

УДК: 004.08; 004.023; 004.085

ISSN 1729-4428 (Print)
ISSN 2309-8589 (Online)

А.В. Далекорей¹, В.П. Іваницький¹, А.А. Крючин², Я.П. Легета¹, В.В. Петров²,
В.М. Рубіш^{1,2}, М.М. Рябощук¹, І.І. Чичура¹

Система автоматичного контролю швидкості хімічного травлення тонких плівок

¹Ужгородський національний університет, Ужгород, Україна, kaf-pbud@uzhnu.edu.ua
²Інститут проблем реєстрації інформації НАН України, Київ, Україна, center.uzh@gmail.com

Показано можливість створення систем автоматичного контролю процесів хімічного травлення на основі інтерферометричного оптичного методу. Розроблено структурну схему пристроїв автоматичного керування побудовою оптичного тракту із елементів сучасних інформаційних оптоволоконних систем. Створено експериментальну модель системи автоматичного керування із оптимальним спектральним «ув'язуванням» джерела випромінювання, оптичних волокон, Y-розгалужувача та фотоприймача. Результати експериментальних досліджень змін інтерференційної картини під час хімічного травлення тонких плівок показали, що створена модель забезпечує простоту оптичного юстування, високу завадостійкість та легкість автоматизації контролю всього процесу травлення. На основі отриманих при дослідженні експериментальної моделі результатів розроблено базовий алгоритм функціонування систем автоматичного контролю процесів хімічного травлення із використанням інтерферометричного оптичного методу.

Ключові слова. Автоматизація процесів хімічного травлення, система автоматичного контролю, інтерференційні методи контролю товщини, алгоритм контролю процесу травлення.

Подано до редакції 27.10.2024; прийнято до друку 18.02.2025.

Вступ

Хімічне «мокре» травлення на сьогодні є основою різноманітних високоточних виробничих процесів: фотолітографія, хімічна обробка, хімічне фрезерування та інше. У всіх таких технологічних процесах необхідно неперервно контролювати протікання реакцій хімічного розчинення окремих елементів поверхні різних об'єктів з метою одержання необхідного рельєфу технічного рисунка із заданими параметрами [1]. Однак такий контроль процесів «мокрого» хімічного травлення традиційними методами та апаратами ускладнюється необхідністю проведення багатьох трудомістких технологічних операцій. Зокрема, це сам процес травлення, послідовне промивання зразків, їх сушіння, виконання необхідних вимірювань, обробка отриманих результатів тощо. Все це надзвичайно

ускладнює розробку сучасних приладів для автоматичного проведення неперервного контролю параметрів процесу травлення, зокрема, швидкості травлення, селективності процесу, однорідності травлення та інше.

Результати досліджень, викладені у [2], показують перспективність використання інтерферометричних методів для автоматизації вимірювань швидкості травлення тонких плівок багатьох матеріалів. Такі методи дозволяють також контролювати в автоматичному режимі весь процес хімічного травлення в реальному часі. При цьому можна забезпечувати високу точність вимірювань параметрів травлення та досягнути високу швидкість автоматичних приладів. Це висуває актуальну задачу досліджень щодо розробки реального макету пристрою автоматичного контролю процесів хімічного травлення тонких плівок на основі

інтерференційного методу. Результати таких досліджень є досить важливими для подальшого розвитку сучасних фотолітографічних технологій, зокрема, у напрямку пошуку нових фоторезистивних матеріалів [3]. Автоматичні пристрої дозволять суттєво знизити затрати часу на проведення наукових лабораторних досліджень процесів хімічного травлення, підвищать їхню точність та спростять їх інтеграцію в автоматичні виробничі системи.

I. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Серед автоматичних пристроїв проведення процесу «мокрого» травлення широко представлене лише обладнання для електролітичних методів полірування. Типовим прикладом може бути прилад Qetch 1000 фірми QATM [4]. 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 [5] розробили автоматичний лабораторний стенд для здійснення «мокрого» травлення. Однак система керування даного устаткування контролює лише процеси подання травників у закриту реакційну камеру та підтримує необхідні параметри даних травників під час травлення (температура та концентрація). Для цього пристрій оснащений мішалкою, парогазовим конденсатором, теплоізолюваними резервуарами для попереднього підігріву травників і води. Система керування забезпечує здійснення автоматизованого багатоступінчастого травлення в одному технологічному циклі із заміною травників і промиванням дослідних зразків без їх 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 можливість автоматизації в роботі [6]. 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 [6] також відмічають, що повну автоматизацію неперервного контролю процесу «мокрого» хімічного травлення забезпечити досить тяжко.

