

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МАТЕМАТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра загальної та прикладної фізики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему: «ВИКОРИСТАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ НА
БАЗІ 40 НМ ТЕХНОЛОГІЇ У ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСАХ»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1051

спеціальності 105 Прикладна фізика та
наноматеріали
(шифр і назва спеціальності)

Д. В. Маслов

(ініціали та прізвище)

Керівник доцент кафедри загальної та прикладної
фізики, доцент, к.ф.-м.н. Яновський О.С.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент доцент кафедри програмної інженерії,
доцент, к.ф.-м.н., Горбенко В.І.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2022

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Яновський О.С.	02.02.22	02.03.22
2	Яновський О.С.	10.04.22	06.08.22
3	Яновський О.С.	12.09.22	18.10.22

7. Дата видачі завдання 19.12.21**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка плану роботи.	05.09.2022	
2.	Збір вихідних даних.	15.09.2022	
3.	Обробка методичних та теоретичних джерел.	12.09.2022	
4.	Розробка першого та другого розділу.	12.10.2022	
5.	Розробка третього розділу.	27.10.2022	
6.	Оформлення та нормоконтроль кваліфікаційної роботи.	04.12.2022	
7.	Захист кваліфікаційної роботи.	14.12.2022	

Студент

(підпис)

Д. В. Маслов

(ініціали та прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

О. С. Яновський

(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер

(підпис)

О. С. Яновський

(ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра «використання мікроконтролерів на базі 40 нм технології у виробничих процесах»: 124 с., 64 рис., 8 джерел.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА, ЕЛЕКТРОНА ЛІТОГРАФІЯ, МІКРОКОНТРОЛЕРИ, НАПІВПРОВІДНИКИ, РЕГУЛЯТОРИ, ТЕХПРОЦЕС, ФОТОЛІТОГРАФІЯ, ЧІП.

Об'єкт дослідження – використання мікроконтролерів на базі 40 нм технології у виробничих процесах.

Предмет дослідження – основні методи та види автоматизації виробничих та дослідницьких процесів за рахунок використання мікроконтролерів.

Мета роботи: розробити та спроектувати автоматизацію процесів за рахунок використання мікроконтролерів на базі 40 нм технології. Навести детальний аналітичний розрахунок та опис проекту.

Метод дослідження: аналітичний.

У кваліфікаційній роботі розглянуто деякі розділи літографії, зокрема, оптична та електрона літографії, наведено основні властивості матеріалів та виробничих процесів. Досліджено різновиди автоматизації. Особливу увагу приділено автоматизації за рахунок використання мікроконтролерів на базі 40 нм технології. Розглянуто впровадження та використання розподілених автоматизованих систем управління технологічними процесами, в основі яких працюють різні мікропроцесорні пристрої. Наведено приклади застосування та впровадження.

SUMMARY

Master`s Qualification Thesis « The use of microcontrollers based on 40 nm technology in production processes»: 124 pages, 64 figures, 8 references.

PRODUCTION AUTOMATION, ELECTRONIC LITHOGRAPHY, MICROCONTROLLERS, SEMICONDUCTORS, REGULATORS, TECHNOLOGY, PHOTOLITHOGRAPHY, CHIP.

The object of study is the use of microcontrollers based on 40 nm technology in production processes.

The subject of the study is the main methods and types of automation of production and research processes by using microcontrollers.

The aim of the study: to develop and design the automation of processes due to the use of microcontrollers based on 40 nm technology. Provide a detailed analytical calculation and description of the project.

The method of research is analytical.

In the Master`s Qualification Thesis some sections of lithography are considered, in particular, optical and electron lithography, the main properties of materials and production processes are given. Various types of automation have been studied. Special attention is paid to automation with microcontrollers based on 40 nm technology. The introduction and use of distributed automated control systems for technological processes, which are based on various microprocessor devices, are considered. Examples of application and implementation are given.

ЗМІСТ

Завдання	2
Календарний план	3
Реферат	4
Summary	5
Вступ.....	8
1 Виробництво напівпровідників та їх застосування	10
1.1 Напівпровідники в електроніці	10
1.2 Класифікація напівпровідникових матеріалів.....	14
1.2.1 Елементарні напівпровідники	16
1.2.2 Напівпровідникові сполуки	17
1.2.3 Аморфні напівпровідникові матеріали.....	19
1.2.4 Органічні напівпровідники	20
1.2.5 Кристалічні напівпровідники	23
1.3 Методи отримання неорганічних напівпровідників.....	27
1.3.1 Технологічний процес отримання напівпровідників.....	32
1.3.2 Виробництво металургійного кремнію	41
1.4 Базові технологічні процеси мікро та нано електроніки.....	45
1.5 Літографія	49
1.5.1 Етапи літографії	49
1.5.2 Способи очищення підкладок.....	52
1.5.3 Резисти	54
1.5.4 Етапи виготовлення резистивної маски. Нанесення резисту.....	55
1.6 Фотолітографія	59
1.6.1 Контактний, безконтактний та проєкційний спосіб фотолітографії.....	60
1.6.2 Фотошаблони. Реперні знаки.....	64
1.6.3 Граничні можливості фотолітографії	73
1.7 Електронна літографія	75
2 Об'єкти та методи дослідження.....	77
2.1 Огляд мікроконтролерів на базі 40 нм технології	77
2.2 Огляд мікроконтролеру ESP32	80

2.3 Огляд мікроконтролеру Raspberry Pi Pico	84
2.4 Установка для дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів	87
3 Експериментальна частина.....	93
3.1 Установка початкової версії та алгоритм дослідження	93
3.2 Автоматизація за рахунок використання мікроконтролерів на базі 40 нм технології	96
3.2.1 Автоматизація з використанням алгоритмів релейного керування	97
3.2.2 Автоматизація з використанням ШІМ сигналів	102
3.2.3 Зчитування та обробка даних	105
3.3 Автоматизація установки з мікроконтролерами ESP32 або ESP8266	112
Висновки	122
Перелік посилань.....	123

ВСТУП

Наприкінці минулого століття і початку XXI – століття в промисловості України та світу розпочалось активне впровадження та використання розподілених автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУТП), в основі яких працюють різні мікропроцесорні пристрої. У сферу автоматизації потрапила величезна кількість програмованих логічних контролерів (ПЛК) від різних світових брендів та виробників, а на самих об'єктах автоматизації поряд з технічними засобами закордонних фірм все частіше використовується мікропроцесорна техніка українського походження.

Збільшення технологічних можливостей і здешевлення виробів напівпровідникового виробництва привело до того, що мікропроцесорні пристрої (МПП) стають найбільш популярними технічними рішеннями в системах автоматизації різного призначення. Інтеграція в одній мікросхемі великого числа функцій, пов'язаних з прийомом, обробкою, зберіганням даних і керуванням, сприяла розвитку нових типів МПП – мікроконтролерів (МК) на одному кристалі. МК стали невід'ємною частиною нашого життя. Вони популярні на транспорті, різних технологічних об'єктах (ТО) і особливо в побутовій техніці. З багатьма такими пристроями ми спілкуємося щодня. Малий розмір, надійність, низька ціна і висока продуктивність є очевидними достоїнствами МПП, які постійно удосконалюються. Області застосування МПП не мають меж.

МПП дають змогу вирішувати завдання науково-технічного прогресу в паливно-енергетичному, електротехнічному, машинобудівному і транспортному комплексах висувають в даний час на перше місце проблему забезпечення необхідної надійності, живучості і безаварійності складних технічних об'єктів і їх систем управління. До таких об'єктів відносяться сучасні потужні електроенергетичні системи і їх елементи (наприклад, електричні станції, дальні лінії електропередачі, електричні розподільні системи крупних промислових підприємств, автономні електроенергетичні, перетворювальні, електротехнічні і електромеханічні установки і системи управління ними), що включають пристрої

релейного захисту і протиаварійної автоматики, контактні розподільні пристрої. Комутація, захист, управління, регулювання і інші функції в цих об'єктах, як правило, виконуються різними електричними апаратами (ЕА).

Останніми роками у зв'язку з появою мікропроцесорів намітилася тенденція до широкого використання їх в електропобутовій техніці (ЕПТ) і електроапаратобудуванні, до безпосереднього впровадження в пристрої управління ЕА, техніку релейного захисту, системи протиаварійної автоматики, в автоматизовані системи управління технологічними процесами виробництва, випробування і дослідження ЕПТ і ЕА.

Відмінними рисами пристроїв і систем, виконаних на базі мікропроцесорів, є: можливість значного розширення функцій шляхом додавання нових алгоритмів і програм в систему програмного забезпечення, високий рівень уніфікації елементів, можливість перепрограмування, для реалізації тих або інших функцій без зміни комплексу технічних і апаратних засобів і автоматизації процесів діагностики і настройки апаратури. Сучасні мікропроцесори мають малі габаритні розміри, і можуть розміщатися поруч з керованими об'єктами, володіють високою надійністю і розвиненими логічними можливостями, характеризуються низькими енергоспоживанням і вартістю.

Мета роботи полягає у визначенні та демонстрації впровадження мікропроцесорів для автоматизованих систем управління технологічними процесами.

Для виконання поставлених завдань використовується сукупність різноманітних методів дослідження та проектування.

1 ВИРОБНИЦТВО НАПІВПРОВІДНИКІВ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

1.1 Напівпровідники в електроніці

Сучасна прикладна фізика, як правило, базується на електроніці, а електроніка, у свою чергу, побудована в основному на напівпровідниках.

Електроніка – галузь науки і техніки, у якій досліджуються електронні явища в речовинах (головним чином – твердотільних), і на основі результатів цих досліджень розробляються методи створення електронних приладів, електронних схем і систем. Можна також визначити електроніку як науку про взаємодію електронів з електромагнітними полями і про методи створення електронних матеріалів, приладів і пристроїв, у яких ця взаємодія використовується для перетворення електромагнітної енергії, в основному, для передачі, обробки і збереження інформації. Теоретичні задачі електроніки – це дослідження взаємодії електронів як з макроскопічними полями в робочому просторі електронного приладу, так і з мікроскопічними полями усередині атома, молекули або кристалічної ґратки. Практичні задачі електроніки зводяться до розробки електронних приладів і пристроїв, що виконують різні функції в системах перетворення і передачі інформації, у системах керування, в обчислювальній техніці, а також в енергетичних пристроях.

Спеціалізації в галузі електроніки відрізняються різноманітним набором сучасних науково-технічних проблем, але всі вони завершуються втіленням у реальні прилади, які засновані на фізичних властивостях тих або інших твердих тіл, у тому числі прилади, реалізовані на основі нанотехнологій. Таким чином, фізика напівпровідників, як найважливіша частина фізики твердого тіла і прикладної фізики, має велике значення для фахівців з електроніки.

У своєму розвитку електроніка пройшла три етапи: лампова електроніка, напівпровідникова електроніка і мікроелектроніка (інтегральна електроніка). Сучасний, четвертий етап електроніки це наноелектроніка.

В усіх трьох останніх етапах розвитку електроніки ключову роль відіграє фізика напівпровідників.

Напівпровідникова структура являє собою границю між областями напівпровідника з особливими властивостями. Якщо ця границя розділяє шари напівпровідника з дірковим і електронним типом електропровідності, то вона називається р-п-переходом; границя шарів різних сполук називається гетеропереходом. Використовуються також структури, що включають шари металу, діелектрика і напівпровідника. Це так звані МДН або МОН-структури. У МОН-структурі діелектриком звичайно служить окисел напівпровідника, наприклад діоксид кремнію (SiO_2) [1].

Таким чином, лампові діод і тріод були замінені кристалічними діодом і транзистором. Виникла електроніка, заснована на використанні дискретних напівпровідникових приладів. Надійність електронних схем і систем значно збільшилася. Істотно зменшилися їхні габарити, вага й енергоспоживання.

Однак «тиранія між з'єднань» зберігалася. Собівартість виробництва також залишилася високою. Тому електроніка, заснована на дискретних напівпровідникових приладах, проіснувала недовго.

Основою третього етапу розвитку електроніки і подальшого прогресу електроніки стали інтегральні схеми. Хоча винахід транзисторів і став революцією в електроніці, але їхнє величезне число в обчислювальних пристроях (включаючи інші компоненти електроніки – резистори, конденсатори, індуктивності) приводило до великих складностей у реалізації безлічі між з'єднань.

Рішення проблеми було знайдено Кілбі в 1958 р. на фірмі Texas Instruments, США (Нобелівську премію за свій винахід Кілбі одержав у 2000 р.). Транзистори, діоди, резистори, конденсатори й індуктивності – всі основні елементи схем разом з їх між з'єднаннями були реалізовані в одному монолітному блоці напівпровідника (спочатку використовувався кремній). Процес виготовлення таких інтегральних схем допускав автоматизацію їхнього виготовлення і значне зниження габаритних розмірів. Першим застосуванням винаходу Кілбі стали мініатюрні калькулятори.

Таким чином, після 1960 р. почалася ера інтегральної напівпровідникової електроніки – мікроелектроніки (мікрон дорівнює 10^{-6} м). Почався третій етап розвитку електроніки. Основним елементом складних електронних систем стала інтегральна мікросхема (ІМС).

Інтегральна мікросхема – це мікромініатюрний функціональний вузол електронної апаратури, у якому активні, пасивні і сполучні елементи виготовляються в єдиному технологічному циклі на поверхні або в об'ємі матеріалу і мають загальну оболонку (рис. 1.1). Виготовлення всіх елементів мікросхеми в єдиному технологічному циклі й в одному матеріалі дозволяє використовувати замість послідовної (індивідуальної для кожного елемента) технології гуртову технологію, що є досить продуктивною. Собівартість виробництва складних електронних систем у розрахунку на один схемний елемент різко зменшилася.

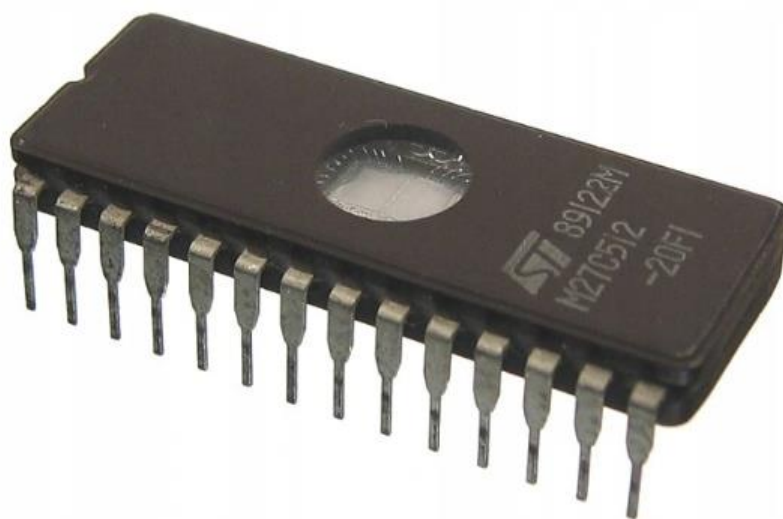


Рисунок 1.1 – Інтегральна мікросхема пам'яті M27C512-20F1[2]

Можливість переходу на гуртову технологію зв'язана з тим, що напівпровідникова структура має практично всі необхідні схемні властивості. Так, окремий *p-n*-перехід може використовуватися як резистор, конденсатор, діод, перемикач сигналу, стабілізатор напруги, фоточутливий елемент, світлодіод,

напівпровідниковий лазер, а в сполученні з іншими *p-n*-переходами – як транзистор, тиристор і т.д. Отже, формуючи на напівпровідниковому кристалі в одному технологічному циклі безліч *p-n*-переходів, можна створювати складну ІМС.

Розвиток твердотільної інтегральної електроніки (мікроелектроніки) йшов по шляху зменшення габаритів, збільшення швидкодії, обсягу пам'яті і надійності електронних систем. Саме на цьому шляху були розроблені методи мініатюризації елементів ІМС, що відкрили реальні можливості переходу до наноелектроніки.

Подальший прогрес в одержанні матеріалів з новими властивостями підготував реальні можливості до появи електроніки субмалих елементів (наноелектроніки). Цей прогрес зв'язаний з такими змінами в структурі речовини, що впливають на її фундаментальні властивості. Дотепер ці властивості були визначені, в основному, для макроскопічних об'єктів. Однак уже давно були помічені (і використовуються в техніці) розмірні ефекти, що спостерігаються в тонких плівках, у властивостях поверхні кристалів і у надмалих частках речовини.

Таким чином, з'являється можливість «керувати» властивостями речовини – шляхом зміни її фрагментації. У зв'язку з потребами техніки в даний час великий прогрес досягнуто в галузі нанофізики – нового наукового напрямку фізичного матеріалознавства, зв'язаного зі створенням і вивченням структури і властивостей матеріалів, що сконденсовані з дуже малих кристалів, кластерів, фрагментів (що мають обсяг усього $10^3 - 10^6$ атомів) [2].

У науковій термінології «нано» означає 10^{-9} : один нанометр (нм) дорівнює одній тисячній частині мікрометра («мікрона»), або одній мільйонній частині міліметра, або одній мільярдній частині метра. Надтонка мікроструктура, що має середній розмір фаз або гранул (кластерів), шарів або ниток порядку (чи менше) за 100 нм вважається наноструктурованою. Саме завдяки малим розмірам блоків (часток, гранул, фаз), з яких вони побудовані, наноматеріали демонструють унікальні механічні, оптичні електричні і магнітні властивості .

Полікристалічні дрібнозернисті матеріали із середнім розміром зерна від 40 до 150 нм іноді називають мікрокристалічними; а якщо середній розмір зерна менш

40 нм – нанокристалічними. Відомо, що й у полікристалічній речовині зменшення розмірів «зерен»-кристалітів може приводити до істотної зміни його властивостей. Такі зміни стають особливо помітними, коли середній розмір кристалічних зерен знижується до 100 нм, але властивості дуже змінюються, коли розмір зерен стає менш 10 нм.

В останні роки розвивається також нова науково-технічна галузь – магнітоелектроніка, або, як тепер прийнято її називати, – «спінтроніка», зайнята вивченням і практичною реалізацією пристроїв, що використовують спіни електронів. «Спінтроніка» вивчає магнітні і магнітооптичні взаємодії в металевих і напівпровідникових структурах, а також квантові магнітні ефекти в структурах нанометрового розміру. Особливе значення для магнітоелектроніки мають сучасні нанотехнології, що дозволяють реалізувати на практиці нові досягнення в галузі нанофізики.

1.2 Класифікація напівпровідникових матеріалів

Фізичні властивості напівпровідників вивчені найбільш повно у порівнянні з металами і діелектриками. Основним стимулом для вивчення напівпровідників є виробництво напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем. Крім того, для фізики твердого тіла важлива і величезна кількість ефектів у напівпровідниках, які не можна спостерігати в інших речовинах. Ці ефекти обумовлені особливостями електронної зонної структури різних напівпровідників, в том числі малою шириною забороненої зони.

Напівпровідники – широкий клас речовин, що по величині питомої провідності займають проміжне місце між провідниками і діелектриками: у металах провідність $\sigma > 10^5$ См/м, а для діелектриків $\sigma < 10^{-10}$ См/м (провідність зазначена при кімнатній температурі).

Характерною рисою напівпровідників, що відрізняє їх від металів, є зростання провідності σ з ростом температури.

Як правило, зростання $\sigma(T)$ експонентне і спостерігається у широкому інтервалі температур [3]:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\left(\frac{-E_g}{2k_B T}\right)} \quad (1.1)$$

де E_g – енергія активації електронів. З формули 1.1 видно, що поблизу абсолютного нуля температури ($T \approx 0$) напівпровідники мають властивості ізоляторів: $\sigma \approx 0$.

Причиною температурної залежності σ є те, що з підвищенням температури тепловий рух розриває зв'язок електронів у кристалічній ґратці, так що частина електронів, пропорційна $e^{\left(\frac{-E_g}{2k_B T}\right)}$, стає вільними носіями заряду.

Зв'язок електронів у кристалі напівпровідника може бути розірваним не тільки тепловим рухом, але і різними зовнішніми впливами: світлом, потоком швидких частинок, сильним електричним полем і т.д.

Крім різкої температурної залежності σ напівпровідники відрізняються від провідників також і сильною залежністю провідності від концентрації домішок та від різних видів випромінювання.

Саме тому для напівпровідників характерна висока чутливість електропровідності до зовнішніх впливів, а також до концентрації домішок і дефектів в кристалах, оскільки в багатьох випадках енергія активації для електронів, локалізованих поблизу домішок або дефектів, істотно менше, ніж в ідеальному кристалі даного напівпровідника.

Можливість у широких межах керувати електропровідністю напівпровідників електричним і магнітним полем, зміною температури, введенням домішок і т.д. є основою їх численних і різноманітних застосувань.

Напівпровідникові матеріали (рис. 1.2) поділяються за хімічним складом на неорганічні і органічні, а за структурою – на кристалічні, аморфні і рідинні напівпровідники.

Найбільше практичне застосування знаходять неорганічні кристалічні напівпровідники, що у свою чергу розділяються на кілька основних груп.

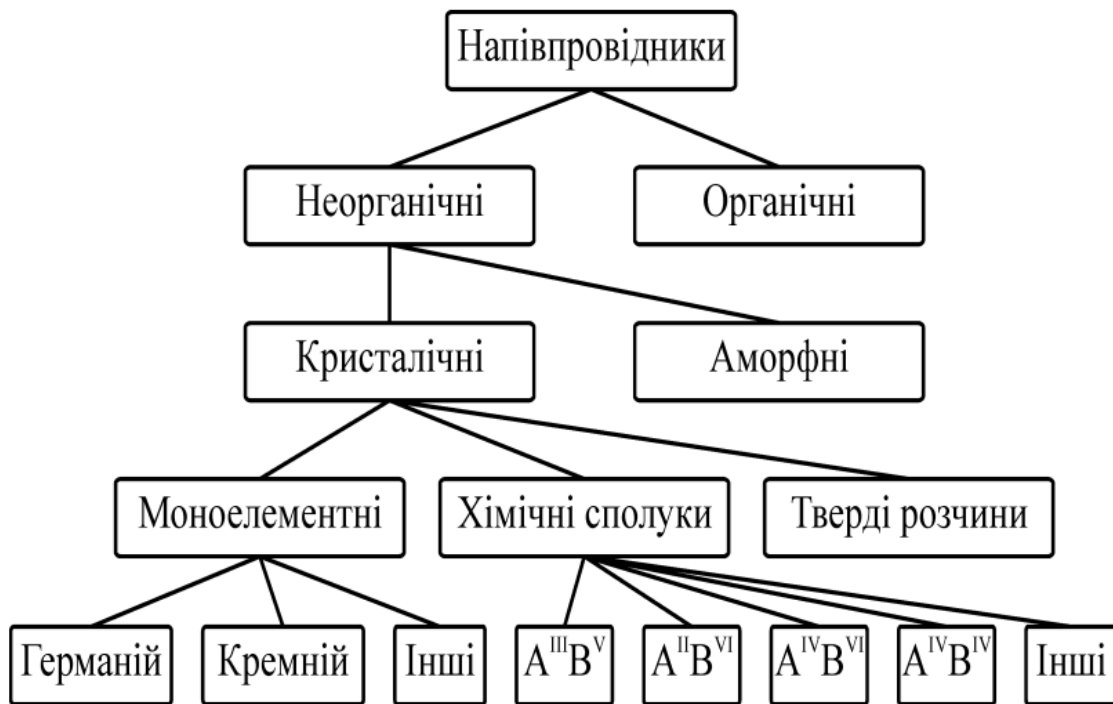


Рисунок 1.2 – Класифікація напівпровідникових матеріалів по складу і властивостям [3]

1.2.1 Елементарні напівпровідники

У періодичній системі елементів до напівпровідників відноситься кілька простих речовин. Найбільш важлива частина елементарних (моноелементних) напівпровідників належать до IV групи елементів: вуглець С (графіт і алмаз), кремній Si, германій Ge, сіре олово α -Sn. Графіт по електричних властивостях близький до провідників ($E_g < 0,1$ eВ), а чисті природні алмази є діелектриками. Однак штучні алмази за рахунок домішок, що у них вводяться, здобувають властивості напівпровідників.

Найважливіші представники цієї групи – Ge і Si – мають кристалічну ґратку типу алмаза. Вони утворюють між собою безперервний ряд твердих розчинів Ge–Si, які також мають напівпровідникові властивості. До моноелементних напівпровідників III групи таблиці Менделєєва можна віднести бор В; з V групи –

фосфор P, арсен As і сурма Sb; з VI групи – сірка S, селен Se і телур Te, з VII групи – іод J [4].

1.2.2 Напівпровідникові сполуки

Кристалічна структура багатьох таких сполук характеризується тетраедричною координацією атомів, як це має місце й у гратці типу алмазу. Тому такі напівпровідникові сполуки одержали назва алмазоподібних напівпровідників.

Серед них найбільший науковий і практичний інтерес представляють бінарні сполуки ($A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$), що у даний час є найважливішими матеріалами напівпровідникової оптоелектроніки. Сучасні технології напівпровідників використовують також трійні і більш складні хімічні сполуки.

Треба також відзначити, що більшість алмазоподібних напівпровідників, що мають близькі властивості, утворюють між собою ізовалентні **тверді розчини**. У твердих розчинах шляхом зміни складу сполуки можна плавно й у досить широких межах керувати найважливішими властивостями напівпровідників, зокрема, шириною забороненої зони і рухливістю носіїв заряду.

Це відкриває додаткові можливості для оптимізації параметрів напівпровідникових приладів, дозволяє домогтися кращого узгодження фізичних характеристик різних компонентів електронної апаратури.

Бінарні сполуки. Перш за все, це біля 30 кристалів сполук трьох та п'ятивалентних елементів $A^{III}B^V = A^{+3}B^{+5}$, з яких найбільш важливим є арсенід галію GaAs, а також Ga, InSb, AlAs, Ga та ін.

Відомі також (і широко застосовуються в електроніці) кристали групи $A^{II}B^{VI}$ – Zn, Zn, Cd, Hg, HgTe і т.д., їх також біля 30.

Сполуки типу $A^{III}B^V$ – найбільш важливі сполуки серед бінарних напівпровідників. Вони є найближчими електронними аналогами кремнію і германія. Кристали $A^{III}B^V$ утворюються в результаті взаємодії елементів III підгрупи періодичної таблиці (бора, алюмінію, галію, індію) з елементами V підгрупи (азотом, фосфором, миш'яком і сурмою). Слід зазначити при цьому, що вісмут і талій не утворюють сполук розглянутого ряду [4].

Напівпровідники групи $A^{III}B^V$ прийнято класифікувати по металоїдному елементі. Відповідно, розрізняють нітриди, фосфіди, арсеніди й антимоніди. За винятком нітридів усі сполуки $A^{III}B^V$ кристалізуються в ґратці цинкової обманки кубічного типу сфалериту. Для нітридів характерна структура гексагонального типу вюрциту. У ґратках того й іншого типів кожен атом елемента III групи знаходиться в тетраедричному оточенні чотирьох атомів елемента V групи і навпаки.

Сполуки $A^{III}B^V$ характеризуються ковалентно-іонним характером хімічного зв'язку (частка іонної складової досягає 15 – 20%). Іноді хімічний зв'язок у цих сполуках трактується як особливий тип хімічного зв'язку, називаного донорно-акцепторним зв'язком. Така назва зумовлена тим, що з чотирьох ковалентних зв'язків, якими кожен атом вбудовується в ґратку, три утворюються усупільненням валентних електронів атомів A^{III} і B^V , але четвертий зв'язок здійснюється неподіленою парою валентних електронів атомів B^V . Утворення зв'язку такого типу відповідає енергетично вигідному переходу електронів від атома B^V в енергетичний стан, загальний для донора (атома B^V) і акцептора .

Напівпровідники $A^{II}B^{VI}$ характеризуються кристалічною структурою типу сфалериту або вюрциту (рідше – структурою «типу NaCl»). Зв'язок між атомами у ґратках носить ковалентно-іонний характер (частка іонної складової досягає 45 – 60%). Для сполук типу $A^{II}B^{VI}$ характерні поліморфізм і наявність політипів кубічної і гексагональної модифікацій. Напівпровідники зі структурою вюрциту мають не тільки п'єзоелектричні, але і піроелектричні властивості. Найважливіші представники цієї групи напівпровідників – кристали CdTe, CdS, ZnTe, ZnSe, ZnO та ZnS [4].

Сполуки типу $A^{IV}B^{VI}$ також мають важливе практичне значення. Вони кристалізуються в структуру «типу NaCl» або в орторомбічну структуру і теж характеризуються ковалентно-іонним типом хімічного зв'язку. Найважливіші представники – напівпровідники PbS, PbSe, PbTe і SnTe; серед твердих розчинів найбільш відомі $Pb_xSn_{1-x}Te$, $Pb_xSn_{1-x}Se$.

Карбід кремнію SiC - єдина хімічна сполука, утворена тільки елементами IV групи. Карбід кремнію має напівпровідникові властивості у всіх структурних модифікаціях: як для β -SiC (структура сфалериту), так і для α -SiC (гексагональна структура), що має близько 15 різновидів. Це один з найбільш тугоплавких і широкозонних кристалів серед широко використовуваних напівпровідникових матеріалів.

1.2.3 Аморфні напівпровідникові матеріали

Типовими представниками цієї групи є склоподібні напівпровідники – халькогенідні й оксидні. До **халькогенідних** відносяться сплави Tl, P, As, Sb, Bi з S, Se та Te. Вони характеризуються широким діапазоном значень електричної провідності, низькими температурами розм'якшення, стійкістю до кислот і луг. Типові представники – тверді розчини As_2Se_3 - As_2Te_3 і Tl_2Se - As_2Se_3 [5].

Оксидні склоподібні напівпровідники, наприклад, сполука типу V_2O_5 - P_2O_5 - RO_x (R-метал I-IV групи) характеризуються електричною провідністю $10^{-4} - 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$. Усі склоподібні напівпровідники мають електронну провідність, виявляють фотопровідність і термо-електро-рушильну силу (термо-ЕРС). При повільному охолодженні вони звичайно перетворюються у кристалічні напівпровідники.

Іншим важливим класом некристалічних напівпровідникових матеріалів є тверді розчини ряду аморфних напівпровідників із воднем – так називані **гідровані** некристалічні напівпровідники: α -Si:H, α -Si_{1-x}C_x:H, α -Si_{1-x}Ge_x:H, α -Si_{1-x}N_x:H, α -Si_{1-x}Sn_x:H. У механізмі електропровідності аморфних неорганічних і напівпровідників виявлено ряд особливостей. У цих напівпровідниках водень має високу розчинність і замикає на собі значну кількість "вільних" зв'язків, характерних для аморфних напівпровідників. У результаті різко знижується щільність енергетичних станів у забороненій зоні і з'являється можливість створення p-n переходів

1.2.4 Органічні напівпровідники

Такі напівпровідники являють собою тверді речовини, що мають (або набувають під впливом зовнішніх впливів) електронну або діркову провідності. Органічні напівпровідники характеризуються наявністю в молекулах системи сполучні зв'язки (валентності). Носії заряду в органічних напівпровідниках утворюються в результаті збудження електронів, делокалізованих по системі сполучених зв'язків. Енергія активації, необхідна для утворення носіїв заряду в органічних напівпровідниках, знижується в міру збільшення числа сполучень у молекулі й у полімері може бути порядку теплової енергії.

Більшість органічних матеріалів є електроізоляторами зі значенням електричної провідності при кімнатній температурі в діапазоні $10^{-9} - 10^{-14}$ См/см. Це обумовлено двома основними причинами. Перша причина полягає в тім, що найвища зайнята молекулярна орбіталь у більшості молекул цілком заповнена електронами, а нижча незайнята молекулярна орбіталь відділена від вищої орбіталі значною енергетичною щілиною. Друга причина – тверді стани звичайно являють собою молекулярні структури, що не володіють системою ковалентних зв'язків, які охоплюють макроскопічні стани. Тому квантово-механічні взаємодії між найвищими зайнятими молекулярними орбіталями суміжних молекул є слабкими, і зони валентності, утворені цими взаємодіями, дуже вузькі. Подібно цьому зона провідності, що виникає при взаємодії між орбіталями, теж дуже мала, так що енергетична щілина, власне кажучи, виявляється такою же, як і у вільних молекул.

Щоб одержати підвищену провідність і, отже, властивості напівпровідника, необхідно зменшити заборонену зону між орбіталями. Це може бути досягнуто в органічних сполуках, наприклад, включенням гетероатомів з парою валентних електронів із протилежними спінами (наприклад, поліацетилену, поліаніліну або поліароматиків). Така зменшена зона полегшує електронам переходи між зонами провідності і валентною зоною, що наближає речовину до властивостей напівпровідника.

На основі органічних напівпровідників у даний час реалізовані транзистори і фото-люменесцентні прилади, що вже застосовуються та досить перспективні для

приладів, які відображають інформацію (гнучких плоских екранів). Потенційно такі напівпровідники мають широке комерційне застосування. Є багато технічних застосувань органічних напівпровідників, таких, як гнучкі дисплеї, де їхні переваги переважають недоліки. У порівнянні з традиційними кремнієвими пристроями вони коштують дешевше, багато процесів їхнього виготовлення виконуються при кімнатних температурах, а використовувана технологія стає усе простішою.

Органічні напівпровідники знаходять також застосування як світлочутливі матеріали (наприклад, для процесів запису інформації) у мікроелектроніці та для виготовлення різного роду датчиків. Дослідження органічних напівпровідників важливо для розуміння процесів перетворення і переносу енергії в складних фізико-хімічних і особливо в біологічних тканинах. З органічними напівпровідниками, зокрема з іон-радикальними солями, зв'язана перспектива створення надпровідників з високою температурою переходу (розділ 9.5, сполука TTF-TCNQ) [5].

До органічних напівпровідників відносяться органічні барвники (наприклад, метиленовий голубий, фталоціанини), ароматичні сполуки (нафталін, антрацен, віолантрен і ін.), полімери зі сполученими зв'язками, деякі природні пігменти (хлорофіл, β -каротін і ін.), молекулярні комплекси з переносом заряду, а також іон-радикальні солі.

