

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 магістерської роботи

на тему:

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧНОГО ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ
ТРАВЛЕННЯ ТОНКИХ ПЛІВОК

Виконав:

Ігор СУГОНЯК

(ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Керівник:

професор Валентин ІВАНИЦЬКИЙ

(вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної магістерської роботи: 73 сторінки, 5 таблиць, 11 рисунків, 23 джерела посилань.

ХІМІЧНЕ ТРАВЛЕННЯ, АВТОМАТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ, ФОТОРЕЗИСТИ, ШВИДКІСТЬ ТРАВЛЕННЯ

Об'єкт дослідження – пристрій автоматичного контролю процесу хімічного травлення фоторезистів на основі інтерференційного методу.

Мета роботи – обґрунтувати перспективність інтерференційного методу для автоматичного контролю процесів мокрого хімічного травлення фоторезистів та розробити технічну пропозицію автоматичного пристрою реалізації даного методу.

Методи дослідження – теоретичний аналіз фізичного явища інтерференції, технічний аналіз існуючих пристроїв контролю процесів травлення; логічне проектування та комп'ютерне проектування.

Проведено теоретичний аналіз явища інтерференції оптичних когерентних хвиль на тонких плівках. Обґрунтовано перспективність використання даного методу для неперервного контролю процесів хімічного травлення тонких шарів сучасних фоторезистів. На основі отриманих результатів запропоновано технічну пропозицію щодо розробки пристроїв автоматичного контролю процесів мокрого травлення тонких шарів на основі інтерференційного методу. Спроектовано структурні та функціональні схеми одного з варіантів реалізації пристрою. Проведено пошук технічних та електронних компонент для створення пристрою. Досліджено основні експлуатаційні параметри автоматичного пристрою. Спроектовано електричну принципову схему пристрою та розроблено алгоритм його автоматичного функціонування при дослідженні процесів хімічного травлення фоторезистів.

ABSTRACT

The qualifying master's thesis contains: 73 pages, 5 tables, 11 figures, 23 reference sources.

CHEMICAL ETCHING, AUTOMATIC CONTROL, PHOTORESISTS, ETCHING RATE

The object of research is a device for automatic control of the process of chemical etching of photoresists based on the interference method.

The purpose of the work is to substantiate the prospects of the interference method for automatic control of the processes of wet chemical etching of photoresists and to develop a technical proposal for an automatic device for implementing this method.

Research methods – theoretical analysis of the physical phenomenon of interference, technical analysis of existing devices for controlling digestion processes; logical design and computer-aided design.

A theoretical analysis of the phenomenon of interference of optical coherent waves on thin films has been carried out. The prospects of using this method for continuous control of the processes of chemical etching of thin layers of modern photoresists are substantiated. Based on the obtained results, a technical proposal is proposed for the development of devices for automatic control of wet etching processes of thin layers based on the interference method. The structural and functional diagrams of one of the variants of the device implementation have been designed. A search was made for technical and electronic components to create the device. The main operational parameters of the automatic device were studied. The electrical schematic diagram of the device was designed and the algorithm for its automatic operation was developed during the study of the processes of chemical etching of photoresists.

Ужгородський національний університет

Інженерно-технічний факультет

Кафедра приладобудування

Освітньо-кваліфікаційний рівень "магістр"

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

к.ф.-м.н., доцент Ігор ЧИЧУРА

"__" _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Сугоняку Ігорю Павловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Алгоритм автоматичного вимірювання швидкості травлення тонких плівок»

та керівник роботи Іваницький Валентин Петрович, д.т.н., професор,

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

затверджені Розпорядженням № __ по ІТФ від _____ 2024 року.

2. Термін подання студентом роботи на кафедру: "05" грудня 2024 року.

3. Вихідні дані до роботи: об'єктом розробки є алгоритм системи автоматичного керування процесом вимірювання швидкості хімічного травлення тонких плівок інтерферометричним методом.

Умови експлуатації пристрою:

- температура навколишнього середовища: від +10°C до +60 °C;
- атмосферний тиск: від 720 до 780 мм.рт.ст.;
- відносна вологість повітря: до 90 %;
- електроживлення: багатоканальний блок живлення стабілізованою напругою;
- габарити і маса: мінімально можливі.

Характеристики пристрою:

- ввід базових параметрів керування: вручну при початковій інсталяції пристрою;
- режим керування: неперервний під час проведення вимірювань;
- формат вихідних інформаційних сигналів: ліній цифрового послідовного коду через USB-порт;
- відображення режимів роботи моделі пристрою: за допомогою дисплею;
- формування бази даних: на флеш-пам'яті;
- сигналізація про нештатні ситуації: повідомлення оператору на дисплей.

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

Аналіз сучасних пристроїв автоматичного проведення процесу травлення; дослідження інтерферометричного методу вимірювання швидкості хімічного травлення; розробка оптичної, структурної, принципової, монтажної та інших необхідних схем моделі пристрою; дослідження особливостей функціонування моделі; розробка алгоритму для системи автоматичного керування.

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

- структурна або схема моделі пристрою (1 аркуш А2);
- оптична схема проведення вимірювань (1 аркуш А2);
- принципова електрична схема моделі пристрою (1 аркуш А2);
- монтажна схема моделі пристрою (1 аркуш А2);
- алгоритм системи автоматичного керування (1 аркуш А2).

6. Консультанти розділів роботи:

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

7. Дата видачі завдання: 15 жовтня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Аналіз проблем сучасної автоматизації процесів травлення.	30.10.2024	
2	Огляд сучасних наукових підходів до систем інтерферометричного методу.	10.11.2024	
3	Аналіз завдання та розробка структурної схеми моделі пристрою.	10.11.2024	
4	Вибір фізичної моделі вимірювань.	20.11.2024	
5	Підбір елементів та виготовлення креслень основних схем моделі пристрою.	20.11.2024	
6	Розробка алгоритму системи автоматичного керування.	30.11.2024	
7	Написання пояснювальної записки.	30.11.2024	
8	Оформлення роботи та креслень.	05.12.2024	

Студент

(підпис)

(ініціали та прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

(ініціали та прізвище)

ЗМІСТ

1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ.....	11
1.1 Дослідження особливостей автоматизації процесів контролю за швидкістю хімічного травлення.....	11
1.2 Фотолітографія як сучасний універсальний технологічний метод на основі процесів хімічного травлення.....	15
1.3 Фоторезисти для технологій виготовлення інтегральних схем та фотохімічні процеси в них.....	17
1.4 Протікання процесів хімічного проявлення фоторезистів.....	22
2 АНАЛІЗ ЗАВДАННЯ РОБОТИ, ВИЗНАЧЕННЯ МЕТОДІВ ЙОГО РІШЕННЯ..	25
2.1 Формування мети досліджень та постановка задач для вирішення.....	25
2.2 Аналіз фізико-хімічного змісту величин швидкості травлення та селективності травлення фоторезисту й методів їх вимірювання.....	26
2.3 Інтерференційний метод контролю процесів травлення.....	29
2.4 Обґрунтування технічної реалізації автоматичного методу контролю хімічного травлення.....	32
3 РОЗРОБКА СТРУКТУРНИХ СХЕМ ПРИСТРОЮ.....	35
3.1 Структурна оптична схема пристрою автоматичного вимірювання швидкості травлення.....	35
3.2 Розробка електричної структурної схеми пристрою.....	36
4 СТВОРЕННЯ МРДЕЛІ ПРИСТРОЮ ВИМІРЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ХІМІЧНОГО ТРАВЛЕННЯ ФОТОРЕЗИСТІВ.....	40
4.1 Узгодження джерела випромінювання та фотоприймача.....	40
4.2 Компоненти оптичного тракту.....	44
4.3 Модуль мікроконтролера.....	46
4.4 LED дисплей для відображення інформації.....	47

					КМР.АКІТ.11588613.000 ПЗ				
		Прізвище ім'я	Підпис	Дата	Алгоритм автоматичного вимірювання швидкості травлення фоторезистів Пояснювальна записка	Літера	Аркуш	Аркушів	
Розробив	Сугоняк І.П.					у	6	72	
Перевірив	Іваницький В.П.					ІТФ, кафедра ПБ, 2 курс магістри денна форма			
Т. контроль									
Н. контроль									
Затвердив	Чичура І.І.								

4.5 Блок живлення.....	49
5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ХІМІЧНОГО ТРАВЛЕННЯ ФОТОРЕЗИСТІВ.....	51
5.1 Матеріали для дослідження та порядок їх проведення.....	51
5.2 Результати експериментальних досліджень та їх аналіз.....	52
6 ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ МОДЕЛІ ПРИСТРОЮ.....	58
7 АЛГОРИТМ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЄМ.....	60
7.1 Логічний блок базової перевірки компонент пристрою.....	60
6.2 Блок перевірки рівня інтенсивності інтерференційної картини.....	62
7.3 Блок фіксації моменту проходження першого екстремуму інтерференційної функції.....	63
7.4 Блок визначення інтервалу часу проходження інтерференційної картини між сусідніми екстремумами.....	65
7.5 Блок контролю процесу ходу інтерференційної функції через черговий екстремум.....	66
7.6 Блок розрахунку швидкості травлення тонких плівок.....	67
7.7 Блок завершення процесу вимірювань.....	68
ВИСНОВКИ.....	69
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	71

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

САК – система автоматичного керування

МК – мікроконтролер

$h(t)$ – 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

$\Delta\varphi$ – 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

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

ВСТУП

У складному сучасному світі виготовлення матеріалів та прецизійного виробництва хімічне травлення є потужною та універсальною технологією. Зокрема, рідинне хімічне травлення різних речовин є одним з важливих сучасних хімічних методів, які використовуються в різних технологічних процесах [1]. Це виробництво кремнієвих мікроструктур для інтегральних схем, виготовлення друкованих плат, мікроелектромеханічні технології аерокосмічної, автомобільної і медичної промисловості, інженерія художнього ландшафту та дизайну тощо. Таке широке застосування процесів «мокрого» хімічного травлення зумовлене низкою його переваг. Це простота процесу, універсальність щодо різних матеріалів, здатність створювати складні елементи і малюнки, точність відтворення рельєфу елементів, висока економічно ефективність в умовах масштабного серійного виробництва.

Ключова віха в розвитку «мокрого» хімічного травлення відбулася в середині 20 століття з розвитком фотолітографічних методів мікровиробництва. Тому у взаємозв'язку з фотолітографією хімічне травлення сьогодні також відоме як високоточні виробничі процеси фототравлення, фотохімічної обробки, хімічного фрезерування [2]. У всіх цих технологічних процесах необхідно контролювати перебіг розчинення необхідних елементів рельєфу для отримання чіткого технічного рисунка. Дуже важлива роль при такому контролі приділяється точним вимірам швидкості травлення різних речовин і селективності травлення по різному оброблених ділянок однієї і тієї ж речовини. Такі вимірювання традиційними методами «мокрого» хімічного травлення вимагають проведення багатьох тривалих експериментів, які включають низку послідовних етапів. Це і сам процес травлення, і подальше промивання зразка для позбавлення залишків хімічних реакцій травлення, і фінішне сушіння. Такі особливості визначають труднощі та складності автоматизації процесів вимірювання швидкості хімічного травлення. Це висуває актуальне завдання дослідження можливості тих методів

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

вимірювання швидкості хімічного травлення, які дозволяють провести автоматизацію таких вимірювань, та створювати відповідні сучасні автоматичні прилади для цього. Результати даних досліджень є важливими для сучасних технологій, оскільки дозволяють суттєво знизити витрати часу при контролі та вимірі швидкості хімічного травлення різних речовин та спрощують їх інтеграцію в автоматичні виробничі системи.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

1.1 Дослідження особливостей автоматизації процесів контролю за швидкістю хімічного травлення

Автоматизації процесу хімічного травлення на сьогодні присвячено мало теоретичних та експериментальних досліджень. Зокрема, у роботі [3] наголошується, що хімічне травлення є традиційною формою «мокрого» травлення та передбачає використання рідких хімікатів або травників для видалення матеріалу. При цьому, як правило, зразок занурюють у кислотні, лужні та деякі інші типи травників. Швидкість такого травлення визначає, наскільки швидко матеріал видаляється з поверхні зразка. Зазвичай швидкість вимірюється після завершення процесу травлення, а виміри вимагають проведення декількох додаткових операцій. Тому невирішеною залишається проблема великих витрат часу щодо навіть одного виміру.

У [4] розглядаються методи вимірювання швидкості травлення, засновані на вимірюваннях ваги зразка. При цьому наголошується, що вони мають низьку точність та характеризуються складністю проведення процесу вимірювань. Зокрема, для цього необхідно використати надточні електронні ваги, готувати зразки з площею протравлюваної поверхні на мене 1 см^2 , проводити кілька підготовчих етапів. До того ж, використання методу вимагає видалення зі зразків шарів завтовшки не менше $0,1 \text{ мкм}$. Такі параметри експериментальних досліджень процесу травлення методом вимірювання ваги зразків прийнятні у багатьох випадках. Виняток становлять лише дослідження процесів травлення з низькою швидкістю та при необхідності досягнення високої точності. Проте залишається важлива невирішена проблема неможливості автоматизації таких вимірів, що визначається внутрішньою сутністю розглянутих «вагових» методів.

Інший вид традиційних методів вимірювання швидкості хімічного травлення, заснованих на прямому визначенні товщини протравленого шару,

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

аналізуються в [5]. Для цього використовують зразок, частина якого покривається нерозчинною маскою. У процесі травлення на такому зразку з'являється сходи́нка, товщина якої є товщиною протравленого шару. Така товщина вимірюється високоточними профілометрами або за допомогою атомно-силової мікроскопії. Крім того, метод дає одночасно можливість контролю однорідності травлення поверхні зразка. Зазначається, що методи визначення товщини дозволяють вимірювати низькі швидкості травлення (від часток нанометра за хвилину) та забезпечують високу точність. Однак і для них невирішеними залишаються проблеми дуже високої трудомісткості та складності автоматизації процесу вимірів.

Авторами [6] проводилися дослідження динаміки травлення фоторезистів на основі шарів склоподібних халькогенідів Ge-Se методом кварцового резонатора. При цьому відмічається, що такий метод дозволяє швидко визначати швидкість травлення, а сам процес вимірювань може бути автоматизований. Але залишається суттєвий недолік – для кожного окремого вимірювання необхідно проводити калібрування кварцової підкладки (резонатора), на яку осаджується шар фоторезисту. Крім того, для кожного нового хімічного складу травника слід вводити поправки до резонансної частоти резонатора. Таки чином, автоматизація вимірювань все-таки вимагає досить тривалої «ручної» підготовки зразків.

