

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПРОЦЕНКО МАКСИМ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 621.3.049.7

ДИСЕРТАЦІЯ
ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ДЕТЕКТОРНИХ МОДУЛІВ
РАДІАЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

_____ М. А. Проценко

Науковий керівник: Невлюдов Ігор Шакирович, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, Лауреат Державної премії в галузі науки і техніки України

Харків 2017

АНОТАЦІЯ

Проценко М. А. Технологія виробництва детекторних модулів радіаційного випромінювання. – 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, м. Харків, 2017 р.

У дисертаційній роботі представлено результати теоретичних та експериментальних досліджень нових технологічних процесів (ТП) виробництва детекторних модулів (ДМ) радіаційного випромінювання (РВ).

Розроблено модель, з використанням якої встановлено аналітичні взаємозв'язки між структурними, топологічними і електрофізичними параметрами ДМ і гнучких з'єднувальних елементів (ГЗЕ) та досліджено залежності захисту ліній передач ДМ від конструктивних параметрів і технології виготовлення. Розроблено оптимальні конструктивно-технологічні рішення ГЗЕ згідно з критеріями мінімізації маси в робочому об'ємі детекторного блоку.

Проведено теоретичні та експериментальні дослідження ТП виготовлення багат шарових ГЗЕ з урахуванням усадки матеріалу, похибки геометричних розмірів елементів, клина травлення алюмінію. Визначені оптимальні режими і обрані маршрутні схеми виготовлення ГЗЕ з кроком розташування провідників 50 мкм і менше.

Удосконалено ТП УЗ зварювання ГЗЕ з безадгезивних алюміній-поліімідних фольгових діелектриків на автоматизованому обладнанні, що дозволило покращити відтворюваність з'єднань і підвищити продуктивність складання ДМ більш ніж у 10 разів.

Розроблено дифузійну модель відмов зварних з'єднань, згідно з якою основну роль в зменшенні зусилля руйнування відіграє ефект дифузійної пористості.

Проведені прискорені випробування мікробірок на вплив температури, що циклічно змінювалась відмов не спричинили, підтвердивши час напрацювання на відмову $t_n = 13,7$ років.

Експериментально досліджено параметри і характеристики реалізованих на практиці експериментальних зразків ДМ.

Ключові слова: детекторні модулі радіаційного випромінювання, гнучкі з'єднувальні елементи, алюміній-поліімідні лакофольгові діелектрики, вуглепластикові підкладки, COF-технологія складання, ультразвукове зварювання.

ABSTRACT

Protsenko M. A. The technology for the production of radiation detector modules. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.27.06 – technology, equipment and production of electronic equipment.– Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, 2017.

In the thesis results of theoretical and experimental research of new technological processes (TP) of radiation detector modules (DM) production are given.

Mathematical model is developed, using which one analytical correlations between the structural, topological and electrophysical parameters of DM and flexible connecting elements (FCE) are defined and dependencies of noise immunity of transmission lines of DM on design parameters and manufacture technology are investigated. Optimal design-technological solutions of FCE in accordance with the criteria of minimizing the material budget in fiducial volume are developed.

Theoretical and experimental studies of the TP for manufacture of multilayered FCE, taking into account the shrinkage of the material, the errors of the elements geometrical sizes and aluminum wedge etched are performed. For manufacture of FCE with pitch of traces 50 μm or less optimal regimes are defined and work flows are chosen.

TP of ultrasonic welding of FCE made of adhesiveless aluminium-polyimide foiled dielectrics on automated equipment is improved that allows to improve reproducibility of connections and to improve DM assembly performance in more than 10 times.

A diffusion model of welded joints failures has been developed, according to which the effect of diffusion porosity plays the main role in reducing the breaking force.

Accelerated tests of microassemblies on the influence of cyclically changing temperature did not cause failures, confirming the time between failures $t_n = 13,7$ years.

Parameters and characteristics of the implemented experimental DM are experimentally investigated.

Key words: radiation detector modules, flexible connecting elements, aluminum-polyimide lacquer foiled dielectrics, carbon-fiber base, COF-assembly technology, ultrasonic welding.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації (Publications with the main scientific results of the thesis):

1. Форсированные испытания гибридных микросборок / В. А. Антонова, В. Н. Борщев, А. М. Листратенко, М. А. Проценко и др. // Технология приборостроения. – 2003. – № 1. – С. 52-55.

2. Климова Л. В. Анализ частотных свойств гибких коммутационных плат / Л. В. Климова, М. А. Проценко // Технология приборостроения. – 2006. – № 2. – С. 22-26.

3. Проценко М. А. Исследование оптимальных конструкций гибких кабелей микроstriпового детекторного модуля для эксперимента СВМ и оценка их емкостных параметров / М. А. Проценко // Технология приборостроения. – 2007. – № 1. – С. 16-21.

4. Алюминиевая "Chip on flex" (COF) технология в радиационном приборостроении / Н. В. Замирец, В. Н. Борщев, М. А. Проценко, И. Т. Тымчук и др. // Технология приборостроения. – 2007. – № 2. – С. 3-9.

5. Гибко-жесткие однодетекторные модули для комптоновской медицинской томографии / В. А. Антонова, А. М. Листратенко, И. Т. Тымчук, М. А. Проценко и др. // Прикладная радиоэлектроника. – 2008. – Том 7, № 4. – С. 367-371.

6. Многосенсорные сверхминиатюрные блоки и многодетекторные модули для медицинских зондов эндоректального применения / В. Н. Борщев, В. А. Антонова, М. А. Проценко, И. Т. Тымчук и др. // Технология приборостроения. – 2009. – № 2. – С. 3-7.

7. Анализ современных технологий изготовления гибридных микросборок / И. Ш. Невлюдов, М. А. Проценко, И. С. Хатнюк, Р. Ю. Аллахверанов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Специальный выпуск "Новые технологии в машиностроении". Сборник научных трудов. Выпуск 3 (63). – 2010. – С. 200-207.

8. Исследования и выбор оптимальных технологических режимов сварки для автоматизации монтажа гибких алюминий-полиимидных микрокабелей / В. Н. Борщев, И. Ш. Невлюдов, М. А. Проценко и др. // Технология приборостроения. – 2011. – № 1. – С. 3-8.