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. Однак результати досліджень [7] свідчать про те, що процес повної автоматизації вимірювань швидкості травлення значно спрощується при використанні фізичних принципів інтерференції когерентних оптичних променів на тонкій плівці, яка підлягає травленню. Тому актуальним є проведення досліджень зі створення пристроїв з автоматичною системою повного контролю технологічних процесів хімічного травлення тонких плівок та автоматичним вимірюванням параметрів таких процесів на основі методу оптичної інтерференції.

II. Мета і задачі досліджень

Метою досліджень є розробка системи автоматичного контролю та вимірювання параметрів технологічних процесів хімічного травлення тонких плівок на основі оптичного інтерференційного методу. Досягнення мети дозволить створювати прості автоматичні прилади для експресного дослідження процесів хімічного травлення тонких плівок широкого кола матеріалів.

Для досягнення мети до вирішення ставились такі задачі:

- обґрунтувати структурну схему моделі системи автоматичного контролю (САК) процесів хімічного травлення з використанням інтерференційного методу;
- розробити дослідний зразок моделі САК процесів травлення;
- створити алгоритм функціонування моделі САК та провести її дослідження.

III. Результати досліджень

Розробка структурної схеми моделі САК процесів хімічного травлення здійснювалася на основі функціональної оптичної схеми інтерференційного методу, запропонованої в [2]. У основу такої схеми покладено використання в якості оптичного тракту

сучасних оптичних волокон для ближнього інфрачервоного діапазону. Відповідно до цього, запропоновано структурну схему пристрою автоматичного контролю процесів травлення, яка наведена на рис. 1.

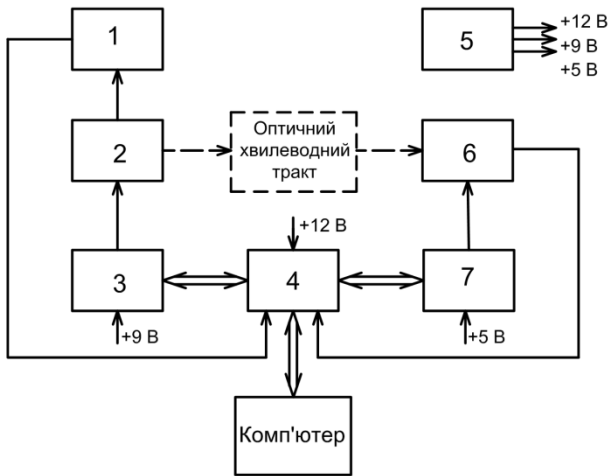


Рис. 1. Структурна схема моделі пристрою автоматичного контролю параметрів хімічного травлення тонких плівок: 1 – датчик інтенсивності, 2 – світлодіод, 3 – модуль живлення світлодіода, 4 – модуль мікроконтролера, 5 – блок живлення, 6 – фотоприймач, 7 – модуль живлення фотоприймача.

У якості джерела оптичного випромінювання взято напівпровідниковий світлодіодний модуль (позиція 1 та 2 на рис. 1), який містить як власне світлодіод (2), так і вбудований датчик інтенсивності вихідного випромінювання (1). Електрична енергія до світлодіода подається від керованого модулю живлення 3. Такі конструктивні особливості даного модуля дозволяють в автоматичному режимі здійснювати як контроль інтенсивності випромінювання в оптичному тракті, так і керування цією інтенсивністю.

Оптичний тракт пристрою побудовано на волоконних оптичних каналах ближнього інфрачервоного діапазону з Y-розгалужувачем. Вибір інфрачервоного діапазону дозволяє суттєво знизити вплив зовнішніх оптичних завад та спростити процес проведення вимірювань. При дослідженнях оптичне вхідне випромінювання вводиться в одне плече Y-розгалужувача. Далі 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 реєструються 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. 1). При необхідності кількість вхідних ліній модуля контролю можна збільшити, додаючи 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. 1). 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.

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

Розробка дослідного зразка моделі САК процесів травлення. Базовим компонентом моделі взято джерело зондуючого оптичного випромінювання – модуль світлодіода типу SFH485P фірми OSRAM. Максимум його випромінювальної спектральної характеристики $P(\lambda)$ припадає на довжину хвилі біля 808 нм (рис. 2) [8].