Останнім часом з'явилися нові технології вимірювання товщини тонких плівок. Це методи запису спектрів інтерференції когерентних променів, які отримуються при пропусканні чи відбитті зонduючого оптичного випромінювання від поверхонь досліджуваного зразка [7]. Дані методи прості в експлуатації, швидкі для вимірювання та мають високу точність. Вони також не вимагають проведення додаткових операцій підготовки зразків перед вимірюваннями. Але суттєвим недоліком є те, що вони орієнтовані на вимірювання товщини тонких плівок у статичному режимі – коли не протікають ніякі процеси зі змінами цієї товщини. Тому вимірювання швидкості травлення такими методами має вже відмічені вище недоліки.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Автори [8] розробили пристрій для вимірювання швидкості травлення фоторезистів з використанням явища інтерференції монохроматичних когерентних оптичних променів. Їхні експериментальні дослідження показали можливість технічної реалізації такого інтерференційного методу для вимірювань швидкостей хімічного травлення різних речовин. При цьому показано можливість контролю змін товщини плівки з абсолютною похибкою, меншою 10 нм. У роботі [8] використано поширення зонduючого та реєструючого оптичного променя лазера в повітряному середовищі, що ускладнює юстування оптичної системи. Крім того, застосування розробленого пристрою вимагає проведення багатьох підготовчих операцій розміщення досліджуваного зразка у спеціальній кюветі та наявності додаткової системи прокачування через кювету хімічного травника. Все це значно підвищує трудомісткість проведення вимірювань та суттєво ускладнює систему автоматизації проведення вимірювань.

Серед автоматичних промислових пристроїв проведення процесу «мокрого» травлення широко представлене лише обладнання для електролітичних методів полірування. Типовим прикладом може бути прилад Qetch 1000 фірми QATM [9]. Він являє собою сучасний лабораторний прилад, який в автоматичному режимі проводить електролітичне травлення чи полірування різних провідних матеріалів з повним контролем таких процесів. У основу автоматичного контролю здійснюваного процесу в даних приладах покладено неперервне вимірювання сили електричного струму через електроліт та спаду напруги на досліджуваному зразку. У результаті в режимі реального часу забезпечується швидке отримання контрольних результатів процесу травлення без структурних змін у самому зразку.

Що ж стосується класичного хімічного травлення, то тут зустрічаються лише окремі розробки лабораторних пристроїв, призначених для вузькоспеціалізованих конкретних досліджень. При цьому ступінь автоматизації контролю процесу травлення досить мала. Зокрема, автори роботи [10] розробили автоматичний лабораторний стенд для здійснення «мокрого» травлення. Однак системою керування даного устаткування контролює лише процеси подання

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

травників в закриту реакційну камеру та підтримує необхідні параметри даних травників під час травлення (температура та концентрація). Для цього пристрій оснащений мішалкою, парогазовим конденсатором, теплоізованими резервуарами для попереднього підігріву травників і води. Система керування забезпечує здійснення автоматизованого багатоступінчастого травлення в одному технологічному циклі із заміною травників і промиванням дослідного зразка, без його вилучення з реакційної камери. Апробація пристрою під час досліджень глибокого анізотропного травлення пластин кремнію в різних лужних травниках показала високу якість контролю із забезпеченням рівномірності протравленої поверхні на рівні близько 1 мкм. Однак розроблений пристрій не здійснює ніякого контролю саме протікання процесу травлення.

Для хімічного травлення металографічних зразків сталі досліджено можливості автоматизації в роботі [11]. При цьому основна увага була приділена автоматичному контролю параметрів травників та процесам очищення і сушіння досліджуваних зразків. Встановлено важливість забезпечення автоматичним пристроєм точності задання тривалості процесу для отримання відтворюваних результатів, що не можливо при ручному контролі. Також відмічено негативну дію автоматичного включення ультразвукового генератора для прискорення процесів травлення – у результаті суттєво знижується однорідність протікання процесу травлення по поверхні зразків. Одночасно, ультразвукова обробка є важливим етапом алгоритму автоматичного очищення зразків перед травленням. Автори [11] також відмічають, що повну автоматизацію неперервного контролю процесу «мокрого» хімічного травлення забезпечити досить важко.

Таким чином, аналіз літературних даних показує, що, не дивлячись на сучасну інтенсивну автоматизацію всієї практичної діяльності людини, вимірювання швидкості «мокрого» хімічного травлення проводиться в більшості випадків «вручну». Така ситуація обумовлена об'єктивними труднощами та технічними складнощами, які виникають при автоматизації процесів контролю за протіканням хімічного травлення традиційними методами.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Аналіз літературних даних свідчить, що в сучасних пристроях для досліджень хімічного травлення забезпечується лише автоматизація переходів між різними технологічними операціями та контролю параметрів травника під час травлення. А неперервний безпосередній контроль за протіканням процесу травлення та станом досліджуваного зразка при цьому не здійснюється. Все це вказує на актуальність проведення досліджень, присвячених визначенню можливості повної автоматизації вимірювань швидкості хімічного травлення для тих або інших типів речовин.

1.2 Фотолітографія як сучасний універсальний технологічний метод на основі процесів хімічного травлення

Сутність технологічних процесів сучасної фотолітографії полягає в нанесенні на відповідно оброблену поверхню початкового об'єкту тим або іншим методом тонкого шару особливого матеріалу, який називають фоторезистом [12]. Ці матеріали відносять до одного з видів фоточутливих речовин. Їхньою особливістю є те, що під дією світла із заданого спектрального діапазону дані матеріали змінюють свої різні фізико-хімічні властивості. Світлове випромінювання, яке здатне створювати такі зміни називають активним або актинічним. Для передових фотолітографічних технологій переважно використовують ультрафіолетове випромінювання. У результаті досягаються мінімальні розміри елементів фотолітографічного технічного рисунку.

При здійсненні технологічного процесу засвітки шару фоторезисту виконують через спеціальний трафарет, який називають фотошаблоном. Цей трафарет відтворює рисунок зображення, яке слід відтворити на відповідному об'єкті, наприклад, на напівпровідниковому кристалі-підкладці. Опромінювання шару фоторезисту актинічним випромінюванням через відповідний фотошаблон зумовлює зміни фізико-хімічних властивостей фоторезисту в тих частинах, які відповідають прозорим для світла ділянкам фотошаблону. У результаті у

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

структурі шару фоторезисту відтворюється у прихованому вигляді той рисунок, який міститься на фотошаблоні.

Наступним етапом є процес «проявлення» засвіченого фоторезисту. У більшості випадків цей процес проводять методами хімічного, іонного чи плазмового травлення. Тут, внаслідок фотозмін структури фоторезисту, проявляються відмінності швидкостей травлення його засвічених і незасвічених ділянок. Зокрема, одні з них протравлюються швидше, у порівнянні з іншими ділянками. Таку властивість різної швидкості травлення різних ділянок фоторезисту називають селективністю травлення.

На закінчення процесу проявлення (або селективного травлення), наприклад, засвічені ділянки фоторезисту «зникають» повністю, а незасвічені його ділянки лишаються у вигляді створеного, необхідного за технологією, просторового рисунку-рельєфу. Таким чином, на поверхні створюється просторове зображення того рисунку відповідного об'єкта, який необхідно відтворити на його поверхні.

Утворені при селективному травленні шару фоторезисту «вікна» рельєфу дозволяють у подальшому проводити такі важливі технологічні операції:

- локальне травлення поверхні об'єкта з метою видалення на ній непотрібних ділянок створених мезаструктур;
- видалення спеціальних захисних шарів, наприклад, оксидів, нітридів чи полімерів з метою розкриття окремих ділянок об'єкта для проведення на них наступних технологічних операцій;
- витравлення металевих шарів для створення омичних контактів, провідних каналів, струмоведучих доріжок та інших елементів складної геометричної форми;
- багато інших технологічних операцій.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

1.3 Фоторезисти для технологій виготовлення інтегральних схем та фотохімічні процеси в них

Фоторезистами для технологій інтегральних мікросхем є особливими світлочутливими речовинами, які змінюють свої властивості хімічної розчинності у спеціальних розчинниках під дією світлового актинічного випромінювання. Основною вимогою до них є висока стійкість до різних кислотних і лужних травників.

Принцип дії сучасних фоторезистів полягає переважно у протіканні в них специфічних стимульованих фотохімічних реакцій під дією активного світла. Такі реакції видозмінюють структуру засвічених ділянок фоторезисту таким чином, що це суттєво впливає на їх стійкість до окремих розчинників.

У інтегральних технологіях основним призначенням плівок фоторезистів є створення на поверхні напівпровідникового кристалу-підкладки тонкого захисного шару, у якому в послідовному можна буде сформувати необхідну конфігурацією рисунка майбутньої електронної схеми. Рельєф даного рисунка в захисному шарі фоторезисту отримують під час його фотоекспонування через відповідний створений трафарет. У результаті впливу актинічного випромінювання на необхідні окремі ділянки фоторезисту вони змінюють свою хімічну розчинність у порівнянні з неосвітленими ділянками [13].

Після проявлення фотоекспонованого фоторезисту (або після його травлення в підібраному розчиннику) непотрібні ділянки рельєфу хімічно видаляються за рахунок реакцій з розчинником, а потрібні ділянки рельєфу залишаються на кристалі-підкладці. Такі залишені ділянки в послідовних технологічних процесах слугують захисною маскою для проведення багатьох подальших технологічних операцій з виготовлення необхідної інтегральної мікросхеми.

Відмітимо, що, як правило, фоторезисти є складними сучасними мономерними або полімерними сполуками спеціальних органічних речовин. Але

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

практично переважне використання знаходять саме полімерні фоторезисти, оскільки вони мають значно вищі захисні властивості [14].

Фотохімічні процеси, які відбуваються в сучасних фоторезистах при опроміненні актинічним світлом, відбуваються за кількома основними фізико-хімічними законами:

- активними є тільки ті кванти випромінювання, які сильно поглинаються структурою атомної сітки фоторезисту, а, відповідно, викликають відповідні зміни цієї структури;
- кінцевий результат хімічної дії світлових квантів прямо пропорційний добутку інтенсивності діючого на шар фоторезисту актинічного випромінювання на час його дії;
- кожному окремому поглиненому кванту актинічного випромінювання відповідає зміна будови лише однієї молекули фоторезисту.

Фотохімічні реакції, які протікають у сучасних фоторезистах при поглинанні квантів світлового випромінювання, відрізняються складністю і різноманіттям перебудов структури атомної сітки. Відмінність у кінцевих результатах їх протікання задається хімічною будовою матеріалу фоторезисту і технологічними умовами його опромінювання.

Основною величиною, яка характеризує інтенсивність структурних фотохімічних процесів у різних фоторезистах, є квантовий вихід [15]. Цей параметр показує математичне відношення загальної кількості молекул, які змінили структуру під час опромінення фоторезиста, до кількості поглинутих квантів.

Квантовий вихід, швидкість фотохімічних реакцій та ступінь їх керованості й інші експлуатаційні параметри сучасних фоторезистів суттєво залежать як від спектрального складу так і від інтенсивності актинічного випромінювання. Для керування величиною спектральної чутливості до складу матеріалів фоторезистів часто вводять спеціальні добавки, які називають сенсibilізаторами. Вони дозволяють більш керовано фіксувати положення максимуму поглинання квантів актинічного випромінювання в необхідній області спектру. Однак основним

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

визначальним фактором лишається хімічний склад та структура атомної сітки матеріалу фоторезисту. У залежності від особливостей прояву цих параметрів у сучасних фоторезистах реалізуються такі базові фотохімічні реакції в молекулах:

- фоторозпад;
- фотоперегрупування;
- фотоприєднання;
- фотоперенесення;
- фотовідновлення;
- фотосенсибілізація.

У свою чергу, у залежності від природи протікаючих у шарі фоторезисту фотохімічних реакцій, їх поділяють на такі дві основні великі групи: негативні та позитивні.

Для негативних фоторезистів під дією світла характерно формування нерозчинних ділянок плівки за рахунок локальних реакцій фотополімеризації або фотоконденсації. У результаті після проявлення дані ділянки залишаються на поверхні кристала-підкладки. Тому рисунок того фоторезисту, який залишився, є протилежним (тобто негативним) до вихідного зображення фотошаблону: освітлені місця залишаються «стають темними», а не освітлені місця зникають – стають «світлими ділянками».

Позитивний фоторезист, у свою чергу, відповідає за утворення під дією світла добре розчинних ділянок фоторезисту за рахунок різних особливих процесів фоторозпаду. Такі ділянки під час травлення у розчиннику зазвичай видаляються з поверхні підкладки. Тому рельєф ділянок фоторезисту, який залишився, повторює рисунок оригінала вихідного фотошаблону, через який вівся процес експонування.

У якості ефективних негативних фоторезистів у сучасних напівпровідникових технологіях переважно застосовують суміші на основі складного органічного ефіру полівінілового спирту і сполук полівінілцинамату й циклокаучука з різними сенсibiliзуючими домішками.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Як позитивні фоторезисти на сьогодні найбільш широко застосовуються хімічні суміші на основі органічного новолаку і полімерного органічного нафтохінондіазиду.

Для вибору оптимального типу фоторезисту на практиці в сучасних технологіях інтегральних мікросхем використовують ряд критеріїв. До основних із них можемо віднести такі.

1. Світлочутливість – величина, обернена до тієї поглинутої світлової енергії, яка необхідна для досягнення в шарі фоторезисту заданої селективності травлення (у більшості випадків це має бути не менше 50 %). Таким чином, світлочутливість матеріалу фоторезистів визначається типом та повнотою закінчення фотохімічних реакцій.

2. Кінцевою метою проведення технологічного процесу фотолітографії є не лише повнота засвічення фоторезисту. Дуже важливою є й висока якість отриманого рельєфу проявленого рисунка в тонкому шарі фоторезиста. На цей же критерій сумісно впливають як загальна світлочутливість, так і характер протікання хімічних реакцій проявлення. Тому на практиці інтегральний параметр світлочутливості вимірюється величиною мінімальної світлової експонованої інтенсивності, при якій після завершення проявлення утворюється необхідна просторова чіткість і механічна стійкість елементів рельєфу рисунка електронної схеми.

3. Особливо важливим критерієм для сучасної фотолітографії в технології мікросхем з високим рівнем інтеграції є поверхнева роздільна здатність фоторезистів, тобто здатність створювати на підкладці мікрорельєф рисунка схеми зі стабільним мінімальним розміром елементів. Величина роздільної здатності R вимірюється кількістю ліній однакової товщини на 1 мм довжини рисунка, які можна створити в шарі фоторезисту методами фотолітографії на підкладці-кристалі з хорошою чіткістю без перекривання та злиття окремих ліній між собою. Тобто,

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

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

де l – мінімальний лінійний розмір окремих елементів електронної схеми, які слід технологічно забезпечити. Для більшості сучасних фоторезистів роздільна здатність лежить біля величини 5000 ліній на міліметр. Для прикладу на рис.1.1 наведено зображення в атомно-силовому мікроскопі рельєфу сучасного фоторезисту з роздільною здатністю, більшою 4000 ліній на міліметр.

