

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

ЧАЛА ОЛЕНА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК.621.3.316.543.2

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ
ПІДКЛАДОК ФУНКЦІОНАЛЬНИХ КОМПОНЕНТІВ
МІКРООПТОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ**

**05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво
електронної техніки**

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Филипенко Олександр Іванович,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
декан факультету автоматичних і комп'ютеризованих
технологій, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих
технологій, автоматизації та мехатроніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Притчин Сергій Емільович,
Кременчуцький національний університет
імені Михайла Остроградського,
професор кафедри інформаційно-управляючих систем;

кандидат технічних наук
Проценко Максим Анатолійович,
товариство з обмеженою відповідальністю
«Науково-виробниче підприємство «ЛТУ»»,
начальник відділення мікроелектроніки –
заступник головного конструктора.

Захист відбудеться «12» березня 2021 р. о 13.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки, за адресою: 61166, м. Харків, просп. Науки, 14 і на сайті спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04 за посиланням: <https://nure.ua/branch/d-64-052-04>.

Автореферат розіслано «11» лютого 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Є. М. Одаренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Швидкий розвиток мікроелектромеханічних систем (МЕМС) та технологій їх виробництва багато в чому пояснюється ключовими перевагами – мініатюрністю, функціональністю, високою надійністю, малим енергоспоживанням, простотою інтегрування, затребуваністю практично усіма ринками електроніки, в тому числі і в оптоелектроніці.

Синергетична комбінація технологій МЕМС з оптоелектронікою розвинулася в клас інтегрованих мікросистем, які отримали назву мікроелектрооптомеханічні системи (МОЕМС). За оцінкою аналітиків, частка пристроїв МОЕМС склала в 2018 р. близько однієї третини від загального ринку МЕМС. Особливу увагу в галузі телекомунікацій привертають оптичні актюатори та перемикачі на базі МЕМС, що широко застосовуються під час побудови оптичних мереж. Серед різноманіття пасивних компонентів можна виділити одні з найбільш чисельних – МОЕМС-перемикачі, за допомогою яких відбувається перенаправлення потоку світла між світловодами. Основним параметром таких пристроїв є відбиваюча здатність функціональних компонентів (ФК) у процесі перенаправлення потоків у світловодних мережах, перш за все за рахунок відбиття.

Однією з важливих тенденцій розвитку виробництва МОЕМС-перемикачів є мініатюризація, але при цьому вимоги до якості виробів тільки підвищуються, а саме відповідність заданим характеристикам і параметрам таких компонентів залежить від технології виробництва їх ФК – дзеркал. Дзеркало складається з монокристалічної підкладки та нанесеного, як правило, металізованого шару.

Розробки в зазначеному напрямі ведуться такими підприємствами як Corning, Lucent Technologies, Pirelli optical (Італія), Alcatel (Франція), OmniGuide Communication (США), BlazePhotonics (Англія).

Конструктивно-технологічним особливостям виробництва МОЕМС і компонентів на їх основі присвячені праці багатьох зарубіжних і вітчизняних вчених: Yole Fink, Y. Zhao, M. Edward Motamedi, Каширіна В. І., Томінага Дж., Цсаї Д. П., Оксанича А. П., Притчина С. Є., Готри З. Ю., Невлюдова І. Ш., Филипенка О. І., Гордієнка Ю. О. та інших.

Однак, незважаючи на достатньо велику кількість досліджень, що присвячені даній тематиці, залишаються протиріччя між необхідністю подальшого підвищення якості МОЕМС компонентів, використання перспективних варіантів реалізації технологічних процесів (ТП) і операцій їх виробництва та обмеженістю відомих підходів до забезпечення якості та контролю МОЕМС-структур у виробі оптоелектронної техніки.

Все це свідчить про те, що технологічне забезпечення якості поверхонь підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем, а також удосконалення методів прогнозування та контролю їх характеристик на етапах виробництва й експлуатації є актуальним науково-прикладним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, результати яких викладені у дисертаційній роботі, здобувачка проводила відповідно до держбюджетних тем НДР у Харківському національному університеті радіоелектроніки (ХНУРЕ) за планом МОН України: у рамках ініціативної науково-

дослідної роботи та як виконавець: «Конструкторсько-технологічні основи створення перспективних компонентів мікроелектромеханічних систем і технологій їх виробництва» (ДР № 0108U002216); «Теоретичні основи мікроелектромеханічних систем, проектування та технології їх виробництва для гнучких інтегрованих систем» (ДР № 0113U000358); «Створення мікрооптоелектромеханічних засобів для інтелектуальних технологічних систем промислового обладнання та робототехніки» (ДР № 0115U002433); «Створення мікрооптоелектромеханічних засобів для інтелектуальних технологічних систем промислового обладнання та робототехніки» (ДР № 0115U002433); «Безскладальні гнучко-жорсткі конструкції зі змінною конфігурацією для компонентів мікросистемної техніки інтелектуальних роботів» (ДР № 0219U001644).

Метою дисертаційної роботи є підвищення якості функціональних компонентів МОЕМС, шляхом розробки технологічного забезпечення їх виробництва на основі досліджень фізико-технологічних параметрів та методів контролю елементів МОЕМС перемикачів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні науково-прикладні задачі:

– проаналізувати будову та існуючі технології виробництва компонентів МЕМС-оптичних перемикачів, їх параметри, виробничі дефекти, що викликані особливостями ТП, та технологічні можливості поліпшення їх характеристик;

– проаналізувати вплив підкладок ФК МОЕМС на характеристики дзеркал та особливості ефектів і втрат, що ними вносяться та залежать від ТП виготовлення;

– розробити фізико-технологічну модель параметрів поверхонь підкладок ФК МОЕМС для прогнозування якісних характеристик та виникнення виробничих дефектів поверхневого шару підкладок таких компонентів і програмне забезпечення для моделювання зазначених процесів;

– розробити технологію формоутворення підкладок відбиваючих ФК для МЕМС-оптичних перемикачів для забезпечення заданих значень шорсткості;

– розробити та провести дослідження метода контролю поверхонь підкладок ФК МОЕМС з використанням запропонованої технології контролю;

– провести апробацію розроблених моделей і методу забезпечення якості компонентів МЕМС-оптичних перемикачів, їх експериментальне дослідження та розробити практичні рекомендації щодо технологічного забезпечення необхідного рівня якості.

Об’єкт дослідження – технологічний процес виробництва ФК МОЕМС.

Предмет дослідження – фізико-технологічні параметри підкладок ФК МОЕМС та ТП їх виготовлення.

Методи дослідження. Проведення досліджень базується на методах математичного та комп’ютерного моделювання, фізико-технологічних процесах ТП виробництва – для розробки математичної моделі прогнозування виробничих дефектів і візуалізації отриманих результатів; методах планування експерименту та регресійного аналізу, методах комп’ютерної обробки даних, цифрового комп’ютерного моделювання ТП – для розробки технології формоутворення; використання інтерактивного середовища моделювання для розрахунку числових масивів даних, інтерференційного методу з використанням рядів Фур’є та адаптивної фільтрації – для розробки ТП

контролю.

Наукова новизна отриманих результатів. У процесі вирішення завдань відповідно до мети досліджень отримано такі наукові результати:

- вперше запропоновано фізико-технологічну модель прогнозування дефектів підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем, яка враховує якість шару підкладок та дозволяє прогнозувати параметри технологічного процесу, що можуть призвести до виникнення виробничих дефектів підкладок функціональних компонентів, а також коригувати технологічні процеси їх виготовлення;

- отримала подальший розвиток регресійна модель, яка враховує залежності між товщиною шару видалення дефектів функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем і факторами формоутворення: швидкістю, часом, зернистістю полірувальної пасти та їх комбінованою дією, що дає можливість визначити параметри поверхні функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем і підвищити їх якість;

- удосконалено інтерференційний метод у технологічному процесі контролю якості функціональних компонентів шляхом усунення супутніх складових у зображенні за рахунок запропонованого адаптивного цифрового фільтру, що дозволяє підвищити достовірність відтворення параметрів формоутворення функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем та розширити функціональні можливості методів технології контролю;

- набув подальшого розвитку метод ідентифікації екстремумів інтерференційних смуг зображень у технологічному процесі контролю поверхонь функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем, що відрізняється визначенням фазової функції зі співвідношення корисної та комплексно спряженої за Гільбертом складових сигналу, що дає можливість підвищити достовірність визначення параметрів форми поверхонь для забезпечення якості функціональних компонентів.

Практична цінність. Результати досліджень реалізовані на практиці у вигляді дослідних зразків і технологічної документації, які складають основу для технологічного забезпечення якості підкладок ФК МОЕМС у складі МОЕМС, а саме:

- розроблено дослідні зразки підкладок ФК для оптичного МЕМС перемикача;
- розроблено та відпрацьовано ТП формоутворення ФК МОЕМС;
- розроблено ТП контролю якості ФК за рахунок використання інтерференційного методу;
- розроблено ТП для забезпечення якості ФК МОЕМС на етапі їх виробництва;

- розроблено конструкції дзеркал-відбивачів (розширення досліджень у суміжній області), викладені рішення захищені патентами на корисні моделі: № 118295 «Сонячний модуль зі стаціонарним параболоциліндричним концентратором» (від 25.07.2017) та № 138990 «Сонячний колектор з фоклінним концентратором» (від 10.12.2019).