Органічні напівпровідники існують у вигляді монокристалів, полікристалічних або аморфних порошоків і плівок. Величини питомого опору ρ при кімнатній температурі в органічних напівпровідників лежать у діапазоні від 10^{18} Ом \times см (нафталін, антрацен) до 10^{-2} ом \times см (іон-радикальні солі). Найбільш елетропровідними органічними напівпровідниками є іон-радикальні солі, в основному на основі аніон-радикала тетраціанхінодіметана. Вони виявляють електропровідність металевого характеру. В органічних напівпровідниках з низькою електропровідністю спостерігається явище фотопровідності.

Органічні напівпровідники мають особливості, що визначаються молекулярним характером їхньої структури і слабкою міжмолекулярною взаємодією:

- поглинання світла викликає електронне збудження молекул, що може мігрувати по кристалу у виді екситонів;
- утворення носіїв заряду під дією світла зв'язано з розпадом екситонів на поверхні кристалу, біля дефектів його структури, на домішках, при взаємодії екситонів один з одним, а також з автоіонізацією сильно збуджених молекул;
- зони провідності органічних напівпровідників вузькі ($\sim 0,1$ eV) і тому рухливість носіїв заряду в них, як правило, мала (~ 1 см²/В×с);
- у кристалах іон-радикальних солей міжмолекулярна взаємодія анізотропна, що приводить до високої анізотропії оптичних і електричних властивостей і дозволяє розглядати цей клас органічних напівпровідників як квазіодновимірні системи;

Механізми провідності в органічних напівпровідниках зумовлюють фундаментальні межі рухливості носіїв заряду. Верхня межа мікроскопічної мобільності носіїв в органічних молекулярних кристалах (визначена при температурі 300 К) лежить в інтервалі від 1 до 10 см²/В×с. За цю межу можуть бути відповідальні слабкі сили міжмолекулярної взаємодії (у більшості випадків це сили Ван-дер-Ваальса з енергією розриву, меншою за 10 ккал/моль), оскільки коливальна енергія молекул досягає величини, близької до енергій міжмолекулярних зв'язків при кімнатній температурі або вище [6].

На противагу цьому в неорганічних напівпровідниках, таких як кремній і германій, атоми утримуються разом дуже сильними ковалентними зв'язками, що у випадку кремнію мають енергію розриву до 76 ккал/моль. У цих напівпровідниках носії заряду рухаються як делокалізовані плоскі хвилі в широкій зоні і мають дуже високу рухливість ($\mu \gg 1$ см²/В×с). Рухливість обмежується завдяки розсіюванню носіїв на коливаннях кристалічної ґратки і, таким чином, знижується при підвищенні температури.

У неупорядкованих органічних напівпровідниках зонний транспорт не реалізується, а транспорт носіїв (поляронів) здійснюється за допомогою стрибків між локалізованими станами, і носії розсіюються на кожному стрибку (стрибкова провідність).

Стрибки полегшуються взаємодією поляронів з фононами, так що рухливість зростає з температурою, залишаючись усе-таки дуже низької ($\mu \ll 1 \text{ см}^2/\text{В}\times\text{с}$).

Границя між зонним транспортом і стрибками визначається матеріалами, що володіють рухливістю між 0,1 і $1 \text{ см}^2/\text{В}\times\text{с}$. Високо-впорядковані органічні напівпровідники, такі як антрацен і пентацен, мають рухливість носіїв заряду в цьому проміжному діапазоні, а в деяких випадках відзначається незалежність рухливості від температури, у тому числі й у полікристалічних тонких плівках пентацена. Це спостереження послужило аргументом на користь того, що активований температурою механізм стрибкового транспорту зарядів може бути виключений для високоякісних тонких плівок пентацена.

При низьких температурах (менш як 250 К) у монокристалах пентацена зонний транспорт стає основним механізмом переносу носіїв. У цьому разі зафіксована досить висока рухливість – від $400 \text{ см}^2/\text{В}\times\text{с}$ до більш ніж $1000 \text{ см}^2/\text{В}\times\text{с}$. При низьких температурах енергія коливань набагато менше, ніж енергія міжмолекулярних зв'язків, і фононне розсіювання дуже слабке. З наближенням до кімнатних температур фононне розсіювання зростає, внесок зонного механізму транспорту зменшується, а внесок механізму стрибків – збільшується. Комбінація цих двох механізмів пояснює той факт, що рухливість падає з підвищенням температури від декількох градусів Кельвіна до приблизно 250 К, а після цього починає повільно зростати.

1.2.5 Кристалічні напівпровідники

Тверді речовини за ступенем упорядкованості взаємного розташування атомів та молекул діляться на кристалічні та аморфні. В аморфних речовинах спостерігається закономірність взаємного розташування сусідніх атомів, що не поширюється на великі ділянки тіла і не повторюються періодично у просторі, тобто ближній порядок. Кристалічні речовини являють собою впорядковану в просторі періодичну структуру, що характеризується далеким порядком розташування атомів, що зберігається в часі за умов зовнішнього середовища. Ця впорядкована періодична структура має назву кристалічної ґратки.

Кристалічні речовини широко використовуються в електронних приладах і часто називають кристалами. Вони мають анізотропію механічних, електричних, теплових та інших властивостей. Кристалічна речовина може мати будову як монокристалу чи полікристала. У монокристалі проявляється строга закономірність кристалографічних властивостей у всьому його обсязі. Полікристалічна речовина має кристалічну структуру, яка не виявляється в макроскопічних масштабах.

В основі кристалічної ґратки лежить елементарна комірка — найменший багатогранник, який можна виділити в кристалі. Послідовне чергування у просторі елементарних комірок призводить до утворення кристалічних ґраток у всьому обсязі. Місця розташування атомів у ґратках називаються вузлами ґратки, а простір між ними — міжвузлями. Найважливішою властивістю кристалічних ґраток є трансляційна симетрія — при паралельному переміщенні (трансляції) решітки на деякий вектор кристал поєднується сам з собою. Це забезпечує кристалу періодичність низки фізичних характеристик, наприклад, щільність заряду.

ґратки, побудовані трансляцією простого елементарного осередку, отримали назву ґраток Браве (рис. 1.3). Розрізняють 14 типів ґрат Браве, об'єднаних у сім систем симетрії (сингоній): триклінна, моноклінна, ромбічна, тетрагональна, тригональна (ромбоедрична), гексагональна, кубічна.

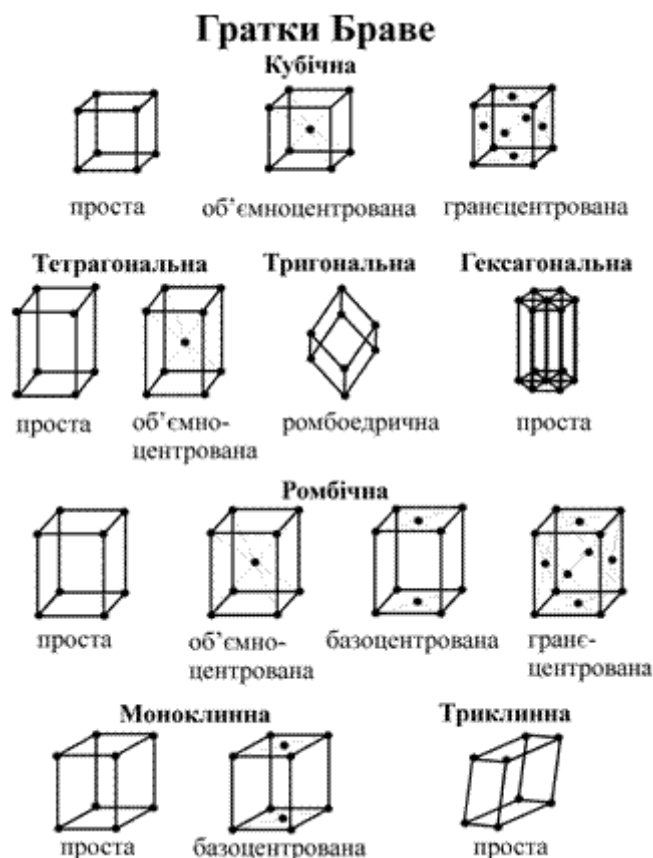


Рисунок 1.3 – Гратки Браве [1]

Кристалічні решітки характеризуються постійними **a**, **b**, **c** що представляють відстань між атомами вздовж кристалічних осей **x**, **y**, **z**. Ці осі, що виходять із вузла решітки, спрямовані вздовж ребер кристала.

Металам притаманні кубічні та гексагональні структури. Постійні грати, як правило, майже дорівнюють розмірам атомів, що свідчить про дуже щільну упаковку частинок у кристалі. Щільність упакування атомів у напівпровідників менше. Це значною мірою визначає їх властивості. Щільність упакування визначається координаційним числом – кількістю найближчих сусідніх атомів кожного атома решітки. Для металів характерні числа 8 або 12, для напівпровідників - $8-N$, де N номер групи елементів в Періодичній системі. Наприклад, для кремнію (Si) та германію (Ge) ($N = 4$) координаційне число дорівнює чотирьом.

Елементи IV групи, що мають напівпровідникові властивості: C (алмаз), Si, Ge, а-Sn (сіре олово), кристалізуються в грати алмазного типу. Такі грати

складаються з двох кубічних гранецентрованих ґрат, зміщених відносно один одного на $1/4a$, $1/4a$, $1/4a$. [3].

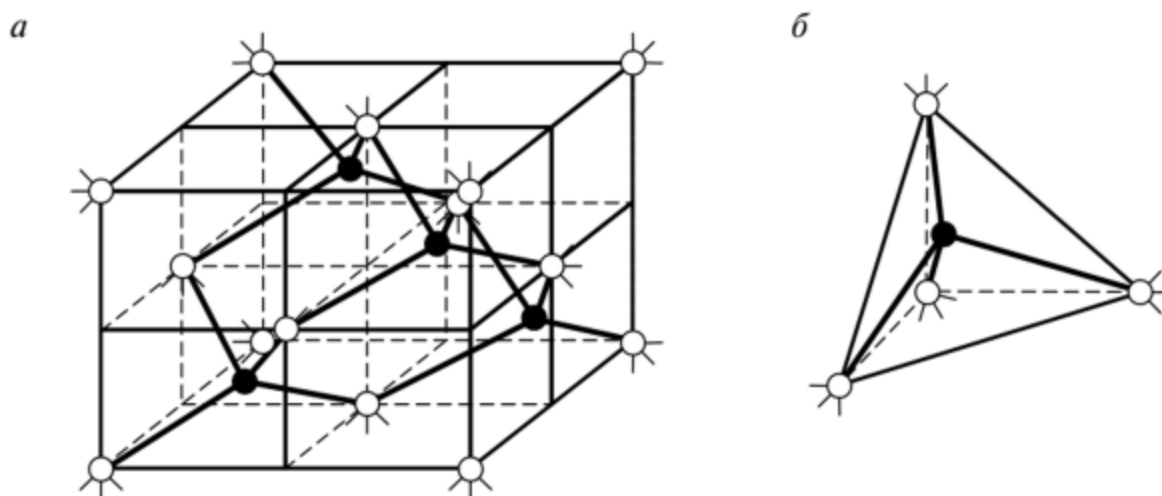


Рисунок 1.4 – Схема кристалічної ґратки алмазного типу (а) та структура зв'язків атома з найближчими сусідніми атомами (б) у формі тетраедра [6]

Елементарна комірка такої решітки складається з восьми атомів: чотири з них належать окремо взятій комірці, шість атомів (що знаходяться в центрі граней – на перетині діагоналей) одночасно належать двом елементарним коміркам, тобто даній комірці — наполовину, кожен із восьми атомів (розташованих у вершинах елементарної комірки) належить одночасно восьми сусіднім коміркам, тобто даній комірці – на $1/8$. З урахуванням частки участі атома у цій клітинці кількість атомів у ній буде: $4 \cdot 1 + 6 \cdot 1/2 + 8 \cdot 1/8 = 8$ атомів. Кожен атом безпосередньо пов'язаний валентними електронами з чотирма сусідніми атомами утворюючи структуру типу тетраедра.

Подібну структуру мають також багато напівпровідникових сполук типу A^nV^{VI} , $A^{IV}V^V$, а також потрійні сполуки, наприклад $A^nV^{IV}C$ та інші. Для опису положення тієї чи іншої атомної площини кристалі використовують систему трьох індексів Міллера (h, k, l) [6].

Серед кристалів є рідкі кристалічні речовини. Молекулярна структура рідких кристалів характеризується далеким порядком лише вздовж однієї з координатних

осей (мезоморфний стан). Відмінною рисою будови молекул рідких кристалів є їхня витягнута форма — сигароподібна, плоска або планкоподібна. Такі молекули мають дипольні властивості та здатність до взаємного впорядкування. Це дозволяє їх використовувати в пристроях пам'яті, в системах кольорової цифрової та буквеної індексації з малим споживанням енергії та великою роздільною здатністю.

Найбільш характерні кристалічні напівпровідники та напівпровідникові сполуки наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Напівпровідники та напівпровідникові сполуки [5].

Матеріал	Хімічна формула	Тип з'єднання
Германій	Ge	A^{IV}
Кремній	Si	A^{IV}
Карбід кремнію	SiC	$A^{IV}B^{IV}$
Антимонід галію	GaSb	A^mB^v
Арсенід галію	GaAs	$A^{ni}B^v$
Фосфід галію	GaP	$A^{ni}B^v$
Антимонід Індія	InSb	$A^{ni}B^v$

1.3 Методи отримання неорганічних напівпровідників

Необхідною умовою досягнення високих електрофізичних характеристик напівпровідників є їхнє глибоке очищення від сторонніх домішок. У випадку Ge і Si ця проблема вирішується шляхом синтезу їхніх летучих сполук (хлоридів, гідридів) і наступного глибокого очищення цих сполук із застосуванням методів ректифікації, сорбції, часткового гідролізу і спеціальних термічних обробок.

Хлориди особливої чистоти піддаються потім високотемпературному відновленню воднем з попереднім глибоким очищенням, з осадженням відновлених продуктів на кремнієвих або германієвих прутках. З очищених гідридів Ge і Si виділяють шляхом термічного розкладання. У результаті

одержують Ge і Si із сумарним вмістом залишкових електрично-активних домішок на рівні 10^{-7} – $10^{-9}\%$. Одержання особливо чистих напівпровідникових сполук здійснюють їхнім синтезом з елементів, що пройшли глибоке очищення.

Сумарний зміст залишкових домішок у вихідних матеріалах звичайно не перевищує 10^{-4} - 10^{-5} %.

Синтез напівпровідникових сполук, що легко розкладаються, проводять або в запаяних кварцових ампулах при контрольованому тиску парів летучого компонента в робочому об'ємі, або під шаром рідкого флюсу (наприклад, особливо чистого збезводненого B_2O_3). Синтез сполук, що мають великий тиск парів летучого компонента над розплавом, здійснюють у камерах високого тиску. Часто процес синтезу сполучають з наступним додатковим очищенням сполук шляхом спрямованої або зонної кристалізації розплав.

Найбільш розповсюджений спосіб одержання монокристалів напівпровідників – витягування з розплаву по методу Чохральського. Цим методом одержують монокристали Ge, Si, сполуки типу $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, $A^{IV}B^{VI}$ і ін. Витягування монокристалів напівпровідників, що не розкладаються, проводять в атмосфері H_2 , інертних газів або в умовах глибокого вакууму. При вирощуванні монокристалів сполук, що розкладаються, (InAs, GaAs, In, Ga, CdTe, PbTe і ін.) розплав герметизують шаром рідкого флюсу (B_2O_3) та витягають монокристали, занурюючи затравку у розплав через флюс і підтримуючи в робочому об'ємі над розплавом визначений тиск інертного газу. Часто процес витягування здійснюють у камерах високого тиску, сполучаючи процес вирощування монокристалів з попереднім синтезом сполук під шаром флюсу (GaAs, InP, GaP і ін.) [7].

Для вирощування монокристалів напівпровідників широко використовують також методи спрямованої і зонної кристалізації розплаву у контейнері. У випадку сполук, що розкладаються, для монокристалів необхідного стехіометричного складу процес проводять у запаяних кварцових ампулах, підтримуючи рівноважний тиск пару летучого компонента над розплавом; часто для цього потрібні камери високого тиску, у яких підтримується протитиск інертного газу.

При одержанні монокристалів необхідної кристалографічної орієнтації використовують орієнтовані відповідним чином монокристалічні затравки.

Для вирощування монокристалів напівпровідників, що мають підходяще сполучення щільності і поверхневого натягу розплаву, використовують метод безтигельної зонної плавки. Найбільше поширення цей метод одержав у технології одержання монокристалів Si, який має порівняно невисоку щільність і досить великий поверхневий натяг розплаву. Відсутність контакту розплаву зі стінками контейнера дозволяє одержувати цим методом найбільш чисті монокристали. Звичайно процес вирощування монокристалу сполучають з попереднім додатковим очищенням напівпровідників методом зонної плавки.

Для одержання монокристалів ряду тугоплавких напівпровідникових сполук, що розкладаються (напр., Cd, Zn, Si, AlN і ін.), використовують кристалізацію з газової фази (методи сублімації і хімічних транспортних реакцій). У випадку якщо при вирощування монокристалу не вдається одержати напівпровідника необхідного стехіометричного сполучення, кристали розрізають на пластини, які піддають додатковому відпалу у парах відсутнього компонента. Найбільше часто цей прийом використовують у технології одержання монокристалів вузькозонних сполук типу $A^{II}B^{VI}$ і $A^{IV}B^{VI}$, де власні точкові дефекти сильно впливають на концентрацію і рухливість носіїв заряду, тобто виявляють високу електричну активність ($PbTe$, $Pb_xSn_{1-x}Te$, $Cd_xHg_{1-x}Te$ і ін.). При цьому вдається знизити концентрацію носіїв заряду в кристалах на кілька порядків. Для вирощування профільованих монокристалів напівпровідників (стрічки, прутки, трубки і т. д.) використовують спеціальні методи [7].

Широко поширене одержання напівпровідників у виді монокристалічних плівок на різного роду монокристалічних підкладках. Такі плівки називають **епітаксіальними**, а процеси їхнього одержання – епітаксіальним нарощуванням. Якщо епітаксіальна плівка нарощується на підкладку тієї ж речовини, то одержувані структури називають гомоепітаксіальними; при нарощуванні на підкладку з іншого матеріалу – гетероепітаксіальними. Можливості одержання тонких і надтонких одношарових і багатшарових структур різноманітної геометрії

із широкою варіацією сполук і електрофізичних властивостей по товщині і поверхні нарощуваного шару, з різкими границями р-п-переходів і гетеропереходів обумовлюють широке використання методів епітаксialного нарощування в мікроелектроніці й інтегральній оптиці, у практиці створення великих і швидкодіючих інтегральних схем, а також оптоелектронних приладів.

Для одержання епітаксialних структур напівпровідників використовують методи рідинної, газофазної і молекулярно-пучкової епітаксії. Методом рідинної епітаксії одержують гомо- і гетероепітаксialні структури на основі сполук типу $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, $A^{IV}B^{VI}$ і їхніх твердих розчинів. Як розчинник звичайно використовують розплав нелетучого компонента відповідної сполуки. Нарощування епітаксialного шару проводять або в режимі програмувального зниження температури, або з попередньо переохолодженого розплаву. Цим методом можна відтворено одержувати багат шарові структури з товщиною окремих шарів до $\sim 0,1$ мкм при товщині перехідних шарів на гетеро-границях порядку десятків нм.

Найбільш розповсюдженими методами газофазної епітаксії є: хлоридна, хлоридно-гідридна і з застосуванням металоорганічних сполук. При хлоридній епітаксії як вихідні матеріали використовують летучі хлориди елементів, що входять до складу напівпровідників. Вихідними матеріалами при хлоридно-гідридній епітаксії є летучі хлориди і гідриди відповідних елементів, а при епітаксії із застосуванням летучих металоорганічних сполук використовують також летучі гідриди. Процеси здійснюють у реакторах проточного типу, де транспортним газом є H_2 . Усі вихідні матеріали і H_2 піддають попередньому глибокому очищенню.

Переваги епітаксialного нарощування плівок із застосуванням металоорганічних сполук такі:

- відсутність у газовій фазі хлор-утримуючих компонентів, хімічно
- взаємодіючих з підкладкою;
- низькі робочі температури;
- простота апаратурного оформлення;
- легкість регулювання товщини і складу епітаксialних шарів.

Метод забезпечує створення багатошарових структур з тонкими, однорідними по товщині шарами і різкими границями розділу і дозволяє відтворено одержувати шари товщиною менш 10 нм при ширині перехідної області менш 1-5 нм. Його широко використовують для вирощування епітаксіальних структур сполук типу $A^{III}B^V$, $A^{III}B^{VI}$, $A^{IV}B^{VI}$ і твердих розчинів на їхній основі. Одержання епітаксіальних структур Si і Ge здійснюється в процесі водневого відновлення відповідних хлоридів або термічним розкладанням гідридів. Перспективним є метод молекулярно-пучкової епітаксії. Процес здійснюють в умовах глибокого вакууму ($10^{10} - 10^{-12}$ мм рт.ст.) при використанні молекулярних пучків відповідних елементів. Застосування особливо чистих вихідних речовин, створення багатокамерних установок з охолоджуваними до низьких температур і обернених підкладок дозволяють різко підвищити чистоту вирощуваних шарів і їхня однорідність.

Розроблено метод одержання епітаксіальних композицій, що містять кілька летучих компонентів. Істотно підвищується "гнучкість" процесу застосуванням при нарощуванні шарів і їхньому легуванні іонних пучків, а також летучих сполук як джерела відповідних елементів. Детальне дослідження механізмів кристалізації дозволило покращити умови травлення підкладок з одержанням атомно-дзеркальних і атомно-чистих поверхонь, збільшити швидкості росту шарів при збереженні рекордно низьких температур епітаксіального нарощування. Усе це дозволяє одержувати цим методом багатошарові епітаксіальні структури з надтонкими шарами і найменшою товщиною перехідних шарів. Методом молекулярно-пучкової епітаксії вирощують епітаксіальні композиції Si, сполуки типу $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, $A^{IV}B^{VI}$ і тверді розчини на їхній основі [8].

Застосування низькотемпературних методів епітаксії вирішує не тільки проблему створення гетеропереходів з різкими границями розділу і *p-n* переходів, але і сприяє удосконалюванню створюваних епітаксіальних композицій. Прогрес у розвитку низькотемпературної молекулярно-пучкової епітаксії і епітаксії із застосуванням металоорганічних сполук дозволив одержати високоякісні гетероструктури ряду сполук типу $A^{III}B^V$ на кремнієвих підкладках (GaAs/Si, GaAs-

GaAlAs/Si, InP/Si, GaP/Si). Це відкриває нові можливості на шляху інтеграції електронних пристроїв і підвищення їхньої швидкодії.

Одержання однорідних по товщині та із заданим розподілом сполуки й електричних властивостей у тонких і надтонких епітаксіальних шарів з різкими *p-n*-переходами і гетерограницями зробило реальним створення багатошарових композицій з надтонкими шарами, які являють собою, по суті, новий тип напівпровідників, тому що їхні властивості визначаються характером розподілу, товщиною і набором сполук у шарах. Товщини окремих шарів можуть бути доведені до величин, менших довжини вільного пробігу електронів, що дозволяє "конструювати" зонну структуру напівпровідника. Власне кажучи, мова йде про новий напрямок у техніці вирощування монокристалів – «кристало-інженерії», створення періодичних структур з ультра-тонкими прошарками – надграток, фізичні властивості яких визначаються квантово-розмірними ефектами.

1.3.1 Технологічний процес отримання напівпровідників

Створення мікросхеми передбачає використання піску. Пісок майже повністю складається з кварцу, а це основна форма діоксиду кремнію SiO_2 . Сам кремній – другий за поширеністю елемент у земній корі. Щоб отримати з кварцу чистий кремній, пісок змішують з коксом (кам'яне вугілля) і розжарюють в доменній печі до 1800°C (рис. 1.5). Так видаляється кисень. Метод називається карботермічне відновлення .

В результаті виходять блоки кремнію полікристалічної структури, так званий технічний кремній.

Чистота одержаного кремнію досягає 99,9%, але його необхідно очистити, щоб одержати полікристалічний кремній. Тут застосовують різні способи. Найпопулярніші – хлорування, фторування та витравлення домішок на міжкристалітних кордонах. Але технічні процеси очищення кремнію постійно вдосконалюються.



Рисунок 1.5 – Доменна піч з кварцом та коксом [9]

Потім із полікристалічного кремнію вирощують монокристалічний кремній – це кремній електронної якості з чистотою 99,9999% (1 атом домішок на мільйон атомів кремнію). Кристали вирощують методом Чохральського, тобто введенням затравки в розплав, а потім витягуванням кристала вгору. Метод (рис. 1.6) названо на честь польського хіміка Яна Чохральського.

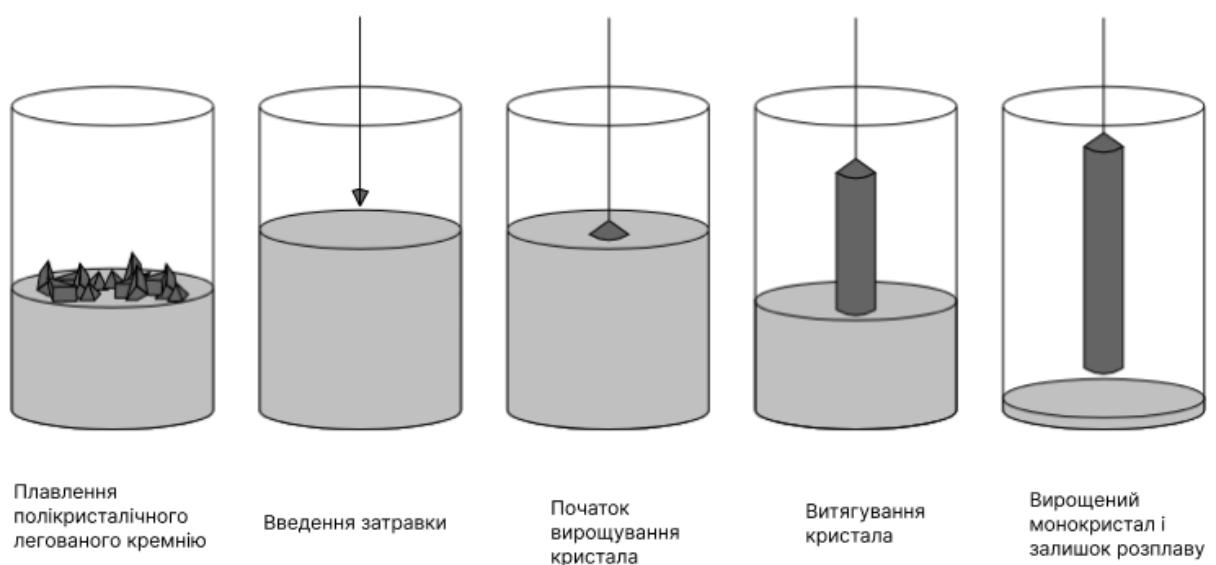


Рисунок 1.6 – Схема методу Чохральського [9]

Монокристалічний кремній є красивими циліндричними зливками — адже їх витягували з розплаву під впливом земної гравітації (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – Монокристалічний кремній електронної якості, нижня частина зливка [9]

З цих циліндричних зливків нарізають кремнієві пластини діаметром 100, 150, 200 або 300 мм (рис. 1.8). Багато хто задається питанням, чому у пластин кругла форма, адже це нераціональна витрата матеріалу при нарізанні на прямокутні мікросхеми. Причина в тому, що кристали вирощують методом Чохральського, виймаючи вгору. Чим більший діаметр кремнієвої пластини – тим ефективніше витрачається матеріал.

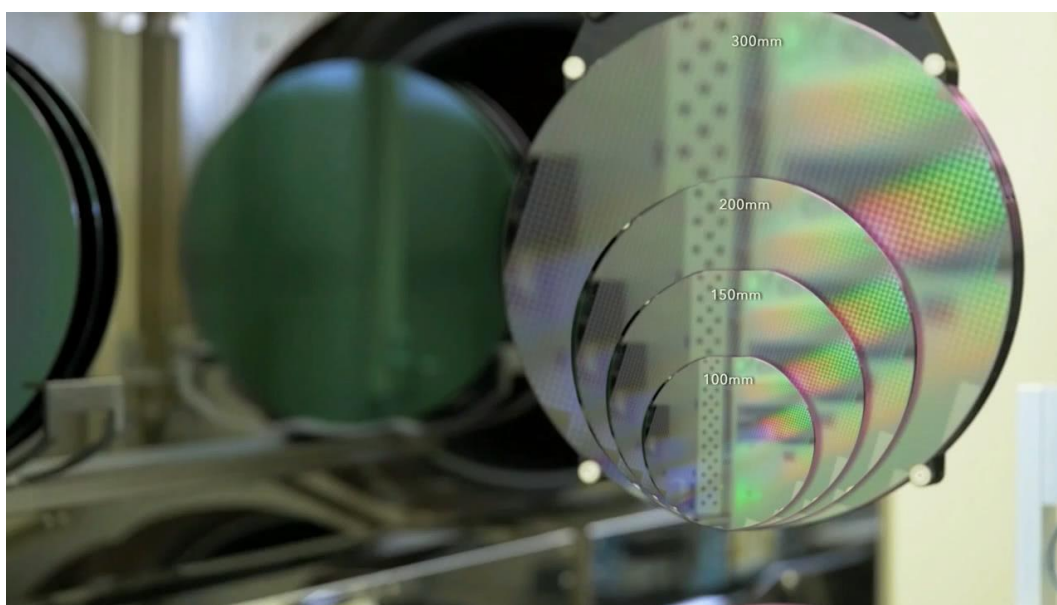


Рисунок 1.8 – Кремнієві пластини діаметром 100, 150, 200 та 300 мм. [10]

У світі всього чотири компанії, здатні виробляти просунуті мікросхеми високого рівня: Samsung, GlobalFoundries, Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) та Intel [10].

У кристалі кремнію у кожного атома по 4 електрони — і кожна з чотирьох сторін утворює зв'язок із сусіднім атомом у квадратній кристалічній решітці. Вільних електронів немає. Значить, кристал не проводить електричний струм за кімнатної температури. Щоб запустити вільні електрони, потрібно замінити деякі атоми кремнію на інші атоми елементів з 3 або 5 електронами на зовнішній орбіті. Для цього ідеально підходять сусідні з кремнієм елементи за таблицею Менделєєва – бор (3 електрони) і фосфор (5). Їх підмішують до кремнію, і ці атоми встають у його кристалічні ґрати. Але в ній лише чотири зв'язки. Відповідно, або одного зв'язку не вистачає, або звільняється вільний електрон. Заряд такого атома плюс чи мінус. Так бор та фосфор у ґратах кремнію створюють два шари напівпровідників із зарядами протилежного знака. "Дірковий" шар p-(positive) з бором і недостатнім електронном – стік. А «електронний» шар n-(negative) із фосфором та зайвими електронами — витік. Вони покриті ізолятором із оксиду кремнію (рис.1.9).

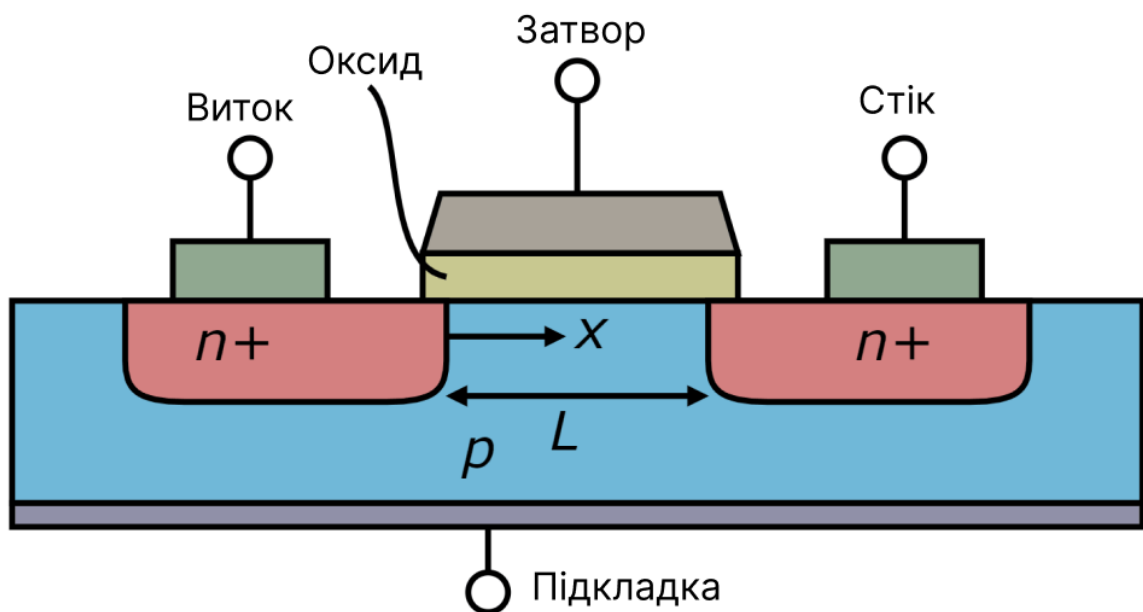


Рисунок 1.9 – Конструкція транзистора MOSFET з керуючим р-n-переходом [11]

Транзистор – мінімальний елемент та основний компонент інтегральної схеми. Залежно від напруги в затворі з полікристалічного кремнію струм потече з витoku, чи ні. Це відповідає логічному 0 та 1.

Сучасні мікросхеми складаються з мільярдів транзисторів, з'єднаних у складні конструкції: комірки пам'яті, мікроконтролери, криптографічні модулі тощо. Усі вони розташовуються на мікросхемі відповідно до плану [12].

Проектуванням займаються цілі відділи із сотень інженерів, адже на сучасних мікросхемах величезна кількість елементів. У процесорів виробництва TSMC (AMD) по 7-нм техпроцесу 113,9 млн. транзисторів на мм^2 . Intel поставила амбітну мету досягти щільності 100 млн транзисторів на мм^2 вже на техпроцесі 10 нм, майже як 7 нм у TSMC. Ціль виявилася надто амбітною — з цим і пов'язана ганебна затримка з впровадженням 10 нм [11].

