його ціна є однією з найнижчих серед аналогів. В одному корпусі міститься два операційних підсилювачі.

Операційний підсилювач OP97, крім малої напруги зміщення у 20 мкВ, має опцію корекції напруги зміщення за допомогою підключення зовнішнього поділювача напруги. У одному корпусі міститься один ОП. В пристрої важливо контролювати напругу зміщення для того, щоб забезпечити мінімальний початковий струм через досліджуваний зразок.

Схема представляє собою струмове дзеркало, що передає струм з кола транзистора VT1 в коло з навантаженням з коефіцієнтом $R2/R5$. В ролі навантаження виступає напівпровідниковий пристрій, під'єднаний до клем XS3

Вхідна напруга, яка надходить з ЦАП, задає струм через діод. Він обчислюється за формулою:

$$I = \frac{U_5}{R_5},$$

де U_5 - падіння напруги на резисторі R_5 .

В схемі реалізовано грубе керування вихідною напругою, з кроком 1,2 мВ, та плавне - з кроком 12 мкВ. Для цього було застосовано два канали ЦАП - канал С та D. Плавне налаштування реалізується як програмно, так і апаратно (рис. 2.16).

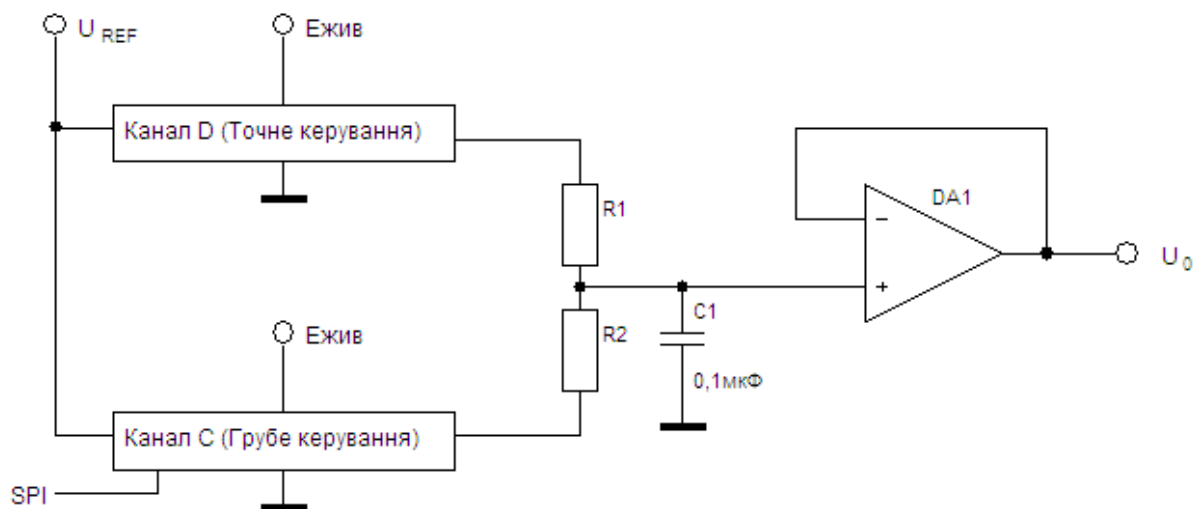


Рисунок 2.16 - Схема збільшення розрядності ЦАП

Значення для резисторів R1 та R2 було обрано в 100 кОм і 1 кОм відповідно. Програмно код для вихідного регістру каналу D збільшується до значення 100, що відповідає збільшенню коду для вихідного каналу C на 1.

Значення напруги на виході розраховується за формулою:

$$U_{вих} = \frac{U_D \cdot R_2 + U_C \cdot R_1}{R_2 + R_1},$$

де U_D - напруга на виході каналу точного налаштування, U_C - напруга на виході каналу грубого налаштування.

В схемі пристрою також передбачена компенсація похибки нульового коду ЦАП. При подачі на ЦАП коду 0x00 на його виходах встановлюється певне мале значення напруги. В експериментальних дослідження, найменшим воно виявилось для каналів C та D і складало 2 мВ та 3 мВ відповідно.