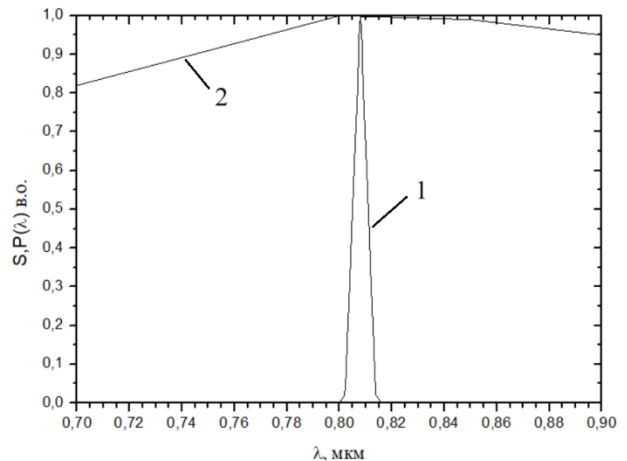


Рис. 2. Спектральні характеристики компонент моделі пристрою: 1 – модуля світлодіода SFH485P [8], 2 – фотодіода OPT101 [9]

Модуль SFH485P має високі технічні експлуатаційні параметри: 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.

У якості приймача випромінювання інтерференційної картини використано сучасний

фотодіод OPT101 фірми Texas Instruments. Його спектральний діапазон чутливості $S(\lambda)$ значно ширший у порівнянні з випромінювальною здатністю використаного світлодіода (рис. 2). Порівняння цих характеристик показує хорошу узгодженість робочого спектрального діапазону даних двох приладів. Тому при виборі фотодіода 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. З рис. 2 також видно, що фотодіод OPT101 має широку спектральну область з високою чутливістю. Тому модуль фотоприймача може успішно функціонувати з джерелами вхідного монохроматичного випромінювання різної довжини хвилі. Це дозволяє підбирати для кожного виду тонких плівок оптимальне джерело випромінювання, яке має максимум випромінювальної характеристики у спектральній області високо оптичного пропускання досліджуваних зразків.

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 [10]. Вони мають діаметр серцевини $d_c = 0,1$ мм та дуже малі втрати потужності випромінювання, менші 3,0 дБ/км у широкому спектральному діапазоні біля 810 нм. Такі параметри відповідають оптимальному узгодженню зі спектральними характеристиками світлодіода та фотодіода.

Y-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 плеча передає оптичне випромінювання на досліджуваний зразок через свою основу з мінімальними втратами (рис. 3). Однак при переході з основи до вихідного плеча в точці А Y-розгалужувача інтенсивність інтерференції когерентних променів розділюється на два потоки з коефіцієнтом поділу γ . У результаті до вихідного плеча передається інтенсивність інтерференції $I \cdot \gamma$, а інтенсивність $I \cdot (1 - \gamma)$ передається у вхідне плече й втрачається. Тому для отримання максимального значення вихідного інформаційного сигналу слід вибрати модифікацію Y-розгалужувача з великим значенням коефіцієнта γ . Зокрема, у дослідній моделі застосовано пристрій з величиною $\gamma = 0,8$.

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 [11]. Тоді, інтенсивність оптичного променя на виході розгалужувача можна оцінити як:

$$I \cdot \gamma = I \cdot \gamma \cdot 10^{-0.05} \approx 0.7$$

Розрахована інтенсивність оптичного випромінювання направляє на досліджуваний зразок та зумовлює формування інформаційного оптичного сигналу у вигляді інтерференційної функції, яка через друге плече Y-розгалужувача передається на фотоприймач для реєстрації. Експериментальні виміри показали, що інтенсивність інформаційного сигналу на вході фотоприймача складає біля 10 % від інтенсивності випромінювання, яке вводиться від світлодіода у хвилеводний тракт.

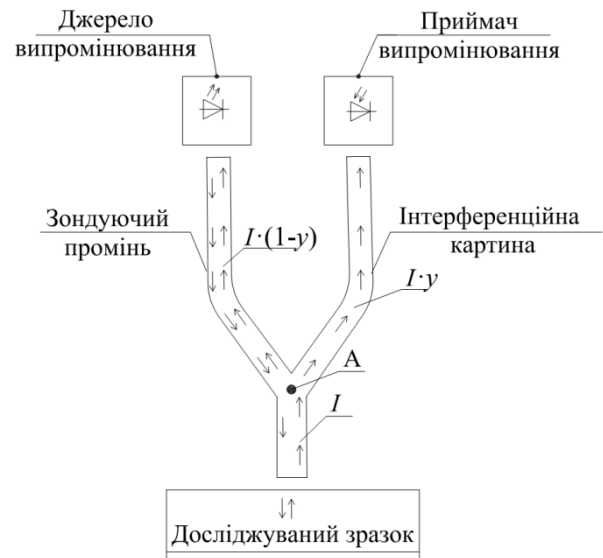


Рис. 3. – Перерозподіл інтенсивності оптичних потоків в Y-розгалужувачі.

