

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО

Завідувач кафедри

Ігор ЧИЧУРА

«___» _____ 2024 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної бакалаврської роботи

на тему:

**АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ СЕЛЕКТИВНОСТІ ТРАВЛЕННЯ
ФОТОРЕЗИСТИВНИХ ХАЛЬКОГЕНІДНИХ ШАРІВ**

Виконав:

Олесь ЧЕРКУН

(ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Керівник:

доцент Іван ТУРЯНИЦЯ

(вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної бакалаврської роботи: 52 сторінки, 12 таблиць, 12 рисунків, 3 додатки, 13 джерел посилань.

ФОТОРЕЗИСТИ, СЕЛЕКТИВНЕ ТРАВЛЕННЯ, АВТОМАТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ ТОВЩИНИ

Об'єкт дослідження – пристрій автоматичного контролю селективності травлення фоторезистів із халькогенідних матеріалів на основі інтерференційного методу.

Мета роботи – обґрунтувати метод вимірювання величини селективності травлення халькогенідних фоторезистів та спроектувати автоматичний пристрій реалізації обраного методу.

Методи дослідження – теоретичний аналіз явища інтерференції, технічний аналіз пристрою контролю товщини; технічне та логічне проектування.

Проведено детальний теоретичний аналіз фізичного явища інтерференції та його використання для контролю товщини тонких шарів. На основі отриманих результатів запропоновано пристрій автоматичного контролю селективності травлення фоторезистивних шарів на основі інтерференційного методу. Проведено технічний пошук компонент пристрою. Спроектовано оптичну структурну схему та електричну структурну і принципову схеми пристрою. Розроблено алгоритму керування автоматичним пристроєм вимірювання селективності травлення фоторезистів.

ABSTRACT

The bachelor's thesis contains: 52 pages, 12 tables, 12 figures, 3 additions, 13 reference sources.

PHOTORESISTS, SELECTIVE ETCHING, AUTOMATIC THICKNESS CONTROL

The object of the research is a device for automatic control of the selectivity of etching of photoresists from chalcogenide materials based on the interference method.

The purpose of the work is to justify the method of measuring the selectivity of etching of chalcogenide photoresists and to design an automatic device for implementing the selected method.

Research methods – theoretical analysis of the interference phenomenon; technical analysis of the thickness control device; technical and logical design.

A detailed theoretical analysis of the physical phenomenon of interference and its use for controlling the thickness of thin layers is carried out. Based on the obtained results, a device for automatic control of photoresist etching selectivity based on the interference method is proposed. A technical search of the device components was carried out. The optical structural diagram and the electrical structural and principle diagrams of the device were designed. An algorithm for controlling the automatic device for measuring photoresist etching selectivity has been developed.

Ужгородський національний університет

Інженерно-технічний факультет

Кафедра приладобудування

Освітньо-кваліфікаційний рівень "Бакалавр"

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

к.ф.-м.н., доц. Чичура І.І.

" " _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Вайтиковському Василю Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Автоматизація автономної котельні середньої потужності»

та керівник роботи Іваницький Валентин Петрович, д.ф.-м.н., професор,

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

затверджені Розпорядженням № ____ по ІТФ від " ____ " _____ 2024 року.

2. Строк подання студентом роботи на кафедру: "15" червня 2024 року.

3. Вихідні дані до роботи: об'єктом розробки є проект електронної системи модернізації муніципальної котельні на твердому паливі з переведенням її на автоматичний режим роботи.

Умови експлуатації електронної системи:

- температура навколишнього середовища від -30°C до $+60^{\circ}\text{C}$;
- атмосферний тиск від 700 до 800 мм.рт.ст.;
- відносна вологість повітря до 95 %;

Характеристики пристрою:

- виконувані функції – обираються у процесі проектування;
- керуючий модуль – блок мікроконтролера або промисловий контролер;
- ввід базових параметрів – вручну при початковій інсталяції пристрою;
- режим керування - неперервний;
- відображення режимів роботи пристрою - за допомогою дисплею та індикаторів;
- живлення - від стандартної однофазної мережі змінного струму;
- наявність автономного резервного живлення від акумуляторної батареї;
- габарити та маса – мінімальні.

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

Аналіз проблем розробки автоматичних систем керування обладнанням котелень; огляд сучасних підходів до проектування електронних систем керування; розробка структурної схеми; проектування принципової електричної схеми; створення алгоритму роботи керуючого пристрою; розробка базових блоків програми керування.

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

- структурна схема пристрою;
- принципова електрична схема;
- алгоритм функціонування контролера;
- лістинг програмного забезпечення.

6. Консультанти розділів роботи:

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

7. Дата видачі завдання: 15 лютого 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	П Примітки
1	Аналіз проблем керування котельнями.	28.02.2024	
2	Огляд сучасних наукових підходів до проектування автоматичних систем керування.	20.03.2024	
3	Аналіз завдання та розробка структурної схеми.	30.03.2024	
4	Підбір елементів та виготовлення креслень основних вузлів пристрою. Проектування принципової схеми.	30.04.2024	
5	Розробка алгоритму.	15.05.2024	
6	Створення базових блоків програми керування.	30.05.2024	
7	Написання пояснювальної записки.	10.06.2024	
8	Оформлення роботи та графічного матеріалу.	15.06.2024	

Студент

_____ /
(підпис)

_____ /
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи

_____ /
(підпис)

_____ /
(ініціали та прізвище)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 ОСНОВИ ФОТОЛІТОГРАФІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ.....	11
1.1 Сутність фотолітографії.....	11
1.2 Фоторезисти та фотохімічні процеси в них.....	12
1.3 Халькогенідні матеріали в якості фоторезисту.....	16
1.4 Процеси проявлення фоторезистів	17
2 АНАЛІЗ ЗАВДАННЯ РОБОТИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ МЕТОДІВ ЙОГО РІШЕННЯ.....	21
2.1 Фізико-хімічний зміст величини селективності травлення фоторезисту.....	21
2.2 Методи вимірювання селективності травлення.....	22
2.3 Метод «кварцового резонатора».....	23
2.4 Інтерференційний метод	24
2.5 Оптична схема реалізації методу вимірювання селективності травлення фоторезисту.....	26
2.6 Обґрунтування фізико-математичних співвідношень для вимірювання швидкості травлення.....	28
2.7 Обґрунтування технічної реалізації автоматичного методу вимірювання селективності травлення халькогенідних фоторезистів.....	29
3 РОЗРОБКА СТРУКТУРНИХ СХЕМ ПРИСТРОЮ.....	31
4 ВИБІР КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ.....	33
4.1 Фотоприймачі.....	33
4.2 Джерело оптичного випромінювання.....	35
4.3 Модуль мікроконтролера.....	37
4.4 LED дисплей для відображення інформації.....	38

КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ				
		Прізвище ім'я	Підпис	Дата
Розробив	Черкун О.О.			
Перевірив	Турянця І.І.			
Т. контроль				
Н. контроль				
Затвердив	Чичура І.І.			
Автоматизований контроль селективності травлення фоторезистивних халькогенідних шарів Пояснювальна записка				
		Літера	Аркуш	Аркушів
		у	6	52
ІТФ, кафедра ПБ, 4 курс бакалаври денна форма				

4.5 Блок живлення.....	40
5 ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ПРИБОРУ.....	41
6 СТВОРЕННЯ АЛГОРИТМУ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРИБОРОМ.....	43
6.1 Логічний блок підготовки вимірювань	43
6.2 Блок перевірки рівня інтенсивності інтерференційної картини	44
6.3 Блок визначення першого мінімуму чи максимуму інтерференційної картини	45
6.4 Блок визначення тривалості проходження ділянки інтерференційної картини між двома екстремумами	47
ВИСНОВКИ.....	49
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	50
ДОДАТКИ.....	52

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$h(t)$ – функція залежності товщини фоторезисту від часу травлення

n – показник заломлення фоторезисту

S – селективність травлення фоторезисту

T – інтервал часу між проходженням двох максимумів інтерференції

$V(t)$ – функція залежності швидкості травлення фоторезисту від часу травлення

$\Delta\phi$ – різниця фаз двох когерентних променів

Δr – геометрична різниця ходу двох когерентних променів

Δ – оптична різниця ходу двох когерентних променів

λ – довжина хвилі зондуючого оптичного випромінювання

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

ВСТУП

Фотолітографія на сьогодні є одним з основних процесів у загальному циклі виготовлення сучасних інтегральних мікросхем. Її суть полягає в утворенні на поверхні певної підкладки просторового рельєфу, який повторює рисунок топології конкретного електронного приладу або схеми. Рельєф створюється за допомогою різних світлочутливих матеріалів, які називають фоторезистами. Створений рельєф фоторезистивного шару містить локальні захисні ділянки плівки, які повторюють мікрозображення електронної схеми. У подальшому це мікрозображення переноситься на напівпровідниковий кристал, де формується структура схеми.

Перевагами сучасної фотолітографії є універсальність, масовість, технологічність, можливість повної автоматизації процесу виготовлення схеми. Методами фотолітографії на одному кристалі-підкладці напівпровідника можна одержати велику густину структурних елементів мікросхеми, а також проводити групову обробку набору кристалів-підкладок за чітко визначеним технологічним маршрутом.

На сьогодні фотолітографія розвивається у двох основних напрямках:

- постійне вдосконалення технологічного високоточного устаткування;
- розробка нових фоторезистивних матеріалів з підвищеною роздільною здатністю.

Дослідження у цих напрямках спрямовані на створення нових технологічних процесів, які дають стабільне відтворення форми і розмірів мікрозображення структури електронної схеми та розширюють граничні можливості щодо густини елементів мікросхеми.

Сучасна фотолітографія є складним комплексом різноманітних технологій, які включають різні механічні, фото-оптичні, фізичні і хімічні процеси. Одним із таких процесів є хімічне селективне травлення фоторезисту, у якому вже створено приховане (непроявлене) мікрозображення структури схеми. Дана робота

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

присвячена розробці системи керування автоматичним пристроєм контролю величини селективності під час хімічного травлення фоторезистів на основі халькогенідних напівпровідників.

