

Голові спеціалізованої вченої ради
Д 64.052.04
у Харківському національному
університеті радіоелектроніки,
просп. Науки, 14, м. Харків,
61166

ВІДГУК

офіційного опонента,

доктора технічних наук, професора, професора кафедри автоматизації та інформаційно-управляючих систем Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського МОН України

Притчина Сергія Емільовича

на дисертаційну роботу **Чалої Олени Олександрівни**

«Технологічне забезпечення якості підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем»,

подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

В комунікаційних мережах та електронній техніці мікрооптоелектромеханічні (МОЕМС) перемикачі є одними з ключових пристроїв, оскільки вони відіграють особливу роль у контролі, моніторингу, захисті, управлінні та інших функціях. Використання МОЕМС перемикачів є альтернативним підходом до мініатюризації і поліпшення характеристик апаратури зв'язку.

Для отримання функціональних відбиваючих покриттів для МОЕМС перемикачів з високоточними заданими електрофізичними та оптичними параметрами, безвідмовною, довгостроковою, стабільною, коректною роботою в часі, а також високою надійністю окремих компонентів і вузлів, необхідно розглядати дефектоутворення таких компонентів через призму фізико-хімічних перетворень та реакцій.

Таким чином можна виділити декілька основних механізмів виникнення виробничих дефектів функціональних компонентів МОЕМС, розвиток яких пов'язаний з перетворенням мікро- і макроструктури вихідних матеріалів, що відбуваються при виробництві та експлуатації функціональних компонентів МОЕМС.

У зв'язку з цим, є відкритим науково-практичне завдання прогнозування та управління дефектоутворенням шарів та підшарів функціональних компонентів МОЕМС, яке вирішується за допомогою контролю параметрів експлуатації та розвитку закладених при виробництві дефектів, які в свою чергу не завжди погіршують параметри мікросистем, а навпаки з часом можуть, навіть, при правильних підходах та певних умовах експлуатації, покращуватися.

Тому на етапі виробництва вихідних матеріалів, малоімовірною представляється, можливість відстежити дефектність структур і залежність фізико-технологічних параметрів, які безпосередньо впливають на якість і відповідність вихідних характеристик МОЕМС компонентів, коли особливе обмеження накладає ще й фактор кінетики деградаційних процесів в матеріалах під час експлуатації виробу.

Саме прогнозування та управління технологічними дефектами при виготовленні кремнієвих структур є досить **перспективним та актуальним напрямком** у розробці технологічних процесів виготовлення МЕМС та МОЕМС. А можливість управління даними процесами стала основою розвитку перспективного наукового напрямку в технологіях виробництва напівпровідників, матеріалів і приладів електронної техніки, що

ХНУРЕ
Вхідний № 01/27-284
" 23 " 02 2021 р.

базується на управлінні і прогнозуванні процесів дефектоутворення. Розвиток цього напрямку в Україні є нагальною необхідністю.

Дослідження, результати яких викладені у дисертаційній роботі, проводилися 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).

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень та висновків

2.1 У вступі обґрунтовано актуальність тематики, що досліджувалася, сформульовано мету і задачі дослідження, вказано об'єкт, предмет та методи досліджень, зазначено наукову новизну та практичне значення, наведено відомості про публікації за темою дисертації про апробацію результатів досліджень, а також вказано особистий внесок здобувача у наукових працях.

2.2 *Перший розділ* присвячено огляду літератури та методів розв'язання поставлених задач. Розглянуто аналіз стану проблеми технологічного забезпечення якості підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем, сфери застосування та конструктивно-технологічні особливості МОЕМС перемикачів оптичного сигналу. Проведено аналіз технологічних процесів виготовлення оптичних перемикачів МЕМС та обґрунтовано вимоги до якості підкладок функціональних компонентів МОЕМС.

2.3 У *другому розділі* розроблена фізико-технологічна модель прогнозування дефектів підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем. Проведено постановку задач на дослідження, фізико-технологічних процесів виготовлення підкладок компонентів МОЕМС.

Визначено перелік виробничих дефектів підкладок ФК МОЕМС та розроблено фізико-технологічну модель їх прогнозування. Слід зазначити, що автором запропоновано та розроблено програмне забезпечення для розрахунку математичних моделей. Запропонована програма дає можливість технологу проводити розрахунок та розробку технологічного процесу за критерієм дефектів, що мають місце в технологічних процесах виробництва підкладок функціональних компонентів МОЕМС перемикачів.

2.3 У *третьому розділі* для побудови моделі формоутворення підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем, визначено ступені впливу факторів технології формоутворення та проведено експериментальні дослідження цих параметрів. В розділі розроблено математична 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.