Стикування оптичних волокон з 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 введеного світлового потоку від світлодіода до оптичного волокна у конекторах використано стандартні фокони. 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 опто-волоконний тракт біля 60 % потужності оптичного випромінювання світлодіода. Аналогічний конектор використовувався й для монтування в механічний маніпулятор досліджуваного зразка для занурення його у травний розчин.

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

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

Розробка та дослідження алгоритму

функціонування моделі САК. На створеній робочій моделі пристрою проводилися експериментальні дослідження особливостей протікання процесів травлення. Результати даних досліджень біло покладено в основу розробки алгоритму роботи САК пристроєм.

Перед початком процесу проводиться налагодження кювети для травлення і розміщення в ній досліджуваного зразка. Після цього виконується юстування оптичного тракту. Одночасно запускається САК, якій передається весь контроль за протіканням процесу травлення. У початковому сеансі роботи з САК оператор, при необхідності, вводить у пам'ять цілий ряд параметрів, які необхідні для виконання алгоритму. Процес введення початкових параметрів забезпечує підпрограма Parameters Input (рис. 4).

У подальшому виконання САК своїх функцій організовується у вигляді кількох послідовних взаємозв'язаних етапів. При здійсненні кожного з них є певні особливості функціонування САК. Тому алгоритм роботи даної системи доцільно розділити на кілька окремих логічних блоків (на рис. 4 виділені пунктирними лініями).

Блок Б1. Він відповідає за перевірку готовності основних компонент всього пристрою до роботи, що передбачає почергове виконання САК таких окремих кроків.

Крок Б1.1. Перевірка готовності фотоприймача до проведення досліджень. Для цього МК подає на модуль фотоприймача оптимальну напругу живлення та перевіряє наявність від нього фонового електричного сигналу s_p . При відсутності від фотоприймача фонового сигналу, МК видає на дисплей САК відповідне повідомлення оператору та переходить в режим очікування. При наявності фонового сигналу фотоприймача САК виконує наступний крок. Даний крок алгоритму виконує підпрограма Photodetector.

Крок Б1.2. Виконується підпрограма LED перевірки світлодіода (рис. 4). Для цього електричне живлення подається на світлодіод і МК встановлює мінімальну допустиму величину сили струму його живлення i_{min} . Після цього МК зчитує електричний сигнал із вбудованого у світлодіод фотоприймача. Якщо сигнал відсутній, то МК робить три послідовні кроки підвищення сили струму живлення світлодіода на Δi 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.

За результатами виконання кроку Б1.2 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 (у цьому випадку оператор має провести всі необхідні налаштування світлодіода та

хвилеводного тракту й подати МК сигнал продовження роботи);

- якщо ж величина сигналу відповідає діапазону оптимальних струмів живлення світлодіода, то МК переходить до виконання наступного кроку роботи МК.