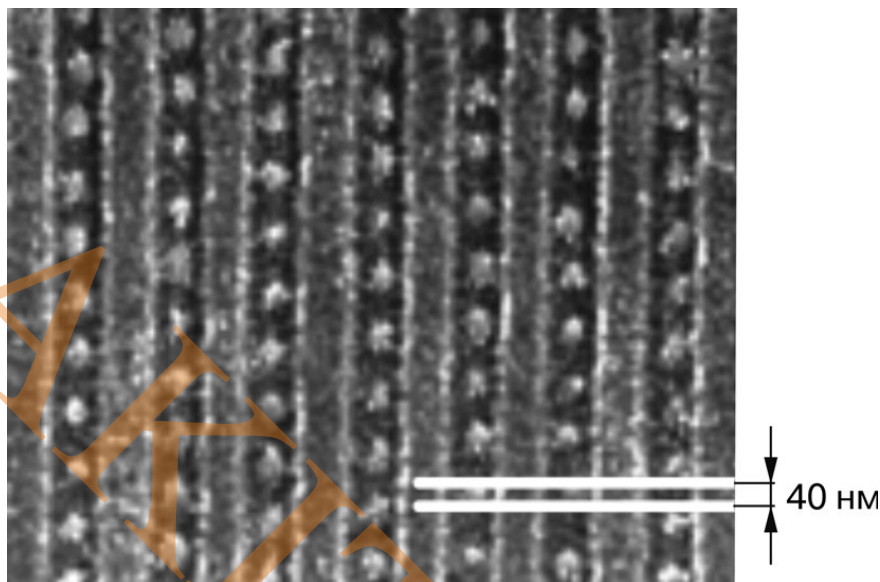


Рисунок 1.1 – Рельєф неорганічного фоторезисту $\text{Ge}_5\text{Sb}_{20}\text{Te}_7$ [14]

4. Особливим технологічним критерієм є хімічна кислотостійкість фоторезистів – здатність створеного рельєфу після експонування, кінцевого проявлення та сушіння надійно захищати поверхню підкладки від дії стандартних розчинів кислотних і лужних травників.

5 Адгезія фоторезисту до несучого кристала-підкладки є наступним критерієм, який безпосередньо пов'язаний з його стійкістю. Цей параметр визначає стабільність структури елементів рельєфу на підкладці до різних зовнішніх механічних дій, а також стійкість до процесів відшарування елементів рельєфу від підкладки.

1.4 Протікання процесів хімічного проявлення фоторезистів

Технологічна операція хімічного проявлення плівки фоторезисту після його експонування виконується шляхом обробки підкладки з фоторезистом у спеціальних розчинах різних хімічних сполук. У результаті з поверхні видаляються певні локальні ділянки фоторезисту – опромінені ділянки для позитивних фоторезистів і неопромінені ділянки – для негативних.

Технологічні процеси хімічного проявлення негативних і позитивних фоторезистів суттєво відрізняються між собою. Основна відмінність полягає в типі тих хімічних реакціях, які починають протікати у фоторезисті при його контакті з певними хімічними розчинами. Зокрема, процес хімічного проявлення негативних фоторезистів є просто фізико-хімічною реакцією розчинення полімерного матеріалу. Як проявники для таких фоторезистів застосовують типові органічні розчинники, зокрема, толуол, хлорбензол, трихлоретилен та інші. Особливістю таких технологічних процесів є набухання опромінених ділянок, наряду зі швидким розчиненням неопромінених локальних ділянок фоторезисту. Крім того, на технологічний процес хімічного проявлення негативних фоторезистів суттєво впливає величина експозиції. У таких випадках особливо небезпечною є мала експозиція, яка призводить до поганої якості утвореного рельєфу після хімічного проявлення плівки фоторезисту. Якщо ж експозиція є оптимальною, то тоді безпечним є навіть перепроявлення шару фоторезисту. Тому технологічні процеси хімічного проявлення негативних фоторезистів значно легше піддаються автоматизації.

Процес проявлення сучасних позитивних фоторезистів є значно складнішим. У його основі є протікання хімічних реакцій взаємодії продуктів фоторозпаду полімеру із спеціальних фенольних смол з комплексом компонент лужних розчинників. Кінцеві продукти протікання таких реакцій у подальшому видаляються різними фізико-хімічними методами. Але характерною особливістю технологічного процесу проявлення позитивних фоторезистів є висока чутливість до значного перепроявлення. Коли плівка позитивного фоторезисту довго

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

перебуває в хімічному розчиннику, її неопромінені локальні ділянки також починають хімічно активно взаємодіяти з травником і поступово розчиняються. Тому сумарний час проявлення шарів позитивних фоторезистів має строго контролюватися: зазвичай даний час не перевищує декількох десятків секунд для сучасних фоторезистів.

У процесі проявлення обох типів фоторезистів досить часто виявляються ряд паразитних ефектів, пов'язаних з фізичним явищем дифракції актинічного випромінювання на краях непрозорих частин фотошаблону при фотоекспонуванні. Такі чинники часто призводять до появи різних дефектних елементів рельєфу у проявленій плівці фоторезисту.

Для прикладу, на рис.1.2 наведено характерні кінетичні криві хімічного проявлення плівок халькогенідного фоторезисту. Із наведених на рисунку результатів слідує, що величина селективності травлення для різних ділянок таких фоторезистів може досягати значень, більших 60 від. од. При цьому спостерігається поведінка, типова для негативного фоторезисту.

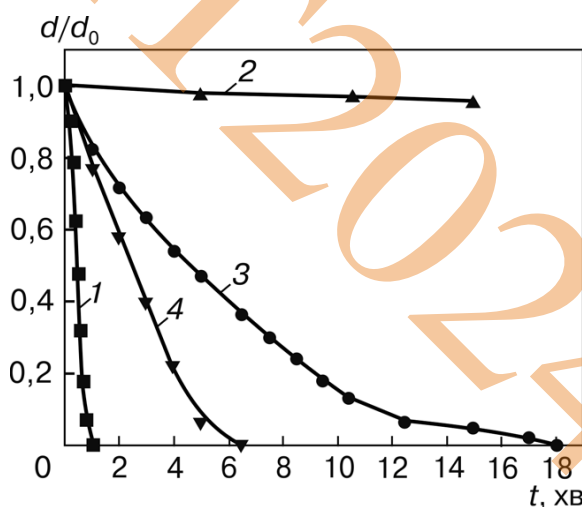


Рисунок 1.2 – Кінетичні криві розчинення фоторезисту $As_{40}S_{30}Se_{30}$ у селективному травнику: 1 – сконденсовані плівки, 2 – відпалені, 3 та 4 – експоновані з різною потужністю випромінювання

Наведені результати вказують, що халькогенідні плівки є перспективними для створення сучасних нелінійних фоторезистів. Важливо, що швидкість

фотостимульованих структурних перетворень у них суттєво залежить від інтенсивності актинічного експонуючого випромінювання. Це дозволяє варіювати технологічні режими як фотоекспонування, так і хімічного проявлення в широких межах.

Переваги використання халькогенідних плівок в якості фоторезистів можна визначити в кількох основних напрямках [15]:

- технологічність методів вакуумного нанесення плівок;
- легкість отримання високо-однорідних за товщиною плівок великої площі;
- процес отримання плівок легко контролюється і легко керується при автоматизації;
- висока роздільна здатність, вище 10 ліній на мікромметр;
- хороша механічна міцність;
- висока стійкість до кислотних середовищ.

Як видно із проведеного аналізу, дослідження фоторезистів на сьогодні вимагають розробки сучасних методик та пристроїв автоматичних вимірювань різних параметрів фотолітографічних технологічних процесів. Одним із таких визначальних параметрів є швидкість хімічного травлення, що підтверджує актуальність вибраної теми даної кваліфікаційної роботи.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

2 АНАЛІЗ ЗАВДАННЯ РОБОТИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ МЕТОДІВ ЙОГО РІШЕННЯ

2.1 Формування мети досліджень та постановка задач для вирішення

Метою досліджень є визначення оптимального методу контролю процесів хімічного травлення для здійснення повної автоматизації вимірювань швидкості хімічного травлення та селективності травлення тонких напівпровідникових та діелектричних фоторезистивних плівок.

Для досягнення мети до вирішення ставились такі задачі:

- дослідити придатність різних методів для автоматизації процесу;
- розробити спрощену структурну оптичну схему оптимального методу для пристроїв автоматичного вимірювання швидкості травлення;
- експериментально дослідити закономірності змін параметрів тонких плівок фоторезистів під час їх хімічного травлення за розробленою оптичною схемою;
- на основі отриманих результатів оцінити можливість автоматизації вимірювань швидкості та селективності травлення;
- розробити основні конструкторські документи на модель пристрою автоматичного контролю процесів травлення;
- розробити ефективний простий алгоритми керування автоматичним пристроєм контролю процесів хімічного травлення тонких плівок фоторезистів.

2.2 Аналіз фізико-хімічного змісту величин швидкості травлення та селективності травлення фоторезисту й методів їх вимірювання

Швидкість травлення фоторезисту визначається як величина зміни геометричної товщини шару фоторезисту за одиницю часу при дії на нього відповідного розчинника. Відповідно, селективність травлення як фізико-хімічне

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

поняття визначає відмінність швидкостей травлення різних структурних станів одного і того ж фоторезисту при тотожних умовах здійснення технологічного процесу травлення [16].

Основні методи вимірювань швидкості травлення розглянуто в попередньому розділі. Щодо ж вимірювання селективності травлення фоторезистів, на сьогодні переважно використовують декілька різних кількісних параметрів.

1. Відношення товщини протравленого на даний момент часу шару фоторезисту до товщини його базового шару, наприклад, того шару, який був перед початком процесу травлення.

2. Відношення кінцевих змін товщини різних структурних станів фоторезисту, які відбуваються протягом заданого часу травлення.

3. Відношення швидкостей травлення двох структурних станів фоторезисту. У цьому випадку швидкість травлення відповідного структурного стану визначається простою похідною функції залежності геометричної товщини фоторезисту $h(t)$ від тривалості протікання процесу травлення t , тобто

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

Найбільш строгим у фізичному відношенні є саме третє із наведених визначення величини селективності травлення. Тому в даній роботі за селективність травлення S будемо брати величину відношення швидкості травлення першого стану фоторезиста до швидкості травлення його другого структурного стану:

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

Зазвичай, чисельник відповідає швидкості травлення більш розчинного структурного стану, що відповідає умові $V_1 > V_2$. Тоді величина селективності травлення завжди буде задовольняти умову

$$S \geq 1. \quad (2.2)$$

Відмітимо, що для хороших сучасних фоторезистів висувається обов'язкова умова:

$$V_1 \gg V_2 \text{ або } S \gg 1. \quad (2.3)$$

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Зокрема, одним із базових критеріїв практичної примінимості фоторезистів є досягнення для них значень $S > 20$.

Проведений аналіз показує, що основне завдання даної кваліфікаційної роботи полягатиме в дослідженнях можливості автоматизації вимірювань саме швидкостей травлення різних структурних станів фоторезистів під час проведення технологічного процесу їх хімічного проявлення. При цьому доцільно аналізувати лише методи, які дозволяють проводити неперервні вимірювання товщини тонких шарів фоторезисту у процесі їх обробки хімічними травниками.

Аналіз різних джерел інформації показує, що на сьогодні серед таких методів за своїми базовими фізичними принципами найбільш поширеними є два підходи [17].

1. Безпосереднє неперервне вимірювання певного параметра плівки, наприклад, товщини чи маси.

2. Реєстрація неперервних часових зміни параметрів певного фізичного явища, яке протікає у плівках.

Обидва типи даних методів можуть неперервно фіксувати динаміку змін товщини плівки фоторезисту протягом часу. Відповідно, ці два типи методів можна рекомендувати як для проведення контролю швидкості травлення фоторезистів, так і для автоматизації процесу вимірювань.

Третій тип методів полягає в порівнянні кінцевих геометричних товщин шару фоторезисту після закінчення процесу травлення h_1 до вихідної початкової його товщини h_0 . При цьому такі вимірювання слід проводити як для «розчинних» ділянок фоторезисту, так і для його «нерозчинних» ділянок. Особливо простою є реалізація таких методів, якщо на момент закінчення технологічного процесу травлення «розчинні» ділянки фоторезисту повністю розчинилися. У такому випадку селективність хімічного травлення можна визначати за строгим математичним співвідношенням (2.1), а за спрощеною граничною фізичною умовою:

$$S = h_1/h_0. \quad (2.4)$$

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Для таких методів нема сенсу здійснювати автоматизацію процесу вимірювань селективності травлення внаслідок їхньої виняткової простоти.

Типовим прикладом реалізації першого типу методів є метод «кварцового резонатора». Його фізична сутність полягає в тому, що досліджуваний фоторезист наносять на підкладку, виготовлену із тонкої кварцової пластинки. Дану систему розміщують у кюветі для травлення таким чином, щоб шар фоторезисту занурювався у розчинник зверху вниз. Після цього відповідною реєструючою електронною системою фіксують зміни у часі основної резонансної частоти збуджуваних ультразвукових коливань кварцової пластини.

Основна резонансна частота виникаючих власних коливань кварцової пластини визначається її масою та масою того матеріалу, який знаходиться на ній. При цьому зменшення сумарної маси всієї системи обумовлює ріст основної резонансної частоти. У такому процесі величина зміни даної частоти пропорційна зміні маси досліджуваної системи та обернено пропорційна її площі. Таким чином, неперервно фіксуючи зміни основної резонансної частоти всієї системи, можна реєструвати динаміку зміни маси плівки фоторезисту на кварцовій підкладці. Відповідно, даний метод дозволяє легко вимірювати і швидкості травлення фоторезисту.

Для методу кварцового резонатора характерні такі особливості:

- універсальність щодо досліджуваних матеріалів;
- простота проведення процесу вимірів;
- простота експериментального вимірювального обладнання;
- відносна легкість автоматизації всього процесу вимірювань;
- достатня точність результатів вимірювань.

Однак, практична реалізація методу кварцового резонатора характеризується й рядом серйозних труднощів і недоліків:

- складність проведення експериментальних електричних вимірів основної резонансної частоти зразків фоторезист-підкладка, які знаходяться в агресивному травному розчині;

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

- точність результатів експериментальних вимірів суттєво залежність від точності задання густини досліджуваного шару фоторезиста;
- для кожної окремої вибраної кварцової підкладки перед початком проведення вимірів слід визначати її «масову чутливість»;
- також характерна висока чутливість резонансної частоти кварцових пластин до зовнішньої температури та до інших параметрів того середовища, у якому вони знаходиться;
- при дії ультразвукових коливань у досліджуваній системі фоторезист-підкладка можуть ініціюватися неконтрольовані структурні зміни.

Враховуючи наведені вище позитивні риси методу кварцового резонатора та його недоліки, можна зробити висновок: автоматизація процесів контролю та точних вимірів швидкості й селективності травлення фоторезистів нагтовхується на ряд серйозних труднощів. Тому для спрощення рішення поставленої у кваліфікаційній роботі проблеми слід проаналізувати можливості інших типів методів.

2.3 Інтерференційний метод контролю процесів травлення

Переважає більшість сучасних фоторезистів є полімерними діелектриками або напівпровідниками, які достатньо прозорі в тому або іншому оптичному спектральному діапазоні. Це відкриває широкі можливості використання інтерференційних методів для точного вимірювання швидкості та селективності хімічного травлення таких матеріалів.