Збільшити роздільну здатність при встановленні струму можливо, збільшивши відношення резисторів в точному та грубому каналах.

Складнішою задачею є точне вимірювання струму.

Для вимірювання струму в промислових умовах використовують 3 типи датчиків: резистивні, датчики Хола та трансформаторні датчики [5]. Останні використовують для вимірювання змінного струму. Резистивні датчики є найдешевшими серед інших, при цьому вони забезпечують лінійність і точність вимірювань. Датчики на базі ефекту Холла є менш чутливими - в середньому роздільна здатність не перевищує 1 мА.

Серед резистивних датчиків, обрана мікросхема INA226, яку можливо придбати розпаяною на "breakout" платі. Даний датчик є одним з найточніших серед аналогів, містить 16 розрядний АЦП і на виході видає оцифровані значення струму і напруги.

Структурна схема датчика наведена на рисунку 2.17. Датчик вмикається в схему послідовно. Струм обчислюється за виміряним падінням напруги на шунтовому резисторі, який під'єднується до відповідних входів датчика. В

схемі використовується шунтовий резистор в 0,1 Ом, що дозволяє вимірювати струм до 800 мА з роздільною здатністю у 25 мкА.

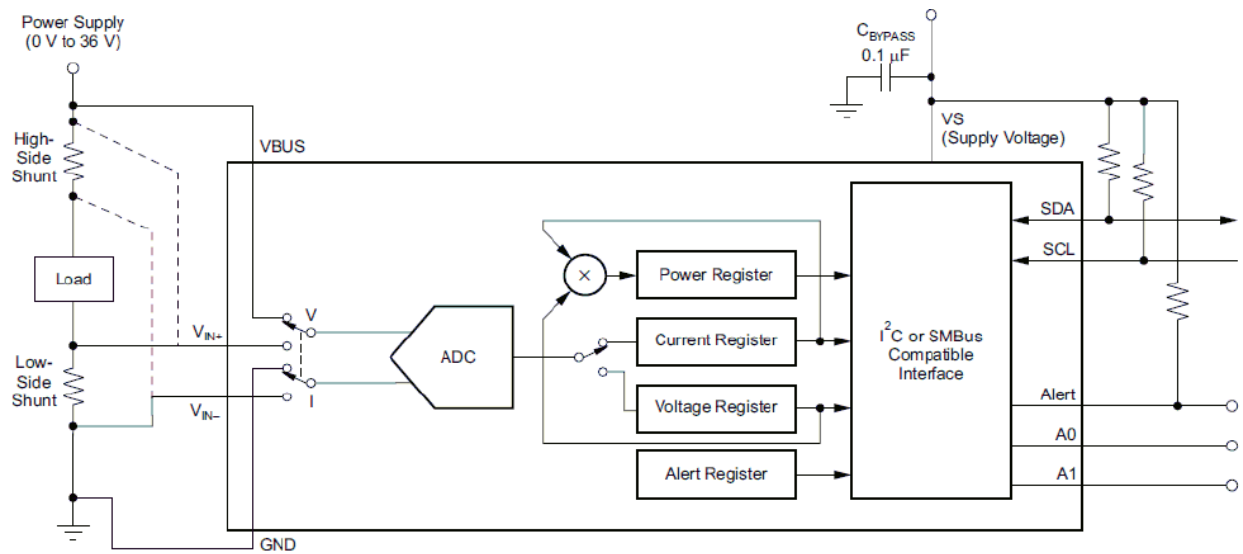


Рисунок 2.17 - Структурна схема датчика INA226

Напряга на структурі діода вимірюється між входом V_{in} , до якого підключений анод зразка, та землею з точністю до 1,5 мВ. Дані з датчика по інтерфейсу I²C передаються на мікроконтролер.