АКТ
2024

АКТ

					КБР.АКТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

1 ОСНОВИ ФОТОЛІТОГРАФІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

1.1 Сутність фотолітографії

Суть технологічних процесів фотолітографії полягає в тому, що на поверхню спеціально обробленої напівпровідникової пластини-підкладки тим або іншим методом наносять тонкий шар спеціального матеріалу, який називають фоторезистом. Фоторезисти відносять до одного з видів фоточутливих матеріалів. Це означає, що під дією світла в певному частотному діапазоні такі матеріали змінюють свої фізико-хімічні властивості. Світлові промені, які здатні творити такі зміни називають активними або актинічним. На сьогодні для передових фотолітографічних технологій у якості таких променів використовують переважно ультрафіолетове випромінювання. Це забезпечує найбільшу густину монтажу елементів інтегральних схем.

Засвітку шару фоторезисту проводять через спеціальний трафарет – фотошаблон. Цей трафарет повторює той рисунок структури електронної інтегральної схеми, який слід відтворити на напівпровідниковій підкладці. Опромінювання шару фоторезисту через фотошаблон актинічним випромінюванням зумовлює зміни властивостей фоторезисту в тих частинах, які відповідають прозорим ділянкам фотошаблону. У результаті на шарі фоторезисту відтворюється у непроявленому прихованому вигляді рисунок, який міститься на фотошаблоні вибраної інтегральної мікросхеми.

Надалі слідує процес «проявлення» засвіченого фоторезисту. Часто цей процес полягає у здійсненні хімічного, іонного чи плазмового травлення шару фоторезисту. Внаслідок відмінності швидкостей травлення засвічених і незасвічених ділянок фоторезисту, одні з них протравлюються значно швидше, у порівнянні з іншими. Властивість мати різну швидкість травлення для різних ділянок матеріалу називають селективністю травлення.

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

У результаті на закінчення процесу селективного травлення, наприклад, засвічені ділянки фоторезисту повністю «зникають», а незасвічені ділянки лишаються у вигляді необхідного за технологією просторового рельєфу. Таким чином, на поверхні напівпровідникової пластинки-підкладки створений просторовий рельєф утворює необхідний рисунок структури інтегральної мікросхеми.

«Вікна» рельєфу, які утворюються у плівці фоторезисту, дозволяють у подальшому проводити такі важливі технологічні операції:

- локальне травлення підкладки з метою видалення непотрібного шару напівпровідникового матеріалу і для створення мезаструктур інтегральної схеми;
- видалення захисних діелектричних шарів окислу кремнію чи нітриду кремнію з метою розкриття ділянок підкладки під дифузію легуючих домішок;
- витравлення металевих шарів з метою створення омичних контактів і струмоведучих доріжок складної геометричної форми;
- багато інших операцій.

1.2 Фоторезисти та фотохімічні процеси в них

Фоторезистами називають світлочутливі речовини, які змінюють свої хімічні властивості розчинності в певних спеціальних розчинниках під дією активнішого світла, але стійкі до кислотних і лужних травників. Принцип дії фоторезисту полягає у протіканні в ньому специфічних фотохімічних реакцій при дії активного світла. Ці реакції змінюють структуру освітлених ділянок фоторезисту і їх стійкість до окремих розчинників.

Основним призначенням фоторезистів є створення на поверхні напівпровідникової пластини-підкладки тонкої захисної плівки, у якій можна сформувати необхідну конфігурацією рисунка електронної схеми. Рельєф такого рисунка в захисній плівці фоторезисту отримують шляхом її фотоекспонування через відповідний трафарет. У результаті світлового впливу на необхідні окремі

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

ділянки плівки вони змінюють свою розчинність у порівнянні з неосвітленими ділянками.

Після проявлення фотоекспонованої плівки фоторезисту (тобто після її травлення у спеціальному розчиннику) непотрібні ділянки рисунку хімічно видаляються розчинником, а ділянки з потрібним рисунком залишаються на підкладці. У послідуєчому залишені ділянки слугують захисною маскою при виконанні подальших технологічних операцій з виготовлення інтегральної мікросхеми.

Як правило, фоторезисти є складними мономерними або полімерними сполуками органічних речовин. Захисні властивості мономерних фоторезистивних плівок невисокі. Тому практично переважне використання знаходять полімерні фоторезисти.

Фотохімічні процеси, які відбуваються у фоторезистах при експонуванні актинічним світлом, протікають за такими основними фізико-хімічними законами та правилами:

- фотохімічно активними є тільки ті кванти світлового випромінювання, які поглинаються структурою фоторезисту і викликають відповідні зміни його атомної сітки;
- результат хімічної дії світла прямо пропорційний добутку інтенсивності падаючого на фоторезист світлового випромінювання на часовий інтервал його дії;
- кожному поглиненому кванту світлового випромінювання відповідає одна молекула структури, яка прореагувала.

Фотохімічні реакції, які протікають у різних фоторезистах при поглинанні квантів світлової енергії, відрізняються складністю і різноманіттям структурних перебудов. Відмінність у результатах їх протікання визначається хімічною будовою речовини фоторезисту і умовами його опромінювання.

Виходячи із наведених законів можна стверджувати, що основною величиною, яка характеризуватиме інтенсивність фотохімічних процесів у фоторезистах, є квантовий вихід. Ця величина показує відношення тієї кількості

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

молекул, які прореагували під час опромінення фоторезиста, до кількості поглинутих при цьому квантів світла.

Квантовий вихід, швидкість фотохімічних реакцій, ступінь їх керованості та інші параметри фоторезистів багато в чому залежать від спектрального складу та інтенсивності актинічного випромінювання. Для керування спектральною чутливістю до складу матеріалів фоторезистів вводять спеціальні добавки – сенсibilізатори. Вони дозволяють керовано фіксувати максимум поглинання квантів актинічного світла в потрібній області спектру. Але основним визначальним фактором все таки є хімічна будова та структура атомної сітки матеріалу фоторезисту. У залежності від цих параметрів у фоторезистах реалізуються такі основні фотохімічні реакції, як фоторозпад, фотоперегрупування, фотоприєднання, фотоперенесення, фотовідновлення і фотосенсibilізація.

Крім того, у залежності від характеру протікаючих у фоторезисті фотохімічних реакцій, їх поділяють на дві основні великі групи: негативні і позитивні.

У негативних фоторезистах під дією світла формуються нерозчинні ділянки плівки за рахунок реакцій фотополімеризації або фотоконденсації. Тому після проявлення ці ділянки залишаються на поверхні підкладки. У результаті рисунок фоторезисту, який залишився, є протилежним (або негативним) до зображення фотошаблону: освітлені місця стають «темними», а не освітлені «темні» місця зникають – стають «світлими».

Позитивний фоторезист, навпаки, сприяє утворенню під дією світла розчинних ділянок фоторезисту за рахунок різних процесів фоторозпаду. Такі ділянки зазвичай під час травлення у розчиннику видаляються з поверхні кристалу-підкладки. Тому рельєф фоторезисту, який залишився, точно повторює рисунок оригінала фотошаблону, через який вівся процес експонування.

У якості негативних фоторезистів у сучасних напівпровідникових технологіях застосовують суміші на основі складного ефіру полівінілового спирту і полівінілцинамату та циклокаучук з різними сенсibilізуючими домішками.

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Як позитивні фоторезисти найбільш широке застосування знаходять суміші на основі органічного новолаку і полімерного нафтохінондіазиду.

Для вибору типу фоторезисту на практиці в напівпровідникових технологіях інтегральних мікросхем користуються рядом критеріїв. До основних із них можна віднести такі.

Світлочутливість – величина, обернена до поглинутої світловій енергії, яка необхідна для досягнення у фоторезисті заданої селективності травлення (як правило, на рівні, не меншому 50 %). Таким чином, світлочутливість фоторезистів визначається повнотою засвічення матеріалу фоторезиста.

Але кінцевою метою проведення процесу фотолітографії є не тільки повнота засвічення фоторезисту. Дуже важливою є і висока якість проявленого рельєфу рисунка в тонкому шарі фоторезиста. А на цей критерій сумісно впливають як світлочутливість, так і характер протікання реакцій проявлення. Тому інтегральний параметр світлочутливості визначається величиною мінімальної світлової інтенсивності експонування, при якій після проявлення утворюється необхідна чіткість і механічна стійкість рельєфу рисунка електронної схеми у плівці фоторезисту.

Особливо важливим критерієм для фотолітографії в технології мікросхем високого рівня інтеграції є роздільна здатність фоторезистів – здатність створювати мікрорельєф рисунка схеми з мінімальним розміром елементів. Кількісно роздільна здатність фоторезисту R вимірюється кількістю ліній рівної товщини на 1 мм довжини, які можна створити з його допомогою методами фотолітографії на підкладці-кристалі без перекривання і злиття ліній між собою. Тобто,

$$R = 1/(2 \cdot l),$$

де l – мінімальний лінійний розмір елементів електронної схеми, які слід забезпечити. Для сучасних фоторезистів роздільна здатність наближається до величини 5000 ліній на міліметр.

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Технологічним критерієм є кислотостійкість фоторезистів – здатність їхнього рельєфу після експонування, проявлення і сушіння захищати поверхню підкладки напівпровідника від дії стандартних кислотних і лужних травників.

Адгезія фоторезисту до несучої підкладки є критерієм, який пов'язаний з його стійкістю. Вона визначає стабільність структури рельєфу на підкладці до різних зовнішніх механічних дій та стійкість до відшарування рельєфу від підкладки.

1.3 Халькогенідні матеріали в якості фоторезисту

Хорошими перспективами для створення фоторезистів володіють халькогенідні матеріали. Вони на сьогодні відносяться до класу неорганічних фоторезистів. Основним механізмом зміни швидкості їх травлення є фотоструктурні перетворення різного типу. Такі фоторезисти цікаві тим, що на них можна формувати елементи рельєфу з розмірами, близькими до 0,1 діаметра експонуючого променя. Для прикладу на рис. 1.1 наведено електронномікроскопічне зображення рельєфу, утвореного методами фотолітографії на плівках Ge-Sb-Se. Експонування фоторезисту здійснювалось лазерним випромінюванням з довжиною хвилі 405 нм.