Інтерференційні методи ґрунтуються на простому фізичному оптичному явищі накладання когерентних хвиль. У процесі такого накладання проходить формування так званої інтерференційної картини – специфічного перерозподілу у просторі інтенсивності кількох когерентних хвиль. Характер даного перерозподілу визначається тими фазовими співвідношеннями, які існують між когерентними хвилями.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Для утворення когерентних хвиль найпростішим методом є розділення променя від одного точкового монохроматичного оптичного джерела на два промені. Якщо у процесі розділення між цими двома променями виникає певна різниця фаз, то їх накладання зумовить формування специфічної просторової інтерференційної картини. При цьому розподіл інтенсивності випромінювання в заданій точці інтерференційної картини визначається тією оптичною різницею ходу даних хвиль, яка залежить від траєкторії проходження кожної з них.

На сьогодні найбільш простим методом просторового розділення оптичної монохроматичної хвилі на два окремі когерентні промені є її направлення на тонку плівку тієї або іншої природи. Зазвичай, такі плівки формують на певній підкладці. При цьому як сама підкладка, так і нанесена на неї плівка мають бути достатньо прозорими для певного спектрального діапазону оптичного випромінювання. З точки зору складності формування просторової картини інтерференції двох когерентних променів, утворених на такій системі, оптимальною є така геометрія, коли вихідний промінь падає перпендикулярно до поверхні підкладки. З цієї причини саме таку геометрію найбільш доцільно вибрати для реалізації автоматичного методу контролю процесу хімічного травлення фоторезисту та вимірювань параметрів травлення.

Для обґрунтування такого висновку розглянемо процес інтерференції двох когерентних оптичних променів за описаним вище сценарієм. Схема такої інтерференції для випадку процесу хімічного травлення тонкої плівки фоторезисту наведено рис. 2.1.

Відповідно до наведеної схеми, між двома когерентними променями, які виходять із досліджуваної системи, виникає оптична різниця ходу

$$\Delta = n \cdot \Delta r, \quad (2.5)$$

де n – показник заломлення плівки фоторезисту на довжині хвилі зондуємого оптичного випромінювання,

Δr – геометрична різниця ходу утворених двох променів.

З утвореною оптичною різницею ходу Δ зв'язана відповідна різниця фаз двох когерентних оптичних променів. Ця різниця

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

$$\Delta\varphi = (2 \cdot \pi \cdot \Delta) / \lambda, \quad (2.6)$$

де λ – довжина хвилі монохроматичного оптичного випромінювання, яке направляється на систему підкладка-плівка.

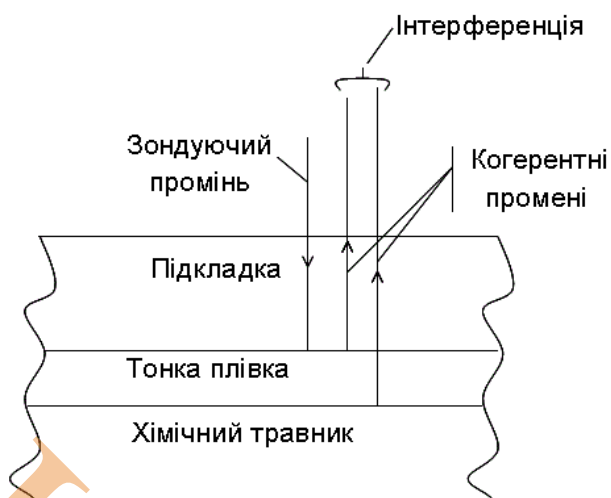


Рисунок 2.1 – Оптична схема утворення оптичних когерентних променів у підкладці з тонкою плівкою фоторезисту

У сформованій інтерференційній картині інтенсивність оптичного випромінювання варіюється у просторі за відповідними законами: вона періодично то посилюється, формуючи відповідні інтерференційні максимуми, то послаблюється, формуючи інтерференційні мінімуми. Для вказаної на рис. 2.1 геометрії інтерференційні оптичні максимуми появляються при виконанні для величини оптичної різниці ходу простої умови

$$2 \cdot h \cdot n = k \cdot \lambda, \quad (2.7)$$

де h – товщина шару фоторезисту у даний момент часу,

k – ряд натуральних чисел.

Із проведеного вище короткого теоретичного аналізу можна зробити висновок, що інтерференційний оптичний метод є цілком придатний для вирішення поставлених у кваліфікаційній роботі завдань.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

2.4 Обґрунтування технічної реалізації автоматичного методу контролю хімічного травлення

Оскільки у процесі хімічного травлення товщина h плівки фоторезисту буде неперервно зменшуватися. Тому фазові співвідношення між двома когерентними променями (рис. 2.1) будуть неперервно змінюватися. У результаті інтенсивність інтерференційної картини буде функцією товщини плівки $I(h)$. Це означає, що в напрямку поширення двох когерентних променів інтенсивність оптичного випромінювання буде змінюватися з часом. При цьому закон зміни даної інтенсивності є близьким до функції $\sin$.

Указані вище зміни інтенсивності оптичного випромінювання легко фіксуються сучасним фотореєструючим пристроєм – чутливим фотоприймачем. Таким чином, для вимірювань необхідно неперервно вимірювати часові зміни інтенсивності інтерференції двох променів в одній точці простору (вхідне вікно фотоприймача).

Для проведення експериментальних вимірювань швидкості травлення інтерференційним методом не обов'язково точно фіксувати величину інтенсивності оптичного випромінювання. Основна інформація про часові зміни товщини плівки фоторезисту міститься в часових змінах інтенсивності інтерференції. Наприклад, це можуть бути ті часові інтервали, протягом яких інтенсивність оптичної інтерференційної картини на фотоприймачі змінюється від одного свого максимуму до іншого. Умовно цей інтервал називають періодом інтерференції – позначимо його надалі як T .

Згідно зі співвідношенням (2.7), періоду інтерференції відповідає той час, протягом якого товщина шару фоторезисту при травленні зменшується на певну величину Δh . Здійснимо відповідні математичні перетворення виразу (2.7) для виведення формули розрахунку даної величини. Очевидно, що при k -ому інтерференційному максимуму товщина шару фоторезисту буде

$$h_1 = (k \cdot \lambda) / 2 \cdot n. \quad (2.8)$$

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Аналогічно, при настанні послідуєчого моменту появи інтерференційного максимуму, товщина шару фоторезисту зменшиться до величини

$$h_2 = [(k - 1) \cdot \lambda] / 2 \cdot n. \quad (2.9)$$

Тоді

$$\Delta h = h_1 - h_2 = \lambda / 2 \cdot n. \quad (2.10)$$

Із останнього співвідношення слідує, що кожен наступний інтерференційний максимум реалізується при зменшенні товщини шару фоторезисту на однакову величину $\lambda / 2 \cdot n$. Як видно, цей інтервал залежить лише від показника оптичного заломлення матеріалу фоторезисту та довжини хвилі використаного оптичного випромінювання. Але при експериментальних вимірюваннях легко фіксується й інтервал часу τ зміни інтенсивності інтерференційної картини між її сусідніми екстремумами, наприклад, між найближчими максимумом і мінімумом. Даному інтервалу буде відповідати зміна товщини на величину $\Delta h_e = \lambda / 4 \cdot n$.

Таким чином, створювана технічна система інтерференційного методу має забезпечувати реєстрацію часових моментів проходження сусідніх інтерференційних екстремумів та вимірювати часовий інтервал τ . Якщо ця величина буде відома, то із експериментальних вимірів швидкість травлення шару фоторезисту знаходиться як

$$V = \Delta h_e / \tau = \lambda / (4 \cdot n \cdot \tau). \quad (2.11)$$

Отриманий кінцевий результат (2.11) показує, що фізично та математично інтерференційний метод експериментального вимірювання швидкості та селективності хімічного травлення фоторезистів є досить простим. Для цього необхідно лише надійно фіксувати часові моменти настання екстремумів інтенсивності випромінювання на фотоприймачі інтерференційної картини. Це дозволяє вимірювати інтервали часу, які протікають між двома такими сусідніми моментами. При цьому також слід знати точне значення величини показника заломлення шару досліджуваного фоторезиста.

Відповідно з проведеним аналізом, технічно завдання кваліфікаційної роботи можна легко вирішити шляхом розробки електронного автоматичного

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

модуля реєстрації змін з часом інтенсивності інтерференційної картини. При цьому саме оптичні інтерференційні методи забезпечують високу точність отриманих експериментальних результатів вимірювань та надійність функціонування відповідного електронного модуля.

Особливістю використання проектного автоматичного модуля буде необхідність створення для кожного дослідження спеціального зразка, на якому проводитимуться експериментальні вимірювання. Для цього на прозору для лазерного випромінювання основу-підкладку слід нанести шар досліджуваного фоторезисту. Зрозуміло, що матеріал фоторезисту також повинен бути достатньо прозорим для оптичного зонduючого променя. Дана умова необхідна для уникнення сильного поглинання інтерферуючих променів як у підкладці, так і у фоторезисті.

Конкретна технічна реалізація створюваного модуля можлива у двох базових варіантах.

1. Простий одноканальний варіант, коли експериментальні вимірювання у процесі хімічного травлення проводяться по чергово для експонованої та неекспонованої ділянок шару фоторезисту.

2. Більш складний двоканальний варіант, у якому одночасно фіксуються зміни товщини обох вказаних ділянок при їх хімічному травленні в одному експерименті.

У даній кваліфікаційній роботі ми вибрали проектування одноканального варіанта, який значно легший у проектуванні і значно дешевший при реалізації. При необхідності ж проводити дослідження хімічного травлення обох ділянок фоторезисту одночасно, можна буде використати систему із двох таких розроблених одноканальних модулів. Результати експериментальних вимірів із даного тандему двох модулів легко обробляються оператором або додатковим модулем сучасного мікроконтролера.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

3 РОЗРОБКА СТРУКТУРНИХ СХЕМ ПРИСТРОЮ

3.1 Структурна оптична схема пристрою автоматичного вимірювання швидкості травлення

Для технічної реалізації інтерференційного методу вимірювання швидкості травлення тонких плівок фоторезистів можна застосувати різні оптичні схеми. Але найпростішим з точки зору технічної реалізації, юстування оптичної схеми та повної автоматизації є використання для введення зондуючого випромінювання оптичних хвилеводів, коли лазерний промінь направляється перпендикулярно до поверхні досліджуваної системи, що відповідає фізичній картині рис. 2.1. Функціональна оптична схема такого запропонованого макету проведення експериментальних вимірювань наведена на рис. 3.1.

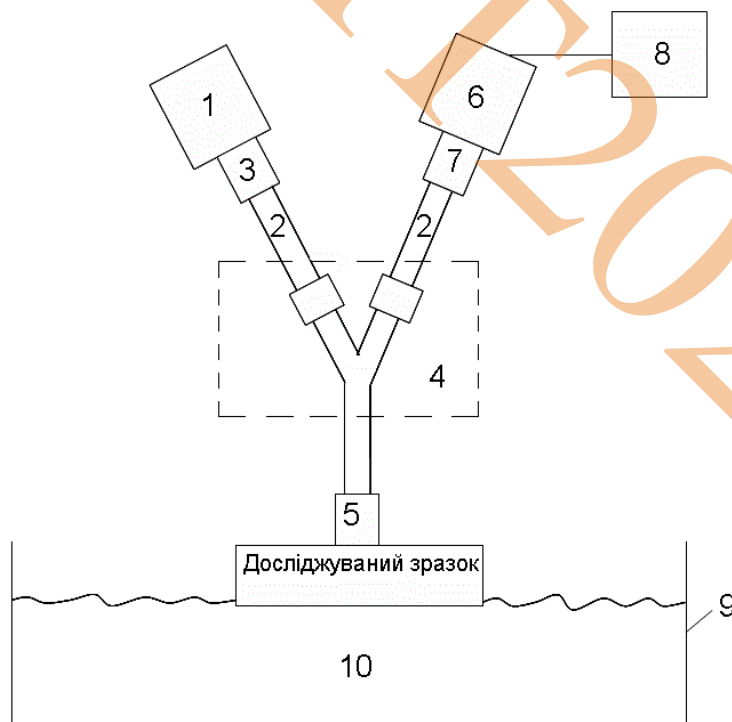


Рисунок 3.1 – Оптична схема макету експериментальних досліджень процесу хімічного травлення фоторезистів

Відповідно з розробленою оптичною схемою, експериментальний макет містить джерело випромінювання 1, оптичні волокна 2, конструктив стикування джерела випромінювання із оптичним волокном з датчиком інтенсивності випромінювання 3, Y-розгалужувач оптичного променя із конструктивами стикування з оптичними волокнами 4, конструктив стикування оптичного волокна із підкладкою з нанесеною на неї плівкою фоторезисту 5, фотоприймач інтенсивності інтерференційної картини 6, конструктив стикування фотоприймача з оптичним волокном 7, електронний пристрій реєстрації інтенсивності інтерференційної картини 8, ванночка для травлення 9, травник 10.

У розробленій оптичній схемі передбачено два незалежні інформаційні канали сприймання оптичних сигналів від зовнішніх пристроїв. Один канал передає сигнали від вбудованого в конструктив 3 фотодатчика. Цей інформаційний канал виконуватиме чисто контрольну функцію. Його сигнали несуть у собі інформацію про наявність в оптичному тракті зондуючого лазерного випромінювання та про його інтенсивність.

Основна частина інтенсивності вхідного випромінювання по оптоволокну буде направлятися через Y-розгалужувач на досліджуваний разок у вигляді оптичної підкладки з плівкою фоторезисту. Утворені за рахунок відбивання зондуючого випромінювання від двох границь поділу різних середовищ когерентні промені (рис. 2.1) формують на виході дослідженого зразка відповідну інтерференційну картину. Інтенсивність інтерференції вводиться у відповідне оптичне волокно і через Y-розгалужувач проходить на основний вимірювальний фотоприймач 6. Електричний сигнал від даного фотоприймача направляється на електронний блок обробки інформації про текучу інтенсивність випромінювання в інтерференційній картині.

3.2 Розробка електричної структурної схеми пристрою

Відповідно із спроектованою функціональною оптичною схемою можна спроектувати структуру електричну схему пристрою автоматичного контролю

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

технологічних процесів хімічного травлення фоторезистів та вимірювання величин швидкості й селективності травлення. Процес та результати проектування полягають у наступному.

У основу розробленої електричної схеми покладено застосування у якості оптичного тракту сучасних оптичних волокон для ближнього інфрачервоного діапазону, як це відображено у функціональній схемі рис. 3.1. Відповідно до цього, спроектована структурна електрична схема пристрою автоматичного контролю процесів травлення наведена на рис. 3.2.

