

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЧАЛА ОЛЕНА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК. 621.3.316.543.2

ДИСЕРТАЦІЯ

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПІДКЛАДОК
ФУНКЦІОНАЛЬНИХ КОМПОНЕНТІВ
МІКРООПТОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки

технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ О. О. Чала

Науковий керівник: Филипенко Олександр Іванович, доктор технічних
наук, професор.

Цей примірник дисертаційної роботи
ідентичний за змістом з іншими,
поданими до спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04

Вчений секретар спецради Д 64.052.04

Одаренко Є.М.

Харків 2021

АНОТАЦІЯ

Чала О. О. Технологічне забезпечення якості підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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.

Одним з перспективних напрямків досліджень технології, обладнання та виробництва електронної техніки є розвиток мікрооптоелектромеханічних систем та технології їх виготовлення. Особливою галуззю використання даних систем є телекомунікаційні пристрої. Такі технології дозволяють створювати мініатюрні вироби з заданими функціональними, часовими і надійнісними характеристиками.

Але залишаються протиріччя між необхідністю подальшого підвищення якості мікрооптоелектромеханічних компонентів, використання перспективних варіантів реалізації технологічних процесів і операцій їх виробництва та обмеженістю відомих підходів до забезпечення їх якості та контролю. Тому дисертація направлена на вирішення актуального науково-прикладного завдання, а саме підвищення якості функціональних компонентів мікрооптоелектронних систем (МОЕМС), шляхом розробки технологічного забезпечення процесу (ТП) їх виробництва на основі дослідження фізико-технологічних параметрів і методів контролю підкладок мікрооптичних перемикачів.

Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, переліку джерел посилання та трьох додатків.

Представлена робота належить до галузі науки, яка вирішує питання розробки обладнання, що призначене для промислового виробництва приладів,

елементів, матеріалів електронної техніки чи виробництва приладів для вимірювання характеристик, параметрів електронної техніки, зокрема технологічного забезпечення якості підкладок ФК МОЕМС.

Обраний напрямок досліджень та отримані в дисертації результати відповідають паспорту спеціальності 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки за наступними пунктами:

- нові технологічні процеси й апаратура для промислового виробництва елементів функціональної електроніки (транзисторів, мікросхем, збірок, фотоелементів, п'єзоперетворювачів, термоелементів, сенсорних елементів);

- розроблення нових технологічних процесів для промислового виробництва приладів електронної техніки, приладів контролю (вимірювання) параметрів електронної техніки.

Основна мета роботи полягає в підвищенні якості функціональних ФК МОЕМС, шляхом розробки технологічного забезпечення їх виробництва, на основі досліджень фізико-технологічних параметрів та методів контролю елементів МОЕМС перемикачів.

Для досягнення поставленої мети було вирішено наступні науково-прикладні задачі:

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

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

- розроблено 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;

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

- розроблено та проведено дослідження методу контролю поверхонь підкладок ФК МОЕМС з використанням запропонованої технології контролю;

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

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.

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.

Результати роботи складають підґрунтя для подальшого розвитку технологічних процесів виробництва підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем та методів контролю параметрів їх якості.

Результати знайшли практичну реалізацію та впровадження в ТОВ ТК «Валор», ПАТ «ХІМФАРМЗАВОД «ЧЕРВОНА ЗІРКА», на ТОВ «НВП «Укрінтех», Інституті сцинтиляційних матеріалів НАН України.

Результати роботи використовуються в освітньому 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 Харківського національного університету радіоелектроніки, що підтверджено відповідними документами.

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

ABSTRACT

Chala O. O. Technological quality assurance of substrates of functional components of microoptoelectromechanical systems. – Qualifying scientific work on the rights of the 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.

One of the promising areas of research in technology, equipment and production of electronic equipment is the development of microoptoelectromechanical systems and technology for their manufacture. A special area of use of these systems are telecommunications devices. Such technologies allow to create miniature products with the set functional, time and reliable characteristics.

But there are contradictions between the need to further improve the quality of micro-optoelectromechanical components, the use of promising options for the implementation of technological processes and operations of their production and the limited known approaches to ensuring their quality and control. Therefore the dissertation is directed on the decision of an actual scientific and applied task, namely increase of quality of functional components of microoptoelectronic systems, by development of technological maintenance of process of their manufacture on the basis of research of physical and technological parameters and methods of control of substrates of microoptical switches.

The work consists of an introduction, five chapters, conclusions, a list of reference sources and three appendices.

The presented work belongs to the field of science, which solves the development of equipment intended for industrial production of devices, elements, materials of electronic equipment or production of devices for measuring characteristics, parameters of electronic equipment, in particular technological quality

assurance of substrates of functional components of microoptoelectromechanical systems.

The chosen direction of research and the results obtained in the dissertation correspond to the passport of the specialty 05.27.06 – technology, equipment and production of electronic equipment on the following points:

- new technological processes and equipment for industrial production of elements of functional electronics (transistors, chips, assemblies, photocells, piezoelectric transducers, thermocouples, sensor elements);
- development of new technological processes for industrial production of electronic equipment, control devices (measurement) of electronic equipment parameters.

The main purpose of the work is to improve the quality of functional components of MOEMS, by developing technological support for their production, based on research of physical and technological parameters and methods of control of elements of MOEMS switches.

To achieve this goal, the following scientific and applied problems have been solved:

- the structure and existing technologies of production of components of MEMS-optical switches, their parameters, production defects caused by features of TP, and technological possibilities of improvement of their characteristics are analyzed;
- the influence of the quality of FC MOEMS substrates on the characteristics of mirrors and the features of the effects and losses they bring and depend on the manufacturing TP is analyzed;
- the physical and technological model of parameters of surfaces of substrates of FC MOEMS for forecasting of qualitative characteristics and emergence of production defects of a surface layer of substrates of such components and the software for modeling of the specified processes is developed;
- the technology of forming substrates of reflecting FC for MEMS-optical switches for maintenance of the set values of roughness is developed;

- the research of a method of control of surfaces of substrates of FC MOEMS with use of the offered control technology is developed and carried out;

- approbation of the developed models and method of quality assurance of components of MEMS-optical switches, their experimental research and practical recommendations on technological maintenance of the necessary level of quality are carried out.

In the process of solving problems in accordance with the purpose of research, the following scientific results were obtained:

- for the first time a physical-technological model of prediction of substrate defects of functional components of microoptoelectromechanical systems is proposed, which takes into account the quality of the substrate layer and allows to predict technological process parameters that can lead to production defects of functional component substrates and adjust technological processes;

- further developed a regression model that takes into account the relationship between the thickness of the layer to remove defects of functional components of microoptoelectromechanical systems and shaping factors: speed, time, grain size of polishing paste and their combined action, which allows to determine surface parameters of functional components;

- improved interference method in the technological process of quality control of functional components by eliminating related components in the image due to the proposed adaptive digital filter, which allows to increase the reliability of reproduction of shaping parameters of functional components of microoptoelectromechanical systems and expand functionality of control technology;

- the method of identification of extremums of interference fringes of images in technological process of control of surfaces of functional components of microoptoelectromechanical systems which differs in definition of a phase function from a ratio of useful and complex conjugate Hilbert components of a signal.

An experimental model was created and a study of the proposed methods was conducted. As a result of the conducted experimental researches the data according to which it is possible to carry out construction and the analysis of dependences of

initial parameters of substrates of FC MOEMS on scattering of optical power are received. It is 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, and the scattering ability does not depend on the beam wavelength within the investigated wavelength, but depends on the quality of the FC substrate MOEMS.

The results of the work form the basis for further development of technological processes of production of substrates of functional components of microoptoelectromechanical systems and methods of control of parameters of their quality.

The results have found practical implementation and implementation in LLC TC «Valor», PJSC «Chervona Zirka «Chemical & Pharmaceutical Plant», in LLC SPE «UKRINTECH», in the Institute of Scintillation Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine.

The results of the work are used in the educational process at the Department of Electronic Devices of Kremenchuk M. Ostrohradskyi National University, at the Department of Electronic Information Technologies of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, as well as in research and teaching at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics Kharkiv National University of Radio Electronics, as evidenced by the relevant documents.

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

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

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

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

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

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. Невлюдов И.Ш. Анализ эффективности использования кремниевых концентраторных солнечных фотоэлементов / И.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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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**).

11. 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.

12. 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.

13. **Чала О. О.** Дефектоутворення, як основа Defect Engineering в МЕМС та МОЕМС // *Технологія приборостроєння*. 2020. № 1. С. 78–81.

14. Nevlyudov, 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.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

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

16. **Чала О.О.** Аналіз факторів втрат в оптичних перемикачах на основі МОEMS-компонентів // *18 Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь в XXI сторіччі»*, (Харків, 14-16 квітня, 2014 р.),

Т. 2, С. 63–64.

17. **Е.А. Чалая.** Потери в оптических микрозеркалаx // *19 Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь в ХХІ сторіччі»*, (Харків, 20-22 квітня, 2015 р.), Т. 2, С. 77–78.

18. **Е.А. Чалая.** Влияние шероховатости поверхности покрытия микрозеркал 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.

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

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

21. 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*).

22. 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*).

23. 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*).

24. 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*).

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

25. 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.

26. Невлюдов І.Ш., Письменецький В.О., Фролов А.В., **Чала О.О.** та інш. 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.

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

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	17
Вступ.....	18
РОЗДІЛ 1 Аналіз стану проблеми технологічного забезпечення якості підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем.....	25
1.1 Сфери застосування та конструктивно-технологічні особливості МОЕМС перемикачів оптичного сигналу.....	25
1.2 Аналіз технологічних процесів виготовлення оптичних перемикачів МЕМС	29
1.3 Вимоги до якості підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем.....	36
1.4 Висновки до розділу 1.....	38
РОЗДІЛ 2 Фізико-технологічна модель прогнозування дефектів підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем.....	40
2.1 Постановка задачі досліджень.....	40
2.2 Дефектоутворення в підкладках функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем.....	41
2.3 Фізико-технологічні процеси виготовлення підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем.....	43
2.4 Розробка фізико-математичної моделі прогнозування дефектів підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем.....	46
2.5 Розробка програмного засобу для обробки даних фізико-технологічних процесів виробництва підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем.....	64
2.6 Висновки до розділу 2.....	68

	15
РОЗДІЛ 3 Дослідження технологічних операцій формоутворення підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем.....	70
3.1 Постановка задачі досліджень.....	70
3.2 Планування експерименту для побудови моделі формоутворення підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем.....	71
3.3 Визначення впливу факторів технології формоутворення підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем.....	72
3.4 Визначення ступені впливу факторів на формоутворення підкладки функціонального компонента мікрооптоелектромеханічних систем.....	76
3.5 Експериментальні дослідження технологічних операцій формоутворення підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем.....	80
3.6 Висновки до розділу 3.....	82
РОЗДІЛ 4 Розробка та дослідження неруйнівного методу контролю поверхонь підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем.....	84
4.1 Обґрунтування вибору методу неруйнівного контролю.....	84
4.2 Експериментальне дослідження інтерференційного методу контролю поверхонь функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем.....	89
4.3 Фазовий метод обробки даних для досліджень поверхонь підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем.....	94
4.4 Обґрунтування вибору типу адаптивної фільтрації вихідного інформаційного сигналу.....	97
4.5 Висновки до розділу 4.....	110

РОЗДІЛ 5. Технологічне забезпечення якості підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем.....	111
5.1 Експериментальна перевірка фізико-технологічних параметрів підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем за критеріями якості.....	111
5.2. Розробка технологічного процесу виготовлення підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем на основі запропонованих методів.....	117
5.3 Промислове впровадження результатів дисертаційної роботи для забезпечення якості підкладок функціональних компонентів.....	118
5.4 Висновки до розділу 5	120
Висновки.....	122
Перелік джерел посилання.....	124
Додаток А Комплект документів на технологічний процес виготовлення підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем.....	137
Додаток Б Акти впровадження.....	146
Додаток В Перелік опублікованих праць за темою дисертаційної роботи	154

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;
ВОЛЗ – волоконно оптичні лінії зв'язку;
ЕТ – електронна техніка;
МЕМС – мікроелектромеханічні системи;
ММ – математична модель;
МОЕМС – мікрооптоелектромеханічні системи;
МСТ – мікросистемна техніка;
НМК – неруйнівний метод контролю;
ПФЕ – повний факторний експеримент;
ПЗ – програмний засіб;
ПЗЗ – прилад із зарядним зв'язком;
ТП – технологічний процес;
ФК – функціональний компонент.

ВСТУП

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 [1].

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 [2]. Серед різноманіття пасивних компонентів можна виділити одні з найбільш чисельних – МОЕМС-перемикачі, за допомогою яких відбувається перенаправлення потоків світла в сітловодних мережах. Основним параметром таких пристроїв є відбиваюча здатність функціональних компонентів (ФК) [3].

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 [4].

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. [5-18] 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 виробках оптоелектронної техніки.

Все це свідчить про те, що технологічне забезпечення якості 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 функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем.

Предмет дослідження – фізико-технологічні параметри підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем та технологічні процеси 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 [1-27]. У публікаціях, написаних у співавторстві, внесок здобувача полягає: [1, 2, 21, 24] – систематизовані технології мікросистемної техніки та МОЕМС; [3] – досліджено залежність направляючої здатності ФК МОЕМС за умов зміни параметрів їх позиціонування; [4] – запропоновано використання гнучко-жорстких конструкцій у МОЕМС; [5] – визначено технологічні фактори виробництва та типи дефектів, що впливають на якість поверхонь ФК МОЕМС-перемикачів; [6, 9, 26-27] – розроблено конструкцію дзеркал відбивачів для підвищення ККД фотоперетворювачів; [7] – визначено основні дефекти, що виникають під час виробництва підкладок ФК для МОЕМС-перемикачів і способи їх мінімізації; [8] – досліджено методи контролю якості поверхонь виробів електронної техніки; [10, 18] – проведено моделювання відбиваючої здатності мікродзеркал ФК МОЕМС; [11] – розроблено метод і ТП контролю ФК МОЕМС за рахунок використання інтерференційного методу; [12, 23] – запропоновано математичну модель та її практичну реалізацію для комп'ютерного моделювання під час розробки ТП виробництва ФК МОЕМС; МЕМС та МОЕМС; [13, 19, 25] – запропоновано математичну модель прогнозування виробничих дефектів для підкладок ФК МОЕМС; [15-17, 20, 22] – визначено фактори втрат в оптичних перемикачах. Роботи [13, 16-18] 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

XXI 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 безпроводних 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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПІДКЛАДОК ФУНКЦІОНАЛЬНИХ КОМПОНЕНТІВ МІКРООПТОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

1.1 Сфери застосування та конструктивно-технологічні особливості МОЕМС перемикачів оптичного сигналу

MEMS технологія – це технологія виготовлення електромеханічних структур, що створені в обмеженому обсязі твердого тіла або на його поверхні у вигляді складних мікросистем субміліметрового розміру, що представляють собою впорядковані композиції областей матеріалу із заданим складом, структурою і геометрією, статична або динамічна сукупність яких забезпечує реалізацію процесів генерації, перетворення і передачі енергії в тісній інтеграції з прийняттям, обробкою, трансляцією і зберіганням інформації при виконанні запрограмованих операцій і дій в необхідних умовах експлуатації з заданими функціональними, енергетичними, часовими і надійнісними показниками.

Особливою сферою застосування MEMS є телекомунікаційні пристрої, що працюють у оптичних каналах зв'язку. Важливою перевагою MEMS є можливість роботи на мікрорівні безпосередньо з променем світла [19, 20]. МОЕМС компоненти посідають друге місце, за обсягом випуску в світі, серед компонентів MEMS.

Перемикачі на сьогоднішній день найбільш активна область застосування MEMS в оптичних каналах, проте вона не є єдиною (рис. 1.1). Мікромеханічні перемикачі на даний момент визнаються найбільш надійними і гнучкими. Вони являють собою системи мікродзеркал, керованих мікроприводом, що налічують від сотень до тисяч функціональних компонентів на одному кристалі. Дзеркала можуть пересуватися уздовж двох (2D) або трьох (3D) осей в залежності від типу.

Той факт, що перемикання променя здійснюється без перетворення світло – електричний сигнал – світло, дозволяє уникнути обмежень спектра і спотворень сигналу, але накладає додаткові, чіткі обмеження та вимоги до якості, як окремих елементів так, і системи в цілому [21].

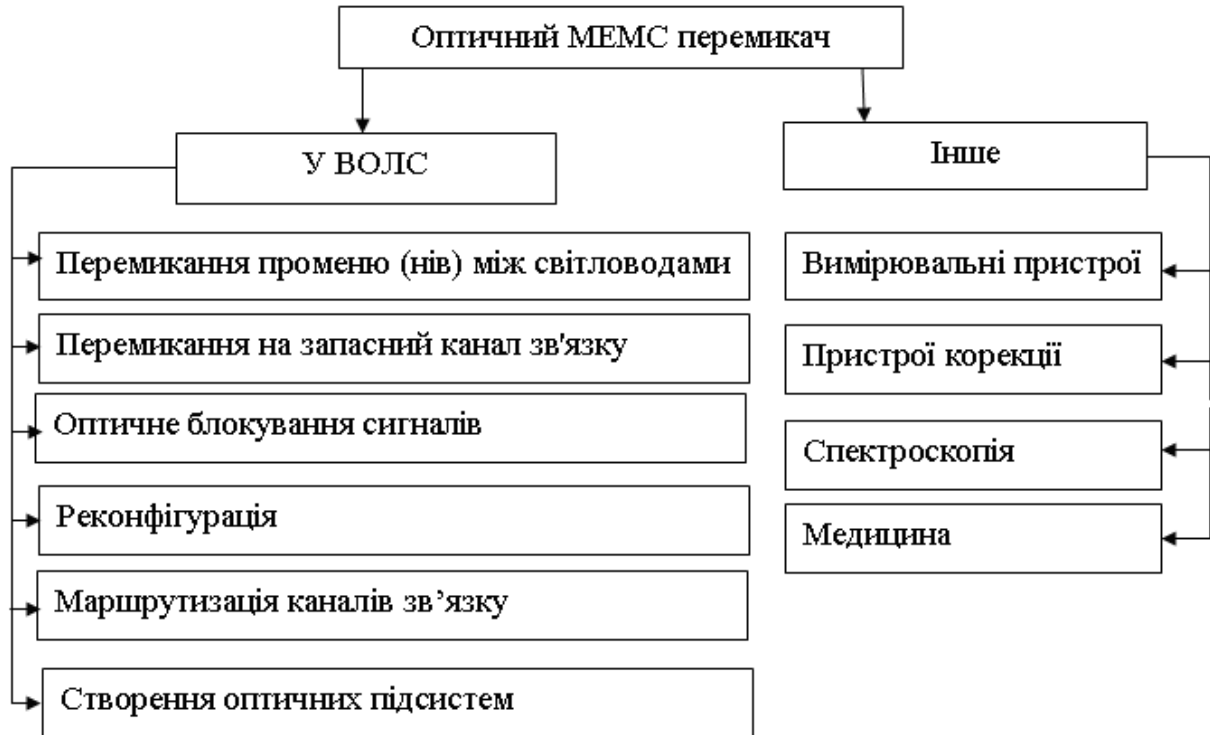


Рисунок 1. 1 – Основні сфери використання МОЕМС перемикачів

Найбільш суттєвим для оптичних перемикачів є фактична відповідність технологічних та функціональних характеристик відбиваючих функціональних поверхонь заданим.

Низка технологічних факторів, таких як: кривизна, шорсткість, деформації, різного роду мікрозабруднення можуть призвести до значних помилок в роботі системи, що характеризуються не тільки уповільненням передачі даних чи сканування, зменшенням величин потужності, що передається, та збільшенням втрат, але й спотворенням оптичного сигналу, повною або частковою втратою інформації.

На даний час ФК, до яких належать дзеркала, знаходять все більше застосування в технологіях МЕМС. Така популярність обумовлена можливістю

зниження габаритних розмірів і маси; об'ємного компонування; часу, вартості та помилок перенаправлення; спотворень сигналів та збільшення коефіцієнту відбиття.

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

Тривалість експлуатації оптичного перемикача визначається виробниками в кількості разів перемикання, тобто залежить від механічної частини МЕМС. Але на даний час до 30% відмов, чи некоректної роботи оптичних перемикачів викликають впливи на ФК [22].

У процесі виробництва ФК виникають дефекти, що викликані самим ТП виробництва цих компонентів на основному етапі – виробництві підкладок, а далі, як правило, нанесення металізованого шару, з неминучим виникненням наслідкових дефектів. Нано- та мікродефекти під впливом механічних сил перемикання, корозії, механічних пошкоджень, за умови навантаження, специфічних умов експлуатації, з часом, перетворюються на макродефекти, що суттєво впливають на коректну роботу перемикачів МЕМС [19, 20].

З цього переліку основними залишаються відмови, що пов'язані з ФК, саме дефекти підкладок ФК є першопричиною дефектності структури в цілому.

Таким чином, існує необхідність розробки технологічного забезпечення у модулях МОЕМС-перемикачів, для цього необхідно виконати ретельний теоретичний аналіз і моделювання розвитку дефектів у ході ТП їх виготовлення, встановити джерела виникнення, а також технологічні чинники, що можуть призвести до збільшення та переходу їх у макророзміри, що тягне за собою зниження параметрів та надійності в цілому.

Перемикачі сигналів функціонують за принципом вибіркового перемикання оптичного сигналу, що передається в волоконнооптичних лініях зв'язку (ВОЛЗ), з одного світловоду в інший [23]. Загальний вигляд МЕМС перемикача (1×2) представлено на рис. 1.2 .



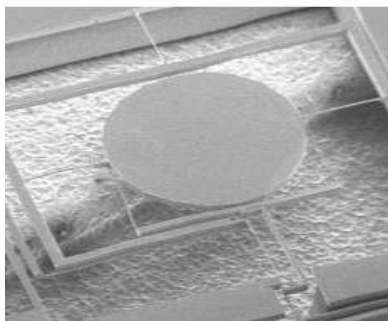
Рисунок 1.2 – Загальний вигляд МОЕМС перемикача

Усі волоконно-оптичні перемикачі можна розділити на дві групи:

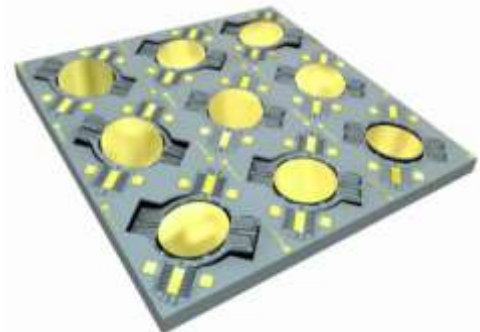
- механічні: перерозподіл оптичної енергії відбувається в результаті руху волоконних світловодів, дзеркал, призм, рідин або інших елементів;
- оптичні: зміна напрямку оптичного променя відбувається в результаті зміни оптичних параметрів нерухомою середовища поширення випромінювання [22-26].

Коли промінь у вільному просторі відхиляється ФК, відхилений промінь може падати на кілька оптичних волокон. Такі ФК, як правило реалізовані в мікроелектромеханічних системах.

Функціональним компонентом перемикача, як правило є дзеркало, що повертається за допомогою приводу у просторі [26, 27]. Перемикачі можуть мати в своїй структурі від одного ФК до тисячі – матриця ФК (дзеркал) (рис. 1.3) [28].



а)



б)

дзеркало (а), матриця дзеркал (б)

Рисунок 1.3 – ФК перемикача МОЕМС

Мікро дзеркало складається (рис.1.4) з напівпровідникової пластини (підкладки) та тонкої, як правило металізованої плівки, нанесеної в вакуумі.

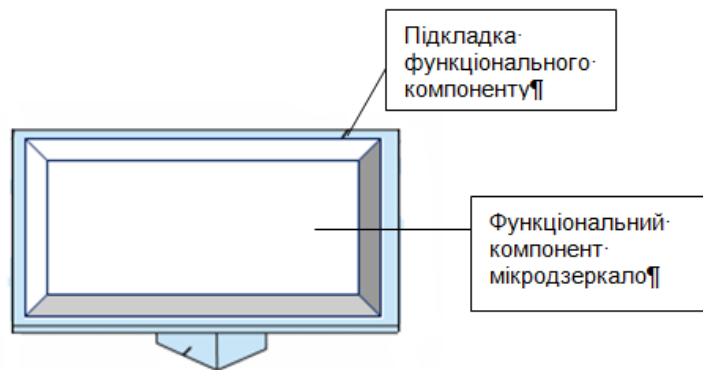


Рисунок 1.4 – Функціональний компонент МОЕМС перемикача

1.2 Аналіз технологічних процесів виготовлення оптичних перемикачів МЕМС

Технологічні процеси виготовлення мікроелектромеханічних перемикачів, можна розділити на декілька груп. На рис. 1.5 представлено узагальнений ТП виготовлення мікроелектромеханічних перемикачів, що складається з восьми основних ТП.

Першу групу складають ТП виробництва одержання вихідних матеріалів заданого складу та ступеня чистоти на основі МЕМС технологій.

Ці ТП характеризуються високою складністю, але разом з цим груповим виконанням та масовістю випуску, типізацією, слаборозвиненою номенклатурою, високим рівнем технологічності та автоматизації виробництва та вартістю, що постійно знижується.

Але слід відзначити, що подальший розвиток компонентної бази відбувається в напрямку синтезу використання нових матеріалів, посилення вимог до їх параметрів, зменшення дефектів підкладок та формоутворення, та підвищення точності і якості ТП, автоматизації виробництва з використанням машинного керування на усіх процесах виробництва.



Рисунок 1.5 –Типовий технологічний процес виготовлення мікроелектромеханічних перемикачів

В другу групу входять ТП виготовлення елементів корпусних деталей та

несучих конструкцій з полімерних та металевих матеріалів, де широко використовується штампування, лиття, пресування, фрезерування, методи пошарового виробництва за цифровою 3D-моделлю, тобто адитивні методи. Удосконалення цих ТП розвивається у напрямку уніфікації як конструкторських, так і технологічних рішень, широкого використання безвідходних та програмно-керуючих технологій, гнучких модулів та обладнання, що можна швидко переналаштувати на інший тип виробництва.

Третю групу об'єднують ТП формоутворення ФК. Ці ТП вирізняються складністю, трудомісткістю операцій обробки прецизійних поверхонь ФК. На цьому етапі виконують абразивну обробку деталей. Особливо трудомісткими в цьому ТП є операції остаточної обробки поверхні, як складають 70 – 80% від загальної трудомісткості.

Нині розробка автоматизованих технологічних комплексів на абразивній обробці поверхні ФК, як в нашій країні, так і за кордоном є я набагато дешевшим, ніж створення і експлуатація вакуумних установок при асферизації і іонно-променевої обробці для оптичних деталей такого ж діаметру. На даному етапі, удосконалення таких ТП, направлене на розробку методів, які б могли здешевити цей процес та давали можливість прогнозування та встановлювання залежності фізико-технологічними характеристиками формоутворення поверхонь ФК та отримувати поверхні з прогнозованими характеристиками, економічність за рахунок впровадження у масове виробництво.

Четверту групу представляють ТП контролю якості формоутворення та геометрії поверхонь ФК перемикачів МОЕМС.

Третій та четверті ТП виготовлення перемикачів МОЕМ є взаємно пов'язаними. На етапі формоутворення неодмінною складовою є контроль виготовлених ФК.

П'яту групу об'єднують ТП складання, позиціонування та юстування елементів у корпусі мікрооптоелектромеханічного перемикача.

На шостому етапі проводиться контроль складання та позиціонування компонентів виробу. Перевіряється геометрія направленості світлових променів

у самому оптичному перемикачі.

В цьому групу входять ТП герметизації мікрооптоелектромеханічного перемикача.

На восьмому етапі перевіряються вихідні параметри перемикача МОЕМС, на відповідність до нормативної документації та технічних умов.

Виготовлення ФК надскладний процес, основою якого є виготовлення пластини-підкладки. Зокрема, вагомим є структурно-геометрична відповідність, а також відсутність дефектів у підкладці. Технології виготовлення шарів і підшарів підкладок, а також нанесення відбиваючого покриття відносяться до технологій мікро системної техніки (МСТ).

Основою конструкцій ФК є напівпровідникова підкладка у вигляді пластини, структура, хімічна чистота та вміст дефектів на поверхні та всередині якої повинні бути якомога ближчими до ідеального монокристалу. Пластини виготовляються з вирощених монокристалічних злиwkів, з низьким вмістом домішок (до $10^{-9} - 10^{-10} \%$).

В даний час відомо більше двадцяти методів виготовлення МЕМС виробів, їх кількість невпинно збільшується. Більшість з них базується на напівпровідникових КМОП-технологія, так як основним функціональним і конструкційним матеріалом у виробництві МЕМС є кремній [29, 30].

Відмінністю структур МЕМС від напівпровідникових є необхідність отримання об'ємних, 3-D компонентів і пристроїв з глибиною обробки до 2 мм, в той час як глибина обробки напівпровідникових приладів обмежується в більшості випадків одиницями мікрометрів. На рис. 1.6 приведено основні технології МСТ.

У МЕМС кремній, крім електричних функцій, виконує роль конструкційного матеріалу. Властивості кремнію досить високі, а для збереження їх в процесі технологічної обробки слід мінімізувати появу об'ємних, поверхневих і крайових (кутових) дефектів [4, 5].



Рисунок 1.6 – Основні технології МСТ

Кремній є технологічним матеріалом для MEMS внаслідок можливості його нанесення у вигляді також хімічного захисту. Але цей матеріал він має ряд недоліків, таких як [29, 30]: тонких плівок, високої відтворюваності форми та властивостей напівпровідникових приладів, групових методів обробки, простоти одержання ізоляції шарів,

- зазвичай пластини кремнію товщиною 0,25 – 0,5 мм і діаметром 50 – 200 мм, навіть нержавіюча сталь за таких розмірів зразків легко деформується;

- як монокристалічний матеріал кремній має тенденцію розколюватися вздовж кристалографічних площин, особливо якщо крайові, поверхневі або об'ємні дефекти структури призводять до концентрації та орієнтації напружень уздовж площин відколу;

- розколювання можуть викликати ушкодження країв або появу дефектів при різанні або скрайбуванні;

- високотемпературна обробка призводить до виникнення внутрішніх напружень, які в поєднанні із крайовими, поверхневими та об'ємними недосконаlostями можуть призводити до напружень уздовж площин відколу.

