

**В. П. Іваницький¹, В. М. Рубіш^{1,2}, А. А. Тарнай²,
І. І. Чичура¹, В. В. Рубіш³, А. В. Далекорей¹,
Р. О. Мешко¹, М. М. Рябошук¹, В. В. Цигика¹**

¹Ужгородський національний університет

Площа Народна, 3, 88000 Ужгород, Україна

²Інститут проблем реєстрації інформації НАН України

вул. Замкові сходи, 4, 88000 Ужгород, Україна

³Інститут електронної фізики НАН України

вул. Університетська, 21, 88000 Ужгород, Україна

Автоматизація вимірювань швидкості хімічного травлення тонких плівок

Проаналізовано особливості застосування інтерференційного методу для контролю товщини тонких плівок і вимірювань їхньої швидкості травлення. Розроблено оптичну структурну схему інтерференційного методу, яка є оптимальною для автоматичного вимірювання швидкості травлення тонких плівок. Як елементи всього оптичного тракту схеми рекомендовано застосовувати оптичні волокна. Експериментально досліджено закономірності змін інтерференційної картини на тонких плівках As_2S_3 під час їхнього хімічного травлення у водному розчині карбонату натрію. Проведено оцінку абсолютної похибки автоматичних вимірювань швидкості травлення, яка не перевищує $\pm 0,5$ нм/с. Показано, що запропоновані підходи придатні для проектування пристроїв автоматичного контролю процесів хімічного травлення різних речовин.

Ключові слова: автоматизація процесів хімічного травлення, халькогенідні аморфні плівки, фоторезисти, інтерференційні методи контролю товщини.

Вступ

У складному сучасному світі виготовлення матеріалів і 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. Крім того, хімічне травлення є важливим етапом при виробництві оригіналів оптичних дисків, голографічних дифракційних ґраток і захисних елементів [2–5]. 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 [6]. В усіх 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, та фінішне сушіння. Такі особливості визначають труднощі та складності автоматизації процесів вимірювання швидкості хімічного травлення. Це визначає актуальне завдання дослідження можливості тих методів вимірювання швидкості хімічного травлення, які дозволяють провести автоматизацію таких вимірювань. 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.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

У роботі [7] 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 [8] 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 не менше 1 см^2 , проводити кілька підготовчих етапів. До того ж, використання методу вимагає видалення зі зразків шарів за товшки не менше $0,1\text{ мкм}$. Такі параметри експериментальних досліджень проце-

су 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, аналізується в [9]. 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 [10] 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 усе 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 відбиванні зондувального оптичного випромінювання від поверхонь досліджуваних зразків [11]. Дані методи прості в експлуатації, швидкі для вимірювань і 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.

Автори [12] 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 [12] використано поширення зондувального та реєструвального оптичного променя лазера в повітряному середовищі. Однак, це дещо 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 і суттєво ускладнює систему автоматизації проведення вимірювань.

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.

Проведений аналіз вказує на актуальність проведення досліджень, присвячених визначенню можливості повної автоматизації вимірювань швидкості хімічного травлення для тих або інших типів речовин. Для цього перспективним вважаються ті методи, які дозволяють легко реєструвати зміни певних параметрів фізичних явищ у тонких плівках, обумовлених змінами їхньої товщини, одним із яких є інтерференційний метод.

Мета та задачі досліджень

Метою досліджень є визначення можливостей оптичного інтерференційного методу контролю товщини для здійснення повної автоматизації вимірювань швидкості хімічного травлення тонких напівпровідникових і діелектричних плівок. Це дозволить створювати відповідні автоматичні прилади з ефективними простими алгоритмами керування процесами хімічного травлення тонких плівок широкого кола матеріалів.

Для досягнення мети ставилися такі задачі:

- розробити спрощену структурну оптичну схему інтерференційного методу для пристроїв автоматичного вимірювання швидкості травлення;
- експериментально дослідити закономірності змін інтерференційної картини на тонких плівках під час їхнього хімічного травлення за розробленою оптичною схемою та на основі отриманих результатів оцінити можливість автоматизації вимірювань швидкості травлення.

Матеріали та методи досліджень

Об'єктом досліджень є протікання явища оптичної інтерференції на тонких плівках під час їхнього хімічного травлення. Для теоретичних досліджень застосовані базові принципи інтерференції когерентних променів у рамках хвильової оптики. При цьому було прийнято наближення відсутності суттєвого поглинання оптичного випромінювання в досліджуваній плівці.

Експериментальні дослідження проводилися на тонких плівках із халькогенідного напівпровідника As_2S_3 , нанесені методом вакуумного термічного напылення на поліровану підкладку із кварцового скла. Такі плівки є перспективними для застосувань як фоторезистів. Товщина вихідних плівок для досліджень фіксувалася біля 1 мкм.