9. Сборка демонстратора трековой системы для международного эксперимента по исследованию сжатой барионной материи / В. Н. Борщев, И. Ш. Невлюдов, М. А. Проценко и др. // Вестник Национального технического

университета "ХПИ": Тематический выпуск "Технологии в машиностроении". – 2011. – Вып. № 40. – С. 165-173.

10. Использование метода планирования экспериментов при оптимизации процесса микромонтажа многослойных конструкций гибких коммутационных структур / И. Ш. Невлюдов, М. А. Проценко, И. С. Хатнюк, Л. С. Федосеев // Вестник Национального технического университета "ХПИ". Тематический выпуск "Новые решения в современных технологиях". – 2012. – Вып. № 9. – С. 30-35.

11. Innovative microelectronic technologies for high-energy physics experiments / V. M. Borshchov, O. M. Listratenko, M. A. Protsenko et al. // Functional materials. – 2017. – Vol. 24, № 1. – P. 143-153.

12. Assembly and validation of the SSD silicon microstrip detector of ALICE / M. Bregant, V. Borshchov, M. Protsenko, I. Tymchuk et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2006. – A 566. – P. 18-21.

13. The ALICE vertex detector: Focus on the micro-strip layers / M. Bregant, V. Borshchov, M. Protsenko, I. Tymchuk et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2006. – A 569. – P. 29-3.

14. Development of thin multi-line cables for the STS micro-strip detector modules / V. N. Borshchov, O. M. Listratenko, M. A. Protsenko, I. T. Tymchuk // CBM Progress Report 2007. – GSI Darmstadt, Germany. – 2008 – P. 34-35.

15. Design and assembly of STS Demonstrator Module 0-B / V. M. Borshchov, J. M. Heuser, M. A. Protsenko, I. T. Tymchuk et al. // CBM Progress Report 2008. – GSI Darmstadt, Germany. – 2009. – P. 12.

16. Development of ultra-thin cables for the CBM Silicon Tracking System / V. M. Borshchov, J. M. Heuser, Yu. A. Murin, M. A. Protsenko et al. // GSI Scientific Report 2009, FAIR-EXPERIMENTS-70. – GSI Darmstadt, Germany. – 2010 – P. 72.

17. Prototyping of the CBM-STS module / V. M. Borshchov, Yu. A. Murin, J. M. Heuser, M. A. Protsenko et al. // CBM Progress Report 2009. – GSI Darmstadt, Germany. – 2010. – P. 17.

18. The MPD detector at the NICA heavy-ion collider at JINR / Kh. U. Abraamyan, V. N. Borshchov, M. A. Protsenko, I. T. Tymchuk et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2011. – A 628. – P. 99-102.

19. Prototyping of the CBM STS module / V. M. Borshchov, Yu. A. Murin, M. A. Protsenko, I. T. Tymchuk et al. // CBM Progress Report 2010. – GSI Darmstadt, Germany. – 2011. – P. 17.

20. A First experience in prototyping sensitive modules for CBM STS / Yu. A. Murin, V. M. Borshchov, M. A. Protsenko, I. T. Tymchuk et al. // CBM Progress Report 2011. – GSI Darmstadt, Germany. – 2012. – P. 19.

21. Full-size silicon microstrip sensors for the CBM Silicon Tracking System / J. M Heuser, V. M. Borshchov, M. Protsenko, I. Tymchuk et al. // GSI Scientific Report 2012, PHN-NQM-EXP-16. – GSI Darmstadt, Germany. – 2013. – P. 45.

22. An assembly concept for modules of the CBM Silicon Tracking System / C. J. Schmidt, V. M. Borshchov, M. Protsenko, I. Tymchuk et al. // CBM Progress Report 2012. – GSI Darmstadt, Germany. – 2013 – P. 18.

23. Full-size prototype microstrip sensors for the CBM Silicon Tracking System / J. Heuser, V. M. Borshchov, I. Tymchuk, M. Protsenko et al. // GSI Scientific Report 2013, NQM-CBM-11. – GSI Darmstadt, Germany. – 2014. – P. 26.

24. First mock-up of the CBM STS module based on a new assembly concept / V. M. Borshchov, C. J. Schmidt, I. T. Tymchuk, M. A. Protsenko et al. // CBM Progress Report 2013. – GSI Darmstadt, Germany. – 2014. – P. 41.

25. Improvement of ultra-light microcables production at LTU for the CBM Silicon Tracking System / V. M. Borshchov, I. T. Tymchuk, M. A. Protsenko, J. Eschke et al. // GSI Scientific Report 2014, MU-NQM-CBM-46. – GSI Darmstadt, Germany. – 2015. – P. 83.

26. The first mock-up of a CBM-STS full-scale ladder / V. M. Borshchov, Yu. A. Murin, G. I. Nikitskiy, M. A. Protsenko et al. // CBM Progress Report 2014. – GSI Darmstadt, Germany. – 2015. – P. 49.

27. Pre-series production of microcables for STS detector modules at LTU Ltd / V. M. Borshchov, Yu. A. Murin, M. A. Protsenko, I. T. Tymchuk et al. // GSI Scientific Report 2015, MU-NQM-CBM-1. – GSI Darmstadt, Germany. – 2016. – P. 1.

28. Assembly of demonstrators for laboratory and in-beam tests at JINR LHEP / A. Sheremetev, M. Protsenko, I. Tymchuk, A. Zavalnyuk et al. // CBM Progress Report 2016. – GSI Darmstadt, Germany. – 2017. – P. 49.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (The list of publications in support of the thesis results approval):

1. ALICE Silicon Strip Detector Module Assembly with Single-Point TAB Interconnections / M. Oinonen, V. Borshchov, I. Tymchuk, M. Protsenko et al. // Book of abstracts of the 11-th Workshop on electronics for LHC and future Experiments. – Heidelberg, Germany. 12-16 September 2005. – P. 92-97.

2. Development and test of TAB bonded micro-cables for silicon detectors in a Compton prostate probe / C. Lacasta, V. Borshchov, M. Protsenko et al. // Nuclear Science Symposium Conference Record, 2005 IEEE NSS-MIC. – Fajardo, Puerto Rico. – 23-29 October 2005. – Vol. 5. – P. 3032-3035.