Підсумовуючи, можна виділити три види найсуттєвіших та найпоширеніших дефектів, що утворюються на кремнієвій пластині, яка є підкладкою ФК МОЕМС:

– поверхневі: утворюються за рахунок різного роду обробок, основним способом усунення є шліфування поверхневого шару кремнієвої підкладки;

– кутові: за рахунок травлення, що викликає зародки тріщин – основним способом усунення є використання ізотропного травлення, за допомогою якого закруглюються краї підкладки, що мінімізує кутові дефекти;

– об'ємні: виникають за рахунок термообробки та призводять до виникнення внутрішніх напружень, які в поєднанні із крайовими, поверхневими та об'ємними недосконаlostями можуть призводити до концентрації напружень і наступного розколювання підкладки.

Загальні правила, яких варто дотримуватися, для мінімізації виникнення дефектів, можна сформулювати наступним чином:

1. Кремній повинен мати якомога меншу щільність об'ємних, поверхневих і крайових дефектів, щоб число потенційних областей концентрацій напружень було мінімальним.

2. Компоненти, які можуть піддаватися сильному тертю, абразивному впливу або механічним напруженням, повинні мати мінімальні розміри та укріплюватися від ударів механічною опорою, наприклад, з'єднанням зі склом методом анодного окислювання.

3. У випадку різання й інших механічних операцій, після них варто обтравлювати краї та поверхню, що піддавалися механічним діям.

4. При утворенні гострих кутів, країв під час анізотропного травлення їх необхідно округлити наступним ізотропним травленням чи шліфуванням.

5. Щоб уникнути безпосередніх контактів з Si , варто наносити міцні, тверді, корозійностійкі тонкоплівкові покриття SiC або Si_3N_4 методом хімічного парофазного осадження.

6. Низькотемпературні ТП, наприклад плазмове окислювання, хімічне парофазне осадження при виготовленні мікромеханічних елементів, дозволять

уникнути напружень, викликаних термічною неузгодженістю різних легованих, осаджених шарів і кремнію [5, 6, 13, 31-34].

Складність технологій МЕМС-пристроїв визначається кількістю структурних шарів. Якщо дефекти виникають на будь-якому з шарів, то з часом ці недоліки проявляться на усіх шарах. Основні дефекти, що можуть утворюватися під час ТП виготовлення підкладин ФК МОЕМС з кремнію наведено на рис. 1.7.



Рисунок 1.7 – Основні дефекти при виготовленні підкладин ФК МОЕМС

Технологічні фактори, що впливають на параметри якості підкладок ФК, надзвичайно різноманітні, і ступінь цього впливу з різних позицій вивчався багатьма дослідниками [1-15].

Складність проблеми пояснюється тим, що обробка пластин здійснюється

на самих різних стадіях технології ТП їх виробництва. Тому дефекти, що виникають, можуть з'являтися і проявлятися на різних етапах виробництва. Але, очевидно, існують загальні закономірності формування якісної поверхні кремнієвих пластин, які пов'язують технологічні фактори і залежні від них параметри якості пластин. Спостерігається технологічна спадковість появи дефектів в структурах, створених на підкладках, що пройшли різні ТП [13, 34].

1.3 Вимоги до якості підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем

До перемикачів МОЕМС пред'являють ряд вимог, серед яких:

- низький рівень оптичних втрат і перехресних перешкод;
- слабка залежність вихідних параметрів від паразитних впливів;
- низький рівень споживаної потужності;
- висока надійність та технологічність.

Якщо проаналізувати ресурси виробників оптичних перемикачів [34-38], то в документації на даний тип приладів в описі характеристик перше місце займає значення кількості втрат (Дб), що вносяться самим оптичним перемикачем. Кількість загальних втрат складається (перелік за кількістю вносимих втрат на зменшення) з втрат на відбивання світлового променя, поляризаційно залежних втрат PDL, обернених втрат, втрат на перехідне затухання, втрат відтворюваності, точності позиціонування та швидкості переключення та часу відгуку.

Якщо роздивлятися основне джерело втрат – втрати ФК – то можна зробити висновок, що саме відбиваюча здатність функціональних компонентів оптичних перемикачів є основним параметром якості.

Як було зазначено, ФК будь-якого оптичного перемикача складається з мікродзеркала (micromirror), що в свою чергу є складною конструкцією з підкладин та поверхневого шару тонкої плівки металу [19, 21, 35-38].

Ці частини оптоелектронного приладу виготовляються на першому і найбільшому, за часовими рамками та найскладнішому, з точки зору, технології виготовлення етапі ТП (рис. 1.5) – етапі ТП виробництва одержання вихідних матеріалів та компонентів. Саме на цьому етапі закладаються параметри, що визначають коефіцієнт втрат, який вноситься оптичним перемикачем.

Підкладка є одним з найважливіших конструктивних та функціональних компонентів МОЕМС перемикача оптичного сигналу. Проходячи весь технологічний процес, вона піддається складним механічним, термічним, фізичним і хімічним впливам. Ці дії значною мірою позначаються на властивостях функціональних елементів, сформованих на підкладках.

Поверхня монокристалічних підкладок повинна бути особливо чистою і гладкою, мати досконалу структуру (густина дефектів не більше 10^2 см^{-2}) і строго задані параметри з мінімальним розкидом.

Від якості підкладки залежить якість самого ФК. Матеріали, що використовуються для виготовлення підкладок, їх дефектність, топологія визначають наступну геометрію та характеристики відбиваючого ФК [12-14].

Перелічені характеристики, закладаються на етапі виробництва підкладок і залежать від фізико-технологічних параметрів виготовлення підкладки. Якщо на підкладці присутні дефекти, то вони неминуче будуть розвиватися, з нано-, мікророзмірів на усі інші шари та підшари ФК у вигляді макродефектів [12-14]. Саме виготовлення підкладки ФК є визначальним етапом для приладів такого типу.

Отже, враховуючи вищевказане, будемо вважати, що основним визначальним та критичним критерієм якості МЕМС оптичних перемикачів є кількість втрат ФК, що вноситься самою системою відбивання на етапі перенаправлення оптичних потужностей. Ці характеристики ФК визначаються на етапі ТП виробництва підкладин і впливають на втрати у всій мікроелектромеханічній системі і є основним джерелом некоректної роботи приладу в цілому.

1.4 Висновки до розділу 1

MEMC технологія – одна з найперспективніших та наймасовіших технологій, що є провідною серед інших, за кількістю випуску мініатюрних пристроїв в електронній техніці. Третина продукції MEMC припадає на випуск пристроїв для потреб телекомунікацій, серед яких друге місце займають оптичні перемикачі.

Однією з важливих тенденцій розвитку виробництва МОЕМС-перемикачів є мініатюризація, але при цьому вимоги до якості виробів тільки підвищуються. Відповідність заданих характеристик і параметрів таких компонентів залежить від технології виробництва їх ФК.

Частіше за все, ФК виготовлено з монокристалічної підкладки та нанесеного, як правило, металізованого шару. Основним параметром такого пристрою є, коефіцієнт втрат оптичної потужності при перенаправленні потоків у світловодних мережах.

Підкладка є одним з найважливіших конструктивних та функціональних компонентів МОЕМС перемикача оптичного сигналу. Під час ТП виробництва, підкладка ФК піддається складним механічним, термічним, фізичним і хімічним впливам. Ці дії значною мірою позначаються на властивостях функціональних елементів, сформованих на підкладках.

Поверхня монокристалічних підкладок повинна бути особливо чистою і гладкою, мати досконалу структуру (густина дефектів не більше 10^2 см^{-2}) суворо визначені задані параметри з мінімальним їх розкидом.

Підкладка ФК МОЕМС є першоджерелом виникнення втрат. Основною причиною внесення похибок та спотворень сигналів є дефекти, що виникають на етапах ТП виготовлення підкладок ФК. Саме на вивчення цих процесів спрямоване дослідження

Для дослідження та поліпшення якості характеристик МОЕМС перемикачів, необхідно вирішити наступні прикладні завдання:

– обґрунтувати фізико-технологічні параметри ТП виготовлення підкладок

ФК МОЕМС;

– розробити фізико-технологічну модель прогнозування дефектів підкладок ФК МОЕМС та програмне забезпечення для розрахунку масивів даних та автоматизації процесу розрахунків;

– визначити та дослідити залежності між товщиною шару видалення дефектів ФК МОЕМС та факторами формоутворення, що дасть можливість оцінити параметри форми поверхні ФК МОЕМС та підвищити їх якість;

– розробити та дослідити метод неруйнівного контролю, з використанням запропонованого методу контролю поверхонь підкладок ФК МОЕМС;

– провести апробацію розроблених моделей та методу забезпечення якості компонентів МЕМС-оптичних перемикачів, їх експериментальне дослідження та розробку практичних рекомендацій, щодо технологічного забезпечення необхідного рівня якості.

Матеріали цього розділу опубліковані в роботах автора [1-10] (Додаток В).

Список джерел, які використано у даному розділі, наведено у повному переліку джерел посилання під номерами [1-38].

РОЗДІЛ 2

ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ДЕФЕКТІВ ПІДКЛАДОК ФУНКЦІОНАЛЬНИХ КОМПОНЕНТІВ МІКРООПТОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

2.1 Постановка задачі досліджень

ФК МОЕМС перемикачів це як правило, кремнієва, підкладка з тонкою плівкою металізації, або без неї, що забезпечує високу відбивну здатність світлового пучка при перенаправленні його в світловодних мережах [19, 20]. Однією з характеристик ФК МОЕМС, що має вагомим значення, є дефектність.

Припустимо, ФК перемикача виготовлений, і його параметри відповідають заданим. Але, потрібно враховувати, що практика експлуатації перемикачів МОЕМС вказує, що розвиток дефектів, які виникають при його виготовленні (експлуатації), є однією з основних причин відмов і некоректної роботи пристрою.

В даний час існує велика кількість методів і засобів, що дозволяють виявляти виробничі дефекти, однак можливості цих методів обмежені [26- 36].

Операції контролю та випробувань, що входять в структуру сучасних ТП, не можуть дати повної гарантії відсутності дефектів у виробництві таких компонентів [19].

У зв'язку з цим, виникає актуальна науково-прикладна задача розробки моделі прогнозування дефектів ФК МОЕМС з урахуванням фізико-технологічних особливостей ТП їх виробництва [39-43].

Предметом дослідження у даному розділі дисертаційної роботи фізико-технологічні параметри ТП виготовлення, що прямо впливають на виникнення дефектів підкладок ФК у складі МОЕМС-виробів на етапах виробництва.

Метою даного дослідження є розробка методу прогнозування виробничих дефектів підкладок ФК МОЕМС на основі фізико-технологічних моделей ТП їх

виготовлення [44, 45].

Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення наступних завдань:

- розглянути існуючі ТП виготовлення ФК МОЕМС перемикачів, які впливають на виникнення виробничих дефектів в підкладках ФК;
- визначити ТП, розробити їх математичні моделі, що прямо впливають на процеси дефектоутворення в підкладках ФК МОЕМС перемикачів;
- використавши отримані результати досліджень; для зниження трудомісткості вирішення задач аналізу даних, ввести візуалізацію процесів ТП виробництва підкладок ФК МОЕМС, розробити для цього програмний засіб.

Таким чином, розробка фізико-технологічних моделей прогнозування дефектів ФК МОЕМ, є актуальним завданням в мікросистемної техніці.

2.2 Дефектоутворення в підкладках функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем

Якщо розглядати підкладку ФК МОЕМС перемикача, безпосередньо на етапі ТП виготовлення пластин, то в структурі пластини можна виділити чотири основні шари, в яких можуть бути дислоковані дефекти (рис 2.1). Такі структури характеризується глибиною порушеного шару, шорсткістю та різного роду забрудненнями [12, 13, 44, 45.].

I шар: зовнішній рельєфний характеризується хаотично розміщеними виступами, тріщинами та виколками;

II шар: порушений шар – має окремі виколювання та мікротріщини, які мають тенденцію поширюватися у глибину інших шарів та розростатися;

III шар: деформований – характеризується скупченням дислокацій, продовженням мікротріщин та зон, що розміщені навколо них – осередків механічних напружень;

IV шар: умовно непорушена структура підкладки ФК [12, 45].

Під час ТП виготовлення підкладок ФК на поверхні чи в об'ємі пластин

відбуваються фізико-технологічні процеси дифузії, корозії та інших процесів. Причому, ці процеси відбуваються одночасно по у всіх структурах та шарах: на поверхні чи в об'ємі пластини, в результаті чого, в пластинах підкладок утворюється значна кількість дефектів, які потім видаляються чи мінімізуються, тим чи іншим способами [12, 13].



I – рельєфний шар; II – порушений шар; III – деформований шар;
IV – умовно непорушена структура підкладки ФК

Рисунок 2.1 – Шари пластини ФК МОЕМС, що зазнають фізико-технологічних впливів та механічних порушень

Фізико-технологічні параметри підкладок ФК МОЕМС перемикачів та їхня кристалографічна орієнтація, повинні забезпечувати отримання пристроїв, елементів та компонентів із заданими властивостями та характеристиками. На етапі проектування обирають напівпровідниковий матеріал з необхідною орієнтацією [19, 46].

Діаметр пластин визначається розмірами напівпровідникового зливку, які як правило, є стандартними. Товщина пластин визначається не тільки їх стійкістю до механічних навантажень у процесі маніпулювання під час ТП та використання, алей здатністю зберігати форму. Зі зростанням діаметра без зміни товщини пластин під час подальших обробок збільшують крайові сколювання, тому треба збільшувати товщину пластин пропорційно діаметру.

Базовий зріз на пластинах кремнію кристалографічної орієнтації (111) виконують у напрямках [110], [011], [101], а на пластинах орієнтації (100) – у напрямку [011], причому зріз формують так, щоб одна зі сторін кристала була

паралельно до базового зрізу. Додаткові зрізи є маркувальними, для кремнію під кутами 45° , 90° і 180° до базового зрізу [12, 13].

Профіль ребер (фаски) пластин повинен бути заокругленим, це зменшує ймовірність виникнення крайових дефектів: тріщин, сколювань, під час наступних етапів ТП, наприклад, під час перекладання їх у касети, транспортування під час переміщення між операціями.

Для напівпровідникових пластин задають геометричні параметри: діаметр, довжину, товщину, профіль, непаралельність сторін (клиноподібність), неплосцинність та прогин.

Непаралельність сторін (або клиноподібність) характеризується різницею їхньої товщини на заданій довжині. Неплосцинність – найбільша відстань від точок реальної поверхні до ідеально плоскої. Прогин – найбільша відстань від точок реального профілю в радіальному перерізі до відповідної плоскої поверхні прилеглого профілю.

2.3 Фізико-технологічні процеси виготовлення підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем

У відповідності до ТП виробництва (рис. 1.5), найбільш важливим етапом, на якому відбувається виникнення виробничих дефектів у пластинах під час самого ТП є перший етап технологічного процесу виробництва оптичного перемикача.

На цьому першому етапі представляється можливість передбачення і прогнозування дефектів в структурах підкладок, їх шарів і підшарів, що дає можливість на наступних етапах побудувати такий ТП, який би давав змогу мінімізувати різноманіття, кількість та розміри дефектів.

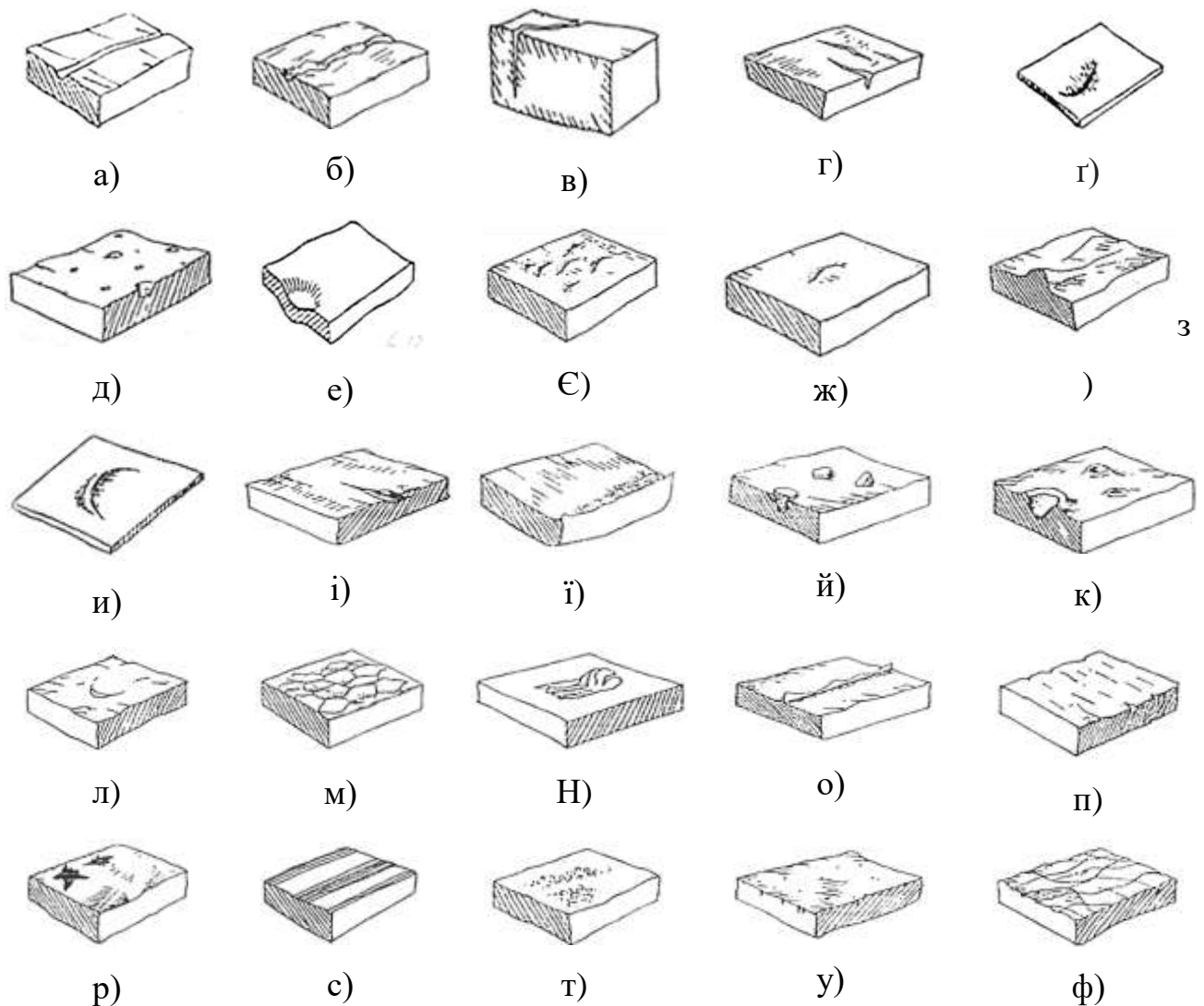
Розглянемо основні технологічні процеси у виробництві підкладок ФК МОЕМС та виробничі дефекти, що було обрано для формування фізико-технологічної бази математичної моделі прогнозування [47]. Розглянуті процеси занесено до табл. 2.1 [1, 10, 19-20, 29-30, 47-49].

Потрібно відзначити, що нами було розглянуто лише значущі технологічні процеси.

Таблиця 2.1 – Перелік виробничих дефектів підкладок ФК МОЕМС

ТП	Вид дефектів	Причини виникнення	Можливі механізми відмов
Випаровування матеріалу при виготовленні підкладки (епітаксійного шару).	Тріщини, задери, розшарування	Поширення і міграція тріщин	Часткове розколювання, роз'єднання підшарів
	Тріщини, зколювання, луски, субзародки.	Механічне напруження	Деформація, зміна співвідношення розмірів структури
	Лусочки, завусениці, шпарини, раковини	Базові та додаткові зрізи, скрайбування	Часткове розділення шарів, міграція тріщин, здуття підкладин
	Подряпини, зколювання, риси, кратери	Вібрації, транспортування	Порушення дифузійних профілів
	Раковини здуття, міхури	Забруднення, тріщини деформованих шарів	Руйнування цілістності, здуття підкладин, розростання дефектів
Дифузія	Нарости, пустоти, кратери	Дифузійні викиди	Зміна геометричних та фізико технологічних параметрів
	Пори, міхури, підтік	Області надлишкової дифузії	Зменшення напруження, деформація
	Сколювання, слоїстість, нахльости	Дислокації на краях дифузійних областей	Зміна геометричних параметрів, гористість
Окислення	Тріщини, розриви, пустоти, слоїстість	Підтравлювання окисника	Області паразитної дифузії
	Тріщини, розриви, риси	Паразитна дифузія. Дефекти окислу	Розриви, деформація, роз'єднання підшарів
	Раковини, наліт, нарости	Надмірна(недостатня) концентрація окисника	Зміна геометрії, щільність дислокацій
Корозія	Нашарування, крапки	Корозійні нашарування	Зміна геометрії
	Кратери, підтоки, наліт	Поширення і міграція тріщин	Розриви, дислокації
	Здуття, крапки, бульбашки	Області надлишкової дифузії окислення	Зміна геометрії, дислокації дефектів, напруження в структурі пластини
Інше	Риси, крапки, налипання	Забруднення, не додержання мікроклімату	Розколювання, розриви, розшарування, міграція тріщин, брак
	Зколи, лусочки, вигини	Включення, неоднорідність матеріалів	Розшарування, зміна геометрії, тріщини, брак
	Тріщини, розриви, вибоїни	Руйнування	Порушення структури, брак

На рис. 2.2 наведено загальний вигляд, дефектів (враховуючи табл. 2.1), що можуть виникнути під час ТП процесу виробництва пластин підкладок ФК.



а) риска, б) подряпина, в) тріщина, г) розрив, щілина, шпарина, (в залежності від геометрії та розмірів), д) вгин (внутрішній), е) раковина, ж) бульбашка, з) наріст, и) вгин (орієнтація в центр пластини і) лусочки, ї) завусениці, й) включення, к) кратери, л) нахльост, м) слоїстість, н) задир, о) підтік, п) забруднення, р) пляма, с) смуга, т) корозійні руйнування, у) крапково-плямиста корозія, ф) тріщини волосяподібні

Рисунок 2.2 – Види дефектів

Присутність дефектів на реальній поверхні пластини підкладки ФК не обов'язково означає, що заготовка не придатна до застосування. Допустимість та якість дефектів (дислокація на одиницю площі, розміри (довжина, ширина, висота), кількість залежить від застосування або функції поверхні і нормується

у відповідними параметрами у технологічній документації

Дефектність поверхні підкладки ФК є одним з компонентів текстури поверхні. Коли встановлюються допустимі вимоги, розмірним критерієм є мінімальний розмір дефекту поверхні та технологічні рекомендації усунення або мінімізації, які вимагають наступні етапи ТП виробництва ФК [36].

2.4 Розробка фізико-технологічної моделі прогнозування дефектів підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем

Дефектність ФК на етапі виробництва закладається на основі дефектів трьох груп: 1) дефекти підкладки функціонального компонента Ω_s ; 2) дефектність наплення тонких плівок Ω_c ; 3) дефектність технологічного суміщення структур Ω_d .

З огляду на це, можна представити узагальнений математичний опис сукупності виробничих дефектів ФК МОЕМС у вигляді:

$$\Omega_{md} = \Omega_s + \Omega_c + \Omega_d.$$

Допускаємо, що значна частина виробничих дефектів виникає саме через дефектність пластин підкладок, або підшарів підкладок ФК МОЕМС.

Спираючись на вище сказане, прийнято рішення розглянути дефекти ФК МОЕМС, як основне і первинне джерело виникнення дефектів компонента ФК МОЕМС в цілому.

Проблема виникає в тому, що на етапі виробництва вихідних матеріалів, малоімовірним уявляється, можливість відстежити дефекти структур і залежність фізико-технологічних параметрів, які безпосередньо впливають на якість і відповідність вихідних характеристик, особливе обмеження накладає фактор кінетики деградаційних процесів в матеріалах.

Але все ж, головною причиною обмеженості ресурсних характеристик

функціональних компонентів МОЕМС є виробничі дефекти, що виникають в процесі виробництва під час, або внаслідок, певних фізико-хімічних процесів на етапах виробництва пластин підкладок ФК [36].

Для попередження та виявлення дефектів існує значна кількість методів контролю [19, 35, 36]. Для їх запобігання та зменшення проводяться роботи з діагностичного забезпечення технологічного обладнання та технологічних процесів [50-52]. Система моніторингу виробничих дефектів існує, але, не дивлячись на велику кількість методів і засобів виявлення дефектів, частина їх залишається не виявленою. Разом з тим, наявність засобів і їх велика інформативність, забезпечують отримання різноманітних відомостей про параметри ФК МОЕМС, використання дає можливість удосконалювати моделі прогнозування на їх основі коректувати технологію виготовлення.

На основі результатів досліджень, узагальнення та систематизації основних видів дефектів, причин їх виникнення, з урахуванням ТП, можливих механізмів відмов (рис. 1.7, табл.2.1, рис. 2.2), визначаємо, що:

- утворення дефектів в пластинах монокристалічних матеріалів (обрано кремній) для виготовлення підкладок ФК МОЕМС є неминучим та закономірним явищем;

- утворення дефектів в пластинах підкладок ФК МОЕМС завжди має місце на певних етапах ТП їх виготовлення, незалежно від вибраних режимів;

- дефекти в пластинах підкладок ФК МОЕМС мають властивість розростання як в глибину, так і назовні шарів та підшарів, по всій площині та структурі матеріалу;

- нано-, мікрodefектні зародки завжди розвиваються в макророзмірні;

- розробка систем, на основі напівпровідників, відкриває нові можливості в напрямку зменшення розмірів систем зі збереження і урізноманітнення їх функціональних можливостей [36]. Все це накладає підвищені вимоги до якості як вихідного напівпровідникового матеріалу, проміжних структур, так і до технології виготовлення готових виробів [53];

- розробка методів та моделей прогнозування виникнення дефектів у

підкладках ФК МОЕМС, під час ТП їх виготовлення, є актуальним науково-прикладним завданням, що дає можливість визначити значення фізико-технологічних параметрів ФК, а також вносити корективи у ТП виготовлення для зменшення, мінімізації та попередження дефектоутворення в таких структурах.

Слід зазначити, що в пластинах ФК реалізується схема перетворення субмікродефектів і мікродефектів в макродефекти.

Субмікродефекти – дефект (1 мкм – 5 мкм), скупчення атомів, сегрегація сторонніх атомів, субзародки, петлі дислокацій (5 мкм – 50 мкм), міхури, (5 мкм – 200 мкм); дефекти скупчення, самозбирання (1 мкм – 5 мкм), петлі дислокацій, кратери (5 мкм – 50 мкм), субмікропори (5 мкм – 200 мкм); дефекти рисок, подряпин, зколів, міжфазні кордони, мікротріщини (0,1 мкм – 100 мкм).

Мікродефекти – дефект включення (дисперсні включення (0,2 мкм – 100 мкм); мікропори (0,2 мкм – 1000 мкм); дефекти мікротріщини, розшарування, (0,2 мкм – 1000 мкм). Основним типом мікродефектів є залишкові напруги, локалізовані в межах кристалу, і обумовлені надлишковою дислокацією дефектів [44].

Макродефекти, більші за 1 мм, виникають внаслідок розвитку мікродефектів (бульбашки, риски, раковини, тріщини, пори). Ослаблення зв'язків на межі окислення кремнію в дефектних областях поверхні, призводить до різкого підвищення здатності вступати в реакцію з активним середовищем, і призводить до інтенсивного протіканню корозії [44, 45].

На підставі аналізу сучасної літератури та ТП, розроблено фізико-технологічні моделі процесів, що мають місце в ТП виготовлення ФК МОЕМС.

Дифузію шарів підкладки ФК МОЕМС виразимо, використовуючи другий закон Фіка: для одновимірної дифузії (2.1) або через плівку (2.2):

$$\frac{dV}{dt} = D \frac{d^2V}{dx^2}, \quad (2.1)$$

$$\frac{dV}{dt} = D \frac{\Delta V}{\Delta}, \quad (2.2)$$

де D – коефіцієнт дифузії;

V – концентрація речовини (компонента), що дифундувала;

Δ – товщина підкладки ФК.

В природі кремній зустрічається лише у вигляді сполук: окислу SiO_2 та у вигляді солей кремнієвої кислоти. Тому, необхідно враховувати процеси окислення кремнію, що неодмінно має місце у будь-яких процесах при його використанні. В процесі окислення поверхня кремнію піддається впливу ряду факторів, які можуть викликати зміни її будови.

При окисленні кремнію виникають значні механічні напруги, під дією яких виникає розупорядкування поверхні компоненту, що призводить до утворення дефектів.

Термічне окислення кремнію протікає за рахунок дифузії окиснення компонентів через окисел до границі розділу фаз, де і відбувається реакція окислення. Кінетика процесу окислення описується моделлю розробленою Діломом та Гуровим [54-57]. Окислення являє собою нерівноважний процес, рушійною силою якого є відхилення концентрації кисню від рівноваги. На рис. 2.3 представлено модель окислення пластини ФК МОЕМС з кремнію.

Потік частинок окислювача через оксид для будь-якої точки V -шару оксиду описується законом (2.3). Окислення під час виробництва підкладок ФК МОЕМС є окремим випадком дифузії [58, 59].

Механізм дефектоутворення при окисленні кремнію, навіть на початковому етапі, генерує мікродефекти в міжвузольних атомах кремнію, їх щільність з плином часу зростає при досягненні певної щільності дефектні дислокації стають мобільними і під дією пружних сил механічної напруги переміщуються до локальних областей з мінімумом потенційної енергії з деформацією кристалічної решітки, утворюючи двомірні дефекти. Надалі при збільшенні товщини оксиду спостерігається зростання щільності і розмірів дефектів,

подальше перетворення їх в дислокації [48].