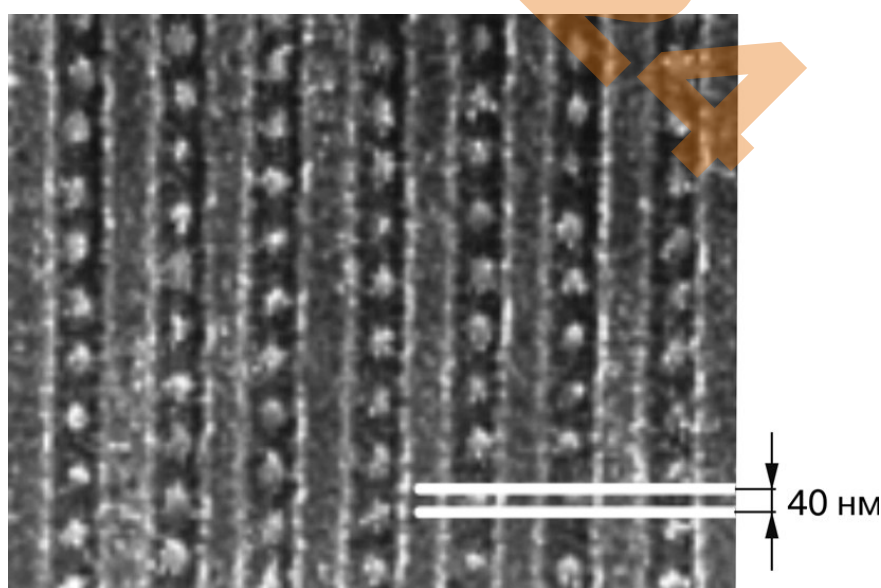


Рисунок 1.1 – Рельєф неорганічного фоторезисту $\text{Ge}_5\text{Sb}_{20}\text{Te}_{75}$

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Із наведеного зображення видно, що на халькогенідних фоторезистах можна отримувати висококонтрастний рельєф з високою роздільною здатністю. Однак актинічне світло інтенсивно поглинається у таких матеріалах. При цьому дуже часто в опромінюваних ділянках оптичне поглинання збільшується. У результаті на фоторезистах Ge-Sb-Se не вдається сформувати рельєфні фотолітографічні структури з необхідною глибиною елементів біля 0,1 мкм.

Використання халькогенідних плівок як фоторезисту ґрунтується на нереверсивних фотопроцесах зміни їх розчинності. Це зумовлено тим, що в конденсованих шарах наявна висока концентрації молекулярних структурних фрагментів із більш слабкими гомополярними хімічними зв'язками. Під час фотоекспонування відбувається інтенсивне розривання гомополярних зв'язків з послідуною полімеризацією молекулярних фрагментів. У результаті суттєво зменшується розчинність опромінених шарів фоторезисту. Досить висока селективність проявлення за таким механізмом спостерігається на фоторезистах халькогенідних систем As-S, As-Se та As-S-Se. еєструвати х

1.4 Процеси проявлення фоторезистів

Операція проявлення шару фоторезисту після його експонування здійснюється шляхом обробки підкладки з фоторезистом у спеціальних хімічних розчинах. У результаті з поверхні підкладки видаляються певні ділянки шару фоторезисту: опромінені для позитивних фоторезистів і неопромінені для негативних фоторезистів.

Хімічні процеси проявлення негативних і позитивних фоторезистів відрізняються між собою. Відмінність полягає в тих хімічних реакціях, які протікають в різних фоторезистах при їхньому контакті з певними розчинами. Зокрема, процес проявлення негативних фоторезистів є звичайною фізико-хімічною реакцією розчинення полімерних матеріалів. У якості проявників для таких фоторезистів використовують типові органічні розчинники: толуол,

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

хлорбензол, трихлоретилен та інші. Особливістю таких процесів є значне набухання опромінених ділянок, наряду з розчиненням неопромінених ділянок фоторезисту. Крім того, на процес проявлення негативних фоторезистів значно впливає величина експозиції. Особливо небезпечною є недостатня експозиція, яка зумовлює погану якість утвореного рельєфу після проявлення плівки фоторезисту. Якщо ж експозиція вибрана правильно, то тоді безпечним є навіть перепроявлення. Тому технологічні процеси проявлення різних негативних фоторезистів легко піддаються автоматизації.

Процес проявлення позитивних фоторезистів значно складніший. Він базується на протіканні хімічних реакцій взаємодії продуктів фотолізу полімеру і фенольних смол з компонентами лужних розчинників. Продукти таких реакцій у подальшому видаляються фізико-хімічними методами. Характерною особливістю такого процесу проявлення позитивних фоторезистів є їх висока чутливість до перепроявлення. При перепроявленні, коли плівка такого фоторезисту довго перебуває в розчиннику, її неопромінені ділянки також починають хімічно взаємодіяти з травником і поступово розчиняються в ньому. Тому час проявлення позитивних фоторезистів зазвичай не перевищує декількох десятків секунд.

У процесі проявлення як негативних, так і позитивних фоторезистів дуже часто виявляються паразитні ефекти, пов'язані з явищем дифракції актинічного світла на краях непрозорої частини фотошаблону. Такі чинники приводять до появи дефектних елементів рельєфу у плівці фоторезисту.

Що стосується закономірностей процесу проявлення халькогенідних фоторезистів, то характерні кінетичні криві їхнього розчинення наведені на рис. 1.2. Із наведених результатів слідує, що величина селективності травлення для таких фоторезистів може досягати значень біля 40 від. од. При цьому спостерігається саме негативна селективність.

Наведені результати свідчать, що халькогенідні плівки є перспективними для створення нелінійних фоторезистів. При цьому швидкість фотоструктурних перетворень у них при фотоекспонуванні суттєво залежить від інтенсивності випромінювання та від температури у зоні опромінення. Це дає змогу варіювати

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

режими фотоекспонування та хімічного проявлення в дуже широких межах. А використання висококонтрастних травників забезпечує хорошу роздільну здатність та чіткість елементів зображення на рельєфі фоторезистивного шару.

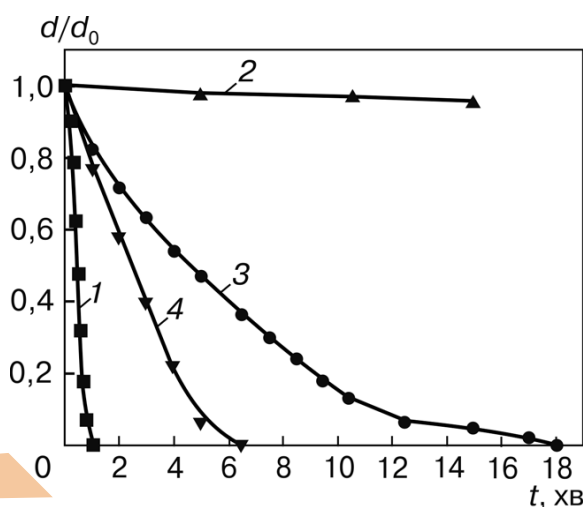


Рисунок 1.2 – Кінетичні криві розчинення фоторезисту $As_{40}S_{30}Se_{30}$ у селективному травнику: 1 – сконденсовані плівки, 2 – відпалені, 3 та 4 – експоновані з різною потужністю випромінювання

Переваги використання халькогенідних фоторезистів можна визначити в кількох напрямках:

- технологічність методів вакуумного нанесення тонких шарів;
- легкість отримання однорідних за товщиною і структурою плівок великої площі;
- процес нанесення шарів легко контролювати і ним легко керувати при автоматизації технологічного циклу;
- досягнення високої роздільної здатності, вище 10 ліній на мікромметр;
- висока механічна міцність фоторезисту;
- висока стійкість до кислотних середовищ, які характерні для технології інтегральних мікросхем.

На сьогодні найкращі фізико-хімічні та технологічні параметри досягнуті на халькогенідних фоторезистах, до складу яких входить миш'як. Це суттєво обмежує практичне використання даних матеріалів у фотолітографії. Тому

продовжуються дослідження фоторезистів на основі інших халькогенідів, зокрема на германій-вмісних та кремній-вмісних. Такі дослідження вимагають постановки сучасних методик автоматичних вимірювань різних параметрів у фоліолітографічних процесах. Одним із таких визначальних технологічних процесів є селективне травлення, що підтверджує актуальність теми даної кваліфікаційної роботи.

АКТІТ
2024

АКТІТ

					КБР.АКТІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

2 АНАЛІЗ ЗАВДАННЯ РОБОТИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ МЕТОДІВ ЙОГО РІШЕННЯ

2.1 Фізико-хімічний зміст величини селективності травлення фоторезисту

Селективність травлення як фізико-хімічний термін визначає відмінність швидкостей розчинення різних структурних станів однієї і тієї ж речовини при тотожних умовах здійснення технологічного процесу.

На сьогодні для вимірювання селективності травлення фоторезистів переважно використовують декілька кількісних параметри.

1. Відношення товщини травленого шару на даний час до товщини базового шару, наприклад, шару, який був перед початком травлення.

2. Відношення змін товщин Δh різних структурних станів речовини, які відбуваються протягом фіксованого часу травлення.

3. Відношення швидкостей травлення двох станів фоторезисту. При цьому швидкість травлення кожного структурного стану визначається похідною функції залежності товщини його шару $h(t)$ від тривалості часу травлення t , тобто

$$V(t) = d[h(t)]/dt.$$

Найбільш строгим є саме третє визначення величини селективності травлення. Тому у своїй роботі під селективністю травлення S будемо вважати величину відношення швидкості травлення першого стану до швидкості травлення другого структурного стану фоторезиста:

$$S = V_1/V_2. \quad (2.1)$$

Зазвичай, у чисельнику ставлять швидкість травлення більш розчинного стану, тобто вибирають умову $V_1 > V_2$. Тоді величина селективності завжди буде більшою одиниці.

Зазначимо також, що для хороших фоторезистів обов'язковою є умова

$$V_1 \gg V_2.$$

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

У такому разі, одним із критеріїв примінимості фоторезистів на практиці є досягнення значень $S > 20$.

Таким чином, завдання кваліфікаційної роботи зводиться до автоматизації вимірювань швидкостей травлення різних ділянок фоторезистів під час виконання технологічного процесу їх проявлення.

2.2 Методи вимірювання селективності травлення

Оскільки вимірювання селективності травлення зводиться до вимірювань швидкостей травлення тонких шарів, то, відповідно, слід аналізувати методи неперервного вимірювання товщини тонких шарів у процесі їх обробки хімічними травниками.