3. Inside the ALICE experiment – Silicon Strip Detector modules from the Helsinki Institute of Physics / M. Oinonen, M. Protsenko, H. Seppänen, I. Tymchuk et al. // Proceedings of the XLI Annual Conference of the Finnish Physical Society. – Tallinn, Estonia, 15-17 March 2007. – P. 322.

4. Development and test of micro-cables for thin silicon detector modules in a prostate probe / C. Lacasta, V. Borshchov, A. Listratenko, M. Protsenko et al. // Nuclear Science Symposium Conference Record, 2008 IEEE NSS-MIC. – Dresden, Germany. – 19-25 October 2008. – P. 1126-1129.

5. Комплексный подход к выбору конструктивно-технологических решений гибко-жестких однодетекторных модулей для комптоновской медицинской томографии / В. Н. Борщов, В. А. Антонова, М. А. Проценко и др. // Сборник материалов Международной конференции "Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационных технологий". – Харьков: "ИСМА". – 2009. – С. 111-127.

6. Development and test of TAB bonded silicon PAD detectors and microcables for the construction of silicon probes for imaging / V. Linhart, V. Borshchov, M. Protsenko et al. // Nuclear Science Symposium Conference Record, – Orlando, FL, 2009 IEEE NSS-MIC. – 24 October – 1 November 2009. – P. 2423-2426.

7. Исследование возможности использования "chip on flex" технологии для сборки микрострипового детекторного модуля / М. А. Проценко, И. Т. Тимчук, И. С. Хатнюк // Сборник материалов 14-го Международного молодежного форума "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке". – 18-20 марта 2010 г., Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. – С. 422.

8. Detection tests of imaging devices based on silicon pixel-array detectors assembled using Tape Automated Bonding and microcable technologies / V. Linhart, V. Borshchov, M. Protsenko et al. // Nuclear Science Symposium Conference Record, – Knoxville, TN, 2010 IEEE NSS-MIC. – 30 October – 6 November 2010. – P. 3194-3196.

9. Исследование зависимости емкостных параметров гибких алюминий-полиимидных коммутационных плат от их конструктивных особенностей / М. А. Проценко, И. Т. Тимчук, И. С. Хатнюк // Сборник материалов 15-го Юбилейного международного молодежного форума "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке". – 18-20 апреля 2011 г., – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. – С. 79-80.

10. Исследование и выбор оптимальных технологических режимов изготовления гибких коммутационных структур для современных микроэлектронных систем / В. Н. Борщев, И. Ш. Невлюдов, М. А. Проценко,

И. С. Хатнюк // Сборник материалов VII Международной конференции "Стратегия качества в промышленности и образовании". – 3-10 июня 2011 г., Варна, Болгария. – Том 3. – С. 34-37.

11. Разработка метода ускоренных испытаний элементов гибких коммутационных плат на надежность и отказоустойчивость / И. Ш. Невлюдов, М. А. Проценко, И. С. Хатнюк // Материалы X Международной научно-технической конференции "Физические процессы и поля технических и биологических объектов". – 4-6 ноября, 2011 г., Кременчук. – С. 22-23.

12. Investigation of the compressed baryonic matter at the GSI accelerator complex / V. P. Ladygin, V. N. Borshchov, Yu. A. Murin, M. A. Protsenko et al. // Book of abstracts of the XXIII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems (Baldin ISHEPP XXIII). – 19-24 September, 2016., Dubna, Russia, – P. 92 (EPJ Web Conf. Volume 138. – 2017. – 10 p.).

13. Разработка и тестирование прототипа базового детекторного модуля для модернизации внутреннего трека эксперимента LHCb / С. С. Кандыбей, И. Т. Тымчук, М. А. Проценко // Тезисы докладов XIV конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям. – 22-25 марта 2016 г., Харьков: ННЦ ХФТИ. – С. 31-32.

14. Новітні підходи створення надлегких детекторних модулів для фізичних експериментів / В. М. Борщов, І. Т. Тимчук, М. А. Проценко // Тезисы докладов XV Конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям. – 21-24 марта 2017 г., Харьков: ННЦ ХФТИ. – С. 105-106.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації (The list of publications with supplementary results of the thesis):

1. Гнучкий багатошаровий з'єднувальний шлейф: патент України на корисну модель № 104141: МПК H05K 1/11 (2006.01) / В. М. Борщов, В. Г. Кучеренко, О. М. Лістратенко, Г. І. Нікітський, М. А. Проценко, І. Т. Тимчук; заявл. 24.07.2015 р.; опубл. 12.01.2016 р., Бюл. №1. – 4 с.

2. Спосіб виготовлення гнучкого світлодіодного модуля: патент України на винахід № 83968: МПК (2006) H01L 27/15 / В. М. Борщов, О. М. Лістратенко, Я. Я. Костишин, Г. В. Буєров, М. А. Проценко, І. Т. Тимчук; заявл. 20.08.2007 р.; опубл. 26.08.2008 р., Бюл. №16. – 6 с.

3. Спосіб виготовлення гнучкого модуля сонячної батареї: патент України на винахід № 85333: МПК (2006) H01L 31/04 / В. М. Борщов, О. М. Лістратенко, В. А. Антонова, І. Т. Тимчук, Г. В. Буєров, Я. Я. Костишин, М. А. Проценко; заявл. 10.12.2007 р.; опубл. 12.01.2009 р., Бюл. №1. – 4 с.