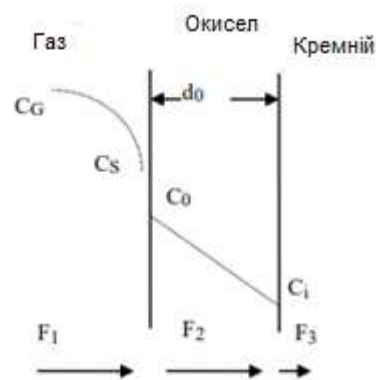


Рисунок 2.3 – Модель окислення пластини ФК МОЕМС з кремнію

Потрібно враховувати, що процес окислення кремнію в областях з зниженою поверхневою енергією (в місцях дефектів) відбувається з більшою швидкістю, чим на всій поверхні, оксид проникає вздовж дефекту на значну глибину та після видалення оксиду на цьому місці залишається, наприклад, бульбашка –дефектна структура.

Корозійні процеси – це самопливне руйнування речовин в результаті хімічної, електрохімічної або фізико-хімічної взаємодії з навколишнім середовищем. Більшість речовин пошкоджується під впливом вологи в повітрі, але на цьому процесі, може позначатися дія певних речовин. Корозія може бути зосереджена місцево, утворюючи заглибини чи шпарини, або простягатися широкою ділянкою, чи рівномірно пошкоджувати поверхню.

Оскільки корозія, це процес, керований дифузією, вона виникає на відкритих поверхнях. Механізми корозії найменше передбачувані.

Хімічну корозію шарів і підшарів ФК МОЕМС, можна математично представити у вигляді (2.3), а за наявності захисних плівок (2.4):

$$\frac{dV}{dt} = V_0 e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (2.3)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{k_d k_p}{k_d + k_p h_0} V_0, \quad (2.4)$$

де E – енергія активації молекул, що беруть участь у реакції;

R – газова стала;

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.

Якщо ТП виготовлення підкладки передбачає використання електричної корозії, то шар матеріалу, що піддався корозії можна виразити (2.5) [58]:

$$V_{\text{Э}} = \gamma_{(-)} Q, \quad (2.5)$$

де $\gamma_{(-)}$ – коефіцієнт ерозії;

Q – електричний струм.

Глибину зношування шару підкладки ФК МОЕМС, визначають (2.6):

$$h = \frac{\gamma_{(-)}}{\rho} \frac{Q}{s_0} = \frac{\gamma_{(-)}}{\rho s_0} \int_0^t i dt = \frac{\gamma_{(-)}}{\rho s_0} I_{CP} t, \quad (2.6)$$

де ρ – питома вага;

S_0 – площа зношеної частини поверхні;

I_{CP} – середнє значення сили струму;

t – час дії струму.

Якщо в ТП виробництва підкладки ФК присутня електрохімічна корозія, то кількість перенесеної струмом речовини виражають (2.7), а глибину

зношення шару підкладки ФК (2.8):

$$V = \eta Q = \eta \int_0^t i dt = \eta I_{CPT}, \quad (2.7)$$

$$h = \frac{\eta}{\rho s_0} I_{CPT}. \quad (2.8)$$

Не рідко в ТП спостерігаються випадки порушення залежності між швидкістю випаровування розчинників і їх температурами кипіння. Це викликає зниження тиску для заданого інтервалу температур [58, 59].

Перш за все необхідно враховувати, що швидкість випаровування розчинника з плівки не є основною фізичною характеристикою, це лише технологічний параметр, який відображає вплив ряду основних фізичних властивостей, таких, як тиск, випаровування і щільність парів розчинника. Для отримання практичних даних про швидкість випаровування слід проводити вимірювання при певних умовах.

Підвищення концентрації випаровувача знижує швидкість випаровування розчинника і тим самим сприяє утворенню щільного, так званого активного (селективного), шару на поверхні ФК. Регулювання пористості ФК може здійснюватися зміною концентрації і умов випаровування розчинів, а також введенням спеціальних речовин, при цьому процесі [12, 36, 58].

Швидкість випаровування матеріалу підкладки або підшарів ФК МОЕМС можна виразити у вигляді (2.9):

$$V' = \frac{k_p}{\sqrt{2\pi R}} \cdot \frac{1}{p \sqrt{\frac{M}{T}}}, \quad (2.9)$$

де M – молекулярна вага матеріалу речовини, що випаровуються;

p – тиск.

Важливим показником кожного фізико-технологічного процесу є швидкість. Дифузія та хімічні реакції можуть служити основою для визначення швидкості і, отже, опису кінетики процесів, що розглядаються. Фізика дає можливість пояснити кінетику термодинамічних параметрів середовища на основі поведінки сукупності частинок, з яких це середовище складається [12, 60, 61].

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. Завдання цих параметрів, у макроскопічному досвіді, 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 завдання 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 (2.10), а також середньоквадратичне відхилення, що проявляється як флуктуація області спостережень порушених шарів (2.11):

$$V = \int_{(X)} V(X) \omega(X, t) dX, \quad (2.10)$$

$$\Delta V = \sqrt{(V - \bar{V})^2}. \quad (2.11)$$

Відповідність між поведінкою сукупності частинок підкладки ФК та областю порушеного шару, що вступили в реакцію речовини можна проілюструвати рис 2.4.

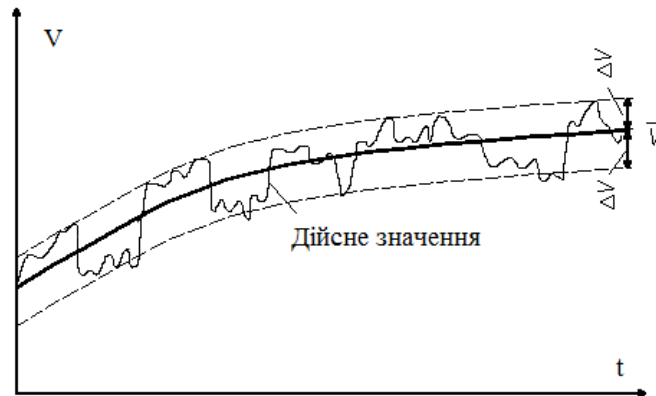


Рисунок 2.4 – Вплив макроскопічного параметра на обсяг порушеного шару ФК

На рис. 2.4 середнє значення \bar{V} зображено жирною лінією. Дійсне значення поведінки V в даному конкретному досвіді, зображено тонкої ламаною лінією.

Апарат статистичної механіки Гіббса дає можливість вивести загальні співвідношення, що зв'язують середні значення, дисперсії і квадратичні кореляції узагальнених координат з їх середніми значеннями, при наявності додаткових сил, що діють на ці координати.

Якщо величина $V(x)$ є функцією тільки координат, то її можна представити як деяку узагальнену координату $q(X)$ (2.12):

$$H(X, a) = H_0(X) + aq(X), \quad (2.12)$$

де a – зовнішня сила, що діє в напрямку узагальненої координати q .

Тоді, відповідно до рівнянь Гамільтона:

$$\dot{p} = -\frac{\partial H}{\partial q} = -\frac{\partial H_0}{\partial q} - a = A_0 - a, \quad (2.13)$$

тобто на систему крім сили $A_0 = -\frac{\partial H_0}{\partial q}$ діє додаткова сила a . З урахуванням $H(X, a)$ та теорії Гіббса, для узагальнених координат системи (2.12), справедливе (2.14) [56-57], отримуємо:

$$\overline{(q - \bar{q})^2} = -kT \frac{\partial \bar{q}}{\partial a}. \quad (2.14)$$

Використання основних положень теорії Гіббса [56-57], дає можливість обчислити середні значення і флуктуації будь-яких фізичних величин, що є функціями координат, якщо відома залежність середніх значень цих величин від зовнішніх постійних сил, що діють на них. Оцінити ці сили для конкретних об'єктів не представляється можливим. Можна зробити висновок про ієрархічний характер флуктуацій, що задаються різним порядком часу релаксації для мікроскопічних і макроскопічних параметрів.

Розглядаючи процес перетворення речовини, як фізико-хімічну реакцію, оцінюючи швидкість процесу через зміну обсягу шарів з дефектами, в одиницю часу, можна припустити [62], що швидкість зміни концентрації i -тої компоненти (2.15):

$$\frac{dC_j}{dt} = K \prod_i C_i^{r_i}, \quad (2.15)$$

де C_i – концентрація i -тої компоненти;

r_i – показник сумарного порядку реакції за i -ою речовини (може дорівнювати нулю).

Для адекватного опису процесів обмежимося порядками, рівними 0, 1, 2. Константа швидкості K є одним з основних параметрів процесу, що визначає час релаксації і тому називається постійної релаксації.

Для відображення прийняті наступні гіпотези:

- двокомпонентний склад середовища (двокомпонентна підкладка);
- залежність швидкості протікання процесу від обсягу дефектного шару: $W_0 - V$, де W_0 – початковий обсяг непорушеного шару, а V – об’єм дефектів;
- пропорційність між кількістю речовини і його концентрацією, при розподілі обсягу середовища та обсягу порушеного шару ФК і умовно не порушеного, визначаємо, як концентрацію компонентів, що беруть участь в реакціях, які можна систематизувати в перелік технологічних дефектів в кожному окремому ТП, з зазначенням причин виникнення і наступними можливими змінами значень параметрів від заданих, в шарах підкладок ФК МОЕМС;
- при протіканні реакцій термодинамічні коефіцієнти, залежать від стану середовища, що дає підстави для використання рівняння Онзагера [27-28], для нелінійних процесів.

Тоді рівняння процесу, що об’єднує фізико-технологічний і математичний підходи, можна представити у вигляді (2.16):

$$\frac{dV}{dt} = K(W_0 - V)^r = f(V), \quad (2.16)$$

де r – порядок реакції, дорівнює нулю або одиниці для лінійної і двом – для нелінійної моделі.

Корені рівняння можуть бути використані для знаходження детермінованої частини залежності обсягу області порушених шарів підкладки функціональних компонентів.

Аналіз даних переліку технологічних дефектів в кожному окремому ТП виготовлення підкладок ФК МОЕМС (таб. 2.1), підтверджує можливість використання (2.16), для процесів розвитку виробничих дефектів, так для: ТП дифузії D пропорційний області непорушеного шару $W_0 - V$, $r = 2$, при постійному D може прийняти $r = 1$ або $r = 0$; в ТП з корозійними фізико-технологічними процесами, з урахуванням залежності енергії активації і

постійних реакцій, умовно не порушених шарів $r=2$, для лінійного представлення $r=0$ або $r=1$; в ТП з процесами випаровування підкладки ФК $r=0$.

Для реакції 0-го порядку справедливе диференціальне рівняння:

$$\frac{dV}{dt} = K. \quad (2.17)$$

Проінтегрувавши, отримаємо:

$$V = Kt. \quad (2.18)$$

Визначивши початком відліку часу момент спостереження за процесом, в інтервалі спостереження δt , то змін $V(\delta t) = |\delta x^i \delta x^j|$ може бути використана для обчислення постійної релаксації K , тобто періоду часу, за який амплітудне значення обурення виведеної з рівноваги фізичної системи зменшується в e разів.

Звідси постійна релаксації:

$$K = \frac{V(\delta t)}{\delta t}. \quad (2.19)$$

Для відображення кінетики процесу, для першого порядку реакції використовуємо:

$$\frac{dV}{dt} = K(W_0 - V). \quad (2.20)$$

Після інтегрування отримаємо (2.21):

$$V = W_0(1 - e^{-Kt}). \quad (2.21)$$

У цьому випадку постійна релаксації (2.22):

$$K = \frac{\ln(W_0) - \ln(W_0 - V(\delta t))}{\delta t}. \quad (2.22)$$

Якщо порядок реакції дорівнює двом, диференціальне рівняння (2.23):

$$\frac{dV}{dt} = K(W_0 - V)^2. \quad (2.23)$$

Після інтегрування (2.24):

$$V = W_0 + \frac{W_0}{1 + KtW_0}. \quad (2.24)$$

Для цього випадку постійна релаксації (2.25):

$$K = \frac{\frac{1}{W_0 - V(\delta t)} - \frac{1}{W_0}}{\delta t}. \quad (2.25)$$

Результатом процесу є $W_0 = V$, то, W_0 визначимо системою рівностей (2.26):

$$\left. \begin{aligned} W_0 &= a^i a^j \\ a^i &= x^i(t_n) - x^i_{min}, \text{ якщо } \delta x^i < 0 \\ a^i &= x^i_{max} - x^i(t_n), \text{ якщо } \delta x^i \geq 0 \end{aligned} \right\}. \quad (2.26)$$

Відсутність інформації про порядок реакції зводить вирішення задачі до вибору порядку на основі спостережень. Критерієм вибору може бути

максимальне значення помилок ΔV , одержуваних різницею спостережуваного і обчисленого значень розмірів дефектних областей (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Диференціальні рівняння реакцій порядків рівнянь

Порядок реакції	Диференціальне рівняння реакцій	Рівняння реакції після інтегрування
0	$\frac{dV}{dt} = K$	$V = Kt$
1	$\frac{dV}{dt} = K(W_0 - V)$	$V = W_0(1 - e^{-Kt})$
2	$\frac{dV}{dt} = K(W_0 - V)^2$	$V = W_0 + \frac{W_0}{1 + KtW_0}$

На основі інтервального оцінювання математичного очікування $M_n(\Delta V)$ помилок на момент t_n і того, що $\max_n \Delta V$ знаходиться на кордоні інтервалу, для однакових умов вибору, маємо вірогідність оцінок (2.27):

$$\max_n \Delta V = M_n(\Delta V) + \frac{\sqrt{D_n(\Delta V)}}{\sqrt{n}}, \quad (2.27)$$

де $D_n(\Delta V)$ – дисперсія помилок на момент t_n .

Задача вибору математичної моделі, передбачає обчислення максимального значення помилок, для кожного порядку реакцій і вибір такого порядку, який забезпечував мінімальне значення помилок, комбінація яких є унікальна для кожного окремого ТП [63, 64].

Статистична фізика дає можливість пояснити кінетику фізико-технологічних параметрів середовища на основі поведінки сукупності та дислокацій дефектів підкладок ФК МОЕМС перемикачів, а макроскопічний стан частинок і зміна – відображають поведінку порушених шарів. Тоді можна зробити висновок про ієрархічний характер флуктуацій, що мають різний

порядок часу релаксації для мікроскопічних і макроскопічних параметрів.

Виникнення дефектів в будь-якій структурі (не залежно від агрегатного стану об'єкта, чи природи впливу) є випадковою величиною, поведінку якої можна описати використовуючи флуктуаційні теорії. Тобто, це випадкове відхилення будь-якої величини від середнього значення випадкової величини, що характеризує систему з великим числом хаотично взаємодіючих частинок.

Для відображення флуктуацій, враховуючи неможливість повного використання результатів статистичної фізики через відсутність необхідної кількісної інформації про гамільтові сукупності взаємодіючих частинок, представляється можливим використовувати методи статистичного аналізу результатів спостережень для визначення та передбачення дефектоутворення в підкладках ФК МОЕМС перемикачів.

Деякі процеси відносяться до непередбачуваних і можуть пов'язані з недотриманням технологічного клімату, броунівським рухом та ін., і викликають ряд дефектів, тому необхідно у процесах прогнозування врахування випадкової складової. Тому скористаємося теорією екстраполяції випадкових процесів, зокрема методами оптимальної фільтрації.

Особливістю рішення задачі, пов'язаної із застосуванням оптимальної фільтрації для виділення і передбачення випадкової складової даної моделі, є не лінійність еволюційних рівнянь [65, 66].

Використаємо лінеаризацію завдання на основі концепції опорної траєкторії і розкладання нелінійної функції $f(V)$ в ряд Тейлора.

В якості опорної траєкторії, досить близькою до істинної, використовуємо рішення $V_{on}(t)$ диференціальних рівнянь для різного порядку реакцій, тоді оцінюванню і прогнозу підлягає випадкова адитивна поправка z до детермінованого V_{on} , яке є рішенням диференціальних рівнянь і для істинної траєкторії $V(t)$, що характеризує процес розвитку виробничих дефектів підкладок ФК МОЕМС (2.28):

$$V(t) = V_{on}(t) + Z(t). \quad (2.28)$$

Методи оцінювання поправки передбачають знання закону її розподілу. Випадкові процеси зміни параметрів підкладок ФК МОЕМС будемо вважати нормально розподіленими. Справедливість гіпотези про нормальний розподіл параметрів підтверджується багаторічним досвідом досліджень в теорії точності і експериментальними даними про технологічні відхилення параметрів, за якими накопичений найбільший фактичний матеріал [29-30, 43].

Технологічний розкид параметрів визначає розподіл випадкового процесу дрейфу параметрів в початковий момент часу (в перетині).

Технологічний діапазон параметрів визначає розподіл випадкового процесу дрейфу параметрів в початковий момент часу (в перетині $t = 0$).

Для таких процесів тип початкового розподілу в першому наближенні зберігається і для будь-яких інших часових перетинів.

Використання гауссівських випадкових процесів в деякій мірі виправдано ще й тим, що нормальний закон розподілу містить максимум ентропії в порівнянні з будь-яким безперервним розподілом з тієї ж дисперсією. Отже, заміна деякого розподілу нормальним не призведе до завищення оцінок.

Отже, форма рівняння еволюції (2.29):

$$\frac{dV_{on}}{dt} + \frac{dz}{dt} = f(V_{on}) + \frac{df(V)}{dV} \Delta V, \quad (2.29)$$

де $f(V_{on})$ – ліва частина диференціальних рівнянь, відповідає системі рівнянь:

$$\frac{dV_{on}}{dt} = f(V_{on}), \quad \frac{dz}{dt} = \frac{df(V_{on})}{dV} \Delta V, \quad (2.30)$$

якщо $z = \Delta V$, то:

$$Z = Z(0) \exp\left(\frac{df(V_{on})}{dV} \cdot t\right). \quad Q = \exp\left(\frac{df(V_{on})}{dV} \delta t\right). \quad (2.31)$$

Розглядаючи вирішення задачі передбачення випадкової складової на основі алгоритму екстраполяції Калмана, що передбачає використання моделей еволюції випадкової складової і спостереження в дискретні моменти часу, задаються параметром k . Початкові умови визначаються при $k=0$, при $k=1$ виконується спостереження, прогнозування здійснюється для $k=2$. Ці моделі визначаються рівняннями (2.32 – 2.33):

$$z(k+1) = Q \cdot z(k) + w(k), \quad (2.32)$$

$$g(k) = z(k) + v(k), \quad (2.33)$$

де $w(t)$ – нормальний білий шум з нульовим середнім значенням $cov\{w(t), w(\tau)\} = d_w \delta(t - \tau)$, де $\delta(t - \tau)$ – дельта-функція Дірака;
 $v(t)$ – процес, що обумовлений похибками.

Флуктуації параметрів фізико-технологічних ТП обумовлені процесами, що відповідають основним положенням статистичної фізики, дає можливість обґрунтувати поведінку сукупності мікрочастинок, з яких вони складаються. Як наслідок такої поведінки можна спостерігати, наприклад, теплові шуми, броунівський рух і інші явища, які характеризують вірогідну розмитість кордонів між шарами підкладин ФК МОЕМС і носять випадковий характер.

Використовуючи ці обґрунтовані припущення, проведемо аналогії ТП виготовлення підкладок ФК, які складаються з сукупності мікрочастинок, розподілених по енергіях, наприклад, канонічний розподіл Гіббса для ізотермічної системи, розподіл Максвелла-Больцмана, як наслідок цього розподілу, для ідеального газу, що дозволяє дати «механічне» трактування термодинамічних параметрів [51, 55, 57, 58].

Можна припустити, що початкові значення випадкової складової ТП

виготовлення $z(0)$ і початкова дисперсія d_w визначаються середніми значеннями $z(t)$ і дисперсією, отриманими в попередні моменти спостережень.

Рівняння екстраполяції мають вигляд (2.34):

$$z(k+1/k) = Qz(k/k-1) + K(k+1, k)[g(k) - z(k/k-1)], \quad (2.34)$$

з коефіцієнтом підсилення $K(k+1, k)$, (2.35):

$$K(k+1, k) = QD(k/k-1)[D(k/k-1) + D_v]^{-1}, \quad (2.35)$$

де D_v – дисперсія обумовлена похибками спостережень.

Рівняння дисперсії має вигляд (2.36):

$$D(k+1/k) = Q^2D(k/k-1) + d_w - (QD(k/k-1))^2[D(k/k-1) + D_v]^{-1}. \quad (2.36)$$

Очевидно, отримані вирази за результатами спостережень $g(k)$ в момент часу, відповідний $k=1$, дозволяють оцінити значення $z(\delta t_p) = z(k+1/k)$, і через інтервал часу прогнозу δt_p , відповідний $k+1=2$, тобто зробити прогноз розвитку процесу і оцінити помилку прогнозу.

Тоді можна стверджувати, що знання математичного очікування $z(\delta t_p)$ і дисперсії $D(\delta t_p)$ дає можливість зробити параметричну оцінку нормального закону розподілу випадкової величини ТП виготовлення підкладин ФК МОЕМС.

На основі отриманої функції щільності розподілу $\omega(z)$ можна оцінити ймовірність P помилки передбачення або навпаки інтервал Δ_z помилки при заданій ймовірності знаходження помилки в цьому інтервалі, використовуючи цю ймовірність як гарантію рішень про технічний стан підкладок ФК МОЕМС, використовуючи вираз (2.37):

$$P(-\Delta_z < z < +\Delta_z) = \int_{-\Delta_z}^{+\Delta_z} \omega(z) dz. \quad (2.37)$$

Реальні оцінки, що відповідають початку процесу, можуть бути зроблені тільки після набору статистичних даних (орієнтовно) щодо відхилення реальної траєкторії від тієї, яка розраховувалася на основі обраної моделі, як оцінки обираються відповідні математичні очікування [44-45, 67-69].

Випадкові складові спостерігаються у вигляді помилок прогнозу, тоді можна припустити, що в початковий момент оцінювання t_n ($k=0$) (2.38)–(2.39):

$$z(0/0) = M_n(\Delta V); \quad (2.38)$$

$$d_w = D(0/0) = D_n(\Delta V). \quad (2.39)$$

Таким чином, при відображенні процесів розвитку виробничих дефектів неодмінно необхідно врахувати флуктуаційний та еволюційний характер процесів в підкладках ФК МОЕМС перемикачів в процесі їх ТП виробництва.

2.5 Розробка програмного засобу для обробки даних фізико-технологічних процесів виробництва підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем

Після отримання математичних моделей фізико-технологічних параметрів ТП виробництва підкладок ФК МОЕМС наступним етапом є обрахунок масивів даних для вибору оптимального варіанту ТП за різними параметрами, наприклад мінімальною кількістю дефектів у структурах підклади ФК МОЕМС.

Для аналізу інформації проводиться нумерація кожного окремого ТП для можливості графічної візуалізації результатів моделювання з використанням розробленого програмного засобу (ПЗ), інтерфейс якого наведено на рис. 2.5.

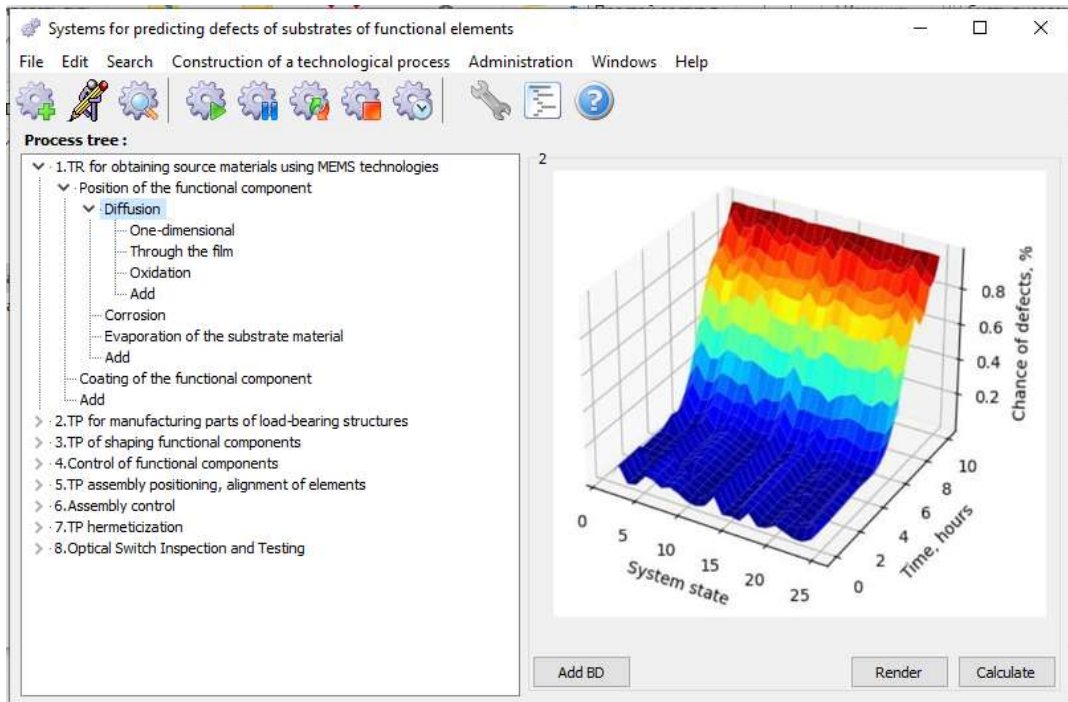


Рисунок 2.5 – Інтерфейс розробленого ПЗ

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

Використовуючи низку вихідних параметрів для підкладок ФК МОЕМС, орієнтуючись на вимоги мінімізації дефектів підкладок ФК МОЕМС і використовуючи дані попередніх експериментальних досліджень того чи іншого варіанту виконання, розробник може прийняти рішення, про використання оптимального ТП та його параметри.

На рис 2.6 представлена послідовність ТП виробництва ФК МОЕМС перемикача. На даному етапі досліджень, сформовано базу вхідної інформації ТП параметрів для підкладок ФК МОЕМС з кремнію.

ПЗ реалізовано зберігання параметрів, значення сталих коефіцієнтів та величин.

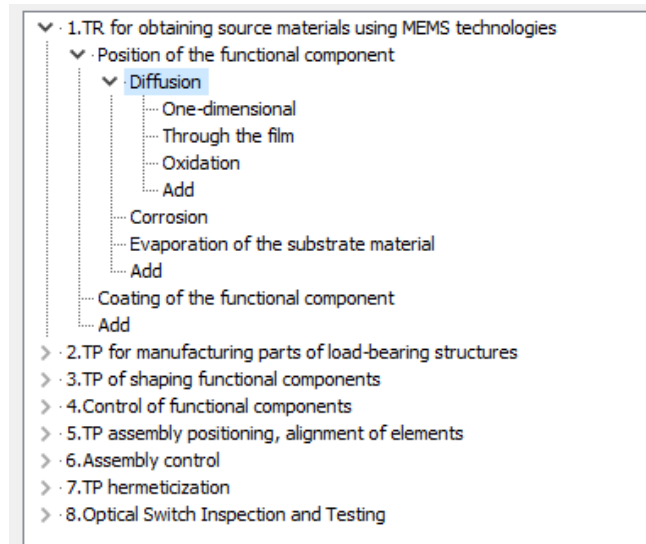


Рисунок 2.6 – ТП виготовлення підкладок ФК МОЕМС

Програмний засіб має функції вибору: стандартного для підприємства ТП, можливість коригування параметрів ТП виготовлення (таких процесів обираємо 25).

ТП з параметрами, представляється як стан системи від 1 до 25. Кожен стан відповідає окремому ТП з унікальними параметрами. За співвідношеннями середніх значень дисперсії та квадратичних кореляцій узагальнених координат з їх середнім значенням, при урахуванні додаткових (випадкових) сил, що діють в кожному стані системи.

Можна створювати нові проекти, зберігати їх і змінювати параметри, за рахунок коригування, представлена можливість зміни кожного параметра окремо або підлаштування масивів параметрів ТП виготовлення, для прогнозування дефектності і підбору устаткування в умовах виробництва. Оператор-технолог приймає рішення про використання існуючого ТП, або розробку нового, з огляду отриманих технічних умов та очікуваних результатів.

При цьому основою для прийняття такого рішення може стати фізико-технологічна модель прогнозування параметрів дефектоутворення в підкладках ФК МОЕМС, запропонована у даному розділі дисертаційної роботи.

На рис. 2.7 наведено залежності станів системи (варіант ТП) від часу та ймовірності виникнення дефектів у структурах підкладок ФК МОЕМС.

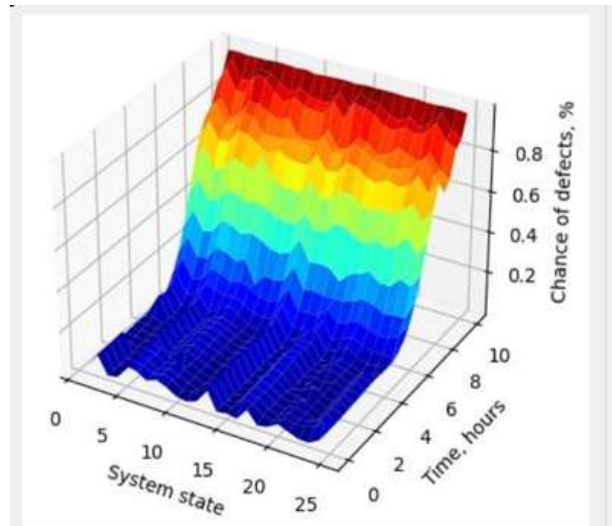


Рисунок 2.7 – Залежності станів системи від часу та ймовірності виникнення дефектів в структурах підкладок ФК МОЕСМ

За наявними теоретичними та експериментальними даними особа, яка приймає остаточне рішення про варіант ТП виготовлення виробу, може також проаналізувати поведінку системи для того часового інтервалу, який виходить за межі експериментальних чи розрахункових результатів, але дозволяє судити про стан виробу на етапі його подальшої експлуатації.

Розглянутий підхід можна застосувати для аналізу параметрів ТП виробництва ФК МОЕСМ під час проведення прогнозування та випробувань спроектованих ТП для виробництва ФК МОЕСМ. За такого відображення динаміки зміни параметрів ТП із часом з використанням спеціально розробленого програмного засобу, що реалізує моделі прогнозування, можна буде значно знизити трудомісткість роботи особи, що приймає рішення про дефектність готового виробу на стадіях контролю, випробувань та експлуатації.

При проведенні розрахунків, за запропонованими фізико-технологічними моделями, час що було затрачено на підрахунок в ручному режимі склав 23,3 години, а з використанням запропонованого ПЗ зменшення трудовитрат склало всередньому більше ніж в 1,5 рази (в залежності від варіанту ТП виробництва).