Аналіз джерел інформації показав, що на сьогодні серед таких різних методів за своїми фізичними принципами найбільшого поширення знаходять два підходи:

- методи безпосереднього вимірювання певних параметрів плівки;
- методи реєстрації зміни параметрів фізичних явищ, які протікають у плівках.

Обидва типи цих методів фактично можуть зафіксувати динаміку зміни товщини шару протягом часу. Відповідно, обидва ці типи методів можна рекомендувати для контролю селективності травлення фоторезистів та для автоматизації процесу вимірювань.

Третім типом методів є порівняння кінцевих геометричних товщин «нерозчинних» ділянок фоторезисту h_1 після закінчення процесу травлення до початкової товщини шару фоторезисту h_0 . Тут вважають, що на момент закінчення процесу травлення «розчинні» ділянки повністю розчинилися. У такому випадку селективність травлення визначається за строгим математичним визначенням (2.1) для хімічних процесів, а за спрощеною фізичною умовою:

$$S = h_1/h_0.$$

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Зрозуміло, що для цього випадку нема необхідності здійснювати автоматизацію процесу вимірювань внаслідок його виняткової простоти.

2.3 Метод «кварцового резонатора»

Основним методом першого типу є так званий метод «кварцового резонатора». Для нього характерні ряд особливостей:

- універсальність щодо матеріалу шарів;
- простота проведення вимірів;
- простота вимірювального обладнання;
- легкість автоматизації процесів вимірювань;
- достатня точність та відтворюваність результатів вимірювань.

Фізична сутність методу «кварцового резонатора» полягає в тому, що досліджуваний шар фоторезисту наносять на підкладку у вигляді тонкої кварцової пластинки. Таку систему поміщають у травний розчин таким чином, щоб шар фоторезисту був знизу. Після цього тією або іншою реєструючою системою фіксують зміну основної резонансної частоти ультразвукових коливань кварцової пластини.

Відомо, що основна резонансна частота коливань кварцової пластини залежить від її маси та від маси того матеріалу, який знаходиться на ній. Основна закономірність тут полягає в тому, що зменшення маси такої системи призводить до росту основної резонансної частоти. При цьому величина зміни частоти пропорційна зміні маси сенсорної системи та обернено пропорційна площі такої системи. Таким чином, фіксуючи зміни основної резонансної частоти, можна визначати динаміку зміни маси шару фоторезисту на підкладці. Відповідно, легко знаходити і швидкості травлення фоторезисту.

Практична реалізація методу «кварцового резонатора» має й ряд серйозних труднощів та недоліків:

- складність проведення електричних вимірів основної резонансної частоти системи фоторезист-підкладка в агресивному травному розчині;

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

- точність результатів вимірів суттєво залежність від точності визначення густини досліджуваного фоторезиста;
- для кожної окремої кварцової підкладки перед проведенням вимірів слід визначати так звану «масову чутливість»;
- висока чутливість кварцових кристалів до зовнішньої температури та до параметрів того зовнішнього середовища, в якому він знаходиться;
- на ультразвукових частотах коливань у систему фоторезист-підкладка можуть протікати неконтрольовані зміни.

Враховуючи наведені вище плюси і мінуси методу «кварцового резонатора», можна зробити висновок, що автоматизація точних вимірів селективності травлення фоторезистів з його використанням наштовхується на ряд серйозних труднощів.

2.4 Інтерференційний метод

Переважна більшість фоторезистів є полімерними діелектричними або напівпровідниковими матеріалами, достатньо прозорими в певному оптичному діапазоні спектру. Це відкриває можливість використання інтерференційного методу для точного визначення селективності травлення таких фоторезистивних шарів.

Інтерференційні методи ґрунтуються на відомому фізичному явищі накладання когерентних хвиль. У результаті відбувається формування інтерференційної картини – специфічного просторового перерозподілу інтенсивності когерентних хвиль, характер якого визначається фазовими співвідношеннями між цими хвилями.

Для утворення двох когерентних хвиль слід розділити промінь від одного точкового монохроматичного джерела на два промені. У процесі розділення між цими променями-хвилями виникає певна різниця фаз. Накладання ж таких двох хвиль формує просторову інтерференційну картину. Інтенсивність світла в

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

заданій просторовій точці інтерференційної картини визначається оптичною різницею ходу двох хвиль у цій заданій точці.

Найбільш простим методом розділення оптичної хвилі на два когерентні промені є направлення її на підкладку з тонкою плівкою. При цьому як підкладка, так і плівка мають бути достатньо прозорими для вибраного діапазону оптичного випромінювання. З точки зору складності просторової картини інтерференції двох утворених променів оптимальною є геометрія, коли початкова хвиля падає перпендикулярно до поверхні підкладки. Тому саме таку геометрію доцільно вибрати для реалізації методу контролю товщини травлення фоторезисту.

Отже, розглянемо процес інтерференції за описаним вище сценарієм, схема якого наведена на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Оптична схема утворення двох когерентних променів на системі підкладки з фоторезистом (I – зондує випромінювання)

Відповідно з наведеною картиною, між когерентними променями 1 та 2 утворюється оптична різниця ходу

$$\Delta = n \cdot \Delta r,$$

де n – абсолютний показник заломлення шару фоторезисту на зондуєчій довжині хвилі,

Δr – геометрична різниця ходу двох променів.

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

З розглянутою оптичною різницею ходу зв'язана різниця фаз двох когерентних променів 1 і 2, які вийшли з підкладки. Ця різниця

$$\Delta\varphi = (2 \cdot \pi \cdot \Delta) / \lambda,$$

де λ – довжина хвилі монохроматичного зонduючого оптичного випромінювання.

Відомо, що в інтерференційній картині інтенсивність оптичного випромінювання буде періодично то посилюватись, формуючи інтерференційні максимуми, то послаблюватись, утворюючи інтерференційні мінімуми. Для вибраної нами геометрії інтерференційні максимуми появляються за виконання для оптичної різниці ходу умови

$$2 \cdot h \cdot n = k \cdot \lambda, \quad (2.2)$$

де h – товщина шару фоторезисту, уде

k – ряд натуральних чисел.

Реєструвати інтерференційну картину в геометрії рис. 2.1 технічними засобами часто не зручно. Для іншої геометрії до вихідної оптичної системи додають плоско опуклу лінзу, яку розміщують опуклою стороною на підкладці. При цьому плоска поверхня лінзи має бути паралельною площині підкладки. При такій геометрії у випадку падіння зонduючого випромінювання перпендикулярно до лінзи у точку її центру, на виході системи будуть спостерігатися інтерференційні кільця Ньютона. Геометрично точки простору, де з'являються кільця інтерференційних максимумів, мають радіуси

$$r = (R \cdot k \cdot \lambda)^{1/2},$$

де R – радіус опуклої поверхні лінзи.

2.5 Оптична схема реалізації методу вимірювання селективності травлення фоторезисту

Із проведеного короткого теоретичного аналізу слідує, що інтерференційний метод є цілком придатний для вирішення завдання кваліфікаційної роботи. Для технічної його реалізації слід використати падіння зонduючого променя під деяким невеликим кутом до підкладки з фоторезистом. Таку особливість враховує

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

вже оптична схема, наведена на рис.2.2. Слід відмітити, що в цьому випадку записана вище фізична умова максимумів інтерференційної картини (2.2) зберігається.

Оскільки у процесі травлення товщина h фоторезисту буде неперервно зменшуватися, то у напрямку поширення двох когерентних променів інтенсивність оптичного випромінювання буде періодично змінюватися. Дані зміни легко зафіксувати певним реєструючим пристроєм, наприклад, фотоприймачем (див. рис. 2.2). Часова картина змін інтенсивності інтерференції якісно відображена на рис.2.3.

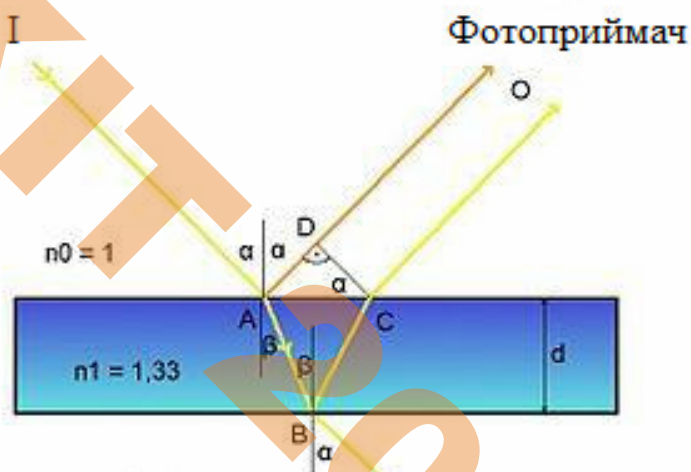


Рисунок 2.2 – Оптична схема реалізації інтерференційного методу для вимірювання селективності травлення

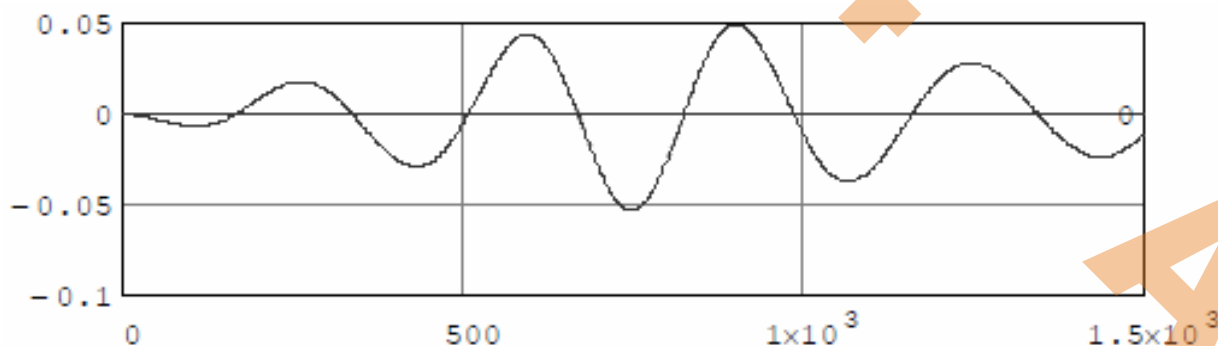


Рисунок 2.3 – Якісна часова залежність інтенсивності оптичного випромінювання на фотоприймачі для схеми рис.2.2.