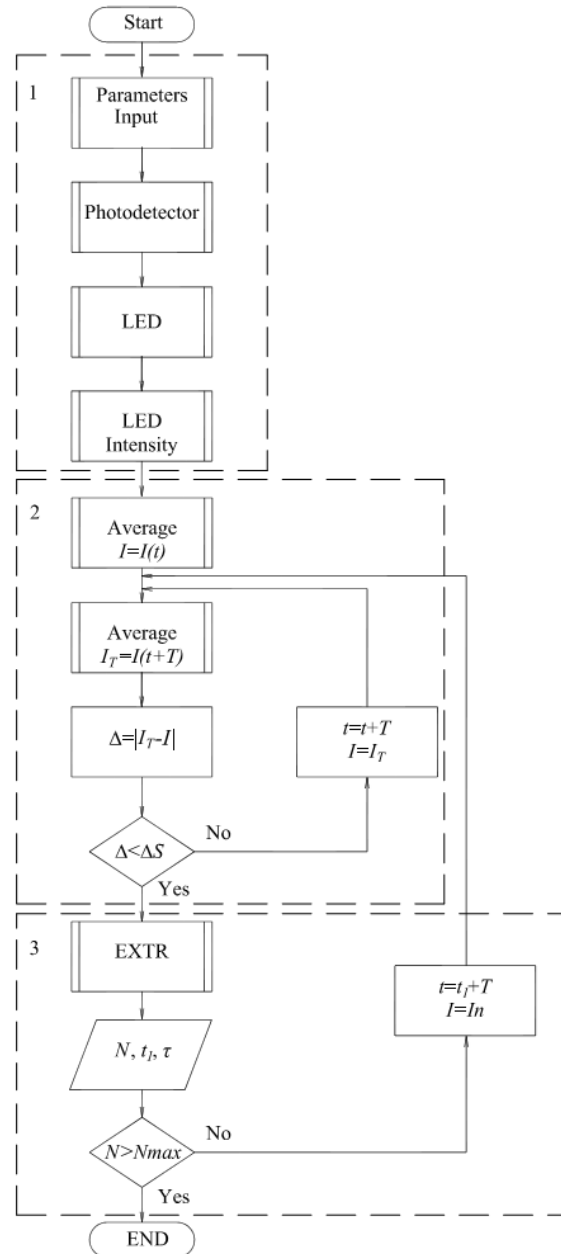


Рис. 4. – Алгоритм функціонування САК процесу хімічного травлення.

Крок Б1.3. Встановлення необхідного рівня інтенсивності випромінювання світлодіода. Цим процесом керує підпрограма LED Intensity рис. 4) МК зчитує сигнал із фотоприймача щодо інтенсивності вихідної інтерференційної картини I . 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 інтенсивність інтерференційної картини є менша допустимого рівня I_{min} і недостатня для проведення надійних вимірювань. Тоді МК покроково піднімає силу струму живлення світлодіода на Δi до максимально допустимого значення i_{max} . Якщо такі дії забезпечують появу необхідного рівня сигналу 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 оператора 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 досліджуванним зразком. Після цього оператор подає команду МК, яка дозволяє почати процес проведення вимірювань. Отримавши дану команду, МК розпочинає виконувати наступний блок алгоритму своєї програми.

Блок Б2. У початковий момент вимірювань на фотоприймачі фіксується інтенсивність невизначеної ділянки інтерференційної картини. Інтерференційний же метод вимагає розпочинати відлік часу з моменту проходження функцією $I(t)$ свого першого екстремуму. Тому цей блок відповідає за встановлення даного стартового моменту. Для цього 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 попередні пробні вимірювання на вибраному об'єкті досліджень для оцінки оптимальної величини періоду T . Тому цей параметр у програмі виступатиме як певна константа, яка вводиться в МК оператором перед початком чергового сеансу роботи наряду з іншими константами.

Для зменшення впливу «шумів» інтенсивності інтерференційної картини на результати проведення вимірювань в алгоритм введено окрему процедуру «згладжування» текучих вимірів. Дана процедура Average (рис. 4) вибирається із бібліотеки готових стандартних програм для МК. Оскільки дії блоку Б2 алгоритму проводяться протягом всього часу роботи

САК, то цей блок оформлюється у вигляді окремої підпрограми, яка містить наступні кроки.

Крок Б2.1. Виконується операція присвоєння для текучого параметра $P = I(t)$. Проводиться вимірювання текучої інтенсивності інтерференції I з її усередненням в околі певного моменту часу та запис значення інтенсивності в окремий регістр. Одночасно ця величина виводиться на дисплей оператора.

Крок Б2.2. Вимірюється усереднена інтенсивність I_T через інтервал часу T та розраховується різниця $\Delta = |I_T - I|$.

Крок Б2.3. Аналіз отриманої величини Δ , за результатом якого можлива одна із таких ситуацій:

- величина Δ більша заданого програмою довірчого інтервалу Δ_s . Це означає, що інтенсивність інтерференції в даний момент зростає або йде на спад і тоді МК переходить на виконання наступного кроку алгоритму Б2.4;

- величина Δ менша інтервалу Δ_s . Це вказує на можливість початку реалізації події досягнення функцією $I(t)$ свого першого екстремуму. Тоді МК починає виконувати окрему підпрограму EXTR визначення положення цього екстремуму. На виході даної підпрограми формується значення моменту часу t_0 , яке відповідає проходженню функцією $I(t)$ свого першого екстремуму та величина інтенсивності інтерференції в точці екстремуму. Отримані величини записуються в пам'ять МК та виводяться на дисплей оператора. Далі підпрограма передає керування блоку Б3 даного алгоритму.