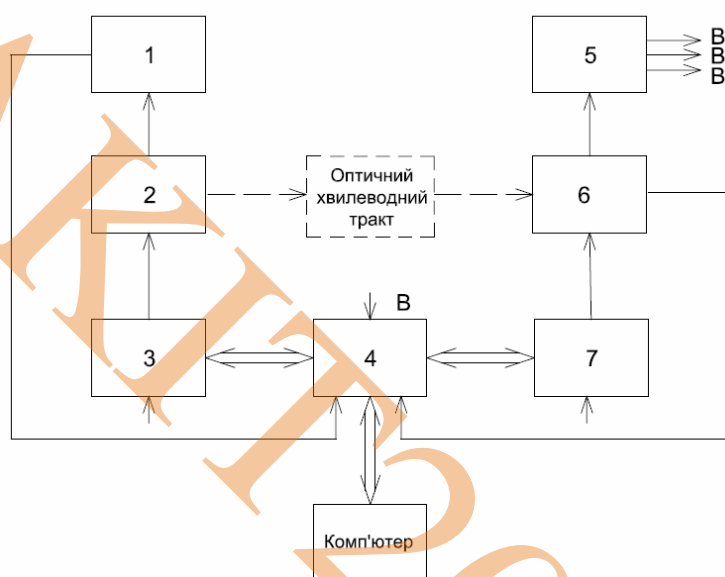


Рисунок 1. Структурна електрична схема моделі пристрою автоматичного контролю параметрів хімічного травлення тонких плівок: 1 – датчик інтенсивності, 2 – світлодіод, 3 – модуль живлення світлодіода, 4 – модуль мікроконтролера, 5 – блок живлення, 6 – фотоприймач, 7 – модуль живлення фотоприймача

У якості джерела оптичного випромінювання взято напівпровідниковий світлодіодний модуль (позиція 1 та 2 на рис. 3.2), який містить як власне світлодіод (2), так і вбудований датчик інтенсивності вихідного випромінювання (1). Електрична енергія до світлодіода подається від керованого модуля живлення 3. Такі конструктивні особливості дозволяють в автоматичного режимі

здійснювати як контроль інтенсивності випромінювання в оптичному тракті, так і керування цією інтенсивністю.

Як уже відмічалось, оптичний тракт пристрою побудовано на волоконно-оптичному Y-розгалужувачі. Оптичне вхідне випромінювання вводиться в одне плече цього розгалужувача. Воно через основу розгалужувача направляється на досліджуваний зразок. За рахунок відбивання від двох поверхонь тонкої плівки формуються два когерентні промені, які інтерферуючи між собою, входять в основу розгалужувача. Інтенсивність результуючої інтерференційної картини виводиться через друге плече Y-розгалужувача.

Зміни вихідної інтенсивності інтерференції реєструється фотоприймачем 6. Сформований фотоприймачем електричний сигнал подається на модуль контролю 4. Живлення фотоприймача здійснюється за допомогою керованого модуля 7, що дозволяє системі автоматичного керування змінювати параметри функціонування даного фотоприймача.

Основою модуля контролю 4 може служити або сучасний модуль мікроконтролера (МК), або малопотужний промисловий логічний контролер. Цей модуль у досліджуваній моделі пристрою було обладнано двома вхідними інформаційними лініями зв'язку, які сприймають електричні сигнали від двох фотоприймачів інтенсивності оптичного випромінювання (рис. 3.2). При необхідності кількість вхідних ліній модуля контролю можна збільшити: додати інформаційні лінії зв'язку від датчиків рівня травного розчину в кюветі, датчика температури розчину, датчика концентрації розчину, інших датчиків.

Модуль контролю 4 містить також два двонаправлені інформаційні канали, які забезпечують керування режимами роботи світлодіода та фотоприймача інтенсивності інтерференційної картини (рис. 3.2). Крім того, у САК введено канал інтерфейсного зв'язку з комп'ютером на основі протоколу USB. Він призначений для створення і компіляції програм у модуль контролю та для збору й обробки всіх даних, які надходять від САК у процесі її функціонування.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Для забезпечення електричною енергією всіх компонентів САК використано трьохканальний блок живлення. Він забезпечує стабільними напругами необхідної величини модуль контролю, світлодіод і фотоприймач.

Таким чином, структурну електричну схему умовно можна розділити на чотири частини:

- вхідна, яка перетворює електричний сигнал в оптичний сигнал світлодіода для оптичного тракту;
- вихідна частина, яка сприймає оптичний сигнал, утворений в оптичному тракту, і перетворює його на електричний сигнал;
- власне сама САК всіх процесів у пристрої;
- модуль електричного живлення, який забезпечує всі інші системи пристрою електричною енергією з необхідними параметрами.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

4 СТВОРЕННЯ МРДЕЛІ ПРИСТРОЮ ВИМІРЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ХІМІЧНОГО ТРАВЛЕННЯ ФОТОРЕЗИСТІВ

4.1 Узгодження джерела випромінювання та фотоприймача

Базовим компонентом пристрою є джерело зонduючого оптичного випромінювання, у якості якого використано сучасний світлодіод типу SFH485P фірми OSRAM. Максимум його випромінювальної спектральної характеристики припадає на довжину хвилі біля 808 нм (рис.4.1) [18]. Таким чином, з даним джерелом випромінювання можна проводити дослідження тонких плівок, які мають високе оптичне пропускання в даному спектральному діапазоні.

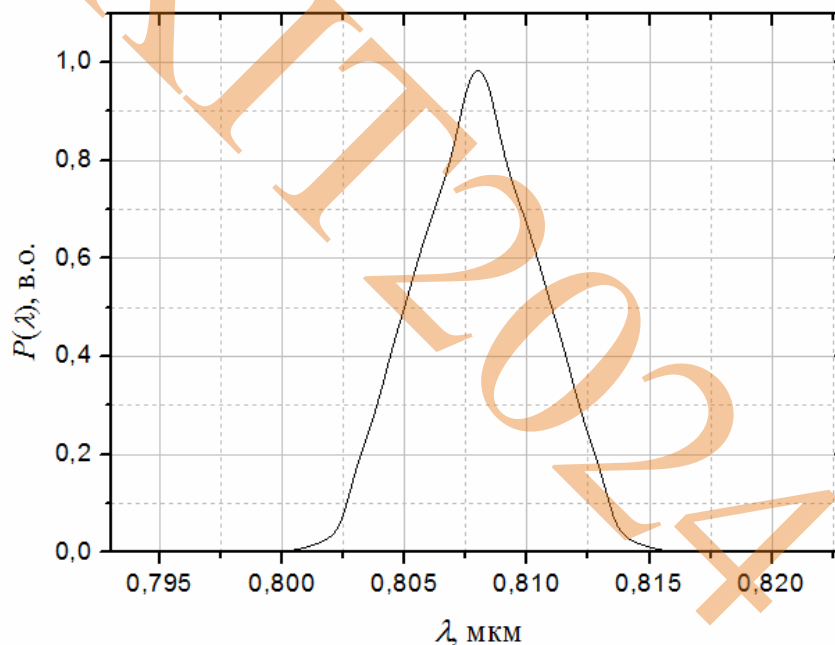


Рисунок 4.1 – Спектральна характеристика світлодіода SFH485P [18]

Вибране джерело випромінювання має високі технічні експлуатаційні параметри (табл. 4.1): середня інтегральна потужність випромінювання не менша за 50 мВт, діаметр вихідного оптичного променя біля 0,25 мм, простота керування вихідною потужністю шляхом зміни робочої сили струму світлодіода.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Таблиця 4.1 – Експлуатаційні характеристики світлодіода SFH485P [18]

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

У якості приймача випромінювання інтерференційної картини використано сучасний фотодіод OPT101 фірми Texas Instruments.. Його спектральний діапазон чутливості значно ширший у порівнянні з випромінювальною здатністю використаного світлодіода (рис. 4.1). Порівняння цих характеристик показує відмінну узгодженість робочого спектрального діапазону даних двох приладів. Тому при виборі фотодіод OPT101 у першу чергу бралися до уваги його висока чутливість (більша 0,5 А/Вт) та стабільність параметрів. Дуже важливими є також конструктивні особливості такого фотодіода, які забезпечують великий кут зору, надійність його стикування з оптичним волокном та механічну стабільність тривалої роботи всього оптичного тракту.

Вибраний тип фотоприймачів призначений для сучасних систем передачі інформації оптичними каналами зв'язку промислового стандарту. Базові експлуатаційні параметри цих приладів наведені в табл. 4.2, а спектральна характеристика – на рис. 4.2.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Таблиця 4.2 – Робочі параметри фотоприймачів HFBR-2521 [19]

Параметр та одиниця його вимірювання	Значення
Температура експлуатації, °C	Від -40 до 85
Напруга живлення V_{cc} , В	Від 1 до 6
Сила струму вихідного сигналу, мА	25
Напруга вихідного сигналу, В	Від 0,5 до V_{cc}
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

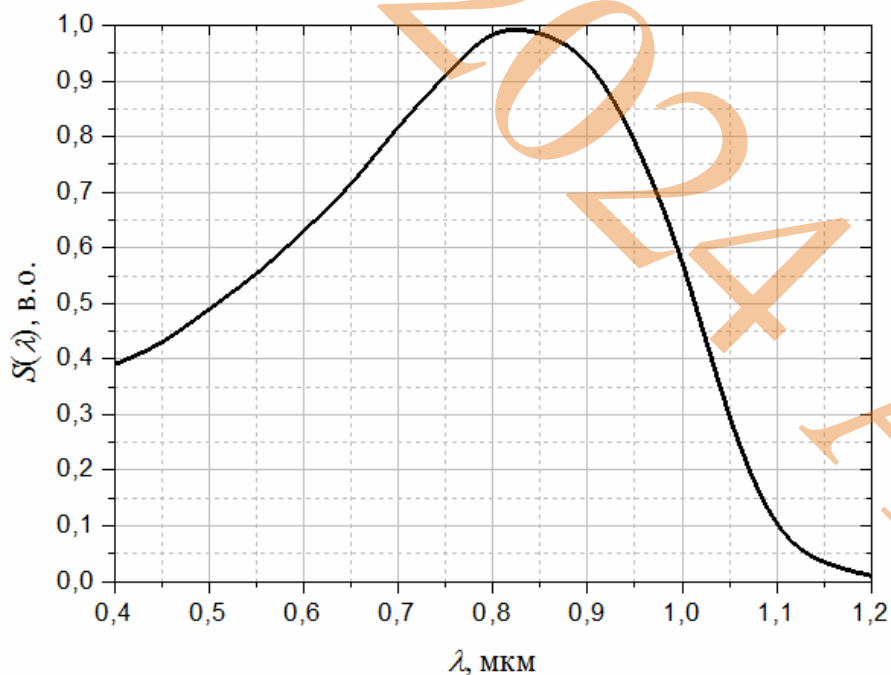


Рисунок 4.2 – Спектральна характеристика фотоприймача [19]

Аналізуючи наведені вище дані, бачимо, що обраний фотоприймач має максимальну чутливість у ближньому оптичному інфрачервоному діапазоні в інтервалі довжин хвиль від 700 до 850 нм. Саме в цьому оптичному діапазоні більшість сучасних фоторезистивів мають високе оптичне пропускання. Крім того, проектування інформаційного оптичного каналу на інфрачервоний діапазон суттєво спрощує його захист від зовнішніх оптичних завад та власних шумів видимого діапазону світла.

Розрахуємо величину потужності оптичного сигналу, яку може надійно реєструвати вибраний фотоприймач. Згідно з даними табл. 4.2, мінімальна вхідна потужність оптичного сигналу на фотоприймачі складає 8 мкВт. Для оптимальних умов реєстрації середнього за рівнем сигналу візьмемо розрахункову оптичну потужність у 10 раз більшу, що складатиме величину біля 100 мкВт. Таке значення потужності бралось при розрахунках щодо вибору джерела зондуючого випромінювання.

При розрахунках також враховувалися втрати оптичного сигналу по всьому оптичному тракті. Вони складаються із таких складових:

- втрат на оптичному модулі з'єднання фотоприймача з волокном, які можна оцінити на рівні 50 %;
- втрат у модулі формування інтерференційної картини, які можуть бути більші 90 %;
- втрат в оптичному Y-розгалужувачі на рівні 30 %;
- інших додаткових втрат в оптичному тракті, які оцінимо на рівні 50 %.

Інтегруючи перераховані вище складові, можна отримати сумарні втрати оптичної потужності в оптичному тракті як добуток всіх вказаних вище величин. Тоді прості арифметичні підрахунки дають необхідний кінцевий результат: оптична потужність джерела оптичного випромінювання повинна бути приблизно у 120 раз більшою від потужності на фотоприймачі 100 мкВт. Таким чином, джерело зондуючого оптичного випромінювання повинне мати вихідну оптичну

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

потужність не менше 10 мВт. Співставлення цих даних із параметрами табл. 4.1 показує, що світлодіод SFH485P забезпечує таку потужність із певним запасом.

4.2 Компоненти оптичного тракту

Важливими для стабільної роботи пристрою є і параметри оптичних волокон оптичного тракту. Наші експерименти з різними типами волокон показали, що оптимальним набором оптичних та конструкційних параметрів володіють багатомодові кварцові волокна фірми FinMark типу PS001MM PVC [20]. Вони мають діаметр серцевини $d_c = 0,1$ мм та дуже малі втрати потужності випромінювання - менші 3,0 дБ/км у спектральному діапазоні біля 810 нм, що оптимально узгоджується зі спектральними характеристиками світлодіода та фотодіода.

У-розгалужувачем моделі використаний готовий пристрій OPTOKON SFT-P, конструкція якого дозволяє легко приєднувати до його входів-виходів оптичні волокна. За своїм конструктивним виконанням розгалужувач зі свого вхідного плече передає оптичне випромінювання на досліджуваний зразок через свою основу з мінімальними втратами (рис. 4.3).

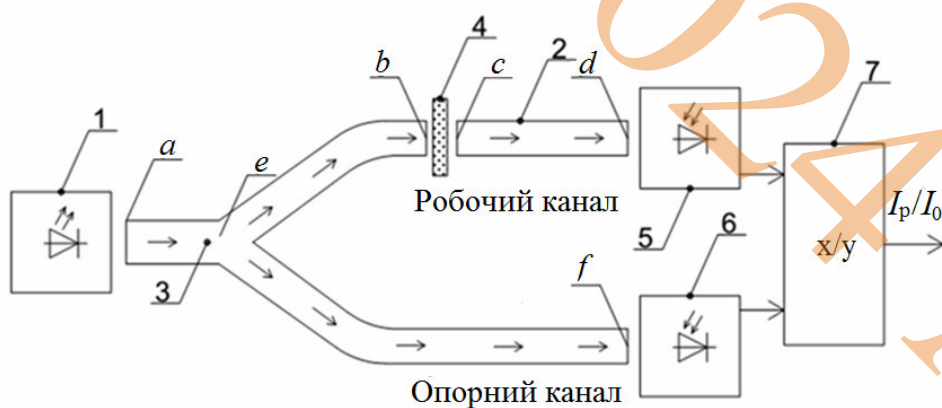


Рисунок 4.3 – Перерозподіл інтенсивності оптичних потоків у Y-розгалужувачі

Однак при переході з основи до вихідного плеча в точці a Y-розгалужувача інтенсивність інтерференції когерентних променів I розділюється на два потоки з коефіцієнтом поділу y . У результаті до вихідного плеча передається інтенсивність інтерференції $I \cdot y$, а інтенсивність $I \cdot (1 - y)$ передається у вхідне плече й втрачається. Для отримання максимального значення вихідного інформаційного сигналу слід вибирати модифікацію Y-розгалужувача з великим значенням коефіцієнта поділу y . Зокрема, у дослідній проектній моделі застосовано пристрій з величиною $y = 0,8$.