Фіксуючи наведену на рис.2.3 динаміку змін інтенсивності, легко знаходити швидкість зменшення товщини фоторезисту, і, відповідно, селективність його травлення.

2.6 Обґрунтування фізико-математичних співвідношень для вимірювання швидкості травлення

Для проведення вимірювань нам не обов'язково точно фіксувати значення інтенсивності. Основна інформація про зміни товщини фоторезисту міститься саме у часових інтервалах, протягом яких інтенсивність на фотоприймачі варіюється від одного максимуму (або мінімуму) до іншого. Умовно назвемо цей інтервал періодом інтерференції і позначатимемо його надалі як T .

Відповідно до співвідношення (2.2), період інтерференції буде відповідати часу, протягом якого товщина фоторезисту при травленні зменшиться на певну величину Δh . Проведемо певні математичні перетворення виразу (2.2) для отримання формули розрахунку цієї величини. Очевидно, що при k -ому зафіксованому інтерференційному максимуму товщина фоторезисту буде

$$h_1 = (k \cdot \lambda) / 2 \cdot n.$$

Аналогічно, при настанні моменту наступного інтерференційного максимуму, товщина фоторезисту зменшиться до величини

$$h_2 = [(k - 1) \cdot \lambda] / 2 \cdot n.$$

Тоді

$$\Delta h = h_1 - h_2 = \lambda / 2 \cdot n.$$

Як слідує із останнього співвідношення, кожен наступний максимум інтерференції реалізується при черговому зменшенні товщини фоторезисту на величину $\lambda / 2 \cdot n$, яка залежить лише від показника заломлення шару фоторезисту та довжини хвилі зондуючого оптичного випромінювання.

Таким чином, технічна система методу має забезпечувати реєстрацію моментів проходження сусідніх інтерференційних максимумів та вимірювати

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

період інтерференцій T . Якщо ця величина відома із експериментальних вимірів, тоді швидкість травлення фоторезисту знаходиться як

$$V = \Delta h/T = \lambda/(2 \cdot n \cdot T).$$

Із отриманого кінцевого результату слідує, що фізично та математично інтерференційний метод вимірювання селективності травлення фоторезистів є досить простим. Для цього достатньо лише надійно фіксувати моменти настання максимуму інтенсивності випромінювання на фотоприймачі, та вимірювати інтервали часу, які проходять між двома такими моментами. При цьому, звичайно, також слід знати точне значення показника заломлення шару фоторезиста.

2.7 Обґрунтування технічної реалізації автоматичного методу вимірювання селективності травлення халькогенідних фоторезистів

Технічно завдання кваліфікаційної роботи виконаємо у вигляді електронного автоматичного блоку реєстрації інтенсивності інтерференційної картини із перебігом часу. Це дозволить уніфікувати процес вимірювання для різних фоторезистів, підвищить зручність проведення процесу вимірювань, покращить інтерфейс взаємодії з оператором.

Вибраний фізичний інтерференційний метод дозволяє легко здійснити автоматизацію процесу. Для цього достатньо створити досить просту електронну систему реєстрації інтенсивності монохроматичного оптичного лазерного випромінювання. Також відмітимо, що саме оптичні методи забезпечують високу точність отриманих результатів вимірювань та надійність роботи відповідного електронного блоку.

Особливістю застосування проектованого блоку є необхідність створення спеціальних зразків для експериментальних вимірювань. Для цього на прозору для зондуючого лазерного випромінювання підкладку слід нанести досліджуваний фоторезист. Матеріал фоторезисту також має бути достатньо

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

прозорим для зондуючого променя, щоб уникнути сильного поглинання інтерферуючих променів.

Сама технічна реалізація проектного блоку можлива у двох варіантах.

1. Простий одноканальний варіант, коли вимірювання у процесі травлення проводяться окремо для експонованої та неекспонованої ділянок фоторезисту.

2. Двоканальний варіант, у якому фіксуються зміни товщини обох ділянок при їх одночасному травленні.

У даній кваліфікаційній роботі ми вибираємо одноканальний варіант, який значно легший і значно дешевший у реалізації. При необхідності ж все-таки проводити дослідження травлення обох ділянок одночасно, можна використати систему із двох розроблених одноканальних блоків. Результати вимірів із такого тандему двох блоків легко обробляються оператором або додатковим мікроконтролером.

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

3 РОЗРОБКА СТРУКТУРНИХ СХЕМ ПРИСТРОЮ

У основу блоку керування пристроєм покладемо готовий модуль мікроконтролера (МК) (додаток А), який обладнаний усіма електронними компонентами зовнішньої комутації, необхідними для програмування та експлуатації системи керування автоматичного вимірювального пристрою.

МК достатньо обладнати двома інформаційними каналами сприймання інформації від зовнішніх пристроїв – це сигнальні канали від двох фотоприймачів інтенсивності оптичного випромінювання (додаток А). Формування сигналів у цих каналах забезпечуватиме одне джерело оптичного випромінювання. Для цього на шляху променя від джерела випромінювання розмістимо непропорційний розгалужувач оптичного випромінювання (додаток Б).

Основну частину інтенсивності випромінювання направлятиме на досліджуваний зразок у вигляді оптичної підкладки з шаром фоторезисту. Невелика ж частина випромінювання від розгалужувача поступатиме на фотоприймач 1 (додаток Б). Цей фотоприймач виконуватиме чисто контрольну функцію – визначатиме наявність зондуючого оптичного променя від джерела випромінювання.

Оптичний промінь другого інформаційного каналу буде направлятися на вимірювальний блок, у якому формуватиметься інтерференційна картина. Інтенсивність випромінювання цієї картини фокусуватиметься оптичним модулем на вхідному віконці фотоприймача 2.

Після налагодження кювети травлення і досліджуваного зразка та юстування оптичної системи до кювети подається хімічний травник. Одночасно запускається вимірювальна частина блоку керування. У такому разі електричний сигнал від фотоприймача 2 поступатиме на модуль МК. Використовуючи дані свого внутрішнього годинника, МК буде відслідковувати моменти проходження максимумів інтерференції та засікати інтервали часу між цими двома подіями.

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Таких інформаційних даних МК достатньо для розрахунків швидкості травлення фоторезисту.

Інформація про всі процеси функціонування вимірювального пристрою та блоку керування буде виводитися на дисплей або на комп'ютер, під'єднаний до модуля МК (додаток А). Даний комп'ютер одночасно використовується і для компіляції керуючої програми в пам'ять МК.

Для живлення всіх компонентів системи керування електричною енергією з необхідними параметрами використаємо спеціальний модуль – блок живлення (додаток А).

АКТ
2024

АКТ

					КБР.АКТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

4 ВИБІР КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

4.1 Фотоприймачі

Основним, з точки зору надійної роботи пристрою, є його здатність реєструвати відносно слабку інтенсивність інтерференційної картини. Тому вибір компонент розпочнемо саме з фотоприймачів. Хорошою чутливістю на сьогодні володіють фотоприймачі HFBR-2521 [].

Дані прилади призначені для систем передачі інформації оптичними каналами зв'язку промислового стандарту. Основні експлуатаційні параметри та характеристики цих приладів наведені в табл. 4.1. Спектральна характеристика фотоприймача наведена на рис.4.1.

Таблиця 4.1 – Експлуатаційні параметри фотоприймачів HFBR-2521 []

Параметр та одиниця його вимірювання	Значення
Температура експлуатації, °C	Від -40 до 85
Напруга живлення Vcc, В	Від 1 до 6
Сила струму вихідного сигналу, мА	25
Напруга вихідного сигналу, В	Від 0,5 до Vcc
Чутливість, мВ/мкВт	Від 6 до 9
Максимальний рівень шумів на виході, мВ	0,6
Вихідний опір, Ом	30
Мінімальна вхідна оптична потужність, мкВт	8
Діаметр вхідного вікна, мм	3,24
Максимальний споживаний струм, мА	40
Мінімальна тривалість реєстрованих імпульсів, нс	5
Швидкість оновлення вихідного сигналу, нс	8
Інтерфейс вихідного сигналу	I2C

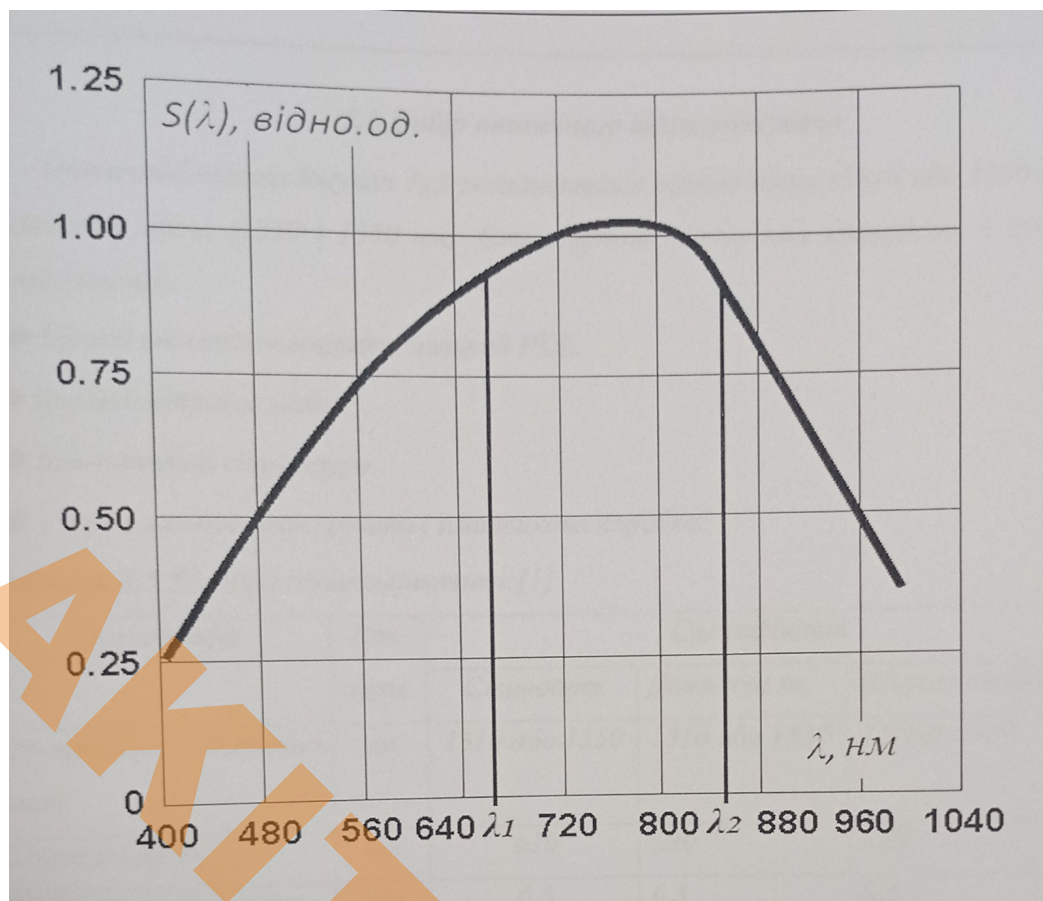


Рисунок 4.1 – Спектральна характеристика фотоприймача HFBR-2521 []