2.6 Висновки до розділу 2

В другому розділі розроблено 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.

Релаксаційний характер великомасштабних еволюційних і флуктуаційних процесів обумовлений властивостями нерівноважних станів фізичних систем під час ТП їх виготовлення. За часом релаксації спостерігаються еволюційні процеси у виробництві і технічному обслуговуванні ФК МОЕМС і відповідні їм моделі мають відношення до витрачання ресурсу і зміни фізичної структури, як функціональної підкладки, так і компонента МОЕМС в цілому.

Статистична фізика дає можливість пояснити кінетику термодинамічних параметрів середовища на основі поведінки сукупності частинок підкладок ФК МОЕМС з яких це середовище компонента складається, а дефектні макроскопічні стани підкладок ФК і його зміна відображають поведінку обсягу дефектних шарів.

Використання основних положень теорії Гіббса дає можливість обчислити середні значення і флуктуації фізичних величин, якщо відома залежність середніх значень цих величин від зовнішніх постійних сил.

Так як метою розробки моделі прогнозування виникнення дефектів в ТП виробництва ФК МОЕМС є передбачення, то пропонується використати теорію екстраполяції з урахуванням випадкових процесів в ТП.

Оцінювання та передбачення випадкової поправки до кожного прийнятого рішення варіанту ТП є рішенням еволюційних диференціальних рівнянь процесів в середині ТП виробництва і дає можливість отримати фізико-технологічну модель процесу розвитку виробничих дефектів в підкладках ФК МОЕМС, що враховує випадкову компоненту при його відображенні і

прийнятті таких рішень при прогнозуванні зміни параметрів.

Для графічної візуалізації процесів та скорочення трудовитрат, зручності аналізу отриманої інформації ТП виробництва підкладок ФК МОЕМС, за запропонованими математичними моделями прогнозування дефектів, розроблено ПЗ, що дає зменшення трудовитрат на розробку ТП більше ніж в 1,5 рази.

Матеріали можуть бути корисними при складанні технологічних процесів виготовлення, як підкладок функціональних компонентів МОЕМС, так і піз час ТП нанесення тонких плівок на підкладки ФК МОЕМС.

Матеріали цього розділу опубліковані в роботах автора [1, 2, 4, 6–8, 11–15] (Додаток Б).

Список джерел, які використано у даному розділі, наведено у повному списку використаних джерел [1, 10, 12, 13, 19, 20, 26, 29, 30, 36, 39–46, 49–66, 69].

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПІДКЛАДОК ФУНКЦІОНАЛЬНИХ КОМПОНЕНТІВ МІКРООПТОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

3.1 Постановка задачі досліджень

Експлуатаційні властивості перемикачів МОЕМС залежать від якості компонентів, що використовуються. Необхідні параметри можна гарантувати лише за умови суворого дотримання ТП їх виробництва та використання високоточного обладнання контролю та обробки даних [70-73].

Однією з найважливіших операцій у виробничому процесі виробництва компонентів МОЕМС є технологічний процес формоутворення [71].

Фінішні операції в такому технологічному процесі формоутворення – шліфування та полірування поверхні підклади функціональних компонентів. Використання зазначених ТП зумовлено тим, що майже на кожному етапі ТП виготовлення пластини підкладок ФК МОЕМС на їх поверхні залишаються дефекти, які призводять до неоднорідності структури поверхневого шару підкладки та зміни його фізико-технологічних параметрів.

Для видалення та мінімізації дефектів поверхню пластини ФК МОЕМС шліфують, полірують або травлять [12, 13,72].

Під час полірування та шліфування з поверхні пластини ФК видаляють шар матеріалу для забезпечення високої точності форми, зменшення чи усунення наслідків різання, отримання значень заданої шорсткості, зменшення товщини порушеного та дефектного шарів. Це дає змогу мінімізувати дефекти, (а деякі, навіть, видалити) в структурі пластини підкладки. Напівпровідникові пластини шліфують жорстким інструментом (шліфувальними колами з алмазу), або вільними абразивами.

Матеріалами для абразивної обробки можуть бути порошкоподібний

алмазний порошок, карбід бору, електрокорундові суміші. Шліфування виконується, як правило на шліфувальних верстатах чи автоматах, якими обробляють напівпровідникові пластини [12, 19].

Розділ присвячено розробці та дослідженню математичної моделі параметрів та факторів, які впливають на формоутворення ФК МОЕМС, що дозволяє прогнозувати, ступінь впливу фізико-технологічних параметрів ТП на параметри формоутворення поверхонь підкладок ФК компонентів МОЕМС для зменшення та мінімізації дефектів.

Шорсткість поверхні ФК є основним показником формоутворення, що є критичним на кожному етапі виготовлення таких компонентів [72, 73].

На першому етапі, використовуючи теорії планування експериментів, було обрано багатофакторний експеримент та проведено факторне планування.

На другому етапі розроблено математичну модель, за якою представлені експериментальні дані моделювання.

Було проведено повний факторний експеримент, щоб забезпечити прогнозування та контроль технологічних процесів формоутворення підкладин функціональних компонентів МОЕМС при поліруванні та шліфуванні різними типами алмазних шліфувальних паст (АСМ 2/1, АСМ1 4/10, АСМ 0/28) та дані рекомендації, щодо формування фізико-технологічних параметрів процесу технологічного процесу формоутворення таких компонентів [74].

На третьому етапі отримано дослідні зразки з використанням запропонованого методу та моделювання в результаті експериментального ТП формоутворення.

3.2 Планування експерименту для побудови моделі формоутворення підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем

Для моделювання впливу режимів фінішних технологічних операцій на параметри формування підкладин ФК МОЕМС було використано повний

факторний експеримент [74].

Для проведення експерименту необхідно виконати наступне:

- отримати та проаналізувати апріорну інформацію;
- вибрати вхідні та вихідні змінні;
- розробити математичну модель, за якою будуть представлені експериментальні дані;
- визначити метод аналізу даних;
- провести експеримент;
- перевірити статистичні передумови для отриманих експериментальних даних;
- провести обробку результатів та інтерпретувати їх, а також розробити рекомендації щодо вибору значень параметрів [73] для отримання запланованих значень параметрів формоутворення підкладок ФК МОЕМС.

3.3 Визначення впливу факторів технології формоутворення підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем

Як відомо [70, 73-74], найбільш значущими вхідними факторами ТП формування, 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).

Слід зазначити, що у всіх проведених дослідах тиск був сталою та одноковою величиною.

Межі зміни факторів:

- максимальний час обробки матеріалу в межах $t_{max} = 20$ 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.

Варіантні фактори, представлено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Межі змін і позначення факторів

Фактори	Час обробки, (хв)	Швидкість обертання диска, (об/хв)	Зернистість паст, (мкм)	Шорсткість, (мкм)
Прийняте позначення	t	v	z	Ra
Позначення в МФЕ	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	–

Плануванню експерименту передуює етап визначення центру експерименту і інтервалів варіювання факторів. При цьому оцінюються границі областей визначення факторів, що задаються технічними обмеженнями [12, 71, 73, 74].

На підставі проведених досліджень обираємо чинники, від яких залежить результуюча величина шорсткості матеріалу Y (мкм) [10].

Складаємо узагальнену формулу залежності математичної моделі:

$$Y=f(t,v,z), \quad (3.1)$$

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

Оскільки істинний вид базової функції (3.1) невідомий, то для опису поверхні відгуку ФК будемо використовувати рівняння, що представляє собою розкладання цієї функції в ряд [73]:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{ij=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2, \quad (3.2)$$

де x_i, x_j – змінні фактори при $1 \dots n, j=1 \dots n, i \neq j$;

b_0, b_i, b_{ij} – коефіцієнти регресії при відповідних змінних, значення яких визначають форму поверхні відгуку підкладки ФК.

Розраховані числові значення коефіцієнтів регресії занесені в таблицю 3.2. Перевірка статистичної значущості параметрів регресійного рівняння (коефіцієнтів регресії) виконувалася за t -критерієм Стьюдента [74-76].

Побудуємо матрицю проведення повного факторного експерименту, а результати занесемо до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати проведення повного факторного експерименту

№	t	V	z	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	$x_1^2 = x_1^2 - d$	$x_2^2 = x_2^2 - d$	$x_3^2 = x_3^2 - d$	y
1	20	40	32	1	1	1	1	1	1	1	0,2697	0,2697	0,2697	44,1
2	10	40	32	-1	1	1	-1	-1	1	-1	0,2697	0,2697	0,2697	20,6
3	20	30	32	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0,2697	0,2697	0,2697	35,7
4	10	30	32	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,2697	0,2697	0,2697	17,9
5	20	40	2	1	1	-1	1	-1	-1	-1	0,2697	0,2697	0,2697	12,2
6	10	40	2	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,2697	0,2697	0,2697	5,8
7	20	30	2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,2697	0,2697	0,2697	9,7
8	10	30	2	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,2697	0,2697	0,2697	4,5
9	24,3	35	17	1,2154	0	0	0	0	0	0	0,7469	-0,7303	-0,7303	28,4
10	7,84	35	17	-1,215	0	0	0	0	0	0	0,7469	-0,7303	-0,7303	8,1
11	15	48,616	17	0	1,22	0	0	0	0	0	-0,7303	0,7469	-0,7303	30,2
12	15	23,538	17	0	-1,22	0	0	0	0	0	-0,7303	0,7469	-0,7303	14,7
13	15	35	38,9	0	0	1,215	0	0	0	0	-0,7303	-0,7303	0,7469	46,6
14	15	35	1,58	0	0	1,215	0	0	0	0	-0,7303	-0,7303	0,7469	3,8
15	15	35	17	0	0	0	0	0	0	0	-0,7303	-0,7303	-0,7303	22,6

Було визначено дисперсію відтворюваності [74]. Розраховані числові значення дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії занесені в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Розраховані числові значення дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії

Коефіцієнти Регресії	Перевірка коефіцієнтів регресії за критерієм Стьюдента				
	Чисельне значення	S^2_{bi}	t_{bi}	Табличне значення коефіцієнта Стьюдента	Перевірка значущості
b_0	20,33	0,418	31,456	1,886	Значний
b_1	5,17	0,572	6,839	1,886	Значний
b_2	2,25	0,572	2,975	1,886	Значний
b_3	9,21	0,572	12,177	1,886	Значний
b_{12}	0,46	0,783	0,520	1,886	Не значний
b_{13}	1,98	0,783	2,238	1,886	Значний
b_{23}	0,49	0,783	0,550	1,886	Не значний
b_{123}	0,30	0,783	0,339	1,886	Не значний
b_{11}	-1,22	1,435	1,016	1,886	Не значний
b_{22}	-0,39	1,435	0,325	1,886	Не значний
b_{33}	0,15	1,435	0,127	1,886	Не значний

Рівняння регресії (3.3) в кодованому вигляді:

$$y=20,33-5,17x_1+2,25x_2+9,21x_3+1,98x_1x_3. \quad (3.3)$$

Для оцінки адекватності моделі було проведено її оцінку за критерієм Фішера. Знайдемо кодовані розрахункові значення Y згідно з отриманим рівнянням регресії (3.3).

Результати кодованих розрахункових і експериментальних значень відгуку функції занесені до таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Розрахункові та експериментальні значень відгуку функції

№ досліджу	\bar{y}_u	\hat{y}_u
1	44,1	38,9
2	20,6	24,6
3	35,7	34,4
4	17,9	20,1
5	12,2	16,6
6	5,8	10,2
7	9,7	12,1
8	4,5	5,7
9	28,4	36,6
10	8,1	14
11	30,2	23,1
12	14,7	17,6
13	46,6	31,5
14	3,8	9,1
15	22,6	20,3

Модель аналізувалася за коефіцієнтом детермінації [74], який є значимим для рівня значущості 5 % та дорівнює 0,98. Отже, отримане рівняння регресії адекватно описує процес у межах досліджуваної області .

3.4 Визначення ступені впливу факторів на формоутворення підкладки функціонального компонента мікрооптоелектромеханічних систем

Для отримання поверхні відгуку кожен з трьох факторів було зафіксовано на нульовому рівні: $t=15$ хв, $v = 35$ об/хв, $z = 17$ мкм.

Підставивши ці значення, було розкодовано рівняння регресії, та отримано три рівняння з двома факторами [71, 74, 76].

Для декодування рівнянь (3.4)–(3.6) було проведено заміну x_i на натуральні значення:

$$x_1 = \frac{t-15}{5} = 0,2t - 3, \quad (3.4)$$

$$x_2 = \frac{v-35}{5} = 0,2v - 7, \quad (3.5)$$

$$x_3 = \frac{z-17}{15} = 0,0057z - 1,13. \quad (3.6)$$

Після декодування :

$$y(t, v, z) = 20,33 + 5,17(0,2t - 3) + 2,25(0,2v - 7) + 9,21(0,05z - 1,13) + 1,98(0,2t - 3)(0,005z - 1,13). \quad (3.7)$$

Після виконання перетворень і скорочень, отримаємо рівняння (3.8)–(3.11):

$$y(t, v, z) = 8,7975t + 0,45v + 0,1635z + 0,0198tz - 14,6251, \quad (3.8)$$

$$y_{t=15}(v, z) = 0,45v + 0,4605z - 5,8273, \quad (3.9)$$

$$y_{v=35}(t, z) = 0,58652t + 0,1635z - 1,1249, \quad (3.10)$$

$$y_{z=17}(t, v) = 0,92312t + 0,45v - 1,1249. \quad (3.11)$$

Побудована за отриманими рівняннями група залежностей представлена на рис. 3.1.

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

На рис. 3.2 – 3.4 представлено поверхні відгуків пластин для різної комбінації факторів.

Використовуючи запропоновану математичну модель, було отримано результати моделювання впливу фізико-технологічні параметрів поверхонь

підкладин ФК МОЕМС на їх формоутворення [70].

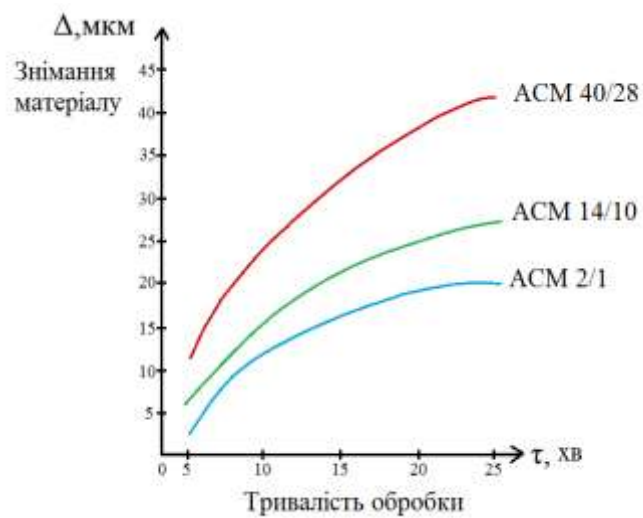


Рисунок 3.1 – Залежність знімання матеріалу від тривалості обробки

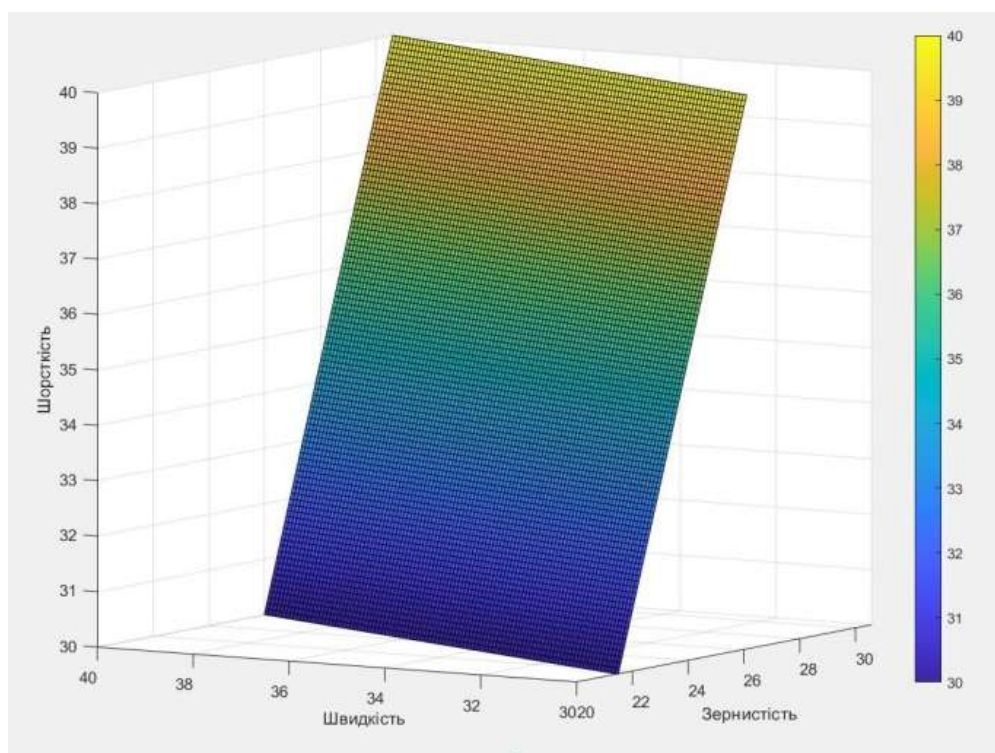


Рисунок 3.2 – Поверхня відгуку за фіксованого значення часу обробки

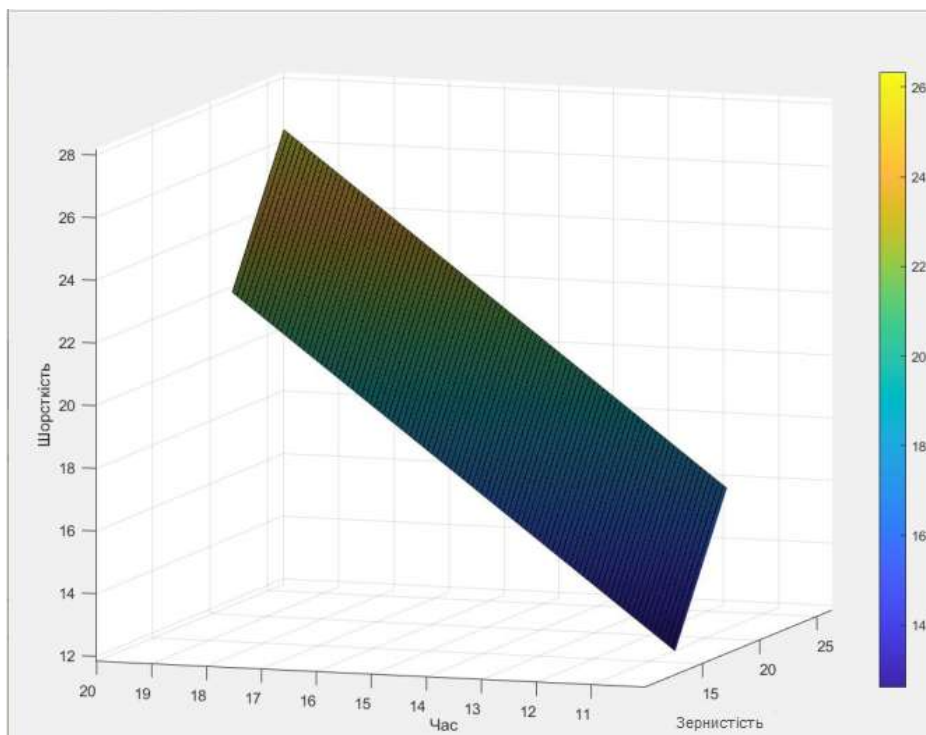


Рисунок 3.3 – Поверхня відгуку за фіксованого значення швидкості
обороту шпинделя

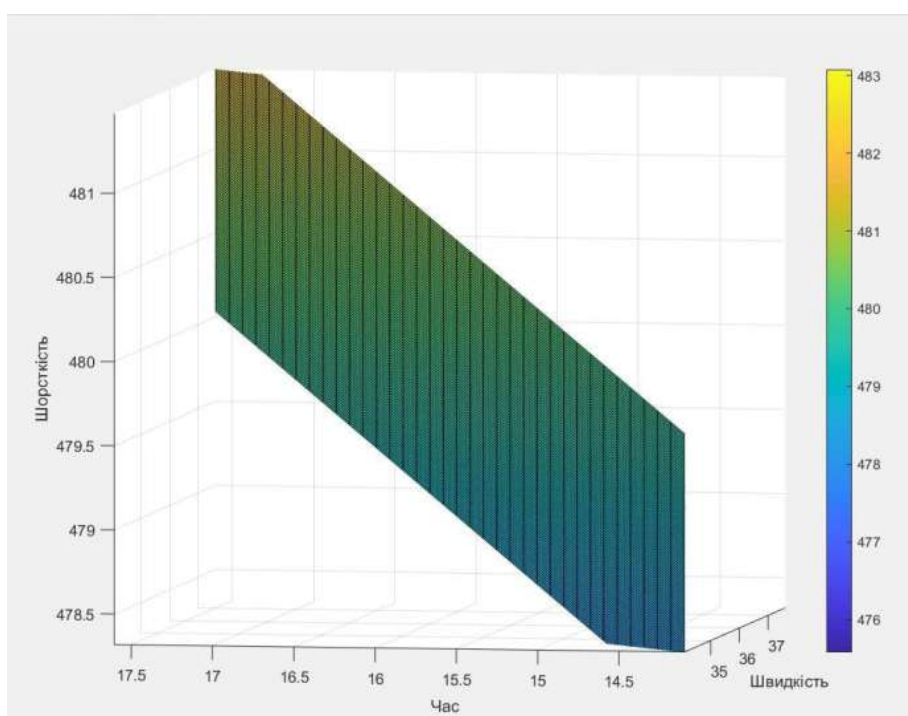


Рисунок 3.4 – Поверхня відгуку за фіксованого значення зернистості
алмазної пасти

3.5 Експериментальні дослідження параметрів технологічного процесу формоутворення підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем

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

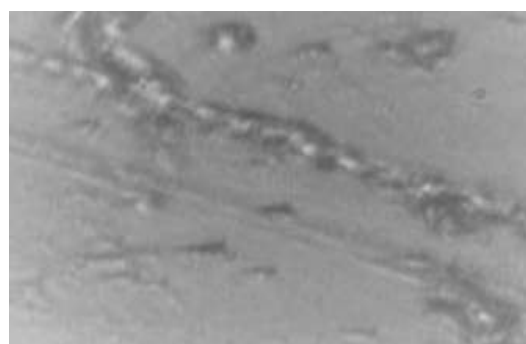
Експеримент було проведено на базі ТОВ «НВП «УКРІНТЕХ» у випробувальній лабораторії (свідоцтво № 100-360/2015 від 29.12.2015 р. видане державним підприємством «Харківський регіональний науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації») (акт впровадження додаток Б).

Формоутворення зразків підкладок ФК МОЕМС з кремнію було проведено на шліфувально-полірувальному верстаті FTP-1М серії PreciPolish (рис. 3.35).



Рисунок 3.5 – Верстат FTP-1М серії PreciPolish

На рисунку 3.6 представлено експериментально отримані зразки поверхонь підкладок ФК МОЕМС з кремнію (рис. 3.6, а – до обробки), результати обробки в режимі за фіксованого значення часу (рис. 3.6, б); за фіксованого значення швидкості обертання шпинделя до та після обробки відповідно (рис. 3.6, в та рис. 3.6, г), а також за фіксованого значення зернистості алмазної пасти до та після обробки відповідно (рис. 3.6, д та рис. 3.6, е).



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.6 – Зображення експериментально отриманих підкладок ФК МОЕМС з кремнію

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

Розроблений метод дозволяє планувати ТП формоутворення підкладин ФК МОЕМС, дані результати можуть бути інтегровані до ПЗ, що дасть змогу планувати ТП, зменшить трудовитрати на їх впровадження і обробку масивів математичних даних та збільшить точність і відтворюваність результатів.

3.6 Висновки до розділу 3

У третьому розділі дисертаційної роботи проведено обґрунтування особливостей виконання ТП формоутворення підкладок з кремнію ФК МОЕМС. Проведене дослідження дає можливість визначити значення параметрів формування підкладок ФК МОЕМС, що в свою чергу, прямо впливає на зменшення осередків і розмірів дефектних мікрозародків в підкладках ФК.

Даний метод дозволяє планувати ТП формоутворення компонентів такого типу, дані результати в перспективі можуть бути інтегровані до існуючого ПЗ (2 розділ), що дасть змогу планувати ТП, зменшить трудовитрати часу обробки масивів даних.

Проведено трифакторний експеримент і отримано математичну модель впливу технологічних операцій шліфування та полірування на параметри формоутворення підкладок ФК МОЕМС.

Адекватність отриманої моделі підтверджено за допомогою критерію Фішера. Знайдено кодовані розрахункові значення згідно з отриманим рівнянням регресії.

Науково новизну, що отримано за результатами досліджень, можна визначити як: 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

За допомогою отриманої моделі проведено експериментальні дослідження та отримано експериментальні зразки на базі ТОВ «НВП «УКРІНТЕХ» у випробувальній лабораторії (акт впровадження додаток Б).

На наступному етапі, отримані зразки, будуть перевірені за допомогою розробленого неруйнівного методу контролю.

Матеріали цього розділу опубліковані в роботах авторки [16-20] (Додаток В).

Список джерел, які використано у даному розділі, наведено у повному списку використаних джерел [12, 13, 19, 70-76].

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ НЕРУЙНІВНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ПОВЕРХОНЬ ПІДКЛАДОК ФУНКЦІОНАЛЬНИХ КОМПОНЕНТІВ МІКРООПТОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Розділ містить результати, що направлені на підвищення точності, відтворюваності інформації та зниження трудомісткості ТП контролю при розробці технології виробництва підкладок ФК МОЕМС.

Розділ присвячено розробці в технологічному процесі інтерференційного методу контролю якості функціональних компонентів шляхом усунення супутніх складових в зображенні за рахунок адаптивного запропонованого цифрового фільтру, для підтвердження результатів теоретичних досліджень, виконаних на попередніх етапах роботи.

З використанням запропонованого фазового методу обробки вхідних даних та комп'ютерного моделювання, на основі інтерференційних зображень підкладок ФК МОЕМС, проведено експеримент на базі проблемної науково-дослідної лабораторії «Мікроелектромеханічні та мікрооптоелектромеханічні системи» (ПНДЛ МЕМС ТА МОЕМС) кафедри КІТАМ, ХНУРЕ та отримано документальне підтвердження про дослідне впровадження результатів дисертаційної роботи в Інституті сцинтиляційних матеріалів Національної Академії Наук України в відділі впровадження науково дослідних розробок (м. Харків, Україна) (додаток Б).

4.1 Обґрунтування вибору методу неруйнівного контролю

Державними стандарти України (ДСТУ), стандартами Міжнародної організації зі стандартизації International Organization for Standardization (ISO) та Єдиної системи технологічної підготовки виробництва [77-80], визначено, що використання методів контролю повинно забезпечувати скорочення термінів

підготовки виробництва продукції заданої якості, забезпечення високої гнучкості виробничої структури і значної економії трудових, матеріальних і фінансових ресурсів.

Також встановлені обов'язкові показники процесу контролю:

- точність вимірювання;
- достовірність контролю;
- трудомісткість контролю;
- вартість контролю [77-80].

Враховуючи вище зазначені вимоги стандартів, було проведено обґрунтування вибору методу в технологічному процесі контролю якості формоутворення підкладок ФК МОЕМС.

З проведеного аналізу [1, 21, 27, 35] було виділено ряд методів, що можна використати для дослідження підкладок ФК МОЕМС.

Вибір методу контролю залежить від параметрів контрольованого об'єкта і умов його досліджень. Жоден із відомих методів не є універсальним, тому не може задовольнити в повному обсязі вимоги.

Методи дослідження форм об'єктів (рис. 4.1) можна розділити на два великих класи – контактні і безконтактні.



Рисунок 4.1 – Методи дослідження 3D-геометрії об'єктів

Враховуючи розміри та особливості матеріалів підкладок ФК МОЕМС, для контролю їх параметрів, було вирішено, що доцільно використовувати неруйнівні безконтактні види контролю.

Оптичні неруйнівні методи контролю (НМК) є перспективними, як найбільш прості і найменш матеріалозатратні. Серед таких методів можна виділити найбільш поширені: методи світлового перерізу, стереоскопічні, інтерференційні і растрові і фотограмметричні методи [35].

Оптичні МНК застосовують для виявлення мікронеоднорідностей і шорсткості поверхні, для вимірювання товщини плівок. В процедуру неруйнівного контролю, як правило, включені як мінімум 2 методи: один поверхневий і один об'ємний. Поверхневі методи більш прості у виконанні, тому їх проводять перед об'ємними, а об'ємні проводять при відсутності показань на неприпустимі дефекти за результатами поверхневих.

Такі прилади мають ряд переваг: незалежність результатів вимірювання від матеріалу об'єкта контролю, можливість зміщення контрольованого об'єкту в поле зору прибору, високою точністю, швидкодією, можливістю автоматизації.

Розрізняють три класи приладів для контролю поверхонь і об'ємних поверхневих дефектів:

- прилади для контролю шорсткості поверхонь;
- прилади для контролю і виміру дефектів і мікрогеометрії (при цьому контролюються окремі дефекти у виробках і вимірюється глибина дефекту);
- прилади для контролю площинності високоякісних поверхонь і вимірювання товщини прозорих плівок (цими приладами виявляються дефекти типу однорідного вигину, завалів, складного вигину (викривлення), сколів та виколів).

Кожний вид НМК здійснюють методами, які класифікують за наступними ознаками:

- характером взаємодії фізичних полів або речовин з контрольованим об'єктом;

- первинними інформативними параметрами;
- способом отримання первинної інформації;

Вибір методу неруйнівного контролю залежить від параметрів контрольованого об'єкту та його умов дослідження [81, 82-90].