Результати, отримані в дисертаційній роботі, впроваджено на ТОВ ТК «Валор» (акт від 20.02.2017 р.), ПАТ «ХІМФАРМЗАВОД «ЧЕРВОНА ЗІРКА» (акт від 13.03.2020 р.), на підприємстві ТОВ «НВП «Укрінтех» (акт від 18.04.2020 р.), в Інституті сцинтиляційних матеріалів НАН України (акт від 02.03.2020), а також у

навчальному процесі на кафедрі електронних апаратів Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського, на кафедрі інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», а також у науково-дослідних роботах і навчальному процесі на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки ХНУРЕ, що підтверджено відповідними документами.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати, наведені у дисертаційній роботі, отримані здобувачем самостійно. У публікаціях, написаних у співавторстві, внесок здобувача полягає: [1] – визначено основні дефекти, що виникають під час виробництва підкладок ФК для МОЕМС-перемикачів і способи їх мінімізації; [2] – визначено технологічні фактори виробництва та типи дефектів, що впливають на якість поверхонь ФК МОЕМС-перемикачів; [3, 13, 16-17] – розроблено конструкцію дзеркал відбивачів для підвищення ККД фотоперетворювачів; [5] – розроблено метод і ТП контролю ФК МОЕМС за рахунок використання інтерференційного методу; [6, 26] – запропоновано математичну модель та її практичну реалізацію для комп'ютерного моделювання під час розробки ТП виробництва ФК МОЕМС; [7, 8, 24, 27] – систематизовані технології мікросистемної техніки та МОЕМС; [9] – досліджено залежність направляючої здатності ФК МОЕМС за умов зміни параметрів їх позиціонування; [10] – запропоновано використання гнучко-жорстких конструкцій у МОЕМС; [11] – досліджено методи контролю якості поверхонь виробів електронної техніки, МЕМС та МОЕМС; [4, 21] – проведено моделювання відбиваючої здатності мікродзеркал ФК МОЕМС; [12, 22] – запропоновано математичну модель прогнозування виробничих дефектів для підкладок ФК МОЕМС; [18-20, 23, 25] – визначено фактори втрат в оптичних перемикачах. Роботи [12, 19-21] написані без співавторів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на таких науково-технічних конференціях і симпозіумах: Міжнародній науково-технічній конференції «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи» (м. Київ, 10-16 березня 2014 р.); Міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка та молодь в ХХІ сторіччі» (м. Харків, 2014 р., 2015 р.); Всеукраїнській науково-практичній Інтернет-конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку» (м. Черкаси, 16-20 березня 2015 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми електромагнітної сумісності перспективних беспроводних мереж зв'язи» (м. Харків, 27 травня 2015 р.); XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів» (м. Кременчук, 6-8 листопада 2015 р.); IEEE XIV та XV International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH) (Polyana, Ukraine, 2018, 2019); IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL) (Sozopol, Bulgaria, 06-08 September, 2019).

Публікації. За темою дисертації з викладенням основних її результатів опубліковано 27 наукових праць, у тому числі 12 статей у наукових фахових виданнях України за фахом (серед яких 6 внесені до міжнародних наукометричних баз, в тому числі 1 стаття в базі Scopus), 2 статті у наукових виданнях інших держав, 1 розділ колективної монографії в державі Євросоюзу, 2 патенти України на корисну

модель, 10 тез доповідей у збірниках праць міжнародних науково-технічних конференцій (серед них 4 реферовано в наукометричній базі Scopus).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота є рукописом і складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел зі 112 найменувань (15 с.), 3 додатків (22 с.), містить 45 рисунків, 12 таблиць. Загальний обсяг роботи складає 157 сторінок, з них 110 сторінок основного тексту.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету роботи, завдання досліджень, які вирішуються у дисертаційній роботі, а також викладено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Наведено відомості щодо впровадження результатів роботи, апробації та особистого внеску здобувача у публікаціях.

У першому розділі проведено аналіз технологій виготовлення ФК у складі МОЕМС, наведено їх класифікацію та розглянуто особливості формування. Доведено, що основною якісною характеристикою ФК МОЕМС є відбиваюча здатність або розсіювання оптичної потужності.

На даний час ФК, до яких належать направляючі компоненти – дзеркала, знаходять все більше застосування в технологіях МЕМС. Це обумовлено необхідністю управління передаванням оптичних сигналів між світловодами. Використання МОЕМС перемикачів дає можливість: об'ємного компонування; зниження габаритних розмірів і маси, вартості, помилок перенаправлення, спотворень сигналів і збільшення коефіцієнту відбиття.

Однак, за численних переваг, існує серйозна проблема забезпечення якісних показників ФК МОЕМС і модулів на їх основі, такі вироби можуть піддаватися великій кількості дестабілізуючих чинників на всіх етапах життєвого циклу.

Тривалість експлуатації оптичного перемикача визначається виробниками за кількістю разів перемикання, тобто такою, що напряму залежить від механічної частини МЕМС-виробу. Але на даний час до 30 % відмов чи некоректної роботи оптичних перемикачів викликано впливами на відбиваючий ФК. У процесі виробництва ФК з'являються дефекти, що викликані самим ТП виробництва цих компонентів на основному етапі – виробництві підкладок, а далі, як правило, нанесення металізованого шару, з неминучим виникненням розростання дефектів підкладок. Нано- та мікродефекти під впливом механічних сил перемикання, корозії, механічних пошкоджень за умови навантаження, специфічних умов експлуатації з часом перетворюються на макродефекти, що суттєво впливає на коректну роботу МЕМС-перемикачів.

З цього переліку основними залишаються відмови, що пов'язані з ФК – дзеркалами. Для з'ясування причин виникнення дефектів проаналізовано ТП виготовлення ФК, особливу увагу приділено виготовленню підкладок. Доведено, що саме дефекти підкладок ФК є першопричиною дефектності структури в цілому.

Таким чином, існує необхідність розробки технологічного забезпечення для підвищення якості ФК МОЕМС-перемикачів. Для цього необхідно виконати ретельний теоретичний аналіз і моделювання розвитку дефектів у ході ТП їх

виготовлення, встановити джерела виникнення, а також технологічні й експлуатаційні чинники, які можуть призвести до збільшення та переходу у макророзміри, що спричинить зниження параметрів і надійності в цілому.

У другому розділі запропоновано модель прогнозування дефектів підкладок ФК у складі МОЕМС-виробів на етапах виготовлення. Зокрема, запропоновано метод прогнозування виникнення виробничих дефектів поверхневого шару підкладок ФК МОЕМС на основі фізико-технологічних моделей ТП їх виготовлення. Цей метод дозволяє виявляти значення фізико-хімічних параметрів ФК під час їх виробництва, а також вносити корективи у ТП виготовлення таких структур.

Проведено аналіз ТП виготовлення МОЕМС-перемикачів і критичних факторів, які впливають на виникнення виробничих дефектів у їх структурі. Він дає підставу припустити, що в основі механізму виникнення виробничих дефектів ФК



Рисунок 1 – Шари пластини ФК, що зазнають фізико-технологічних впливів і механічних порушень: I – рельєфний шар; II – порушений шар; III – деформований шар; IV – непорушена структура підкладки ФК

МОЕМС лежать перетворення мікро- та макроструктур вихідних матеріалів і фізико-хімічні процеси, що відбуваються під час виробництва ФК МОЕМС, при цьому реалізується схема перетворення субмікроефектів і мікроефектів на макродефекти. Область підкладки ФК, що зазнає фізико-технологічних впливів і проявляється як флуктуація області спостережень поверхневого шару пластини підкладки ФК, наведена на рис. 1 (зони I - III).

Дифузію шарів і підшарів ФК МОЕМС можна виразити через другий закон Фіка: для одновимірної дифузії (1) або дифузії через плівку (2):

$$\frac{dV}{dt} = D \frac{d^2V}{dx^2}, \quad (1)$$

$$\frac{dV}{dt} = D \frac{DV}{\Delta}, \quad (2)$$

де D – коефіцієнт дифузії; V – концентрація речовини (компонента), що дифундувала; Δ – товщина плівки.

Потрібно відзначити, що значну роль у ТП виготовлення відіграє термічне окислення кремнію. Термічне окислення кремнію протікає за рахунок дифузії окислення компонентів, до границі розділу фаз, де і відбувається реакція окислення. Окислення являє собою нерівноважний процес, рушійною силою якого є відхилення концентрації кисню від рівноваги. Потік цих частинок окислювача для будь-якої точки V -шару оксиду описується законом (1). Окислення під час виробництва підкладок ФК МОЕМС є окремим випадком дифузії. Хімічну корозію шарів і підшарів ФК МОЕМС можна представити у вигляді (3), а за наявності захисних плівок – (4):

$$\frac{dV}{dt} = V_0 e^{\frac{E}{RT}}, \quad (3)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{k_d^k k_p}{k_d + k_p h_0} V_0, \quad (4)$$

де E – енергія активації молекул, що беруть участь у реакції; R – газова постійна; T – абсолютна температура, k_p – константа швидкості хімічної реакції; V_0 – концентрація реагенту (наприклад, кисню) на зовнішній поверхні на межі з газовою фазою; h_0 – товщина покриття; k_d – коефіцієнт дифузії у процесі корозії.

Швидкість випаровування матеріалу підкладки або підшарів ФК МОЕМС можна виразити у вигляді (5):

$$V' = \frac{k_p}{\sqrt{2\pi R}} \Big/ p \sqrt{\frac{M}{T}}, \quad (5)$$

де M – молекулярна вага матеріалу речовини, що випаровуються; p – тиск.

Дифузія та хімічні реакції можуть служити основою для визначення швидкості і, отже, опису кінетики процесів, що розглядаються. Пояснити кінетику термодинамічних параметрів середовища можливо на основі поведінки сукупності частинок, з яких це середовище складається. Мікроскопічний стан сукупності частинок повністю задається канонічними змінними (X). З макроскопічної ж точки зору стан речовини визначається досить обмеженим числом параметрів, достатніх для макроскопічної характеристики середовища. Задання цих параметрів визначає макроскопічний стан середовища. Макроскопічні параметри, в тому числі обсяг речовини, що вступила в реакцію, є функціями канонічних змінних:

$$V_k(X), \text{ причому } k = 1, 2, \dots, n.$$

Таким чином, макроскопічна система зображується за допомогою задання щільності ймовірності змінних $\omega(X, t)$. Ця фазова щільність ймовірності називається фазовим розподілом ймовірностей, або просто фазовим розподілом. Знаючи $\omega(X, t)$, можна обчислити статистичне середнє значення відповідно (6), а також середньоквадратичне відхилення, що проявляється як флуктуація області спостережень порушених шарів (7):

$$V = \int_{(X)} V(X) \omega(X, t) dX, \quad (6)$$

$$DV = \sqrt{(V - \bar{V})^2}. \quad (7)$$

Вирішення завдання побудови математичної моделі передбачає обчислення максимального значення помилок для кожного порядку реакцій і вибір такого порядку, який забезпечить мінімальне значення помилок, комбінація яких унікальна

для кожного окремого ТП.