Аналізуючи наведені дані, бачимо, що фотоприймач має максимальну чутливість у ближньому інфрачервоному діапазоні в інтервалі оптичних хвиль від 700 до 850 нм. І саме в цьому оптичному діапазоні більшість халькогенідних фоторезистивів мають високе оптичне пропускання. Крім того, проектування оптичного каналу передачі інформації на інфрачервоний діапазон суттєво спрощує вирішення проблеми його захисту від зовнішніх оптичних завад та шумів видимого діапазону світла.

Розрахуємо потужність оптичного сигналу, яку може надійно реєструвати даний фотоприймач. Мінімальна вхідна оптична потужність сигналу на фотоприймачі складає 8 мкВт. Для оптимального середнього сигналу візьмемо оптичну потужність у 10 раз більшу, тобто біля 100 мкВт. Саме таку потужність братимемо до уваги при виборі джерела зондуючого випромінювання.

Слід також врахувати втрати оптичного сигналу на всьому оптичному каналі. Вони складаються із:

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

- втрат на оптичному модулі фокусування інтерференційної картини, які можна оцінити на рівні 50 %;
- втрат у вимірювальному модулі, які можуть бути більші 90 %;
- втрат в оптичному розгалужувачі на рівні 30 %;
- інших втрат на шляху руху оптичного променя та оптичної схеми формування пучка, які оцінимо на рівні 50 %.

Інтегруючи наведені вище складові, отримаємо сумарні втрати оптичної потужності як добуток вказаних вище величин. Тоді арифметичні підрахунки дають кінцевий результат: оптична потужність джерела живлення повинна бути у 120 раз більшою потужності на фотоприймачі. Таким чином джерело зондуючого випромінювання повинне мати середню оптичну потужність біля 10 мВт.

4.2 Джерело оптичного випромінювання

Орієнтирами для пошуку джерела випромінювання є номінальна вихідна потужність біля 10 мВт та довжина хвилі в області максимальної чутливості фотоприймача. На сьогодні таким параметрам відповідає багато сучасних напівпровідникових лазерів та світлодіодів. Серед них оберемо прилад VCSEL. Його основні технічні параметри наведені в табл.4.2.

Таблиця 4.2 – Експлуатаційні характеристики світлодіода VCSEL

Параметр та одиниця його вимірювання	Значення
Температура експлуатації, °C	Від 0 до 70
Напруга живлення V_{cc} , В	Від 1,7 до 2,1
Максимальний робочий струм, мА	20
Максимальний імпульсний робочий струм, мА	800
Максимальна вихідного оптична потужність, мВт	12
Розсіювана електрична потужність, мВт	8
Ємність $p-n$ -переходу, нФ	30
Швидкодія в імпульсному режимі, мкс	Менше 0,1

Довжина хвилі в піку потужності, нм	850
Діаметр вихідного вікна, мм	2,2
Вхідний опір, Ом	25

Спектральна вихідна характеристика вибраного світлодіода наведена на рис.4.2.

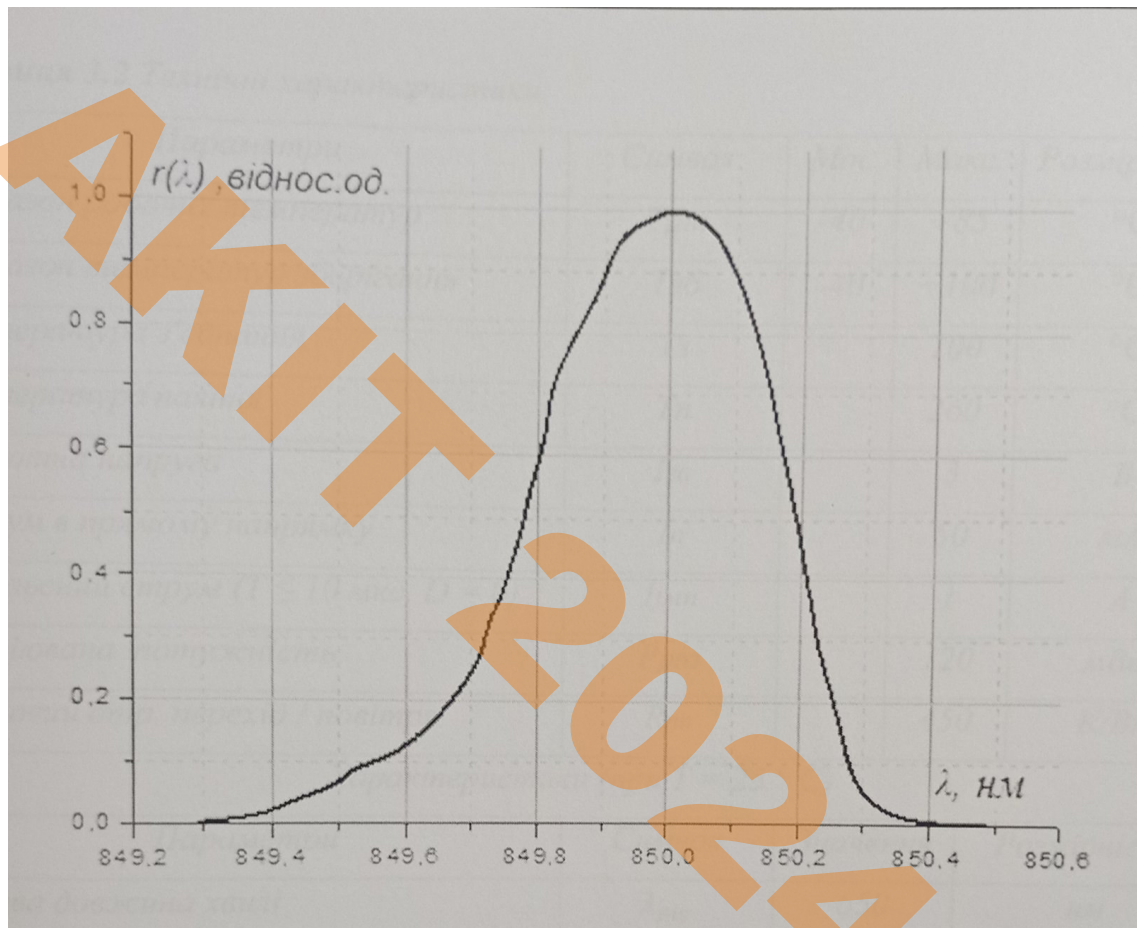


Рисунок 4.2 – Спектральна характеристика світлодіода VCSEL []

Із співставлення рис.4.1 та 4.2 видно, що за спектральними характеристиками вибране джерело випромінювання цілком «стикується» із фотоприймачами пристрою та оптичними властивостями халькогенідів. Тому його можна взяти за основу проектування системи керування та оптичної схеми проектованого пристрою вимірювання селективності травлення халькогенідних фоторезистів.

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

4.3 Модуль мікроконтролера

Система керування процесом вимірювання селективності травлення може бути побудована на основі окремого готового електронного модуля МК. Оскільки у нас нема необхідності проводити складні математичні розрахунки, а система керування є досить простою з технічної точки зору, то застосуємо один із простих таких модулів.

Для можливості використання широкого набору готових програм відкритого доступу виберемо модуль Arduino Uno R3. Основні параметри цього модуля наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Експлуатаційні характеристики модуля МК Arduino Uno R3

Параметр, одиниця вимірювання	Величина
Напруга живлення МК, В	5
Напруга живлення модуля від зовнішнього джерела, В	Від 7 до 12
Кількість цифрових входів/виходів, шт.	14
Кількість цифрових виходів ШІМ сигналів, шт.	6
Кількість аналогових входів, шт	6
Максимальний струм навантаження одного виходу, мА	40
Параметри Flash пам'яті	32 кб, із яких 0.5 кб займає Bootloader
Об'єм пам'яті SRAM, кб	2
Об'єм пам'яті EEPROM, кб	1
Тактова частота мікропроцесора	16 МГц

Схема необхідних зовнішніх комутацій та призначення функціональних виводів модуля Arduino Uno R3 наведено у додатку А

4.4 LED дисплей для відображення інформації

Для відображення поточної інформації про функціонування пристрою використаємо символний дисплей моделі WH1602С. Керуванням потоком даних тут здійснюється через 8-ми пінову шину паралельного порту. Зовнішній вигляд та експлуатаційні параметри вибраного приладу наведено на рисунку 4.3. Даний дисплей дозволяє надавати інформацію оператору у вигляді двох символних рядків по 16 знаків у кожному.

Для побудови мінімального інформаційного інтерфейсу даного дисплею достатньо під'єднати його 4 цифрові входи до керуючого МК. Оскільки на дисплеї проєктованого пристрою має відображатися незначна кількість даних, то така інформаційна шина є достатньою для обслуговування вимірювальної системи. Призначення виводів дисплея WH1602С наведено в таблиці 4.4.