4. Ескіз та опис багатошарової гнучкої комутаційної плати для піксельних матричних детекторів радіаційного випромінювання в позитронно-емісійній та комптонівській медичній томографії: свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 15116 / В. М. Борщов, О. М. Лістратенко, В. А. Антонова, М. А. Проценко, В. Є. Старков; дата реєстрації: 22.12.2005 р.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	15
ВСТУП	17
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ КТР СУЧАСНИХ ДМ РВ	28
1.1 Загальні підходи при створенні ДМ.....	28
1.2 Початок розвитку ДМ для експериментів ФВЕ.....	29
1.3 Огляд сучасних ДС та особливостей ДМ	32
1.4 Розробка вимог до створення новітніх ДМ.....	34
1.5 Розвиток технологій виробництва ДМ	37
1.6 Вибір та обґрунтування матеріалів для ГЗЕ.....	48
1.7 Висновки за розділом та постановка завдань дослідження.....	52
РОЗДІЛ 2 ОБґРУНТУВАННЯ ПІДХОДІВ ДО СТВОРЕННЯ НОВИХ КТР ДМ РВ.....	54
2.1. Загальні вимоги до матеріалів підсистеми комутації ДМ РВ	54
2.2. Моделювання впливу конструктивно-технологічних факторів ГЗЕ на шумові характеристики сенсорів.....	57
2.3. Розрахунок товщини ДМ.....	63
2.4 Оцінка теплового режиму ГМ на піровуглецевій основі.....	65
2.5 Висновки за розділом.....	72
РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТП ФОРМУВАННЯ СЛОЇВ ГЗЕ	74

3.1 Аналіз технологічних особливостей виготовлення ГЗЕ на основі безадгезивних лакофольгових діелектриків з алюмінієвим провідниковим шаром.....	74
3.2 Технологічні послідовності виготовлення ГЗЕ ДМ	80
3.3 Дослідження ТП виготовлення ГЗЕ підвищеної щільності розташування елементів	84
3.4 Висновки за розділом.....	99
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТП СКЛАДАННЯ ДМ.....	101
4.1 Послідовність складання ДМ для експерименту СВМ.....	101
4.2 Визначення оптимальних режимів УЗ-зварювання ГЗЕ та безруйнівний метод контролю	106
4.3 Висновки за розділом.....	121
РОЗДІЛ 5 ВИПРОБУВАННЯ ДОСЛІДНИХ ЗРАЗКІВ МІКРОЗБІРОК НА НАДІЙНІСТЬ.....	122
5.1 Стан проблеми дослідження надійності. Обґрунтування переліку і обсягу випробувань мікробірок.....	122
5.2 Аналіз фізики та механізмів відмов мікробірок.....	126
5.3 Побудова моделі параметричної надійності, імітаційні випробування зразків та прогнозування показників надійності мікробірок.....	135
5.4 Прискорені форсовані випробування мікробірок та оцінювання показників надійності за результатами випробувань.....	142
5.5 Висновки за розділом.....	157
РОЗДІЛ 6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДМ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ТП	158
6.1 Вимірювання параметрів експериментального зразка детекторного модуля.....	158

6.2 Застосування розробленої технології.....	161
6.3 Висновки за розділом.....	168
ВИСНОВКИ.....	169
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	172
ДОДАТОК А. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ.....	191
ДОДАТОК Б. СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	197
ДОДАТОК В. ПАТЕНТИ ТА АВТОРСЬКІ СВДОЦТВА.....	204
ДОДАТОК Г. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ДЕТЕКТОРНИХ СИСТЕМ.....	209
ДОДАТОК Д. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ФОТОРЕЗИСТИВНОЇ МАСКИ.....	225
ДОДАТОК Е. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТРАВЛЕННЯ АЛЮМІНІЮ.....	228
ДОДАТОК Ж. ТЕХНОЛОГІЧНА ПОСЛІДОВНІСТЬ СКЛАДАННЯ ДМ.....	233

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

БГП	–	багатошарова гнучка плата
ВАК	–	Великий адронний коллайдер
ВЕТ	–	вироби електронної техніки
ВЕТ ПФС	–	вироби електронної техніки підвищеної функціональної складності
ВТС	–	Внутрішня трекова система
ГЗЕ	–	гнучкі з'єднувальні елементи
ГП	–	гнучка плата
ДМ	–	детекторні модулі
ДМ РВ	–	детекторні модулі радіаційного випромінювання
КТС	–	кремнієва трекова система
ПЗ	–	паяні з'єднання
ПКП	–	параметр – критерій придатності
ПФВ	–	прискорені форсовані випробування
УЗ	–	ультразвуковий
ФВЕ	–	фізика високих енергій
ALICE	–	A Large Ion Collider Experiment
ATLAS	–	A Toroidal LHC ApparatuS
CBM	–	Compressed Baryonic Matter
CERN	–	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
CMS	–	Compact Muon Solenoid
COB	–	Chip on Board (кристал на платі)
FAIR	–	Facility for Antiproton and Ion Research:
ITS	–	Inner Tracking System (внутрішня трекова систем)
IT	–	Inner Tracker (внутрішній трекер)

LHC	–	Large Hadron Collider (великий адронний коллайдер)
LHCb	–	Large Hadron Collider beauty
OT	–	Outer Tracker (зовнішній трекер)
PD	–	Pixel Detector (пксельний детектор)
SCT	–	Semi-Conductor Tracker (напівпровідникова система стеження)
SDD	–	SDD (дрейфовий детекторний модуль)
SMT	–	Surface Mount Tehnology (технологія поверхневого монтажу)
SpTAB	–	Single Point TAB (одноточкове ультразвукове зварювання)
TAB	–	Tape Automated Bonded
TRT	–	Transition Radiation Tracker (трековий детектор перехідного випромінювання)
TT	–	Trigger Tracker (тригерний трекер)

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні досягнення науки та техніки базуються на наукомістких технологіях, рівень яких визначає конкурентоспроможність продукції, що випускається, та є основою інноваційної політики. До наукомістких галузей електроніки в першу чергу відноситься радіаційне приладобудування. Ключовим елементом у всіх пристроях реєстрації радіаційного випромінювання є сенсор, чутливість і роздільна здатність якого визначає характеристики пристрою в цілому. Твердотільні кристалічні сенсори (сцинтиляційні, стрипові, дрейфові, матричні піксельні та ін.) є практично єдиним типом сенсорів, які забезпечують як виявлення невидимих випромінювань, так і визначення їх типу та спектру. Вони широко використовуються у фізиці високих енергій для вимірювання енергії елементарних частинок та їх координат. Сфера їх використання, однак, не обмежується ядерною фізикою, а розповсюджується також на галузі охорони здоров'я, моніторингу навколишнього середовища, космічного приладобудування, геології, контролю на митницях, в аеропортах та ін.