Швидкість травлення плівок вимірювалась із використанням водного розчину карбонату натрію, який вважається оптимальним для плівок As_2S_3 [12]. Травник під час вимірювань постійно перемішувався магнітною мішалкою, а його температура підтримувалася постійною в околі 40 °С.

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

На одній і тій же плівці дослідження змін інтерференційної картини під час хімічного травлення проводилися декілька разів. Для кожного дослідження визначалися моменти часу досягнення інтенсивністю своїх екстремальних значень. Для цих моментів також розраховувалась товщина тонкої плівки. За отриманими результатами визначалася швидкість травлення на різних часових інтервалах проведення процесу хімічного травлення. За результатами обробки статистичними методами набору отриманих експериментальних результатів отримувалися середні значення швидкості травлення тонкої плівки та відносні похибки їхніх вимірювань.

Результати досліджень автоматизації вимірювань швидкості травлення

Розробка структурної оптичної схеми автоматичного вимірювання швидкості травлення плівок. Інтерференційні методи ґрунтуються на фізичному явищі накладання кількох когерентних хвиль. У результаті відбувається формування інтерференційної картини — специфічного просторового перерозподілу інтенсивності когерентних хвиль, характер якого визначається фазовими співвідношеннями між цими хвилями. Для розділення оптичної хвилі на два когерентні промені найпростіше використати відбивання оптичного випромінювання від границь досліджуваної тонкої плівки, яка знаходиться на певній підкладці. При нормальному падінні вхідного оптичного променя сформуються два відбиті когерентні промені, які поширюватимуться в оптичній системі перпендикулярно до площини плівки (рис. 1). Ці два промені будуть інтерферувати між собою. У результаті інтенсивність вихідного випромінювання буде періодично змінюватися із періодом, величина якого задається товщиною плівки та її показником заломлення. Фіксуючи часові параметри таких змін, ми математично можемо легко їх трансформувати у зміни товщини плівки, а, відповідно, вимірювати швидкість її травлення.

Слід зауважити, що для реалізації даного методу як сама тонка плівка, так і підтримуюча її підкладка мають бути достатньо прозорими для певного спектрального діапазону оптичного випромінювання. У процесі травлення товщина h плівки неперервно зменшується. Тому фазові співвідношення між двома когерентними променями будуть неперервно змінюватися. У результаті інтенсивність інтерференційної картини буде функцією товщини плівки $I(h)$. При цьому закон зміни даної функції є близьким до функції $\sin$.

Для проведення вимірювань швидкості травлення нам не обов'язково точно фіксувати значення інтенсивності $I(h)$. Основна інформація про зміни товщини плівки міститься саме в часових інтервалах, протягом яких інтенсивність варіюється від одного свого екстремуму до іншого. При цьому інтенсивність $I(h)$ змінює-

ться між двома сусідніми екстремумами при зміні товщини шару плівки на величину $\lambda/4n$.

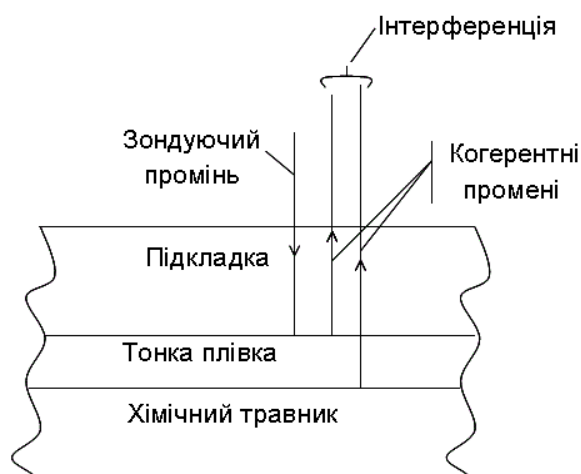


Рис. 1. Формування інтерференційної картини при травленні тонкої плівки

Для технічної реалізації інтерференційного методу вимірювання швидкості травлення тонких плівок можна застосувати різні оптичні схеми. Але найпростішим з точки зору технічної реалізації, юстування оптичної схеми та повної автоматизації є використання для введення зондувального випромінювання оптичних хвилеводів, коли лазерний промінь направляється перпендикулярно до поверхні досліджуваної системи, що відповідає фізичній картині на рис. 1. Функціональна оптична схема використаного макету проведення експериментальних вимірювань наведена на рис. 2.