2.4 *Четвертий розділ*, для підтвердження результатів теоретичних досліджень, виконаних на попередніх етапах роботи, присвячений розробці методу неруйнівного контролю якості функціональних компонентів, шляхом усунення супутніх складових в інтерференційному зображенні, за рахунок використання запропонованого адаптивного

фільтру. Для усунення супутніх складових в сигналах запропоновано використовувати спосіб, що відрізняється від інших можливістю визначення 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.

2.5 У *п'ятому* розділі проведено експериментальну перевірку фізико-технологічних параметрів якості підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем на розробленому макеті для дослідження відбиваючої здатності. Визначено, що для отримання коефіцієнту втрат на 1550 нм довжині хвилі на розсіювання менш 10%, шорсткість поверхні ФК повинна бути менше 57 нм. Проведено розробку технологічного процесу виготовлення підкладок функціональних компонентів МОЕМС на основі запропонованих методів.

Наведено промислове впровадження результатів дисертаційної роботи для забезпечення якості підкладок функціональних компонентів.

Висновки достатньо повно відображають зміст отриманих результатів дисертаційної роботи.

У додатках наведено комплект документів на технологічний процес виготовлення підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем, акти впровадження та список опублікованих автором праць за темою дисертаційної роботи.

3. Новизна результатів досліджень та їх теоретичне значення

3.1 Найбільш важливі наукові нові наукові результати, що отримані у процесі вирішення дисертаційних завдань, такі:

– 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.

3.2 Отримані наукові результати відзначаються новизною, та дають можливість підвищення якості функціональних компонентів МОЕМС, шляхом розробки технологічного забезпечення їх виробництва на основі досліджень фізико-технологічних параметрів та методів контролю елементів МОЕМС перемикачів. Наведені дисертантом результати досліджень мають достатнє теоретичне обґрунтування та є внеском у теорію та практику вирішення завдань щодо забезпечення якісних показників виробництва

підкладок для функціональних компонентів МОЕМС.

4. Достовірність наукових результатів і висновків

Основні наукові результати та висновки дисертаційної роботи повністю обґрунтовані. Їх достовірність забезпечується коректністю математичних постановок задач, перевіркою результатів на модельних прикладах. результати були протестовані за допомогою відповідних обчислювальних експериментах.

Дисертантом було використано методи математичного та комп'ютерного моделювання – для розробки математичної моделі прогнозування виробничих дефектів і візуалізації отриманих результатів; методи планування експерименту та регресійного аналізу, методи комп'ютерної обробки даних, цифрового комп'ютерного моделювання ТП – для розробки технології формоутворення; інтерактивне середовища моделювання для розрахунку числових масивів даних, інтерференційний метод з використанням рядів Фур'є та адаптивної фільтрації – для розробки ТП контролю.

5. Практичне значення результатів

5.1 Практична цінність роботи полягає у реалізації на практиці у вигляді дослідних зразків і технологічної документації, які складають основу для технологічного забезпечення якості підкладок ФК МОЕМС у складі МОЕМС, а саме:

- розробці дослідних зразків підкладок ФК для оптичного МЕМС перемикача;
- розробці та відпрацюванні ТП формоутворення ФК МОЕМС;
- розробці ТП контролю якості ФК за рахунок використання інтерференційного методу;
- розробці ТП для забезпечення якості ФК МОЕМС на етапі їх виробництва.

Дослідження отримали розширення у суміжній галузі та втілені у розробці конструкцій дзеркал-відбивачів для пристроїв альтернативної енергетики. Запропоновані рішення захищені патентами України 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).

5.2 Практичне значення роботи підтверджується тим, що результати, отримані в дисертаційній роботі, **впроваджено** на ТОВ ТК «Валор», ПАТ «ХІМФАРМЗАВОД «ЧЕРВОНА ЗІРКА», на підприємстві ТОВ «НВП «Укрінтех», в Інституті сцинтиляційних матеріалів НАН України, 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, про що свідчать наявні акти впровадження.

6. Рекомендації щодо використання результатів дисертації

Результати роботи можуть бути використані в якості наукової основи для розробки та впровадження нових методів проектування та виготовлення МЕМС та МОЕМС пристроїв з метою забезпечення якості їх функціональних компонентів. Наукові та практичні результати, отримані в дисертаційній роботі, можуть бути використані:

- на підприємствах-виробниках мікроелектронної та мікрооптоелектронної апаратури як побутового, так і спеціального призначення;
- у освітньому процесі при підготовці фахівців у галузі електроніки, телекомунікацій та радіотехніки.

Результати досліджень рекомендовано до застосування в Україні на підприємствах в галузі радіоелектронного приладобудування, космічного та авіаційного приладобудування, а також в суміжних галузях, наприклад, таких як альтернативна енергетика, зокрема геліотехніка та медицина.

7. Стиль, оформлення дисертації, автореферату. Повнота публікацій та відповідність спеціальності

7.1 Дисертація написана досить чіткою, лаконічною мовою, з логічним способом викладення матеріалу, що в достатній мірі розкриває загальний науково-технічний рівень авторки. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, переліку джерел посилань (112 найменувань) та додатків.