Крок Б2.4. Виконання операції присвоєння $I_T = I$ та перехід до блоку алгоритму Б2.2.

Блок Б3 забезпечує керування процесом вимірювань при проходженні інтенсивності інтерференційної функції від одного свого екстремуму до наступного.

Крок Б3.1. Проведення операції вимірювань нової інтенсивності I_T через інтервал часу T та розрахунок нової різниці $\Delta = |I_T - I|$. При цьому величина I знаходиться в регістрі як результат дії попередніх кроків алгоритму.

Крок Б3.2. Аналіз отриманої величини Δ , за сценарієм, описаним у блоці Б2 як кроки Б2.3 та Б2.4. За результатами аналізу працює підпрограма EXTR. На виході даної підпрограми формується значення моменту часу t_1 , яке відповідає проходженню функцією $I(t)$ свого чергового екстремуму. Отримані величини t_1 та інтенсивність екстремуму записуються в пам'ять МК та виводяться на дисплей оператора. По виході із підпрограми МК переходить на виконання наступного кроку.

Б3.3. Розрахунок інтервалу часу між двома виявленими екстремумами $\tau = t_1 - t_0$, переприсвоєння значень $t_0 = t_1$ вивід на дисплей значення τ та його запис у пам'ять МК. У цей же блок можна ввести розрахунок текучої швидкості травлення тонкої плівки. Але цю операцію доцільніше покласти на комп'ютер, який підключений до САК, і якому САК передає всі отримані у процесі вимірювань дані.

Б3.4. Безумовний перехід до початку блоку Б3 для пошуку наступного екстремуму.

Блок Б4. 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. По завершенню роботи САК у комп'ютері формується набір параметрів τ , який є основою бази експериментальних даних для визначення швидкості травлення тонких плівок.

Підпрограма EXTR знаходження положення екстремуму. При аналіз екстремуму можливим є виникнення ситуації, коли умова $\Delta < \Delta_s$ повторюватиметься протягом багатьох циклів вимірювань інтенсивності інтерференції. Тому ця підпрограма контролює кількість чергових повторень даної умови. Якщо така 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 через період часу T .

IV. Аналіз результатів досліджень

Отримані результати показують, що інтерференційний оптичний метод дозволяє здійснювати автоматизацію всього процесу експериментальних досліджень процесу хімічного травлення тонких плівок. На його основі можна створювати різні САК. Структурна схема однієї з таких САК розроблена в даній роботі (рис. 1). Її позитивні риси зумовлені виконанням всього оптичного тракту на основі функціональних елементів сучасних інформаційних систем та оптичних волокон (рис. 2 та 3). У результаті досягається простота юстування оптичної частини САК, висока завадостійкість та легкість автоматизації процесу функціонування всієї САК. Однак, при необхідності, дана САК може бути побудована і на основі традиційного способу практичної реалізації інтерференційного метода контролю товщини тонких плівок із розповсюдженням лазерного променя в повітряному середовищі.

Розроблена одноканальна структурна схема САК може бути легко розширена до двоканальної для одночасного дослідження процесів хімічного травлення двох різних ділянок тонкої плівки. Це дозволить в одному експерименті досліджувати й селективність травлення по різному оброблених ділянок даної тонкої плівки.

Для експериментальних досліджень параметрів розробленої структурної схеми САК створено модель пристрою автоматичного контролю процесу хімічного травлення. У такому проектуванні основна увага була приділена оптимальному спектральному «ув'язуванню» всіх оптичних елементів САК: джерела випромінювання, оптичних волокон, Y-розгалужувача та фотоприймача (рис. 2). При виборі приладів для моделі значна увага також приділялась можливості їх легкої адаптації до електронних

елементів САК.

Особливістю застосування створеної моделі є необхідність створення спеціальних зразків для експериментальних вимірювань (рис. 3). Для цього на прозору для зондуєчого оптичного випромінювання підкладку слід нанести досліджувану тонку плівку, матеріал якої також має бути достатньо прозорим для зондуєчого оптичного променя. Це дозволяє уникнути сильного поглинання утворюваних когерентних променів та забезпечує високу інтенсивність інтерференційної картини на фотоприймачі.

Дослідження моделі показали, що інтерференційний оптичний метод забезпечує:

- хорошу надійність та строгий контроль роботи САК;
- високу точність отриманих результатів вимірювань;
- можливість уніфікації процесу вимірювань для різних матеріалів;
- зручність проведення процесу вимірювань та оперативність обробки їх результатів;
- можливість досліджувати весь процес травлення в динаміці в режимі реального часу.