Вдосконалений пристрій має забезпечувати лінійну залежність код-струм. Оскільки для завдання струму використовуються два канали, залежність аналізувалася із використанням об'єднаного коду, значення якого обчислювалося за формулою:

$$n = n_C \cdot k + n_D,$$

де n_C - значення коду, поданого на вхід грубого каналу, n_D - значення коду, поданого на вхід точного каналу, k - коефіцієнт пропорційності.

Значення k було встановлено рівним 103,541 виходячи з того, що апроксимаційні прямі залежності струм-код для точного каналу та струм-код для грубого каналу, повинні описуватися однаковою рівнянням.

Вдосконалений пристрій для вимірювання вольт-амперних характеристик пройшов макетне випробування і показав результати точності поліпшені на 5,8% у порівнянні з методами виміру на стандартній вимірювальній апаратурі.

3 Охорона праці та техногенна безпека

3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Приміщення, в якому знаходиться робоче місце інженера електронщика, 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. Загальна площа дорівнює 24.1 кв.м. Тобто на кожне робоче місце припадає по 8 кв.м., що відповідає нормам (не менше 6 кв.м.).

На рисунку 3.1 наведено план розташування робочих місць інженерів електронщиків. На робочому місці інженер електронщик піддається впливу наступних несприятливих факторів [9]:

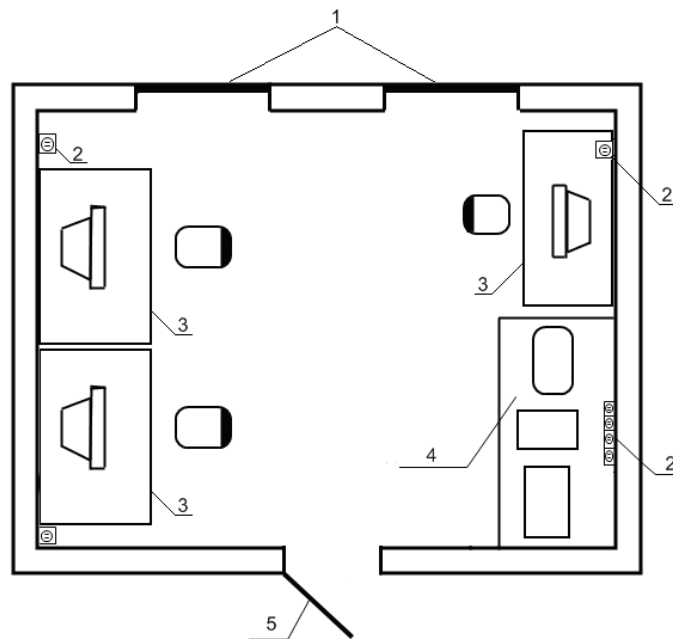
- недостатнє освітлення;
- шум від працюючих машин (комп'ютерів, робочих стендів) На даному робочому місці шум непостійний. Джерелом шуму є робочі стенди. Шум діє на робітника протягом 5 годин;
- електромагнітне випромінювання. На робочому місці допустимі рівні електромагнітних випромінювань за електричної та магнітної складових в діапазоні 5...2000 Гц;
- виділення надлишків теплоти. Тепловий поріг починається з $J = 10 \text{ мВт/см}^2$;
- підвищена запиленість.

Розвитку стомлюваності на робочому місці сприяють такі чинники [10]:

- неправильна ергономічна організація робочого місця, нераціональні зони розміщення обладнання по висоті від підлоги, по фронту від осі симетрії. Робоча поза сидячи викликає мінімальне стомлення, тому велике значен-

ня надається характеристикам робочого крісла. Велике значення також надається правильній робочій позі користувача. Істотне значення для продуктивної і якісної роботи на комп'ютері мають розміри знаків, контраст і співвідношення яскравості символів і фону екрану. Під час користування комп'ютером медики радять встановлювати монітор на відстані 50...60 см від очей.

- характер протікання праці. Трудовий процес організований таким чином, що інженер електронщик 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. Тому дотримання правильного режиму праці і відпочинку при роботі грає дуже важливу роль.