При аналізі балансу енергій у різних частинах Y-розгалужувача слід також прийняти до уваги, що середній коефіцієнт сумарних оптичних втрат у сучасних оптичних розгалужувачах відповідає величинам біля 0,5 дБ [21]. Тоді, інтенсивність променя інтерференції на виході розгалужувача можна оцінити як

$$I_{out} = I \cdot y \cdot 10^{-0,05} \approx 0,7 \cdot I.$$

Таким чином, більша частина інформаційного оптичного сигналу Y-розгалужувачем передається на його вихід для реєстрації фотоприймачем.

Стикування оптичних волокон із іншими оптичними компонентами діючої моделі здійснювалося за допомогою стандартних конекторів OPTOKON BFA-PC-Z-2, які широко використовуються в сучасних опто-волоконних мережах. З метою збільшення величини введенного світлового потоку від світлодіода до оптичного волокна у конекторах було використано також стандартні фокони (рис. 4.4). Це дозволяє збільшувати ефективність вводу потужності світла в оптичне волокно в k разів (коефіцієнт k також називають коефіцієнтом ефективності фокона).

Проведені експериментальні вимірювання показали, що використані фокони мають коефіцієнт $k \approx 3,9$. Це дозволяє вводити в оптоволоконний тракт біля 60 % потужності оптичного випромінювання світлодіода. Аналогічний конектор використовувався й для монтування в механічний маніпулятор досліджуваного зразка для занурення його у травний розчин.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

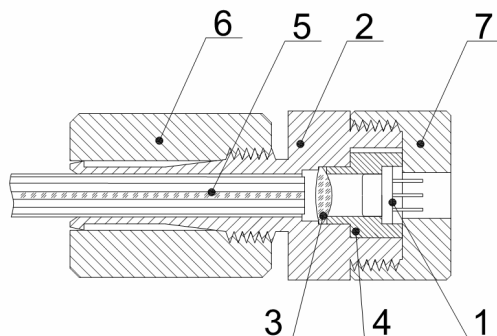


Рисунок 4.4 – Конструкція використаного конектора з фоконом: 1 - світлодіод; 2 – основа конектора; 3 – лінза фокона; 4 – тримач фокона; 5 - оптичне волокно; 6 та 7 – фіксатори конектора

4.3 Модуль мікроконтролера

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

Оскільки у нас нема практичної необхідності проводити складні математичні розрахунки, а САК є досить простою з технічної точки зору, то доцільно застосувати відносно простий із таких модулів.

Для можливості застосування широкого набору готових програм відкритого доступу використаємо модуль Arduino Uno R3. Основні характеристики даного модуля наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Основні експлуатаційні параметри модуля МК Arduino Uno R3 [22]

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

Продовження табл. 4.3

Параметр, одиниця вимірювання	Величина
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 електричних комутацій та призначення різних функціональних входів та виходів модуля Arduino Uno R3 наведено у додатку А

4.4 LED дисплей для відображення інформації

Для відображення всієї поточної інформації про стан технологічного процесу травлення та параметри функціонування пристрою використано символьний дисплей моделі WH1602C. Керування потоком цифрових даних здійснюється у дисплеї через 8-ми бітову шину паралельного порту. Загальний вигляд та експлуатаційні характеристики вибраного приладу наведено на рисунку 4.3. Дисплей WH1602C дозволяє надавати текучу інформацію оператору у вигляді двох рядків символів по 16 знаків у кожному.

Для створення інформаційного інтерфейсу даного дисплею з мінімальною кількістю ліній, достатньо під'єднати 4 його цифрові входи до вихідних пінів керуючого МК. Оскільки на дисплеї спроектованої моделі пристрою має неперервно відображатися незначна кількість параметрів, то запропонована інформаційна шина є достатньою для обслуговування всієї САК процесом хімічного травлення. Призначення базових виводів дисплея для організації інформаційного інтерфейсу наведено в таблиці 4.4.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47



Pin NO.	Symbol	Function
1	V _{SS}	GND
2	V _{DD}	+3V or +5V
3	V _O	Contrast Adjustment
4	RS	H/L Register select signal
5	R/ $\overline{W}$	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/V _{EE}	4.2V for LED (R _A =0Ω) / Negative Voltage output
16	K	Power supply for B/L (0V)

48

Як слідує із останньої наведеної таблиці керування процесом виведення інформації на дисплей WH1602C здійснюється сигналами RS (register select signal) та R/W (read/write signal). Полегшує організацію роботи дисплея з даним вбудована бібліотека LiquidCrystal комп'ютерного програмного середовища Arduino IDE. Дана бібліотека містить окремі програмні блоки з необхідним набором базових команд та функцій, які забезпечують активну взаємодію МК з дисплеєм.

Для підключення дисплея WH1602C до модуля МК Arduino використаємо 8-ми бітовий цифровий паралельний порт. Чотири із цих бітів переносять інформацію від МК до дисплея, два інформаційні біти забезпечують передачу керуючих сигналів RS та R/W, а два інші – для передачі сигналів синхронізації від дисплея до МК. Живлення електричною енергією +5 В дисплея забезпечимо від блоку живлення всієї САК. Також відмітимо, що передбачено налаштування контрасту екрану дисплея змінним резистором, який змінює рівень напруги V_0 , яка подається на відповідний пін регулювання контрасту світлодіодних символів дисплея.

4.5 Блок живлення

Для живлення моделі використано спеціальний електричний блок, який містив три незалежні канали живлення стабілізованою напругою:

- +12 В для живлення світлодіода;
- +5 В для живлення фотодіода;
- +9 В для живлення САК та інших компонентів пристрою.

Відповідно з проведеним вище аналізом та вибором основних електронних компонент для живлення САК автоматичного пристрою оптимальним є джерело постійного електричного струму із стабільною електрорушійною силою $E = +9$ В. Підрахуємо базову вихідну потужність, яку має забезпечувати таке джерело. Основними споживачами його електричної енергії є малопотужні компоненти, такі як модуль МК, світлодіодний дисплей та інші. Усі такі пристрої мають

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

споживану сумарну потужність на рівні кількох десятків міліват. Однак, враховуючи необхідність підключення до моделі пристрою додаткових інформаційних та виконуючих електронних і електричних пристроїв, блок живлення даного каналу взято із запасом по потужності до 15 Вт. Це відповідає сумарному вихідному струму силою біля 1,5 А. Із даного каналу окремо організовано додаткова лінія зі стабілізованою ЕРС = +5 В для організації електронної схеми живлення фотоприймача.

Канал живлення світлодіода має вихідну ЕРС +12 В, яка подається на його спеціальний електронний блок. Останній забезпечує керування силою стабілізованого струму, який протікає через світлодіод, а, відповідно, регулює вихідну інтенсивність його випромінювання. Оскільки максимальна сила струму даного каналу живлення складає біля 2 А, то блок ЕРС +12 В мав вихідну потужність 50 Вт.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ХІМІЧНОГО ТРАВЛЕННЯ ФОТОРЕЗИСТІВ

5.1 Матеріали для дослідження та порядок їх проведення

Технологічний процес досліджень процесу травлення складається з кількох етапів. Після налагодження дослідної кювети для травлення і досліджуваного зразка проводиться юстування оптичної системи. Потім до кювети подається хімічний травник. Одночасно запускається та частина блоку керування, яка проводить безпосередні вимірювання. У такому разі електричний сигнал від фотоприймача надходить до модуля МК. Використовуючи дані свого внутрішнього годинника, МК відслідковує моменти проходження максимумів інтенсивності інтерференції та засікає інтервали часу між такими двома послідовними подіями. Таких інформаційних даних МК достатньо для проведення розрахунків швидкості хімічного травлення досліджуваного зразка тонких плівок.

Інформація про всі процеси функціонування вимірювального пристрою та САК виводиться на дисплей комп'ютера, який під'єднаний до модуля МК. Даний комп'ютер одночасно використовується і для компіляції керуючої програми в пам'ять МК.

Об'єктом експериментальних досліджень вибрано тонкі плівки із халькогенідного напівпровідника As_2S_3 , які були нанесені методом вакуумного термічного напилення на поліровану підкладку із кварцового скла. Дані плівки є перспективними для застосувань в якості сучасних фоторезистів. Товщина вихідних плівок для досліджень фіксувалася біля 1 мкм.

Швидкість хімічного травлення тонких плівок вимірювалася із використанням водного розчину карбонату натрію, який вважається оптимальним травником для плівок As_2S_3 [8]. Травник під час експериментальних вимірювань постійно переміщувався магнітною мішалкою, а його температура підтримувалася постійною біля величини 40°.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Для проведення експериментальних вимірювань підкладка з досліджуваною плівкою розміщувалася у ванночці для хімічного травника. Для цього було використано простий механічний маніпулятор, за допомогою якого підкладка з тонкою плівкою плавно вводилася у хімічний травник на глибину біля 0,2 мм. Така геометрія при одночасному застосуванні магнітної мішалки забезпечувала природне видалення продуктів травлення від поверхні плівки.

Після розміщення поверхні плівки у травнику розпочиналася реєстрація інтенсивності інтерференційної картини. На одній і тій же плівці дослідження змін відповідної інтерференційної картини під час процесу хімічного травлення проводилися кілька разів. Для кожного проведеного дослідження визначалися моменти часу досягнення інтенсивністю інтерференції своїх екстремальних значень. Для цих часових моментів також розраховувалась товщина тонкої плівки, яка залишалась ще не розчиненою. За отриманими результатами розраховувалась швидкість травлення на різних часових інтервалах проведення технологічного процесу. Експериментальні результати оброблялися статистичними методами. Таким чином із набору отриманих експериментальних результатів розраховувались середні значення швидкостей травлення тонкої плівки та відносні похибки їх вимірювань.

5.2 Результати експериментальних досліджень та їх аналіз

Під час проведення вимірювань товщина тонкої плівки в будь-який момент часу є невідомою. Тому експериментально зміни інтенсивності інтерференційної картини $I(h)$ реєструвалися у вигляді функції часу $I(t)$. У результаті проведення циклів із 4 – 5 експериментальних досліджень одного і того ж зразка для нього отримувався набір функцій $I(t)$. Зокрема, на рис. 5.1 наведено типовий графік функції $I(t)$ для процесу травлення плівки As_2S_3 товщиною біля 2 мкм у 10 % водному розчині Na_2CO_3 при температурі біля 40° (при менших температурах процес розчинення протікає значно повільніше [8]).

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

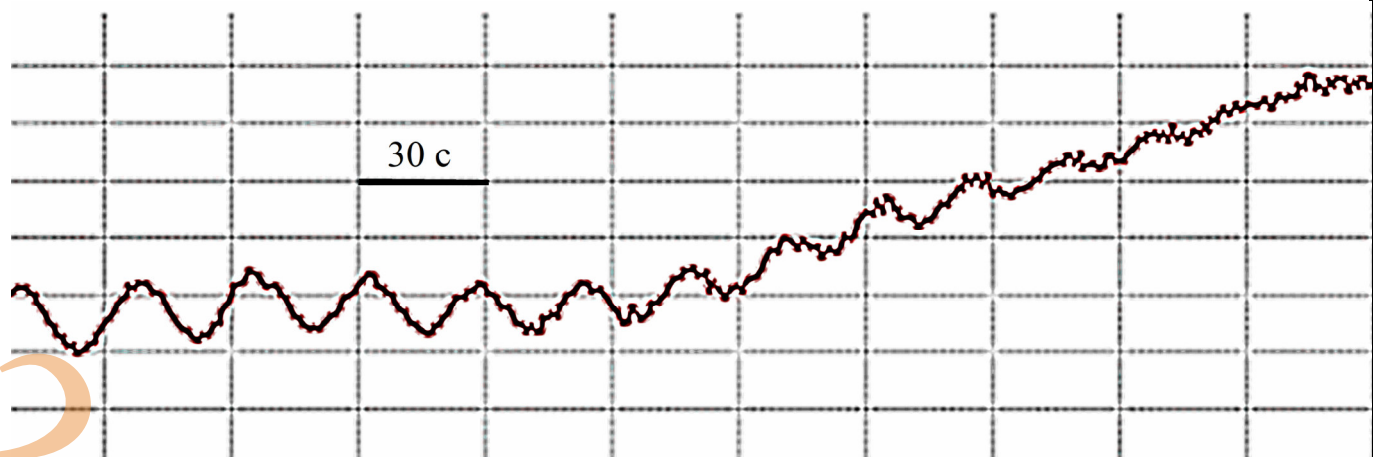


Рисунок 5.1 – Приклад експериментальної функції $I(t)$ зміни інтенсивності інтерференційної картини при травленні фоторезисту As_2S_3

З отриманих графіків визначалися моменти часу t_i досягнення функцією $I(t)$ своїх i -их екстремумів. Початком відліку часу вибрано момент наближення інтенсивності інтерференції до першого максимуму. Результати обрахунків наведено в табл. 5.1. У цій же таблиці наведено інтервали часу Δt_i , протягом яких інтенсивність $I(t)$ змінювалася від одного свого i -го екстремуму до наступного.

Таблиця 5.1 – Часові параметри динаміки зміни інтенсивності інтерференційної картини під час травлення тонкої плівки As_2S_3 .

Тип екстремуму та його порядковий номер	t_i , с	Δt_i , с
max1	2,5	
min1	15,7	13,2
max2	29,6	13,9
min2	43,4	13,8
max3	56,0	12,8
min3	69,9	13,7
max4	83,4	13,5
min4	96,7	13,3
max5	110,2	13,5

Продовження табл. 5,1

Тип екстремуму та його порядковий номер	t_i , с	Δt_i , с
min5	123,5	13,3
max6	136,2	12,7
min6	149,1	12,9
max7	161,9	12,8
min7	174,5	12,6
max8	186,8	12,3
min8	199,4	12,5
max9	211,5	12,1
min9	223,5	12,0

Статистична обробка отриманих кількісних даних дала середній інтервал часу змін інтерференційної картини між найближчими сусідніми екстремумами $\Delta t_c = 13,1$ с.

Зрозуміло, що автоматизація процесу проведення експериментальних вимірювань вимагає вибору оптимальних методів їх технічної реалізації. Такі методи забезпечують оптимальний набір технологічних операцій, кожна з яких підлягає легкому виконанню, контролю та регулюванню сучасними технічними засобами. З цієї точки зору перспективність інтерференційного методу для автоматичних вимірювань швидкості травлення показана в роботі [8]. Однак, з точки зору підвищення надійності, точності та спрощення автоматизації процесу вимірювань оптимальною є інша оптична схема проведення вимірювань, яка й використана в цій роботі. Вона полягає в перпендикулярному падінні зондуєчого оптичного випромінювання на досліджуваний зразок із використанням в якості всього оптичного тракту оптичних волокон. Проведені експериментальні дослідження з використанням даної оптичної схеми показали, що вона має такі переваги:

- значно спрощує процес юстування оптичного тракту;

- запобігає впливу на результати вимірювань завад від зовнішнього середовища;
- полегшує та прискорює процес підготовки до проведення вимірювань;
- робить більш простою техніку автоматизації вимірювань.