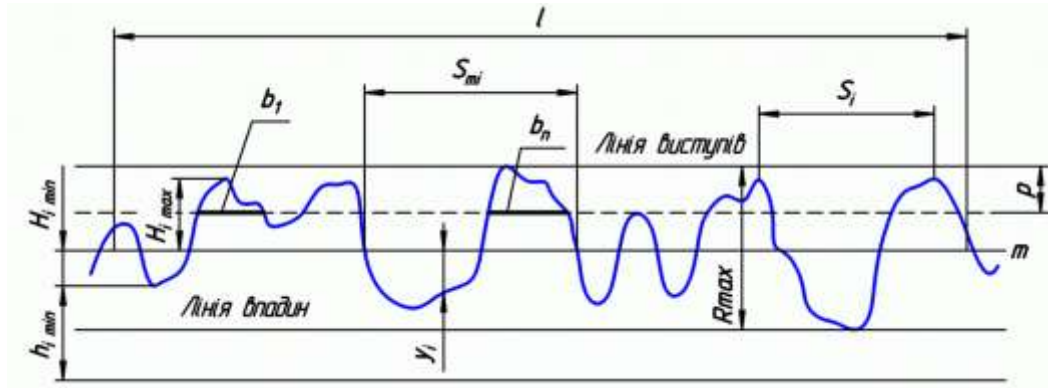
Для якісної оцінки шорсткості в цілому використовується близько 30 параметрів. Однак, як правило, число таких параметрів зведено до шести. Їх поділяють на дві групи – вертикальні (їх називають також висотні) і горизонтальні (крокові) та інтерпретують профілографами [12].

До першої відносяться середнє арифметичне відхилення профілю: R_a – середнє арифметичне відхилення профілю в межах базової довжини; R_z – висота нерівностей профілю по 10 точках (сума середніх абсолютних значень висот п'яти найбільших виступів і глибин п'яти найбільших впадин профілю в межах базової довжини; R_{max} – найбільша висота профілю (відстань між лінією виступів профілю і лінією впадин профілю в межах базової довжини); S – середній крок місцевих виступів профілю (середнє арифметичне значення кроку нерівностей профілю по вершинах в межах базової довжини); S_m – середній крок нерівностей профілю по середній лінії (середнє арифметичне значення кроку нерівностей профілю в межах базової довжини); t_p – відносна опорна довжина профілю (відношення опорної довжини профілю до базової довжини, де p – значення рівня перерізу профілю) (рис. 4.2).

Виступи шорсткості розподіляються на поверхні рівномірно або нерівномірно, причому в загальному випадку вони можуть мати різну форму й розміри.

Шорсткість може оцінюватися середнім арифметичним відхиленням профілю, тобто середнім арифметичним абсолютних відхилень профілю R_a у межах базової довжини l : $R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$, або висотою нерівностей профілю:

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^n R_{i_{max}} \cdot \sum_{i=1}^5 R_{i_{min}} \right).$$



Рисуюнок 4.2 – Профілограма шорсткості поверхні

Залежно від значень параметрів Ra і Rz якість обробки поверхні оцінюється відповідним класом шорсткості [12, 90].

Слід враховувати, те, що для виробів одного типу характеристичні розміри дефектів S_{ki} вимірюються в певному інтервалі і обумовлюються приблизним порядком випадкових факторів [90, 91]:

$$P_{ki}(S_{ki} > S_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ki}} \int_{S_0}^{\infty} e^{-\frac{(S_{ki}-\bar{S}_{ki})^2}{2\sigma_{ki}^2}} dS_{ki}, \text{ де, } \sigma_{ki} - \text{середнє квадратичне}$$

відхилення характеристичного розміру дефекту типу (k) і виду (i); S_{ki} – центр розсіювання.

При неруйнівному способі контролю в залежності, від умов контролю і розмірів дефект може бути виявлений чи не виявлений. Мінімальне значення характеристичного розміру дефекту виробу, що фіксується при контролі із імовірністю більше ніж 0,99 визначає граничну чутливість пристрою неруйнівного контролю [35, 37].

Якість обробки поверхні ФК МОЕМС напряму впливає на френелівські втрати, на втрати, що виникають із-за розсіювання світла на мікронерівностях поверхонь підкладок. Для досягнення заданої якості обробки поверхні підкладки необхідно технологічно забезпечити і контролювати нерівності поверхні.

Інформація про якість поверхні може бути отримана на основі

використання наступних оптичних методів неруйнівного контролю: метод світлового розрізу; растровий метод; рефлектометричний метод; метод зліпків; метод порівнянь із еталонною поверхнею; інтерференційний метод.

Слід зазначити, що перераховані методи контролю теж не в повній мірі вирішують поставлену задачу, бо деякі з них не є безконтактними.

Серед перелічених та досліджених методів, було прийнято рішення обрати інтерференційний неруйнівний, безконтактний метод.

Сучасна інтерференційна профілометрія широко застосовується в метрології, промисловості і наукових дослідженнях.

Інтерференційні методи дають можливість вимірювати рельєф поверхонь з роздільною здатністю менше 0,2 мкм, похибкою менше 0,01 мкм і високою продуктивністю (більше 100 точок вимірювання в секунду).

4.2 Експериментальне дослідження інтерференційного методу контролю поверхонь функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем

В інтерференційних засобах вимірювання шорсткості поверхонь використовується інтерференція двох або більше пучків світла, що відходять із однієї точки і що мають однакове направлення коливань, однакову частоту, постійну різницю фаз [35, 37, 83].

Явище інтерференції виникає, зокрема, в повітряному проміжку між двома пластинами. Падаючий на верхню пластину пучок променів розділяється її внутрішньою поверхнею на два когерентних пучка, один з яких відображається у зворотному напрямку, а інший також у зворотному напрямку, інтерферуючи з першим пучком.

Більшість відомих у даний час інтерферометрів побудовано на класичних інтерференційних схем Релея, Майкельсона, Фізо, Маха-Цендера і Фабрі-Перо [35, 37].

Залежно від призначення існують різні конструкції інтерферометрів,

однак, принцип їх дії в основному один і той же.

Світлові хвилі від кожної крапки, що світиться, джерела світла поділяються в приладі на дві або декілька частин, які проходять шляхи різної довжини і знову з'єднуються один. Завдяки цьому світлові хвилі, що накладаються, набувають певної оптичної різниці ходу, є когерентними і інтерферуються.

У інтерферометрах, що застосовують для контролю топології поверхні, один з інтерферуючих променів відбивається від еталонної поверхні, а інший – від контрольованої.

Інтерферометри, призначені для вимірювання висоти мікронерівностей або мікрообробки на поверхнях малої шорсткості, називають мікроінтерферометрами.

Вимірювання висоти мікронерівностей здійснюється за викривлення смуг рівної товщини. Але оптичний прилад, призначений для спостережень мікронерівностей, повинен мати велике збільшення і високу роздільну здатність. Тому мікроінтерферометри є поєднанням інтерферометра типу Майкельсона (рідше Фізо) і мікроскопу.

За чутливість приладу прийнятий вигин інтерференційної смуги на ступінь напилення на скляній плоскій пластині, виражений в частках смуги, яка може бути видима в полі зору приладу і виміряна за допомогою відлікового пристрою [35, 37, 83]. Основні характеристики мікроінтерферометрів наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4. 1 – Основні характеристики мікроінтерферометрів [37]

Параметри	МИИ-4	МИИ-9	МИИ-10
R_a , мкм	0,16 – 0,02	0,16 – 0,02	2,5 – 0,04
R_z , мкм	0,1 – 0,25	0,1 – 0,25	
при візуальному спостереженні	490	500 та 700	375 та 500
при фотографуванні	260	125	200
Поле зору, мм	0,32	0,35 та 0,25	0,48 та 0,36

Експеримент проводився на базі обладнання кафедри КІТАМ ХНУРЕ у проблемній науково-дослідній лабораторії «Мікроелектромеханічні та мікрооптоелектромеханічні системи» (ПНДІ МЕМС та МОЕМС).

Було використано інтерферометр МІІІ-4 (рис. 4.3), камерою з матричним ПЗЗ (прилад із зарядним зв'язком), яку під'єднано до персонального комп'ютеру.



Рисунок 4.3 – Установка для проведення експерименту на основі інтерферометру МІІІ-4

На рис. 4.4 наведено схему двопробеневого інтерферометра Лінніка, що було використано. В її основу покладено принцип дії інтерферометра Майкельсона.

Світловий пучок, що йде від джерела світла 1 , проходить через конденсор 2 і діафрагму 3 з напівпрозорим дзеркалом 4 , ділиться на два когерентних пучка, які фокушуються об'єктивами 5 і $5'$ на еталонне дзеркало 6 і контрольовану поверхню 7 , відповідно. Після відбиття від еталону і виробу пучок проходить через ті ж елементи схеми і фокусується лінзою 8 в площині діафрагми 9 , в якій за допомогою окуляра 10 спостерігають інтерференційну картину взаємодії еталонного і робочого пучків світла.

Спостерігається інтерференційна картина відповідає інтерференції в повітряному шарі, утвореному дзеркалом 7 і уявним зображенням (6 , пунктирна лінія) еталонного дзеркала 6 в ділячній пластині 4 . Дзеркало 6 розташоване так, що дзеркала 7 і 6 утворюють повітряний клин, тому виникають смуги рівної товщини, локалізовані в площині клина і представляють собою паралельні лінії. Для їх спостереження використовують об'єктив, що можна переміщувати, 10 , фокальна площина якого поєднана з поверхнею дзеркала 7 [35, 37].

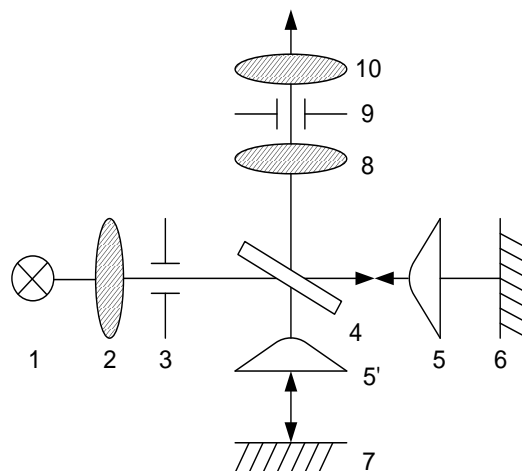


Рисунок 4.4 – Схема двопробеневого інтерферометра [35, 37]

Ширину і напрямок інтерференційних смуг можна регулювати нахилом дзеркал [92, 93].

Смуги викривлені відповідно до профілю поверхні, що контролюється

(рис. 4.5 а, б) [37]. Форма інтерференційних смуг відтворює у масштабі профіль контрольованої ділянки поверхні. Кривизну смуг (величину вигину ΔA) вимірюють за допомогою окулярного мікрометра. На рисунку 4.5, в приведено реальне фото інтерференційної картини підкладки ФК МОЕМС ФК, що досліджувалася.

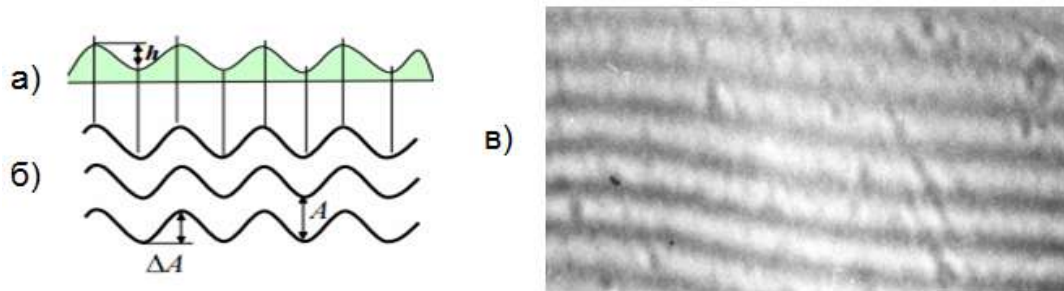


Рисунок 4.5 – Інтерферограф: а) профіль поверхні; б) вигляд інтерференційної картини; в) реальне фото інтерференційної картини підкладки ФК МОЕМС ФК, що досліджувалася

Кривизна смуг є кількісною характеристикою мікронерівностей поверхні ФК МОЕМС. Вимірювання можна проводити в білому або монохроматичному світлі. При роботі в білому світлі висота нерівності рівна:

$$h = 0,27\Delta A / A(\text{мкм}),$$

де ΔA – величина вигину інтерференційної смуги;

A – величина інтервалу між смугами.

При роботі в монохроматичному світлі:

$$h = \lambda\Delta A / 2A(\text{мкм}),$$

де λ – довжина хвилі.

Мікроінтерферометри МИИ-4,5,9,10 призначені для визначення висоти нерівностей поверхонь в межах від 1 – 0,02 мкм.

Оптичні системи інтерферометрів мають збільшення 490 раз і полі зору

0,32 мм. При подібних вимірах не потрібно навіть визначати ціну поділки шкали барабана окулярного мікрометра, оскільки вона отримується сама собою при порівнянні розмірів нерівностей профілю, виражених в поділках шкали [35, 37], із шириною інтерференційної полоси, вираженої в тих же поділках, тому що відстань в одну поділку відповідає розміру нерівності профілю поверхні, рівному зазвичай половині довжини хвилі .

4.3 Фазовий метод обробки даних для досліджень поверхонь підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем

Використання того чи іншого метода обробки залежить від наступних факторів: точність вимірів і захищеності системи від похибок; швидкодії пристрою реєстрації та обчислювальної системи; наявності незалежних каналів отримання інформації сигналів та зовнішніх впливів.

Для контролю поверхонь підкладок 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, не потребує використання специфічного обладнання, дозволяє аналізувати характеристики поверхонь та отримувати їх тривимірне зображення.

Реальні інтерференційні сигнали можна представити для одновимірного випадку в формі (4.1) [83]:

$$s(x, \Theta) = s_0(x) + s_m(x) \cos[\varepsilon + 2\pi u_0 x + \psi(x)] + n(x), \quad (4.1)$$

де Θ – вектор параметрів;

$S_0(x)$ – фонові (гармонійна інформаційна) складова;

$\psi(x)$ – коефіцієнт фазових флуктуацій;

$n(x)$ – адитивний Гаусівський шум.

В (4.1) присутня гармонійна інформаційна складова, що свідчить про доцільність обробки інтерференційних сигналів у частотній області.

Сигнал (4.1) 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: дискретне (4.2) – у процесі обробки N - елементної послідовності значення сигналу $s(p)$ і дискретне зворотне перетворення (4.1) для визначення періодичностей в сигналах виду (4.3-4.4) [83]:

$$S(q) = \sum_{p=0}^{N-1} s(p) \exp(-j2\pi pq / N) , \quad (4.3)$$

$$S(q) = (1/N) \sum_{p=0}^{N-1} s(p) \exp(-j2\pi pq / N) . \quad (4.4)$$

Дослідний зразок ФК МОЕМС, після фінішних операцій було поміщено в інтерферометр та отримано фото та інтерферограму поверхні (рис. 4.6).

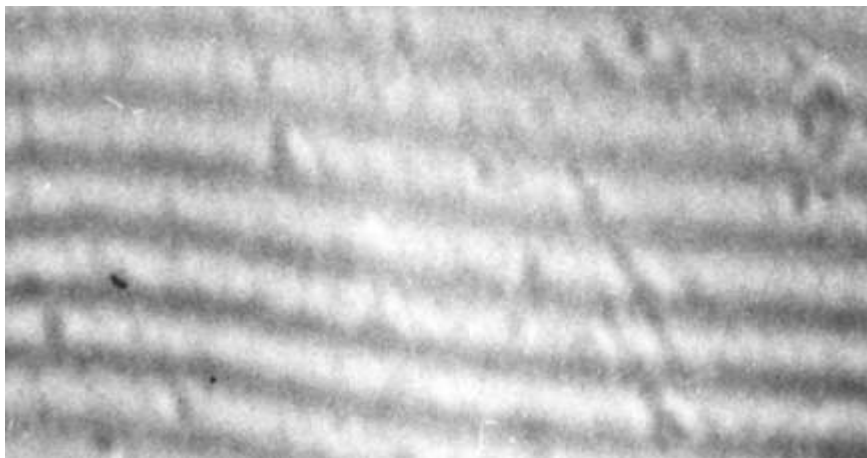


Рисунок 4.6 – Інтерференційних знімок досліджуваної поверхні

На (рис. 4.7) відзначається присутність у сигналі високочастотних та імпульсних шумів структури ФК.

Було використано інтерактивне середовище для програмування чисельних розрахунків і візуалізації, яке дозволило сформувати матрицю цифрових даних. На рис. 4.7) наведено фрагмент розподілу амплітуди інтерференційного поля в одновимірному варіанті, на рис. 4.8 – сигнал із шумовою складовою у багатовимірному варіанті.

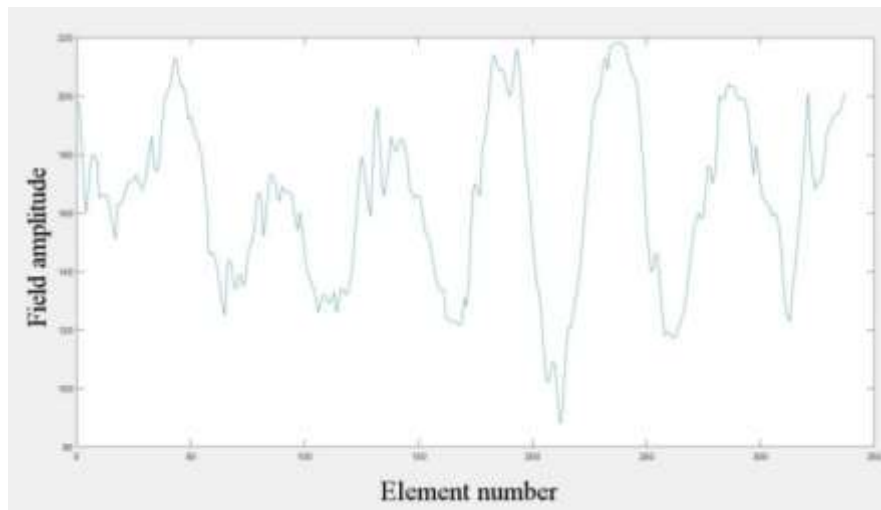


Рисунок 4.7 – Інтерференційний сигнал розподіл амплітуди інтерференційного поля в одновимірному варіанті

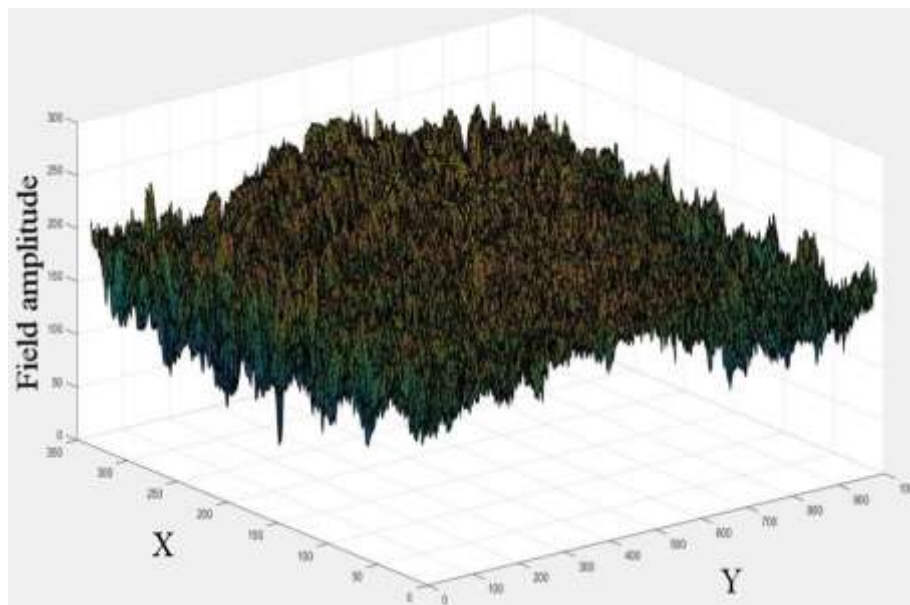


Рисунок 4.8 – Інтерференційний сигнал із шумовою складовою у багатовимірному варіанті

Враховуючи, що сигнал містить значні шумові складові, які унеможлиблюють знайти достовірні інтерференційні максимуми для отриманої матриці, та для мінімізації шумових складових, необхідно провести фільтрацію вхідного сигналу.

4.4 Обґрунтування вибору типу адаптивної фільтрації вихідного інформаційного сигналу

Процедура синтезу фільтра включає отримання передавальної функції з заданою точністю та відтворенням заданих частотних або просторових характеристик.

Найбільш поширеними видами передавальних функцій, що можуть бути використані для отримання заданих амплітудно-частотних характеристик, є функції Баттерворта, Чебишева та Бесселя [94-96].

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 (4.5):

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \omega^{2n}} \quad (4.5)$$

Сигнал має в собі значні шумові складові, які не дають можливості знайти інтерференційні максимуми для отриманої матриці. Для мінімізації шумових складових потрібно профільтрувати вхідний сигнал.

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) фільтра Баттерворта вирізняється тим, що при будь-якому порядку n значення амплітудно-частотної характеристики $H(j_0) = 1$; на частоті зрізу ω_c ($H(j\omega_c) = 0,7$).

АЧХ фільтра монотонно зменшується з ростом частоти. З цієї причини фільтри Баттерворта називають фільтрами з максимально плоскими характеристиками [94-96].

Порядок передатної функції n вибирають з умови забезпечення необхідного загасання в смузі затримування на частоті $\omega > \omega_c$.

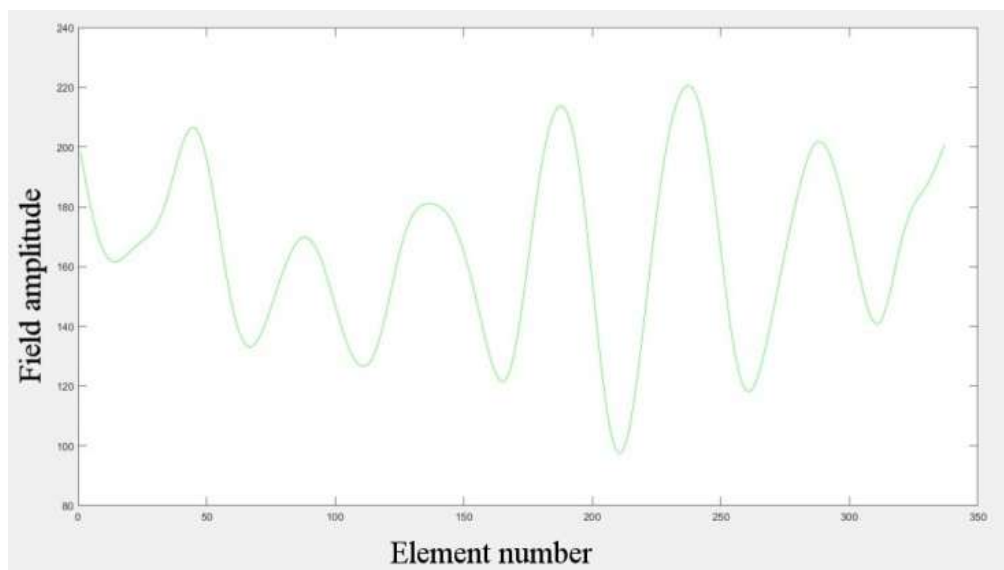
Модуль передатної функції у смузі затухання визначається (4.6):

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^{2n}}} \approx \frac{1}{\omega^n} . \quad (4.6)$$

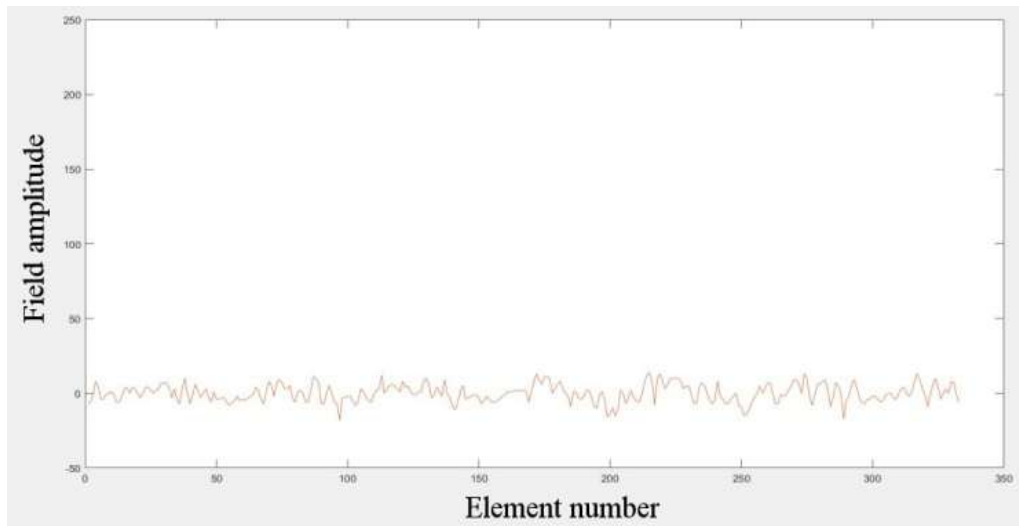
Порядок передатної функції визначається наближено (4.7):

$$n = 20 \lg |H(j\omega)| / 20 \lg(\omega / \omega_c) . \quad (4.7)$$

Число отримане в результаті розрахунків округляється до найближчого цілого [94-96]. На рисунку 4.9 представлено відфільтрований сигнал (рис. 4.9,а) та окремо шумова складова (рис. 4.9, б).



a)



б)

Рисунок 4.9 – Відфільтрований інтерференційний сигнал фрагменту ФК із використанням фільтру Баттерворта: а) відфільтрований сигнал; б) виділенні шуми

На рисунку 4.10 показано сигнал інтерференції до фільтрації і після в одномірному варіанті.

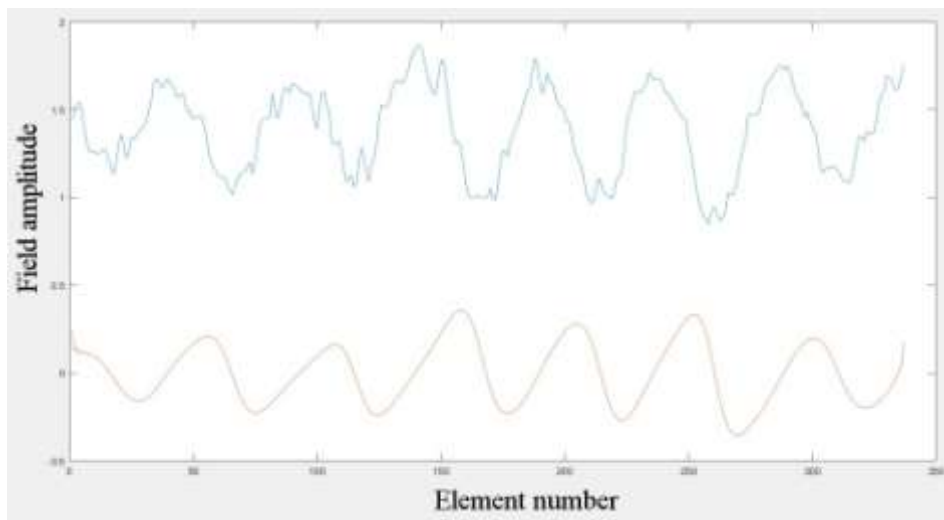


Рисунок 4.10 – Інтерференційний сигнал до і після фільтрації

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.