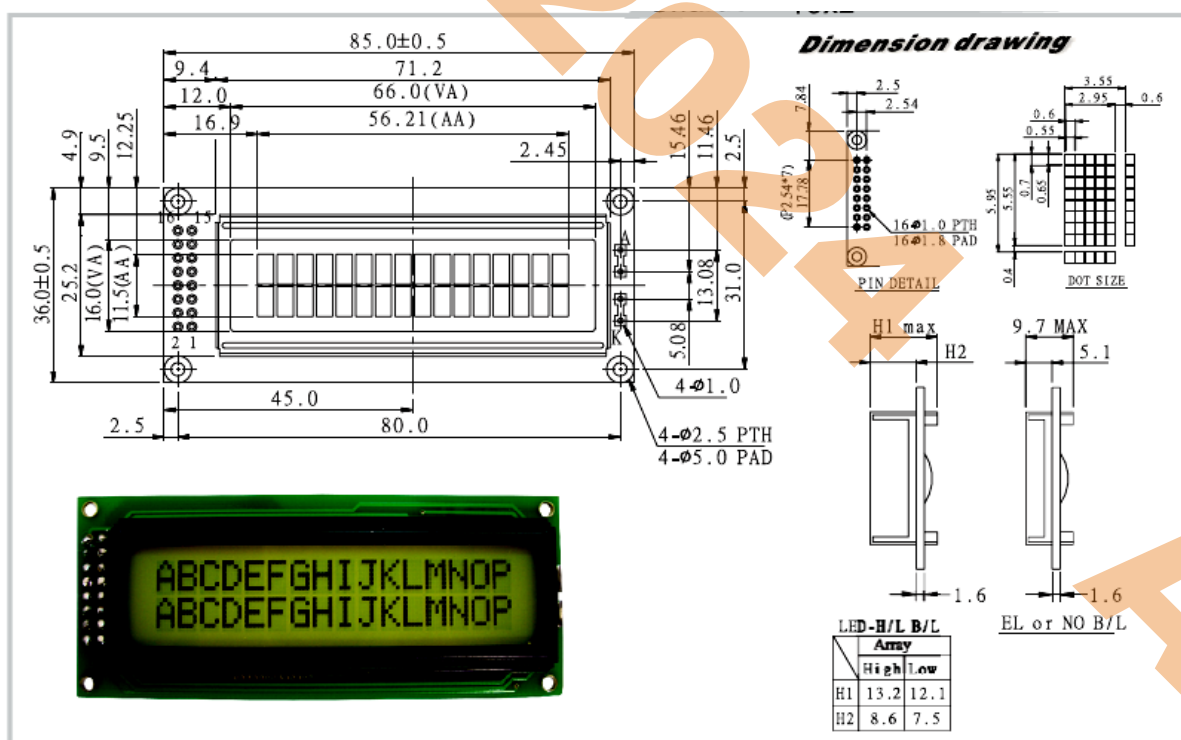


Рисунок 4.3 - Конструктивні параметри дисплея WH1602С

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

Як слідує із таблиці 4.4 керування процесом виведення інформації на дисплей здійснюється керуючими сигналами RS (register select signal) і R/W (read/write signal). Полегшує роботу з даним дисплеями вбудована бібліотека LiquidCrystal програмного середовища Arduino IDE. Ця бібліотека містить необхідний набір команд і функцій для організації активної взаємодії МК з дисплеєм.

Для підключення дисплея до МК модуля Arduino використаємо 8-ми піновий цифровий паралельний порт. Для цього виберемо 10 цифрових виходів плати Arduino, 8 із них служитимуть для передачі інформаційних даних, а 2 - для передачі керуючих сигналів RS та R/W. При цьому також відмітимо, що контраст екрану дисплея налаштовується змінним резистором за участю спеціального сигналу V_0 , який подається на 3-ій пін дисплея.

Таблиця 4.4 – Перелік та призначення пінів дисплея WH1602C

Pin NO.	Symbol	Function
1	Vss	GND
2	Vdd	+3V or +5V
3	Vo	Contrast Adjustment
4	RS	H/L Register select signal
5	R/W	H/L Read / write signal
6	E	H→L Enable signal
7	DB0	H/L Data bus line
8	DB1	H/L Data bus line
9	DB2	H/L Data bus line
10	DB3	H/L Data bus line
11	DB4	H/L Data bus line
12	DB5	H/L Data bus line
13	DB6	H/L Data bus line
14	DB7	H/L Data bus line
15	A/Vee	4.2V for LED(RA=0Ω)/Negative Voltage output
16	K	Power supply for B/L (0V)

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

4.5 Блок живлення

Відповідно з проведеним вище аналізом та вибором електронних компонент для живлення вимірювального автоматичного пристрою оптимальним є джерело постійного струму із стабільною електрорушійною силою $E = + 5 \text{ В}$. Підрахуємо вихідну потужність, яку має забезпечувати таке джерело. Основним споживачем його енергії є напівпровідниковий лазер, який в найбільш навантаженому імпульсному режимі вимагає 4 Вт потужності. Всі інші пристрої мають споживану потужність на рівні десяти міліват. Відповідно, для живлення пристрою достатньо використати джерело стабілізованої напруги з вихідною потужністю біля 5 Вт. Отриманим параметрам відповідає стандартний блок живлення модулів платформи Arduino з вихідною стабілізованою ЕРС +9 В та максимальним вихідним струмом 1,5 А. Тому у проєктованому пристрої доцільно застосувати саме такий блок.

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

5 ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ПРИСТРОЮ

На основі проведених вище досліджень та зібраних матеріалів спроектовано електричну принципову схему пристрою, яка наведена в додатку Г. На цій схемі для контролю роботи напівпровідникового світлодіода (джерела живлення) використано два незалежні інформаційні канали. Перший канал – електричний – контролює наявність напруги живлення на світлодіоді. Другий канал – оптично-електричний – контролює наявність оптичного випромінювання на виході світлодіода.

Перший канал організований на одному аналоговому вході МК АЦП3. Сигнал цього каналу формується напругою живлення світлодіода через баластний резистор номіналом 1 кОм.

Другий канал побудований на аналоговому вході МК АЦП1. Сигнал на цей електричний вхід поступає від фотоприймача 1. Рівень даного сигналу визначається інтенсивністю світлового потоку, який надходить на фотоприймач 1 від розподільвача оптичного променя. Якщо рівень сигналу буде нижче заданого, то система керування робить висновок про помилки в роботі джерела живлення або в юстуванні оптичної системи пристрою.

Для керування роботою джерела випромінювання, напруга живлення на нього подається через оптопару, Керуючий сигнал необхідного рівня подається на оптопару від виходу відповідного ЦАП МК. Для оптимальної роботи даного каналу живлення він попередньо налаштовується при початковій інсталяції програми керування МК. Для цього встановлюються цифрові двійкові комбінації, які відповідають мінімальній та максимальній робочим напругам живлення світлодіода. У послідуочому процес керування проводиться зміною цифрових комбінацій у встановлених межах до тих пір, поки від фотоприймачі 2 не буде отриманий сигнал із рівнем, достатніми для надійного функціонування вимірювального пристрою.

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ

жк.

41

Для відображення інформації про функціонування пристрою для оператора організовано окремий канал взаємодії МК з матричним дисплеєм. Такий взаємозв'язок виконаний на повному 8-бітному цифровому порту DA мікроконтролера.

Живлення на блок керування подається від спеціального блоку. При цьому напруга +9 В даного блоку подається на вхід VIN МК та на силову частину оптопар. Стабільні напруги +5 В для живлення всіх інших модулів блоку керування відводиться від спеціального піну VCC МК.

АКІТ 2024

АКІТ

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

6 СТВОРЕННЯ АЛГОРИТМУ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЄМ

Перед роботою пристрою слід підготувати ванну для травлення та розмістити у ній досліджуваний зразок. Потім провести юстування всієї оптичної схеми. Завершивши підготовчі роботи можна запускати виконання МК своєї програми.

Робота пристрою вимірювання селективності травлення фоторезистів інтерференційним методом складається з кільком послідовних етапів. На кожному з них є певні особливості функціонування системи керування процесом вимірювань. Тому алгоритм роботи системи доцільно розбити на кілька логічних блоків.

6.1 Логічний блок підготовки вимірювань

Перший блок відповідає процесу завантаження програми керування в операційну пам'ять МК та перевірки готовності основних компонент пристрою до роботи. У цьому блоці передбачається виконання системою керування таких окремих кроків.

1. Перевірка готовності джерела випромінювань до проведення досліджень. Для цього МК подає мінімальну допустиму величину напруги живлення світлодіода. Після він зчитує сигнал із фотоприймача поділювача оптичного променя. Якщо сигнал відсутній, то МК робить три кроки підвищення напруги живлення світлодіода від мінімального до середнього допустимого рівня. На кожному кроці підвищення напруги перевіряється наявність сигналу на фотоприймачі і відповідність його величини оптимальному діапазону інтенсивності зондуючого випромінювання.

2. За результатами першого кроку МК приймає одне з трьох рішень. Якщо сигнал так і не з'явився, то МК видає на дисплей повідомлення оператору про помилку в роботі джерела випромінювання і закінчує виконання своєї програми.

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Якщо ж сигнал на фотоприймачі з'явився, але його величина не відповідає діапазону оптимальних рівнів інтенсивності випромінювання, необхідним для вимірювань, то МК видає оператору відповідне повідомлення. Після цього він переходить у режим очікування до тих пір, поки не отримає команду від оператора про продовження роботи. Під час очікування оператор має провести необхідні налаштування світлодіода, подільника променя та фотоприймача. Якщо ж величина сигналу попадає у вказаний діапазон, то МК переходить до виконання другого логічного блоку алгоритму.

6.2 Блок перевірки рівня інтенсивності інтерференційної картини

Якщо рівень інтенсивності випромінювання джерела випромінювання є достатнім для проведення вимірювань, то МК починає зчитувати сигнал із фотоприймача інтерференційної картини. За отриманими результатами МК виконує одну із наступних гілок алгоритму:

1. Сигнал від фотоприймача відсутній. Тоді МК передає на дисплей повідомлення оператору про відсутність сигналу і переходить у режим очікування до тих пір, поки оператор не усуне виниклу помилку і не відновить виконання програми.

2. Сигнал від фотоприймача присутній, але рівень інтенсивності інтерференційної картини недостатній для проведення надійних вимірювань. У такому разі МК спочатку покроково піднімає інтенсивність зондуючого оптичного випромінювання в оптичній системі у дозволених програмою межах. Якщо такі дії приводять до появи необхідного рівня інтенсивності інтерференційної картини, то МК переходить до виконання третього логічного блоку алгоритму. Якщо ж необхідний рівень сигналу від фотоприймача не отримується, то МК передає повідомлення оператору про необхідність юстування оптичної системи пристрою. Після цього він переходить у режим очікування до отримання відповідної команди від оператора.