Роздільна здатність детекторних систем визначається параметрами детекторного модуля (ДМ), який складається з напівпровідникового сенсора та електроніки первинної обробки інформації. Підвищення вимог до детекторних систем вимагає підвищення просторової та енергетичної роздільної здатності, підвищення відношення сигнал/шум, зниження енергетичного порогу, чого можливо досягнути шляхом зменшення розмірів чутливих елементів сенсорів та їх розташування з мінімальним кроком, що, в свою чергу, є певним протиріччям до існуючого рівня технологічних можливостей виготовлення та складання гнучких з'єднувальних елементів (ГЗЕ) для передачі інформації між компонентами ДМ та зовнішніми приладами обробки інформації в умовах жорсткого радіаційного випромінювання. Отже, розробка нових технологічних процесів (ТП) створення ГЗЕ і гібридних мікрозбірок (ГМ) на основі

безадгезивних алюміній-поліімідних фольгових діелектриків, які дозволять реалізувати ДМ для нових експериментів фізики високих енергій, є актуальним завданням.

Активні роботи в галузі технології виготовлення функціональних елементів первинної електроніки з високою щільністю монтажу та комутацією на основі гнучкої лакофольгової системи алюміній-поліімід (типу ФДИ-А) проводилися та проводяться такими підприємствами як: ТОВ "Світлодіодні технології Україна" (м. Харків), ДП Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування (м. Харків), НТК "Інститут монокристалів" (м. Харків) та ДП Науково-дослідний інститут мікроприборів" (м. Київ). Накопичений ними досвід та науково-технічний потенціал було використано під час створення координатних ДМ внутрішньої трекової системи для експерименту A Large Ion Collider Experiment (ALICE) на Великому адронному колайдері (CERN, Швейцарія). При цьому було досягнуто зниження габаритних розмірів ДМ у 1,5 рази, створено ГЗЕ довжиною до 600 мм із кроком розташування провідників 300 мкм, гнучкі носії для мікросхем із кроком виводів 80 мкм, реалізовано тривимірні конструкції ДМ із можливістю обробки до 1500 каналів інформації з відношенням сигнал/шум більше 10.

Аналіз стану проблеми дозволив зробити висновок, що не дивлячись на суттєвий прогрес у галузі розробок ДМ, питання створення нових конструктивів і розробки нових наукових положень із вдосконалення технології виготовлення багат шарових гнучко-жорстких плат та ГЗЕ ДМ не повністю вивчені, деталізовані та реалізовані. Зокрема, під час розробки ГЗЕ відсутній підхід, що орієнтується на теоретичне обґрунтування принципів створення оптимальних конструктивно-технологічних рішень (КТР) відповідно до критеріїв мінімізації маси в робочому об'ємі детекторного блока, підвищення ступеня відповідності експлуатаційних параметрів заданим значенням, забезпечення завадостійкості під час спільного функціонування. Так, наприклад, ключовим моментом під час створення нового покоління ГЗЕ з

покращеними характеристиками для підготовки експерименту із дослідження стислої баріонної матерії в національному центрі GSI (м. Дармштадт, Німеччина) є встановлення аналітичних взаємозв'язків між їх структурними, топологічними та електрофізичними параметрами, розробка та дослідження ТП їх виготовлення з метою забезпечення заданих характеристик і завадостійкості ліній передач сигналів за максимально можливого відношення сигнал/шум, але не меншого, ніж 10-15. При цьому для вимірювання параметрів елементарних частинок мають бути використані тонкі мікострипові двосторонні сенсори з кроком стрипів 50 мкм і відповідно розроблені та виготовлені інноваційні багат шарові ГЗЕ (шлейфи) великої довжини (до 600 мм) із кількістю провідників більше ніж 1000 та з кроком 50 мкм.

Все вище викладене обумовлює актуальність сформульованої теми дисертаційної роботи та проведених у роботі досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові дослідження дисертаційної роботи проводилися на ДП Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування, ТОВ "Світлодіодні технології Україна" та у Харківському національному університеті радіоелектроніки (ХНУРЕ). Результати дисертаційної роботи отримані в рамках наступних науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт:

- ДКР "Розробка та впровадження перспективних технологій і матеріалів радіоелектронної апаратури ракет-носіїв і космічних апаратів" (ДР №0103U007272) – *замовник Національне космічне агентство України;*

- НДР "Розробка технології виготовлення мікрокабелів для проекту ALICE" (ДР №0104U006372) та НДР "Розробка та дослідження модулів мікострипових детекторів для проекту ALICE" (ДР №0106U007294) – *замовник Міністерство освіти і науки України;*

- НДР "Розробка, моделювання та дослідження новітніх конструктивно-технологічних рішень детекторних модулів для систем детектування експериментів у галузі фізики високих енергій" (ДР №0113U008109) та

НДР "Розроблення дослідно-промислової технології створення базових високотехнологічних компонентів детекторних модулів для систем детектування часток в експериментах з фізики високих енергій" (ДР №0113U007364) – *замовник Державне агентство з питань науки, інновацій та інформатизації України;*

- ДКР "Обслуговування технологічного обладнання" (договір № 17-11).

Значні результати дисертаційної роботи отримані під час виконання науково-дослідних робіт у Сьомій рамковій програмі з наукових досліджень та технологічного розвитку (FP7): "Study of strongly interacting matter" (HadronPhysics2) (угода про надання гранту №227431 від 03.12.2008 р.), work package "Ultra-light silicon tracking and vertex detection systems for frontier precision experiments" (ULISI), sub-project "Thin microstrip tracking detector system for large-area coverage" – *замовник Європейська Комісія (уряд Європейського Союзу).*

Дисертаційні дослідження також виконувалися за сприянням Українського науково-технічного центру (УНТЦ). Окремі результати дисертаційної роботи отримані в рамках наступних науково-дослідних робіт:

- НДР "Розробка та дослідження гнучких ліній координатних детекторів для міжнародного експерименту "ALICE" (проект №015с від 01.09.2001 р.) – *замовник Європейська організація з ядерних досліджень (CERN), (м. Женева, Швейцарія);*

- НДР "Розробка мініатюрних одно- та багатодетекторних модулів та матричних детекторів для комптонівської і позитроноемісійної томографії" (проект №3966 від 01.01.2008 р.) – *замовники Університет Перуджи / Національний інститут ядерних досліджень (INFN), (м. Перуджа, Італія) та Європейська організація з ядерних досліджень (CERN), (м. Женева, Швейцарія);*

- НДР "Розробка та дослідження конструкції і виготовлення кремнієвих стріпових модулів для експерименту CBM у FAIR" (проект №P602 від 01.06.2013 р.) та НДР "Розробка та дослідження мікростріпових детекторних

модулів на етапі дослідного виробництва для експерименту CBM у FAIR" (проект №P635 від 01.06.2014 р. і проект №P635а від 01.06.2016 р.) – *замовник GSI Центр із дослідження важких іонів ім. Гельмгольца (м. Дармштадт, Німеччина).*

Автор брав участь у виконанні даних робіт як виконавець та відповідальний виконавець.