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

Рисунок 3.1 – План розташування робочих місць інженерів-електронщиків

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

Джерела небезпечних та шкідливих чинників на інженера електронщика [10]:

- рівень шуму в приміщенні протягом робочого дня непостійний (табл. 3.1). 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. Основними джерелами шуму є: комп'ютери, робочі стенди. Отже, робоче місце по показнику рівня шуму відноситься до класу умов праці 3.2 – шкідливий.

- основним джерелом електромагнітного випромінювання приміщення є персональні комп'ютери з системними блоками Intel Pentium і моніторами SVGA Samsung, SyncMaster 450b.

Таблиця 3.1 Оцінка чинників виробничого і трудового процесу робочого місця інженера електронщика

№	Чинники виробничого середовища і трудового процесу	Нормативне значення	Фактичне значення	III клас: шкідливі і небезпечні умови			Тривалість дії чинників за зміну %
				I ступінь	II ступінь	III ступінь	
1	Пил, переважно фіброгенної дії. мг/м ³	4	3.9				50
2	Шум, дБА	70	83		13		75
3	Мікроклімат в приміщенні:						
	- температура повітря С°	22-24	18-24				100
	- швидкість руху повітря, м/с	0,1-0,2	0,15-0,2				100
	- відносна вологість повітря %	40-60	45-60				100

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 призначені для [11]:

- 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).

- б) забезпечення недоступності струмоведучих частин досягається ізолюванням струмовідних 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 мг/м^3 , а в даному приміщенні вона складає $3,9 \text{ мг/м}^3$.

Для запобігання дещо підвищеної запиленості рекомендується встановлювати витяжні пристрої, а також проводити вологе прибирання 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 температури 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 слизистих 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 в теплий період – 18-24 °С, 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.

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 [11].

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. 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 електроустаткування. 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 [11]. Приміщення, в якому знаходиться робоче місце інженера електронщика, класифікується як приміщення з підвищеною небезпекою.

Щоб захистити людину від ураження електричним струмом, захисне заземлення має задовольняти ряду вимог, викладених у ПЗП. 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 та техногенна безпека

Пожежі в лабораторному приміщенні становлять особливу небезпеку, тому що пов'язані з великими матеріальними втратами. Характерна особливість лабораторних кімнат - невеликі площі приміщень. Як відомо, пожежа може виникнути при взаємодії горючих речовин, окислення і джерел запалю-

вання. У даному приміщеннях присутні всі три основні чинника, необхідні для виникнення пожежі.

Горючими компонентами в кімнаті є: будівельні матеріали для акустичної і естетичної обробки приміщень, перегородки, двері, підлоги, ізоляція кабелів і ін.

Джерелами запалювання в лабораторному приміщенні можуть бути електронні схеми від ЕОМ, прилади, застосовувані для технічного обслуговування, пристрої електроживлення, кондиціонування повітря, де в результаті різних порушень утворюються перегріті елементи, електричні іскри і дуги, здатні викликати загоряння горючих матеріалів.

В сучасних ЕОМ дуже висока щільність розміщення елементів електронних схем. У безпосередній близькості один від одного розташовуються сполучні дроти, кабелі. При протіканні по них електричного струму виділяється значна кількість теплоти. При цьому можливо оплавлення ізоляції. Для відводу надлишкової теплоти від ЕОМ служать системи вентиляції та кондиціонування повітря. При постійній дії ці системи представляють собою додаткову пожежну небезпеку.

Для більшості приміщень лабораторних кімнат встановлена категорія пожежної небезпеки В.

Однією з найбільш важливих завдань пожежного захисту є захист будівельних приміщень від руйнувань та забезпечення їх достатньої міцності в умовах впливу високих температур при пожежі. Враховуючи високу вартість електронного обладнання, а також категорію його пожежної небезпеки, будівлі для лабораторного приміщення і частини будівлі іншого призначення, в яких передбачено розміщення ЕОМ, повинні бути 1 та 2 ступеня вогнестійкості.