Отримані результати при дослідженні створеної моделі пристрою автоматичного контролю процесу травлення тонких плівок покладено в основу розробки алгоритму функціонування САК (рис. 4). Наведений алгоритм є базовим для здійснення автоматичного керування процесом хімічного травлення на основі інтерферометричного оптичного методу. Надалі він може бути модифікований та оптимізований для розв'язання різних конкретних задач. Зокрема, актуальними в даному напрямку можуть бути наступні роботи.

1. Додаткові експериментальні дослідження особливостей поведінки інтенсивності інтерференції на різних етапах процесу травлення тонких плівок та в різних технологічних умовах. Наприклад, характер поведінки функції $I(t)$ на кінцевій стадії процесу травлення, коли плівка повністю розчинюється. На основі таких досліджень можна буде створити фінішний блок алгоритму завершення програми за певною умовою або за перериванням. Актуальним також є аналіз впливу різних травників на поведінку та параметри функції $I(t)$.

2. Розширення функцій алгоритму для реєстрації та запису змін всієї функції інтенсивності інтерференції $I(t)$ від початку процесу травлення до його закінчення. Послідуєчою математичною обробкою даної функції можна отримати додаткові фізико-хімічні параметри протікання всього процесу травлення.

3. Введення підпрограми швидкого повторення вимірювань інтенсивності $I(t)$ в даний момент часу із статистичною обробкою отриманих результатів. Швидкодія розробленої САК дозволяє проводити один вимір інтенсивності $I(t)$ протягом кількох часток мілісекунди. За цей проміжок часу товщина плівки зміниться менше, ніж на один моноатомний шар навіть при «гігантських» швидкостях травлення, більших 10 мкм/хв. Такі величини на кілька порядків менші абсолютних похибок вимірювань швидкості

травлення інтерференційним методом – $\pm 0,5$ нм/с [2].

4. Для створеної САК характерна висока гнучкість, особливо в умовах навчальних та науково-дослідних організацій. У результаті обладнання з даною САК зможе обслуговувати багатьох дослідників, які працюють з різними матеріалами та вивчають вплив різних зовнішніх факторів на процес травлення: температури, тиску, хімічного складу травника та інше. При цьому для різних цілей можна створити різні версії керуючої програми для САК – у алгоритм додати відповідні блоки автоматичного контролю тими або іншими зовнішніми чинниками. Крім того, при незначній доробці створена САК може бути використана і для досліджень процесів «сухого» травлення, наприклад іонного чи плазмового..

Висновки

Розроблено структурну схему системи автоматичного контролю процесів хімічного травлення з використанням інтерференційного оптичного методу. Особливістю схеми є виконання оптичного тракту на основі сучасних компонентів волоконнооптичних інформаційних систем, що забезпечує простоту юстування, високу завадостійкість та гнучкість алгоритму функціонування пристроїв контролю процесу травлення тонких плівок.

Створено дослідний зразок моделі системи автоматичного керування процесами хімічного травлення. Для практичного застосування даної моделі необхідно виготовляти спеціальні зразки для експериментальних вимірювань у вигляді підкладки з нанесеною досліджуваною тонкою плівкою. При цьому як підкладка, так і тонка плівка мають мати невеликий коефіцієнт поглинання в певному інфрачервоному спектральному діапазоні шириною більше 0,2 мкм. Експериментальні дослідження моделі системи автоматичного керування показали її

високу надійність та точність отриманих результатів вимірювань, можливість модифікації системи для різних матеріалів та різних умов досліджень; зручність проведення процесу вимірювань та оперативність обробки їх результатів.

На основі результатів експериментальних досліджень моделі системи автоматичного керування розроблено базовий алгоритм її функціонування. Запропоновано найбільш актуальні напрямки послідувочої модифікації розробленого алгоритму для створення автоматичних приладів дослідження процесів хімічного травлення.

Робота виконана за сприяння Національного Фонду досліджень України проект 2023/4/0004.