З отриманих файлів на заводі роблять фотомаски - шаблони друку мікросхем (рис.1.10). Вони схожі на плівкові негативи, з яких на фотозбільшувачі друкуються фотографії. Але якщо у фотографії ця техніка залишилася у минулому, то у виробництві мікроелектроніки вона збереглася досі.

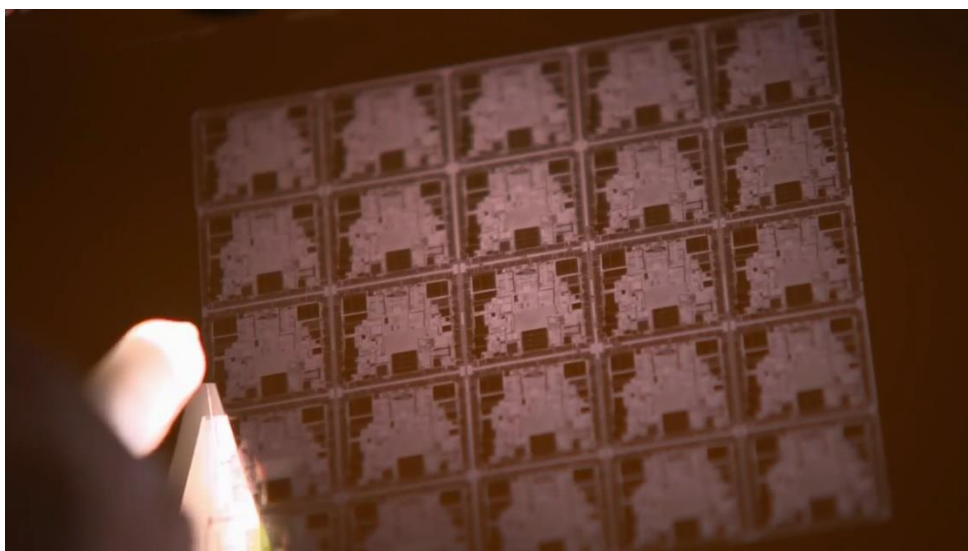


Рисунок 1.10 – Фотомаска шаблон для друку мікросхем [12]

Ось як виглядає сучасний «фотозбільшувач», а саме степер компанії ASML (рис.1.11) для фотолітографії в глибокому ультрафіолеті (EUV).

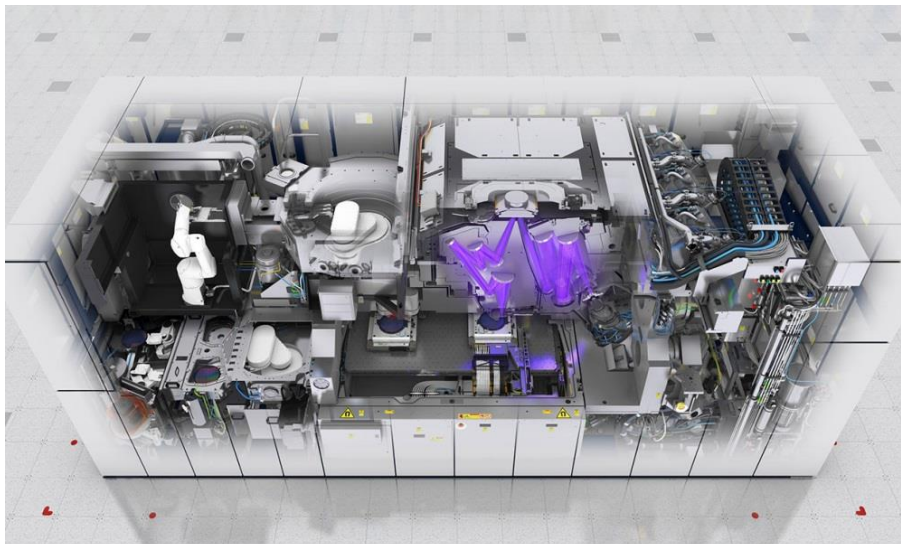


Рисунок 1.11 – Степер компанії ASML [13]

Фіолетовим кольором показаний маршрут світлових імпульсів від джерела до підсвічування, потім до фотомаски з топологією кристала - і через проекційну оптику на кремнієву пластину (рис. 1.12).

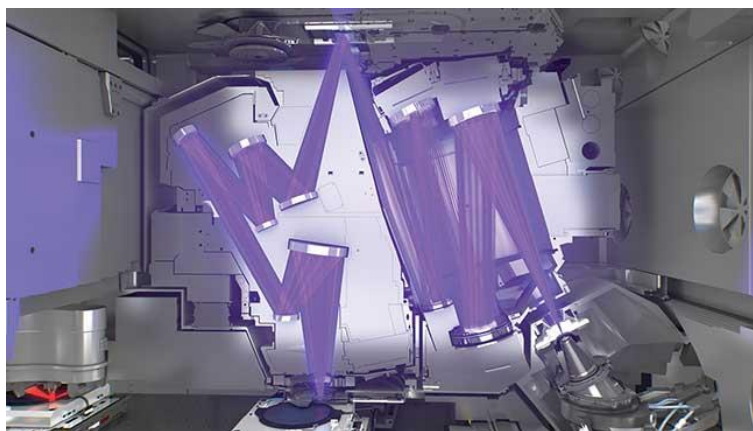


Рисунок 1.12 – Маршрут світлових імпульсів [13]

Пластини з монокристалічного кремнію, отриманого на першому етапі нашого процесу, містяться в цьому степері, і тут засвічуються через фотомаску, роздруковану з файлів з проектного бюро (рис.1.13). Це завершення всього технологічного циклу.

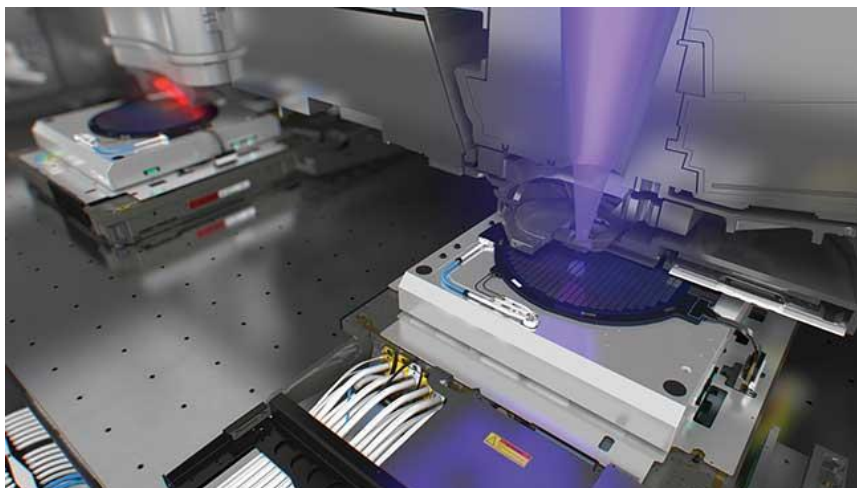


Рисунок 1.13 – Засвітлення кремнієвої пластини [14]

Усередині найсучаснішої EUV-машини кожену секунду 50 тис. крапель розплавленого олова падають через камеру на її основі. Пара високоенергетичних лазерів на вуглекислому газі вдаряє по кожній краплі, створюючи плазму, яка, своєю чергою, випромінює світло потрібної довжини хвилі. Перший імпульс перетворює краплю олова в туманну форму млинця, так що другий імпульс, який є потужнішим і слідує за ним всього через 3 мікросекунди, підриває олово в плазму, яка світиться на довжині хвилі 13,5 нанометрів. Потім світло збирається, фокусується і відбивається від візерункової маски, щоб проектувати візерунок на кремнієву пластину. Для 7-нм процесорів використовується літографія в екстремальному ультрафіолеті із довжиною хвилі 13,5 нм [14].

Засвітлення пластини – не єдиний крок на виробництві. Перед степером пластини нагрівають до 1000°C та окислюють поверхню, щоб сформувати шар з діоксиду кремнію SiO_2 . Потім на цьому шарі діелектрика поступово розподіляють фоточутливий матеріал — фоторезист. І лише потім поміщають у степер (рис. 1.14).



Рисунок 1.14 – Засвітлення фоторезиста на кремнієвій пластині у степпері [16]

На засвічених ділянках пластини оголюється шар SiO_2 , все інше захищене фоторезистом. Тепер настає етап плазмового витравлення (plasma etching), де із засвічених ділянок знімається шар SiO_2 , створюючи поглиблення. Витрачені ділянки знову окислюють. Поверх SiO_2 наносять електропровідний шар полікристалічного кремнію. Потім знову покривають фоторезистом і цикл повторюється кілька разів, створюючи нові поглиблення вже в другому шарі, потім у третьому, потім пластина покривається шаром металу і цикл повторюється (рис.1.15).

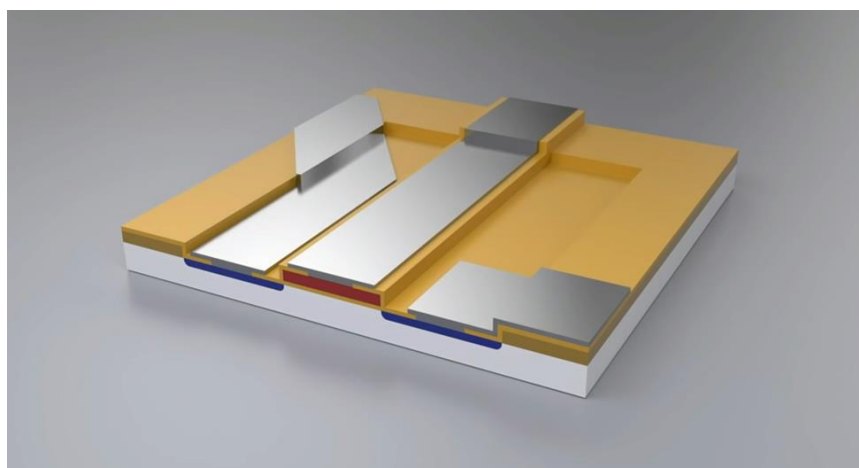


Рисунок 1.15 – Схема циклів нанесення різних матеріалів при створенні багатошарову структуру транзистора [16]

За декілька циклів нанесення різних матеріалів (фоторезист, полікристалічний кремній, діоксид кремнію, метал), засвітки та плазмового витравлення створюють багатшарову структуру транзистора [12]. У результаті формуються самі структури польових транзисторів з р-п переходом. Цикл повторюється багаторазово, доки не буде створено повну структуру інтегральної мікросхеми з усіма необхідними елементами.

Залежно від технічного процесу розмір мінімальних елементів у цих структурах може бути 14 нм, 10 нм, 7 нм, 5 нм або менше, але це дуже умовна різниця, яка не зовсім відображає реальність. Наприклад, на фотографіях під мікроскопом на рисунку 1.16, можна порівняти розмір транзисторів у кеші L2 процесорів Intel (технічного процес 14 нм+++) та TSMC (7 нм). У першого затвора ширина 24 нм, у другого 22 нм, висота однакова .

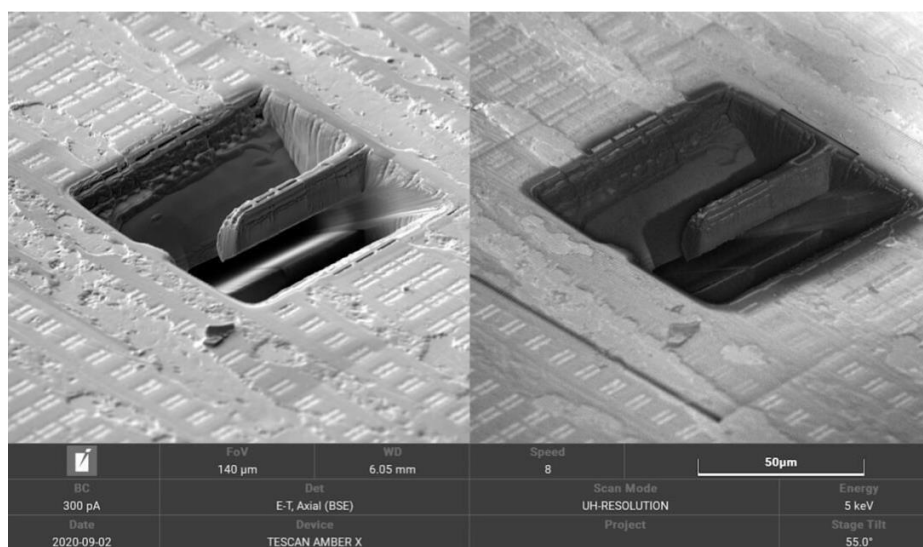


Рисунок 1.16 – Порівняння транзисторів у кеші L2 процесорів Intel (14 нм+++) та TSMC (7 нм), що сканує електронний мікроскоп [17]

За розміром вони практично не відрізняються, хоча TSMC щільніше розміщує ці транзистори на мікросхемі. Залежно від розміру, на одній пластині міститься від кількох десятків до кількох тисяч мікросхем. Пластини з готовим продуктом перевіряють, а потім здійснюється складання - упаковка чипів у корпуси, підключення контактів. Складання повністю автоматизовано.

1.3.2 Виробництво металургійного кремнію

За поширенням кремній в земній корі займає друге місце слідуючи за киснем, стикається головним чином у вигляді кисневих синтезів (силікати, кварц і т.д.). Найвищої чистоти кремній застосовується в напівпровідникових техніках, а технічної чистоти (від 96 до 99%) - у кольоровій і чорній металургії для вилучення сплавів за не залізним принципом (силуміну та інші), виготовлення силіцидів, і розкислення сплавів і сталі (усунення кисню), легування (кременисті сплави та сталі, що використовуються в електричних обладнаннях) [14].

Залізний кремній є основою для надтехнологічної промисловості. Кремній – вважається основним фотоелементом, що використовується для сонячних батарей, для комп'ютерів, напівпровідників.

До речі, створення металургійного кремнію абсолютно безвідходне. Зверху печі прикріплені повітроводи, і весь пил випаровується в газоочищення, в якому уловлюються мікрочастинки. Цей пил кремнію є корисним продуктом в іншій частині виготовлення. Наприклад, раніше в Європі кварц переплавляли тільки для того, щоб його потім розмолоти і зробити добавкою для бетону, а також в розчини, які мають дуже велику зміцнюючу властивість. Кварцова кристалічна сітка є надзвичайно міцною. І бетон маркою 900, можна отримати тільки за допомогою кремнію.

У процесі виробництва на заводі одержують два види продукції:

- металевий кремній (з чистотою не менше 98,5%, що застосовується в алюмінієвій та хімічній галузях)
- кремнієвий пил (ультра дисперсний матеріал, що отримується в процесі газоочищення печей, він застосовується у виробництві особливо міцних сухих будівельних сумішей)

У промисловості кремній технічної чистоти одержують, відновлюючи розплав SiO_2 коксом за температури близько 1800 градусів Цельсія в руднотермічних печах шахтного типу. Чистота одержаного таким чином кремнію може досягати 99,9% (основні домішки - вуглець, метали).

Основним агрегатом для виплавки технічного кремнію є дугова рудотермічна одно-трифазна електропіч потужністю від 8 до 25 МВА (рис. 1.17). Піч являє собою круглий сталевий кожух з днищем, футеровані вогнетривкою кладкою. Подина (днище) і частина висоти стін футеруються графітовими блоками, наступний шар магнезитової цегли і зовнішній шар – шамотом (пористий цегла зі спеціальної вогнетривкої глини).



Рисунок 1.17 – Одно-трифазна електропіч [18]

Подача енергії робочий простір печі здійснюється з допомогою електрода, виконаного з графіту. Самоспікаючі електроди в технології кремнію не застосовуються через можливе забруднення продукту компонентами кожуха електрода та електродної маси (залізо, кальцій, алюміній). Електричні параметри відновлювального процесу забезпечуються за допомогою пічного трансформатора, з'єданого з електродом високоамперною короткою мережею, в якій сила струму становить 40-80 кА. У міру торцевої витрати електрода вони періодично подовжуються за допомогою механізмів перепуску. Регулювання заданої сили струму в електроді здійснюється шляхом пересування електрода вертикальної осі.

Випуск кремнію здійснюється практично безперервно через літку (отвір у футеруванні) в сталеву футеровану виливницю (рис. 1.18).



Рисунок 1.18 – Випуск кремнію [18]

У печі із шунтованою дугою відбувається відновлення кремнію з кремнезему кварциту вуглецем відновника. Теоретична температура початку процесу 1670 градусів за Цельсієм. До основних типів відновників відносяться: деревне вугілля (березове, соснове), нафтококс, кам'яне вугілля.

Завод потребує величезну кількість електроенергії для підтримки температури печі. Виробництво працює цілодобово. А при першому запуску печі на її розігрів до робочої температури потрібно близько двох тижнів.

З рудотермічної печі розплавлений кремній потрапляє в ківш з якого він переливається за формами (рис. 1.19).



Рисунок 1.19 – Заповнення форм кремнієм [18]

У формах металевий кремній охолоджується та застигає (рис.1.20).



Рисунок 1.20 – Застигання кремнію в формах [18]

Після остигання кремній дроблять на дрібні шматки гідромолотом. Потім готова продукція упаковується в бігбеги – пластикові мішки, що вміщують 1000 кілограмів металургійного кремнію і відправляється замовникам.

1.4 Базові технологічні процеси мікро та наноелектроніки

Для одержання напівпровідників електронного типу провідності (n-типу) з концентрацією носіїв заряду (електронів) звичайно використовують **донорні** домішки, що утворюють "маленькі" енергетичні рівні в забороненій зоні поблизу дна зони провідності (енергія іонізації $\geq 0,05$ eV). Для напівпровідника діркового типу провідності (p-типу) аналогічна задача вирішується шляхом введенням **акцепторних** домішок, що утворюють "мілкі" енергетичні рівні в забороненій зоні поблизу стелі валентної зони. Такі домішки при кімнатній температурі практично цілком іонізовані, так що концентрація носіїв заряду приблизно дорівнює концентрації домішок. Для Ge і Si основними донорними легуючими домішками є елементи V групи періодичної системи: P, As, Sb, а акцепторними – елементи III групи: B, Al, Ga [15].

Для сполук типу $A^{III}B^V$ використовуються легуючі домішки елементів VI групи (S, Se, Te), а також Sn, і елементів II групи (Be, Mg, Zn, Cd). Елементи IV групи (Si, Ge) у залежності від умов одержання кристалів і епітаксialних шарів сполук типу $A^{III}B^V$ можуть виявляти як донорні, так і акцепторні властивості.

У сполуках типу $A^{II}B^{VI}$ і $A^{IV}B^{VI}$ вплив домішок сильно ускладнюється присутністю власних точкових структурних дефектів. Необхідний тип і величина провідності в них звичайно досягаються прецизійним регулюванням відхилення сполуки від стехіометричного, що забезпечує задану концентрацію визначеного типу власних точкових дефектів структури в кристалах.

Перераховані вище легуючі домішки утворюють, як правило, тверді розчини заміщення і мають досить високу розчинність (10^{18} - 10^{20} атомів/см³) у широкому інтервалі температур. Максимум розчинності приходить на температурний інтервал 700 – 900°C в Ge, 1200 – 1350°C у Si і 1100 – 1200°C в GaAs. Ці домішки є малоефективними центрами рекомбінації носіїв заряду і порівняно слабо впливають на величину їхнього часу життя [15].

Домішки важких металів (Fe, Ni, Cr, W, Cu, Ag, Au й ін.) у більшості напівпровідників утворюють енергетично глибокі, часто багатозарядні донорні або акцепторні рівні в забороненій зоні, мають велику ймовірність перетини

захоплення носіїв заряду і є ефективними центрами рекомбінації носіїв заряду, приводячи до суттєвого зниження їхнього часу життя. Ці домішки мають малу розчинність у напівпровідниках і мають дуже малі значення коефіцієнти розподілу між кристалом і розплавом. Легування ними роблять у тих випадках, коли треба одержати напівпровідники з малим часом життя носіїв заряду або з високим питомим опором, що досягається компенсацією дрібних енергетичних рівнів протилежної природи. Останнє часто використовують для одержання напівізолюючих кристалів широкозонних напівпровідників типу $A^{III} B^V$ (GaAs, Ga, In). Легуючими домішками служать Cг, Fe, Ni.

Легування напівпровідників звичайно здійснюють безпосередньо в процесах одержання монокристалів і епітаксіальних структур. Домішка вводиться в розплав або у виді елемента, або у виді сплаву з напівпровідником (лігатури). Часто легування здійснюють із газової фази даного елемента або його легколетучих сполук. Це – основний спосіб легування у процесах епітаксії при кристалізації із газової фази (рис.1.21). При молекулярно-пучкової епітаксії джерелом легуючої добавки звичайно є сама елементарна домішка.



Рисунок 1.21 – Прилад молекулярно-пучкової епітаксії Ribier Compact 21TM [20]

Розрахунок необхідного вмісту легуючої домішки вимагає знання необхідної концентрації та зв'язку між концентрацією домішки і заданими властивостями напівпровідників, а також основних фізико-хімічних характеристик домішки:

коефіцієнта розподілу між газовою фазою і кристалом, пружності парів і швидкості випарування у широкому інтервалі температур, розчинності у твердій фазі і т. п.

Одна з головних проблем легування – забезпечення рівномірного розподілу домішки по товщині епітаксialного шару. При спрямованій кристалізації з розплаву розподіл домішки по довжині злитка досягається або шляхом підтримки її постійної концентрації у розплаві за рахунок його підживлення з твердої, рідкої або газової фази, або шляхом програмованої зміни ефективного коефіцієнта розподілу домішки при відповідній зміні параметрів процесу росту.

При зонній перекристалізації звичайно використовують цільове завантаження домішки в початкову розплавлену зону з наступним її проходом через увесь кристал. Ефективний спосіб підвищення об'ємної однорідності монокристалів – вплив на масоперенос у розплаві накладенням магнітного поля. Однорідного розподілу домішки по товщині шару в процесі рідинно-фазній епітаксії досягають кристалізацією при постійній температурі в умовах підживлення розплаву, а при газо-фазній епітаксії – підтримкою постійної концентрації легуючої домішки в газовій фазі над підкладкою протягом усього процесу нарощування.

Легування напівпровідників може бути здійснене також шляхом **радіаційного впливу** на кристал: в результаті ядерних реакцій за участю власних атомів речовини утворюються електрично-активні домішки. Найбільший інтерес для радіаційного легування представляє опромінювання тепловими нейтронами, які володіють великою проникаючою здатністю, що забезпечує підвищену однорідність легування. Легування опроміненням тепловими нейтронами забезпечує строго контрольоване введення заданих концентрацій домішки і рівномірний її розподіл в об'ємі кристалу.

Однак у процесі опромінення в кристалі утворюються радіаційні дефекти, для видалення яких необхідний наступний високотемпературний відпал. Крім того, може з'явитися наведена радіоактивність, що потребує витримки зразків після опромінення. Легування опроміненням тепловими нейтронами звичайно використовують для одержання однорідно легованих фосфором монокристалів Si

с високим питомим електричним опором. Цей метод перспективний також для GaAs і ряду інших напівпровідників [15].

При створенні структур з р-п-переходами для напівпровідникових приладів широко використовують легування шляхом дифузійного введення домішки. Профіль концентрації домішки при дифузії описується звичайно функцією похибок і має вигляд плавної кривої, характер якої визначається наступними факторами: температурою і часом проведення процесу; товщиною шару, з якого здійснюється дифузія; концентрацією і формою перебування домішки в джерелі, а також її електричним зарядом і можливістю взаємодії із супутніми домішками і дефектами у напівпровіднику.

Через малі значення коефіцієнта дифузії основних легуючих домішок дифузійне легування звичайно проводять при високих температурах (для Si, наприклад, при 1100 – 1350°C) і протягом тривалого часу; при цьому легування, як правило, супроводжується генеруванням у кристалі значної кількості структурних дефектів, зокрема дислокацій. При дифузійному легування виникають труднощі в одержанні тонких легованих шарів і досить різких *p-n* перехід.

Для одержання тонких легованих шарів перспективні процеси іонного легування (іонної імплантації), при яких уведення домішкових атомів у приповерхній шар матеріалу здійснюється шляхом бомбардування відповідними іонами с енергією від декількох кіло-еВ до декількох мега-еВ. Можливість уведення практично будь-якої домішки в будь-який напівпровідник, низькі робочі температури процесу, гнучке керування концентрацією і профілем розподілу домішки – переваги іонної імплантації. Легування через діелектричні покриття з одержанням тонких, сильно легованих шарів забезпечили широке поширення цього методу в технології напівпровідникових приладів.

1.5 Літографія

Питання зменшення лінійних розмірів елементів інтегральних мікросхем (ІМС) - одне з основних мікроелектроніці. Нині рівень розвитку технологій у цій галузі дозволяє досягати субмікронних розмірів елементів, і відбувається перехід вже на нанометровий рівень. Змінюються і фізичні основи роботи елементів - тепер вони переважно пов'язані з квантомеханічними явищами. Створення інтегральних наноелектронних квантових схем є кінцевою метою літографічних нанотехнологій.

Літографія (від грецьких «lithos» - камінь і «grapho» - пишу, маюю) – одна з найбільш поширених технологій для отримання наноструктур. Спочатку літографією називали спосіб друку, при якому відбитки виходять переносом фарби під тиском з плоскої (нерельєфної) друкованої форми безпосередньо на гладку поверхню. Літографія в мікро-і наноелектроніці – це формування в спеціальному чутливому шарі (резисті), нанесеному на поверхню підкладки, рельєфного малюнка, що повторює топологію мікросхеми, з подальшим перенесенням цього малюнка на підкладки [20].

1.5.1 Етапи літографії

Типові технологічні кроки процесу літографії на прикладі фотолітографії такі:

- очищення підкладки;
- формування маски з резиста: нанесення на підкладку, сушіння;
- суміщення з фотошаблоном, експонування;
- прояв;
- травлення;
- зняття фотомаски (резиста).

Ці процеси у складних літографічних технологіях можуть повторюватися багаторазово.

Основним матеріалом для отримання підкладок є полікристалічний кремній, який отримують з кварцового піску (SiO_2). Заготовки з полікристалічного Si

являють собою стрижні діаметром 40 - 120 мм і довжиною 450 - 950 мм. Ступінь чистоти 98%. Полікристалічний Si може бути використаний виготовлення приладів, т.к. має внутрішню зернисту структуру (кристали розділені міжкристалітними межами), що рівносильне наявності дефектів. Для виготовлення напівпровідникових приладів використовують монокристали Si, які отримують з полікристалічного Si. Найпоширенішим методом отримання монокристалу Si є метод Чохральського (приблизно 70% монокристалів виготовляють цим методом). Полікристалічний Si розколюється на шматки, завантажується в тигель і розплавляється ($t=14120\text{K}$). Монокристал-затравку опускають у розплав і, не допускаючи його плавлення, піднімають вгору при постійному обертанні навколо осі. При цьому розплав частково піднімається разом із затравленням і при охолодженні в зоні над розплавом кристалізується, повторюючи кристалічні ґрати та орієнтацію монокристала. Швидкість вирощування – 10 - 60 мм/год.

Домішки, що легують, вводяться в розплав шляхом добавки сильнолегованих гранул Si. При цьому концентрації домішки в розплаві і кристалі різні, але в розплаві концентрація домішок вища (як корисних так і випадкових), цей метод можна розглядати як метод очищення кристала або метод отримання чистого кристала.

Іншим поширеним методом очищення є метод зонної плавки, який також заснований на принципі перерозподілу домішок між кристалом та розплавом. Вихідні стрижні полікристалічного Si попередньо шліфують і зміцнюють (без затравки). Частина стрижня нагрівають до температури плавлення. При безперервному пересуванні нагрівача (індуктора) вздовж стрижня пересувається і зона розплаву. При цьому атоми домішки відтісняються на межі фаз у розплав. Коли зона плавлення досягає протилежного кінця стрижня, то на ньому концентрується більшість домішок. Багаторазовим повторенням цього процесу або шляхом створення кількох зон плавлення, що йдуть один за одним, отримують Si такої чистоти, яка дозволяє здійснювати зміну властивостей кристала за допомогою спрямованого легування домішками. Зона домішок, що залишилася після

кристалізації на кінці стрижня, видаляється, а стрижень, що залишився, являє собою чистий полікремній. Швидкість – кілька мм/хв.

Наступний технологічний процес полягає в перетворенні полікристалічного Si на монокристалічний. Цей процес може виконуватися методом Чохральського або закінчуватися одночасно з зонною плавкою, якщо в кінець стрижня вплавляється монокристалічна затравка. Розплав твердішає та кристалізується в монокристал, починаючи з затравки.

Легування домішками досягається завдяки тому, що застосовують попередньо леговану затравку. При переміщенні розплавленої зони домішкові атоми затравки поширюються по всьому стрижню. Інший підхід полягає в подачі легуючого газу, атоми якого дифундують у розплав і при кристалізації впроваджуються у ґрати. Діаметр кристала ~ 125 мм. Кристали чистіші (бо немає випадкових домішок з тигля) [20].

Надалі монокристал піддають розпилювання на пластини товщиною 200 - 300 мкм, на основі яких потім виготовляють різні прилади. Але перед розпилюванням кристал шліфують по діаметру, внаслідок чого виходить циліндр, на ньому паралельно осі кристала знімається частина матеріалу, а по отриманій поверхні вимірюють розподіл опору по довжині стрижня (щоб дізнатися чи стрижень рівномірно легований). Отримана кромка також служить для юстування.

Різання злитків може проводитися за допомогою сталевих полотен (служать засобом переносу абразивного порошку до місця різання) або "алмазних дисків" (металевих дисків з вкрапленими алмазними крихтами, частіше по внутрішній кромці). При різанні майже половина зливка губиться. Різання залишає на поверхні пластин нерівномірності глибиною близько 10 мкм, тоді як для подальшого використання необхідна шорсткість поверхні не більше 0,01 мкм. Тому пластини спочатку шліфують за допомогою мікропорошків, розмір зерна яких вибирається з кожним все меншим циклом, аж до 3 - 5 мкм. Сторони пластин шліфують окремо.

Після шліфування залишаються нерівності в кілька мікрон, а також порушений після розпилювання шар поблизу поверхні. Для усунення цих дефектів застосовується полірування, найчастіше хімічне (травлення), тобто розчинення

поверхневого шару за допомогою азотної та плавикової кислот. В результаті нерівності знижуються до рівня тисячних часток мкм. Іноді хімічне полірування поєднують з попереднім механічним, з розміром зерна утвору 0,1 - 0,3 мкм. Крім того, пластини перед використанням неодноразово знежирюються за допомогою ацетону, етилового спирту та аналогічних органічних розчинників.

Напівпровідникові пластини, вирізані з монокристалу, в об'ємі та на поверхні яких надалі формуються елементи пристроїв, називаються підкладками. При використанні підкладок на їхній поверхні часто доводиться отримувати діелектричні покриття, найбільш поширеним є окисне покриття (SiO_2).

1.5.2 Способи очищення підкладок

Зазвичай використовуються підкладки з кремнію, легованого бором (кремній р-типу) або фосфором (кремній n-типу), з опором 15-20 Ом см, товщиною ~500 мкм. Поверхню підкладок попередньо очищають, щоб забезпечити її високу змочуваність розчином полімеру і, відповідно, адгезію резиста, а також щоб видалити забруднення та виключити включення домішок. Технологічно чистою вважається поверхня, на якій концентрація домішок не перешкоджає отриманню заданих значень параметрів мікросхем. Основні способи очищення підкладок – знежирення (ацетон, спирти), травлення (кислоти, плазма), відмивання (деіонізована вода). Є різні типи забруднень і, способи очищення від них:

- «Фізичні включення» (не пов'язані хімічно з поверхнею пластин) - це невеликі частки металів, пил від тари, пух. Ці забруднення легко видаляються обробкою в ультразвуковій ванні з ацетоном.

- Оксиди, а також забруднення іонними домішками (аніони кислот, катіони металів). Для очищення застосовують промивку в кислотах, в деіонізованій воді (з контролем її чистоти за опором $\rho=1-20 \text{ МОм}\cdot\text{см}$), обробку в іонній плазмі. Відмивання зверхчистої (деіонізованої) водою видаляє сліди розчинника, а також мікрочастинки, які можуть згодом утворити "проколи" в тонкому шарі резиста.

- Органічні забруднення – олії (жири). Для розчинення жирових плівок, які погіршують адгезію резиста з поверхнею, підкладки кип'ячать в органічних розчинниках або поміщають в ультразвукову ванну з цими розчинниками.
- Гази, що адсорбуються на поверхні, видаляються при нагріванні на повітрі.

При отриманні структур мікронних та субмікронних розмірів результати літографії значною мірою визначає культура виробництва та вакуумна гігієна (рис.1.22). Найбільш небезпечна присутність у повітрі частинок розміром менше 0.5 мкм, оскільки вони можуть довго перебувати у зваженому стані та осідати на підкладки. Стандартом встановлено наступний поділ виробничих приміщень залежно від концентрації частинок розміром менше 0.5 мкм в 1 л повітря: 0.5, 35, 350, 1000, 3500, 10000 та 35000 [21].



Рисунок 1.22 – Комплект одягу для роботи у чистій зоні [21]

У США прийнято інші способи класифікації "запиленості" робочих приміщень:

1. кімната класу 10 містить у повітрі не більше 300 частинок зазначеного розміру в 1 м³;
2. кімната класу 100 – не більше 3600 таких частинок в 1 м³ і т.д. У загальному випадку номер класу в американській класифікації - це кількість частинок розміром 0.5 мкм в 1 кубічному футі (1 фут = 0.3048 м).

1.5.3 Резисти

Основними матеріалами для здійснення літографічних процесів служать резисти. **Резисти** (англ. resist - чинити опір, перешкоджати) – це органічні багатокомпонентні полімерні композиції, чутливі до впливу будь-якого високоенергетичного випромінювання (оптичного, рентгенівського, потоку іонів або електронів). Резисти застосовуються для формування заданого рельєфу на поверхні плівки та її захисту від впливу травників. Їх наносять на поверхню підкладки у розчиненій формі, а потім висушують.

До складу резистів входять такі компоненти:

1. Світло- (електроно-, іоно-, рентгено-) чутливий компонент (наприклад, поліметилметакрилат (ПММА), азид, каучук, полібутен), з якого після впливу відповідного випромінювання утворюється продукт, що істотно відрізняється розчинністю і/або хімічною реакційною здатністю.