Мета роботи та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є створення ТП виробництва ДМ радіаційного випромінювання (РВ) з високою щільністю монтажу компонентів у просторі, які дозволять зменшити багатократне розсіювання в шарах внутрішньої трекової системи (ВТС).

Досягнення поставленої мети здійснюється шляхом вирішення таких завдань:

- аналіз КТР сучасних ДМ РВ та обґрунтування засобів покращення електрофізичних, конструктивних і технологічних характеристик компонентів ДМ РВ;

- фізико-математичне моделювання залежності завадостійкості ліній передач ДМ від конструктивних параметрів і технології виготовлення та теоретичне обґрунтування покращення характеристик ДМ РВ за рахунок вдосконалення технології їх виготовлення;

- теоретичне та експериментальне дослідження ТП формування шарів ГЗЕ із високою щільністю розміщення провідників для виконання вимог експерименту Compressed Baryonic Matter (CBM);

- дослідження та розробка ТП складання ДМ з використанням інноваційної повністю алюмінієвої технології складання "Chip-on-flex" (COF);

- моделювання параметричної надійності, прогнозування показників надійності мікрозбірок та їх підтвердження у процесі випробувань;

- експериментальне дослідження параметрів і характеристик ДМ.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси виготовлення детекторних модулів радіаційного випромінювання.

Предмет дослідження – фізико-технологічні параметри технологічних процесів виготовлення детекторних модулів радіаційного випромінювання, які забезпечують високу щільність монтажу компонентів і зменшення маси речовини в робочому об'ємі.

Методи досліджень. Під час проведення дисертаційних досліджень використовувалися: метод конформних перетворень – для розрахунку електричної ємності лінії зв'язку; аналітичні методи стаціонарної теплопередачі – для дослідження температурного поля ГМ; положення теорії факторного експерименту – для визначення оптимальних технологічних режимів ультразвукового (УЗ) зварювання; методи математичного та комп'ютерного моделювання – для розробки моделі деградаційних процесів і прогнозування надійності зварних з'єднань; метод термоциклічних випробувань – для дослідження надійності мікрозбірок; метод експериментальних досліджень і статистичний аналіз отриманих результатів.

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

- вперше запропоновано технологічні процеси виготовлення ДМ РВ з використанням інноваційної алюмінієвої СОФ-технології складання, які на відміну від відомих дозволяють забезпечити високу щільність монтажу компонентів і зменшити масу речовини в робочому об'ємі на ~30% (що призведе до зменшення багатократного розсіювання в шарах ВТС);

- набула подальшого розвитку математична модель для встановлення завадостійкості ліній передач ДМ, яка на відміну від відомих дозволяє врахувати вплив конструктивних та технологічних параметрів виготовлення ГЗЕ, у результаті чого для модулів експерименту СВМ забезпечено відношення сигнал/шум більше 10;

- удосконалено методи обліку значень похибок геометричних розмірів елементів гнучких плат, клину травлення алюмінію, маршрутні схеми та режими процесів виробництва, що дозволило зменшити крок розташування

провідників ГЗЕ з безадгезивних алюміній-поліімідних фольгових діелектриків з 80 мкм до 50 мкм та менше, які відповідають кроку стрипів сучасних сенсорів;

- набув подальшого розвитку метод визначення оптимальних технологічних режимів УЗ-зварювання та їх підтвердження у процесі безруйнівного оптичного спостереження, за рахунок чого автоматизовано процес складання ДМ, що дозволило покращити відтворюваність з'єднань і підвищити продуктивність складання більш ніж у 10 разів.

Практичне значення отриманих результатів.

Практичне значення мають наступні результати дисертаційної роботи:

- експериментально відпрацьовані та впроваджені удосконалені ТП виробництва та УЗ-зварювання алюміній-поліімідних ГЗЕ з кроком розташування провідників 50 мкм та менше, а також складання гнучко-жорстких ДМ та їх тривимірного монтажу з використанням інноваційної COF-технології;

- розроблено та впроваджено конструкцію гібридної мікробірки на високотеплопровідній вуглепластиковій основі для ДМ експерименту ALICE;

- удосконалено гнучкий багатосаровий з'єднувальний шлейф, в якому сигнальні шари виконані з безадгезивних алюміній-поліімідних фольгових діелектриків, що дозволило на відміну від вже існуючих аналогів зменшити об'ємно-масові характеристики та товщину шлейфа в три рази, зменшити радіаційну довжину більш ніж у три рази, зменшити сумарну погонну ємність шлейфу на 15% (патент України на корисну модель № 104141 "Гнучкий багатосаровий з'єднувальний шлейф", дата реєстрації 12.01.2016 р.).

Результати досліджень впроваджено у ТОВ "Світлодіодні технології Україна" (м. Харків), у GSI Центрі із дослідження важких іонів ім. Гельмгольца (м. Дармштадт, Німеччина), на ДП "Науково-дослідний інститут мікроприладів" (м. Київ), а також у навчальному процесі на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки ХНУРЕ та

на кафедрі інформаційних технологій електронних засобів Запорізького національного технічного університету.

Застосування нових підходів та інноваційної COF-технології складання забезпечило створення декількох інноваційних виробів електронної техніки з покращеними параметрами: патент України на винахід № 83968 "Спосіб виготовлення гнучкого світлодіодного модуля", дата реєстрації 26.08.2008 р. та патент України на винахід № 85333 "Спосіб виготовлення гнучкого модуля сонячної батареї", дата реєстрації 12.01.2009 р.