У результаті перетворення Гілберта інтерференційного сигналу відновлюється спряжена компонента $S_s(x)$ в аналітичному сигналі (4.8):

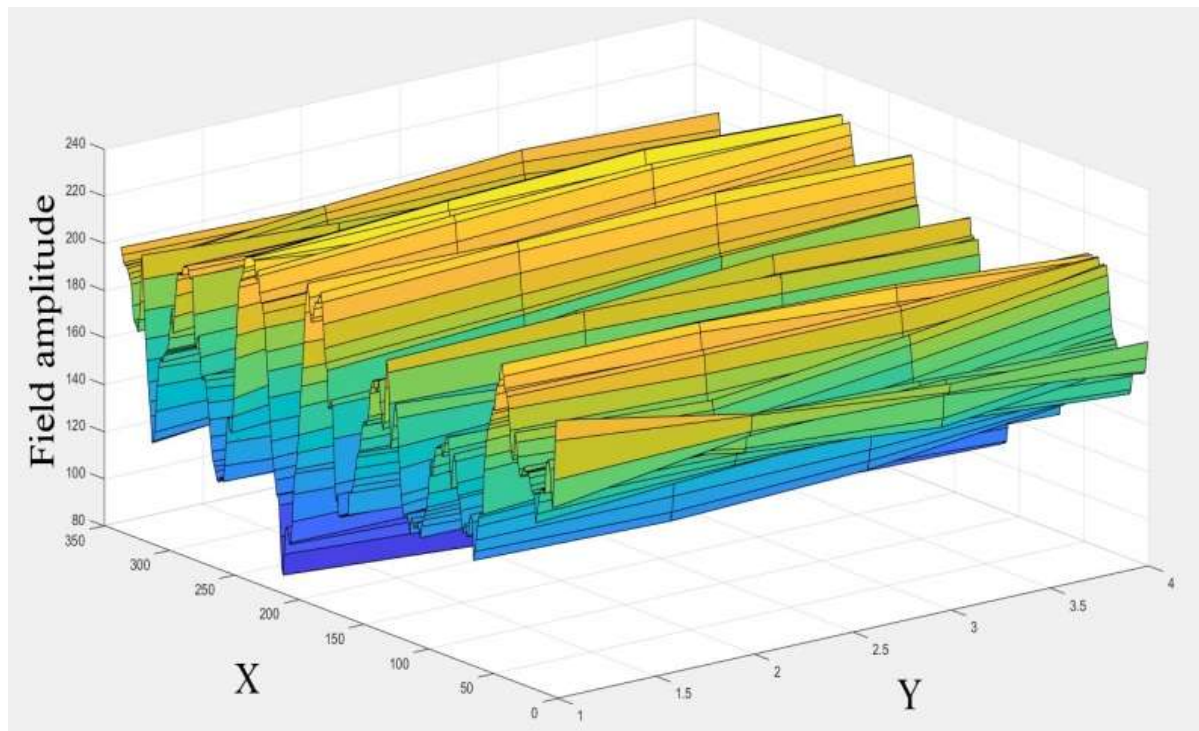
$$z(x) = s_c(x) + js_s(x), \quad (4.8)$$

де

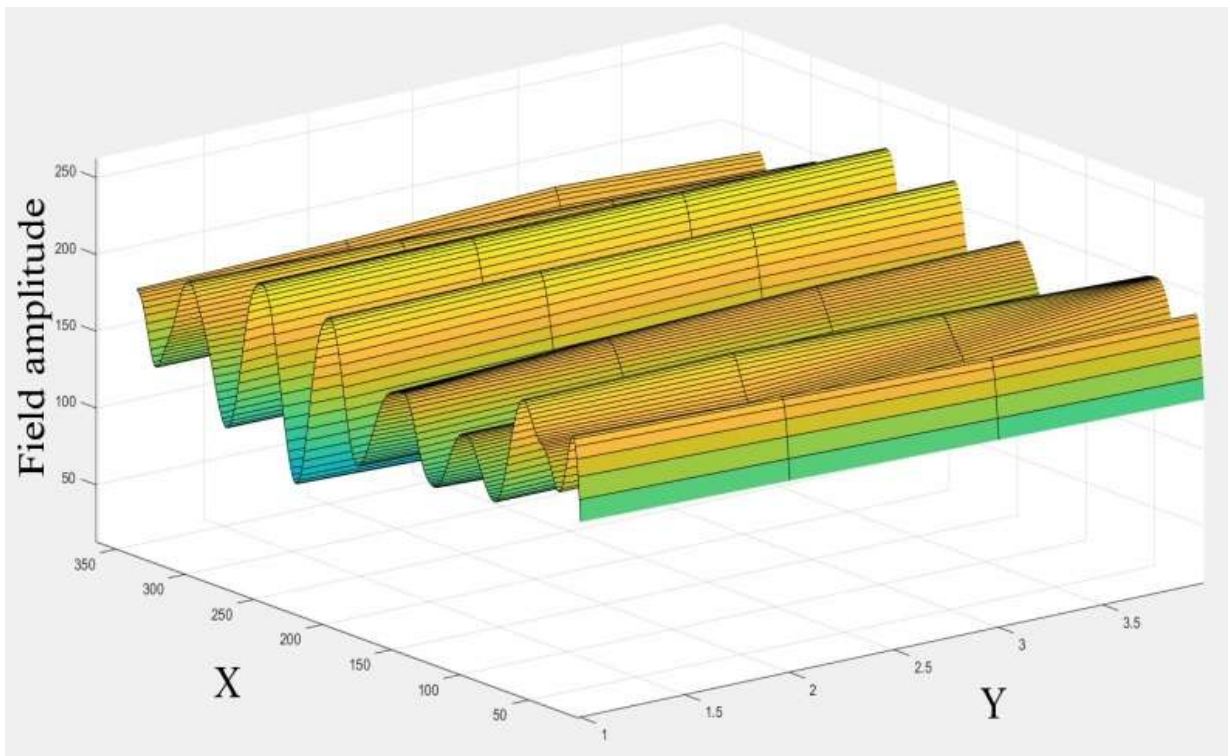
$$\begin{aligned} s_c(x) &= \operatorname{Re}\{z(x)\} = s_m(x) \cos[\varepsilon + 2\pi\mu_0 x + \psi(x)], \\ s_s(x) &= \operatorname{Im}\{z(x)\} = s_m(x) \sin[\varepsilon + 2\pi\mu_0 x + \psi(x)]. \end{aligned}$$

Обраний метод фільтрації було застосовано до всього інтерференційного зображення.

На рис. 4.11, а представлено тривимірний графік розподілу амплітуди інтерференційного поля на зразку ФК до фільтрації та після фільтрації – рис. 11, б.



a)



б)

Рисунок 4.11 – Тривимірний графік розподілу амплітуди інтерференційного поля ФК: а) до фільтрації; б) після фільтрації

Спостерігаємо, очевидне зменшення шумової складової (з використанням фільтру Батерворду), чіткість зображення, що дозволило достовірніше виконувати наступні перевірки.

Використавши квадратурні складові з (4.8) отримуємо оцінку фази інтерференційного сигналу (4.9) виконуючи операцію (4.7), що дійсна для усіх значень x :

$$\hat{\varphi}(x) = \hat{\varepsilon} + 2\pi\mu_0 x + \hat{\psi}(x) = \arctg[s_s(x) / s_c(x)]. \quad (4.9)$$

Слід враховувати той факт, що в операції (4.9) значення фази обчислюють з урахуванням всіх частотних складових сигналу, що є суттєвим і значно підвищує точність контролю підкладки ФК.

На рис. 4.12 приведено спектр вхідного сигналу з виділеним корисним сигналом, маркерами-пунктирами виділено зону корисного сигналу.

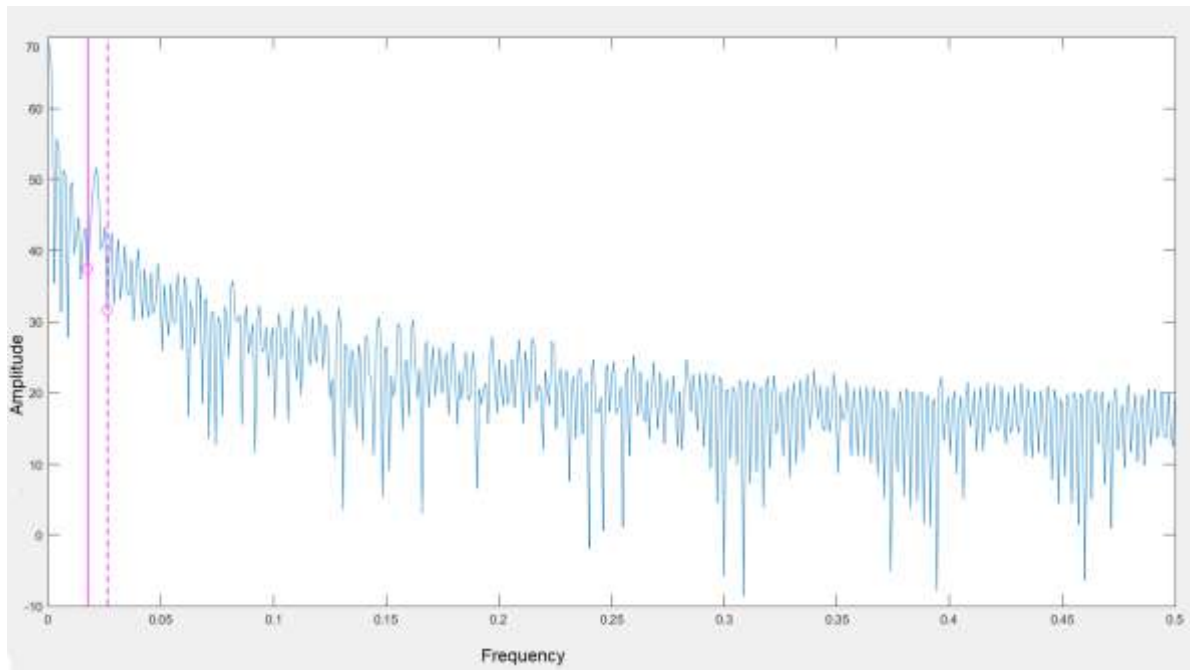


Рисунок 4.12 – Спектр вхідного сигналу з виділеним корисним сигналом

Для визначення максимумів в відфільтрованому сигналі можна провести диференціювання фільтрованого сигналу або застосувавши перетворення Гільберта [97-99].

Використаємо перетворення Гільберта для того, щоб розкласти вихідний сигнал на амплітудну та фазову складову.

Цей спосіб 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.

На рисунку 4.13 наведено фазовий рисунок фільтрованого сигналу.

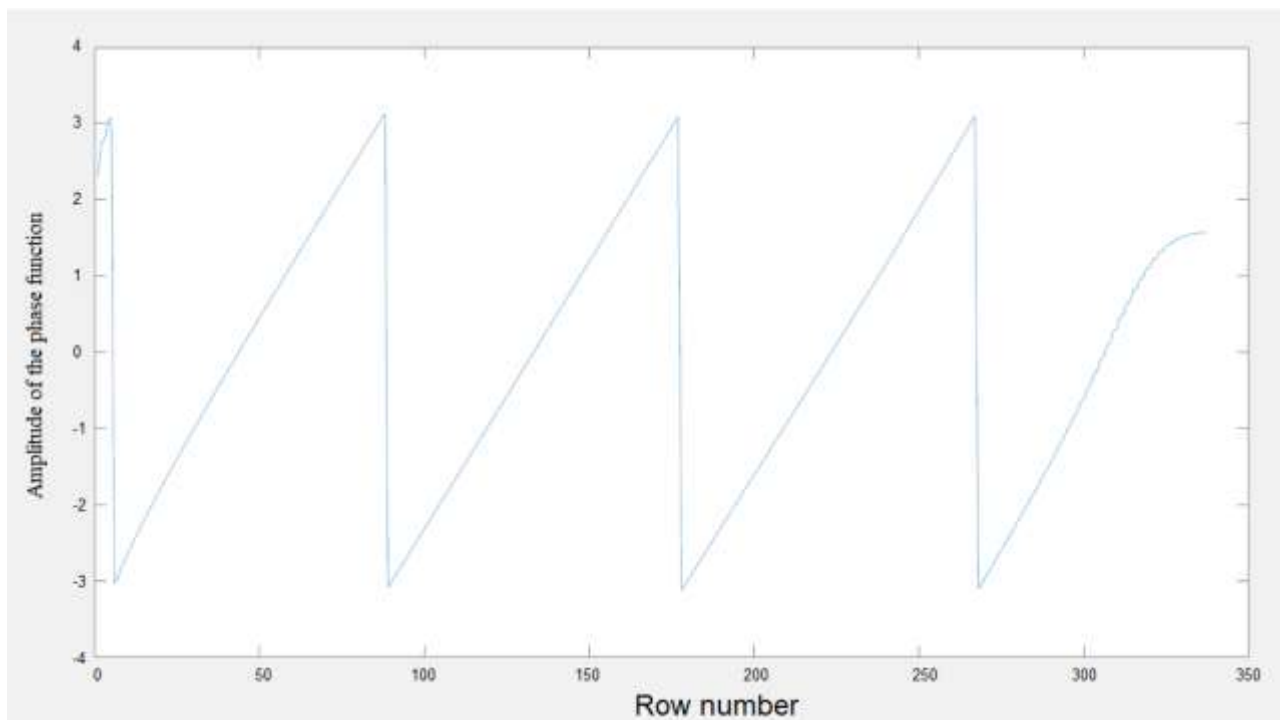


Рисунок 4.13 – Фазовий рисунок для фільтрованого сигналу

На рисунку 4.14 наведено фазовий рисунок (1), фільтрований сигнал (2), та вхідний сигнал (3) на одному графіку.

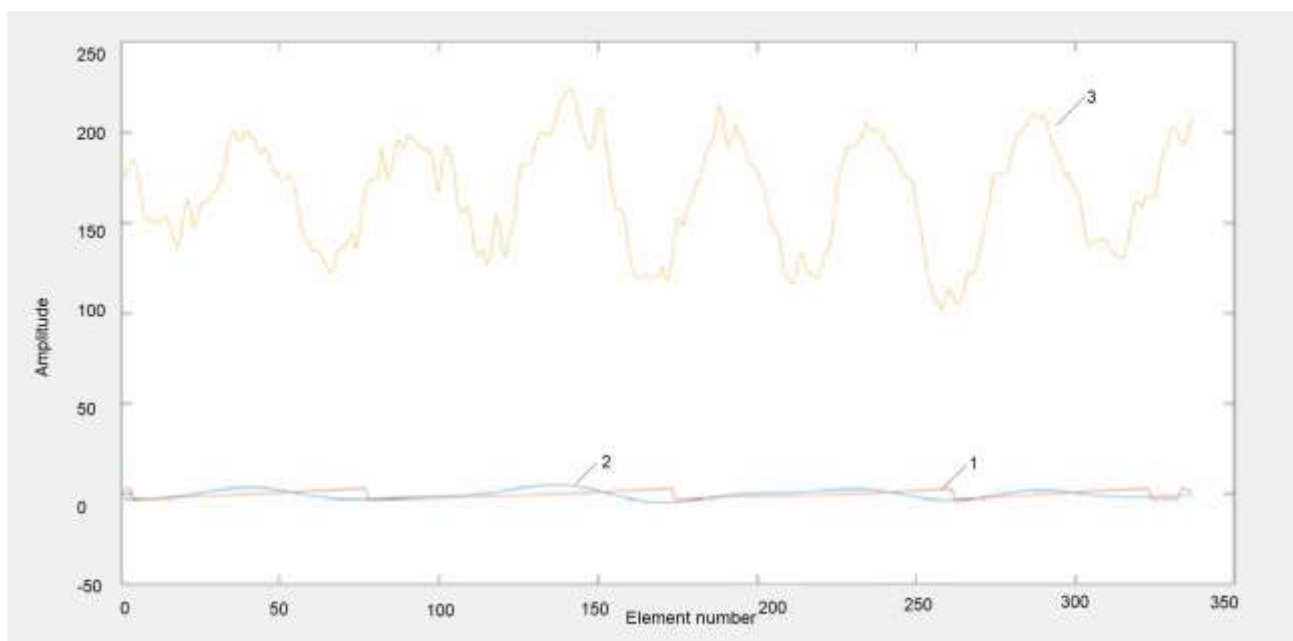
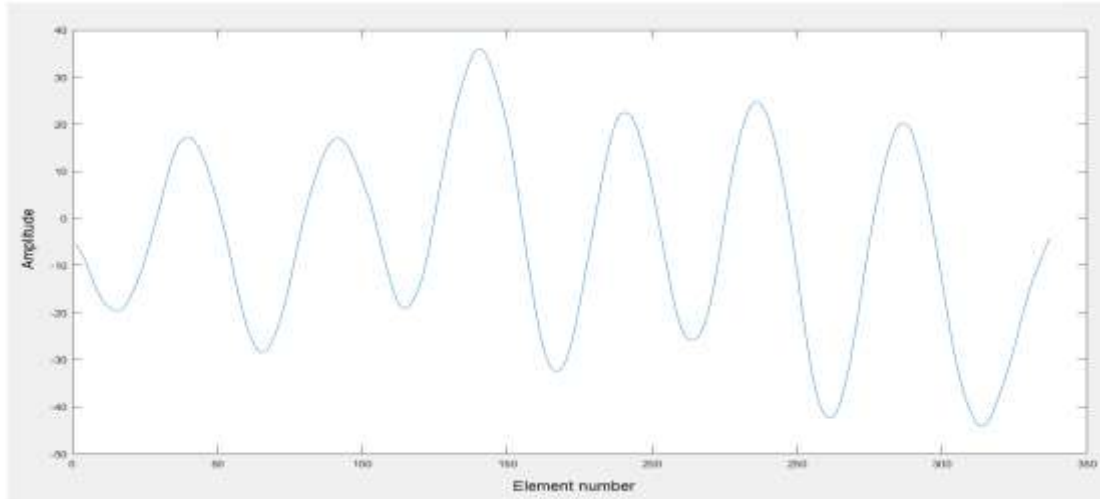
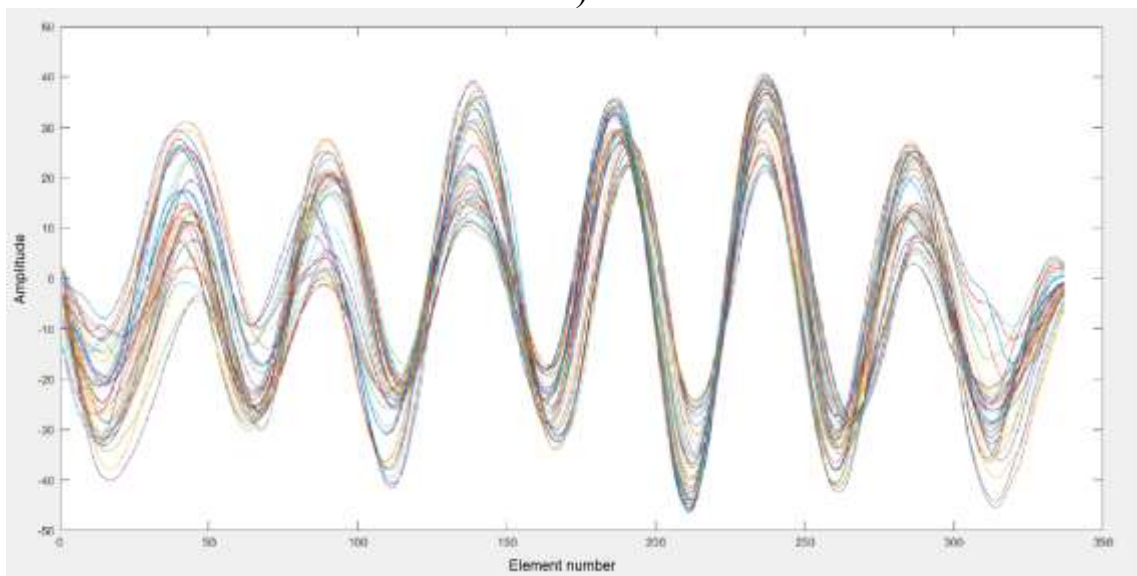


Рисунок 4.14 – Фільтрований сигнал, вхідний сигнал, та фазовий рисунок

На рисунках 4.15 наведено відфільтрований сигнал в одномірному варіанті (рисунок 4.15, а), та в багатомірному (рис. 4.15, б).



а)



б)

Рисунок 4.15 – Інтерференційний фільтрований сигнал в одномірному варіанті (а), в багатомірному (б)

На рисунку 4.16 наведено спектр вхідного сигналу з виділеним корисним сигналом. Маркерами-пунктирами виділено зону корисного сигналу.

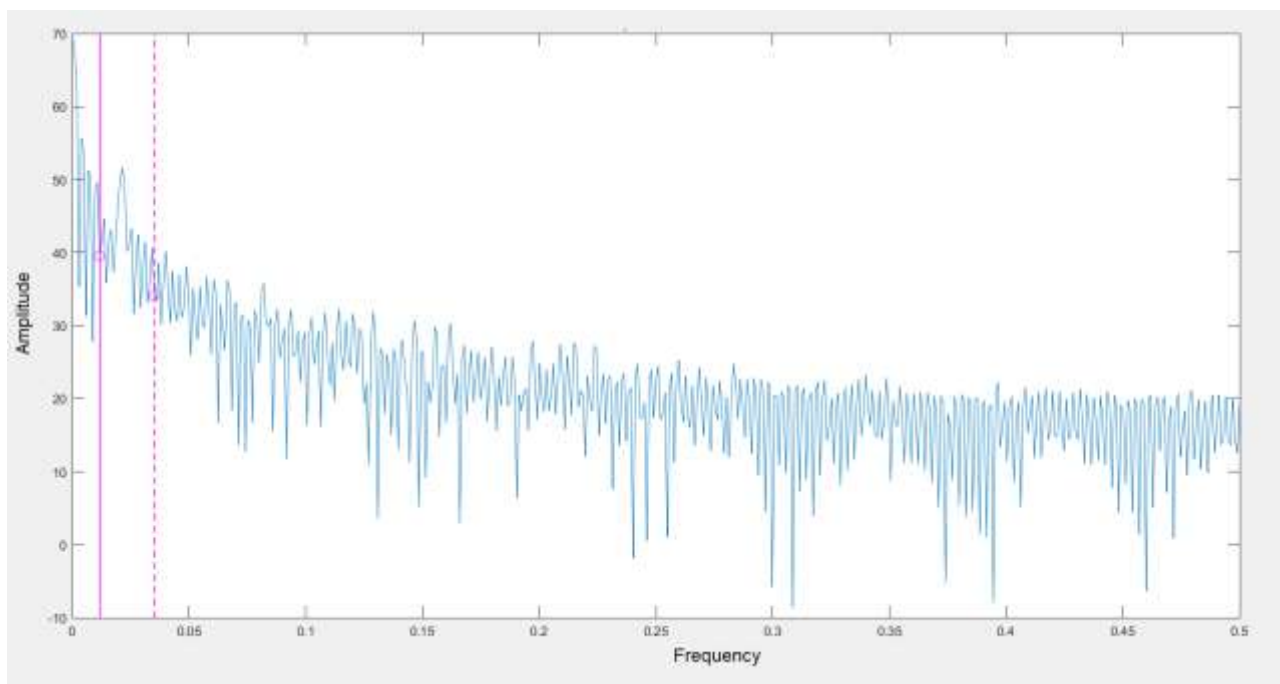
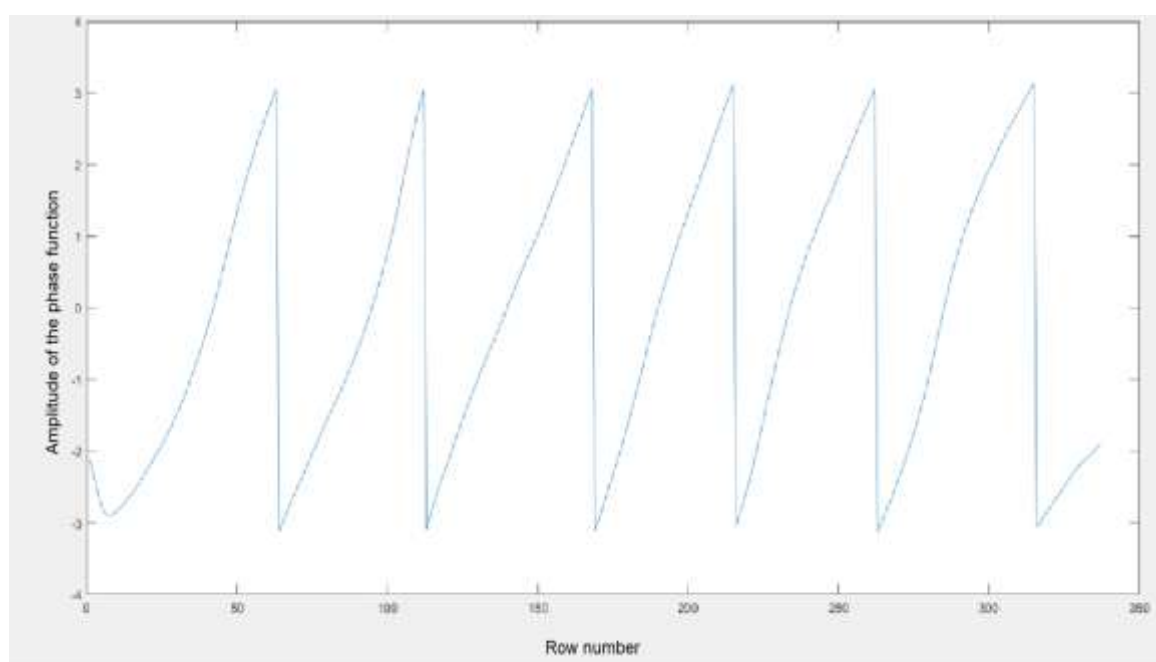


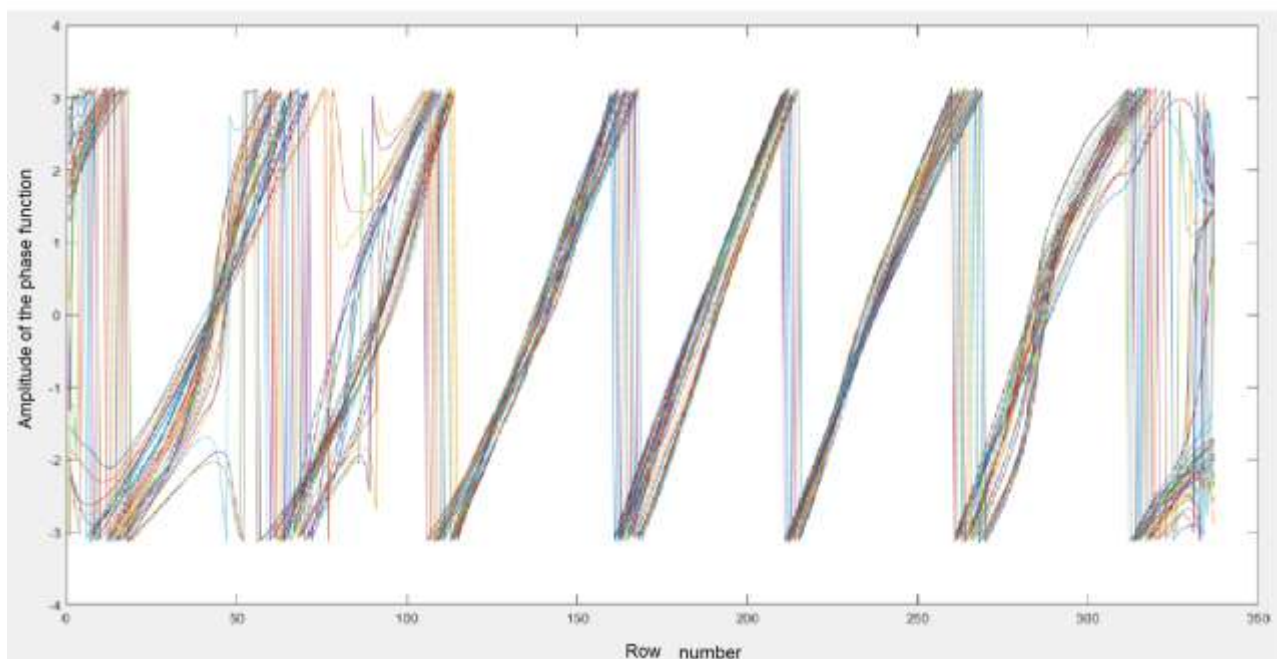
Рисунок 4.16 – Спектр вхідного сигналу з виділенням корисним сигналом

Виділена зона була розширена, оскільки встановлено, що перший варіант (рисунок 4.12) «відрізає» частину корисного сигналу.

На рисунку 4.17, а наведено фазовий знімок для вхідного одномірної інтерференційного сигналу, а на рисунку 4.17, б – фазовий знімок для вхідного багатомірної сигналу.



a)



б)

Рисунок 4.17 – Фазовий знімок для вхідного сигналу сигнал в
одномірному варіанті (а), в багатомірному (б)

На рисунку 4.18 наведено фазовий знімок(1), вхідний сигнал(3) та
фільтрований сигнал (2).

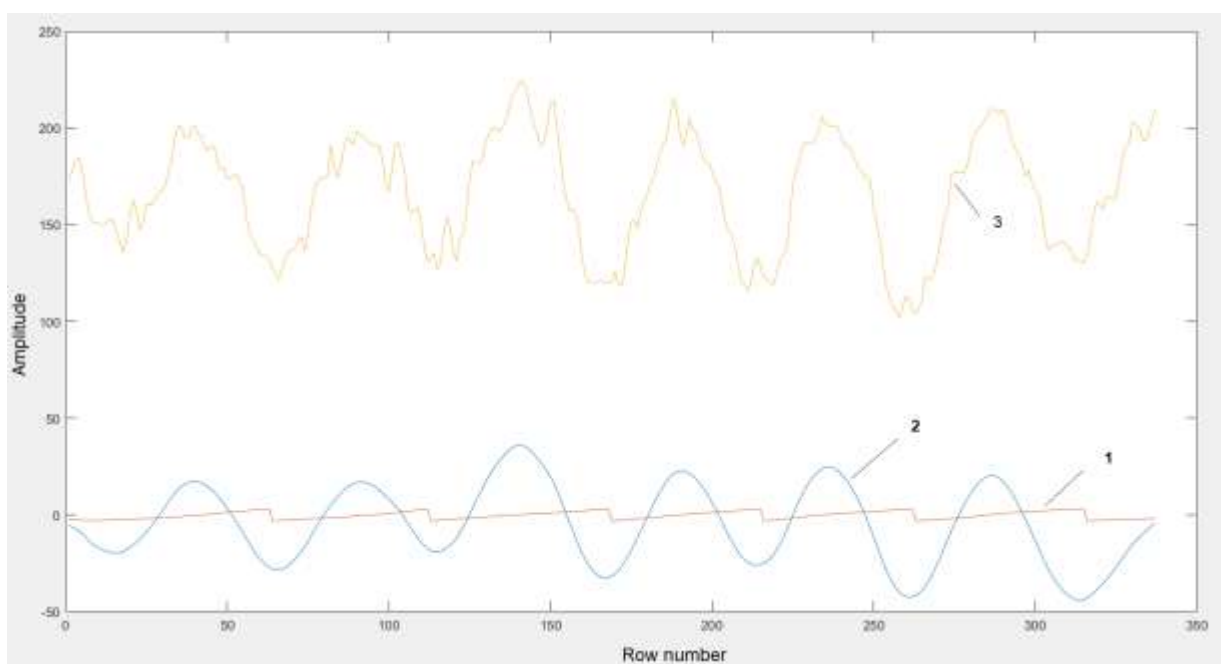


Рисунок 4.18 – Фазовий знімок (1), вхідний сигнал (3) та фільтрований
сигнал (2) на одному графіку

Порівнюючи рис.4.14 та рис. 4.18, робимо висновок, що в випадку рис.4.14 спостерігається надлишкове подавлення корисного сигналу. Через це було прийняте рішення використовувати фільтр Баттерворда 1 порядку. Також, можна зазначити, що форма сигналу повторює вхідний, отже спектр корисного сигналу обрано коректно.