2. Плівкоутворюючі полімери (епоксидні та інші смоли), для забезпечення в'язкості розчину і, відповідно, забезпечення потрібної та рівномірної вздовж поверхні підкладки товщини шару резиста.

3. Спеціальні добавки, зокрема, у фоторезистах-для зміни спектральної характеристики світлочутливості (ароматичні сполуки), для поліпшення зчеплення фоторезистивного шару з підкладкою, а також добавки, що підвищують кислотостійкість маски резиста, та інші.

4. Розчинники (метанол, бензол, толуол, ацетон) для однорідного розподілу всіх компонентів.

Функції кожного з компонентів резиста взаємопов'язані, і лише комплексно всі компоненти забезпечують необхідні параметри чутливого до випромінювання шару. Важливо, що чутливість резистів залежить не тільки від природи компонентів, а й від дози опромінення, складу проявника, часу і температури прояви [17].

1.5.4 Етапи виготовлення резистивної маски. Нанесення резисту.

Першою стадією формування маски резиста є створення рівномірної плівки певної товщини. Найбільшого поширення цієї операції набуло центрифугування, що дозволяє використовувати нескладні пристрої. Підкладка закріплюється вакуумним присосом на центрифугі, після нанесення декількох крапель резиста розкручується з певною швидкістю. Якщо літографія проводиться на підкладках з розвиненою топологією (тобто з вже отриманими раніше структурами), їх попередньо планаризують (вирівнюють), наприклад, шляхом нанесення шару легкоплавкого покриття. Плівка фоторезиста повинна бути рівномірною (відхилення від середньої товщини вздовж поверхні не більше $\pm 10\%$) і мати хорошу адгезію до підкладки. Планаризуюча дія відцентрових сил призводить до утворення надгладких плівок з однорідністю по товщині $\sim 1\%$, яку не можна отримати будь-яким іншим способом.

Товщина плівки фоторезиста залежить від в'язкості розчину, швидкості та часу обертання центрифуги (рис. 1.5), температури та вологості середовища. Товщина плівки резиста σ обумовлюється в'язкістю розчину ν та швидкістю (частотою) обертання центрифуги ω [14]:

$$\sigma = k\left(\frac{\nu}{\omega}\right) \times \frac{1}{2} \quad (1.2)$$

де k – коефіцієнт, який визначається експериментально для кожного полімеру, розчинника даної центрифуги.

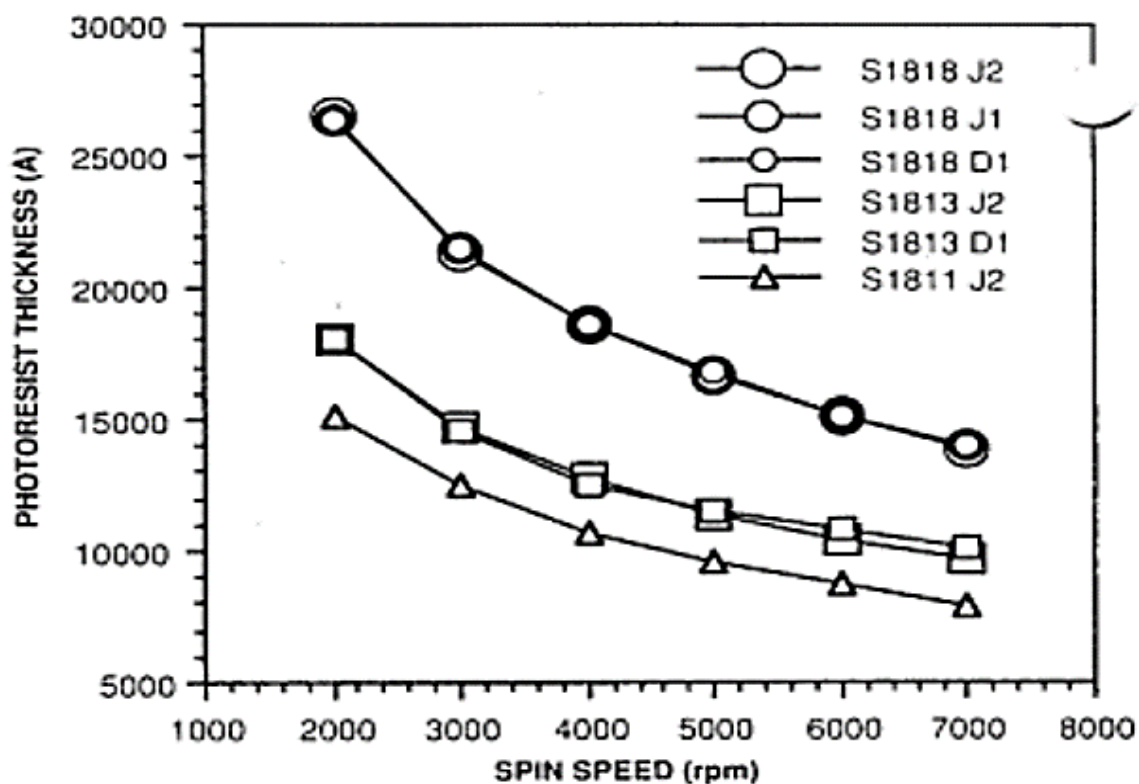


Рисунок 1.23 – Залежність товщин резистів (трикутники – резист S1811) від швидкості обертання центрифуги (об/хв) [14]

Товщина резиста впливає на дефектність, час сушіння, час експонування та прояви, селективність травлення плівки. Тонкі плівки резиста дозволяють забезпечити більш високу роздільну здатність.

Іноді використовують нанесення фоторезиста та з його аерозолі. Застосування пульверизації для нанесення фоторезиста дозволяє автоматизувати процес, проте пов'язане з великою витратою матеріалу і складнішим контролем товщини покриття. Метод «занурення» застосовують рідко, оскільки, незважаючи на простоту та можливість ручного виконання, він не дає відтворюваних результатів.

Сушіння резиста. У процесі сушіння відбувається випаровування розчинника, змикання порожнин, в яких знаходився розчинник. Плівка ущільнюється, покращується її адгезія (зчеплення) до підкладки, усуваються внутрішні напруження. Температуру сушіння вибирають так, щоб відбулося повне,

але поступове видалення розчинника. При цьому температура повинна бути вище точки кипіння розчинника, але нижче температур склування та термічного розкладання полімеру. Сушіння має також забезпечувати максимальне відношення швидкостей розчинення експонованого (R) та неекспонованого (R_0) резистів (R/R_0). При дуже високих температурах сушіння відбувається розрив полімерних ланцюгів та окислення, що зменшує співвідношення R/R_0 . Для фоторезистів оптимальні температури сушіння $\sim 70-90^\circ\text{C}$, а електронних резистів $\sim 130-180^\circ\text{C}$. Випаровування розчинника відбувається і при використанні резистів, тому термін зберігання у них невеликий (~ 1 рік).

Експонування – процес опромінення світлочутливого матеріалу актинічним електромагнітним випромінюванням. Продуктами перетворень полімерів можуть бути полімерні молекули іншої полярності або (при деструкції полімерного ланцюга під дією випромінювання) мономери. Продуктами перетворень низькомолекулярних речовин можуть бути, навпаки, полімери. У будь-якому випадку протікають процеси розриву або утворення хімічного зв'язку, що мають високі активаційні бар'єри - або відрив груп-заступників від мономерів, або розрив/утворення між мономерами. Всі ці реакції не протікають із помітними швидкостями без впливу високоенергетичного випромінювання. В результаті під дією енергетичного впливу (випромінювання) ультрафіолету або потоку електронів та іонів змінюються властивості резиста (розчинність у слаболужних розчинах, хімічна стійкість).

Залежно від виду випромінювання, використаного для вибіркового опромінення резистної плівки, розрізняють такі види літографії:

- **фотолітографія** (довжина хвилі ультрафіолетового випромінювання $\sim 250 - 440$ нм);
- **рентгенолітографія** (довжина хвилі рентгенівського випромінювання $\sim 0,01 - 1$ нм);
- **електронна літографія** (потік електронів, що мають енергію $10 - 100$ Кев або довжину хвилі $\sim 1 - 0,001$ нм);
- **іонолітографія** (довжина хвилі випромінювання $\sim 0,05 - 0,1$ нм).

Роздільна здатність літографії визначається довжиною хвилі падаючого випромінювання, а також кінетикою та механізмами процесів у резисті та на підкладці [15].

Прояв та видалення резиста. Залежно від характеру реакцій, що протікають у резистах, їх поділяють на дві групи: позитивні та негативні. У негативних резистах під впливом світла (для фоторезистів) відбувається полімеризація мономерних молекул з утворенням полімерних, у результаті розчинність резиста на опромінених ділянках зменшується, і після прояву вони залишаються на поверхні підкладки. У позитивних резистах внаслідок реакції розпаду відбувається розрив зв'язків у молекулах полімерів, і на опромінених ділянках розчинність резиста збільшується. При прояві позитивних резистів опромінені ділянки видаляються, а чи не опромінені залишаються підкладці. Прояв прихованого зображення для негативних фоторезистів полягає в обробці резиста органічним розчинником. У позитивних резистах продукти деструкції полімеру мають кислотні властивості, і для переведення їх у розчинну форму застосовують розчини неорганічних сполук з лужними властивостями (наприклад, KOH, NaOH для фоторезиста).

Після відмивання від слідів проявника і сушіння отриману маску піддають тепловому «задублюванню» ($120\div 180^\circ\text{C}$ залежно від марки резиста), у результаті остаточно формуються її захисні властивості. Термічна обробка опроміненого резистного шару покращує функціональні характеристики резистних масок, насамперед їхня контрастність при прояві. Крім того, правильно обраний режим обробки дозволяє "заліковувати" дефекти масок за рахунок релаксації механічних напруг, що виникають внаслідок структурних перебудов резистентних шарів під час їх експонування.

Наступна операція – обробка ділянок поверхні підкладки, не закритих резистивним шаром, через сформовані на її поверхні резистні маски, та перенесення малюнку топологічного шару на підкладку. Зазвичай обробка пов'язана з травленням поверхні металу, раніше обложеного на підкладку. Використовують як рідинні, так і сухі методи травлення (наприклад, у плазмі CF_4).

Завершальною операцією є видалення резиста з поверхні підкладки. Для цього використовують різні способи, зокрема, обробку в органічних розчинниках з подальшим механічним видаленням шару, кип'ятіння в кислотах, іонно-плазмову та плазмохімічну обробку поверхні в атмосфері O_2 .

1.6 Фотолітографія

Центральне місце у сучасній технології виготовлення виробів мікроелектроніки займає фотолітографія. Фотолітографія (оптична літографія) – процес вибіркового травлення поверхневого шару з використанням захисної фотомаски. Основними складовими процесу фотолітографії, що визначають її рівень, є фоторезист, фотошаблон і конкретна схема реалізації технологічного процесу, пов'язана з технічними характеристиками устаткування, що використовується. Спрощена оптична схема установки фотолітографії показано на рис.1.24.

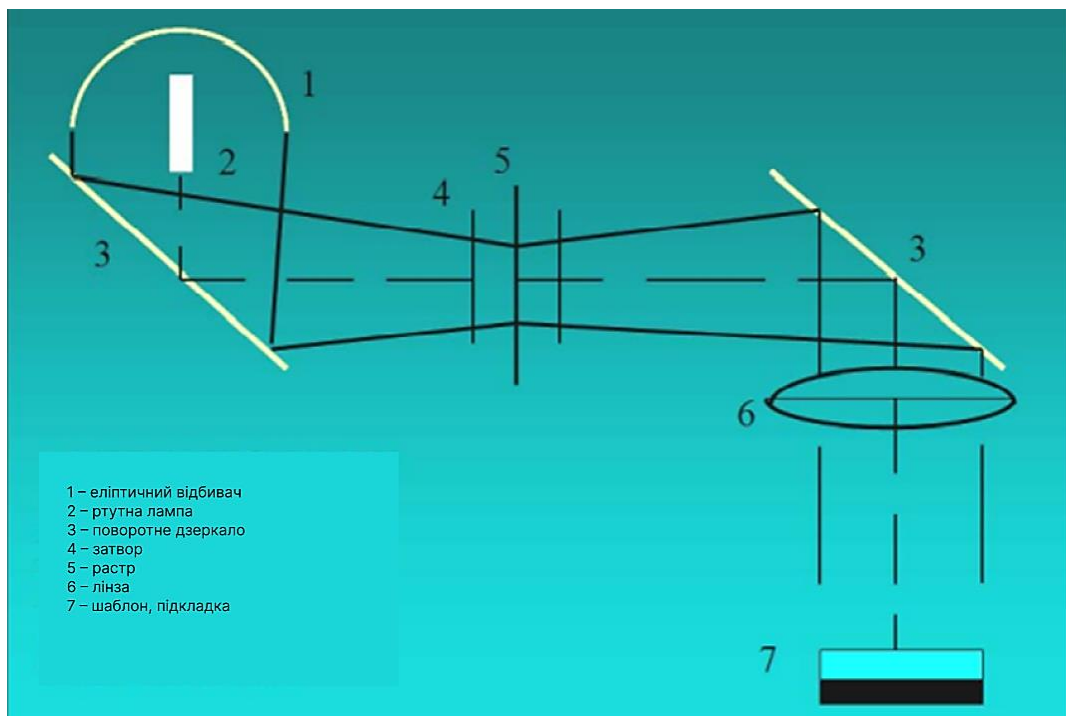


Рисунок 1.24 – Оптична схема установки суміщення та експонування [11]

Ртутна лампа (ДРШ-350, наприклад) міститься всередині металевого водоохолоджуваного корпусу з еліптичним відбивачем (1). Світло від лампи

проходить крізь блок растрів (5), відбивається дзеркалами (3) та фокусується конденсорною лінзою (6) на шаблоні з підкладкою (7). Затвор (4) служить для регулювання часу експонування. Як джерело випромінювання використовують ртутні лампи, що характеризуються високою інтенсивністю випромінювання, паралельністю світлового пучка та його рівномірністю.

Спектр випромінювання цих джерел лежить у трьох основних спектральних діапазонах: дальній УФ від 100 до 200-300 нм; середній УФ 300-360 нм; близький УФ від 360-450.

Довжини хвиль, що використовуються для експонування резистів:

- 365нм.(J лінія) Hg;
- 405нм(H лінія) Hg;
- 435нм(G лінія) Hg;
- 248нм-KrF, 13нм-Xe (роздільна здатність 10нм);
- 198нм-ArF, 157нм-F2.

Дуже важливо забезпечити паралельність світлового пучка, навіщо використовують конденсорні лінзи [11].

Розмір зображення та властивості резистивної маски визначаються та обмежуються такими основними фізичними властивостями світла та всієї проєкційної системи:

- когерентність;
- дифракція;
- інтерференція;
- астигматизм;

1.6.1 Контактний, безконтактний та проєкційний спосіб фотолітографії.

Розрізняють контактний, безконтактний та проєкційний способи фотолітографії (див. рис. 1.25).

При контактному способі фотошаблон та пластина з нанесеним фоторезистом торкаються. Пластина встановлюється на вакуумному утримувачі,

який піднімає її до тих пір, поки пластина і шаблон не прийдуть в контакт один з одним. Щоб провести суміщення топологічного малюнка фотошаблону з попереднім, топологічним малюнком, шаблон і пластину розводять на 25 мкм, а об'єктиви з сильним збільшенням поміщають ззаду від шаблону для одночасного спостереження малюнків шаблону і пластини з двох точок. Об'єктиви належать мікроскопу з розведеним полем зору, так що праве око бачить точку на правій стороні шаблону та пластини, а ліве – точку зліва. Шаблон і пластину поєднують механічним переміщенням і обертанням вакуумного тримача (столика) до збігу топологічних малюнків шаблону і пластини. При експонуванні мікроскоп автоматично відводиться, і промінь ультрафіолетового (УФ) опромінення освітлює весь шаблон протягом певного часу експонування. Час експонування підбирають експериментально, зазвичай, в межах 15-20 с.

Інтенсивність експонування на поверхню пластини, помножена на час експонування, дає енергію експонування або дозу опромінення, одержуваного резистом. Внаслідок тісного контакту між резистом та шаблоном при контактному друку значення роздільної здатності (~ 0.1 мкм) вище, ніж при використанні інших методів літографії. Деякі недоліки цього полягають у наступному. Реальна поверхня пластини не є абсолютно рівною, тому між нею та фотошаблоном існують мікро-зазори, товщина яких поверхнею змінюється випадковим чином. Наявність зазору призводить до того, що розміри та форма елементів спотворюються через розбіжність світлового пучка. Оскільки щільний контакт між пластиною та фотошаблоном неможливий, повітряні зазори призводять до появи дифракційних ефектів та збільшення розмірів зображення. Цьому ж сприяють дифракція світла на краях елементів, розсіювання світла в товщі фоторезиста і багаторазове відображення контактуючих поверхонь, що призводить до того, що світло заходить в область геометричної тіні. До спотворення малюнка шару призводять механічні та температурні деформації пластини, що викликають усунення малюнків різних топологічних шарів.

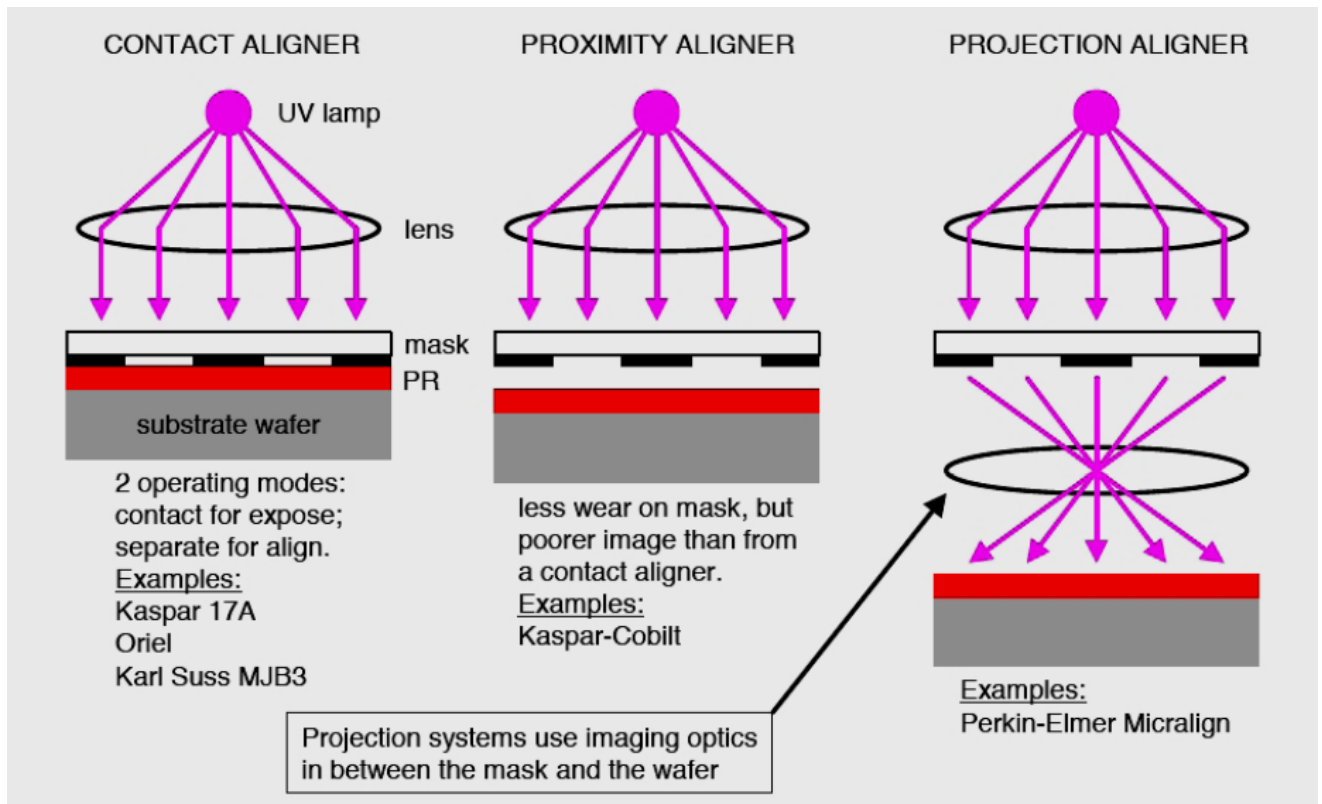


Рисунок 1.25 – Типи проєкцій [21]

Зліва – контактний друк. При контактному друку пластина кремнію, покрита резистом, знаходиться у безпосередньому фізичному контакті зі скляним фотошаблоном. У центрі – безконтактний друк. Під час експонування між кремнієвою пластиною та шаблоном підтримується невеликий проміжок шириною 10-25 мкм. Праворуч – проєкційний друк. Зображення топологічного малюнка шаблону проєктується на кремнієву пластинку, на відстані кількох сантиметрів від шаблону.

Проблеми, що виникають під час контактного друку, пов'язані також із зношуванням фотошаблону при його багаторазовому використанні. Зіткнення фотошаблону з резистом призводить до виникнення дефектів на ньому, і накопичення дефектів і частинок фоторезиста, що прилипають до фотошаблону при багаторазовому експонуванні. Кремнієва порошок на пластині може призвести до пошкодження поверхні шаблону в момент зіткнення з пластиною. Пошкоджена ділянка шаблону відтворюється як дефектний топологічний малюнок

на всіх інших пластинах, при експонуванні яких використаний цей шаблон. Кожна пластина додає власні пошкодження поверхні шаблону.

Якщо при виготовленні не забезпечується необхідна чистота процесу та навколишнього середовища, то лише деякі елементи схем не матимуть дефектів. Для забезпечення високого виходу придатних виробів щільність дефектів (кількість дефектів на 1 см²) повинна бути мінімальною для кожного процесу літографічного перенесення.

Інтерференція фоторезиста світлового потоку, що проходить через шар, і його відображення від кордону з підкладкою, а також розсіювання світла, створюють нерізку зону по краю зображення, яка після прояву дає "ореол", що погіршує контрастність і змінює геометричні розміри малюнка. Для ослаблення цього ефекту застосовують антивідбивні покриття, наприклад, плівки оксиду хрому, які осаджують поверхню пластини перед нанесенням фоторезиста.

Метод **безконтактного** експонування схожий на метод контактного друку, за винятком того, що під час експонування між пластиною і шаблоном підтримується невеликий зазор шириною 10-25 мкм. Цей проміжок зменшує можливість пошкодження поверхні шаблону. Однак дифракція світла зменшує роздільну здатність і погіршує чіткість зображення. При безконтактному друку величина роздільної здатності становить 2-4 мкм.

При **проекційному** способі фотолітографії контакту фотошаблону з підкладкою немає, що унеможлиблює його пошкодження. Крім цього, проекційний метод спрощує процес поєднання фотошаблону і дозволяє здійснити поєднання точніше, ніж при використанні контактної методи.

Проекційну фотолітографію можна здійснити одночасною передачею всіх елементів топологічного шару на пластину, поелементним (кроковим) проектуванням окремих фрагментів або модулів на пластину, кресленням малюнка у шарі фоторезиста підкладки за допомогою сфокусованого до певних розмірів світлового променя, керованого від комп'ютера.

Проекційну фотолітографію можна здійснити одночасною передачею всіх елементів топологічного шару на пластину, по елементним (кроковим)

проектуванням окремих фрагментів або модулів на пластину, кресленням малюнка в шарі підкладки фоторезиста за допомогою сфокусованого до певних розмірів світлового променя, керованого від комп'ютера.

Для досягнення високої роздільної здатності відображається лише невелика частина малюнка шаблону. Це невелика область, що відображається, сканується або переміщається по поверхні пластини. У скануючих проєкційних пристроях друку шаблон та пластина синхронно переміщуються. За допомогою цього методу досягається роздільна здатність близько 1,5 мкм для ширини ліній і відстані між ними. Проєкційні пристрої друку, в яких зображення на шаблоні переміщається над поверхнею пластини, називають системами з безпосереднім переміщенням пластиною або фотоштампами. При використанні цих пристроїв друку шаблон містить топологію одного кристала великого розміру або кількох кристалів малих розмірів, збільшених у кілька разів (до десяти). Зображення цієї топології або структури зменшується та проєктується на поверхню пластини. Після експонування одного елемента кристала пластина зсувається або переміщається на столику з інтерферометричним керуванням по осях ХУ до наступного елемента одного кристала, і процес повторюється. За допомогою зменшують проєкційних фотоштампів можна отримати роздільну здатність ~ 1 мкм. У більшості сучасних проєкційних систем друку оптичні елементи досить досконалі, і їх характеристики точності відображення обмежені дифракційними ефектами, а не аберацією лінз. Ці пристрої друку називають системами з дифракційним обмеженням.

1.6.2 Фотошаблони. Реперні знаки.

Фотошаблон – скляна пластина (підкладка) з нанесеним на її поверхню маскувальним шаром – покриттям, що утворює трафарет з прозорими та непрозорими для оптичного випромінювання ділянками. У процесі фотолітографії шар фоторезиста експонується відповідно до малюнка покриття, наявного на фотошаблоні. Підкладку фотошаблону виконують зі скла. Як матеріал маскуючого (непрозорого) шару фотошаблону зазвичай використовуються речовини, що утворюють тверді зносостійкі покриття. Це срібна емульсія, оброблений іонами

резист, оксид заліза, германій, хром або його оксид, оксид Європію та інші. До фотошаблонів пред'являється комплекс вимог, насамперед, такі:

- Висока оптична щільність маскуючого матеріалу;
- Товщина маскуючого матеріалу – не більше 100 нм;
- Відбивна здатність – не вище 15%;
- Висока роздільна здатність;
- Точність відтворення всіх розмірів малюнка;
- Неплощинність (допускається від декількох мкм до десятків мкм для різних класів фотошаблонів);
- Мала мікродфектність, стійкість до стирання.

При поганому контакті пластини і фотошаблону, тобто за наявності зазору, виникає дифракція, яка і спотворює розміри області, що експонується. Спотворення геометричних розмірів малюнка можуть призвести також неправильно підібрані режими експонування і прояви. До дефектів шаблону відносяться – нерівний край, розрив малюнка, подряпини, проколи, застосування. Шаблиони необхідно промивати через кожні 15-20 поєднань у деіонізованій воді з наступним сушінням. Нині оригінали фотошаблонів виготовляються методом електронної літографії.

Поєднання та експонування. Реперні знаки. У процесі виготовлення кристала ІМС фотолітографія повторюється багаторазово і необхідно щоразу здійснювати поєднання схем топології ІМС. Під суміщенням перед експонуванням розуміється точна орієнтація фотошаблону щодо пластини, коли елементи чергового топологічного шару (на фотошаблоні) займають положення щодо елементів попереднього шару (у пластині), запропоноване розробником топології. Наприклад, фотошаблон, що несе малюнок емітерних областей, має бути точно орієнтований щодо пластини, в якій вже сформовані базові області. Для поєднання використовують складні оптико-механічні комплекси, що дозволяють здійснювати поєднання візуально, вручну та автоматично. У першому випадку спочатку проводять поєднання візуально (так зване грубе поєднання), а потім точне поєднання по реперних знаках з точністю в межах 1 мкм. Автоматизований спосіб

поєднання забезпечує точність поєднання до 0,1 мкм. Оптична система забезпечує загальний огляд зі збільшенням $\times 40 - 80$ і точне поєднання при $\times 100 - 400$.

Після кожної операції фотолітографії реперні знаки переносяться на пластину. При кожній наступній операції реперні знаки, наявні на фотошаблоні, що використовується в даний момент, поєднуються з реперними знаками на пластині. Наприклад, на рисунку 1.26 показано, як поєднані 1-й знак поєднання на підкладці (чорний квадрат на світлому (зеленому) полі) та 2-й знак на фотошаблоні (жовтий квадрат).

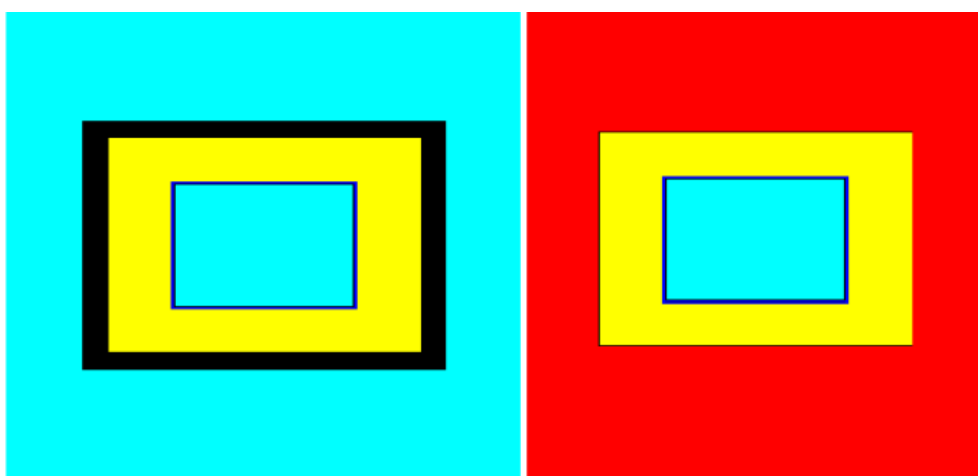


Рисунок 1.26 – Загальний вигляд реперних знаків при суміщенні [17]

Для точного поєднання використовують спеціальні знаки поєднання з контрольованим зазором, що входять до складу топологічних малюнків відповідних шарів.

Поєднання вважається виконаним, якщо при введенні одного знаку всередину іншого по всьому контуру проглядається проміжок (рис. 1.26). Після виконання поєднання мікроскоп відводиться, але в його місце підводиться освітлювач (ртутна лампа), жорстко пов'язаний із мікроскопом на каретці (або поворотній турелі). Оператор включає освітлювач одночасно з реле часу, яке контролює час експонування.

Властивості резистів. Фоторезисти. Умовно структуру фоторезиста можна представити як R1-O-R2, де R1 і R2-світлочутлива і полімерна складові частини

фоторезиста відповідно (фрагменти органічних молекул), а Про - з'єднує їх атом кисню (такі органічні сполуки називаються простими ефірами).

Основними критеріями, які необхідно брати до уваги при виборі та використанні будь-яких резистів у технології ІМС, є (світло-) чутливість, роздільна здатність, кислотостійкість та плазmostійкість, адгезія, дефектність, висока контрастність.

Важливою характеристикою резистів є чутливість. Чутливістю резиста називають заряд, який необхідно передати ділянці цього резиста для його повного прояву за прийнятний час (зазвичай за 1-2 хвилини). Фоторезист містить світлочутливу речовину, що поглинає УФ світло з довжинами хвиль певного інтервалу. Визначити цей інтервал можна за спектрами поглинання фоторезиста. Області поглинання резиста є область довжин хвиль, в якій оптична щільність резистної плівки не менше 0.2. Зазначена область називається областю спектральної чутливості фоторезисту. Крім того, іноді говорять про інтегральну світлочутливість фоторезиста. Вона визначається як світлочутливість фоторезиста при дії світла всіх довжин хвиль, що поглинаються фоторезистом. Знаючи світлочутливість фоторезиста (~ 100 мДж/см²) та освітленість, можна визначити приблизний час експонування для даного типу фоторезиста. Інтенсивність ртутних ламп $\sim 300-500$ мВт/см². Точний час експонування встановлюється експериментально і становить від 10-20 сек. до кількох хвилин. Фірми-виробники резистів зазвичай з великим розкидом повідомляють чутливість резистів для певних складів проявників, умов вияву та енергій. Кожен користувач експериментально підбирає дозу для своїх конкретних умов.

Наступною важливою властивістю резистів є їх роздільна здатність. Роздільна здатність фоторезиста визначається кількістю ліній рівної товщини, які можуть бути отримані без злиття на 1 мм поверхні підкладки в результаті проведення процесу фотолітографії. Граничне значення роздільної здатності визначається розмірами полімерних молекул фоторезисту. Роздільна здатність фоторезиста також залежить від мінімальної товщини плівки фоторезиста, здатної витримати вплив агресивного середовища. Відношення товщини плівки до

мінімальної ширини ліній для найкращих негативних фоторезистів становить 1:2-1:3, а для позитивних – 1:1. Для отримання ліній мінімальної ширини товщину резиста також треба враховувати. Найкраща роздільна здатність позитивних фоторезистів дозволяє використовувати їх при виготовленні великих ІМС. На роздільну здатність істотно впливають як процеси експонування та пов'язані з ними оптичні явища в системі «фотошаблон-фоторезист-підкладка», так і процеси прояву і сушіння. До оптичних явищ, що впливають на здатність фоторезистів, слід віднести дифракцію світла на межі фото-шаблон-фоторезист, відображення світла від поверхні підкладки і розсіювання світла в шарі фоторезиста [19].

Стабільність геометричних розмірів елементів рельєфу малюнка у шарі фоторезиста сильно залежить від умов проведення процесів прояву і сушіння. Перепрояв призводить до збільшення розмірів елементів (особливо для позитивних фоторезистів), а неоптимальні режими сушіння можуть призводити до короблення шару фоторезиста і його відшаровування.

Слід розрізняти роздільну здатність фоторезиста і роздільну здатність процесу літографії з використанням цього резиста. Насправді необхідно орієнтуватися на роздільну здатність фотолітографічного процесу.

Під кислотостійкістю фоторезистів розуміють здатність фоторезистивного шару після експонування, прояви та сушіння, селективно захищати поверхню підкладки від впливу кислотних та лужних травників (на основі азотної, плавикової, соляної та інших кислот). Критерієм кислотостійкості є величина крайового і локального розтравлення. Її зазвичай оцінюють за величиною клина, що утворюється на краю плівки після травлення. Критерієм кислотостійкості є також час, протягом якого травник впливає фоторезистивний шар до початку його руйнування або відшаровування, і якість отриманих структур в підкладці після травлення. Кислотостійкість фоторезистів часто характеризують щільністю дефектів (кількістю дефектів на одиниці поверхні), що передаються на підкладку при травленні її поверхні, покритою маскою фоторезисту. Стійкість фоторезиста до хімічних впливів залежить не тільки від складу, а й товщини та стану резистної

маски. Стійкість фоторезиста до травлення оцінюють за допомогою фактора травлення K [19]:

$$K = \frac{h}{x} \quad (1.3)$$

де h – глибина травлення; x – бічне розтравлення. Чим менше бічне розтравлення при заданій глибині травлення, тим вища кислотостійкість фоторезиста. Бокове підтравлення часто характеризують клином травлення.