Для скорочення трудовитрат та зручності аналізу отриманої інформації, за запропонованими математичними моделями, проводиться нумерація кожного окремого ТП для можливості графічної візуалізації результатів моделювання з використанням розробленого програмного засобу (ПЗ), інтерфейс якого наведено на рис. 2.

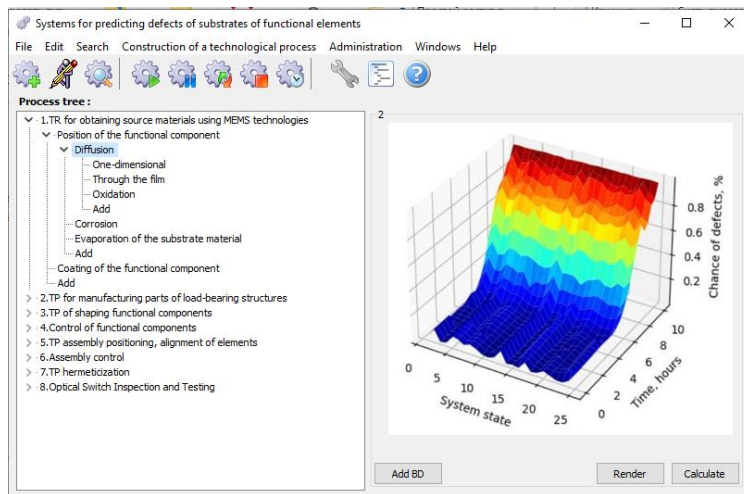


Рисунок 2 – ПЗ для визначення поведінки реакцій під час вибору ТП

За допомогою розробленого ПЗ вдалося знизити трудовитрати на вирішення проблеми прогнозування виробничих дефектів у підкладках ФК МОЕМС, підвищити точність і достовірність одержуваної інформації при розробці ТП виготовлення таких об'єктів у цілому.

У ПЗ реалізовано можливість створення різних за параметрами варіантів ТП, їх зберігання, можливість зміни кожного параметра ТП виготовлення ФК для прогнозування дефектності в умовах виробництва.

Особа, яка приймає рішення, може аналізувати поведінку системи для того ТП, який виходить за межі експериментальних чи розрахункових результатів, але дозволяє судити про стан виробу на етапі його подальшої експлуатації.

Важливим є те, що під час аналізу масиву великого обсягу даних завдяки запропонованому ПЗ можна здійснювати вибір оптимальних варіантів виробу та ТП виготовлення, залежно від різних початкових умов (наприклад: технічних вимог, вимог щодо надійності, класу точності, ресурсу роботи або вартості виробу).

У третьому розділі представлено результати проведення експерименту для побудови моделі впливу параметрів технологічних операцій шліфування та полірування на параметри формоутворення ФК МОЕМС.

Результати моделювання використовуються під час планування ТП виробництва як підкладок ФК, так і мікродзеркал МОЕМС. Моделювання дозволяє визначити величину вихідних параметрів для отримання заданих значень шорсткості зразка, що, в свою чергу, прямо впливає на зниження дефектів у структурі підкладки ФК і на відбиваючу здатність дзеркала.

Для моделювання впливу режимів фінішних технологічних операцій на параметри формування ФК МОЕМС використано повний факторний експеримент. Для проведення експерименту було виконано наступне: отримано та проаналізовано апріорну інформацію; обрані вхідні та вихідні змінні; розроблено математичну модель; визначено метод аналізу даних; проведено експеримент; перевірено статистичні передумови для отриманих експериментальних даних; проведена обробка результатів, а також розроблено рекомендації щодо вибору значень параметрів обробних операцій у процесі формоутворення компонентів МОЕМС.

Найбільш значущими вхідними факторами технологічних операцій формоутворення ФК, що відповідають усім вимогам факторного експерименту, є час обробки зразка – t (хв), швидкість обертання шпинделя – v (об/хв) і зернистість пасти для полірування та шліфування – z (мкм). В усіх проведених дослідах тиск був сталою та однаковою величиною.

Межі зміни факторів: максимальний час обробки матеріалу $t_{max} = 20$ хв, а мінімальний $t_{min} = 10$ хв; швидкість обертання диска – $V_{max} = 40$ об/хв, $V_{min} = 30$ об/хв; зернистість пасти – $Z_{max} = 32$ мкм, $Z_{min} = 2$ мкм. Межі змін факторів перелічені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Межі змін факторів

Фактори	Час обробки (хв)	Швидкість обертання диска (об/хв)	Зернистість паст (мкм)	Шорсткість, (мкм)
Прийняте позначення	t	v	z	Ra
Позначення в експерименті	x_1	x_2	x_3	Y
Верхня межа (1)	20	40	32	–
Основний рівень (0)	15	35	17	–
Нижня межа (-1)	10	30	2	–

На підставі проведених досліджень та аналізу було обрано чинники, від яких залежить результуюча величина шорсткості матеріалу Y (мкм) та складено узагальнену математичну модель залежності (8):

$$Y = f(t, v, z), \quad (8)$$

де t, v, z – фактори, що впливають на величину Y .

Побудовано матрицю проведення повного факторного експерименту. Оскільки істинний вид базової функції невідомий, то для опису поверхні відгуку було використано рівняння (9), що являє собою розкладання цієї функції в ряд:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{ij=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2, \quad (9)$$

де x_i, x_j – змінні фактори для $i=1 \dots n, j=1 \dots n$, при цьому $i \neq j$; b_0, b_i, b_{ij} – коефіцієнти регресії за відповідних змінних, значення яких визначають форму поверхні відгуку.

Перевірка статистичної значущості коефіцієнтів регресії виконувалася за t -критерієм Стюдента. Було визначено дисперсію відтворюваності.

За результатами проведеного експерименту отримано рівняння регресії у кодованому вигляді (10):

$$y = 20,33 - 5,17x_1 + 2,25x_2 + 9,21x_3 + 1,98x_1 x_3. \quad (10)$$

Модель аналізувалася за коефіцієнтом детермінації, який є значимим для рівня значущості 5 % та дорівнює 0,98. Отже, отримане рівняння регресії адекватно описує процес у межах досліджуваної області.

Для отримання поверхні відгуку кожен з трьох факторів було зафіксовано на початковому рівні: $t = 15$ хв, $v = 35$ об/хв, $z = 17$ мкм. З використанням цих значень було розкоровано рівняння регресії та отримано три рівняння з двома факторами.

Для декодування рівнянь було проведено заміну x_i на натуральні значення:

$$x_1 = \frac{t-15}{5} = 0,2t - 3, \quad x_2 = \frac{v-35}{5} = 0,2v - 7, \quad x_3 = \frac{z-17}{15} = 0,0057z - 1,13.$$

Після декодування виразів:

$$y(t, v, z) = 20,33 + 5,17(0,2t - 3) + 2,25(0,2v - 7) + 9,21(0,05z - 1,13) + 1,98(0,2t - 3)(0,0057z - 1,13). \quad (11)$$

Після виконання перетворень і скорочень отримаємо рівняння (12) – (15):

$$y(t, v, z) = 8,7975t + 0,45v + 0,1635z + 0,0198tz - 14,6251 \quad (12)$$

$$y_{t=15}(v, z) = 0,45v + 0,4605z - 5,8273, \quad (13)$$

$$y_{v=35}(t, z) = 0,58652t + 0,1635z - 1,1249, \quad (14)$$

$$y_{z=17}(t, v) = 0,92312t + 0,45v - 1,1249 \quad (15)$$

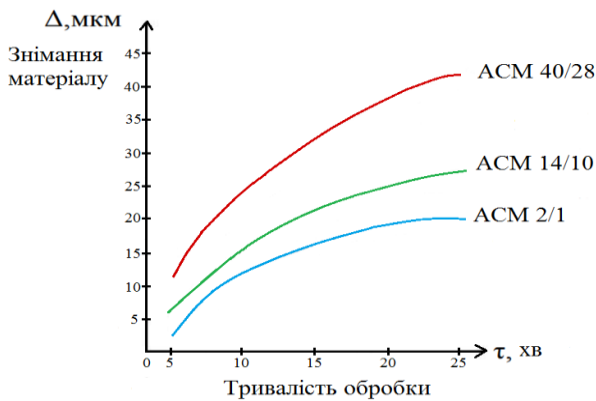


Рисунок 3 – Залежність знімання матеріалу від тривалості обробки

Побудована за отриманими рівняннями група залежностей представлена на рис. 3.

За отриманими графіками проведено оцінку впливу кожного фактору (або комбінації факторів) технологічних операцій на параметри формоутворення ФК МОЕМС.

На рис. 4–6 представлено поверхні відгуків пластин для різної комбінації факторів.