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, отримані данні заносимо до таблиці 4.2

Таблиця 4.2 – Фазові корені

X1	X2	X3	X4	X5	X6
93,5	138,5	191,5	234,5	288,5	326,5
91,5	138,5	190,5	235,5	288,5	326,5
90,5	137,5	190,5	235,5	288,5	334,5
90,5	136,5	191,5	235,5	286,5	331,5
92,5	137,5	190,5	236,5	284,5	329,5
92,5	137,5	189,5	236,5	283,5	329,5
92,5	138,5	188,5	236,5	283,5	330,5
91,5	137,5	187,5	235,5	283,5	332,5
92,5	140,5	187,5	236,5	282,5	331,5
92,5	140,5	187,5	236,5	282,5	331,5
91,5	140,5	186,5	236,5	283,5	333,5
91,5	141,5	185,5	236,5	283,5	333,5
43,5	91,5	141,5	185,5	235,5	282,5
43,5	91,5	142,5	185,5	236,5	282,5
43,5	91,5	142,5	185,5	236,5	283,5
92,5	142,5	185,5	236,5	284,5	334,5
91,5	142,5	185,5	236,5	284,5	334,5
91,5	140,5	184,5	236,5	283,5	334,5
91,5	141,5	185,5	236,5	283,5	334,5
44,5	140,5	185,5	236,5	284,5	286,5
44,5	89,5	139,5	185,5	236,5	286,5
84,5	86,5	138,5	185,5	236,5	286,5
83,5	137,5	185,5	236,5	286,5	336,5
84,5	138,5	184,5	236,5	285,5	336,5
77,5	138,5	184,5	236,5	286,5	336,5
98,5	138,5	185,5	236,5	287,5	336,5
80,5	145,5	207,5	246,5	306,5	336,5
83,5	138,5	186,5	237,5	284,5	336,5
83,5	138,5	187,5	236,5	284,5	336,5
81,5	138,5	186,5	236,5	286,5	335,5
81,5	139,5	185,5	237,5	287,5	334,5

Отримавши максимуми відфільтрованого сигналу, визначаємо квадратний корінь із середнього квадрату (середнє арифметичне з квадратів набору чисел), вираз (4.10) для кожної колонки (інтерференційної полоси) відповідно [77-80]:

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)}, \quad (4.10)$$

де $x_1 \dots x_n$ – координати відхилень максимумів інтерференційних смуг X1, X2...X6 від їх середніх значень \bar{X} .

n – номер точки в межах інтерференційної смуги.

Розраховані показники значень параметрів середніх арифметичних відхилень профілю поверхні ФК МОЕМС (*rms* – root mean square) наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Розраховані показники *rms*

Порядковий номер інтерференційної смуги	Значення
rms_1	17,4526702
rms_2	18,5669958
rms_3	18,0937225
rms_4	19,2483486
rms_5	19,0347729
rms_6	19,7717622

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. 4.19).

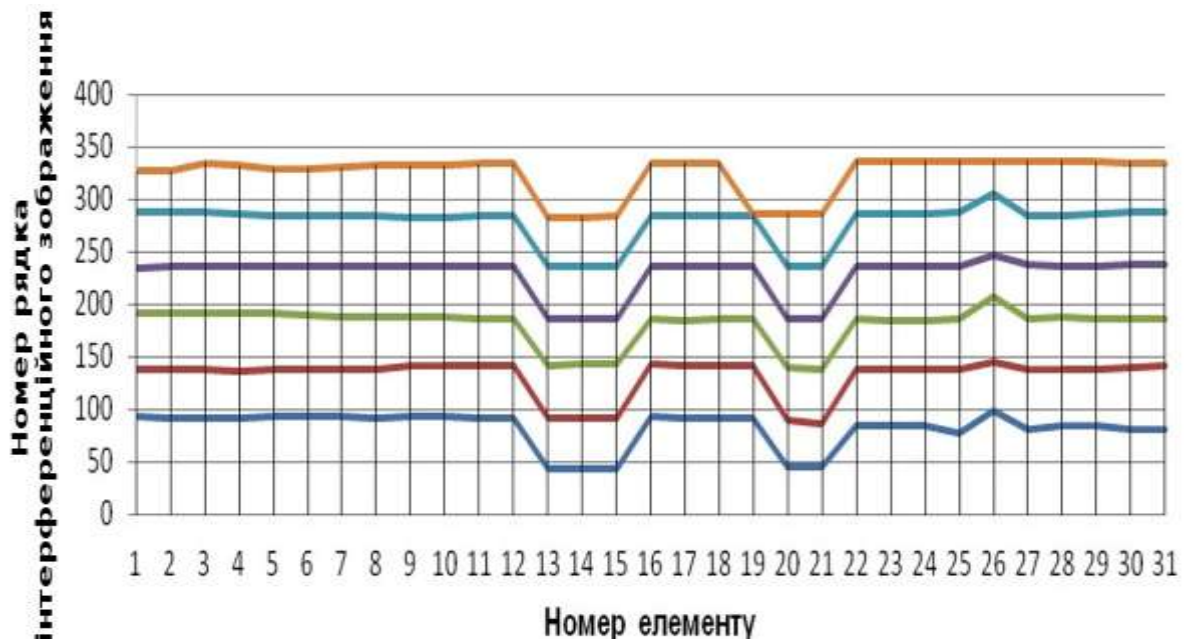


Рисунок 4.19 – «Траси» максимумів смуг інтерференційного сигналу

Отримані результати вказують, що порядок функції Баттерворта (1 порядку) за умови зміни w_n , w_e було встановлено вірно та визначені частоти знаходяться в межах від 0,08 Гц до 0,35 Гц.

За результатами експериментальної апробації методу побудовано «трасу» інтерференційних смуг і розраховано середньоквадратичні значення шорсткості зразка ФК поверхні.

За результатами було розроблено метод неруйнівного контролю поверхонь підкладок 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 та достовірність ТП контролю.

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

4.5 Висновки до розділу 4

Розроблено та апробовано інтерференційний метод у технологічному процесі контролю якості ФК шляхом усунення супутніх складових у зображенні за рахунок запропонованого адаптивного цифрового фільтру, що дозволило підвищити достовірність відтворення параметрів формоутворення ФК МОЕМС та розширити функціональні можливості методів технології контролю;

Набув подальшого розвитку метод ідентифікації екстремумів інтерференційних смуг зображень у технологічному процесі контролю поверхонь ФК МЕМС, 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

За результатами експериментальної апробації запропонованого методу було розраховано середньоквадратичні значення шорсткості зразка підкладки ФК МОЕМС та побудовано «трасу» топології поверхні. Отриманні значення дають уявлення про проникнення дефектів в глибину шарів та за їх формою, розмірами та можна зробити припущення про процеси, які призвели до їх виникнення.

Запропонований метод може бути легко адаптований до існуючих стандартних систем контролю, а програма обробки може бути використана для знаходження значень формоутворення поверхонь, як підкладок так компонентів з поверхневим відбиваючим шаром ФК МОЕМС.

Метод також можна використовувати для вимірювання мікрохарактеристик об'єктів при рядовому і атестаційному контролі різних поверхонь, наприклад, поверхонь елементів оптичних систем і т.д.

Матеріали цього розділу опубліковані в роботах авторки [3, 15, 21] (Додаток В).

Список джерел, які використано у даному розділі, наведено у повному списку використаних джерел [1, 12, 21, 27, 35, 37, 77-99].

РОЗДІЛ 5

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПІДКЛАДОК ФУНКЦІОНАЛЬНИХ КОМПОНЕНТІВ МІКРООПТОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

5.1 Експериментальна перевірка фізико-технологічних параметрів якості підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем

МЕМС, які містять оптичні компоненти, виділяють в окрему групу – МОЕМС через конструктивні відмінностей, оскільки вони вимагають застосування особливих технологічних режимів їх отримання і контролю, через високі вимоги, що пред'являються [100-101]. Мікросистема передбачає інтеграцію ряду різних технологій (МЕМС, КМОП, DEM, Liga, гідравлічної і т. д) [12-14, 29-34].

Застосування оптичних систем, в яких використовуються поворотні механізми з дзеркалами, часто пов'язане з рядом проблем, які суттєво впливають на кількість внесених втрат в комплекс МОЕМС [21, 102-104].

З аналізу стану проблеми технологічного забезпечення якості ФК МОЕМС перемикачів (Розділ 1) було визначено, що існують протиріччя між необхідністю подальшого підвищення якості МОЕМС компонентів, використання перспективних варіантів реалізації ТП) і операцій їх виробництва та обмеженістю відомих підходів до забезпечення якості та контролю МОЕМС-структур у виробках оптоелектронної техніки.

За основний з критеріїв якості ФК МОЕМС на основі мікродзеркал, визначено відбиваючу здатність ФК, виходячи з функцій та призначення.

Було визначено, що відбиваюча здатність, або коефіцієнт втрат на розсіювання оптичної енергії перемикача напряму залежить від якості підкладки ФК дзеркала МОЕМС [21, 26, 37].

Для отримання високої здатності системи на основі мікродзеркал необхідно, як мінімум, виконання таких умов:

- малі значення статичного і динамічного викривлення дзеркала;
- високий коефіцієнт відбиття поверхні дзеркала, що залежить від матеріалу покриття та поверхневого рельєфу (рельєф менше $\frac{\lambda}{10}$, де λ – довжина хвилі випромінювання; матеріал покриття – плівки метал).

При цьому максимальна здатність системи обмежується дифракцією оптичних елементів [105].

Коефіцієнт відбиття ФК дзеркал в МОЕМС великою мірою залежить від багатьох чинників, але, основним є форма (шорсткість, викривлення) [106-109].

В даний час питання, що стосуються, точного оцінювання геометричних параметрів мікродзеркал (шорсткості і викривлення), їх контролю на проміжних операціях і в формі готових виробів, для внесення уточнень в технологічні процеси і поліпшення характеристик для зменшення втрат, є актуальним завданням.

Однією з основних характеристик оптичних компонентів є величина зворотних втрат, тобто кількість світла, що поширюється в напрямку, протилежному напрямку передачі корисної інформації на етапі перенаправлення сигналу в МОЕМС перемикачах.

Первинною причиною зворотних втрат є відбиття від області зміни показника мікрорельєфу оптичних дзеркал (Френелівське відбиття), яке утворюється через наявність нерівностей на самих дзеркальних поверхнях [6]. Цей ефект усувається шляхом додання функціональної поверхні дзеркала певної форми і властивостей шляхом полірування і шліфування на етапі виробництва та контролю.

Будь-який, оброблений, ретельно компонент, не може мати ідеально рівну поверхню. Значення гладкості і рівності поверхні ФК в будь-якому випадку буде відрізнятися від номінального значення. При цьому, відхилення можуть бути або макрогеометричні або мікрогеометричні.

Макрогеометричні відхилення можуть бути охарактеризовані кривизною деталі і невідповідністю форми. Мікрогеометричні відхилення, в свою чергу, визначаються не чим іншим, як шорсткістю поверхні [8]. Навіть шорсткість, значення висоти якої менше довжини хвилі, вносить значні похибки в систему, спотворює сигнал. Величину діапазону в залежності від шорсткості ФК МОЕМС описують виразом (5.1). Загальний комплексний діапазон використовується для вимірювання розсіювання потужності від ідеально гладкої, чистої поверхні) [106-109].

$$\eta = 1 - \exp \left[- \left(\frac{4\pi\sigma \cos\Theta_i}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (5.1)$$

де η – відсоток втрат на розсіювання;

σ – середньоквадратична шорсткість відбиваючої поверхні ФК;

Θ_i – кут падіння променя світла;

λ – довжина хвилі [10].

Для перевірки фізико-технологічних параметрів якості підкладок ФК МОЕМС було зібрано експериментальний стенд (рис. 5.1) та проведено експеримент на базі проблемної науково-дослідної лабораторії «Мікроелектромеханічні та мікрооптоелектромеханічні системи» (ПНДЛ МЕМС та МОЕМС), кафедри КІТАМ ХНУРЕ.

На рисунку 5.1 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.

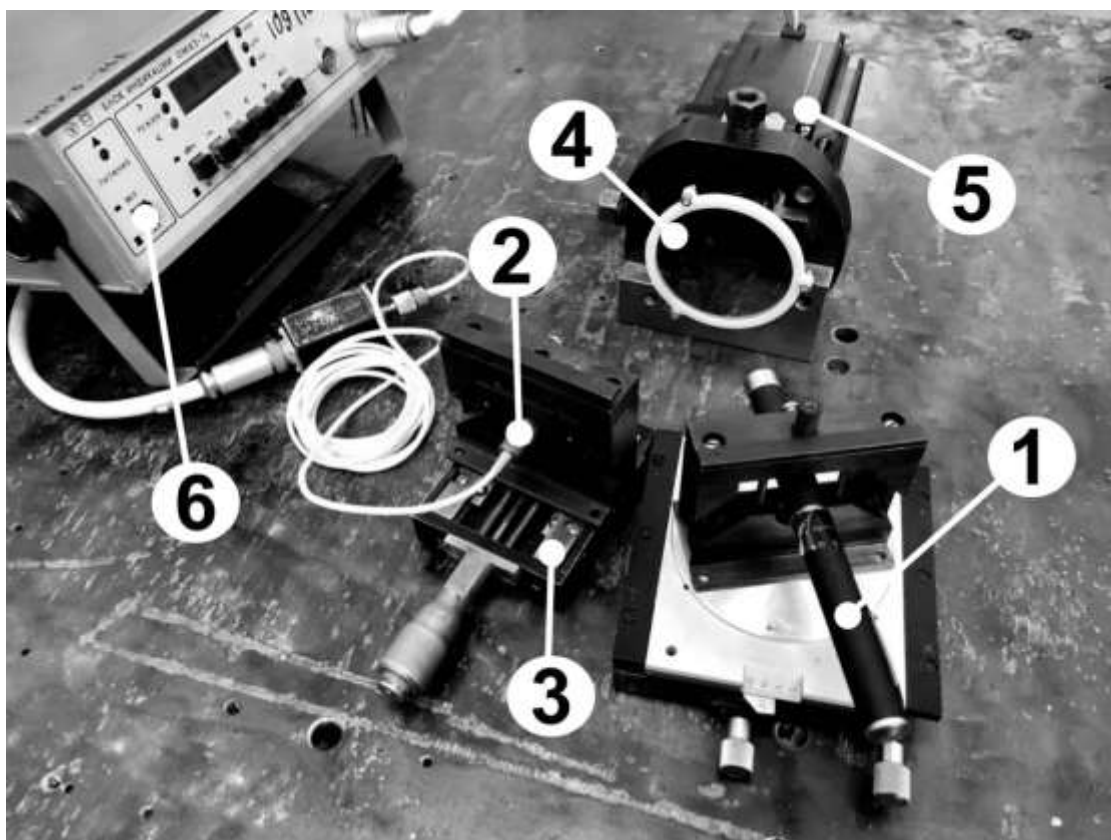


Рисунок 5.1 – Макет для випробувань

Кут падіння регулюється кроковим двигуном NEMA 17 із програмним керуванням, який і відхиляє мікродзеркало, тим самим імітується робота оптичного перемикача MEMS.

NEMA 17 модель 17HS4401 (рис.5.2, а) має досить високі точності характеристики і є прецезійним. Кутовий крок складає $1,8^\circ \pm 5\%$ (1 оберт – 200 кроків), коефіцієнт редуктора: 27:1, роз'єм: 4 PIN.

На рис. 5.2, б наведено драйвер крокового двигуна TMC2208, з інтерфейсом управління за замовчуванням: STE /DIR (можна змінити на UART перемичкою J2), режим SPREADCYCLE, що дозволяє знизити резонанс і підвищити плавність ходу (включений тільки через UART і OPT) та режим STEALTHCHOP2, який дозволяє провести автоматичну оптимізацію налаштувань для зниження шуму.



а) б)
Рисунок 5.2 – Кроковий двигун NEMA 17 (а) драйвер крокового
двигуна TMC2208 (б)

На рисунку 5.3 представлено фрагмент коду, який описує переміщення двигуна.

```
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {12800}
* Default Max Feed Rate (mm/s)
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE {5}
#define LIMITED_MAX_FR_EDITING
#if ENABLED(LIMITED_MAX_FR_EDITING)
#define MAX_FEEDRATE_EDIT_VALUES {10}
#endif

* Default Max Acceleration (change/s) change = mm/s
* (Maximum start speed for accelerated moves)
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION {100}
// #define LIMITED_MAX_ACCEL_EDITING
#if ENABLED(LIMITED_MAX_ACCEL_EDITING)
#define MAX_ACCEL_EDIT_VALUES {200}
#endif
```

Рисунок 5.3 – Фрагмент коду драйверу для переміщення двигуна

На представленому макеті проведені дослідження зразка ФК, що отримані з використанням запропонованих методів та технологій.

Визначено, величину розсіювання оптичної енергії сигналу η в залежності від шорсткості поверхні σ на різній довжинах хвилі λ , що показано на рис. 5.4.

Визначено, що для отримання значення коефіцієнту втрат на 1550 нм довжині хвилі на розсіювання менш 10%, шорсткість поверхні ФК повинна бути менше 57 нм.

Проте, розсіювальна здатність майже не залежить від довжини хвилі променя. Наприклад, ця величина в 1,4% для 1520 нм і 1,2% для 1620 нм при куті падіння 45° , а середньоквадратична шорсткість ФК дзеркала 20 нм.

З цього можна зроблено висновок, що одним з основних переваг ФК МОЕМС на основі дзеркал, є незалежність втрат від довжини хвилі.

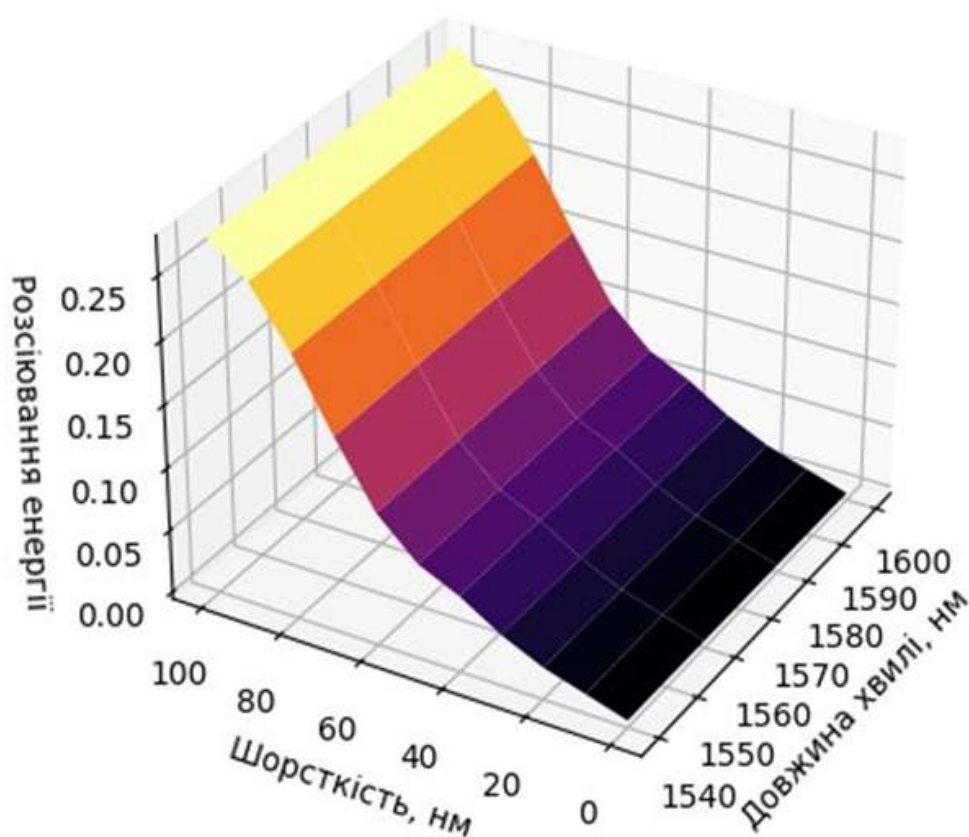


Рисунок 5.4 – Залежність розсіювання від середньоквадратичної шорсткості ФК

Проте, втрати, що залежать від довжини хвилі, залежать від шорсткості поверхні ФК, що відбивають дзеркала.

Величина потужності сигналу, що розсіюється, складе 5,3% на довжині хвилі 1520 нм і 4,7% на довжині 1620 нм при середньоквадратичних значеннях шорсткості поверхні 40 нм, в порівнянні з 1,4% і 1,2% відповідно, при середньоквадратичній шорсткості поверхні 20 нм.

5.2 Розробка технологічного процесу виготовлення підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем на основі запропонованих методів

Підкладка ФК МОЕМС перемикача є одним з найважливіших елементів, в технологічному процесі виготовлення яких закладаються та виникають дефекти в структурі матеріалу.

Проходячи весь ТП виготовлення, вона піддається складним механічним, термічним, фізичним і хімічним впливам, які різною мірою позначаються на дефектах ФК, сформованих на підкладках.

Проблема якісної підготовки поверхні підкладок у виробництві МОЕМС компонентів вкрай важлива для всіх класів виробів.

На параметри якості підкладок впливають фізико-технологічні чинники: товщина оксидів на поверхні підкладок; мікронерівності рельєфу поверхні; мікронапруженність поверхневого шару; густина дислокацій в приповерхневому шарі; ступінь фізичної і хімічної забрудненості поверхні; структурна недосконалість шарів, вирощених на підкладці; густина поверхневих станів окислення [12].

Структура типового технологічного процесу виготовлення пластин підкладок ФК МОЕМС передбачає калібрування злитків за діаметром, орієнтацію злитка, щодо кристалографічних площин, виконання базового зрізу, розрізання злитка на пластині, шліфування і полірування, зняття фасок, фінішне очищення і вихідний контроль (як проміжний, так і вихідний).

На основі типового ТП було розроблено технологічний процес виготовлення підкладок ФК МОЕМС, який наведено на рис. 5.5. Операції, в яких запропоновано використовувати розроблені методи та моделі, виділено кольором.

Маршрутну карту на вказаний ТП наведено в Додатку А.

дозволило підвищити рівень контролю у оптоволоконних лініях зв'язку, які є складовими автоматизованих технологічних ліній з виробництва і контролю лікарських засобів. За результатами досліджень похибка вимірювання параметрів ФК не перевищує 1% у всьому діапазоні вимірювань.

Отримано АКТ про дослідне впровадження результатів дисертаційної роботи в Інституті сцинтиляційних матеріалів Національної Академії Наук України в відділі впровадження науково дослідних розробок (м. Харків, Україна).

В документах відзначено доцільність використання методів контролю на етапах тестування технологічних процесів виробництва підкладок функціональних компонентів, використання інтерференційного методу контролю з усуненням супутніх складових в сигналах, що дозволило підвищити рівень достовірності відтворювання значень параметрів топології поверхонь елементів приладів оптоелектроніки.

Комісія підтвердила працездатність моделей та методики забезпечення якості підкладок ФК оптичних перемикачів МЕМС. Зазначила, що дослідні зразки можуть бути використані як база для розробки практичних рекомендацій, щодо технологічного забезпечення підвищення рівня якості підкладок ФК МОЕМС та дозволило суттєво розширити функціональні можливості методів випробування та технології контролю.

На базі ТОВ «Науково-виробниче підприємство «УКРІНТЕХ» (м. Харків, Україна) у випробувальній лабораторії (свідоцтво № 100-360/2015 від 29.12.2015 р. видане державним підприємством «Харківський регіональний науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації») було використано запропоновану математичну модель залежності між товщиною шару видалення дефектів ФК МОЕМС та факторами формоутворення: швидкістю, часом, зернистістю полірувальної пасти та їх комбінативної дії, що дало можливість оцінити параметри форми поверхні ФК МОЕМС.

Зазначено, що результати впровадження довели, що запропоновані методи дослідження ґрунтуються на сучасних технологіях проведення

випробувань, виконані на високому науково-технічному рівні та мають переваги над існуючими рішеннями, зокрема дослідні зразки, що виготовлені з використанням запропонованих методів відрізняються, від відомих аналогів, тим, що їх відбиваюча здатність більша на 9%, при чому похибка вимірювань не перевищує 1% у всьому діапазоні випробувань.

Дослідження отримали розширення у суміжній галузі та втілені у розробці конструкцій дзеркал-відбивачів для пристроїв альтернативної енергетики.

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, що забезпечило таку величину розсіювання енергії світла, яка дала можливість підвищити коефіцієнт корисної дії зазначених розробок [109-112].

5.4 Висновки до розділу 5

Таким чином, в розділі було представлено рекомендації для технологічного забезпечення та підвищення якості підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем.

Викладено результати експериментальної перевірки фізико-технологічних параметрів якості підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем, з використанням розробленого макету.

Розроблено ТП виготовлення підкладок ФК МОЕМС. В окремих операціях було використано розроблені методи. На етапі підготовки, для прогнозування дефектів в структурах підкладках було використано запропоновану модель, для операцій палірування та шліфування – модель прогнозування технологічних режимів; для операцій контролю (як проміжного так і вихідного) – розроблений метод контролю.

Промислове впровадження результатів дисертаційної роботи для

забезпечення якості підкладок функціональних компонентів, що наведено в розділі, довели, що отримані результати можуть бути використані на промислових об'єктах і після техніко-економічних розрахунків бути впроваджені у масове виробництво.

Матеріали цього розділу опубліковані в роботах авторки [2, 13, 17, 26] (Додаток В).

Список джерел, які використано у даному розділі, наведено у повному списку використаних джерел [8, 10, 12-14, 21, 26, 29-34, 37, 100-112].

ВИСНОВКИ

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. 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 .

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. Дослідження отримали розширення у суміжній галузі та втілені у розробці конструкцій дзеркал-відбивачів для пристроїв альтернативної енергетики. 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.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Лобур М., Мельник М. Основи мікросистемних пристроїв: навч. посіб. Національний університет «Львівська політехніка», 2012. 258 с.
2. Yang S. P. et al. Optical MEMS devices for compact 3D surface imaging cameras // *Micro and Nano Systems Letters*. – 2019. – №. 1. P. 8.
3. H. M. Van Driel, «Ultrafast Optical Switching of 2-D Photonic Crystals. 2006 *International Conference on Transparent Optical Networks*, Nottingham. 2006. P. 83-87.
4. Spahn O. B., Mani S. S. Microfabrication in MOEMS – Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems. Ed. Bellingham, Washington: SPIE – *The international Society for Optical Engineering*, 2005. 636 p.
5. Fink Y., Winn J. N., Fan S., Chen C., Michel J., et al. A Dielectric Omnidirectional Reflector *SCIENCE* 27 Nov. 1998 : Vol. 282, Issue 5394, pp. 1679-1682.
6. Lu S., Chen S., Zhao Y. MOEMS Gyroscope based on acousto-optic mode coupling. *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition. Optical Society of America*. 2010.
7. Motamedi M. E. MOEMS: Micro-opto-electro-mechanical Systems. *SPIE press*, 2005. T. 126.
8. Tominaga Sh., Aditya S., Farup I. An image-based multi-directional reflectance measurement setup for flexible objects (Erratum). *International Society for Optics Measuring, Modeling, and Reproducing Material Appearance and Photonics*, 2019. Vol. 9398.
9. Оксанич А. П. Удосконалення методу отримання поруватого шару на підкладках n-GaAs. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. №. 29 (68), № 6. С. 228-234.
10. Оксанич А. П. Автоматизированный комплекс для измерения внутренних напряжений в пластинах GaAs. *Сложные системы и процессы*.

2006. №. 2. С. 40-50.

11. Притчин, С. Е. Розробка технології виробництва підкладок арсеніду галію для виробів мікроелектроніки: автореф. дис. д.т.н: 05.27.0. Кременчук, 2016. 326 с.

12. Готра З.Ю., Григорчак І.І., Лукіянець Б.А. та ін. Наноелектроніка: Науково-навчальне видання. Львів: Ліга-Прес. 2009. 360 с.

13. Готра З.Ю. Технологія електронної техніки: підручник для вузів. Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», в 2-ох т. 2009. – 888с.

14. Невлюдов І. Ш., Палагін В. А. Мікросистемна техніка та нанотехнології: монографія. Київ: НАУ, 2017. 528 с.

15. Невлюдов И. Ш., Андрусевич А. А, Палагин В. А. Микроэлектромеханические системы и нанотехнологии. Х.: «Коллегиум». 2007. 268 с.

16. Филипенко О. І. Компоненти волоконно- оптичних систем: навч. посіб. Харків: Ін-т змісту та методів навчання, 1999. 101 с.

17. Галат О. Б., Гордієнко Ю. О, Старшинський М. Г. Оптоелектроніка: учеб. пособ.: МОН Украины. СМІТ, 2010. 198 с.

18. Лепіх Я. І., Гордієнко Ю. О., Дзядевич С. В. Створення мікроелектронних датчиків нового покоління для інтелектуальних систем: монографія. Одеса: Астропринт, 2010. 296 с.

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

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

21. Филипенко А.И., Чалая Е. А., Хрусталеv К.Л. Моделирование

зависимости отражающей способности микрозеркал оптоволоконных компонентов от их геометрических параметров. *Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. №. 5(115). 2018. С. 65-71.

22. Иванов А.Б. Контроль соответствия в телекоммуникациях и связи. *Измерения, анализ, тестирование, мониторинг*. Сайрус Системс. 2000. 375 с

23. Осадчук В.С., Осадчук О.В. О Волоконно-оптичні системи передачі. навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2005. 225 с.

24. Скришевський В., Іванов І. Application of Microsystems devices: навч.посіб. Європейський Союз за Спільний Європейським Проектом «Curricula Development for New Specialization: Master of Engineering in Microsystems Design» (MastMST), 2016. 374 с.

25. Невлюдов, І.Ш., Касьянов А.Д. Перемикачі волоконних світловодів: навч. пос. Харків.: ХТУРЕ, 1997. 100 с. Рос. мовою.

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

27. Е.А. Чалая Потери в оптических микрозеркала. *19 Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь в XXI сторіччі»*, Харків, 20-22 квітня, 2015., Т. 2. С. 77-78.

28. М. У. Kulikov, S. A. Sheptunov, M. A. Larionov and D. V. Gusev. Manufacturing of highquality products to the method of DLP RP – Technology. *International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS)*, St. Petersburg, 2017, pp. 741-744.

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

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

31. Вернер В. Д., Мальцев П. П., Сауров А. Н., Чаплыгин Ю. А.

Технология миниатюризации «сверху вниз» или «снизу вверх». *Нано- и микросистемная техника*. 2005. № 1. С. 5-9.

32. Черняев В. Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров: учеб. для вузов. М.: Радио и связь. 1987. 464 с.

33. Невлюдов И. Ш., Палагин В. А., Шинкаренко О. Г. Нанолитография-наноимпринтинг. *Радіотехніка*. 2007. №150. С. 151-158.

34. Петерсен К. Э. Кремний как механический материал. *ТИИЭИР*. 1982. Т. 70, №5. С. 5-49.

35. Филипенко О.І., Чала О.О., Бондаренко Ю.В. Методи контролю структур топології поверхонь матеріалів виробів електронної техніки, МЕМС та МОЕМС. *Технологія приборостроєння*. 2018., № 2. С. 3-7.

36. Чала О. О. Дефектоутворення, як основа Defect Engineering в МЕМС та МОЕМС. *Технологія приборостроєння*. 2020. №1. С. 78-81.