У зв'язку з використанням методів сухого газофазного травлення матеріалу підкладки важливою характеристикою фоторезиста є стійкість до плазmostійкості або дії газової плазми. Оскільки є кілька альтернативних складів плазмоутворюючих газів для травлення для того чи іншого матеріалу мікроелектроніки, необхідно конкретизувати, стійкість по відношенню до якої плазми розглядається. Якщо йдеться про травлення у фторвмісних плазмах, то для характеристики плазmostійкості зазвичай використовують відносну швидкість травлення матеріалу фоторезиста стосовно швидкості травлення діоксиду кремнію SiO_2 . Якщо йдеться про отруєння полімерних шарів, то як міра плазmostійкості найчастіше використовують відношення швидкості травлення матеріалу до швидкості травлення полістиролу в плазмах, що містять кисень.

Наступною важливою властивістю резиста є його **адгезія**. У додатку до фотолітографії **адгезія** – це здатність шару фоторезиста перешкоджати проникненню травника до підкладки по периметру резистної маски, що створюється. Адгезію фоторезистного шару визначають як час відриву шару фоторезиста заданих розмірів від підкладки ламінарному потоці розчинника. Адгезія вважається задовільною, якщо шар резиста $20 \times 20 \text{ мкм}^2$ відривається за 20 хв.

Надзвичайно важливою властивістю фоторезиста є дефектність сформованої з нього маски. Під дефектністю розуміється кількість мікроскопічних дефектів плівки, що виявляють себе в технологічних стадіях обробки підкладок через резистивну маску. Зазвичай дефектність виражають $[1/\text{см}^2]$. Поява проколів у плівці фоторезиста пов'язана з неякісним або зношеним фотошаблоном, різного

роду забрудненнями, поганою змочуванням поверхні пластини. Як правило, при травленні проколи переходять в окисний захисний шар і є паразитними областями локальної дифузії домішок, що може призвести до деформації шарів. Методи зниження дефектів у резисті:

- Використання більш товстого або двошарового резиста;
- Чищення поверхні пластини перед нанесенням;
- Покриття шаблонів протиадгезивним шаром;
- Фільтрування резиста;
- Сушіння при вищій температурі;
- Запобігання потоншенню резиста при прояві.

Величиною, що тісно пов'язана з роздільною здатністю, є контраст фоторезиста. Контраст можна назвати мірою роздільної здатності фоторезиста. Для того, щоб забезпечити високу роздільну здатність, фоторезист повинен мати велику величину контрасту, таку, щоб відбите від підкладки світло, що з'явилося завдяки дифракційним ефектам, не впливало на формування фоторезистної маски. Від розмаїття залежить насамперед профіль формується фоторезистної маски; меншою мірою від нього залежать розміри критичних елементів сформованих фоторезистних масок. Для поліпшення контрастності після операції експонування до прояву сушать фоторезист, чим досягається його однорідна щільність. Крім цього, можливе застосування антивідбивних покриттів на підкладці для виключення внутрішнього відображення плівки фоторезиста. Це явище виникає через те, що відбитий потік інтерферує з світлом, що проходить, викликаючи додаткове засвітлення в місцях, захищених непрозорими ділянками фотошаблону. В результаті утворюється так званий "ореол", що викликає нерізкість та нерівність краю зображення.

Використання фоторезистів у конкретних технологічних процесах накладає додаткові вимоги. Видається надзвичайно важливим підкреслити, що підбір фоторезиста повинен проводитися безпосередньо під конкретну технологію. Для цього необхідно вибрати певні фізико-хімічні характеристики фоторезистів, так звані критичні характеристики, знання яких дозволить з великою ймовірністю

визначити можливість та ефективність використання фоторезисту та/або фотолітографічного процесу в технології, що розробляється. Для успішної роботи з тим чи іншим фоторезистом та ефективного застосування будь-якого літографічного процесу у технології виготовлення виробів мікроелектроніки необхідно, перш за все, мати уявлення про фізико-хімічні механізми процесів, що протікають на кожній із стадій фотолітографічного процесу. Саме ці знання мають бути науковою основою розробки та підтримки у робочому стані фотолітографічних процесів та фоторезистів.

Позитивні фоторезисти. Фоторезисти на основі системи смоли НХД/НС є "робочою конячкою" в мікроелектронній промисловості. Їх можна використовувати для експонування УФ світлом з різними довжинами хвиль, наприклад, відповідних I-(365 нм) та G-(436 нм) лініям ртутно-кварцових ламп і навіть світлом з довжиною хвилі 248 нм. Незважаючи на те, що з міркувань підвищення ефективності виробництва при експонуванні випромінюванням 248 нм найчастіше використовують фоторезисти з хімічним посиленням, фоторезистентна система НХД/НС продовжує використовуватись. Крім того, фоторезисти цього класу використовуються у технології товстих плівок для отримання магнітних головок, що мають малі розміри, мікроперемикачів, планарних мікромоторів, мікроіндуктивних елементів, планарних НВЧ-пристроїв тощо. Фоторезисти на основі системи НХД/НС зазвичай містять у своєму складі орто-нафтохінондіазидне (2-діазо-1(2H)-нафталенон-5-сульфонатне) похідний іновалочний полімер, розчинені у відповідному розчиннику (диглімі, рідше –діоксані). Полімерна основа фоторезиста – новолачна смола надає йому таких важливих властивостей, як хороше плівкоутворення, відмінну адгезію, задовільний стійкість до дії кисневої плазми [20].

Особливості прояву фоторезистів. Характер та умови прояву фоторезиста залежать від його виду та умов попереднього сушіння та експонування. Прояв позитивних фоторезистів пов'язаний з видаленням опромінених ділянок при обробці в сильно розведених розчинах лугів КОН і NaOH (0,1-10 масових % H_2O) або 1-2 масових % у розчині тринатрійфосфату (Na_3PO_4). Прояв негативних

фоторезистів – просте розчинення неопромінених ділянок в органічних розчинниках (толуол, діоксан, хлорбензол, трихлоретилен та інші). Особливістю прояву позитивних фоторезистів, порівняно з проявом негативних, є відсутність набухання неопромінених ділянок. Тому вони мають більшу роздільну здатність і меншу залежність її від товщини плівки фоторезиста.

Крім хімічних методів використовують також плазмохімічну обробку поверхні кисневою плазмою.

Негативні фоторезисти. Механізмом отримання резистного зображення в негативних фоторезистах на основі системи полімерів є фотозшивання макромолекул. Негативні фоторезисти мають порівняно з позитивними фоторезистами ряд переваг. У тому числі слід зазначити такі:

1. Велика технологічна широта, тобто. можливість широкого вибору технологічних параметрів, у яких виходять резистивні маски хорошої якості.
2. Нечутливість до перепрояву.
3. Хороша адгезія та стійкість до рідинного травлення.
4. Здатність до "самокорекції" – розміри неекспонованих ділянок можна підкоригувати в необхідному напрямку за рахунок підтравлювання при подальшому ізотропному рідинному травленні.
5. Широкий вибір компонентів фоторезистних композицій та складів проявників.

Найбільш серйозними недоліками негативних резистів є такі:

1. Роздільна здатність обмежена товщиною фоторезистивної плівки. Існує емпіричне правило, згідно з яким типові критичні розміри одержуваних фотолітографічним методом елементів будуть не менше потрійної товщини фоторезистивного шару.
2. Кисень дуже інгібує процес утворення резистивних масок з негативних резистів.
3. Негативні резисти дуже важко використовувати для "вибухової фотолітографії".

Найбільш часто в даний час використовуються фоторезисти серії MICROPOSIT S1800. Плівки, що виходять з них, характеризуються:

- відсутністю механічних напруг;
- відмінною адгезією;
- високою однорідністю.

Ці фоторезисти оптимізовані для експонування випромінюванням G-лінії ртутної лампи (436 нм). Вони добре зарекомендували себе при експонуванні випромінюванням з широким спектром. Для прояву резистної маски рекомендується користуватися проявником MICROPOSIT MF-319, що не містить іонів металу. Резистна маска видаляється без залишку при використанні стандартних розчинів для видалення (MICROPOSIT REMOVER).

1.6.3 Граничні можливості фотолітографії

Відомо, що обмеженням отримання мінімальних розмірів за допомогою фотолітографії є дифракція світла. Мінімальний розмір визначається довжиною хвилі світла, що використовується. Довжина хвилі видимого світла 0.35-0.7 мкм; ультрафіолетового випромінювання (УФ) 0.1-0.3 мкм. У разі контактного друку (фотошаблон накладається безпосередньо на шар фоторезиста) де роздільна здатність $\Delta x = 2\lambda$. Таким чином, використання УФ дозволяє отримати за допомогою фотолітографії мінімальний розмір $\sim 0.1-0.2$ мкм.

Одна з нових технологій, названа **EUV** (Extreme Ultra Violet) та об'єднала навколо себе кілька відомих компаній, націлена на покращення процесу фотолітографії при виробництві мікросхем.

Установки для крокового мультиплікування на пластину із застосуванням глибокого ультрафіолетового випромінювання (Deep Ultra Violet, **DUV**) – машини, які друкують схеми на кремнієвих підкладках, використовують джерела світла з довжиною хвилі 248 нм. Довгохвилі EUV-випромінювання близько 13 нм, тобто приблизно в 20 разів менше. Перехід з DUV на EUV-літографію забезпечує більш ніж 10-кратне зменшення довжини хвилі і перехід в діапазон, де вона зіставна з

розмірами всього декількох десятків атомів. Літографічна технологія, що застосовується зараз, дозволяє наносити шаблон з мінімальною шириною провідників 0,1 мкм, в той час як EUV-літографія робить можливим друк ліній набагато меншої ширини (до 0,03 мкм).

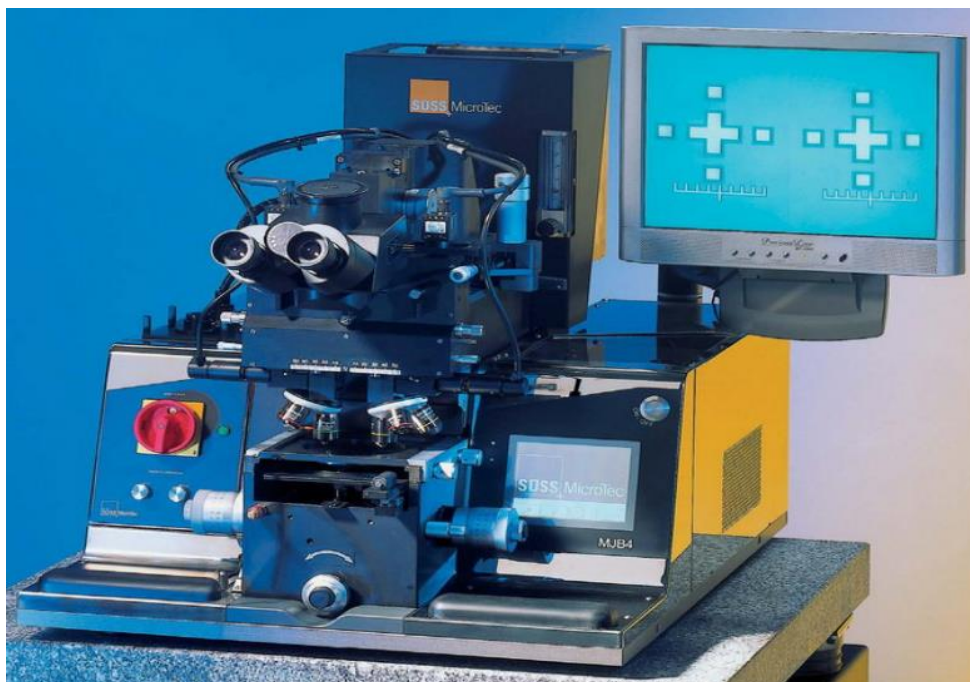


Рисунок 1.27 – Сучасний прилад фотолітографії MJB 4 [21]

Керувати ультракороткими випромінюванням не так просто. Оскільки EUV-випромінювання добре поглинається склом, нова технологія передбачає використання серії із чотирьох спеціальних опуклих дзеркал, які зменшують та фокусують зображення, отримане після застосування маски. Щоб зробити EUV-технологію доступною для широкого використання, має бути ще багато в ній удосконалити.

Сучасна установка експонування та поєднання MJB 4 складається з основних вузлів: оптичної системи (мікроскопа), механізму поєднання та джерела ультрафіолетового випромінювання.

Ніякі інші системи експонування не можуть змагатися з оптичними системами у продуктивності та високій стабільності шаблонів. Існує ряд приладів, які можуть бути виготовлені тільки за допомогою УФ літографії, оскільки

застосування високоенергетичних електронних пучків або рентгенівських променів може завдати цим приладам незворотних пошкоджень. Фотолітографія, як така, залишиться основним інструментом при масовому виробництві ІМС.

Внутрішні та взаємні ефекти близькості є головними проблемами систем фотолітографії. Дифракційні та інтерференційні ефекти спотворюють структури, що відтворюються поверх вже сформованого рельєфу. Проблема поверхневого переносу зображення у тому, що необхідно зробити товщину резистного шару всього кілька нанометрів. Резисти, що мають високу чутливість порядку 1 мДж/см², дозволяють застосовувати метод експонування типу "спалах на льоту".

1.7 Електронна літографія

Електронно-променева літографія (ЕЛ) – метод виготовлення субмікронних та нанорозмірних топологічних елементів за допомогою експонування електронним променем електрично чутливих поверхонь. Метод схожий на фотолітографію, але використовує електрони замість фотонів. В даний час електронна літографія освоює розміри з інтервалу 0.04 – 0.08 мкм.

Основні елементи скануючих систем експонування – електронні пучки з'явилися у 60-х роках минулого століття та стали використовуватися для запису телевізійного зображення в електроннопроменевих трубках. Перші діючі прилади були створені у 1939 (Арденні) та у 1942 (Зворикін) роках. Однак широке використання растрових електронних мікроскопів (РЕМ) у науці та техніці стало можливим лише у 70-ті роки, коли з'явилися високонадійні прилади, створені на основі досягнень мікроелектроніки та обчислювальної техніки.

В 1948 Денніс МакМіллан і Чарльзом Отлі побудували перший РЕМ (SEM або Scanning Electron Microscope), і в 1952 цей інструмент досяг дозволу 50 нанометрів і, що найбільш важливо, забезпечив тривимірний ефект відтворення рельєфу зразка – характерну особливість всіх сучасних РЕМ. У 1960 році Томас Еверхарт та Річард Торнлі, винайшовши новий детектор («детектор Еверхарта-Торнлі»), прискорили розвиток растрового електронного мікроскопа. Цей

детектор, вкрай ефективний для збору як вторинних, так і відбитих електронів, дуже популярний зараз на багатьох РЕМ. Роботи, які велися в Кембриджському університеті групою Чарльза Отлі у 60-ті роки, дуже сприяли розвитку РЕМ, і в 1965 році фірмою «Cambridge Instrument Co.» було випущено перший комерційний скануючий електронний мікроскоп – Stereoscan [21].

Незабаром електронно-променеве експонування почали використовувати для отримання фотошаблонів та експонування резистів. Головні елементи експонуючої ЕЛ системи – джерело електронів, системи фокусування та бланкування променя, пристрій контролю суміщення та відхилення, електромеханічний стіл та комп'ютерний інтерфейс.

1. Блок бланкування електростатичного чи електронно-магнітного типу, який “вимикає” електронний промінь, відхиляючи його межі отвори колімуючої діафрагми.
2. Блок відхилення – або поєднаний з кінцевою лінзою, або помішаний після неї. Блоки відхилення поділяються на електронно-статичні та електронно-магнітні, але перевага зазвичай надається останнім (з причин менших аберацій та кращої захищеності від впливу поверхневого заряду).
3. Блок динамічного фокусування, що коригує аберації, що вносяться відхиленням променя від оптичної осі системи.
4. Система детектування електронів, що сигналізує про виявлення міток суміщення та інших деталей рельєфу мішені.
5. Прецизійний робочий стіл із механічним приводом, що забезпечує обробку всієї пластини.

2 ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Огляд мікроконтролерів на базі 40 нм технології

У будь-якому електронному пристрої, якими ми користуємося щодня, є безліч чіпів, кожен з яких складається з ще більшої кількості транзисторів. У новинах про нові смартфони, процесори, відеокарти та іншу електроніку можна часто зустріти термін «техпроцес» і вказівку кількості нанометрів. Для прикладу можна взяти звичайний процесор для настільного комп'ютера – принцип буде однаковим і для нього, і для чіпсетів смартфонів, і для чіпів відеокарт, і для решти всіх чіпів (рис. 2.1).

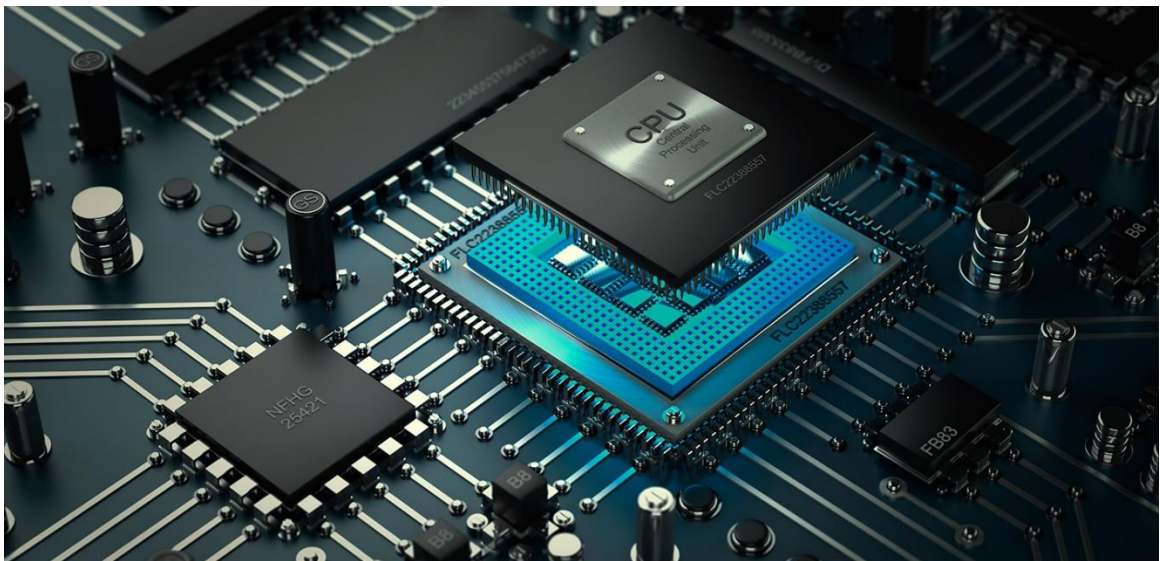


Рисунок 2.1 – Кристал процесора [2]

Під теплорозподільною панеллю, яку ви бачите на зображенні 2.1, розміщений сам кристал процесора. Він складається з мільярдів мікроскопічних транзисторів, відстань між якими визначає техпроцес. Так, Intel сьогодні випускає процесори на базі 10 нм техпроцесу (компанія ніяк не може налагодити виробництво 7 нм чіпів), а TSMC – чіпсети для мобільних девайсів на базі 7 нм техпроцесу (Apple A12, Kirin 980 і Snapdragon 855). При цьому технології

виробництва у них помітно відрізняються: Intel зі своїми 10 нм може розміщувати на одному квадратному міліметрі площі до 100 млн. транзисторів, а TSMC зі своїми 7 нм – лише 66 млн.

Що ж дає поступове зменшення (оптимізація) техпроцесу? В основі всіх переваг – зменшення відстані між транзисторами, що дозволяє їм швидше передавати дані та витратити на їх передачу менше енергії.

Таким чином, процесори на однаковій архітектурі, але вироблені з використанням різного техпроцесу, відрізнятимуться у таких аспектах:

- тактова частота (підвищення продуктивності);
- споживання енергії;
- можливе збільшення кількості ядер;
- зниження собівартості виробництва;
- більш кеш-пам'яті, для якої на кристалі можна виділити більше місця.

Комп'ютерні чіпи, які виготовляли в сімдесятих роках минулого століття, використовували техпроцеси, що вимірюються в мікронах (мкм) - 10, 8, 6, 4, 3 та 2 мкм. Кожні три роки відбувалося зменшення приблизно в 0.7 разів. Так, 3 мкм техпроцес почали використовувати в 1975 (Zilog) і 1979 (Intel) роках.

Подальше зменшення йшло досить швидко: в 1982 Intel досягла позначки в 1.5 мкм, в 1989 – 0.8 мкм, в 1994 – 0.6 мкм. Після середини 90-х і до 2008 року кожні два роки щільність транзисторів подвоювалася. У 1997 Intel, IBM і TSMC досягли 350 нм, в 1998 інженери Intel змогли освоїти 250 нм, а в 1999 вже 180 нм.

Нижче за 100 нм поріг знизився вже на початку «нульових» – так, Intel Pentium 4 на архітектурі Prescott використовував техпроцес 90 нм. Вже до 2004 року було досягнуто позначки в 65 нм (Intel Core, Core 2 Duo, Celeron D та безліч інших процесорів), а в 2006 – 40/45 нм (AMD Phenom II, Athlon II та інші).

Наступний ступінь еволюції був досить високим – техпроцес 32/28 нм Intel почав використовувати лише до 2011 (TSMC – трохи раніше, в 2010). Ще раз удвічі (22/20 нм) щільність збільшили вже до 2012 року.

У 2014 році основні гравці на ринку почали використовувати у виробництві мікрочіпів 14/16 нм техпроцес та технологію FinFET (транзистори нового типу – з

вертикально розташованим затвором, який займає ще менше місця). Перші 14 нм процесори Intel з'явилися у продажу вже в 2015 році. У 2016 на ринку з'явилися iPhone з чіпами Apple A10 (16 нм).

Перехід на 10 нм почався в 2017 – цей техпроцес використовують у процесорах Apple A11 Bionic, процесорах Intel Cannon Lake та Ice Lake, а також в Qualcomm Snapdragon 835 і Snapdragon 845.

Нарешті, в 2018 році мобільні чіпсети почали використовувати новий 7 нм техпроцес. Це Apple A12 Bionic, Snapdragon 855 і Huawei HiSilicon Kirin 980. Крім того, в 2019 7 нм техпроцес почав використовувати AMD (у відеокартах Radeon VII, рис.2.2).



Рисунок 2.2 – Перша комерційна відеокарта, яка використовує 7 нм чіп [6]

Перші зразки чіпів, які виробляються з використанням 5 нм техпроцесу, вже виготовляються в лабораторіях TSMC. Про комерційні продукти на їх основі поки що ніякої інформації немає. При цьому до 2023 року Samsung вже планує випускати чіпи з використанням 3 нм техпроцесу і технології GAAFET.

2.2 Огляд мікроконтролеру ESP32

ESP32 – це серія мікроконтролерів типу «система на кристалі», що мають інтегровані контролери Wi-Fi і Bluetooth (дворежимний, англ. dual-mode), низьке енергоспоживання і невисоку ціну. У серії ESP32 використовується мікропроцесор Tensilica Xtensa LX6 в двоядерних та одноядерних варіаціях та включає вбудовані антенні перемикачі, радіочастотний балун, підсилювач потужності, приймач з низьким рівнем шумів, фільтри та модулі керування живленням. ESP32 (рис.2.3) створений та розроблений компанією Espressif Systems, китайською компанією, розташованою у Шанхаї, а виробляється компанією TSMC. Він є наступником мікроконтролера ESP8266.

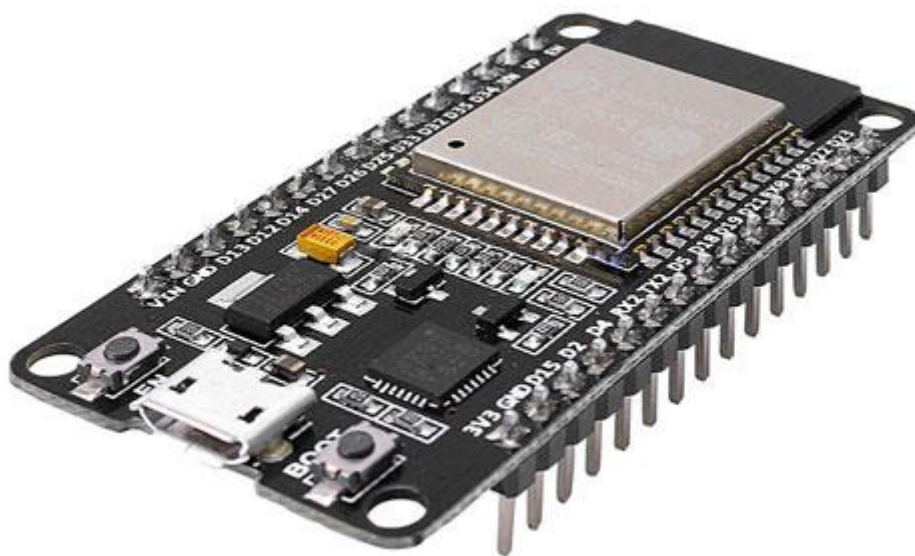


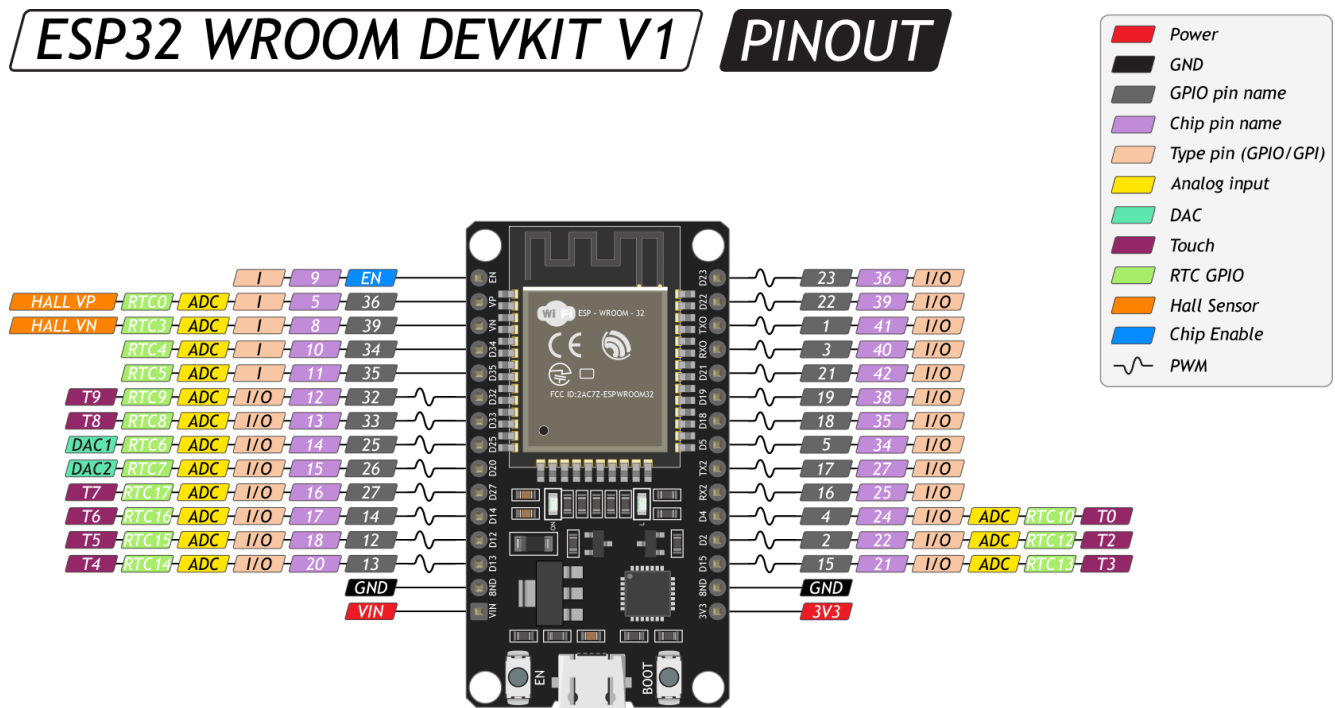
Рисунок 2.3 – Модуль ESP32 NodeMCU [1]

Мікроконтролер ESP32, який вийшов на ринок восени 2015 року, є видатним пристроєм. Espressif ESP32 – високоінтегрований, суміщений (Wi-Fi + Bluetooth) чіп, виконаний для рішень, що потребують мінімальних показників енергоспоживання.

ESP32 розроблений для електроніки і додатків, виконаний в супер-мініатюрному корпусі 6 x 6 мм, що вимагає для інтеграції близько 10-ти зовнішніх

компонентів. Він має гарний функціонал і багатообіцяючі можливості. Поєднання в одному чіпі WiFi та Bluetooth, двох процесорних ядер та багатого набору периферії може зробити ESP32 лідером у своєму сегменті. ESP32 обіцяє знову зробити революцію у світі IoT, як свого часу зробив його молодший брат ESP8266.

ESP32 (рис. 2.4) отримав значний приріст у продуктивності порівняно зі своїм попередником ESP8266. Обчислювальна потужність зросла вчетверо. ESP32 має два ядра, кожен з яких працює на частоті 160 МГц. Друге ядро зробить життя розробника простішим. Так, наприклад, одне ядро може взяти на себе завдання реального часу по роботі з графікою або керуванням двигунами, а друге може обробляти комунікаційні протоколи і в цілому відповідати за зв'язок. Завдяки цьому розробникам ПЗ менше доведеться думати про розподіл часу між завданнями.



👁 Interface on all GPIO pins: 3×SPI, 3×UART, 2×I²C and 2×I²S

Рисунок 2.4 – Інтерфейси всіх GPIO [1]

ESP32-WROOM – модуль з чіпом ESP32-D0WDQ6, Flash-пам'яттю на 4 МБ і всією необхідною обв'язкою, які заховані під металевим кожухом. Поруч із кожухом розташована мініатюрна антена з доріжки на верхньому шарі друкованої плати. Металевий кожух екранує компоненти модуля і покращує електромагнітні властивості.

Кристал включає 2-ядерний 32-розрядний процесор Tensilica Xtensa LX6, 520 Кб пам'яті SRAM і 448 Кб флеш-пам'яті, 4 Мб зовнішньої флеш-пам'яті. Тактова частота виставляється до 240 МГц залежно від режиму споживання енергії.

Є вбудований температурний датчик, датчик Холла, інфрачервоний контролер на приймання та передачу, контролер сенсорних кнопок, Bluetooth (BLE v4.2 BR/EDR), Wi-Fi (стандарти зв'язку Wi-Fi 802.11 b/g/n (2,4 ГГц)).

Перетворювач USB-UART на мікросхемі CP2102 забезпечує зв'язок модуля ESP32-WROOM із USB-портом комп'ютера. При підключенні до ПК платформа ESP32 DevKit визначається як віртуальний COM-порт. Роз'єм micro-USB призначений для прошивки та живлення платформи ESP32 DevKit за допомогою комп'ютера.

З двох сторін плати розташовані контактні гребінки по 15 пін з кроком 2,54 мм (модифікація на 30 пін). Доступно 25 пінів загального призначення. Усі контакти підтримують переривання. Максимальний струм на пінах 12 мА:

- цифрові 21 контакт вводу-виводу (GPIO) (див рис. 2.4): 1–5, 12–19, 21–23, 25–27, 32 та 33. Контакти загального призначення. Піни можуть бути налаштовані на вхід або вихід. Логічний рівень одиниці – 3,3 В, нуля – 0 В. Максимальний струм виходу – 12 мА. Всі висновки введення-виводу можуть працювати як ШІМ (Широтно-імпульсна модуляція), що дозволяє виводити аналогові значення у вигляді ШІМ-сигналу з розрядністю 16 біт. Максимальна кількість каналів 16.

- цифрові 4 контакти введення (GPI): 34, 35, 36 та 39. Можуть бути налаштовані тільки на вхід.

- 15 аналогових входів з АЦП (12 біт): 2, 4, 12–15, 25–27, 32–36 та 39. Дозволяє уявити аналогову напругу в цифровому вигляді з розрядністю 12 біт.

- аналогових виходу з ЦАП (8 біт): 25 (DAC1) та 26 (DAC2). Аналоговий вихід цифро-аналогового перетворювача, що дозволяє формувати 8-бітові рівні напруги. Висновки можуть використовуватись для аудіо-виходу.

- 10 контактів ємнісного сенсора.

На пінах вводу-виводу можна налаштувати апаратні інтерфейси:

- 3×UART
- 3×SPI
- 2×I²C
- 3× I²S

Піни живлення системи:

- VIN: Пін для підключення зовнішнього джерела напруги в діапазоні від 5 до 14 вольт (поряд із GND)
- 3V3: Пін від стабілізатора напруги з виходом 3,3 вольт та максимальним струмом 1 А. Регулятор забезпечує живлення модуля ESP32-WROOM (поряд із GND)
- GND: Виводи землі (два контакти, по одному на кожній стороні)

На модулі налагодження розташовані дві тактові кнопки. Кнопка EN призначена для ручного перезапуску плати – аналог кнопки RESET звичайного комп'ютера.

Кнопка Boot використовується для ручного запуску режиму прошивки модуля. Алгоритм наступний: Натисніть кнопку BOOT; Натисніть та відпустіть кнопку EN; Відпустіть кнопку BOOT.

Також на платі знаходиться світлодіод живлення та індикаторний світлодіод, підключений до цифрового піну 2 (замість 13 як стандартних Arduino).

Лінійний понижувальний регулятор напруги AMS1117-3.3 забезпечує живлення мікроконтролера. Вихідна напруга 3,3 вольт з максимальним струмом 1А. Живлення подається через роз'єм micro-USB або контакт Vin. Джерело визначається автоматично. Під час живлення через USB використовуйте зарядник на 5В разом із кабелем Micro USB. У разі живлення через Vin рекомендується вхідна напруга від 5 до 14 В. Перетворювач живлення на платі вирівнює вхідну

напругу до 3,3 В. Як і у випадку з платами Arduino, плати ESP32 також бувають від різних виробників з різним числом висновків та різною обв'язкою. Також з'являються модифікації та конкретної плати. Наприклад, плата ESP32 DEVKIT DOIT буває з 30 та 36 пінами.