За стилем та оформленням дисертація та автореферат **відповідають вимогам державного стандарту**, мають чітку та логічну структуру. Стиль викладення доказовий.

7.2 Автореферат розкриває суть і зміст дисертаційної роботи, основні наукові положення, практичну цінність та висновки.

7.3 Тематика дисертації, її форма і зміст відповідають паспорту спеціальності 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки.

7.4 За матеріалами дисертації було опубліковано 27 наукових праць, у тому числі 12 статей у наукових фахових виданнях України (серед яких 6 внесені до міжнародних наукометричних баз, в тому числі 1 статтю внесено в базу Scopus), 2 статті видані у інших державах, 1 розділ колективної монографії в державі Євросоюзу, 2 патенти України на корисну модель. Матеріали було апробовано та обговорено на різного рівня конференціях та форумах, викладено в 10 тезах доповідей у збірниках праць, серед них 4 реферовано в наукометричній базі Scopus.

Нові положення, що виносяться на захист, **досить повно відображені** в наукових працях здобувачки, опублікованих у необхідному обсязі у фахових виданнях України та матеріалах конференцій.

7.5 Такий висновок, у сукупності із матеріалом, викладеним у дисертаційній роботі та авторефераті, дозволяють вважати одержані Чалою О.О. в дисертації наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів обґрунтованими і достовірними та такими, що відповідають паспорту спеціальності 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки.

8. Недоліки та зауваження

8.1 До дисертаційної роботи Чалої О.О. є окремі **зауваження**:

– з тексту першого розділу дисертації не досить чітко зрозуміло, чи розглядається можливість виготовлення функціональних компонентів для МЕОМС з інших матеріалів окрім кремнію. Бажано б було розширити та доповнити перелік матеріалів, з яких може бути виготовлена підкладка компонентів, що досліджується;

– у другому розділі (таблиця 2.1 – Перелік виробничих дефектів підкладок ФК МОЕМС) вказано що наступні дефекти: раковини, наліт, нарости, кратери, підтоки, наліт виникають через наявність дислокацій, але дислокації в кристалічних решітках є точковими (нульмірними) дефектами, а мова йде про поверхневі та об'ємні дефекти;

– у другому розділі роботи, при побудові фізико-технологічної моделі та обчисленні максимального значення помилок для кожного порядку реакцій і його вибору, не наведено основні етапами розробки програмного засобу та реалізації баз даних технологічних параметрів;

– в третьому розділі роботи недостатньо повно виконано аналіз похибок вимірювань;

– в четвертому розділі дисертації рисунок 4.13 має назву «Фазовий рисунок...», а рисунок 4.17 «Фазовий знімок...», бажано використовувати одноманітну термінологію, адже на рисунках представлені одні і ті ж процеси;

– наявні деякі порушення вимог щодо оформлення друкованого тексту на сторінці, наприклад стор. 91, 98, 102, 112 дисертації;

– також до недоліків слід віднести наявність в тексті дисертації складних речень, які створюють певні труднощі для сприйняття його семантичного змісту.

8.2 У авторефераті дисертаційної роботи здобувача також присутні деякі **недоліки**, а саме

– в тексті автореферату доцільно б було навести опис основних технологічних операцій виготовлення ФК МОЕМС заявленої технології;

– на рисунках 4, 5 (стор. 10) та рисунку 6 (стор) 11 відсутні позначення одиниць вимірювання на осях графіків;

– з автореферату не зрозуміло етапи та порядок побудови експериментальної моделі процесу формоутворення ФК МОЕМС (вираз 10), лише вказано, що вона виконана за результатами повного факторного експерименту;

– в списку опублікованих праць за темою дисертації під номером 23 двічі повторюється назва міста, де було проведено Міжнародну науково-технічну конференцію.

Зроблені зауваження не знижують загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи та якість в цілому, як глибокого та актуального дослідження, і не впливають на достовірність і новизну результатів.

9. Загальні висновки.

Незважаючи на вказані незначні недоліки, вважаю, що дисертація є **завершеною працею**, містить нові наукові та практичні результати, що в сукупності розв'язують задачу технологічного забезпечення якості підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем.

За актуальністю теми, ступенем обґрунтованості та достовірності результатів, науковою новизною та практичним значенням представлена дисертаційна робота відповідає пунктам 9, 11-14 «Порядку присудження наукових ступенів» (постанова КМУ від 24.07.2013 р. № 567) щодо кандидатських дисертацій, та пункту 3 паспорта спеціальності, а її автор Чала Олена Олександрівна заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інформаційно-управляючих систем
Кременчуцького національного університету
ім. Михайла Остроградського

С. Е. Притчин