Для гасіння пожеж на початкових стадіях широко застосовуються вогнегасники. В лабораторних приміщеннях застосовуються головним чином вуглекислотні вогнегасники ОУ-5 (ВВК3,5), перевагою яких є висока ефективність гасіння пожежі, схоронність електронного устаткування, діелектри-

чні властивості вуглекислого газу, що дозволяє використовувати ці вогнегасники навіть у тому випадку, коли не вдається знеструмити електроустановку відразу. Вогнегасник ОУ5 (ВВК3,5) переносний з місткістю балона 5 літрів (3,5 кілограма), призначений для гасіння електроустановок, що знаходяться під напругою не більш 10 кВ. В даному приміщенні знаходиться один такий вогнегасник.

З приміщень, на випадок пожежі, має бути передбачена й забезпечена евакуація людей через так звані евакуаційні виходи. Найважливішою вимогою успішної евакуації людей і цінностей є улаштування внутрішніх переходів, пожежних сходів і аварійного освітлення. Виходи вважають евакуаційними, якщо вони ведуть із приміщень:

1) першого поверху назовні безпосередньо або через коридор, вестибюль, сходову клітку;

2) будь-якого поверху, крім першого, в коридор, що веде на сходову клітку, в тому числі через хол. При цьому сходові клітки повинні мати вихід назовні безпосередньо або через вестибюль, відокремлений від прилеглих коридорів перегородками з дверима;

3) у сусіднє приміщення на цьому ж поверсі, яке забезпечене виходами, зазначеними в пунктах 1 і 2.

Фактично, лабораторне приміщення має необхідні умови для евакуації людей і цінностей. В будівлі передбачені й забезпечені евакуаційні виходи з приміщення. Коридор веде на сходову клітку, яка має вихід безпосередньо назовні.

3.6 Розрахунок штучного освітлення лабораторного приміщення

Для освітленості приміщення з розмірами $A = 6,5$ м, $B = 3,7$ м та ви-
стою $H = 3,5$ м використовуються 2 світильники ОДР з двома люмінесцент-
ними лампами типа ЛБ - 40. Коефіцієнти віддзеркалення світлового потоку

від стелі, стін і підлоги відповідно рівні $P_{\text{стелі}} = 70\%$, $P_{\text{стін}} = 50\%$, $P_{\text{підлоги}} = 10\%$. Затінювання робочих місць немає. Висота звісу світильника $h_s = 0$, 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:

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

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 $E_{\text{сер}} / E_{\text{мін}}$);

$k_{\text{зан}} = 1,5$ – коефіцієнт запас, що враховує зниження освітленості із-за забруднення і старіння лампи ;

η – коефіцієнт використання освітлювальної установки.

Для визначення η 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 η 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:

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

Підставляємо набуте значення у формулу (3.2) і знаходимо індекс при-
міщення:

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

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 осві-
тленості необхідно або збільшити кількість світильників, або збільшити по-
тужність 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 фак-
тична освітленість E_ϕ практично відповідає нормативному значенню освіт-
леності $E_n = 400$ лк.