Таблиця 2.1 – Версії системи ESP32 на інтегральній схемі мікросхем упакована у пакети QFN розміром 6 мм × 6 мм та 5 мм × 5 мм

Назва	Кількість ядер	Вбудована флеш-пам'ять (MiB)	Розмір	Опис
ESP31B	2	0	6×6 mm ²	Попередній випуск SoC для бета-тестування; більше не доступний.
ESP32-D0WDQ6	2	0	6×6 mm ²	Початковий чіп виробництва випуску серії ESP32.
ESP32-D0WD	2	0	5×5 mm ²	Менший фізичний варіант схожий на ESP32-D0WDQ6.
ESP32-D2WD	2	2	5×5 mm ²	2 MiB (16 Mibit) вбудована варіація флеш-пам'яті.
ESP32-S0WD	1	0	5×5 mm ²	Одноядерний процесор.

Модулі друкованої плати на основі ESP32 містять ESP32 SoC і призначені для легкого інтегрування в інші плати. Вимірювані інвертовані F-антенні конструкції використовуються для трасування антени PCB на модулях.

2.3 Огляд мікроконтролера Raspberry Pi Pico

Raspberry Pi Pico – це нова плата мікроконтролера, розроблена Raspberry Pi Foundation (рис. 2.5). Новий продукт, який приєднується до існуючих і більше

схоже на Arduino ніж SBC. Цей мікроконтролеру відомий завдяки невеликому розміру, чудової енергоефективності та ціні. Варто зазначити, що Raspberry Pi Foundation перетворилася принаймні на мить на фабрику, розробивши свій власний чіп (рис. 2.6). Це про RP2040 SoC. Тобто, за цей час вони не використовували чіпи Broadcom, як в інших платах, а самі розробили його.

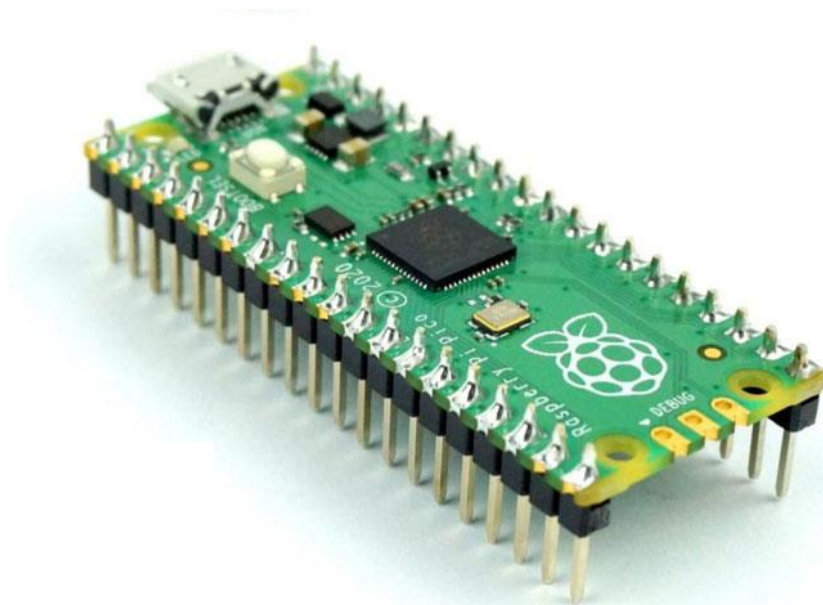


Рисунок 2.5 – Мікроконтролер Raspberry Pi Pico [2]

SoC: RP2040 розроблений у Великій Британії робочою групою з проектування ASIC Raspberry Pi Foundation. Що ж до технічні характеристики та характеристики, ось усі деталі плати:

- DualCore ARM Cortex-M0+ з динамічною тактовою частотою до 133 МГц.
- 264 КБ пам'яті SRAM
- МБ вбудованої флеш-пам'яті.
- дуже низьке споживання в режимах очікування та сну.
- Зв'язок: microUSB з підтримкою USB 1.1 Host
- Програмування: Підтримка таких мов, як C/C++ і MicroPython.
- GPIO: 26-контактний багатофункціональний

2.4 Установка для дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів

На сьогодні існує велика кількість теплоізоляційних матеріалів. Матеріали, що використовуються для теплоізоляції можна розділити на є органічні (пінопласти) та неорганічні (вати).

Є декілька можливих способів вимірювання теплопровідності, кожен з яких підходить для обмеженого кола матеріалів, в залежності від термічних властивостей і температури середовища. Існують два класи методів для вимірювання теплопровідності: стаціонарні і нестаціонарні (або перехідні) методи.

Стаціонарні методи вимірювання (1-2 в таблиці 2.2) застосовують, коли температура матеріалу не змінюється з часом. Це робить аналіз прямим. Недоліком є дорога, складна і точна експериментальна установка та відносно більший час вимірювання. Нестаціонарні методи вимірювання теплопровідності (3-9 в таблиці 2.2) вивчають сигнал як функцію часу.

Таблиця 2.2 – Існуючі методи вимірювання теплопровідності

№	Метод	Застосування
1	розділеного бруска	геофізичні об'єкти
2	визначення при стаціонарному тепловому режимі	тверді речовини
3	визначення теплопровідності циліндричним зондом	тверді речовини, порошки, паста
4	визначення теплопровідності поверхневим перетворювачем	тверді речовини
5	джерела перехідних площин	тверді речовини, паста, тонкі плівки
6	МTPS–метод	рідини, порошки, пасти
7	лазерного спалаху	тонкий диск
8	3 ω –метод	речовини криогенних температур
9	теплого відбиття випромінювання	тонкі плівкові матеріали

Перевага цих методів полягає в тому, що вони можуть в цілому бути виконані більш швидко, оскільки немає необхідності чекати стаціонарної ситуації. Недолік полягає в тому, що математичний аналіз даних в цілому складніше.

Вимірювання коефіцієнту теплопровідності може проводитися за допомогою запропонованих різними виробниками готових приладів. Але у існуючих ДСТУ для вимірювання теплопровідності теплоізоляційних матеріалів застосовуються вимірювальні установки індивідуального виготовлення, а не промислові прилади.

Отже, порівнюючи характеристики теплоізоляційних матеріалів, бачимо, що найбільш конкурентним утеплювачем за співвідношенням економічності та теплоефективності для утеплення всередині панелей, в багатошаровій кладці та при фасадній теплоізоляції (за умови захисного покриття) є безпресовий пінополістирол – жорсткий матеріал з комірчастою структурою, отриманий шляхом спікання гранул полістиролу або одного з його сополімерів. Останнім часом популярності набуває екструдований пінополістирол, що пов'язано з більшою стабільністю його характеристик.

Нестаціонарні методи мають необхідність складних обчислень, велику похибку визначення коефіцієнта теплопровідності і потребу у руйнуванні зразків, стаціонарні ж вимагають складної апаратури, існуючі прилади невиправдано дорого коштують.

За основу було взято стаціонарний метод вимірювання коефіцієнту теплопровідності, з використанням поширених матеріалів та приладів створено лабораторний пристрій, що досягає відносно швидкого вимірювання з прийнятною точністю, та без необхідності у проведенні дуже складних дослідів і розрахунків.

Найбільш популярні теплоізоляційні матеріали переважно використовуються для утеплення житла у вигляді пластин або плоского шару. Тому досліджуваний зразок теплоізоляційного матеріалу повинен мати форму пластини.

Для спрощення математичного апарату будемо досліджувати стаціонарний тепловий режим, коли температура досліджуваного зразка не залежить від часу.

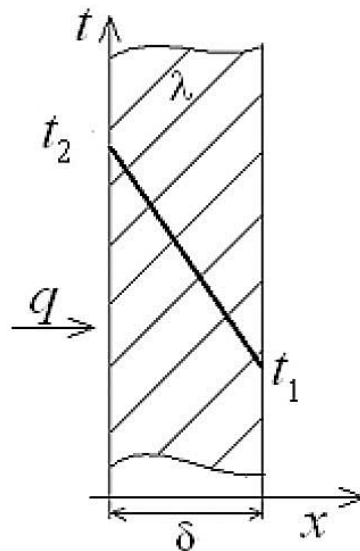


Рисунок 2.7 – Плоский однорідний зразок у стаціонарному тепловому потоці [4]

Розглянемо плоский однорідний зразок (рис. 2.7) товщиною δ з постійним коефіцієнтом теплопровідності λ . На зовнішніх поверхнях зразка підтримуються постійними температури t_1 і t_2 . Таким чином через зразок проходить стаціонарний тепловий потік.

Тепловий потік – це кількість теплоти, що передається в одиницю часу через довільну поверхню.

Густина теплового потоку q – тепловий потік, віднесений до одиниці поверхні. Це вектор, що співпадає з напрямком поширення тепла, тобто направлений в сторону зменшення температури і перпендикулярний частинам з однаковою середньою температурою.

Оскільки ми розглядаємо пластину, що пронизується одновимірним тепловим потоком з лініями, перпендикулярними до поверхні пластини, а коефіцієнт теплопровідності матеріалу λ приймається постійним, не залежним від температури, то густина теплового потоку q через таку пластину може бути розрахована за законом Фур'є:

$$q = \lambda \cdot \frac{\Delta t}{\delta} \quad (2.1)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу пластини (Вт/(м·°C));

$\Delta t = t_2 - t_1$ – різниця температур між внутрішньою та зовнішньою поверхнями зразка, °C;

δ – товщина пластини, м.

Після вивчення недоліків та переваг існуючих методів вимірювання теплопровідності ізоляційних матеріалів було запропоновано конструкцію лабораторної установки, зображену на рисунку 2.8.

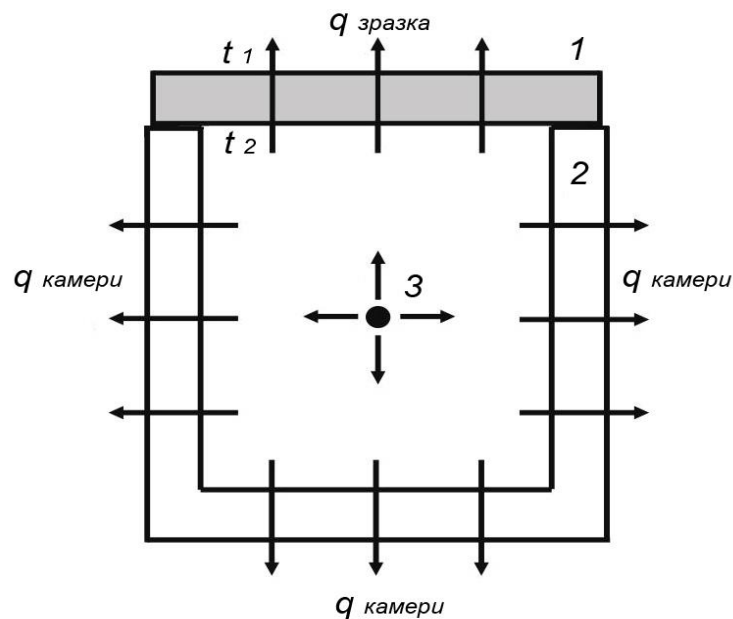


Рисунок 2.8 – Схема термокамери:

1 – зразок, 2 – термокамера, 3 – нагрівач

Установка являла собою термоізольовану камеру (термокамеру). Для спрощення розрахунків вибрано геометрично правильну форму установки у вигляді куба.

Усередині камери було встановлено точкове електричне джерело теплоти регульованої потужності.

Зразок, що підлягає випробуванню, встановлювався у вигляді кришки в верхній частині термоізольованої камери. Розташування зразка – горизонтальне, напрямом теплового потоку знизу вгору.

У загальному випадку слід враховувати залежність коефіцієнта теплопровідності матеріалу від температури. Проте для теплоізоляційних матеріалів у вузькому інтервалі температур (до 60 °С) величина коефіцієнта теплопровідності може бути прийнята постійною.

Також при використанні зразків кінцевих розмірів в експерименті необхідно враховувати, що частина теплового потоку, що надходить в зразок, розсіюється в навколишнє середовище через торцеві поверхні. Але якщо зразки виготовлені з повітряно-пористих матеріалів малої густини, розсіюванням теплоти через торцеві поверхні можна знехтувати.

Суть методу в створенні стаціонарного теплового потоку, що проходить через плоский зразок певної товщини і спрямованого перпендикулярно до лицьових (найбільших) граней зразка, вимірюванні електричної потужності нагрівача, температури протилежних лицьових граней і товщини зразка.

Була запропонована теоретична залежність для визначення величини густини теплового потоку, що досягає поверхні зразка від електричної потужності нагрівального елемента з урахуванням геометричних особливостей внутрішнього об'єму камери.

Шляхом вираження густини теплового потоку через електричну потужність нагрівача, що створює цей потік і за умови використання вибраної для установки кубічної форми коефіцієнт теплопровідності матеріалу пластини λ дорівнює:

$$\lambda = \eta \cdot \frac{P}{6 \cdot S_{\text{зразка}}} \cdot \frac{\delta}{\Delta t} \quad (2.2)$$

де η – тепловий ККД нагрівача; P – електрична потужність нагрівача у режимі насичення, Вт; $S_{\text{зразка}}$ – внутрішня площа зразка, м²; δ – товщина пластини, м. Δt – різниця температур між внутрішньої та зовнішньої поверхнями зразка, °С.

Незважаючи на велику кількість теплоізоляційних матеріалів на ринку України, найпопулярнішими за співвідношенням ціна/якість є різні типи пінополістиролу. Завдяки попиту на ці матеріали, багато виробників пропонують

вибір пінополістиролів різного типу. Проте, намагаючись зекономити сировину, не всі виробники добросовісно дотримуються правильної технології виготовлення. Тому характеристики цих матеріалів можуть відхилятися від норм, вказаних в ДСТУ.

Для дослідження з метою визначення коефіцієнтів теплопровідності були використані зразки типів пінополістиролів, що на поточний час найбільш затребувані на ринку:

- безпресовий пінополістирол різної товщини.
- екструдований пінополістирол різної товщини від різних виробників (Sweetondale і Styrofoam)

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Установа початкової версії та алгоритм дослідження

Виходячи з теоретичних розрахунків і аналізу існуючих методів вимірювання теплопровідності, була побудована діюча модель установки, яка використовує поширені матеріали та доступні вимірювальні прилади.

Термокамеру діючої моделі установки було виготовлено з пінопласту ПСБ–35 ДСТУ Б 13163:2012, товщиною 50 мм.

Джерелом електричного струму був лабораторний блок живлення DNF-1502DD з плавним регулюванням та стабільними значеннями струму та напруги.

Необхідні для обчислення електричної потужності нагрівача значення сили струму I та напруги U у стаціонарному режимі установки визначалися за допомогою електровимірювального комбінованого приладу Ц4317 та перевірялися цифровим мультиметром DT-830B.

Послідовно через кожні 10 хвилин проводилися зняття показників датчиків температур лицьових граней зразка, що розташований на установці (рис. 3.1).

Показники температури вимірювалися термометрами цифровими з виносними датчиками WSD10 з точністю до 0,5 °С. Різниця температур лицьових граней зразка Δt складала 10–50 °С, що забезпечувало у процесі випробування постійний коефіцієнт теплопровідності.

Тепловий потік через випробуваний зразок вважався стаціонарним, коли значення різниці температур лицьових граней зразка Δt у трьох послідовних вимірюваннях сигналів датчиків температур не зростало і не зменшувалося монотонно.

У підсумку було підтверджено можливість використання експериментальної залежності для визначення на цій установці коефіцієнта теплопровідності невідомих матеріалів.

$$\lambda \approx 5,44 \cdot I \cdot U \cdot \frac{\delta}{\Delta t}, \quad (\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})) \quad (3.1)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу пластини ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$); Δt – різниця температур між внутрішньої та зовнішньої поверхнями зразка, $^\circ\text{C}$; δ – товщина пластини, м. I – сила струму, що протікає через нагрівач, А; U – напруга на нагрівачі, В.

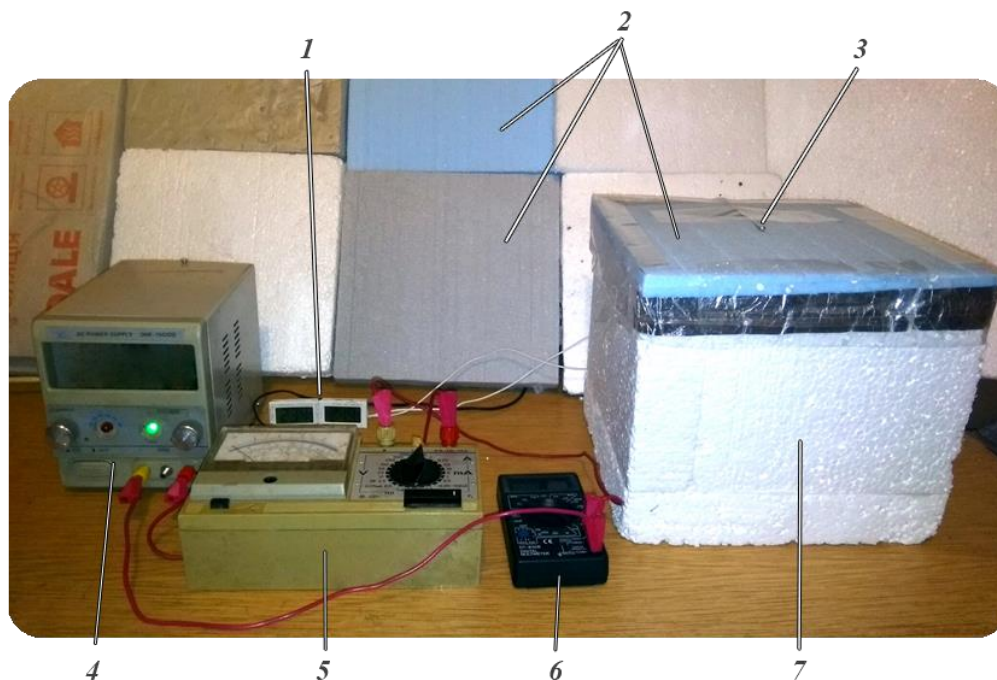


Рисунок 3.1 – Фотографія установки:

1 – індикатори температури; 2 – зразки; 3 – термодатчик;
4 – блок живлення; 5 – вольтметр; 6 – амперметр; 7 – термокамера

Експериментальні значення коефіцієнта теплопровідності близькі до обрахованих у формулі 3.1, тому можуть бути використаними для практичного визначення коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів.

Отже, було проаналізовано теоретичні засади розробленого методу вимірювання коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів та описано принцип дії створеної моделі лабораторного пристрою для вимірювання коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів, а також здійснено юстирування створеного пристрою для визначення кількості теплового потоку, який потрапляє на поверхню зразка в залежності від електричної потужності нагрівача.

За наявності великої кількості приладів велику роль відіграє обчислення похибки результатів. Згідно формули 3.1, ця похибка складається з наступних складових:

$$\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon_U + \varepsilon_I + \varepsilon_{\delta} + \varepsilon_{\Delta t}, \quad (\%) \quad (3.2)$$

де ε_U - відносна похибка обчислення напруги, %;

ε_I - відносна похибка обчислення струму, %;

ε_{δ} - відносна похибка обчислення товщини зразка, %;

$\varepsilon_{\Delta t}$ - відносна похибка обчислення різниці температур, %.

Напруга U вимірювалася за допомогою комбінованого приладу Ц4317 з відомим класом точності: 1,5

Згідно ГОСТ 8.401-80 відносна похибка ε_X вимірюваної величини X дорівнює:

$$\varepsilon_X = \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\% , \quad (\%) \quad (3.3)$$

де ΔX – абсолютна похибка;

X – виміряне значення.

За відсутності класу точності у вимірювального приладу значення абсолютної похибки ΔX приймається рівним від половини (мінімальне значення) до цілої (максимальне значення) поділки шкали в залежності від сприятливості умов проведення дослідів. Якщо відомий клас точності приладу, абсолютна похибка визначається верхньою межею шкали вимірювання:

$$\Delta X = \alpha \cdot X_{\text{верх}}, \quad (3.4)$$

де α - клас точності приладу;

$X_{\text{верх}}$ - верхня межа шкали вимірювання.

Щоб знайти абсолютну похибку вимірювання ΔU , скористаємося формулою (3.4) та помножимо клас точності на верхню межу вимірювань 10 В:

$$\Delta U = \frac{1,5 \cdot 10}{100} = 0,15(B)$$

Це приблизно відповідає ціні поділки на цій межі вимірювань.

$$\text{За формулою (3.3): } \varepsilon_U = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100\% = \frac{0,15}{5} \cdot 100\% = 3(\%)$$

Відносна похибка струму I , що вимірювався цифровим мультиметром DT 830B (клас точності 2, верхня межа вимірювань 10 А, абсолютна похибка 0,2)

$$\varepsilon_I = \frac{\Delta I}{I} \cdot 100\% = \frac{0,2}{1} \cdot 100\% = 0,2(\%)$$

Відносну похибку обчислення товщини зразка δ обчислено за (3.3) для кожного зразка і занесено до таблиці 3.2

$$\varepsilon_\delta = \frac{\Delta \delta}{\delta} \cdot 100\% , (\%) \quad (3.5)$$

де $\Delta \delta = 0,001$ м - поділка лінійки;

δ - товщина зразка, г.

Відносну похибку обчислення різниці температур $\varepsilon(t_2-t_1)$ вираховуємо для кожного зразка і заносимо до таблиці 3.4

$$\varepsilon_{(t_2-t_1)} = \frac{\Delta t_2 + \Delta t_1}{|t_2 - t_1|} \cdot 100\% = \frac{1}{\Delta t} \cdot 100\% , (\%) \quad (3.6)$$

де $t_2-t_1=\Delta t$ – різниця температур, °C;

$\Delta t_1=\Delta t_2=0,5^\circ\text{C}$ – точність термодатчиків, вказана виробником, (тобто $\Delta t_1+\Delta t_2=1^\circ\text{C}$)

3.2 Автоматизація за рахунок використання мікроконтролерів на базі 40 нм технології

Експериментальну установку можна автоматизувати використовуючи мікроконтролери на базі 40 нм технології, наприклад мікроконтролери серії Raspberry PI Pico або ESP32. У початковій версії установки, описаної вище, не автоматизованими є рівень динамічної або запланованої зміни потужності нагрівального елемента, утримання певної температури на протязі довгого періоду,

а також не автоматизованим є процес отримання результатів та подальша обробка отриманих даних.

3.2.1 Автоматизація з використанням алгоритмів релейного керування

Релейне управління – найпростіший алгоритм із можливих, адже у нас є лише два стани – включено та вимкнено.

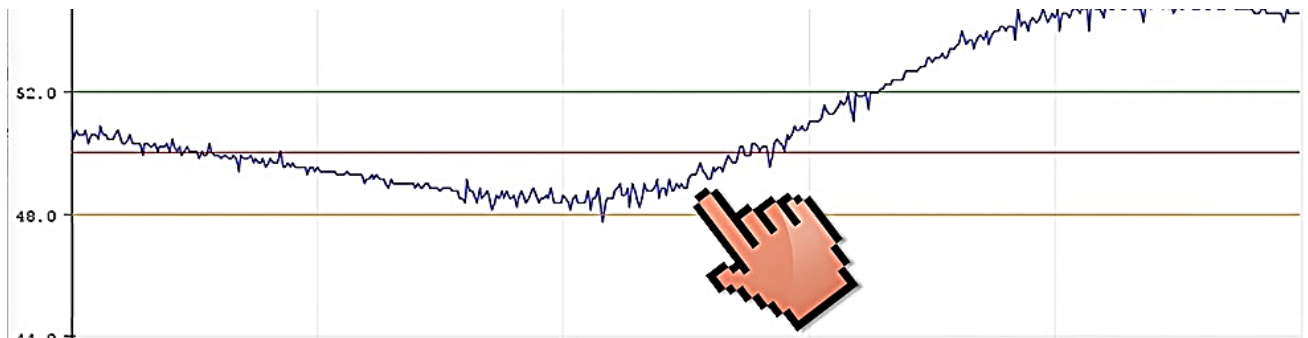


Рисунок 3.2 – Приклад релейного керування (стрибкоподібна зміна показників)

Нижче розглянемо алгоритми, які зроблять релейне керування більш правильним, дозволять зберегти довготривалість реле і підвищать точність регулювання.

Почнемо з найпростішого і найочевиднішого:

```
pin_relay = Pin(0, Pin.OUT) #Прив'язали пін 0 до об'єкту класу Pin в режимі OUT
if temperature < 50.0:     # Якщо температура з датчика менше ніж 50 градусів, то увімкнемо реле
    pin_relay.value(1)
else:                       # Якщо температура з датчика понад 50 градусів, то вимикаємо реле
    pin_relay.value(0)
```

Рисунок 3.3 – Приклад елементарного релейного керування

Цей код не потребує коментарів, він просто включає реле, коли умовна температура нижче 50 градусів, і вимикає, коли вона вища. Якщо викликати цей код без затримки або таймера – ми отримаємо жахливий брязкіт у момент

включення та вимкнення реле, оскільки шуми вимірювань постійно змінюватимуть результат умови:

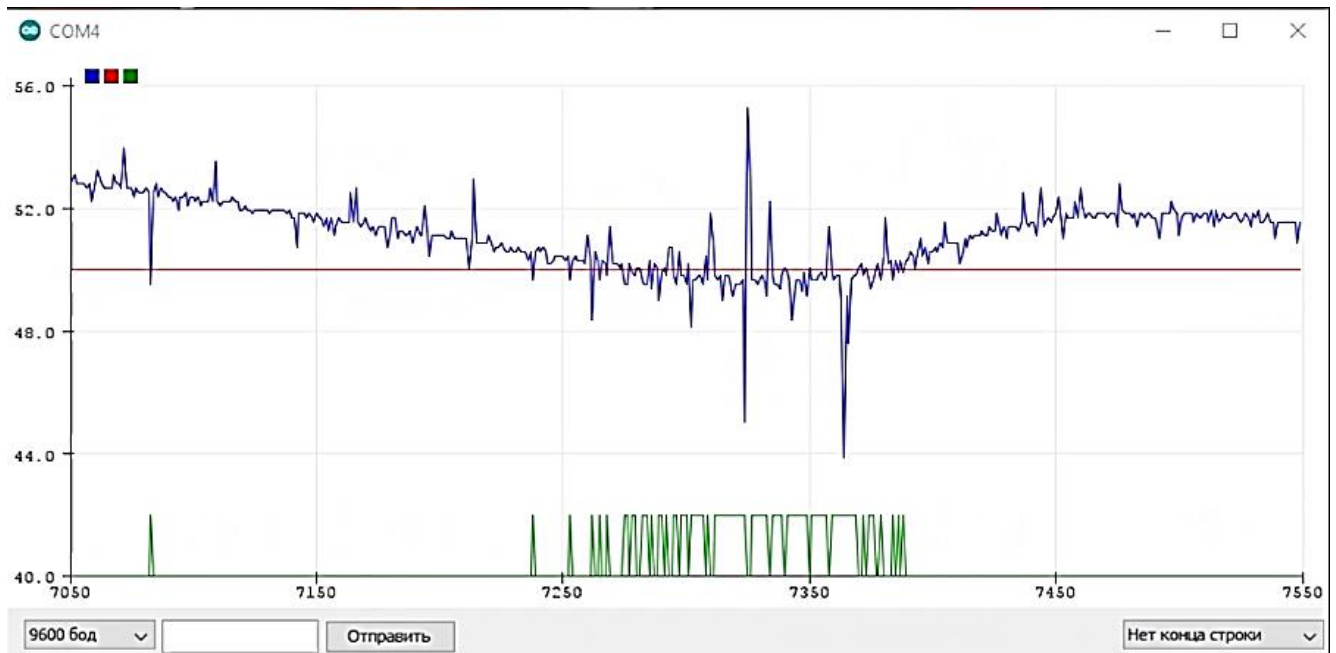


Рисунок 3.4 – Графік елементарного релейного керування

Зелений графік – саме стан реле. З цього графіка також впливає невтішний висновок: значення треба фільтрувати, це збільшить стабільність системи. Першим кроком до створення нормального релейного регулятора є період роботи регулятора, його можна реалізувати як затримкою (не рекомендується, тому що в однопотоковому, синхронному режимі призведе до "завмирання" всієї системи), так і таймером на мілісекунди:

```
while True: # В нескінченному циклі
    temperature = get_temperature() # Функція опитування термодатчиків
    pin_relay = Pin(0, Pin.OUT) #Прив'язали пін 0 до об'єкту класу Pin в режимі OUT
    if temperature < 50.0: # Якщо температура з датчика менше ніж 50 градусів, то увімкнемо реле
        pin_relay.value(1)
    else: # Якщо температура з датчика понад 50 градусів, то вимикаємо реле
        pin_relay.value(0)
    time.sleep(1000) # Таймаут на 1 секунду
```

Рисунок 3.5 – Приклад релейного керування з затримкою

І ситуація докорінно зміниться, адже навіть за всього бажання реле не зможе перемикатися частіше, ніж раз на секунду.

Другий спосіб – **гістерезис**, що дозволяє ще сильніше зменшити кількість перемикань реле і навіть позбутися опитування по таймеру, що підвищує реакцію системи на зміни, зберігши при цьому хорошу стійкість до похибок. Гістерезис поділяє установку на дві, трохи менше і трохи більше, на розмір вікна гістерезиса.

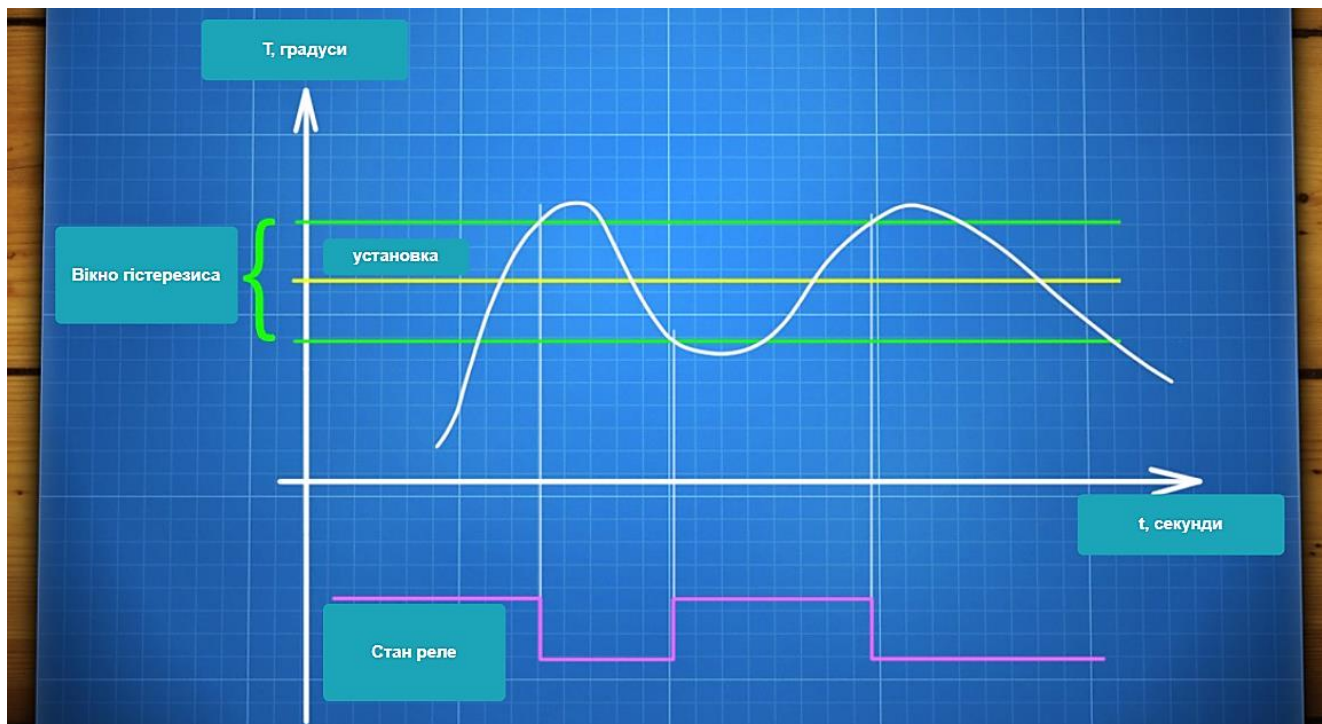


Рисунок 3.6 – Графічне зображення другого алгоритму

Логіка роботи така, що ми включаємо реле на нагрівання нижче нижньої лінії і вимикаємо тільки вище верхньої. Тобто утворюється область, усередині якої система грубо кажучи рухається за інерцією від останнього перемикання і переходить на новий стан лише за виході з цієї області. Зрозуміло, що додавання гістерезиса сильно зменшує не тільки кількість перемикань реле, але й точність, тому що ми своїми власними руками задаємо область, точність усередині якої нам фактично байдужа, як і шуми вимірювання.