3. Якщо рівень сигналу на фотоприймачі відповідає необхідній величині, то МК передає оператору повідомлення про готовність до проведення вимірів і

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

переходить у режим очікування. Отримавши дане повідомлення оператор має завершити всі підготовчі дії та залити травник до кювети із досліджуваним зразком. Після цього він подає команду МК на початок проведення вимірювань. Отримавши таку команду, МК розпочинає виконувати наступний – третій блок алгоритму програми.

6.3 Блок визначення першого мінімуму чи максимуму інтерференційної картини

Необхідність цієї частини алгоритму зумовлена тим, що в початковий момент часу на фотоприймач може попадати інтенсивність із будь-якого просторового напрямку. За розробленою ж методикою слід фіксувати лише моменти проходження мінімумів чи максимумів інтерференційної картини. Тому МК повинен визначити той стартовий момент часу, у який через діафрагму фотоелемента буде пройдено черговий мінімум чи максимум інтенсивності.

Для здійснення цієї операції МК періодично вимірює інтенсивність оптичного випромінювання на фотоелементі. Період таких вимірів T має бути достатньо великим, щоб за цей час помітно зменшилася товщина фоторезисту. Тоді це буде приводити до помітних змін інтенсивності на фотоелементі. Крім того, швидкості травлення експонованих і неекспонованих ділянок фоторезисту сильно відрізняються. Тому період T слід задавати МК з урахуванням цих обставин на основі попередніх пробних досліджень особливостей процесу травлення. Цей параметр вводиться оператором на початку вимірів у регістрову пам'ять МК.

Для зменшення впливу шумів та похибки результуючих вимірювань інтенсивність інтерференційної картини в кожній «точці» будемо проводити п'ять разів із послідовним усередненням таких даних. Інтервал між такими вимірами вибираємо на межі інерційності реєструючого фотоелемента.

У результаті даний блок алгоритму міститиме наступні послідовні логічні кроки.

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

1. Цикл із п'яти вимірювань інтенсивності та отримання усередненого результату I . Запис цього результату у реєстр та вивід на дисплей МК для оператора.

2. Проведення операцій пункту 1 через інтервал часу T для визначення наступної інтенсивності I_n . Розрахунок різниці $\Delta = I_n - I$.

3. Аналіз величини Δ , при якому можливі дві ситуації:

- Δ у межах заданого довірчого інтервалу менша або більша нуля, тобто інтерференційна картина зростає або йде на спад;

- Δ у межах заданого довірчого інтервалу дорівнює нулеві.

У першому випадку в реєстр записується нове значення інтенсивності $I = I_n$ та повторюються кроки 2 і 3.

У другому випадку виконується невеликий внутрішній цикл: параметр P збільшується на одиницю, у реєстр записується нове значення інтенсивності $I = I_n$ та повторюється крок 2. Після цього знову проводиться аналіз величини Δ із двома можливими випадками:

- Δ у межах заданого довірчого інтервалу менша або більша нуля – тоді МК переходить на виконання наступного блоку алгоритму;

- Δ у межах заданого довірчого інтервалу дорівнює нулеві – тоді параметр P збільшується на одиницю, у реєстр записується нове значення інтенсивності $I = I_n$ та здійснюється перехід на оператор проведення вимірювань наступного значення інтенсивності. Після цього кроки внутрішнього циклу повторюються до тих пір, поки величина Δ не вийде за межі прийнятого «нульового» діапазону. Така ситуація буде відповідати переходу до виконання наступного блоку алгоритму.

У описаному перебігу подій може виникнути ситуація, коли умова $\Delta \approx 0$ буде повторюватися протягом багатьох циклів проведення вимірювань інтенсивності. Тому в тіло програми даного блоку алгоритму слід ввести також оператори, які контролюватимуть кількість повторень умови $\Delta \approx 0$ в одній неперервній послідовності.

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Переходячи до наступного блоку алгоритму контролю селективності травлення, МК без будь-якої перерви продовжує дискретні цикли вимірювань інтенсивності із періодом T .

6.4 Блок визначення тривалості проходження ділянки інтерференційної картини між двома екстремумами

Початком функціонування цього блоку є параметр P , величина якого отримана в попередньому блоці. Вона описує кількість інтервалів тривалістю T , протягом яких інтенсивність інтерференційної картини знаходилась на гладкому «плато» екстремуму. Тоді МК легко визначає той момент часу, коли через діафрагму фотоелемента проходила точка екстремуму інтерференційної картини

$$t_0 = (T \cdot P) / 2.$$

Орієнтуючись на дану величину, МК розпочинає у циклі відлік кількості сеансів N вимірювань інтенсивності інтерференційної картини, протягом яких виконується умова $\Delta \neq 0$ у заданому допустимому діапазоні відхилень. Фізично це означає процесу змін інтенсивності від одного екстремуму інтерференційної функції до наступного. Результатом виконання даного циклу є встановлення величини інтервалу часу τ , протягом якого товщина фоторезисту змінюється настільки, що забезпечує «зсув» інтерференційної картини від одного екстремуму до другого. При цьому

$$\tau = t_0 + T \cdot N.$$

Отримання даного кількісного параметру i є метою виконання МК четвертого блоку алгоритму. Цей параметр є основним для визначення швидкості травлення фоторезисту.

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської роботи:

1. Проведено короткий аналіз особливостей і перспектив та проблем розвитку автономних сонячних електростанцій. У результаті аналізу визначено основні задачі, які слід розв'язати у процесі виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи.

2. На основі метеорологічних даних проведено розрахунки мінімальної середньодобової генерованої електроенергії стандартною сонячною панеллю в умовах міста Ужгорода.

3. Для визначення технічних параметрів проєктованої автономної електростанції зроблено короткий аналіз середньодобових витрат електричної енергії типовим домогосподарством в регіоні міста Ужгорода.

4. Розроблена структурна схема автономної сонячної електростанції, параметри якої відповідають поставленому завданню щодо виконання бакалаврської роботи. Дана схема містить модуль сонячних панелей, модуль контролера-інвертора, батарею акумуляторів, канал живлення споживачів змінного струму, канал живлення споживачів постійного струму, резервний генератор на зрідженому газі та систему автоматичного контролю і керування сонячної електростанцією.

5. Згідно з технічними параметрами автономної сонячної електростанції та її структурною схемою проведено вибір сучасних компонентів всієї системи.

6. Проведено аналіз схеми енергетичних потоків, які реалізуються при різних режимах функціонування електростанції.

7. Визначено інформаційні електронні модулі, які здійснюють контроль всіх енергетичних потоків системи та забезпечують автоматичне керування її роботою.

8. Спроектована монтажної схеми автономної електростанції і розрахована її орієнтована вартість та економічні показники самоокупності.

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

9. Основні технічні параметри спроектованої автономної сонячної електростанції:

- вихідні канали: стандартний змінний струм, постійний струм +5 В, +12 В, та +24 В.

- робоча сумарна вихідна потужність – 4 кВт;

- максимальна пікова вихідна потужність (тривалістю до 30 хвилин) – 7 кВт;

- резервне джерело електроенергії – генератор на зрідженому газі;

- система керування на основі промислового контролера фірми Siemens.

АКІТ 2024

АКІТ

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Фотоприймачі HFBR. Електронний ресурс – режим доступу: <https://www.tme.eu/ua/details/hfbr-2521z/optichnii-vikhid-peredavachi-i> Вербицький Є. В. Енергозбереження і енергоефективність. Конспект лекцій для студентів напрямку підготовки 6.050802 «Електронні пристрої та системи». - К.: НТУУ“КПІ”, 2014. – 106 с.

2. Іваницький В.П., Лукша О.В., Чичура І.І. Ресурсозберігаюча енергетика: підручник. – Ужгород: УжНУ, 2023. – 100 с.

3. Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications: Second Edition. Edited by Manajit Sengupta, Aron Habte, Christian Gueymard, Stefan Wilbert, Dave Renné, and Thomas Stoffel / National Technical Information Service. 5301 Shawnee Road Alexandria, VA 22312.

4. Електронний ресурс – режим доступу: <https://www.meteoblue.com/ru/%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0/historyclimate/weatherarchive>.

5. Ivanitsky, V. P., Ryaboschuk, M. M., Stojka, M. V., Tiutiunnykov, S. V. Astronomical and geographical model for programming microcontrollers of ground-based trackers. Science and education a new dimension. Natural and Technical Sciences, 2021, no. 255, pp. 11-13.

6. Електронний ресурс – режим доступу: https://energy.in.ua/files/lp182_m_72_mh_530_550w_ua_2.pdf.

7. Електронний ресурс – режим доступу: https://brandsolar.com.ua/p1646821378-solnechnaya-monokristallicheskaya-panel.-html?source=merchant_center&gclid=CjwKCAjwrJ-BhB7EiwAuyBVXY9AtU7YGay-wXHDniSM2zsQxtGpoWFIGU-KKJhaHhtHFtpIfOycFRoCfG0QAvD_BwE.

8. Електронний ресурс – режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BE%D0%BD%D1%8F%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D0%B1%D0%B0%D1%82%D0%B0%D1%80%D0%B5%D1%8F.

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

9. Електронний ресурс – режим доступу: <https://i-energy.com.ua/ua/p1426494130-litievuj-tyagovuj-akkumulyator.html>.

10. Електронний ресурс – режим доступу: <https://www.se.com/ua/uk/product-range/7654-conext-xw/#overview>.

11. Електронний ресурс] – режим доступу: <https://sayanukr.com.ua/ua/p1413610090-komplekt-solnechnoj-elektrostantsii.html>.

12. Електронний ресурс – режим доступу: <https://fd24.com.ua/p1690584007-tsifrovoj-voltmetr-ampermetr.html>.

13. Електронний ресурс – режим доступу: <https://voltik.com.ua/ua/p-1555176613-tsifrovoj-voltmetr-ampermetr.html>.

АКІТ 2024

АКІТ

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Додатки

					КБР.АКІТ.20050049.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52