Результати дисертаційної роботи також використано під час підготовки спеціалістів за спеціальностями 153 "Мікро та наносистемна техніка" і 171 "Електроніка" на кафедрі мікроелектроніки електронних приладів та пристроїв ХНУРЕ під час проходження передатестаційної практики в ТОВ "Світлодіодні технології Україна" у 2016 та 2017 рр.

Також результати дисертаційної роботи використано під час виконання наступних дослідно-конструкторських робіт:

- ДКР "Розробка технологічної документації і виготовлення експериментальних зразків мікрокабелів" (договір №53/04 від 27.10.2004 р.) – замовник *Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України (м. Харків, Україна)*;

- ДКР "Розробка та виготовлення прототипів піксельних детекторних модулів" (контракт №10s-10 від 24.03.2010 р.) – замовник *Державна агенція Верховна Рада Наукових Досліджень (CSIC), Інститут корпускулярної фізики (IFIC) (м. Мадрид, Іспанія)*;

- НДР "Розробка конструктивно-технологічних рішень базових детекторних модулів для модернізації внутрішнього трекеру експерименту ЛНСб" (договір №7бк від 10.07.2014 р.) – замовник *Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут" НАН України (м. Харків, Україна)*;

- ДКР "Розробка та виготовлення Демонстраторів 1-а, 1-б та 1-б' для СВМ-КТС" (контракт №6g-09 від 09.07.2009 р.), ДКР "Розробка, виготовлення та поставка Демонстраторів 2-а і 2-б за проектом СВМ" (контракт №8г-09 від 06.10.2009 р.), ДКР "Конструювання, виготовлення та поставка СВМ-STS Демонстраторів 2б-4" (контракт №9g-10 від 23.11.2010 р.), ДКР "Розробка, дослідження, виготовлення та поставка Демонстраторів 2а-1, 2а-2, 2а-3, 2а-4 та 2б-3 за проектом СВМ" (контракт №11г-010 від 04.05.2010 р.), ДКР "Розробка, виготовлення та поставка демонстраторів за проектом СВМ" (контракт №14г-11 від 16.03.2011 р.), ДКР "Розробка, виготовлення та поставка Демонстраторів BSD-1 та FSD-1 за проектом СВМ" (договір №100/2379 від 04.09.2014 р.), ДКР "Підготовка виробництва детекторних модулів, розробка, виготовлення та поставка макетів за проектом СВМ" (договір №1/10 від 10.10.2013 р.), ДКР "Виготовлення та поставка комплектів плат гнучких для детекторних модулів експерименту СВМ" (договір №08626319/15201121-74 від 28.05.2015 р.), ДКР "Виготовлення та постачання Демонстраторів СВМ та компонентів для Демонстраторів" (контракт №1 від 09.05.2016 р.), ДКР "Розробка, виготовлення та поставка плат гнучких для детекторних модулів експериментів NICA/MPD та СВМ" (договір №100-104 від 10.03.2017 р.) – замовник *GSI Центр із дослідження важких іонів ім. Гельмгольца (м. Дармштадт, Німеччина)*.

Ряд положень дисертаційної роботи було використано у роботі "Розроблення та впровадження у виробництво новітніх технологій створення надсучасних детекторних модулів на основі базових високотехнологічних компонентів з алюмінієвою комутацією для систем детектування часток в експериментах фізики високих енергій", за яку здобувач у складі авторського колективу був відзначений Премією Кабінету Міністрів України за розроблення і впровадження інноваційних технологій.

Обґрунтованість і достовірність досліджень підтверджується зіставленням теоретичних і експериментальних результатів за розробленою

методикою та порівнянням з аналогічними результатами інших авторів, контролем розрахунків, фізичною реальністю результатів, надійною роботою і високими параметрами виготовлених експериментальних зразків ДМ РВ.

Особистий внесок здобувача полягає в постановці й обґрунтуванні завдань дослідження, виборі об'єкту, предмету та методів досліджень, критичному обґрунтуванні результатів досліджень. Вирішення завдань, що представлені в роботі, виконані автором самостійно або за його безпосередньої участі. Дисертант вирішував питання розробки, дослідження та реалізації багатосарових структур ГЗЕ [1, 4, 7, 9, 18, 23, 24, 41], розробки та удосконалення ГП та маршрутів [2, 3, 6, 8, 10-17, 19-21, 25-33, 35, 37, 39, 42, 44, 46], випробування виготовлених ДМ та їх компонентів [5, 22, 34, 36, 38, 40, 43, 45]. Здобувач брав особисту участь в обробці й обговоренні результатів, підготовці публікацій і в усіх етапах впровадження у виробництво отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних та всеукраїнських науково-технічних і науково-практичних конференціях із публікацією у відповідних збірниках: 11-th Workshop on electronics for LHC an future Experiments (2005, м. Гейдельберг, Німеччина); IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2005, м. Фахардо, Пуерто-Ріко; 2008, м. Дрезден, Німеччина; 2009, м. Орландо, штат Флоріда, США; 2010, м. Ноксвілл, штат Теннессі, США); XLI Annual Conference of the Finnish Physical Society (2007, м. Таллінн, Естонія); на Міжнародній конференції "Інженерія сцинтиляційних матеріалів і радіаційні технології" (2008 р., м. Харків, Україна); 14-му та 15-му Міжнародному молодіжному форумі "Радіоелектроніка і молодь у XXI столітті" (2010, 2011 рр., м. Харків, Україна); VII Міжнародній конференції "Стратегія якості у промисловості та освіті" (2011 р., м. Варна, Болгарія); X Міжнародній науково-технологічній конференції "Фізичні процеси й поля технічних та біологічних об'єктів"

(2011 р., м. Кременчук, Україна); XXIII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems (2017 р., м. Дубна, Росія); XIV та XV конференції з фізики високих енергій, ядерної фізики та прискорювачів (2016, 2017 рр., м. Харків, Україна).