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

38. 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. С.153-156.

39. H. Abdelnaby, G. P. Potirniche, A. Elshabini, F. Barlow, S. K. Groothuis and R. S. Parker Numerical simulation of heat generation during the back grinding process of silicon wafers. *IEEE Workshop on Microelectronics and Electron Devices*. Boise. 2012. pp. 1-4.

40. M. Wilson Importance of defect photoionization in silicon-rich SiNx dielectrics for high PID resistance. *IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. Tampa, FL. 2013. pp. 0218-0222,

41. G. Margutti et al. Silicon defects characterization for low temperature ion

implantation and spike anneal processes *20th International Conference on Ion Implantation Technology (IIT)*. Portland, 2014, P. 1-4.

42. S. Seal, V. Budhraj, B. Sopori, S. Devayajanam, P. Basnyat and V. V. Varadan Defect mapping and stress mapping of crystalline silicon using Spectroscopic Ellipsometry. *IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. Tampa, FL, 2013, P. 0212-0217.

43. Zafirovska, M. K. Juhl and T. Trupke Comparison of Line Scan Luminescence Imaging Techniques for Defect Characterisation in Crystalline Silicon Solar Modules *IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)*. Waikoloa Village, 2018, P. 1364-1369.

44. 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 edited by I. Linde, I. Chumachenko, V. Timofeyev*. Riga: ISMA, 2020. P.193-206.

45. Nevliudov I., Omarov M., Chala O. Mathematical model of the development of manufacturing defects in the surface layer of substrates of moems' functional components. *International Conference on Natural Sciences and Technologies Iconat 2020*, Baku, Azerbaijan, 20 -22 August 2020. P. 40.

46. 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. P. 223-226.

47. R. Agarwal, S. Samson, S. Kedia and S. Bhansali, Fabrication of Integrated Vertical Mirror Surfaces and Transparent Window for Packaging MEMS Devices. *Journal of Microelectromechanical Systems*. Vol. 16, 1, 2007, P. 122-129,

48. O. Filipenko, O. Chala and O. Sychova Some Issues of Dependencies of Loss from Technological Features of Optical Switches for Communication Systems

International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, 2018, P. 599-603.

49. P. H Chen and S. S Ho Is overfeat useful for image-based surface defect classification tasks? *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2016. P. 749-753.

50. Пилипенко В.А, Горушко В.А., Петлицкий А.Н., Понарядов В.В, Методы и механизмы геттерирования кремниевых структур в производстве интегральных микросхем. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2013. № 2-3. С. 43-57.

51. Оксанич А. П., Седин Е. А. Разработка модели расчёта внутренних напряжений и деформаций в кремниевых эпитаксиальных структурах *Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка. Перша міжнародна науково-практична конференція НМІТФ-2011. 5-7 травня 2011. Кременчук, 2011. – С. 70-89.*

52. Абдуллин Ф. А., Пауткин В. Е., Печерская Е.А., Печерский А. В. Применение методов селективного травления кремния для оценки качества пластин при изготовлении микромеханических датчиков. *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2018. №1 (25).

53. 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. С. 75-77.

54. L. Zhang, Y. Dong and J. Wang Wind Speed Forecasting Using a Two-Stage Forecasting System With an Error Correcting and Nonlinear Ensemble Strategy. *IEEE Access*. Vol. 7, P. 176 000-176023, 2019.

55. Журавлев Ю. И. Распознавание, классификация, прогноз. *Математические методы и их применение*. Вып. 2. – М.: Наука, 1989. – 302 с.

56. Румер Ю., Рывкин М. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. Рипол Классик, Москва, 1977. 397 с.

57. Рудой Ю. Г., Суханов А. Д. Термодинамические флуктуации в

подходах Гиббса и Эйнштейна. *Успехи физических наук*. 2000. Т. 170. №. 12. – С. 1265-1296.

58. Фізика конденсованого стану матеріалів: навч. посіб. / Т. П. Говорун, В. О. Пчелінцев, В. М. Радзієвський, Л. В. Носонова. Суми: Сумський державний університет, 2015. 236 с.

59. Пилипенко В. А. и др. Модель термического окисления кремния при быстрой термической обработке. *Вестник Белорусского государственного университета. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика*. 2006. № 2. С. 35-39.

60. Бахадырханов М. К. и др. Электрофизические свойства кремния, легированного марганцем методом низкотемпературной диффузии *Неорганические материалы*. 2011. Т. 47. №. 5. С. 545-550.

61. Ахметов В. Д., Фадеев Н. В. Инфракрасная томография времени жизни и диффузионной длины носителей заряда в слитках полупроводникового кремния. *Физика и техника полупроводников*. 2001. Т. 35. №. 1. С. 40-47.

62. Тігаренко О. В. Забезпечення якості поверхневого шару на етапі напівчистої обробки термопластичних полімерних матеріалів: дис...канд. тех.. наук: 05.03.01. Харків НТУ «ХПІ», 2008. 278 с.

63. Славко О. Г. Метод синтезу еквівалента невідомого зовнішнього збурення для динамічних об'єктів. *Математические машины и системы*. 2011. Т. 1. №. 2.

64. Панченко Т. Д. и др. Вибір чисельних методів для моделювання динаміки систем. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2016. №. 53, вип. 3. С. 98-108.

65. N. Kalboussi, A. Raparport, T. Bayen, N. B. Amar, F. Ellouze and J. Harmand Optimal Control of Membrane-Filtration Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. Vol. 64 (5,) pp. 2128-2134, May 2019/

66. Y. M. Sub *et al.* Reduction the Micro-sized Scratches using Optimal Design of POU Dual Filtration at STI CMP. *13th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)*, Taipei,

Taiwan, 2018, P. 297-300.

67. D. Li and J. Su Nondestructive Defect Detection and Localization of Defects in Annular Through Silicon Via(TSV). *Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC)*, Taiyuan, China, 2019, P. 1-3.

68. L. Wei, Z. Zhang, Y. Ning and J. Lv Improved Markov Residual Error to Long-Medium Power Load Forecast Based on SVM Method. *First International Workshop on Education Technology and Computer Science, Wuhan, Hubei*, 2009, P. 128-132.

69. C. R. Charan Application of Generalized Neuron Model in Short Term Load Forecasting under error functions. *Second International conference on Computing, Communication and Networking Technologies*, Karur, 2010, P. 1-4,

70. O. Filipenko, O. Donskov and O. Chala The influence of geometric characteristics on a bandwidth of the photonic crystal waveguide. *Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, 2015, P. 93-94,

71. Филипенко А. И. Влияние состояния поверхности микрзеркал МОЕМС-компонентов на их оптические характеристики. *XIV Міжнародна науково-технічна конференція “Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів* (м. Кременчук, 2015 р.) С. 98-99.

72. How to Polish Fused Silica to Obtain the Surface Damage Threshold Equals to the Bulk Damage Threshold. Troy Alley, Peter Allard, Rod Schuster, David Collier, Arlee V. Smith, Binh T. Do, Alice C. Kilgo /*Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, October 2010. – P. 7842.

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

74. Rawlings, John O. Applied Regression Analysis: a Research Tool. Pacific Grove (Calif.): Wadsworth and Brooks. Cole advanced books and software,

1988. 553 p.

75. Чала О. О., Филипенко О. І., Боцман І. В. Вплив параметрів технологічних операцій шліфування та полірування на формоутворення компонентів MOEMS. *III-я Міжнародна конференція «Виробництво & Мехатронні Системи 2019»*, м. Харків, 24-25 жовтня 2019 р. Харків. ХНУРЕ, 2019. С. 69 – 72.

76. 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, P. 371-374.

77. ДСТУ ISO 10110-5:2018 Оптика та оптичні прилади. Розроблення креслеників оптичних елементів та систем. Частина 5. Допуски на форму поверхні (ISO 10110-5:2015, IDT). Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» Наказ від 23.10.2018 № 377. ISO 10110-5:2015 Optics and photonics – Preparation of drawings for optical elements and systems Part 5: Surface form tolerances прийнято як національний стандарт методом «підтвердження» за позначенням Відповідає офіційному тексту ДСТУ ISO 10110-5:2018 (ISO 10110-5:2015, IDT).

78. SE Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality (2019), DSTU ISO 10110-8:2018 Оптика у optycheskye prybory. Razrabotka chertezhei optycheskykh elementov u system. Chast 8. Tekstura poverkhnosty, sherokhovatost y volnystost (ISO 10110-8:2010, IDT).

79. ДСТУ ISO 10110-9:2018 Оптика та оптичні прилади. Розроблення креслеників оптичних елементів та систем. Частина 9. Оброблення поверхні та покривів (ISO 10110-9:2016, IDT).

80. ДСТУ ISO 10110-9:2004 Оптика та оптичні приладів. Готування креслеників оптичних елементів та систем. Частина 9. Обробляння поверхні та покриву (ISO 10110-9:1996, IDT).

81. Jiang Y., Ma W., Zhao Z. Adaptive Interference Cancellation System with

Different Correlation Control Methods. *International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*. Hangzhou, Zhejiang, 2009. P. 372-375.

82. Suarez J., Kravtsov K, Prucnal P.R. Methods of Feedback Control for Adaptive Counter-Phase Optical Interference Cancellation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2011. Vol. 60. No. 2. P. 598-607.

83. Васильев В.Н. И.П Гуров, В.Н. Васильев Компьютерная обработка сигналов в приложении к интерферометрическим системам. СПб.: БХВ-Санкт-Петербург, 1998. 237 с.

84. Comtois J.H., Michalick M.A., Clark N. and Cowan W. MOEMS for adaptive optics. *IEEE/LEOS Summer Topical Meeting. Digest. Broadband Optical Networks and Technologies: An Emerging Reality. Optical MEMS. Smart Pixels. Organic Optics and Optoelectronics (Cat. No.98TH8369)*. Monterey, CA, USA, 1998. P. II/95-II/96.

85. Unamuno A., Uttamchandani D. Hybrid MOEMS tunable filter for interrogation of fiber Bragg grating sensors. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2005. Vol. 17. No. 1. P. 202-204.

86.. Wei L, Zhang Z., Ning Y. and. Lv J, Improved Markov Residual Error to Long-Medium Power Load Forecast Based on SVM Method. *First International Workshop on Education Technology and Computer Science, Wuhan, Hubei*, 2009, P. 128-132.

87. Paul E Murphy, Christopher A. Hall Considerations in the evaluation and correction of mid-spatial frequency surface features. *Proc. SPIE 9633, Optifab 2015*, 11 October 2015. P. 96330F.

88. Hong Y.K. Dynamic Response Modeling of MEMS Micromirror Corner Cube Reflectors With Angular Vertical Combedrives. *Journal of lightwave technology*. 2007. Vol. 25. No. 2. P. 472-480.

89. Zhao Y., Chen M., Xia F., Cai L., Li X. Small Curvature Sensor Based on Butterfly-Shaped Mach-Zehnder. *Interferometer. IEEE Trans Electron Devices*. 2017. –Vol. 64. No. 11. P. 4644-4649.

90. Невлюдов И. Ш., Жарикова И. В., Перепелица И. Д. Резниченко А. Г.

Анализ методов контроля шероховатости подложек для изделий электронной техники. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. № 2(5). С. 25-30.

91. McAneny James J, Kennedy M., McGroggan T. Advances in photonic MOEMS-MEMS device thinning and polishing. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering Micromachining and Microfabrication Process Technology X*. 2010. Vol. 7590. P. 75900-00.

92. Y. Li, J. lu and X. Xu, Phase Transformation of Monocrystalline Silicon Induced by Polishing With Diamond Abrasives. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*. May 2015. Vol. 28, no. 2, P. 153-159,.

93. Qu Shouping, Zhang Zhongshu and Liang Tianzhu. The experimental research of the non-brasive cryogenic polishing monocrystalline silicon wafer super-smooth surface. *International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering*. Changchun, 2010. P. 445-448

94. Calvano J. V., Alves V. C. and Lubaszewski M., Fault detection methodology and BIST method for 2nd order Butterworth, Chebyshev and Bessel filter approximations. *Proceedings 18th IEEE VLSI Test Symposium*, Montreal, Quebec, Canada, 2000, P. 319-324.

95. S. Rakhshan Anjum, S. Bhattacharya and G. Srivastava Effect of phase compensation on the performance of classic Butterworth filter," *IEEE-International Conference On Advances In Engineering, Science And Management (ICAESM - 2012)*, Nagapattinam, Tamil Nadu, 2012, pp. 217-221.

96. I. M. Filanovsky, "Generalization of Bessel (Thomson), Stokes and Quasi-Butterworth Filters, 2020 *IEEE 63rd International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, Springfield, MA, USA, 2020, pp. 742-745,

97. O. V. Poliarus, S. D. Ianushkevych, A. O. Koval, A. V. Lebedynskyi, Y. S. Medvedovska and Y. A. Poliakov. Influence of Measurements Uncertainty on Uncertainty of Gilbert-Huang Transform Modes. *IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL)*, Sozopol, Bulgaria. 2019. P. 644-647.

98. Пономарева Н. В., Пономарева О. В., Хворенков В. В. Определение огибающей ангармонического дискретного сигнала на основе преобразования Гильберта в частотной области. *Интеллектуальные системы в производстве*. 2018. Т. 16. №. 1. С. 33-40.

99. Пономарёв В. А., Пономарёва О. В., Пономарёва Н. В. Метод быстрого вычисления дискретного преобразования Гильберта в частотной области. *Современные информационные и электронные технологии*. 2014. Т. 1. №. 15. С. 183-184.

100. Суховеев, С. П. Волоконные МЭМС и НЭМС. *Микросистемная техника*. 2004. №1. С. 2-11.

101. Мальцев П. П., Телец В.А., Никифоров А. Ю. Технологии и изделия микроэлектромеханики. *Микросистемная техника*. 2001. №10. С. 18-24.

102. Филипенко О.І, Чала О.О., Відешин М. І. Математическое моделирование методом Монте-Карло зависимости направляющей способности оптических компонентов MOEMS-переключателей при изменении их параметров позиционирования. *Технология приборостроения*. 2016. №2. С. 32-35.

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

104. V. Bortnikova, V. Yevsieiev, S. Maksymova, I. Nevliudov, O. Chala and K. Kolesnyk и 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, P 83-86.

105. Колобродов В.Г., Тимчик Г.С., Микитенко В.І., Колобродов М.С. Проектування цифрових когерентних оптичних спектроаналізаторів. Київ: КПІ ім.Ігоря Сікорського. Політехніка. 2019. 256 с

106. Fan-Gang Tseng and Chun-Jun Lin Polymer MEMS-based Fabry-Perot shear stress sensor," *IEEE Sensors Journal*. Vol. 3, no. 6, P. 812-817.

107. Yun-Ho Jang and Yong-Kweon Kim Design and fabrication of a

micromirror using silicon bulk micromachining for out-of-plane right angle reflection," *IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMs*, Lugano, Switzerland, 2002, P. 79-80.

108. Riza N. A., Reza S. A. Broadband All-Digital Variable Fiber-Optic Attenuator Using Digital Micromirror Device. *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 19, no. 21. Nov.1. 2007 P. 1705-1707.

109. Невлюлов І.Ш., Письменецький В.О., Фролов А.В., Чала О.О., Ємельянов М.А. Аналіз ефективності використання кремнієвих концентраторних сонячних фотоелементів. *Системи управління, навігації та зв'язку: збірник наукових праць. Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка*, 2017. Вип. 6(46). С. 85-88.

110. 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*. V.77, Issue 2. 2018. P.173-186.

111. Невлюдов І. Ш., Письменецький В. О., Фролов А. В., Лук'яненко В. Л., Чала О. О. 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.

112. Невлюдов І. Ш., Письменецький В. О., Фролов А. В., Чала О. О., Лук'яненко В. Л. Патент на корисну модель № 138990 МПК (2006) F24S 23/70 (2018.01), F24S 10/00 Сонячний колектор з фоклінним концентратором; заявник і власник Харківський національний університет радіоелектроніки. опубл. 10.12.2019, бюл. № 23.

ДОДАТОК А

Комплект документів на технологічний процес виготовлення підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем

ДОДАТОК Б
Акти впровадження



Затверджую
Генеральний директор
ТОВ ТК «ВАЛОР»
В.М. Баранніков
20.02.2017 р.

Технічний акт впровадження
результатів дисертаційного дослідження
Чалої Олени Олександрівни

Комісія у складі:


Голови – генерального директора Бараннікова Вячеслава Миколайовича,

та членів комісії: начальника технічного відділу Столбового Олександра Васильовича, інженера телекомунікаційних мереж Шарова Сергія Ігоровича, склала цей Акт, що засвідчує впровадження результатів науково-дослідної роботи Чалої Олени Олександрівни в ТОВ Телекомунікаційній компанії «ВАЛОР».


Результати дисертаційного дослідження Чалої О.О. у формі методів, алгоритмів та дослідних зразків МОЕМС-компонентів використовуються для тестування та технологічного контролю комутаційних компонентів оптоволоконних ліній зв'язку, що скорочує час контролю та підвищує ймовірність виявлення технологічних дефектів.


Акт складений для пред'явлення до спеціалізованої Вченої ради із захисту дисертацій та не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова комісії :

 В.М. Баранніков

Члени комісії:

 О. В. Столбовой

 С.А. Шаров

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Публічне Акціонерне Товариство
«Хімфармзавод «Червона зірка»

Директор І.В. Трутаєв



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття ступеня кандидата технічних наук Чалої Олени Олександрівни

Комісія у складі: Голови — головного інженера Величко Олексія Володимировича та членів комісії: директора з виробництва Кропивки Ганни Олексіївни, начальника відділу фармацевтичних розробок Мирного Андрія Валерійовича, начальника цеху № 3 Казмиренка Миколи Петровича, складала цей Акт, що засвідчує впровадження результатів науково-дослідної роботи Чалої Олени Олександрівни в ПАТ «Хімфармзавод «Червона Зірка».

Комісія з розгляду результатів впровадження науково-дослідної роботи Чалої О.О. підтверджує доцільність використання, алгоритмів та методів контролю характеристик функціональних елементів МЕМС оптичних перемикачів, що дозволило підвищити рівень контролю та відтворюваність результатів операцій моніторингу та контролю у оптоволоконних каналах зв'язку, які є складовими автоматизованих технологічних ліній з виробництва і контролю лікарських засобів. За результатами досліджень похибка вимірювання параметрів функціональних компонентів не перевищує 1 % у всьому діапазоні вимірювань.

Отриманий позитивний науково-технічний ефект дозволив забезпечити необхідні якісні характеристики модулів контролю на основі функціональних компонентів МОЕМС.

Акт складений для пред'явлення до спеціалізованої Вченої ради із захисту дисертацій та не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова комісії:
Головний інженер

О.В. Величко

Члени комісії:
Директор з виробництва

Г.О. Кропивка

Начальник ВФР

А.В. Мирний

Начальник цеху № 3

М.П. Казмиренко

Національна академія наук України
ІНСТИТУТ СЦИНТИЛЯЦІЙНИХ
МАТЕРІАЛІВ



INSTITUTE for SCINTILLATION
MATERIALS
National Academy of Sciences of Ukraine

60 пр. Науки,
Харків 61072,
УКРАЇНА
Тел. (057) 341-01-61, 341-01-50
факс: (057) 340-44-74
E-mail: info@isma.kharkov.ua

60 Nauky Ave.,
Kharkov, 61072,
UKRAINE
Phone: 38(057) 341-01-61, 341-10-50
Fax: 38(057) 340-44-74
E-mail: info@isma.kharkov.ua

№ _____



АКТ

про дослідне впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття ступеня кандидата технічних наук Чалої Олени Олександрівни

Комісія у складі: голови комісії головного інженера ІСМА НАН України Бреславського Ігора Анатолійовича та членів комісії: в.о. н.с. Непокупної Тетяни Анатоліївни та к.т.н. Колесникова Олександра Володимировича склала даний Акт, що засвідчує дослідне впровадження у відділі впровадження науково дослідних розробок Інституту сцинтиляційних матеріалів Національної Академії Наук України результатів дисертаційної роботи Чалої Олени Олександрівни.

Комісія відзначила доцільність використання методів контролю на етапах розробки та тестування технологічних процесів виробництва підкладок функціональних компонентів, запропонованих Чалою О.О. Використання інтерференційного методу контролю, з усуненням супутніх складових в сигналах, дозволило підвищити рівень і достовірність відтворювання значень параметрів топології поверхонь елементів приладів оптоелектроніки.

Комісія підтверджує працездатність моделей та методики забезпечення якості підкладок функціональних компонентів оптичних перемикачів МЕМС.

Викладені в дисертаційній роботі експериментальні дослідження та створені дослідні зразки, можуть бути використані, як база для розробки практичних рекомендацій, щодо технологічного забезпечення підвищення рівня якості підкладок функціональних компонентів МОЕМС та дозволило суттєво розширити функціональні можливості методів випробування та технології контролю.

Акт складений для пред'явлення до спеціалізованої вченої ради із захисту дисертацій і не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова комісії
Члени комісії

І. А. Бреславський
Т. А. Непокупна
О. В. Колесников



про впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття ступеня кандидата технічних наук Чалої Олени Олександрівни

Комісія у складі: **Голова:**

Демченко С.В. – директор Товариства з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче підприємство «УКРІНТЕХ»;

Члени Комісії:

Вікторова О.В. – керівник випробувальної лабораторії ТОВ «НВП «УКРІНТЕХ»;

Пилипенко К.В. – начальника служби сервісу та ремонту ТОВ «НВП «УКРІНТЕХ»;

склала даний акт про те, що у випробувальній лабораторії (свідоцтво № 100-360/2015 від 29.12.2015 р. видане державним підприємством «Харківський регіональний науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації») було використано математичну модель залежності між товщиною шару видалення дефектів функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем та факторами формоутворення: швидкістю, часом, зернистістю полірувальної пасти та їх комбінованої дії, що дало можливість оцінити параметри форми поверхні функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем та підвищити їх якість

Результати впровадження довели, що запропоновані Чалою О.О. методи дослідження ґрунтуються на сучасних технологіях проведення випробувань, виконані на високому науково-технічному рівні та мають переваги над існуючими рішеннями, зокрема дослідні зразки, що виготовлені з використанням запропонованих методів відрізняються, від відомих аналогів, тим, що їх відбиваюча здатність більша на 9%, при чому похибка вимірювань не перевищує 1% у всьому діапазоні випробувань.

Розроблене програмне забезпечення, для ТП виробництва підкладок ФК МОЕМС дало можливість знизити трудовитрати вирішення проблеми прогнозування виробничих дефектів у підкладках ФК МОЕМС та підвищити точність одержуваної інформації.

Використання методу неруйнівного контролю дало змогу знизити трудовитрати та збільшити точність контроль на 14 %.

Комісія підтверджує працездатність методів для забезпечення якості підкладок функціональних компонентів мікроелектромеханічних систем і запропонованого програмного продукту, а також той факт, що їх впровадження дозволило суттєво розширити функціональні можливості методів контролю функціональних компонентів, дослідження яких пов'язане із низкою труднощів через їх малі габаритно-масові показники.

Акт складений для пред'явлення до спеціалізованої вченої ради із захисту дисертацій і не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова комісії

Члени комісії

С. В. Демченко

О.В. Вікторова

К.В. Пилипенко

«Затверджую»

Проректор з науково-педагогічної та методичної роботи Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського

проф. Кости В. В.

2020 р.



АКТ

з впровадження результатів дисертаційної роботи
Чалої Олени Олександрівни

Комісія у складі голови: декана факультету електроніки та комп'ютерної інженерії – к.т.н., доц. Мосьпана Владислава Олександровича та членів комісії: завідувача кафедри електронних апаратів – к.т.н., доц. Фомовської Олени Владиславівни, доцента кафедри електронних апаратів – к.т.н., доц. Юрка Олексія Олексійовича, склала акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Чалої О. О. на тему «Технологічне забезпечення якості поверхонь підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки у навчальний процес Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського.

Склад впровадження:

– фізико-технологічна модель параметрів поверхонь підкладок функціональних компонентів МОЕМС, що становить основу для прогнозування виникнення виробничих дефектів поверхневого шару підкладок таких компонентів та можливість корегування технологічного процесу їх виготовлення;

– технологічний процес контролю якості функціональних компонентів, що базується на використанні інтерференційного методу, який становить основу для неруйнівного контролю топології поверхонь елементів та компонентів МЕМС та МОЕМС.

Комісія встановила, що результати дисертаційної роботи Чалої О. О. були впроваджені у навчальний процес кафедри електронних апаратів Кременчуцького національного університету імені М. Остроградського при проведенні лабораторних робіт та практичних занять з курсів «Матеріали та матеріалознавство електронних пристроїв», «Конструювання електронних пристроїв», «Основи технології електронних пристроїв», «Технологія деталей електронних пристроїв» для спеціальності 171 Електроніка.

Голова комісії
Члени комісії

В.О. Мосьпан
О.В. Фомовська
О.О. Юрко



ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. ректора Національного університету
«Запорізька політехніка»

С. Б. Беліков

02 2020 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Чалої Олени Олександрівни

Комісія у складі голови: декана факультету радіоелектроніки та телекомунікацій – к.т.н., доц. Кабака Владислава Семеновича та членів комісії: завідувача кафедри «Інформаційні технології електронних засобів» – д.т.н., доц. Шило Галини Миколаївни, доцента кафедри «Інформаційні технології електронних засобів» – к.т.н., доц. Фарафонова Олексія Юрійовича, доцента кафедри «Інформаційні технології електронних засобів» – к.т.н., доц. Фурманової Наталії Іванівни, склала акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Чалої О.О. на тему «Технологічне забезпечення якості поверхонь підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки, у навчальний процес Національного університету «Запорізька політехніка».

Склад впровадження:

– фізико-технологічна модель параметрів підкладок функціональних компонентів МОЕМС, яка дозволяє за рахунок обробки великого масиву даних прогнозувати виникнення виробничих дефектів поверхневого шару підкладок компонентів МЕМС та МОЕМС, у складі мікросистемної техніки;

– програмне забезпечення для опису реакцій, що відбуваються в верхніх шарах підкладок ФК МОЕМС, під час технологічного процесу їх виготовлення, яке використовується для аналізу прогнозування дефектів підкладки та дозволяє судити про стан виробу на етапі його виготовлення та подальшої експлуатації.

Комісія встановила, що результати дисертаційної роботи Чалої О.О. були впроваджені у навчальний процес кафедри «Інформаційні технології електронних засобів» Національного університету «Запорізька політехніка» при проведенні лабораторних робіт з курсів «Фізичні основи мікро- і наносистемної техніки», «Основи технології електронних апаратів» та «Проектування мікро- і наноструктур» для спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Голова комісії

Члени комісії

В. С. Кабак

Г. М. Шило
О. Ю. Фарафонов
Н. І. Фурманова

«Затверджую»

Ректор Харківського національного

університету радіоелектроніки

проф. Семенець В.В.

04 20 р.



з впровадження у навчальний процес
результатів дисертаційної роботи
Чалої Олени Олександрівни

Комісія у складі голови: завідуючого кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки (КІТАМ) – д.т.н., проф. Невлюдова Ігоря Шакировича, членів комісії: к.т.н., доцента кафедри КІТАМ Євгенія Анатолійовича Разумова-Фризіюка, к.т.н., доцента кафедри КІТАМ Стародубцева Миколи Григоровича, склала акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Чалої О. О. на тему «Технологічне забезпечення якості підкладок функціональних компонентів мікрооптоелектромеханічних систем», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання і виробництво електронної техніки у навчальний процес Харківського національного університету радіоелектроніки.

Комісія встановила, що наукові результати, запропоновані в дисертаційній роботі Чалої О.О. впроваджені у навчальний процес на кафедрі КІТАМ при викладанні дисциплін: «Компоненти та технології мікросистемної радіоелектронної техніки», «Обробка та передача інформації при управлінні технологічними системами», «Технічні засоби автоматизації інтелектуальних виробництв», «Сучасні матеріали виробництва засобів радіоелектроніки», «Фізико-хімічні основи технології засобів радіоелектроніки», «Фотоніка та інфокомунікаційні технології» для студентів спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка, освітньо-професійних програм «Інтелектуальні технології засобів радіоелектроніки» та «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки».

Голова комісії

І.Ш. Невлюдов

Члени комісії

Є.А. Разумов-Фризіюк

М.Г. Стародубцев

ДОДАТОК В

Список опублікованих праць за темою дисертаційної роботи

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. Филипенко А.И. Моделирование зависимости отражающей способности микрозеркал 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.
4. Чала О.О. Аналіз факторів втрат в оптичних перемикачах на основі МОЕМС-компонентів // *18 Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь в ХХІ сторіччі»*, (Харків, 14-16 квітня, 2014 р.), Т. 2, С. 63–64.
5. Е.А. Чалая. Потери в оптических микрозеркалаx // *19 Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь в ХХІ сторіччі»*, (Харків, 20-22 квітня, 2015 р.), Т. 2, С. 77–78.
6. Невлюдов И.Ш. Технологии микросистемной техники / И.Ш. Невлюдов, В.А. Палагин, Е.А. Чалая // *Технология приборостроения*. 2014. № 3. С. 7–10.
7. Невлюдов И.Ш. Технологии микросистемной техники (часть II) / И.Ш. Невлюдов, В.А. Палагин, Е.А. Чалая // *Технология приборостроения*. 2015. № 2. С. 5–11.

8. Чала О. О. Дефектоутворення, як основа Defect Engineering в MEMC та MOEMS // *Технологія приборостояння*. 2020. № 1. С. 78–81.

9. Е.А. Чалая. Влияние шероховатости поверхности покрытия микрорезеркал 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.

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

11. 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.

12. 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.

13. 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*).

14. 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*).

15. 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.

16. Филипенко А.И., Чалая Е.А. Влияние состояния поверхности микрозеркал МОЕМС компонентов на их оптические характеристики // *Збірник матеріалів XIV міжнародної науково-технічної конференції “Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів”* (м. Кременчук, 2015 р.), С. 98–99.

17. 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.

18. 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.

19. 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*).

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

21. 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 // *Технологія приборостроєння*. 2016. № 2. С. 32–35.

22. 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.

23. 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*).

24. 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.

25. 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*).

26. Невлюдов І.Ш., Письменецький В.О., Фролов А.В., Чала О.О. та інш. 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.

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