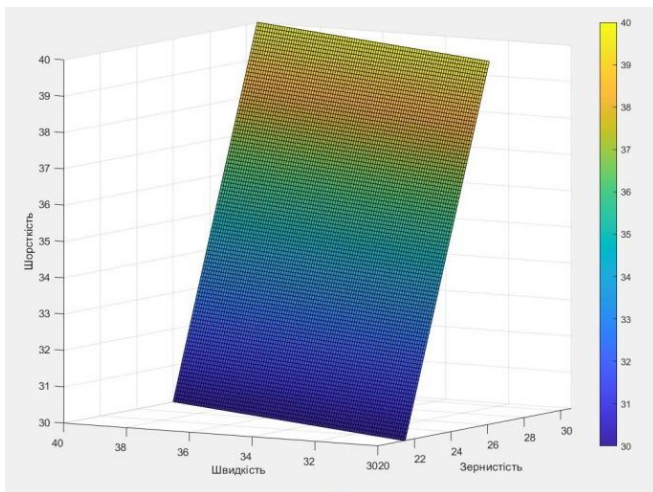


Рисунок 4 – Поверхня відгуку за фіксованого значення часу обробки

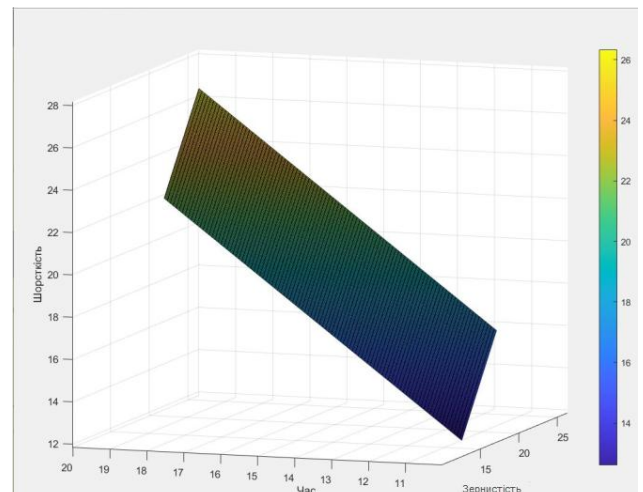


Рисунок 5 – Поверхня відгуку за фіксованого значення швидкості обороту шпинделя

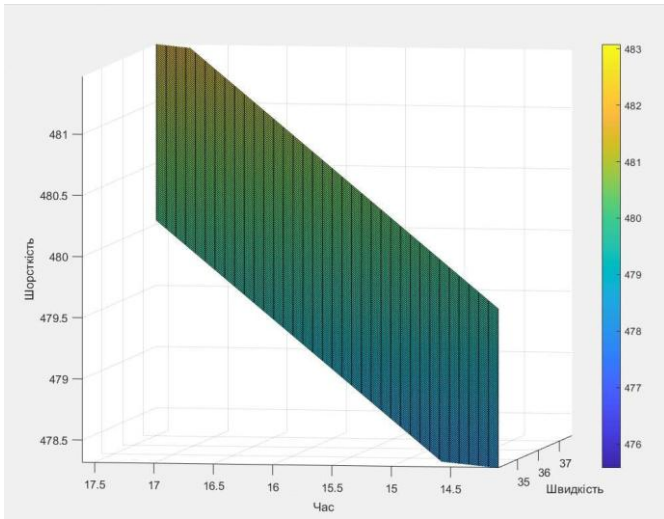


Рисунок 6 – Поверхня відгуку за фіксованого значення зернистості алмазної паст

значення зернистості алмазної паст до та після обробки відповідно (рис. 7, д та рис. 7, е).

На наступному етапі, з використанням результатів комп'ютерного моделювання формоутворення підкладок ФК МОЕМС, отримано експериментальні зразки компонентів.

На рисунку 7 представлено експериментально отримані зразки поверхонь підкладок ФК МОЕМС з кремнію (рис. 7, а – до обробки), результати обробки в режимі за фіксованого значення часу (рис. 7, б); за фіксованого значення швидкості обертання шпинделя до та після обробки відповідно (рис. 7, в та рис. 7, г), а також за фіксованого

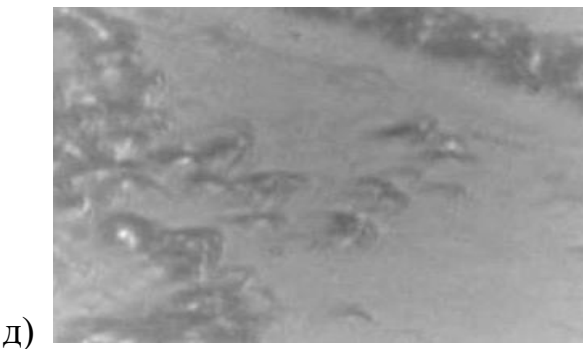
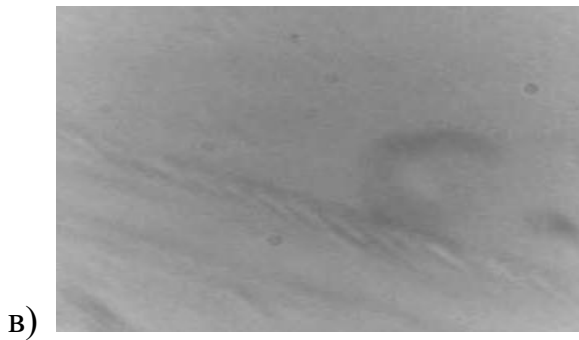
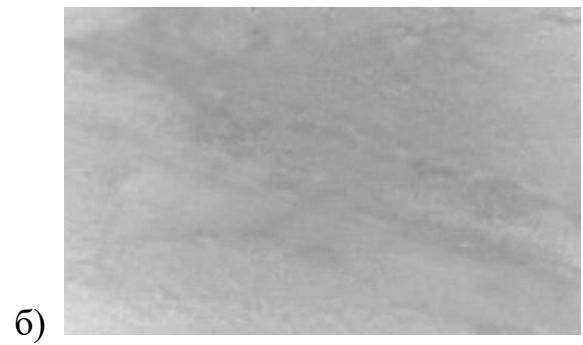
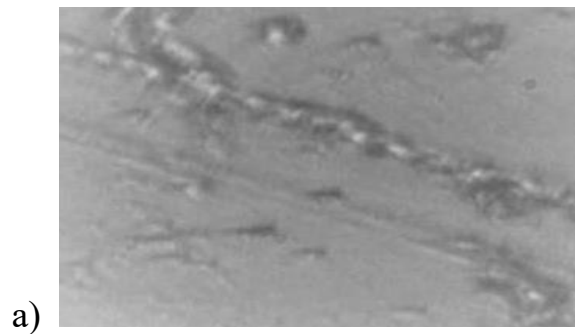


Рисунок 7 – Зображення експериментально отриманих підкладок ФК МОЕМС з кремнію

Таким чином, проведене дослідження дає можливість визначити точні значення параметрів формування підкладок ФК МОЕМС, що, в свою чергу, позитивно впливає на зменшення осередків і розмірів дефектних мікрозародків та, як наслідок, на збільшення коефіцієнту відбиття.

Даний метод дозволяє планувати ТП формоутворення компонентів такого типу, отримані результати можуть бути інтегровані до існуючого ПЗ, що дасть змогу планувати ТП, зменшить трудовитрати на їх впровадження, обробку масивів математичних даних та збільшить точність і відтворюваність результатів.

Четвертий розділ присвячено розробці методу контролю ФК МОЕМС, як етапу ТП їх виготовлення. Розроблений метод реалізовано засобами комп'ютерного моделювання екстремумів смуг на основі відфільтрованих інтерференційних зображень поверхонь ФК МОЕМС.

Для контролю поверхонь ФК МОЕМС запропоновано використовувати фазовий метод, який дозволяє швидко та досить точно (до 0,001 мкм) проводити чисельну оцінку параметрів шорсткості зразків за рахунок виключення супутніх складових у сигналах, аналізувати характеристики поверхонь та отримувати їх тривимірне зображення.

Реальні інтерференційні сигнали можна представити для одновимірного випадку в формі (16):

$$s(x, \Theta) = s_0(x) + s_m(x) \cos[\varepsilon + 2\pi u_0 x + \psi(x)] + n(x), \quad (16)$$

де Θ – вектор параметрів; $S_0(x)$ – фонові складова; $\psi(x)$ – коефіцієнт фазових флуктуацій; $n(x)$ – адитивний білий Гауссівський шум.

У (16) присутня гармонійна інформаційна складова, що свідчить про доцільність обробки інтерференційних сигналів у частотній області.

Сигнал (16) характеризується двома значущими параметрами – частотою u_0 та початковою фазою ε . На практиці має місце вплив апріорно невідомих параметрів $s_m(x)$, $\psi(x)$ та $S_0(x)$, внаслідок чого вигляд сигналу може істотно змінюватися.

Це дає підстави для використання непараметричних методів під час комп'ютерної обробки інтерференційних сигналів на основі апарату перетворення Фур'є: дискретного (17) – у процесі обробки N -елементної послідовності значення сигналу $s(q)$ і дискретного зворотного перетворення (16) для визначення періодичностей у сигналах виду (18):

$$S(q) = \sum_{p=0}^{N-1} s(p) \exp(-j2\pi pq / N), \quad (17)$$

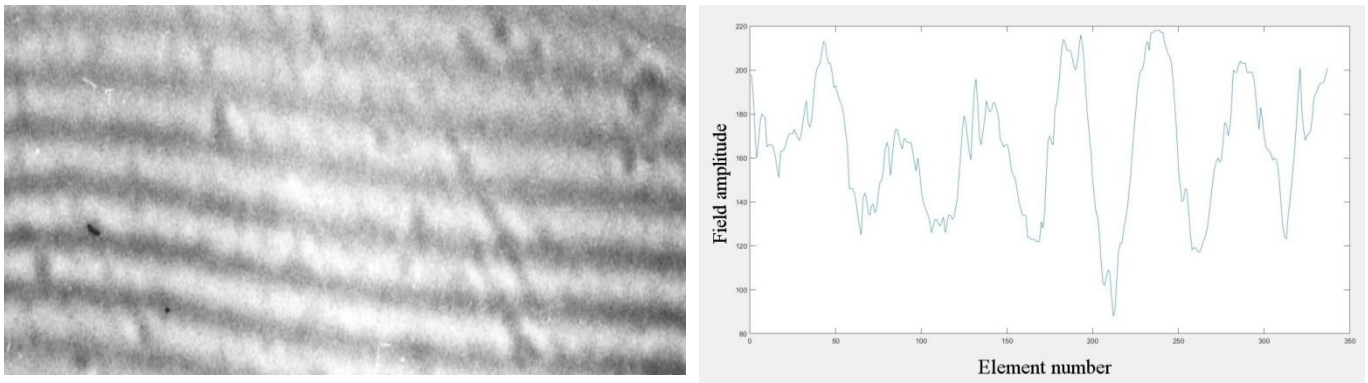
$$s(q) = (1/N) \sum_{p=0}^{N-1} s(p) \exp(-j2\pi pq / N). \quad (18)$$

Дослідний зразок ФК МОЕМС після фінішних операцій було поміщено в інтерферометр та отримано фото та інтерферограму поверхні (рис. 8). На рис. 8, а відзначається присутність у сигналі високочастотних та імпульсних шумів, що впливають на достовірність аналізу. Використано інтерактивне середовище для чисельних розрахунків і візуалізації, яке дозволило сформулювати матрицю цифрових

даних. На рис. 8, б наведено фрагмент розподілу амплітуди інтерференційного поля в одновимірному варіанті в поперечному до смуг напрямку, на рис. 8, в – сигнал із шумовою складовою в багатовимірному варіанті.