Далекорей А.В. – старший викладач кафедри комп'ютерних систем та мереж УжНУ;
Іваницький В.П. – професор кафедри приладобудування УжНУ, доктор фіз.-мат. Наук;
Крючин А.А. – завідувач відділу оптичних носіїв інформації Інституту проблем реєстрації інформації НАН України, член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор;
Легета Я.П. – старший викладач кафедри технології машинобудування УжНУ;
Петров В.В. – директор Інституту проблем реєстрації інформації НАН України, академік НАН України, доктор технічних наук, професор;
Рубіш В.М. – завідувач Ужгородської лабораторії матеріалів оптоелектроніки та фотоніки Інституту проблем реєстрації інформації НАН України, доктор фіз.-мат. наук, професор;
Рябошук М.М. – доцент кафедри приладобудування УжНУ, кандидат фіз.-мат. наук;
Чичура І.І. – завідувач кафедри приладобудування УжНУ, кандидат фіз.-мат. наук.

- [1] Qualitech 2016. Introduction to Chemical Etching. [Electronic resource] Access mode: <https://www.qualitetch.com/introduction-chemical-etching/https://www.qualitetch.com/introduction-chemical-etching>.
- [2] V. P. Ivanytskyi, V. M. Rubish, A. AND. Tarnay, I. AND. Chychura, V. IN. Rubish, A. IN. Dalekore, R. AT. Meshko, M. M. Ryaboshchuk, V. IN. Tsigika. *Automation of measurements of the rate of chemical etching of thin films*. Data Registration, Storage and Processing, 26, 2, 81 (2024).
- [3] V.V. Petrov, A.A. Kryuchin, Y.A. Kunytsky, V.M. Rubish, A.S. Lapchuk, S.O. Kostyukevich. *Nanolithography Methods*. – Kyiv: Naukova Dumka, 2015. – 262p.
- [4] QATM products. Electrolytic polisher and etcher for reliable and convenient metallographic preparation. [Electronic resource] Access mode : https://www.qatm.com/products/grinding-polishing-etching/electrolytic-polisher-etcher/?gad_source=1&gclid.
- [5] Yu.V. Sukhoroslova, D. Veselov, Yu.A. Voronov. *Automated unit of the chemical wet etching*. IOP Conference Series Materials Science and Engineering 475(1), 012005 (2019); <https://doi.org/10.1088/1757-899X/475/1/012005>. www.researchgate.net/publication/331188689.
- [6] O. Ambroz, J. Cermak, S. Mikmekova. *Apparatus for automatic chemical etching of metallographic samples*, Conference: METAL, 6 (2021); <https://doi.org/10.37904/metal.2021.4146>. <https://www.researchgate.net/publication/356490772>.
- [7] A.A. Tarnay, V.K. Kyrylenko, V.M. Rubish, E.V. Gera. *Installation for studying the processes of liquid etching of inorganic resists – media for holography and optical recording of information*, Data Registration, Storage and Processing, 10, 2, 32 (2008).

- [8] T - Series TO - Can 9 mm M 9- SM -808 nm -50 mW [Electronic resource] Access mode: <https://www.sheaumann.com/download/t-series-to-can-9mm-m-9-sm-808-nm-50-mw/>.
- [9] OPT 101 Datasheet (PDF) – Texas Instruments [Electronic resource] Access mode: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/545673/TI/OPT101.html>.
- [10] Optical cable [Electronic resource] Access mode: <https://finmark.ua/catalog/optical-cable.html>.
- [11] David Bailey, Edwin Wright. Fiber optics: theory and practice. Trans. with English - M.: Kudyts-Press, (2008). - 320 p.

A.V. Dalekorej¹, V.P. Ivanytsky¹, A.A. Kryuchyn², Ya.P. Legeta¹, V.V. Petrov²,
V.M. Rubish^{1,2}, M.M. Ryaboshchuk¹, I.I. Chychura¹

Automatic speed control system for the chemical etching of thin films

¹*Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine, kaf-pbud@uzhnu.edu.ua*

²*Institute for Information Recording of NAS of Ukraine, Uzhgorod, Ukraine, center.uzh@gmail.com*

The possibility of creating automatic control systems based on the interferometric optical method for chemical etching processes has been shown. A structural diagram of device for automatic control of the construction of an optical path from the elements of modern information fiber-optic systems has been developed. An experimental model of an automatic control system with optimal spectral "binding" of the radiation source, optical fibers, Y-splitter and photodetector has been created. The results of experimental studies of changes in the interference during chemical etching of thin films have shown that the created model provides simplicity of optical adjustment, high noise immunity and simplicity of automation of control of the entire etching process. Based on the results which were obtained during the study of the experimental model, a basic algorithm for the functioning of automatic control systems for chemical etching processes using the interferometric optical method has been developed.

Keywords: Automation of chemical etching processes, automatic control system, interference thickness control methods, etching process control algorithm.