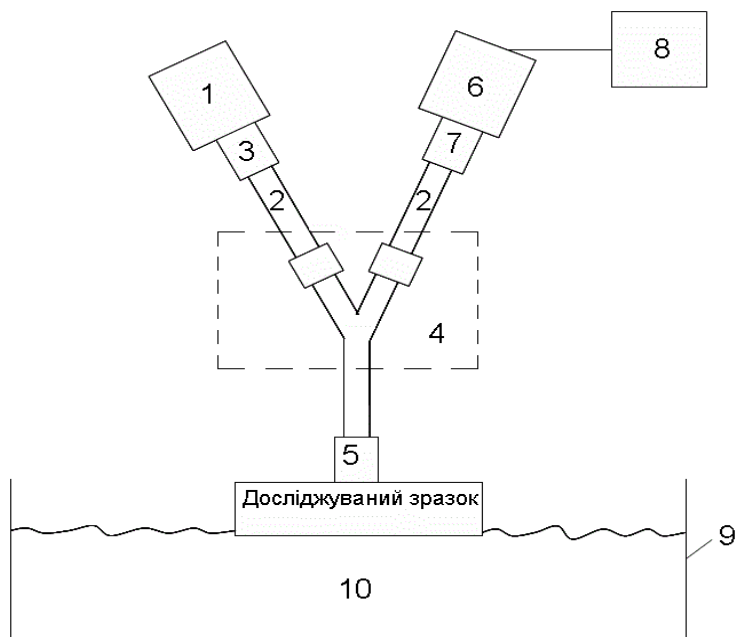


Рис. 2. Оптична схема макету експериментальних досліджень процесу хімічного травлення тонких плівок

Згідно з оптичною схемою, розроблений макет містить: джерело випромінювання 1; оптичні волокна 2; конструктив стикування джерела випромінювання із оптичним волокном 3; Y-розгалужувач оптичного променя із конструктивами стикування з оптичними волокнами 4; конструктив стикування оптичного волокна із підкладкою з нанесеною на неї плівкою 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.

Для проведення експериментів було створено простий оптичний стенд. У ньому як джерело випромінювання застосовано світлодіод SFH485P фірми OSRAM, який має максимум випромінювальної спектральної характеристики на довжині хвилі 880 нм. У оптичному тракті макета використано оптичне волокно FinMark PS001MM PVC з низьким рівнем оптичних втрат (менші 3,0 дБ/км) у спектральному діапазоні біля 810 нм. Y-розгалужувачем був готовий пристрій OPTOKON SFT-P, який дозволяє легко приєднувати до його виходів оптичні волокна. Приймачем інтенсивності інтерференційної картини слугував прилад OPT101 (Texas Instruments) з максимумом спектральної характеристики біля 830 нм. Стикування оптичних волокон із іншими компонентами макету здійснювалося за допомогою стандартних конекторів OPTOKON BFA-PC-Z-2, які використовуються в сучасних оптоволоконних мережах. Для монтування досліджуваного зразка в маніпулятор використано механічний конструктив стикування оптичного волокна з підкладкою та плівкою.

Зміни інтенсивності інтерференційної картини фіксувалися як електричний сигнал електронної схеми фотоприймача. Цей вихідний електричний сигнал оброблявся модулем мікроконтролера Arduino UNO. Оброблений сигнал надсилався на комп'ютер для обробки та зберігання.

Результати експериментальних досліджень змін інтенсивності інтерференційної картини на тонких плівках під час їхнього хімічного травлення. Оскільки під час вимірювань товщина шару фоторезисту в будь-який момент часу є невідомою, то експериментально зміни інтенсивності інтерференційної картини $I(h)$ реєструються 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. 3 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 ~ 40 °C. При менших температурах процес розчинення протікає значно повільніше [12].

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

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

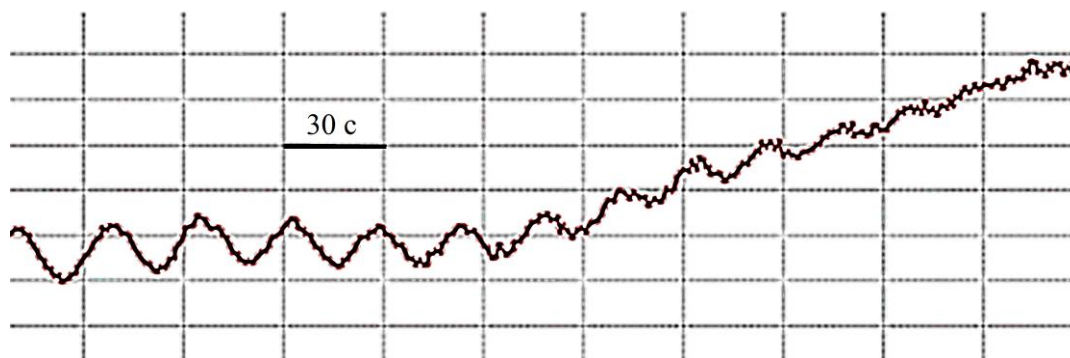


Рис. 3. Приклад експериментальної функції $I(t)$ зміни інтенсивності інтерференційної картини при травленні фоторезисту As_2S_3