Наведені особливості свідчать, що запропонована оптична схема забезпечує реальну можливість повної автоматизації вимірювань швидкості хімічного травлення тонких плівок для тих речовин, які мають достатнє пропускання у певному оптичному спектральному діапазоні..

Відповідно з рис. 5.1, отримані експериментальні функції $I(t)$ проявляють чітку традиційну форму змін інтерференційної картини при зміні товщини тонких плівок. Це свідчить про те, що інтерференційні методи є адекватними для експериментальних досліджень динаміки хімічного травлення різних шарів. При цьому виявлено, що вплив хімічного травника на інтерференційну картину проявляється лише у певному зменшенні інтенсивності вихідного сигналу. Така поведінка зумовлена зміною умов відбивання зондуючого оптичного випромінювання на поверхні плівки – до травлення це межа поділу плівка-повітря, а при травленні це межа поділу плівка-травник. При цьому при зміні хімічного складу травника початковий вихідний сигнал змінюється в різній ступені. Однак виявлені експериментально зміни у проведених експериментах не перевищують 15 % від початкового вихідного сигналу без травника.

Таким чином, фізично та математично інтерференційний метод вимірювання швидкості травлення є досить простим. Для цього достатньо лише надійно фіксувати інтервали часу Δt , протягом якого інтенсивність $I(h)$ змінилася від одного свого екстремуму до наступного. При цьому, звичайно, також слід знати точне значення показника заломлення тонкої плівки. Отже, якщо експериментально виміряно інтервал часу Δt , який відповідає зміні товщини плівки на величину $\Delta h = \lambda/(4n)$, то середня швидкість травлення протягом цього інтервалу часу буде рівна

$$v = \Delta h / \Delta t = \lambda / (4n \cdot \Delta t).$$

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Графік функцій $I(t)$ проявляє плавний хід з невеликим рівнем шумів сигналу на рівні кількох відсотків від його середньої інтенсивності. У результаті екстремуми функцій $I(t)$ виявляються чітко і легко ідентифікуються, що спрощує розробку алгоритму функціонування системи автоматизації досліджень хімічного травлення. Такий алгоритм має фіксувати моменти часу послідовного проходження екстремумів інтенсивності $I(t)$ і трансформувати їх у зміни товщини плівки, а, відповідно, вимірювати швидкість її травлення. При цьому у САК доцільно ввести модуль, який буде усереднювати значення $I(t)$ за певний вибраний інтервал часу. Це дозволить суттєво зменшити рівень «шумів» цієї функції і, відповідно, підвищить рівень надійності ідентифікації її екстремумів.

Аналіз отриманих експериментальних результатів також показує, що при різних циклах вимірювань інтенсивності $I(t)$ незначною мірою відрізняються одна від одної загальною формою. Однак при рівномірності процесу травлення для певного зразка положення їхніх відповідних екстремумів є досить близькі. Зокрема, для досліджених нами тонких плівок As_2S_3 отримано середнє значення $\Delta t_c = 13,1$ с з відносною похибкою біля 7 % (табл. 5.1). Враховуючи показник заломлення досліджуваної плівки $n = 2,35$ та довжину хвилі зонduючого випромінювання $\lambda = 880$ нм, розраховано її середню швидкість травлення $v = 7,1$ нм/с. Отримане значення добре корелює з результатами досліджень [8]. Оскільки величини n та λ визначені із значно меншою похибкою, то для вимірювань швидкості травлення буде характерна теж відносна похибка біля 8 %. Відповідно, абсолютна похибка вимірювань швидкості травлення тонких плівок запропонованим методом не буде перевищувати значення $\pm 0,5$ нм/с. Дану похибку можна суттєво зменшити шляхом оптимізації умов проведення експериментальних вимірювань, зокрема, збільшенням інтенсивності зонduючого випромінювання та зменшенням власних шумів каналу реєстрації інтенсивності інтерференційної картини.

Слід також відмітити, що на кінцевому етапі травлення виділення точок положення екстремуми функції $I(t)$ суттєво ускладнюється, оскільки чіткість прояву самих екстремумів сильно розмивається (рис. 5.1). Тому точний контроль

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

процесу закінчення хімічного травлення тонких плівок інтерференційним методом стає утрудненим. За експериментальними результатами рис.5.1 це відповідає кінцевим товщинам досліджуваного зразка, меншим 500 нм. Відповідно, для отримання надійних результатів запропонований метод примінимий лише для тонких плівок, початкова товщина яких більша 0,5 мкм.

Враховуючи результати експериментальних досліджень, можна зробити висновок, що спроектована модель пристрою для автоматичного контролю швидкості травлення тонких плівок має хороші експлуатаційні параметри. Тому доцільно розробити для неї принципову електричну схему та алгоритм функціонування САК на базі сучасного модуля МК.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

6 ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ МОДЕЛІ ПРИБОРУ

На основі результатів проведених експериментальних досліджень також спроектовано електричну принципову схему моделі пристрою, яка наведена в додатку до кваліфікаційної роботи. На даній схемі для контролю роботи джерела випромінювання використано два незалежні інформаційні канали:

- електричний, який вимірює силу струму від джерела живлення світлодіода;
- оптично-електричний, який контролює наявність оптичного випромінювання необхідної інтенсивності на виході світлодіода.

Перший канал організований на одному із пінів аналогового порту МК. Сигнал даного каналу формується струмом живлення світлодіода, який протікає через баластний резистор номіналом 1 Ом і створює на ньому відповідний спад напруги.

Другий канал побудований ще на одному пині аналогового порту МК. Електричний сигнал на цей вхід поступає від вбудованого в модуль світлодіода фотоприймача. Рівень даного сигналу прямо пропорційний інтенсивності світлового потоку, який надходить на фотоприймач від внутрішнього розподільвача оптичного променя. Якщо рівень цього сигналу буде нижче заданого значення, то САК робить висновок про наявність помилок або в електричному каналі роботи джерела живлення, або в юстуванні оптичного тракту моделі пристрою.

Для ефективного керування інтенсивністю світлового променя джерела випромінювання, напруга живлення на світлодіод подається через оптопару. Відповідний керуючий сигнал, який задає силу струму живлення світлодіода необхідного рівня, подається на оптопару від виходу одного з ЦАП МК. Для оптимального функціонування каналу живлення світлодіода він попередньо налаштовується у процесі початкової інсталяції програми керування МК. Для

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

цього визначаються дві цифрові комбінації, які відповідають мінімальній та максимальній силі струму живлення світлодіода. Одночасно задаються й рівні електричного сигналу контрольного вбудованого фотоприймача, які відповідають цим двом граничним режимам живлення світлодіода. У послідовному процес керування інтенсивністю випромінювання світлодіода проводиться зміною цифрових комбінацій інтенсивності у встановлених межах. При цьому перевіряється відповідність конкретної текучої цифрової комбінації з величиною сигналу на контрольному фотоприймачі.

Інформаційний сигнал про інтенсивність інтерференційної картини формується на елементах електричної схеми роботи реєструючого фотодіода. Даний сигнал подається на відповідний пін порту АЦП МК. Отриманий сигнал приймається МК та передається на комп'ютер для послідовної обробки.

У використаного в САК МК лишаються вільні цифрові та аналогові піни для задіяння додаткових каналів автоматичного керування процесом хімічного травлення. Це може бути контроль рівня травника, його температура, чистота травника та інше.

Для відображення інформації про роботу пристрою для оператора організовано окремий інформаційний канал взаємодії МК з матричним світлодіодним дисплеєм. Такий взаємозв'язок створений на основі повного 8-бітного цифрового порту DA МК.

Електричне живлення на модуль МК керування подається від блоку стабілізованої напруги +9 В. Вона подається на вхід VIN МК та на силову частину буферної оптопари. Стабільні напруги +5 В, необхідні для живлення інших елементів САК відводиться від спеціального пину VCC МК.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

7 АЛГОРИТМ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЄМ

Перед включенням пристрою слід провести всі підготовчі роботи:

- підготувати кювету для хімічного травлення;
- заповнити кювету травним розчином;
- підготувати та розмістити зверху кювети маніпулятор із досліджуваним зразком;
- включити оптичний канал проведення вимірювань та провести юстування всієї оптичної схеми;
- отримати стабільний електричний сигнал від інтерференції на вході фотоприймача.

Завершивши всі підготовчі роботи можна запускати виконання своєї програми САК.

Виконання САК своїх функцій щодо вимірювання та контролю швидкості хімічного травлення тонких плівок інтерференційним методом містить кілька послідовних взаємозв'язаних етапів. При проведенні кожного з них є певні особливості функціонування САК. Тому алгоритм роботи даної системи доцільно розділити на кілька окремих логічних блоків (див. додаток документації до роботи).

7.1 Логічний блок базової перевірки компонент пристрою

Перший блок алгоритму відповідає процесу завантаження скомпільованої програми керування в операційну пам'ять МК. При цьому одночасно розпочинається перевірки готовності основних компонент всього пристрою до роботи. Тому даний блок передбачає по чергові виконання САК таких окремих кроків.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

1. Перевірка готовності світлодіода до проведення досліджень. Для цього МК подає на фотоприймач оптимальну напругу живлення та перевіряє наявність від нього фонового електричного сигналу. Цей крок алгоритму оформляється у вигляді окремої підпрограми МК. При відсутності від фотоприймача фонового сигналу, підпрограма видає на дисплей САК відповідне повідомлення оператору.

2. Електричне живлення подається на світлодіод і МК встановлює мінімальну допустиму величину сили струму його живлення. Після цього САК зчитує електричний сигнал із вбудованого у світлодіод фотоприймача. Якщо сигнал відсутній, то МК робить три послідовні кроки підвищення сили струму живлення світлодіода від мінімального до середнього оптимального рівня. На кожному кроці підвищення величини силу струму перевіряється наявність сигналу на вбудованому фотоприймачі та відповідність величини даного сигналу силі струму живлення. Даний етап алгоритму програмно також оформляється окремою підпрограмою.

3. За результатами виконання другого кроку МК приймає одне з трьох рішень:

- якщо сигнал так і не з'явився, то МК видає на дисплей нове повідомлення оператору про помилки в роботі світлодіода і припиняє виконання своєї програми;

- якщо сигнал на вбудованому фотоприймачі з'явився, але його рівень не відповідає силі струму живлення світлодіода, то МК видає відповідне повідомлення на дисплей і переходить у режим очікування (режим очікування триває до тих пір, поки МК не отримає команду оператора на продовження роботи – у цьому випадку оператор має провести всі необхідні налаштування світлодіода та його перевірконого каналу й подати МК необхідний сигнал);

- якщо ж величина сигналу відповідає діапазону оптимальних струмів живлення світлодіода, то МК переходить до виконання наступного логічного блоку алгоритму.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

7.2 Блок перевірки рівня інтенсивності інтерференційної картини

Якщо рівень інтенсивності випромінювання в оптичному тракті від світлодіода є достатнім для початку проведення вимірювань, то МК зчитує сигнал із фотоприймача вихідної інтерференційної картини. За отриманими результатами МК виконує одну із таких гілок алгоритму:

- якщо інформаційний сигнал від фотоприймача відсутній, то МК видає на дисплей повідомлення оператору про помилки в роботі оптичного тракту або фотоприймача і переходить у режим очікування, який триває до тих пір, поки оператор не виправить виниклу помилку і не відновить виконання програми своєю командою;

- сигнал від фотоприймача наявний, але рівень фіксованої інтенсивності інтерференційної картини є недостатнім для проведення надійних вимірювань. Тоді МК піднімає покроково інтенсивність зондуючого оптичного випромінювання в оптичному тракті в дозволені програмою межі. Якщо такі дії забезпечують появу необхідного рівня сигналу інтенсивності інтерференційної картини, то МК автоматично переходить до виконання наступного логічного блоку алгоритму. Якщо ж потрібний рівень сигналу від фотоприймача так і не отримано, то МК передає нове повідомлення оператору про необхідність додаткового юстування оптичної системи пристрою. Після цього МК знову переходить у режим очікування до отримання необхідної команди від оператора.

- якщо рівень електричного сигналу від фотоприймача відповідає необхідній величині, то МК виводить на дисплей оператору повідомлення про готовність до виконання вимірів і переходить у наступний режим очікування. Отримавши таке повідомлення, оператор завершує всі підготовчі дії та заливає до необхідного рівня травний розчин у кювету із досліджуваним зразком. Після цього оператор подає команду МК, яка дозволяє почати процес проведення вимірювань. Отримавши дану команду, МК розпочинає виконувати наступний блок алгоритму своєї програми.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

7.3 Блок фіксації моменту проходження першого екстремуму інтерференційної функції

Необхідність даної частини алгоритму обумовлена тим, що в початковий момент вимірювань на фотоприймачі фіксується інтенсивність невизначеної ділянки інтерференційної картини. За розробленою ж методикою інформація про товщину тонкої плівки міститься лише в тих моментах, коли інтенсивність інтерференції проходить через мінімум або через максимум. Тому МК спочатку повинен зафіксувати той стартовий момент часу, під час якого на фотоприймач буде спрямований черговий мінімум чи максимум інтенсивності. Даний блок алгоритму й описує таку процедуру.

Для здійснення описаної операції МК періодично проводить вимірювання інтенсивності оптичного випромінювання на фотоприймачі. Період T таких почергових вимірів має бути достатньо великим, щоб протягом даного інтервалу достатньо зменшилася товщина досліджуваної плівки. У такому разі відбудуться й помітні зміни інтенсивності інтерференції на фотоприймачі. З іншої сторони, період T не повинен зменшувати «роздільну» здатність процесу вимірювань. Оскільки швидкості травлення різних тонких плівок можуть суттєво відрізнятись, то період T слід задавати для МК з урахуванням відмічених вище обставин. Для цього доцільно провести попередніх пробні вимірювання на вибраному об'єкті досліджень для оцінки величини періоду T . Тому цей параметр у програмі виступатиме як певна константа, яка вводиться в МК оператором перед початком чергового сеансу роботи з автоматичним пристроєм вимірювань швидкості травлення.

Для зменшення впливу «шумів» інтенсивності інтерференційної картини на результати проведення вимірювань в алгоритм введено окрему процедуру «згладжування» текучих вимірів. Така процедура забезпечуватиме вимірювання інтенсивності інтерференційної картини в кожній «точці» N разів із послідовним усередненням такого набору даних. Інтервал між окремими такими вимірами слід вибирати на межі інерційності фотоприймача з урахуванням швидкодії МК.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Розроблена процедура згладжування експериментальних даних у вигляді алгоритму міститиме наступні послідовні логічні кроки.

1. Цикл із N вимірювань інтенсивності інтерференції $I(t)$ та отримання усередненого результату I . Запис середнього результату в окремий регістр та виведення на дисплей МК для оператора.

2. Проведення циклу операцій за пунктом 1 через інтервал часу T для визначення наступної текучої інтенсивності інтерференції I_n . Розрахунок різниці $\Delta = I_n - I$.