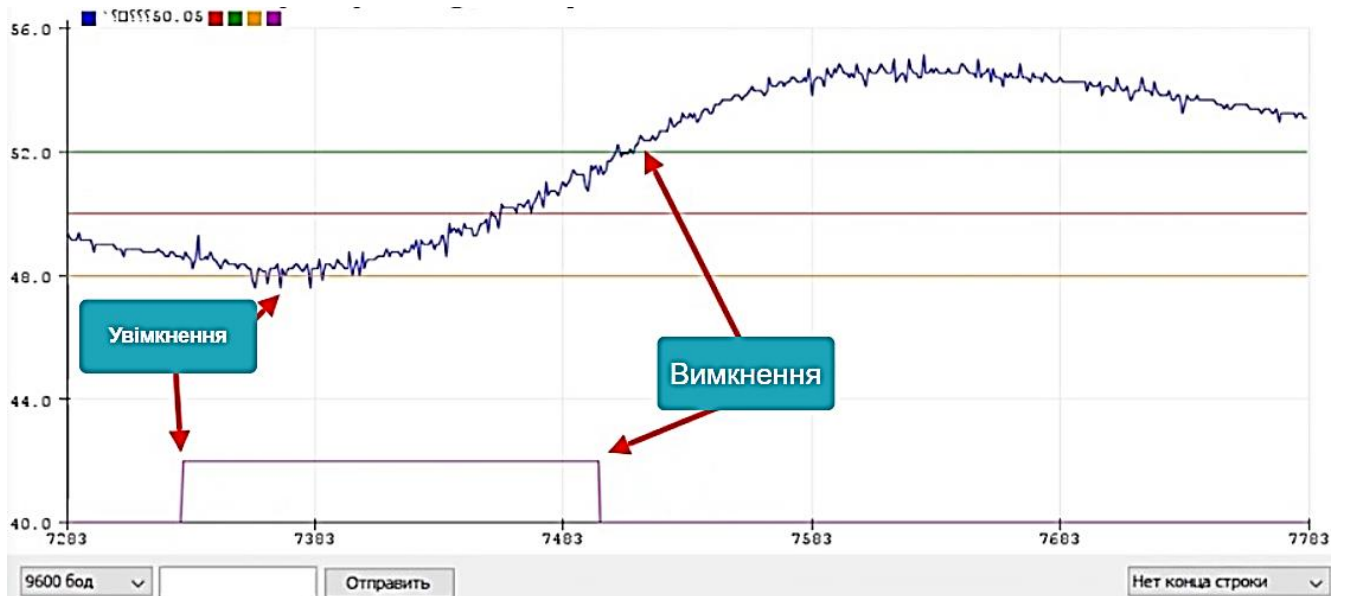


Рисунок 3.7 – Графічне зображення результату другого алгоритму

Тепер зменшилася кількість шумів і зношування реле, але ми фактично "розкачали" систему, змушуючи її включатися трохи нижче заданої температури, а вимикатися - трохи вище. Коливання температури стали сильнішими, і це не дуже добре. Але є спосіб їх уникнути.

Розглянутий далі алгоритм дозволяє вимикати та включати реле заздалегідь, аналізуючи швидкість зміни температури. Якщо система відчуває, що температура зростає і може піднятися вище за установку – вона вимикає реле, і навпаки. Такий спосіб називається **керуванням із зворотним зв'язком за швидкістю зміни величини**. Сама швидкість зміни вводиться в алгоритм як похідна – зміна величини, поділена на час, за який відбулася зміна. Далі ця зміна множиться на якийсь коефіцієнт, який відіграє роль коефіцієнта підсилення та є унікальним для кожної системи, підбирається вручну в діапазоні від 0.001 до 1000, залежить від інертності системи та вибраного періоду роботи регулятора. Сам алгоритм у вигляді функції:

```

def lookahead_algorithm() -> None:

    coefficient = 0.01

    if coefficient > 0:
        rate = (input_value - previous_input) / delta_time
        previous_input = input_value
        signal = input_value + rate * coefficient
    else:
        signal = input_value

    value_direction = (sign(signal - setpoint - hysteresis / 2) + sign(signal - setpoint + hysteresis / 2)) / 2
    if value_direction == 1:
        result = some_direction
    else:
        result = not some_direction
    return result

```

Рисунок 3.8 – Алгоритм з випередженням

Як можна бачити, алгоритм дуже простий: налаштуємо установку та гістерезис – система намагатиметься утримати установку всередині нього, тобто він грає більше роль вікна точності.



Рисунок 3.9 – Результат роботи алгоритму з випередженням

Далі передаємо регулятор значення з датчика, а він нам видає 1 або 0 – включати або вимикати реле. І все, графік на тій же системі виглядає так, регулятор працює набагато краще. Точність більша ніж з класичними схемами з гістерезисом.

Налаштування для відносно швидкої системи (описано в пункті 3.1), потрібно вибирати час меншого опитування датчика, тобто опитувати датчик частіше. Рекомендований результат вийшов при 2 опитуваннях на секунду. Для

великих інерційних систем можна брати період кілька секунд або навіть хвилин. Алгоритм вимірює швидкість зміни температури цей час і множить його на коефіцієнт. Якщо під час роботи система «перелітає» через гістерезис, потрібно збільшити коефіцієнт, щоб реле вимикалося та вмикалося раніше.

3.2.2 Автоматизація з використанням ШІМ сигналів

Дуже часто у виробничих процесах виникає необхідність плавно керувати якимось процесом, чи то потужність обігрівача, чи швидкість обертання мотора. Цілком очевидно, що управління безпосередньо пов'язане зі зміною напруги на споживачі: і світлодіод буде по-іншому світити, і двигун обертатися з іншою швидкістю. Але проблема в тому, що керувати напругою може ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач, а в нашому мікроконтролері вбудованого ЦАП немає, у нас є тільки цифровий сигнал, тобто. або вкл, або вимк.

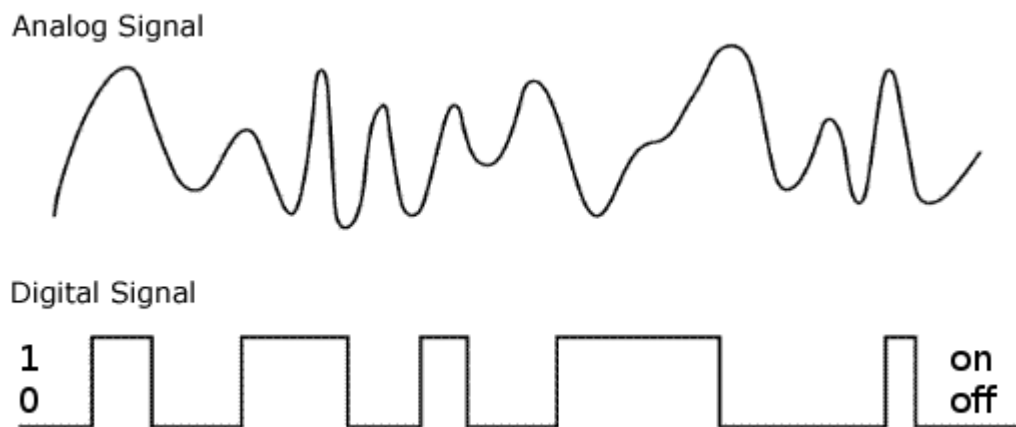


Рисунок 3.10 – Порівняльні графіки аналогового та цифрового сигналів [5]

Але можна досягти плавного керування цифровим сигналом. Уявіть собі вентилятор, що обертається на повній потужності, напруга – постійна. Уявімо тепер, що секунду напруга подається, і секунду – ні, і так продовжується "по колу". Вентилятор почне крутитися вдвічі повільніше, але ми швидше за все помічатимемо моменти включення та вимкнення, особливо якщо вентилятор маленький і швидко зупиняється. Тепер давайте вмикати напругу на 0.5 секунди, а на решту 1.5 секунд – вимикати. Вентилятор обертатиметься зі швидкістю 25% від максимальної. Цей приклад описує так званий ШІМ сигнал, тобто широтно-імпульсну модуляцію.

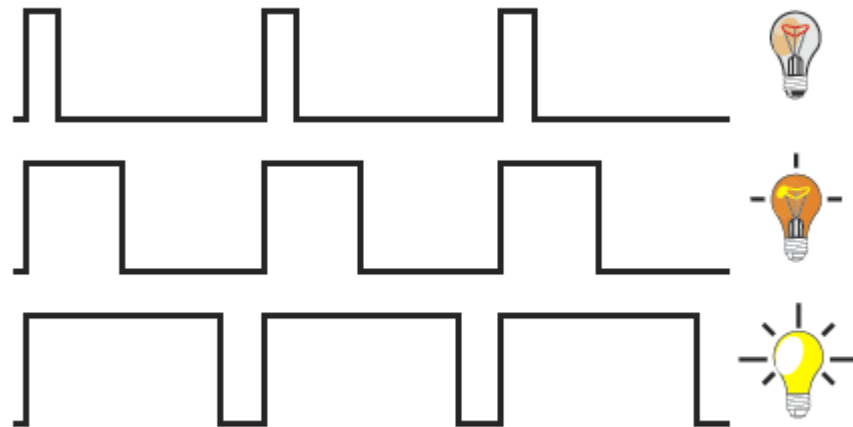


Рисунок 3.11 – Демонстраційне зображення ШІМ сигналу [2]

З лампочкою розжарювання буде працювати, адже вона дуже інертна, але, наприклад, зі світлодіодом ми будемо бачити, як він включається і вимикається, тому що він практично не має затримки включення/вимикання. Щоб це виправити потрібно підняти частоту. У уявному експерименті у нас був період 2 секунди, що є 0.5 Гц. А тепер уявіть собі такий сигнал із частотою скажімо 1000 Гц. Або 25'000 Гц (25 кГц). Тепер роль відіграє інертність ока, він не помітить спалахів на такій частоті, для нього це буде просто зменшення яскравості.

Змінюючи так зване "заповнення" ШІМ сигналу можна змінювати "сумарну" (інтегровану) напругу за деякий період. Чим більше заповнення ШІМ, тим вища напруга.

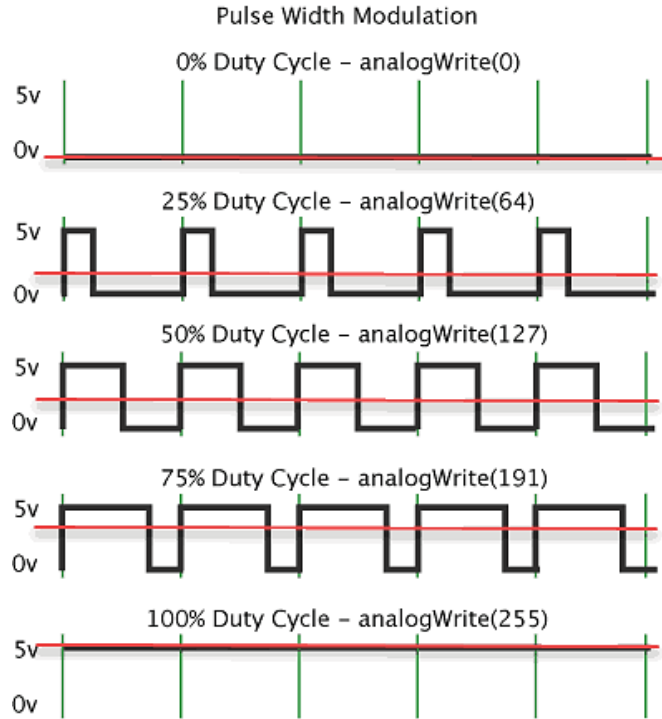


Рисунок 3.12 – Демонстрація «заповнення» ШІМ сигналу [1]

За допомогою ШІМ сигналу можна навіть модулювати складні аналогові сигнали, наприклад синусоїду. На зображенні нижче показаний ШІМ (знизу) і цей же ШІМ після фільтрів:

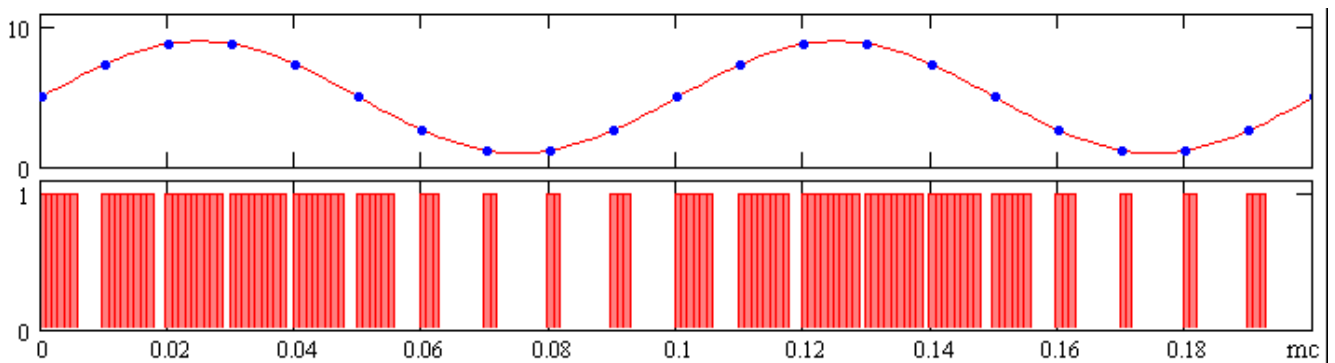


Рисунок 3.13 – Модулювання складних аналогових сигналів за допомогою ШІМ сигналу [1]

Частота ШІМ за замовчуванням 1 кГц. Розрядність ШІМ за замовчуванням 8 біт (0.. 255)

3.2.3 Зчитування та обробка даних

Зчитування (парсинг) даних та результатів – дуже важливий аспект функціональності автоматизованих систем.

У багатьох мікроконтролерів є інтерфейс UART (Universal asynchronous receiver-transmitter), що дозволяє передавати та приймати різні дані. Інтерфейс має два контакти на платі – піни TX (Transmitter) і RX (Receiver). На більшості плат до цих пін підключений USB-UART перетворювач (розташований на платі), за допомогою якого плата може визначатися комп'ютером при підключенні кабелю USB і обмінюватися з ним інформацією. На комп'ютері створюється віртуальний COM порт (послідовний порт), до якого можна підключитися за допомогою програм-терміналів та приймати-надсилати текстові дані. Так само працюють деякі принтери і більшість верстатів з ЧПУ.

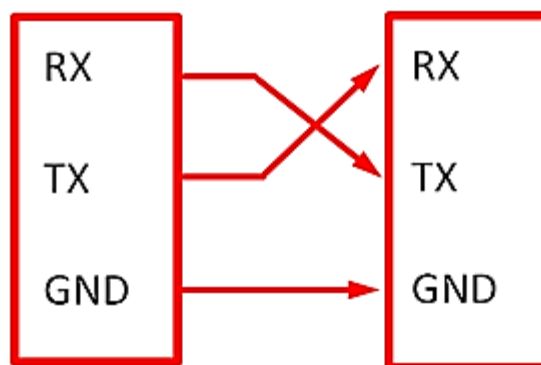


Рисунок 3.14 – Схема TX-RX з'єднання [7]

У більшості IDE (Integrated development environment – Інтегроване середовище розробки) є вбудована консоль – монітор порту. Об'єкт класу Serial

дозволяє як просто приймати та відправляти дані через послідовний порт, так і успадковує із класу `Stream` з безліччю спеціальної функціональності.

Запустити зв'язок по `Serial` можна на швидкості **speed** (вимірюється в **baud**, біт за секунду). Швидкість можна поставити будь-яку, але є кілька стандартних значень.

Список швидкостей для монітора порту:

- 9600
- 19200
- 115200
- 250000
- 1000000
- 2000000

Крім монітора послідовного порту, в IDE є плоттер – «будівник» графіків у реальному часі за даними послідовного порту. Достатньо відправити значення за допомогою команди **`Serial.println(значення)`** і відкрити плоттер по послідовному з'єднанню, наприклад, побудуємо графік значення з аналогового піна A0:

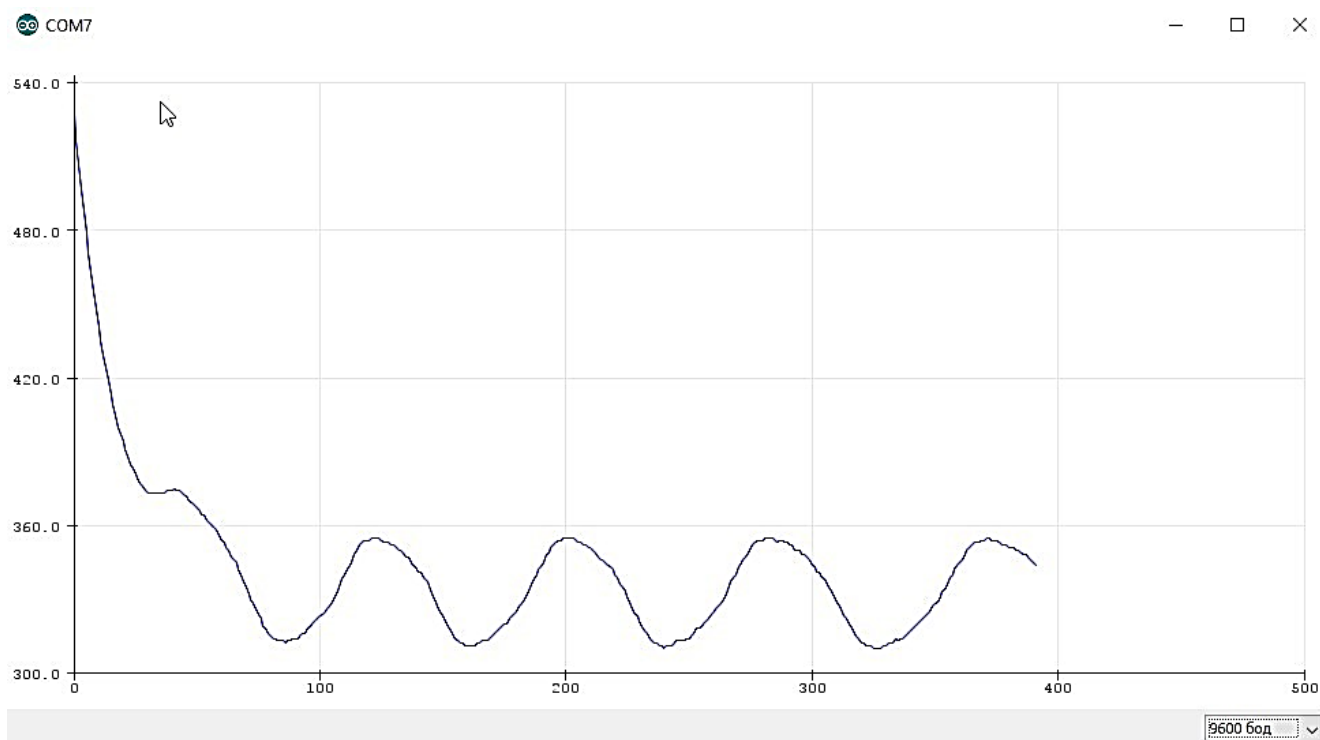


Рисунок 3.15 – Демонстрація побудови графіку через плоттер

Дуже важливу роль отриманні даних відіграє фільтрація сигналів. Дуже поширеною проблемою є шум при вимірах.

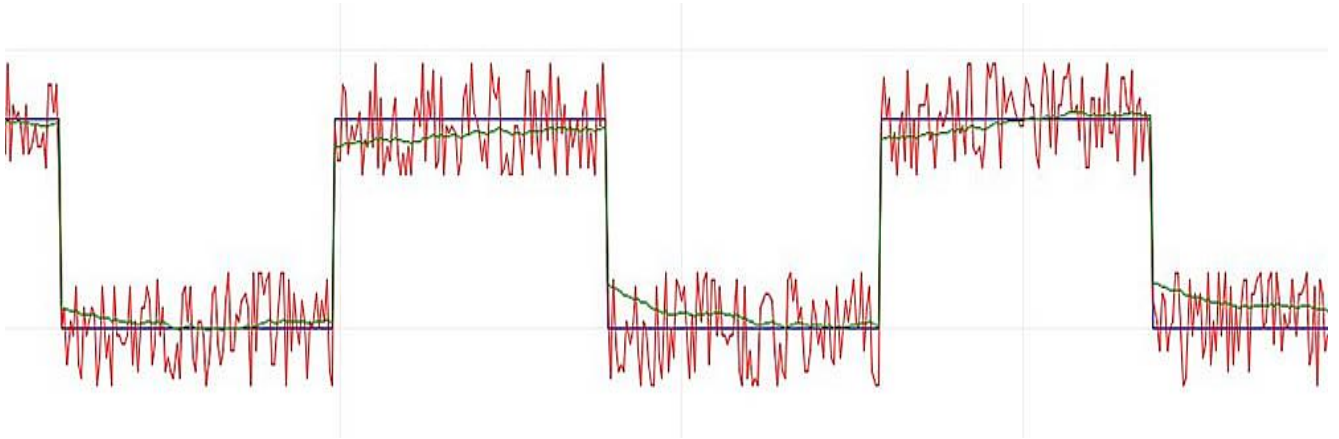


Рисунок 3.16 – Демонстрація шуму при вимірах

Шум можна умовно розділити на два типи: постійний шум датчика з однаковим відхиленням (див. рис. 3.14), і випадковий шум, який виникає за різних випадкових (найчастіше зовнішніх) обставин (див. рис. 3.15).

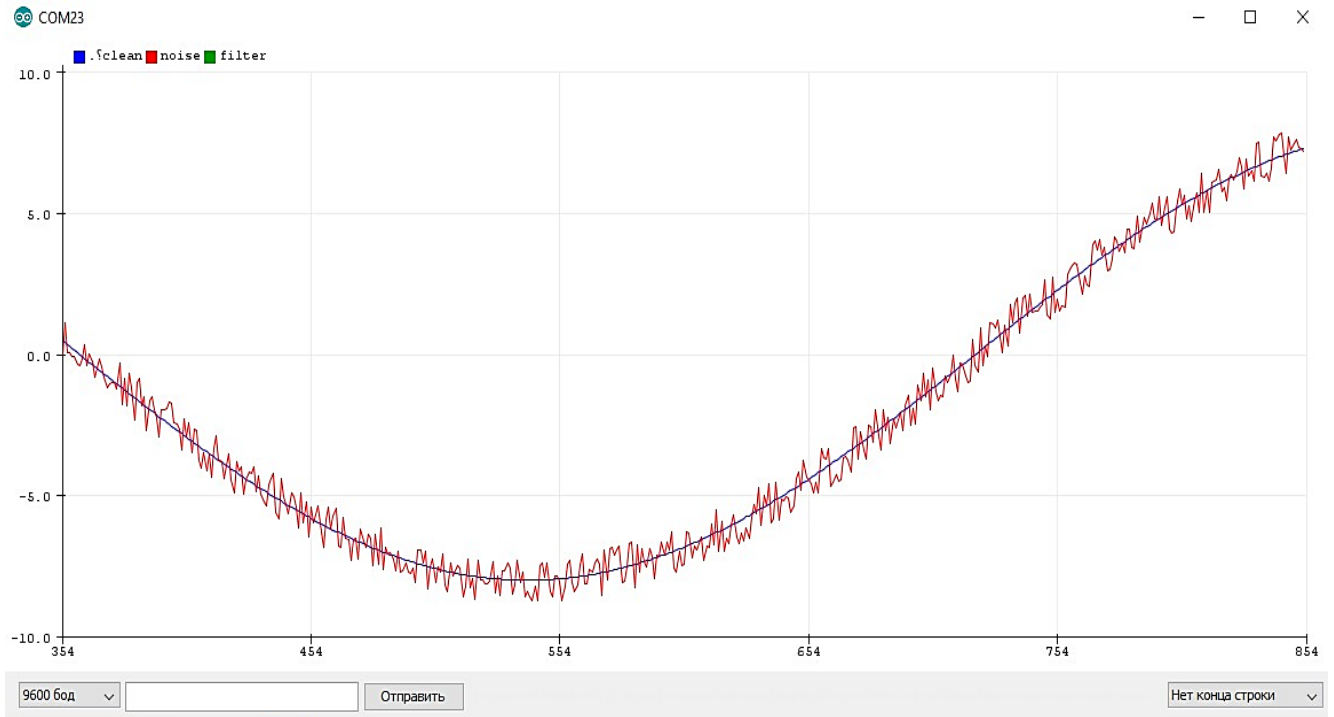


Рисунок 3.17 – Постійний шум датчика з однаковим відхиленням

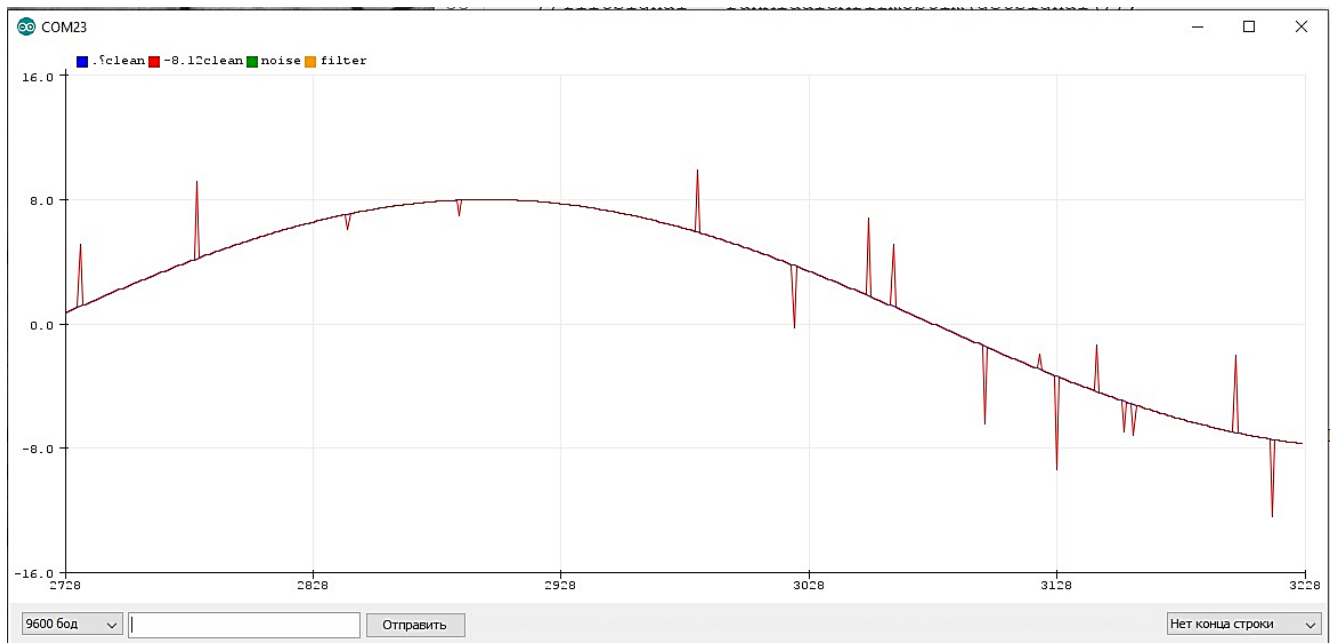


Рисунок 3.18 – Випадковий шум

Невеликий шум спостерігається у будь-якого аналогового датчика, що опитується засобами АЦП ESP32. Причому сам АЦП практично не шумить, якщо забезпечити якісне харчування плати та відсутність електромагнітних наведень – сигнал із того ж потенціометра буде ідеально рівний. Але як тільки живлення стає неякісним, наприклад, від дешевого блоку живлення, картина змінюється. Або, наприклад, без навантаження блок живлення дає хороше живлення і шуму немає, але як тільки з'являється навантаження – з'являються шуми, пов'язані з пристроєм блоку живлення та відсутністю нормальних вихідних фільтрів. Інший варіант – десь поруч із проводом до аналогового датчика з'являється потужне джерело електромагнітного випромінювання (провід з великим змінним струмом), який наводить у проводах додаткову ЕРС і ми знову бачимо шум. Цих причин можна позбутися апаратно, додавши фільтри по живленню і екранувавши всі аналогові дроти, але це не завжди виходить, тоді потрібно застосовувати програмну фільтрацію значень.

Цифрові (програмні) фільтри дозволяють відфільтрувати різні шуми. Наведені нижче приклади показують деякі популярні фільтри. Всі приклади оформлені як функція, що фільтрує, якій в якості параметра передається нове

значення, і функція повертає фільтровану величину. Деякі функції потребують додаткових налаштувань.

Експоненційне ковзне середнє – найпростіший і найефективніший фільтр значень, дуже оптимальний у плані реалізації

```
k = 0.1
fil_val = 0

def exp_running_average(new_val: float) -> float:
    global fil_val
    fil_val += (new_val - fil_val) * k
    return fil_val
```

Рисунок 3.19 – Алгоритм «Експоненційне ковзне середнє»

Особливості використання:

- Найлегший, найшвидший і найпростіший для обчислення алгоритм. Водночас дуже ефективний
- Сила дії фільтра налаштовується коефіцієнтом (0.0 - 1.0). Чим він менший, тим плавніший фільтр
- Робить лише один вимір за раз, не блокує код на тривалий період
- Чим частіше виміри, тим краще працює
- При невеликих значеннях коефіцієнта працює дуже плавно, що також можна використовувати у проекті

Ось так експоненційне ковзне середнє справляється з рівномірно зростаючим сигналом з випадковими викидами. Синій графік – реальне значення, червоний – фільтрований з коефіцієнтом 0.1, зелений – коефіцієнт 0.5.

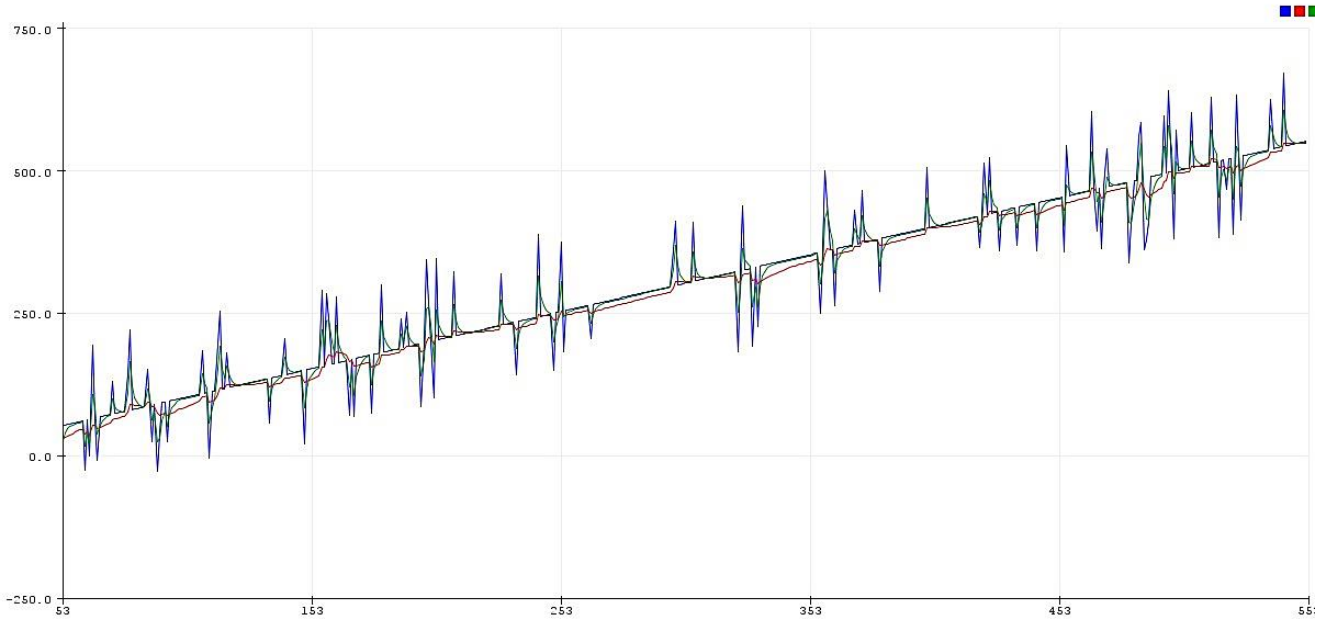


Рисунок 3.20 – Використання алгоритму для рівномірно зростаючого сигналу з випадковими викидами

Приклад із шумним квадратним сигналом, на якому видно запізнення фільтра:

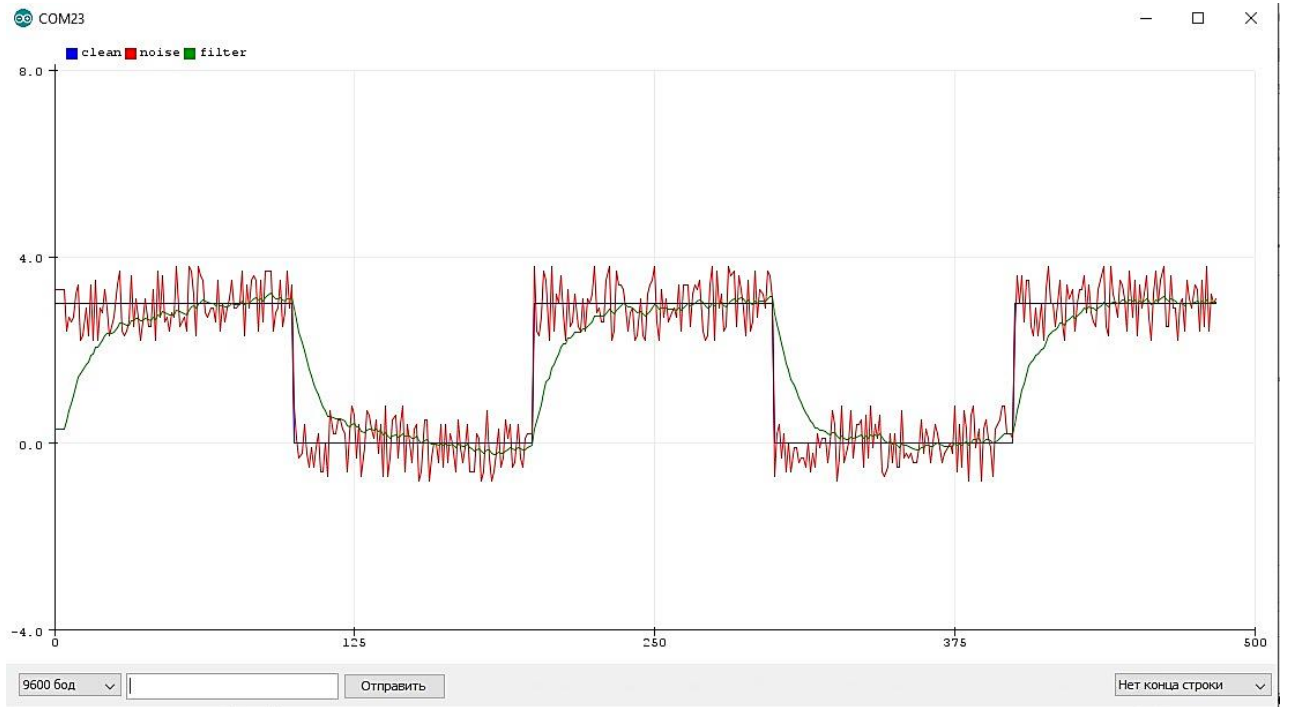


Рисунок 3.21 – Використання алгоритму для квадратного сигналу

Щоб експоненційне ковзне середнє коректно працювало з сигналами, що різко змінюються, коефіцієнт можна зробити адаптивним, щоб він підлаштовувався під різкі зміни значення, наприклад так: якщо фільтроване значення "далеко" від реального – коефіцієнт різко збільшується, дозволяючи швидко скоротити "розрив" між величинами. Якщо значення "близько" – коефіцієнт ставиться невеликим, щоб добре фільтрувати шум:

```

fil_val = 0

def exp_running_avg_adaptive(new_val: float) -> float:
    global fil_val

    if abs(new_val - fil_val) > 1.5:
        k = 0.9
    else:
        k = 0.03

    fil_val += (new_val - fil_val) * k
    return fil_val

```

Рисунок 3.22 – Експоненційне ковзне середнє з адаптивним коефіцієнтом

Таким чином, навіть найпростіший фільтр можна покращувати і робити більш "розумним".