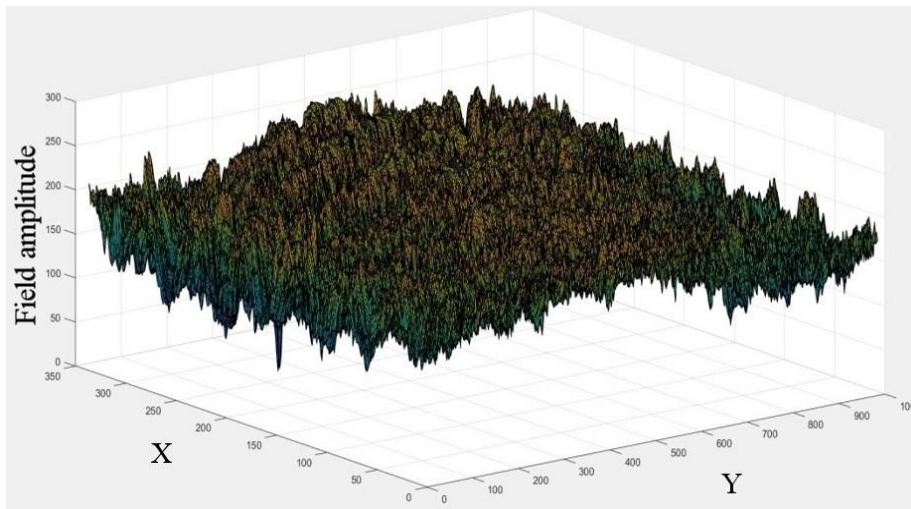
Враховуючи, що сигнал містить значні шумові складові, які ускладнюють знаходження достовірних інтерференційних максимумів отриманої матриці, для мінімізації шумових складових пропонується провести фільтрацію вхідного сигналу з використанням функції Баттерворта. Передавальна функція фільтра нижніх частот Баттерворта n -го порядку характеризується виразом (19):

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \omega^{2n}} \quad (19)$$



а)

б)



в)

Рисунок 8 – Вихідне інтерференційне зображення фрагменту поверхні ФК досліджуваного об'єкту: а) інтерферограма фрагменту поверхні ФК; б) розподіл амплітуди інтерференційного поля в одновимірному варіанті; в) сигнал із шумовою складовою у багатовимірному варіанті

На рис. 9, а показано відфільтрований інтерференційний сигнал фрагменту ФК з використанням фільтра Баттерворта, а на рис. 9, б – виділенні шуми, на рис. 9, в – сигнал інтерференції до фільтрації та після в одновимірному варіанті для порівняння.

На рис. 10, а представлено тривимірний графік розподілу амплітуди

інтерференційного поля на зразку ФК до фільтрації та після фільтрації – рис. 10, б.

Використання фільтру Баттерворта дало змогу згладити амплітуду інтерференційного поля, усунути фонову складову, зменшити кількість шумів в інтерференційних смугах і між ними та збільшити чіткість картини зразка поверхні ФК, тим самим підвищити точність на наступних етапах обробки.

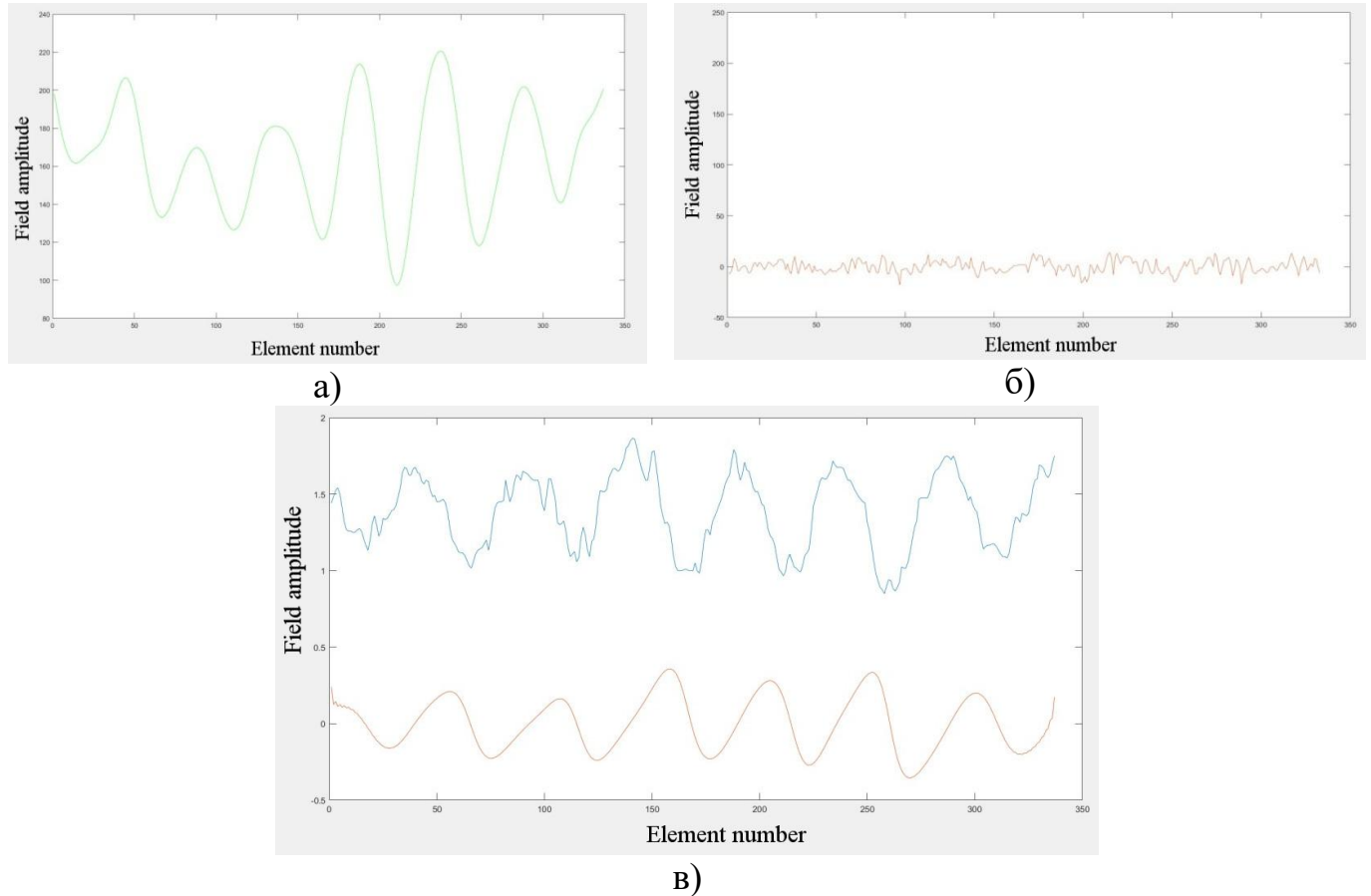


Рисунок 9 – Відфільтрований інтерференційний сигнал фрагменту ФК із використанням фільтру Баттерворта: а) відфільтрований сигнал; б) виділенні шуми; в) сигнал до та після фільтрації

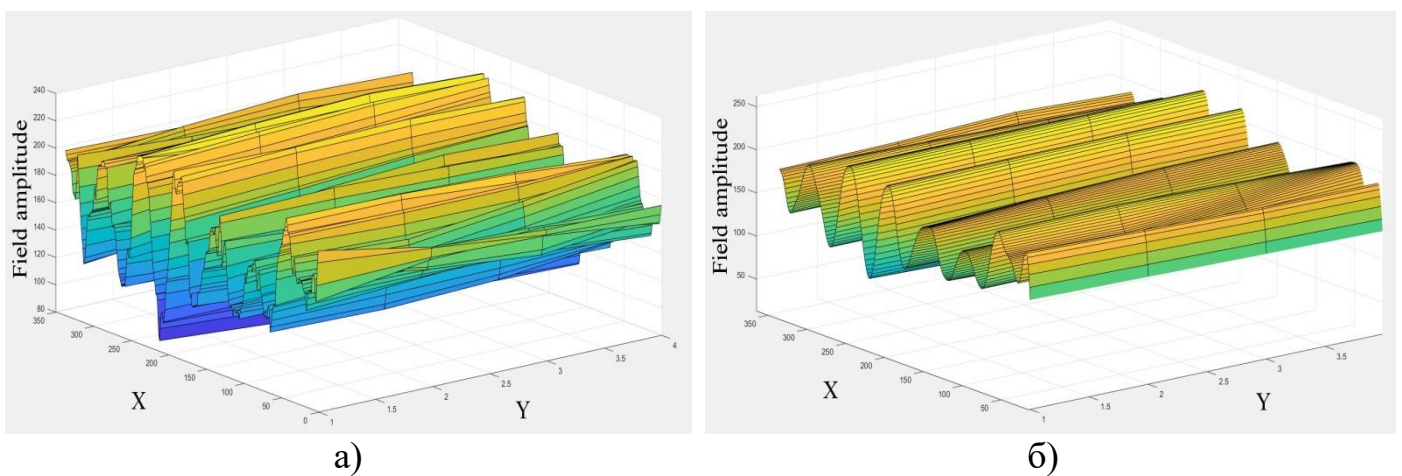


Рисунок 10 – Тривимірний графік розподілу амплітуди інтерференційного поля ФК: а) до фільтрації; б) після фільтрації

У результаті перетворення Гілберта інтерференційного сигналу відновлюється спряжена компонента $S_s(x)$ в аналітичному сигналі (20):

$$z(x) = s_c(x) + js_s(x), \quad (20)$$

де

$$\begin{aligned} s_c(x) &= \operatorname{Re}\{z(x)\} = s_m(x) \cos[\varepsilon + 2\pi u_0 x + \psi(x)], \\ s_s(x) &= \operatorname{Im}\{z(x)\} = s_m(x) \sin[\varepsilon + 2\pi u_0 x + \psi(x)]. \end{aligned}$$

Використавши квадратурні складові з (20) отримуємо оцінку фази інтерференційного сигналу (19), виконуючи операцію (21), що дійсна для усіх значень x :

$$\hat{\varphi}(x) = \hat{\varepsilon} + 2\pi u_0 x + \hat{\psi}(x) = \operatorname{arctg}[s_s(x) / s_c(x)]. \quad (21)$$

В операції (21) значення фази обчислюють з урахуванням всіх частотних складових сигналу, що є суттєвим і значно підвищує точність контролю ФК.