3. Аналіз отриманої величини Δ , за результатом якого можлива одна із таких ситуацій:

- Δ у межах заданого програмою довірчого інтервалу менша або більша нуля, що означає, що інтенсивність інтерференції в даний момент зростає або йде на спад і тоді МК переходить на виконання наступного блоку алгоритму;
- Δ у межах довірчого інтервалу дорівнює нулеві.

У випадку першої ситуації в регістр записується нове текуче значення інтенсивності $I = I_n$, після чого знову повторюються кроки 2 і 3.

У випадку другої ситуації процедурою виконується невеликий внутрішній цикл:

- вихідне нульове значення параметра P збільшується на одиницю;
- у регістр записується нове отримане значення інтенсивності $I = I_n$;
- алгоритм повертає виконання підпрограми до кроку 2 з послідуочим переходом до кроку 3.

Описані кроки внутрішнього циклу підпрограми повторюються до тих пір, поки розрахована величина Δ не вийде за межі прийнятого для неї «нульового» діапазону. Такий перебіг алгоритму відповідає переходу МК до виконання наступного блоку алгоритму.

Слід відмітити, що в описаному перебігу подій можливим є виникнення ситуації, коли умова $\Delta \approx 0$ повторюватиметься протягом багатьох циклів вимірювань інтенсивності інтерференції. Тому в тіло підпрограми даного блоку алгоритму також вводяться оператори, які контролюватимуть кількість чергових

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

повторень умови $\Delta \approx 0$ в одній неперервній послідовності вимірювань. Якщо дана кількість перевищує встановлену величину, то МК видає відповідне повідомлення оператору. У протилежному випадку МК переходить до наступного блоку алгоритму і без будь-якої перерви продовжує проводити дискретні цикли вимірювань інтенсивності інтерференції із періодом T .

7.4 Блок визначення інтервалу часу проходження інтерференційної картини між сусідніми екстремумами

Основою функціонування цього блоку є текучий параметр P , величина якого отримана в попередньому блоці алгоритму. Вона задає кількість часових інтервалів середньою тривалістю T , протягом яких інтенсивність інтерференційної картини проходить гладке «плато» або «впадину» текучого екстремуму. Якщо параметр P відомий, то МК розраховує той момент часу, коли на фотоприймачі фіксується проходження чергового екстремуму інтенсивності інтерференційної картини

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

Орієнтуючись на дану розраховану величину, МК розпочинає свій цикл відліку кількості сеансів N проведених вимірювань інтенсивності інтерференційної картини, при яких виконується умова $\Delta \neq 0$ у наперед заданому діапазоні допустимих відхилень. Фізично це відповідає процесу змін інтенсивності інтерференційної картини від одного її екстремуму до наступного. У результаті виконання описаного циклу можна розрахувати величину інтервалу того часу τ , протягом якого товщина тонкої плівки змінюється настільки, що створює «зсув» інтерференційної картини від свого одного екстремуму до наступного. При цьому

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

Отримання набору величин τ і є метою виконання МК цього четвертого блоку алгоритму. Набір параметрів τ , отриманий у процесі експериментальних вимірювань, є основною базою даних для визначення швидкості травлення тонких

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

плівок. Після закінчення розрахунків кожного окремого значення τ у реєстрі встановлюється також нове початкове значення параметра $P = 1$. Така операція необхідна для виконання даного блоку алгоритму при переході до реєстрації наступного екстремуму.

7.5 Блок контролю процесу ходу інтерференційної функції через черговий екстремум

Дана частина алгоритму призначена для уточнення того часового моменту, коли інтерференційна функція досягає свого істинного чергового екстремуму. Оскільки швидкість травлення досліджуваного зразка може бути різною, то даний інтервал часу може змінюватися для різних екстремумів у значних межах. Для точного ж експериментального визначення змін товщини тонких плівок МК повинен досить строго фіксувати саме той момент часу, коли на фотоприймачі проходить «серединна» точка екстремуму інтерференції.

Початковим станом алгоритму програми МК при виконанні даного блоку є наявність у реєстрі пам'яті значення I попередньої точки інтерференційної картини, коли остання виходить на ділянку екстремуму.

У послідовному даний блок алгоритму передбачає дії МК у вигляді наступних послідовних логічних кроків.

1. Виконання введеної раніше процедури вимірювання інтенсивності інтерференції шляхом усереднення результатів кількох швидких вимірів та запис отриманої величини I_n в реєстр МК.

2. Розрахунок різниці отриманих інтенсивностей $\Delta = I_n - I$.

3. Аналіз розрахованої величини Δ , за яким можливі такі ситуації:

- Δ у межах заданого інтервалу рівна нулеві;
- Δ у межах довірчого інтервалу стає не рівним нулю, що означає, що інтенсивність інтерференційної картини починає зростати або йти на спад.

4. У першому випадку реалізується ситуація, коли точка вимірювань інтенсивності знаходиться в зоні плато або впадини відповідного екстремуму.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Тому логічно виконується невеликий внутрішній цикл підпрограми, який описаний раніше у другому блоці алгоритму.

У другому випадку виникає ситуація, коли зміна інтенсивності інтерференційної картини починає виходити із зони плато (або впадини) текучого екстремуму. У такому випадку підпрограма МК має знову перейти на виконання блоку-підпрограми визначення тривалості часу проходження інтенсивності інтерференційної картини від даного текучого до наступного екстремуму. Ця частина алгоритму також уже була описана раніше.

У описаному вище перебігу подій може виникнути й така ситуація, коли умова $\Delta \approx 0$ буде повторюватися на протязі багатьох циклів проведення експериментальних вимірювань інтенсивності. Тому в тіло даного блоку-підпрограми алгоритму вводяться також додаткові оператори, які контролюватимуть кількість чергових повторень умови $\Delta \approx 0$ в одній послідовності.

7.6 Блок розрахунку швидкості травлення тонких плівок

Цей блок алгоритму є заключним при функціонування САК. Він складається з кількох кроків.

1. За результатами виконання попередньої підпрограми МК визначає нову часову поправку, яка буде рівна:

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

2. МК розраховує час проходження інтенсивності інтерференції між двома екстремумами:

$$\tau_r = \tau + t_0.$$

3. МК рахує швидкість травлення досліджуваного зразка. При цьому використаємо отриману раніше умову появи екстремумів інтенсивності інтерференційної картини. У результаті отримаємо:

$$V = \lambda / (2 \cdot 2 \cdot \tau_r) = \lambda / (4 \cdot \tau_r).$$

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

4. МК видає на дисплей оператору отримане значення швидкості травлення для аналізу.

5. МК переходить до виконання алгоритму, починаючи з блоку-підпрограми визначення тривалості проходження інтенсивності інтерференційної картини між двома наступними екстремумами.

7.7 Блок завершення процесу вимірювань

Розроблений алгоритм передбачає циклічне автоматичне неперервне виконання програми пошуку екстремумів інтенсивності інтерференційної функції. Автоматичного припинення процесу вимірювань у даному алгоритмі не передбачено. Тому для закінчення функціонування даної програми має прийти відповідна команда оператора.

Для пошуку та створення алгоритму автоматичного закінчення вимірювань слід провести додаткові експериментальні дослідження поведінки інтенсивності випромінювання на фотоприймачі на кінцевій стадії процесу хімічного травлення тонких плівок. На основі таких досліджень можна буде створити фінішний блок алгоритму. Зокрема, це може бути алгоритм завершення програми за перериванням за певною умовою. Прикладом такої умови можна навести повторення якоїсь події вимірювань неперервно протягом багатьох циклів.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

ВИСНОВКИ

У результаті виконання магістерської роботи:

1. Проведено аналіз процесу хімічного травлення та проблем розробки автоматичних сучасних пристроїв вимірювання швидкості хімічного травлення тонких плівок. У результаті проведення аналізу визначено основні задачі, які необхідно розв'язати при виконанні кваліфікаційної роботи.

2. Критично проаналізовано існуючі сучасні методи та прилади автоматичного контролю технологічних процесів хімічного травлення різних матеріалів. Показано переваги та перспективу застосування для багатьох фоторезистивних матеріалів інтерференційного методу вимірювання параметрів процесу травлення.

3. Оптимізовано оптичну структурну схему інтерференційного методу автоматичного вимірювання швидкості травлення тонких плівок. Для цього вибрана найпростіша реалізація схеми при нормальному падінні оптичного зондуючого випромінювання. У якості елементів всього оптичного тракту схеми використано оптичні волокна.

4. Обґрунтовано технічну реалізацію системи автоматичного керування пристроїв вимірювання швидкості травлення тонких плівок та спроектовано структурну електричну схему такої системи.

5. Проаналізовано особливості застосування запропонованих оптичної та структурної схем при створенні моделі пристрою автоматичних досліджень процесів хімічного

6. Експериментально досліджено часову поведінку інтерференційної функції при хімічному травленні тонких плівок фоторезисту As_2S_3 . Отримані експериментальні результати показали перспективність застосування інтерференційного методу для створення систем автоматичного керування процесами хімічного травлення.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

7. Розроблена принципова електрична схема системи автоматичного керування пристроями вимірювання параметрів хімічного травлення тонких плівок. До даної схеми підібрані сучасні електронні компоненти.

8. Створено алгоритм роботи системи автоматичного керування на основі мікроконтролера. Даний алгоритм програми містить такі основні логічні модулі та блоки:

- підготовки початку вимірювань;
- перевірки та встановлення необхідного рівня інтенсивності інтерференційної картини;
- визначення початкового екстремуму інтерференційної функції;
- визначення тривалості проходження ділянок інтерференційної функції між двома сусідніми екстремумами;
- контролю моменту часу проходження інтерференційною функцією свого чергового екстремуму;
- кінцевого розрахунку швидкості травлення.

9. Експериментально оцінена абсолютна похибка автоматичних вимірювань швидкості хімічного травлення на рівні $\pm 0,5$ нм/с.

10. У напрямку розвитку даного дослідження можна проектувати пристрої автоматичного контролю та вимірювання параметрів хімічного травлення тонких плівок різних матеріалів, достатньо прозорих у певному оптичному діапазоні спектру. Такі пристрої дозволять:

- уніфікувати процес експериментальних вимірювань параметрів хімічного травлення для різних фоторезистів;
- підвищити зручність проведення процесів вимірювань;
- покращити інтерфейс двосторонньої взаємодії системи керування з оператором;
- фіксувати неперервну динаміку травлення різних тонких плівок у режимі реального часу.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Qualitech, 2016. Introduction to Chemical Etching. Available at: <https://www.qualitetch.com/introduction-chemical-etching/https://www.qualitetch.com/introduction-chemical-etching/>
2. Abiola Ayodele. Chemical Etching: A Comprehensive Guide to Processes, Applications, and Techniques. Wevolver, 2024. Available at: <https://www.wevolver.com/article/chemical-etch>.
3. A History of Etching and its place in Modern Manufacturing. Etching Technology, 2024. Available at: <https://www.etch-tech.co.uk/about/more-about-etching>.
4. Guo J., Yu B., Chen L. Nondestructive nanofabrication on Si(100) surface by tribochemistry-induced selective etching, Sci. Rep., 2015, №5, p. 16472.
5. Buckwell M., Wing H.Ng., Hudziak S., Mehonic A., Lanza M., Kenyon A.J. Improving the consistency of nanoscale etching for atomic force microscopy tomography applications. Front matter: mechanics of materials, 2019, V.6. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00203>.
6. Бабічук І.С., Данько В.А., Індутний І.З., Луканюк М.В., Минько В.І., Шепелявий П.Є. Фотостимульовані реверсивні перетворення у плівках Ge-Se як основа резистивного процесу. Оптоелектроніка і напівпровідникова техніка, 2014, вип. 49, с.36-41.
7. Jiaxing Sun, Xinyu Li, Haojie Zhang, Jinlong Song, Zhisong Li. A method for measuring and calibrating the thickness of thin films based on infrared interference technology. Results in Physics, 2023, V.51, 106727.
8. Тарнай А.А., Кириленко В.К., Рубіш В.М. Гера Е.В.. Установка для дослідження процесів рідинного травлення неорганічних резистів – середовищ для голографії та оптичного запису інформації. ISSN 1560-9189 Реєстрація, зберігання і обробка даних, 2008, Т. 10, № 2, с.32-36.

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

9. QATM products. Electrolytic polisher and etcher for reliable and convenient metallographic preparation. Available at https://www.qatm.com/products/grinding-polishing-etching/electrolytic-polisher-etcher/?gad_source=1&gclid

10. Yu.V. Sukhoroslova, D. Veselov, Yu.A. Voronov. Automated unit of the chemical wet etching. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2019, DOI: 10.1088/1757-899X/475/1/012005. Available at <https://www.researchgate.net/publication/331188689>.

11. O. Ambroz, J. Cermak, S. Mikmekova. Apparatus for Automatic chemical etching of metallographic samples. Conference: METAL 2021, 6 p. DOI: 10.37904/metal.2021.4146. Available at <https://www.researchgate.net/publication/356490772>.

12. Ю.А. Куницький, В.В. Кирилюк, Л.В. Овдворець. Основи спітроніки – матеріали, пристрої та прилади: навчальний посібник. Суми: Сумський державний університет – 2013. 127 с.

13. Д.М. Фреїк. В.М. Чобанюк, Л.І. Никируй. Напівпровідникові тонкі плівки – сучасний стан досліджень та використання. Фізика і хімія твердого тіла. – 2016. – т. 17, № 3. – С. 405 – 417.

14. В.В. Погосов, А.В. Бабіч. Нанofізика і нанотехнології: навчальний посібник. Запоріжжя: Запоріжський національний технічний університет. – 2011. 380 с.

15. A.A. Kryuchyn. Application of thin films chalcogenid vitreous semiconductors in optical recording systems. Physics status solidi, C. – 2011. – v. 8, № 9. – P. 2766 – 2769.

16. С.М. Павлов, О.В. Войцеховська. Технологія мікроелектронних засобів: навчальний посібник. Вінниця: Вінницький національний технічний університет. – 2017. – 169 с.

17. Г.Я. Якименко. Технологія виробництва друкованих плат: навчальний посібник. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2001. – 152 с.

18. Williams K.R., Muller R.S.: 'Etch rates for micromachining process-ing', J. Microelectromech. Syst., 1996, 5, (4), pp. 256–269

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

19. Chen P., Peng H., Hsieh C.M., ET AL.: 'The characteristic behavior of TMAH water solution for anisotropic etching on both silicon substrate and SiO₂ layer', Sens. Actuators A, Phys., 2001, 93, (2), pp. 132–137

20. Shikida M., Sato K., Tokoro K., ET AL.: 'Differences in anisotropic etching properties of KOH and TMAH solutions', Sens. Actuators A, Phys., 2000, 80, (2), pp. 179–188

21. Guo J., Song C., Li X., ET AL.: 'Fabrication mechanism of friction-induced selective etching on Si(100) surface', Nanoscale Res. Lett., 2012, 7, (1), p. 152

22. Модулі Arduino Uno. Електронний ресурс – режим доступу: <https://arduinoakit.com.ua/ua/p1137698825-plata-arduino-uno.html>.

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

					КМР.АКІТ.11588613.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73