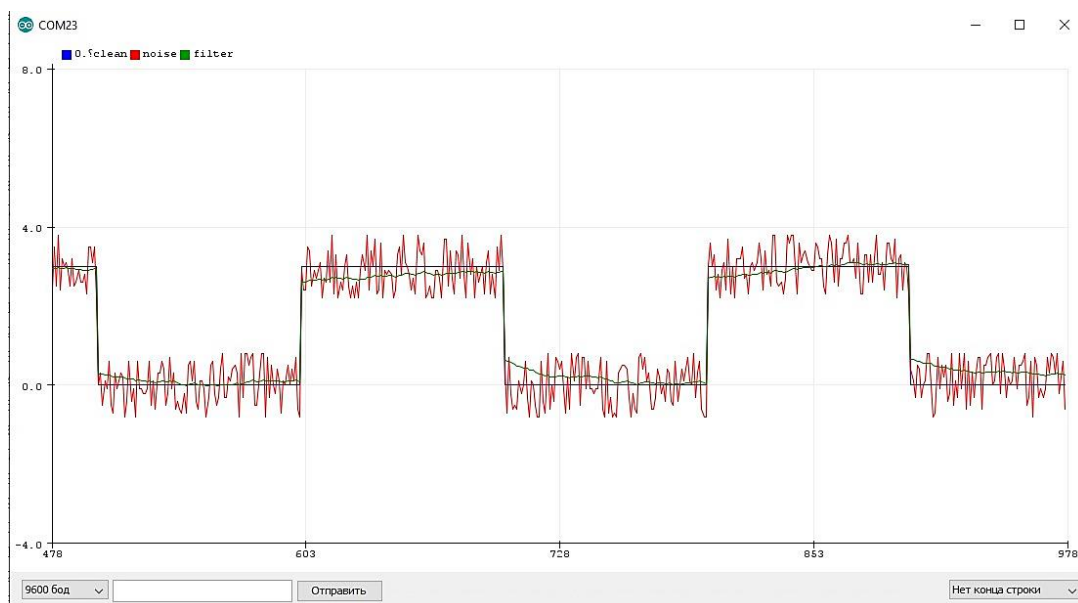


Рисунок 3.23 – Результат застосування алгоритму

3.3 Автоматизація установки з мікроконтролерами ESP32 або ESP8266

Експериментальну установку можна автоматизувати використовуючи мікроконтролери, наприклад мікроконтролери серії Arduino або ESP32. Не автоматизованими є рівень динамічної або запланованої зміни потужності нагрівального елемента, утримання певної температури на протязі довгого періоду, а також не автоматизованим є процес отримання результатів та подальша обробка отриманих даних.

Для плавного управління навантаженням змінного струму завдання сильно ускладнюється: потрібно спіймати момент перемикання напруги, засікати час і вимикати симістор, відсікаючи частину синусоїди, це називається фазовим керуванням. Отже для динамічної або запрограмованої зміни потужності можна використовувати димер на базі симістору. Нижче буде схематично зображено робота симістору.

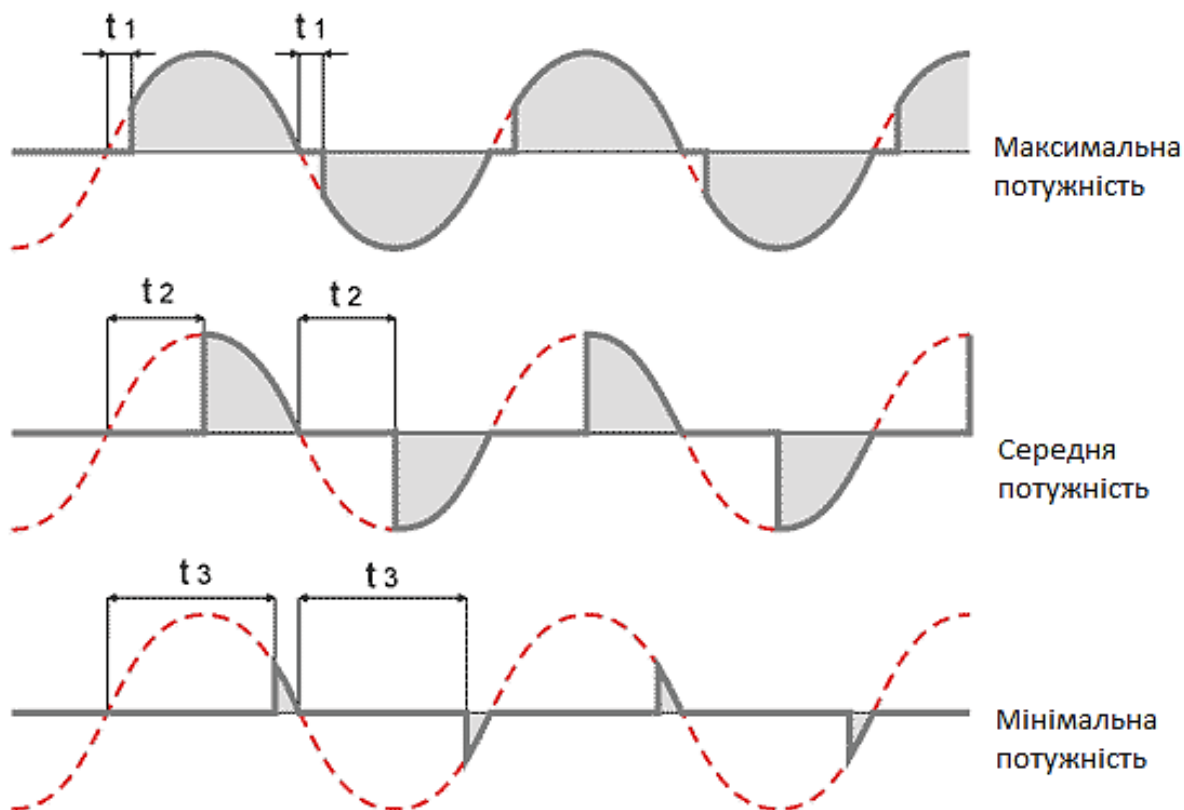


Рисунок 3.24 – Керування потужністю симістром [7]

Схема під'єднання димеру до мікроконтролерів зображена нижче:

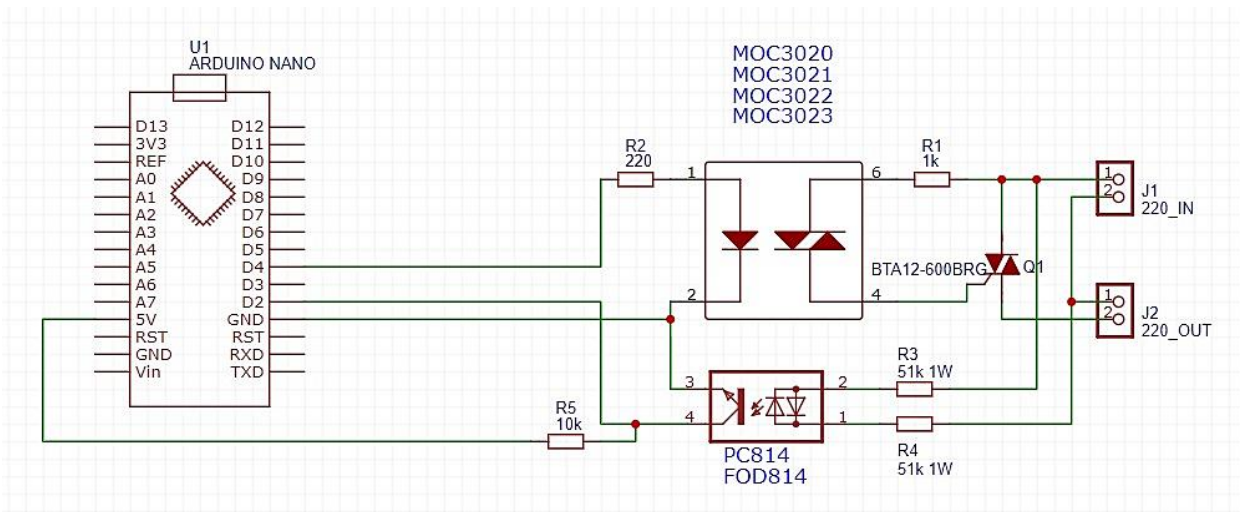


Рисунок 3.25 – Схема під'єднання димеру [5]

Схема підключення до ESP32 аналогічна. Таким способом можна керувати потужністю нагрівального елемента. Але для утримання певної постійної температури потрібно використовувати ПІД-регулятор.

Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор – найскладніший математичний алгоритм функціонування автоматичного регулятора, що включає вплив усіх розглянутих вище законів. ПІД регулятор один з найпоширеніших автоматичних регуляторів. Він настільки універсальний, що застосовується практично скрізь, де потрібно автоматичне керування. Наприклад температурою: спеціальні печі, холодильники, інкубатори, паяльники, сопло або стіл 3D принтера, ІК паяльні станції та інше. Підтримка частоти оборотів мотора, наприклад для верстатів. Будь-які балансувачі прилади, гіроскутери, сігвеї, левітуючі магнітні платформи, і звичайно ж квадрокоптери та літаки з автопілотом.

Перш ніж переходити безпосередньо до ПІД-регулятора, дуже важливо зрозуміти кілька базових понять, з яких складається автоматична система. Насамперед це регулятор, який усім керує і знаходиться в центрі системи. Регулятор у цьому розумінні – математичний алгоритм чи частина програми, яка виконується мікроконтролері. Регулятор, як алгоритм, працює зі звичайними числами та значеннями. Об'єкт керування – це девайс, яким ми керуємо, наприклад,

ТЕН або мотор. Для цього у нас є пристрій, що керує, наприклад через димер керуємо ТЕН-ом або драйвером мотора. Керуючий пристрій отримує від регулятора сигнал керування, тобто конкретне число. Це може бути заповнення ШИМ сигналу, від 0 до 255, а може бути кут повороту сервоприводу від 0 до 180, тому що регулятору не має значення чим керувати.

В об'єкті управління у нас стоїть датчик, з якого регулятор отримує керовану величину, тобто поточний сигнал із датчика. Це – **зворотний зв'язок**, який дає можливість системі підтримати задане значення. Що стосується печі це температура, і з мотором – частота оборотів. Ну і нарешті регулятор отримує **установку** (уставку), тобто число, до якого він має привести поточне значення датчика.

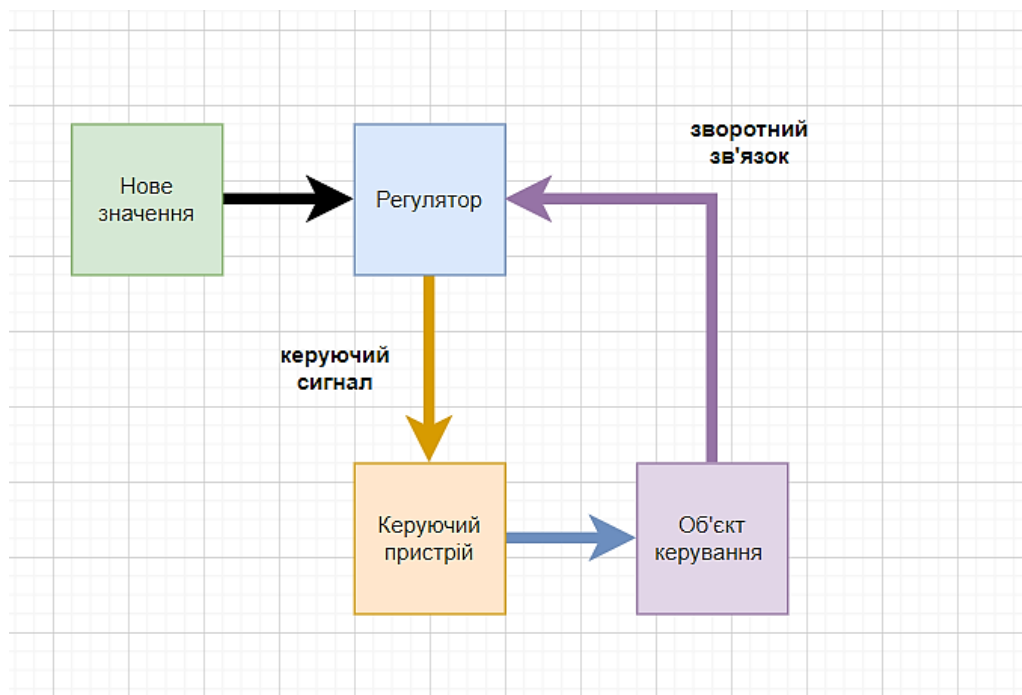


Рисунок 3.26 – Схема керування

Установка може задаватися будь-яким чином: кнопками, повзунком, енкодером, сенсором, та хоч СМС або голосовим введенням. Регулятору це не важливо, для нього це просто значення. Завдання регулятора полягає в тому, щоб порівнювати поточне значення з установкою і видавати сигнал керування на керуючий пристрій. Тобто в програмі це буде виглядати умовно так: регулятор

отримав установку, регулятор отримав значення з датчика, регулятор виконав обчислення і видав нам сигнал, що керує, і це знову ж таки число.

Якщо це ШІМ – ми його подаємо через функцію генерації ШІМ. Є ще один момент - регулятор повинен робити розрахунки і застосовувати сигнал керування через рівні проміжки часу, тобто з рівним періодом або частотою. Ця частота називається частотою дискретизації системи, а період позначається як dt , як період інтегрування.

Як було зазначено раніше, ПІД-регулятор складається з трьох частин: пропорційної, інтегральної та диференціальної. Нижче буде графік прикладу «стабілізування» величини на відмітці 0.86 за рахунок ПІД-регулятора.

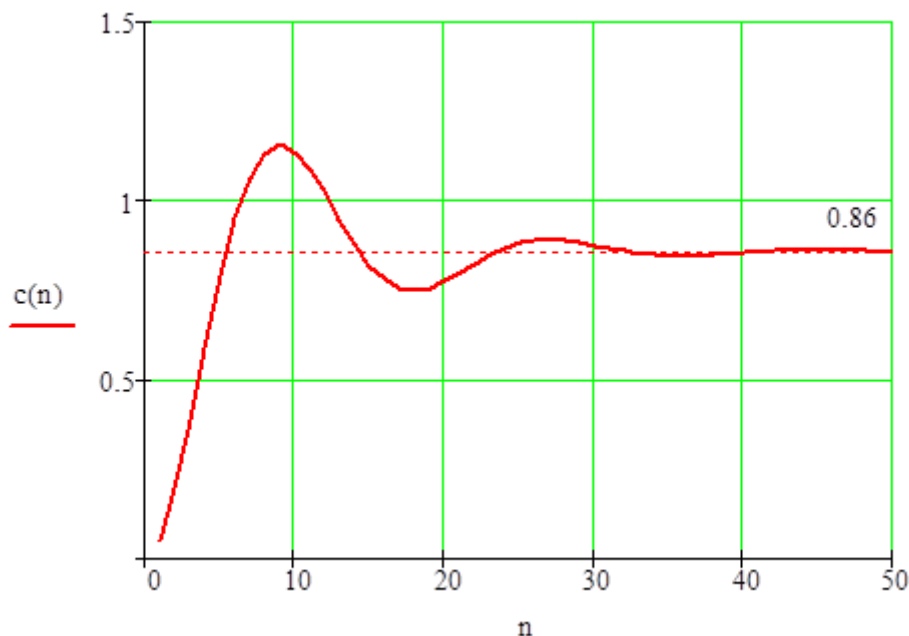


Рисунок 3.27 – Застосування ПІД-регулятора [7]

ПІД-регулятор – математичний алгоритм, реалізація якого відбувається на мікроконтролері, математично його можна записати формулою:

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.7)$$

ПІД регулятор складається з трьох складових: пропорційної P , інтегральної I та диференціальної D , формується просто як сума трьох значень, помножених на свій коефіцієнт. Ця сума після обчислень стає керуючим сигналом, який подається на керуючий пристрій, позначається як **result**.

$$result = P * kP + I * kI + D * kD \quad (3.8)$$

де kP , kI і kD ті самі коефіцієнти, які потрібно налаштувати для роботи ПІД-регулятора. Значення можуть бути різні, від 0.001 до десятків і тисяч, це залежить від конкретної системи.

Хочу зазначити, що будь-який коефіцієнт може дорівнювати нулю, і в такому випадку обнулюється вся його компонента. Тобто регулятор можна перетворити на П, ПІ, ПД, та інші поєднання. Різні системи вимагають різного підходу, саме тому ПІД регулятор такий універсальний. Надалі користуватимемося наступними назвами змінних:

- *result* – вихід із регулятора (сигнал керування)
- *set_point* - установка (задане значення)
- *input* - вхід (значення з датчика)
- *error* – похибка регулювання
- *dt* – період обчислення та регулювання

Пропорційна складова є різницею поточного значення з датчика та установки:

$$P = set_point - input \quad (3.9)$$

Ця різниця називається похибкою регулювання, тобто як далеко знаходиться система від заданого значення. Виходить чим більше похибка, тим більше буде керуючий сигнал і тим швидше система приводитиме керовану величину до заданого значення. Коефіцієнт **kP** тут впливає на роль посилення похибки та налаштовується вручну. Але в той же час, якщо система дійшла заданої величини, похибка стане рівною нулю, і керуючий сигнал теж. Іншими словами, регулятор ніколи не зможе привести до заданого значення, завжди буде якась похибка. П

складова є основною в ПІД регуляторі і має важливий вплив. Регулятор може непогано працювати тільки на ній одній. Р складова виправляє помилку в даний час.

Інтегральна складова просто підсумовує в саму себе ту саму похибку, різницю поточного і заданого значення, помножену на період дискретизації системи, тобто на час, що минув з попереднього розрахунку dt – фактично бере інтеграл від похибки за часом.

$$I = I + (set_point - input) \times dt \quad (3.10)$$

У самому регуляторі це ще множиться на коефіцієнт k_I , яким налаштовується різкість цієї складової. В інтегральній складовій буквально накопичується похибка, що дозволяє регулятору з часом повністю її усунути, тобто привести систему до заданого значення з максимальною точністю. І складова виправляє минулі похибки, що накопичилися.

Диференціальна складова являє собою різницю поточної та попередньої помилки, поділену на час між вимірюваннями, тобто на ту ж dt , яка має загальний період регулятора. Іншими словами - це похідна від помилки за часом.

Фактично **D** складова реагує на зміну сигналу з датчика, і що сильніше відбувається це зміна, то більше значення додається до загальної суми. Іншими словами, **D** дозволяє компенсувати різкі зміни в системі і при правильному налаштуванні запобігти сильному перерегулюванню та зменшити розгойдування. Коефіцієнт **D** дозволяє налаштувати вагу, чи різкість даної компенсації, як інші коефіцієнти регулюють свої складові.

$$error = set_point - input \quad (3.11)$$

$$D = (error - previous_error) / dt$$

$$previous_error = error$$

D складова в першу чергу потрібна для швидких систем, тобто для систем з різкими змінами, такі як квадрокоптер або верстат шпиндель під змінним навантаженням. **D** складова виправляє можливі майбутні помилки, аналізуючи швидкість.

Для налаштування регулятора потрібно варіювати коефіцієнти:

При збільшенні k_P збільшується швидкість виходу на рівень встановленого значення, збільшується керуючий сигнал. Чисто математично система не може прийти рівно до заданого значення, так як при наближенні до установки I складник пропорційно зменшується. При подальшому збільшенні k_P , реальна система втрачає стійкість та починаються коливання.

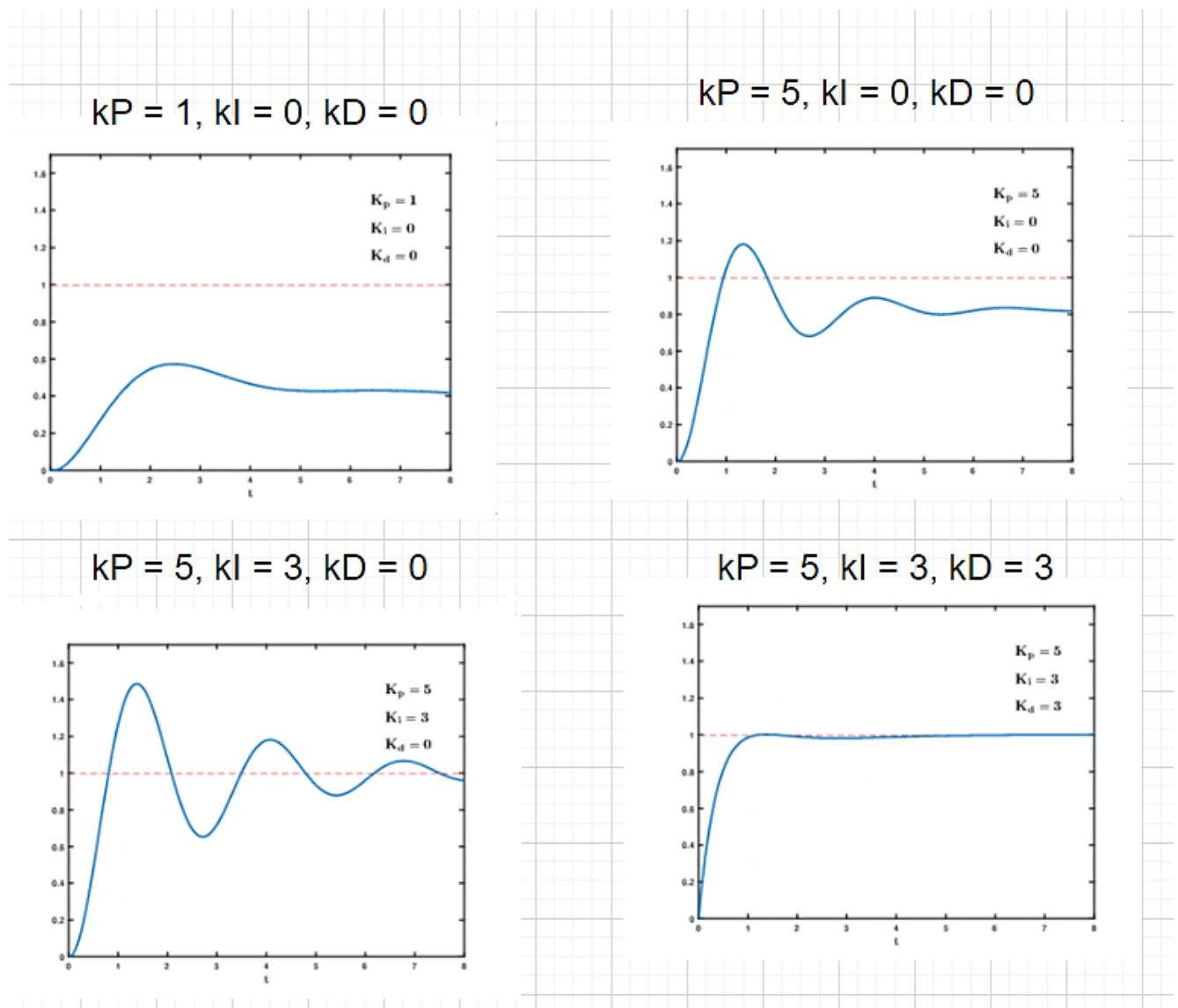


Рисунок 3.28 – Вплив значень ПІД-регулятора [7]

При збільшенні k_I зростає швидкість компенсації накопиченої похибки, що дозволяє вивести систему точно до заданого значення з плинном часу. Якщо система повільна, а k_I занадто великий – інтегральна сума сильно зросте і відбудеться перерегулювання, яке може мати характер коливань, що незатухають, з великим

періодом. Тому інтегральну суму в алгоритмі регулятора часто обмежують, щоб вона не могла збільшуватися та зменшуватись до нескінченності.

При збільшенні **kD** зростає стабільність системи, вона не дає системі змінюватися надто швидко. У той же час kD може стати причиною неадекватної поведінки системи та постійних стрибків керуючого сигналу, особливо якщо значення з датчика шумить. На кожну різку зміну сигналу з датчика D складова реагуватиме зміною керуючого сигналу, тому сигнал з датчика потрібно фільтрувати.

Налаштування регулятора – справа не тривіальна. Початкові коефіцієнти для підбору можна отримати за наступним алгоритмом: спочатку виставляємо всі коефіцієнти в 0. Плавно збільшуємо kP до появи коливань, що незатухають. Значення kP, за якого вони з'явилися, запишемо і позначимо як **kP1**. Далі вимірюємо період коливань системи за секунди, позначимо як T.

Як варіант, коефіцієнти можна отримати так:

- $kP = 0.6 * kP1$
- $kI = kP / T * 2 * dt$
- $kD = kP * T / 8 / dt$

На отриманих коефіцієнтах має більш-менш працювати більшість систем, але не всі. Також можна скористатися автоматичним тюнером коефіцієнтів з різних бібліотек.

Отже, ми вирішили одне з питань цього пункту, а саме автоматизація температури, залишилось автоматизувати процес отримання результатів та подальшу обробку отриманих даних.

Для автоматизації розглядається мікроконтролер ESP32, а для створення програми на ПК бібліотеку Qt, оскільки функціонал цієї бібліотеки важко переоцінити.

Що стосується отримання даних, то в першу чергу це залежить від сенсорів, які ми використовуємо, оскільки від цього залежить тип підключення, наприклад I2C, SPI, UART, або просто байтові сигнали на аналогові або цифрові піни. Якщо наприклад взяти найпростіші та найнадійніші температурні датчики DS18B20 або

інші, але з подібною схемою підключення, то там використовуються лише 1 сигнальний пін з під'єднаним резистором на 4.7кОм до живлення в 3.3В або 5В. Данні, що зчитуються з цих датчиків можна відправити на ПК в декілька способів: через USB, через Ethernet Shield (при умові прямого підключення до ПК), через Wi-Fi на локальний хост або при підключенні до інтернету (неважливо Wi-Fi чи Ethernet wire) по відомим протоколам TCP або UDP на сервер. Але для цього випадку потрібно реалізувати серверну частину або скористуватись протоколом MQTT з придбаним хостингом, в цьому випадку данні можна дивитись дані або керувати температурою з будь-якого місця на нашій планеті, за умови наявності там інтернету.

Для нашого випадку можна швидко реалізувати USB з'єднання для пересилання даних в форматі JSON. Основними параметрами будуть розмір даних та швидкість в «БОД». Отже основний алгоритм програми на мікроконтролері:

- Зчитування даних сенсорів.
- Передача цих даних в клас ПІД-регулятора (для стабілізування).
- Запис всіх даних в JSON файл.
- Переведення JSON в ByteArray.
- Запис ByteArray в Serial.
- Отримання команд с ПК, а саме бажану температуру, та запис в ПІД

клас.

Оскільки в ESP32 два ядра, то для збільшення швидкості комунікації потрібно винести комунікацію з комп'ютером на інше ядро. Це можна зробити за допомогою операційної системи реального часу FreeRTOS А команди та данні записувати в черги.

На комп'ютері алгоритм з певною абстракцією можна навести:

- Ініціалізація мікроконтролера за vender id.
- Створення «клієнта», що «прослуховує» порта.
- Перезаписати сигнально-слотові співвідношення.
- Записувати отриманні данні в чергу для обробки.
- Апкастити байтові масиви до JSON формату даних.

- Обробка даних вноситься в інший клас та залежить лише від функціоналу, який потрібен для лабораторного дослідження.
- Створення користувацького інтерфейсу.
- (Якщо потрібно) Запис даних в бази даних використовуючи СУБД MySQL, SQLite, і т.д.
- Також можна вписувати команди для налаштування мікроконтролера, в нашому випадку – бажана температура. Звісно за умови створеного Messagehandler-а на ESP32.

Як було зазначено раніше бібліотека Qt має неймовірно великий функціонал, та включає класи QCustomPlot, QwtPlot3D для створення будь-яких графіків.

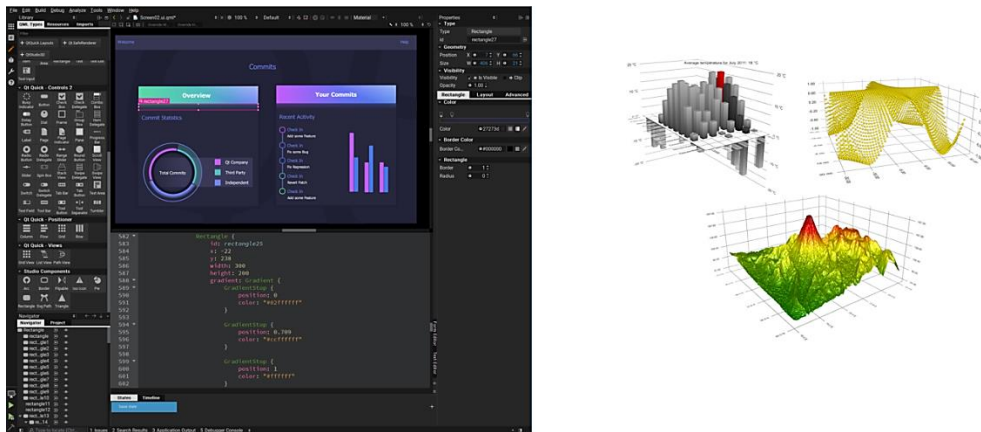


Рисунок 3.29 – Приклад застосування QCustomPlot

Як висновок, хочу зазначити, що автоматизування не має меж, в цьому пункті було розглянуто лише алгоритми автоматизування базового функціоналу установки, а саме контроль температури та обробка вихідних даних. Також повинен відмітити, що вказані вище методи та компоненти можуть бути замінені на інші, але з аналогічним функціоналом. Описаний в цьому пункті алгоритм є універсальним, оскільки ресурс обчислювальної потужності та розмір пам'яті дозволяють обновлювати ПЗ для вдосконалення старого функціоналу або введення нового.

ВИСНОВКИ

1. Змодельовано автоматизацію процесу з використанням алгоритмів релейного керування та ШІМ сигналів.
2. Встановлені основні алгоритми зчитування та обробки даних.
3. Запропоновано вдосконалення установки за рахунок використання мікроконтролерів ESP32 або ESP8266, а саме: контроль рівня динамічної або запланованої зміни потужності нагрівального елемента, утримання певної температури на протязі довгого періоду (Пропорціонально-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор).
4. Мікроконтролери на базі 40нм техпроцесу (ESP32, Raspberry Pico) дозволяють автоматизувати виробництво та процеси, а саме утримання стану в нестабільних системах, автоматизоване зчитування та запис показників, обробка та моделювання даних, передача даних на пристрої та хмарні сховища (API, S3) завдяки TCP/UDP рівню комунікації або високорівневих протоколів gRPC, HTTPS, MQTT та інших.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Поплавко Ю. М. Фізичне матеріалознавство. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, вид-во Політехніка, 2015. 699 с.
2. Бадаєв А. С. Фізичні властивості твердих тіл. Воронеж: ГОУВПО Воронежський державний технічний університет, 2011. 294с.
3. Фізика твердого тіла: підручник. В 2-х томах. / Ю. М. Поплавко. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во Політехніка, 2017. Том 1: Структура, квазічастинки, метали, магнетики. 415 с.
4. Бірюкович Л. О. Кристалографія, кристалохімія та мінералогія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 234 с.
5. Радзівєвський В. М. Фізика конденсованого стану речовини. Суми: Сумський державний університет, 2015. 236 с.
6. Зельдович Я.Б. Хімічна фізика та гідродинаміка. Спб: Наука, 2014 374 с.
7. Фреїк Д. М. Фізика процесів у напівпровідниках та елементах електроніки. Івано-Франківськ: Видавництво Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2010. 263 с.
8. Колесов С.М. Електроматеріалознавство (електротехнічні матеріали): підручник для вузів. Київ: Дельта, 2008. 516 с.
9. Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Загальна фізика та основи зонної теорії твердих тіл: навчально-методичний посібник для самостійної роботи з фізики, ч. 2. Київ: ІСЗЗІ НТУУ «КПІ», 2010. 400с.
10. Ankrum Paul D. Semiconductor electronics. – Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1971. 548 p.
11. Brennan K. F. Physics of semiconductors with application to optoelectronic devices. Cambridge University press, 1999. 762 p.
12. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. 4-е изд. Москва: Энергия, 1977. 671 с.
13. Dimitrijevic S. Understanding semiconductor devices. New York: Oxford University, 1998. 574 p.

14. Балыкин В.И. Атомная оптика и нанотехнология// Успехи физических наук. 2009. т.179, №3. С. 297–304.
15. Болховитянов Ю.Б., Пчеляков О.П. Эпитаксия GaAs на кремниевых подложках: современное состояние исследований и разработок// Успехи физических наук. 2008. Т.178, №5. С. 459–481.
16. Leaver K. Microelectronic devices. Imperial College Press, UK. 1997. 236 p.
17. Mayer J. W., Lau S. S. Electronic materials science: for integrated circuits in Si and GaAs. New York: Macmillan Publishing Company, 1990. 476 p.
18. <http://ecolog.at.ua/index/nanotekhnologiji/0-65>
19. <http://www.nanonewsnet.ru/news/2011/rossiiskie-uchenyere-zrabotalieffektivnye-lazernye-diody-na-dline-volny-1060-nm>
20. [http://www.nanometer.ru/all_list.html?F\[status\]43](http://www.nanometer.ru/all_list.html?F[status]43).
21. <http://www.rus-nano.ru/news.php?extend.2626>