На рис. 11 наведено спектр вхідного сигналу з виділеним корисним сигналом, а на рис. 12 – відфільтрований сигнал та його фазову функцію. Форма сигналу повторює вхідний, отже характеристики фільтру обрано коректно.

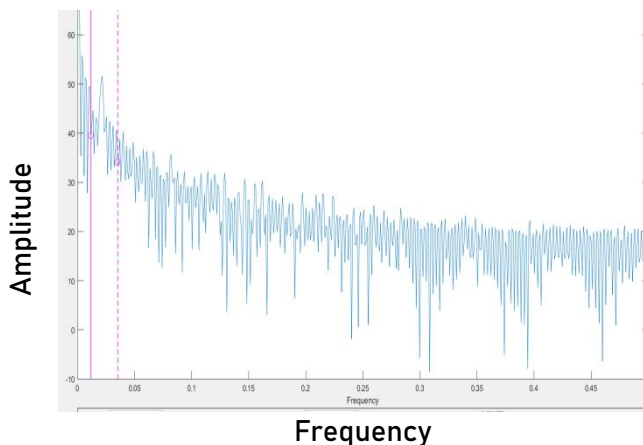


Рисунок 11 – Спектр вхідного сигналу з корисним сигналом

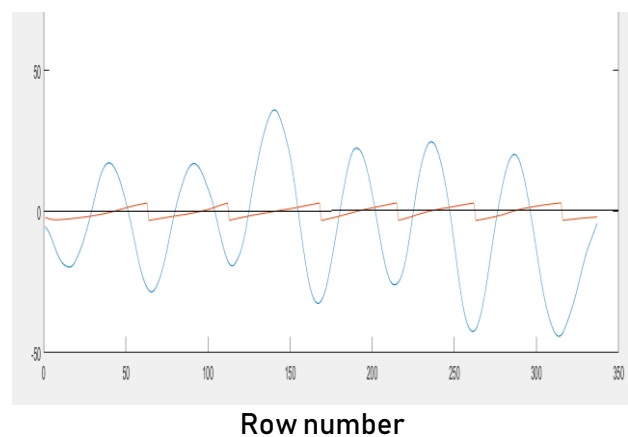


Рисунок 12 – Фазова функція відфільтрованого сигналу

Для визначення інтерференційних максимумів із використанням перетворення Гілберта необхідно співвіднести точку, в якій фазовий знімок дорівнює нулю, та точку відфільтрованого сигналу. Координати цих точок відповідають інтерференційним максимумам з матриці відфільтрованого сигналу.

Отримавши максимуми відфільтрованого сигналу, визначаємо квадратний корінь із середнього квадрату (середнє арифметичне з квадратів набору чисел), вираз (22) для кожної колонки (інтерференційної полоси) відповідно:

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n}(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)}, \quad (22)$$

де $x_1 \dots x_n$ – координата максимуму інтерференційної смуги; n – номер точки в межах інтерференційної смуги.

Отримані результати вказують, що порядок функції Баттерворта (1 порядку) за умови зміни w_n , w_ε було встановлено вірно та визначені частоти знаходяться

в межах від 0,08 Гц до 0,35 Гц.

У результаті проведеного експерименту отримано графічне зображення «траси», що представлена максимумами інтерференційного сигналу, які відповідають

значенням параметрів середніх арифметичних відхилень профілю поверхні ФК МОЕМС (рис. 13).

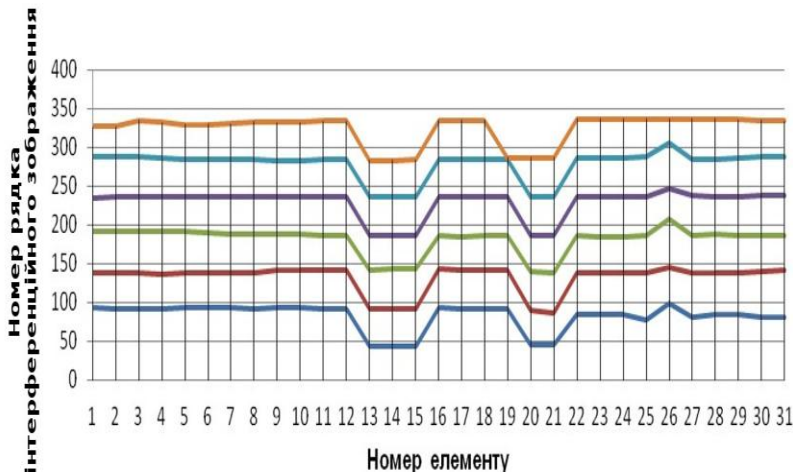


Рисунок 13 – «Траси» максимумів смуг інтерференційного сигналу

Розроблено метод контролю поверхонь ФК МОЕМС за рахунок використання інтерференційного методу, в якому, на відміну від існуючих, запропоновано використовувати смуговий фільтр для усунення супутніх складових в інтерференційному сигналі, що дозволяє підвищити точність і достовірність ТП контролю та знизити трудомісткість.

П'ятий розділ дисертаційної роботи містить опис експериментального макету та результати дослідження зразків, що були отримані з використанням запропонованих методів.

Як було визначено, однією з основних характеристик якості ФК МОЕМС є відбиваюча здатність, або кількість світла, що поширюється в напрямку, протилежному до напрямку передачі корисної інформації на етапі перенаправлення сигналу в світловодах.

Основною причиною зворотних втрат є відбиття від області зміни показника мікрорельєфу дзеркала, яке утворюється через наявність нерівностей на поверхнях ФК. Цей ефект мінімізується на етапах виробництва та контролю (ТП формоутворення), шляхом надання поверхні ФК певної форми та властивостей. Величину діапазону розсіювання оптичної потужності, в залежності від мікрорельєфу мікродзеркал, описують виразом (23) для ідеально гладкої чистої поверхні:

$$\eta = 1 - \exp\left[-\left(\frac{4\pi\sigma \cos\Theta_i}{\lambda}\right)^2\right], \quad (23)$$

де η – відсоток втрат на розсіювання; σ – середньоквадратична шорсткість відбиваючої поверхні ФК; Θ_i – кут падіння променя світла; λ – довжина хвилі.

На рисунку 14 наведено макет для дослідження відбиваючої здатності ФК МОЕМС, який складається з випромінювача 1 та фотоприймача 2 на оптичних позиціонерах 3 для юстування, дослідного зразка – відбивної підкладки 4, кут падіння променя на яку регулюється кроковим двигуном із програмним керуванням 5, та вимірювача оптичної потужності 6. Вся конструкція дослідного макету в робочому режимі захищена корпусом із внутрішнім світлопоглинаючим покриттям.

Були проведені дослідження зразка ФК, що отримані з використанням запропонованих методів.

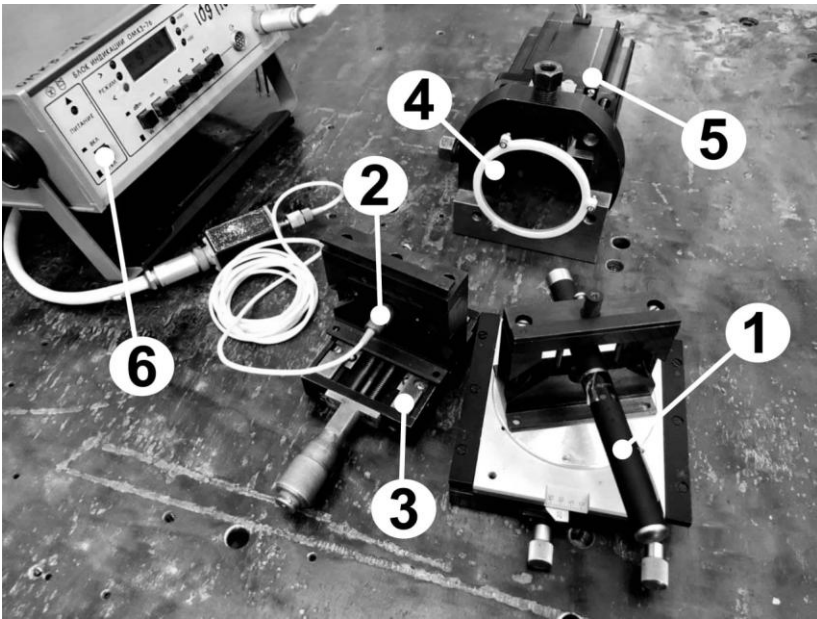


Рисунок 14 – Макет для досліджень відбиваючої здатності ФК МОЕМС

З цього можна зробити висновок, що однією з основних переваг ФК МОЕМС на основі дзеркал є незалежність втрат від довжини хвилі. Втрати, що вносяться дзеркалами, залежать від якості ФК та кута падіння променя.