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
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

Обговорення результатів досліджень

Автоматизація процесу проведення вимірювань вимагає вибору таких методів і їхньої технічної реалізації, що 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 [12]. Однак, з точки зору підвищення надійності, точності та спрощення автоматизації процесу вимірювань оптимальною є інша оптична схема проведення вимірювань. Вона полягає (рис. 1) в перпендикулярному падінні зондувального оптичного випромінювання на досліджуваний зразок із використанням як всього оптичного тракту оптичних волокон. Проведені експериментальні дослідження з використанням даної оптичної схеми (рис. 2) 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. 3, 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 в певному зменшенні інтенсивності вихідного сигналу. Така поведінка зумовлена зміною умов відбивання зондувального оптичного випромінювання на поверхні плівки — до травлення це межа поділу плівка-повітря, а при травленні це мажа поділу плівка-травник. При цьому при зміні хімічного складу травника початковий вихідний сигнал змінюється в різній ступені. Однак виявлені експериментально зміни в 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:

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

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.

Аналіз отриманих 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 близькими. Зокрема, для досліджених нами тонких плівок As_2S_3 отримано середнє значення $\Delta t_c = 13,1$ с з відносною похибкою біля 7 % (див. таблицю). Враховуючи показник заломлення досліджуваної плівки $n = 2,35$ [13] та довжину хвилі зондувального випромінювання ($\lambda = 880$ нм), розраховано її середню швидкість травлення $v = 7,1$ нм/с. Отримане

значення добре корелює з результатами досліджень [12]. Оскільки величини n та λ визначені зі 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 зондувального 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. 3). Тому точний контроль процесу закінчення хімічного травлення тонких плівок інтерференційним методом стає утрудненим. За експериментальними результатами (рис. 3) це відповідає кінцевим товщинам досліджуваного зразка, < 500 нм. Відповідно, для отримання надійних результатів запропонований метод може бути застосований лише для тонких плівок, початкова товщина яких більша 0,5 мкм.

Висновки

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

Проаналізовано особливості використання запропонованої оптичної схеми при автоматизації досліджень процесів травлення. Для цього експериментально досліджено закономірності змін інтерференційної картини на тонких плівках фоторезисту As_2S_3 під час їхнього хімічного травлення. Отримані результати показують перспективність застосування запропонованих методів для створення автоматичних пристроїв вимірювання швидкості та динаміки травлення тонких плівок у режимі реального часу. Оцінена абсолютна похибка автоматичних вимірювань швидкості травлення на рівні $\pm 0,5$ нм/с.

Досліджений метод придатний для автоматизації вимірювань процесів травлення тонких плівок матеріалів, які мають мале поглинання в певному оптичному спектральному діапазоні. У напрямку розвитку даного дослідження можна проектувати пристрої автоматичного вимірювання швидкості травлення та створювати алгоритми їхнього функціонування.

1. Qualitech, 2016. Introduction to Chemical Etching. Available at: <https://www.qualitetch.com/introduction-chemical-etching/>

2. Петров В.В., Крючин А.А., Костюкевич С.О., Рубіш В.М. Неорганічна фотолітографія. Київ: ІМФ НАНУ. 2007. 197 с.

3. Петров В.В., Крючин А.А., Рубіш В.М. Материали перспективных оптоэлектронных устройств. Київ: Наук. думка. 2012. 336 с.

4. Петров В.В., Крючин А.А., Куницький Ю.А., Рубіш В.М., Лапчук А.С., Костюкевич С.О. Методи нанолітографії. Київ: Наук. думка. 2015. 262 с.

5. Коротун А.В., Коваль А.О., Крючин А.А., Рубіш В.М., Петров В.В., Тітов І.М. Нанофотонні технології. Сучасний стан і перспективи. Ужгород: ФОП Сабов А.М. 2019. С. 482.
6. Abiola Ayodele. Chemical Etching: A Comprehensive Guide to Processes, Applications, and Techniques. Wevolver. 2024. Available at: <https://www.wevolver.com/article/chemical-etch>.
7. 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.С. Фотостимульовані реверсивні перетворення у плівках Ge-Se як основа резистивного процесу. *Оптоелектроніка і напівпровідникова техніка*. 2014. Вип. 49. С. 36–41. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/314207533>.
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. *Реєстрація, зберігання і оброб. даних*. 2008. Т. 10, № 2. С. 32–36.
9. Гера Е. В. , Дуркот О. М., Мар'ян В. М., Михайло О. А., Поп М. М., Рубіш В. М., Штець П. П. Вплив лазерного випромінювання на оптичні характеристики плівок $\text{As}_{40}\text{S}_{60-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 15$). *Фізика і хімія твердого тіла*. 2014. Т. 15, № 4. С. 741–746.

Надійшла до редакції 15.10.2024