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

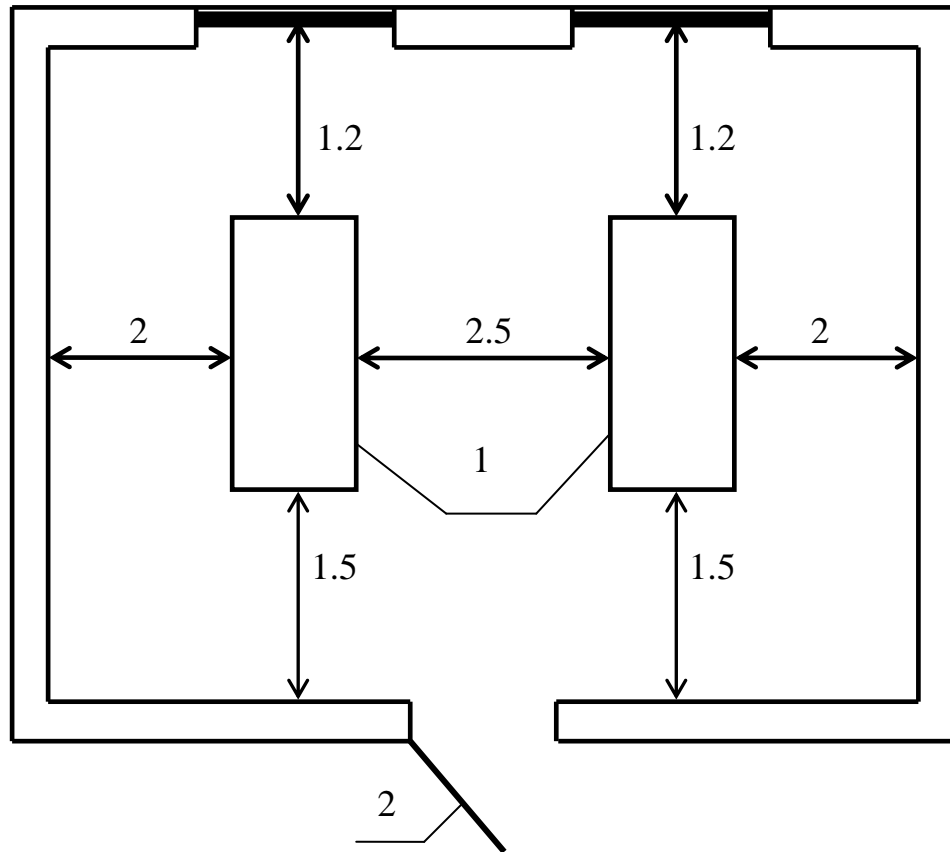
$$F_1 = F \cdot W = 3120 \cdot 1.42 = 4430.4, \text{ (лм)}$$

Так, якщо всі лампи типа ЛБ-40 в приміщенні замінити на лампи типа
ЛТБ-65 з $F=3980$ лм E_ϕ 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

Висновки та рекомендації

1. Розроблений прототип пристрою для вимірювання вольт-амперних характеристик складається з керуючого модуля на базі налагоджувальній платі з мікроконтролером STM32F401RE, 12 бітного ЦАП, схеми перетворення напруга-струм і датчика INA226, який вимірює значення напруги і струму зразка та передає їх на ноутбук з програмою в середовищі LabVIEW для обробки і візуалізації даних.

2. Керування струмом здійснюється за допомогою грубого каналу з кроком 40 мкА та точного каналу з кроком 400 нА. Вимірюється струм відкаліброваним датчиком INA226.

3. Вдосконалений пристрій для вимірювання вольт-амперних характеристик пройшов макетне випробування і показав результати точності поліпшені на 5,8% у порівнянні з методами виміру на стандартній вимірювальній апаратурі.

Рекомендовано подальше вдосконалення пристрою з метою поліпшення автоматизації процесу виміру електричних параметрів напівпровідникових структур

Перелік посилань

1. Андрущак Г.О., Козьярський 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. Швець Є.Я., Небеснюк О.Ю., Ніконова З.А., Ніконова А.О.. Діагностика, контроль та випробування напівпровідникових приладів. Навч. посібн. Запоріжжя : Видавництво ЗДІА, 2007. 173 с.
7. Павлов С.М., Войцеховська О.В. Технологія мікроелектронних засобів : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2017. 169 с.
8. Дубов Є.В, Лободзінська Р.Ф., Мізерний В.М. Проектування мікроскірок та гібридних інтегральних схем. Вінниця : ВДТУ, 2000. 137 с.
9. 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.
10. Ткачук К.Н. Охорона праці і довкілля в радіоелектронній промисловості. Київ : Вища шк., 1988. 240 с.

11. Горобець А.І. Степаненко А.І. Охорона праці в радіоелектронній промисловості. Київ : Техніка, 1987. 345 с.