Отримані результати, промислове впровадження результатів дисертаційної роботи, дозволяють зробити висновок про виконання завдань підвищення якості ФК шляхом розробки технологічного забезпечення технологічного процесу виробництва на основі досліджень фізико-технологічних параметрів і методів контролю елементів МОЕМС-перемикачів.

Визначено величину розсіювання оптичної енергії сигналу η в залежності від шорсткості поверхні σ на різній довжині хвилі λ (рис. 15).

Щоб отримати значення коефіцієнту відбиваючої здатності на розсіювання менше за 10 %, шорсткість поверхні ФК має бути меншою за 57 нм, при цьому розсіювальна здатність майже не залежить від довжини хвилі променя у межах дослідженої ділянки довжини хвиль.

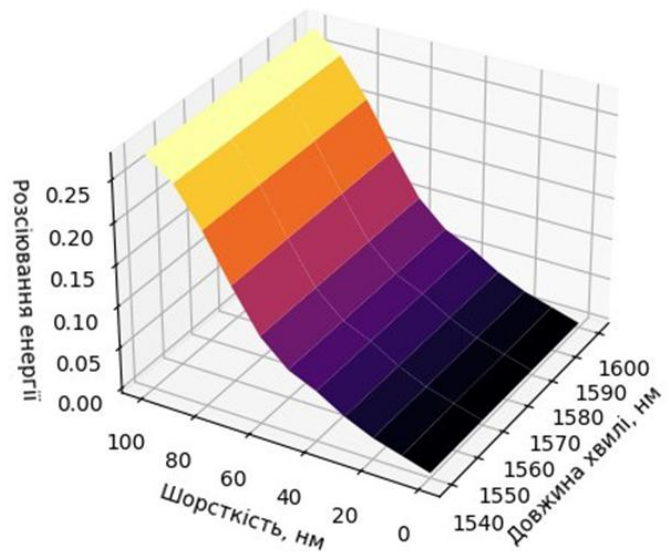


Рисунок 15 – Залежність розсіювання від середньоквадратичної шорсткості ФК

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

У дисертаційній роботі, на підставі отриманих результатів, вирішено актуальну науково-прикладну задачу підвищення якості ФК МОЕМС за рахунок технологічного забезпечення, а також розробки та удосконалення методів прогнозування й оцінки характеристик підкладок ФК МОЕМС.

Проведені дослідження дозволяють зробити такі висновки:

1. Розроблено моделі та метод забезпечення якості підкладок ФК МОЕМС на

етапі виготовлення, які дозволяють прогнозувати стан підкладок ФК з урахуванням технологічних факторів під час їх виготовлення. Розроблено ПЗ для візуалізації процесів у ТП виробництва підкладок ФК, що дає зменшення трудовитрат більше ніж в 1,5 рази.

2. Розроблено модель впливу параметрів технологічних операцій шліфування та полірування на параметри формоутворення ФК МОЕМС, що дозволяє визначити величину вихідних параметрів для отримання заданих чисельних значень шорсткості.

3. Розроблено метод контролю ФК МОЕМС, усунення супутніх складових в інтерференційному зображенні за рахунок використання адаптивного цифрового фільтру, що дозволив підвищити рівень і достовірність відтворення параметрів формоутворення ФК МОЕМС та розширити функціональні можливості методів випробувань і технології контролю.

4. Створено експериментальний макет і проведено дослідження запропонованих методів. У результаті проведених експериментальних досліджень отримано дані, відповідно до яких можна провести побудову й аналіз залежностей вихідних параметрів підкладок ФК МОЕМС на розсіювання оптичної потужності. Визначено, що для отримання значення коефіцієнту відбиваючої здатності на розсіювання менше за 10 %, шорсткість поверхні ФК має бути меншою за 57 нм, при цьому розсіювальна здатність майже не залежить від довжини хвилі променя у межах дослідженої ділянки довжини хвиль, а залежить від якості підкладки ФК МОЕМС.

На основі проведених досліджень розроблено технологічний процес виготовлення підкладок ФК МОЕМС.

5. Результати роботи дисертаційного дослідження були використані ТОВ ТК «Валор» для тестування та технологічного контролю комутаційних компонентів оптоволоконних ліній зв'язку та ПАТ «Хімфармзавод «ЧЕРВОНА ЗІРКА» в оптоволоконних каналах зв'язку, які є складовими технологічних ліній виробництва та контролю лікарських засобів. За результатами дослідження похибка вимірювання параметрів ФК не перевищує 1 %, про що є відповідні акти.

6. Результати роботи отримали дослідне впровадження в «Інституті сцинтиляційних матеріалів» НАН України.

7. Результати роботи зі створення та дослідження підкладок ФК МОЕМС впровадженні та пройшли експериментальну перевірку на базі Центра незалежних досліджень ТОВ НВП «Укрінтех» в атестованій випробувальній лабораторії.

Виготовлені зразки відрізняються від відомих аналогів тим, що їх відбиваюча здатність більша на 9%, причому похибка вимірювань не перевищує 1 % у всьому діапазоні вимірювання.

8. Запропоновані методи було використано під час розробки конструкцій відбивачів для сонячного модуля зі стаціонарним концентратором і колектора з концентратором. Викладені рішення захищені патентами на корисні моделі: № 118295 «Сонячний модуль зі стаціонарним параболоциліндричним концентратором» (від 25.07.2017) та № 138990 «Сонячний колектор з фоклінним концентратором» (від 10.12.2019) відповідно.

9. Результати дисертаційних досліджень впроваджені у навчальному процесі на кафедрі електронних апаратів Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського, на кафедрі інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», а також у науково-дослідних роботах і навчальному процесі на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки ХНУРЕ, що підтверджено відповідними документами.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних:

1. Филипенко О.І. Технологічні дефекти виробництва кремнієвих підкладок для функціональних відбиваючих поверхонь МОЕМС-перемикачів / О.І. Филипенко, **О.О Чала**, М.І. Відешин // *Системи управління, навігації та зв'язку: збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка*. 2017. Вип. 2(42). С. 61–63.

2. Филипенко О.І. Технологічні фактори виробництва, що впливають на якість покриттів дзеркальних поверхонь МОЕМС-перемикачів / О.І. Филипенко, **О.О Чала**, М.І. Відешин // *Наукові нотатки («Технічні науки»)*. 2017. Вип. 57. Луцьк. С. 178–183.

3. Невлюдов І.Ш. Аналіз ефективності використання кремнієвих концентраторних сонячних фотоелементів / І.Ш. Невлюдов, В.О. **Чала О.О.** та інш. // *Системи управління, навігації та зв'язку: збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка*. 2017. Вип. 6(46). С. 85–88.

4. Nevlyudov I.S., Pismenetsky V.O., Frolov A.V., **Chala O.O.**, Gerasimenko M.V., Kulish S.M. Improving The Efficiency Of Silicon Solar Cells With Cylindrical Parabolic Concentrating Collectors// *Journals Telecommunications and Radio Engineering*. 2018. V.77, Issue 2. pp.173–186 (*Scopus*).

5. Невлюдов І.Ш. Метод контролю функціональних поверхонь компонентів мікрооптоелектромеханічних систем (engl.) / І.Ш. Невлюдов, О.І. Филипенко, **О.О. Чала**, І.В. Боцман // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2020. № 3(40). С. 114–123.

6. Невлюдов І.Ш. Математична модель для моделювання процесу формоутворення функціональних поверхонь компонентів мікро-опто-електромеханічних систем (engl.) / І.Ш. Невлюдов, **О.О. Чала**, О.І. Филипенко, І.В. Боцман // *Системи озброєння і військова техніка*. 2020. № 2(62). С. 73–82.

Статті у наукових фахових виданнях України:

7. Невлюдов И.Ш. Технологии микросистемной техники / И.Ш. Невлюдов, В.А. Палагин, **Е.А. Чалая** // *Технология приборостроения*. 2014. № 3. С. 7–10.

8. Невлюдов И.Ш. Технологии микросистемной техники (часть II) / И.Ш. Невлюдов, В.А. Палагин, **Е.А. Чалая** // *Технология приборостроения*. 2015. № 2. С. 5–11.

9. Филипенко А.И. Математическое моделирование методом Монте-Карло зависимости направляющей способности оптических компонентов МОЕМС-

переключателей при изменении их параметров позиционирования // А.И. Филипенко, **Е.А. Чалая**, М.И. Видешин // *Технология приборостроения*. 2016. № 2. С. 32–35.

10. Овчаренко В.Е. Перспективы использования гибких и гибко-жестких конструкций в электронной технике / В.Е. Овчаренко, А.А. Ефименко, Е.В. Токарева, **Е.А. Чалая** // *Технология приборостроения*. 2016. № 3. С. 22–24.

11. Филипенко О.І. Методи контролю структур топології поверхонь матеріалів виробів електронної техніки, МЕМС та МОЕМС / О.І. Филипенко, **О.О. Чала**, Ю.В. Бондаренко // *Технология приборостроения*. 2018. № 2. С. 3–7.

12. **Чала О. О.** Дефектоутворення, як основа Defect Engineering в МЕМС та МОЕМС // *Технология приборостроения*. 2020. № 1. С. 78–81.

Статті у науковому виданні іншої держави:

13. Филипенко А.И. Моделирование зависимости отражающей способности микрзеркал оптоволоконных компонентов от их геометрических параметров / А.И. Филипенко, **Е.А. Чалая**, К.Л. Хрусталева // *Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. № 5(115), 2018, С. 65–71.

14. Nevliudov, I., Omarov, M., Chala, O. (2020). Mathematical model of the development of manufacturing defects in the surface layer of substrates of MOEMS' functional components. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, Vol:21. ICONAT 2020 Special Issue, P.113–127.

Розділ колективної монографії в країні Євросоюзу.

15. Nevliudov I., Omarov M., **Chala O.** The Modeling of Progress of Production Defects In Surface Layers of Functional Optical Components of MOEMS // *Intelligent computer-integrated information technology in project and program management: Collective monograph*. Riga: ISMA, 2020. pp.193–206.

Патенти на корисну модель:

16. Невлюдов І.Ш., Письменецький В.О., Фролов А.В., **Чала О.О.** та інші. Патент на корисну модель № 118295 МПК F24J 2/14 (2006.01) F24J 2/18 (2006.01). Сонячний модуль зі стаціонарним параболоциліндричним концентратором; заявник і власник Харківський національний університет радіоелектроніки. опубл. 25.07.2017, бюл. № 14.

17. Невлюдов І.Ш., Письменецький В.О., Фролов А.В., **Чала О.О.** та інші. Патент на корисну модель № 138990 МПК (2006) F24S 23/70 (2018.01), F24S 10/00. Сонячний колектор з фокліним концентратором; заявник і власник Харківський національний університет радіоелектроніки. опубл. 10.12.2019, бюл. № 23.

Матеріали та тези наукових доповідей:

18. Филипенко О.І., **Чала О.О.** Конструктивно-технологічні фактори втрат в оптичних перемикачах на основі МОЕМС-компонентів // *Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи»*, (Київ, 10-16 березня 2014 р.). С. 75–77.

19. **Чала О.О.** Аналіз факторів втрат в оптичних перемикачах на основі МОЕМС-компонентів // *18 Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь в XXI сторіччі»*, (Харків, 14-16 квітня, 2014 р.), Т. 2, С. 63–64.

20. **Е.А. Чалая.** Потери в оптических микрзеркалах // *19 Міжнародний*

молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь в XXI сторіччі», (Харків, 20-22 квітня, 2015 р.), Т. 2, С. 77–78.

21. **Е.А. Чалая.** Влияние шероховатости поверхности покрытия микрзеркал на отражение и потери // *Всеукраїнська науково-практична конференція «Автоматизація, контроль та управління: пошук ідей та рішень»*, (м. Красноармійськ, 25-29 травня 2015 р.), С. 48–50.

22. Филипенко А.И., **Чалая Е.А.** Помехоустойчивость МОEMS-переключателей с электростатическим управлением // *Международная научно-практическая конференция «Проблемы электромагнитной совместимости перспективных беспроводных сетей святой ЭМС -2015»*, (Харьков, 27 мая 2015 г.), С.153–156.

23. Филипенко А.И., **Чалая Е.А.** Влияние состояния поверхности микрзеркал МОEMS компонентов на их оптические характеристики // *Збірник матеріалів XIV міжнародної науково-технічної конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів»*. – Кременчук, 2015. С. 98-99. (м. Кременчук, 2015 р.), С. 98–99.

24. I. Nevliudov, S. Maksymova, A. Funkendorf, **O. Chala** and K. Khrustalev. Using MEMS to adapt ultrasonic welding processes control in the implementation of modular robots assembly processes. *IEEE XIV-th International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*, Lviv, 2018, pp. 223–226 (**Scopus**).

25. O. Filipenko, **O. Chala** and O. Sychova Some Issues of Dependencies of Loss from Technological Features of Optical Switches for Communication Systems. *IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 599–603 (**Scopus**).

26. O. Filipenko, **O. Chala**, V. Bortnikova, O. Sychova and I. Botsman Impact of Technological Operations Parameters on Moems Components Formation. *IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL)*, Sozopol, Bulgaria, 2019, pp. 371–374 (**Scopus**).

27. V. Bortnikova, V. Yevsieiev, S. Maksymova, I. Nevliudov, **O. Chala** and K. Kolesnyk Mathematical Model of Equivalent Stress Value Dependence from Displacement of RF MEMS Membrane. *IEEE XVth International Conference on the Perspective Technologies and Methods i MEMS Design (MEMSTECH)*, Polyana, Ukraine, 2019, pp. 83–86 (**Scopus**).

АНОТАЦІЯ

Чала О. О. Технологічне забезпечення якості підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі підвищення якості ФК (функціональних компонентів) МОЕМС (мікроелектромеханічних систем) за рахунок технологічного забезпечення, розробки

та удосконалення методів прогнозування й оцінки характеристик підкладок ФК МОЕМС. Розроблено моделі та метод забезпечення якості підкладок ФК МОЕМС, які дозволяють прогнозувати стан підкладок ФК під впливом технологічних факторів під час їх виготовлення. Розроблено модель впливу параметрів технологічних операцій шліфування та полірування на параметри формоутворення ФК МОЕМС, що дозволяє визначити величину вихідних параметрів для отримання заданих чисельних значень шорсткості. Розроблено технологічний процес контролю підкладок ФК МОЕМС, що направлений на підвищення точності та відтворюваності інформації, зниження трудомісткості. Створено експериментальний макет і проведено дослідження запропонованих методів. У результаті проведених експериментальних досліджень отримано дані, які дали змогу дати оцінку вплив параметрів ФК МОЕМС-перемикачів на розсіювання оптичної потужності. Отримано результати, відповідно до яких можна провести побудову й аналіз залежностей вихідних параметрів підкладок ФК МОЕМС на розсіювання оптичної потужності. На основі проведених досліджень розроблено технологічний процес виготовлення підкладок ФК МОЕМС.

Ключові слова: мікрооптоелектромеханічні системи, функціональний компонент, підкладка, фізико-технологічна модель, модель прогнозування, формоутворення, неруйнівний контроль, технологічний процес.

АННОТАЦИЯ

Чалая Е. А. Технологическое обеспечение качества подложек функциональных компонентов микрооптоэлектромеханических систем. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 – технология, оборудование и производство электронной техники. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2021.

Диссертационная работа посвящена актуальной научно-прикладной задаче повышения качества ФК (функциональных компонентов) МОЭМС (микрооптоэлектромеханических систем) за счет технологического обеспечения, разработки и усовершенствования методов прогнозирования и оценки характеристик подложек ФК МОЭМС. Разработаны модели и метод обеспечения качества подложек ФК МОЭМС, которые позволяют прогнозировать состояние подложек ФК под влиянием технологических факторов при их изготовлении. Разработана модель влияния параметров технологических операций шлифовки и полировки на параметры формообразования ФК МОЭМС, что позволяет определить величину исходных параметров для получения заданных численных значений шероховатости. Разработан технологический процесс контроля подложек ФК МОЭМС, направленный на повышение точности и воспроизводимости информации, снижение трудоемкости. Создан экспериментальный макет и проведено исследование предложенных методов. В результате проведенных экспериментальных исследований получены данные, которые позволили дать оценку влияния параметров ФК МОЭМС-переключателей на рассеяние оптической мощности. Получены результаты, в соответствии с которыми можно провести построение и анализ зависимостей выходных параметров подложек ФК

МОЭМС на рассеяние оптической мощности. На основе проведенных исследований разработан технологический процесс изготовления подложек ФК МОЭМС.

Ключевые слова: микрооптоэлектромеханические системы, функциональный компонент, подложка, физико-технологическая модель, модель прогнозирования, формообразования, неразрушающий контроль, технологический процесс.

ABSTRACT

Chala O. O. Technological quality assurance of surfaces of functional components of microoptoelectromechanical systems. – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.27.06 – Technology, equipment and production of electronics. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2021.

The dissertation work is dedicated to the actual scientific and applied task of improving the quality of FC (functional components) MOEMS (micro-optoelectromechanical systems) through technological support, development and improvement of methods for predicting and evaluating the characteristics of FC MOEMS substrates. Models and a method for ensuring the quality of MOEMS FC substrates have been developed, which make it possible to predict the state of PC substrates under the influence of technological factors during their manufacture. For the first time, a physical-technological model for predicting substrate defects of functional components of micro-optoelectromechanical systems has been proposed, which takes into account the quality of the substrate layer and makes it possible to predict the parameters of technological processes that can lead to the appearance of technological defects in substrates, as well as to correct the technological processes of their manufacture. A model of the influence of the parameters of technological operations of grinding and polishing on the parameters of the formation of FC MOEMS has been developed, which makes it possible to determine the value of the parameters for obtaining the specified numerical values of the roughness. A technological process for controlling MOEMS FC substrates has been developed and investigated, aimed at increasing the accuracy and reproducibility of information, and reducing labor intensity. The method takes into account the relationship between the thickness of the layer for removing defects in the functional components of micro-optoelectromechanical systems and the factors of shaping: speed, time and granularity of the polishing paste and their combined effect. This makes it possible to determine the parameters of the surfaces of the functional components of micro-optoelectromechanical systems. It is proposed to use the interference method in the technological quality control of functional micro-optoelectromechanical systems. This is realized by eliminating the accompanying components in the images using the proposed adaptive filter. This makes it possible to increase the reliability of the reproduction of the parameters of shaping of the functional components of micro-optoelectromechanical systems and to expand the functionality of the control technology methods. A method for identifying the extrema of interference fringes of images in the technological process of monitoring the surfaces of functional components of micro-optoelectromechanical systems is proposed, which differs in the determination of the phase function from the ratio of the useful and complexly coupled with Hilbert signal components, which makes it possible to increase the reliability

of determining the parameters. An experimental model was created and the proposed methods were studied. As a result of the experimental studies, data have been obtained according to which it is possible to construct and analyze the dependences of the parameters of the MOEMS FC substrates on the scattering of optical power. It was determined that to obtain the value of the coefficient of reflectance for scattering less than 10%, the surface roughness of the FC should be less than 57 nm, while the scattering ability is almost independent of the wavelength of the beam within the investigated wavelength region, but depends on the quality of the substrate of the MOEMS FC. The results are obtained, in accordance with which it is possible to construct and analyze the dependences of the parameters of the MOEMS FC substrates on the scattering of optical power. On the basis of the studies carried out, a technological process for the fabrication of MOEMS FC substrates has been developed.

Keywords: microoptoelectromechanical systems, functional component, surfaces, physical-technological model, forecasting model, formation, non-destructive testing, technological process.