Публікації. Результати досліджень, що викладені в дисертації, опубліковані в 46 наукових працях (серед них 14 включено до міжнародних науково-метричних баз даних Scopus, Researchgate та РІНЦ), у тому числі 17 праць у закордонних журналах та 14 – у збірниках тез доповідей на міжнародних і всеукраїнських конференціях. Серед публікацій – 11 статей у наукових фахових виданнях України з технічних наук. Результати досліджень також були захищені 3 патентами України та 1 свідоцтвом авторського права на твір.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 239 сторінок, з них 19 сторінок – список використаних джерел (168 найменувань) та 49 сторінок – 7 додатків. Дисертація містить 53 рисунки та 23 таблиці (на 9 сторінках).

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ КТР СУЧАСНИХ ДМ РВ

1.1 Загальні підходи при створенні ДМ

На сьогоднішній день науковий прогрес у експериментах фізики високих енергій (ФВЕ) певною мірою стримується відсутністю нових експериментальних даних. Рішення проблеми здійснюється створенням прискорюючих центрів для отримання пучків іонів з надзвичайно високими рівнями енергії, вторинних пучків рідких ізотопів та антипротонів. Такі прискорювачі створюють пучки заряджених частинок, а довкола прискорювачів будуються детекторні установки різного призначення, що безпосередньо здійснюють детектування та обробку результатів взаємодії заряджених частинок.

Базовою установкою детектування та дослідження параметрів заряджених частинок у експериментах фізики високих енергій є багатопараметрова детекторна система, центральним елементом якої, як правило, є трекова система (ТС) або трекер для вимірювання траєкторій і моментів усіх заряджених частинок, що створюються у мішені чи при зіткненні пучків. ТС зазвичай включає декілька шарів кремнієвих детекторів. Для вимірювання параметрів частинок використовуються тонкі піксельні або мікстрипові сенсори. На основі сенсорів створюються стандартні блоки для трекових станцій – детекторні модулі (ДМ).

Найважливішим фізичним параметром детекторних станцій (ДС), що обмежує їх просторову роздільну здатність, є загальна вага базових комірок – ДМ. З метою мінімізації маси розсіюючих матеріалів у активному об'ємі ДС електроніка зчитування та первинної обробки інформації, за можливості, повинна бути розміщена за межами її активної області.

Основні вимоги при створенні ДМ – забезпечення високої модульності, мінімізація радіаційної довжини усіх складових частин конструкції, що

знаходяться у робочому об'ємі на шляху частинок, при забезпеченні необхідних характеристик та активному відведенні тепла від електроніки зчитування. Важливою проблемою при розробці ДМ є узгодження електричних параметрів ліній зв'язку з мікросхемами обробки інформації. Висока швидкість зчитування даних вимагає забезпечення обробки декількох сотень або й тисяч каналів, що передають інформацію зі швидкістю до 100 нс/канал.

Підвищення роздільної здатності, збільшення відношення сигнал/шум, мінімізація фонового випромінювання вимагають мінімального розміру чутливих елементів (пікселів, стрипів) з мінімально можливим кроком між ними, що висуває жорсткі вимоги як до сенсорів, так і до елементів комутації, що забезпечують передачу інформації між сенсорами та зовнішніми пристроями обробки даних.

На практиці незамінними для створення функціонально складних електронних виробів з високими вимогами до радіаційної стійкості, термостійкості, швидкодії та довготривалій надійності є гнучкі з'єднувальні елементи (ГЗЕ) на основі алюміній-поліімідних або мідь-поліімідних фольгованих або лакофольгових діелектриків. Для вибору найбільш оптимальних підходів при створенні сучасних ДМ проведено огляд існуючих ДС та ДМ.

1.2 Початок розвитку ДМ для експериментів ФВЕ

На сьогоднішній день у провідних світових наукових центрах (CERN, DESY, BNL, FNAL, SLAC) експлуатуються детекторні установки, головною чутливою частиною яких є кремнієві ДС, що виявились незамінними частинами при створенні великих установок для досліджень у ФВЕ. Головною чутливою частиною таких ДС є ДМ на основі напівпровідникових кремнієвих сенсорів. Кремнієві сенсори є практично єдиним типом компонентів, що забезпечують як виявлення невидимих випромінювань так і визначення їх типу та спектру та

широко використовуються для вимірювання енергії елементарних частинок та їх координат.

Кремнієві координатно-чутливі детектори на основі діодних структур нині є одним з основних інструментів дослідження різних частинок і випромінювань, що є продуктами ядерних реакцій і взаємодії високоенергетичних частинок в зустрічних пучках і з мішенями [1-3]. Їх перевагами є невелика енергія, що витрачається на утворення електронно-діркової пари, яка в кремнії складає близько 3,6 еВ, висока гальмівна здатність, що надає компактність ДМ, висока швидкість набору статистики, найбільш відпрацьована технологія виробництва кремнієвих сенсорів, висока радіаційна стійкість, здатність працювати в магнітних полях, у вакуумі і рідині [1.1-1.3].

На сьогоднішній день існує два основних типи ДМ, відповідно до кремнієвих сенсорів, на основі яких вони створюються: піксельні ДМ та стрипові ДМ (на основі одно- та двосторонніх сенсорів).

Перші зразки ДМ на основі кремнієвих сенсорів були виготовлені понад 30 років тому. Незважаючи на те, що перший прототип стрипового сенсору був створений ще у 1959 році у Chalk River Laboratory в Онтаріо, у Канаді [1.4], а сенсор на основі напівпровідникових р-п-переходів лише кілька місяців потому, у ФВЕ був використаний лише у 1983 році [1.5], чому передувала значна робота провідних науково-дослідних центрів світу. Варто відзначити активну участь у створенні перших зразків стрипових ДМ наукових груп: Bell Telephone Laboratories and Brookhaven National Laboratories (W.L. Brown, P.F. Donovan, W.M. Gibson і G.L. Miller.), Oak Ridge National Laboratory (C.J. Borkowski і J.L. Blankenship.) та Hughes Aircraft Research Laboratories (J.W. Mayer і S.S. Friedland).

Зовнішній вигляд першого ДМ на основі стрипового сенсору, що був використаний у експерименті ФВЕ NA11 у CERN наведено на рисунку 1.1.

Розміри сенсору були $24 \times 36 \text{ мм}^2$, крок розташування стрипів – 20 мкм, а крок зчитування – 120 мкм при зчитуванні тільки з одного боку і 60 мкм в центральній області, яка зчитувалась з обох боків.

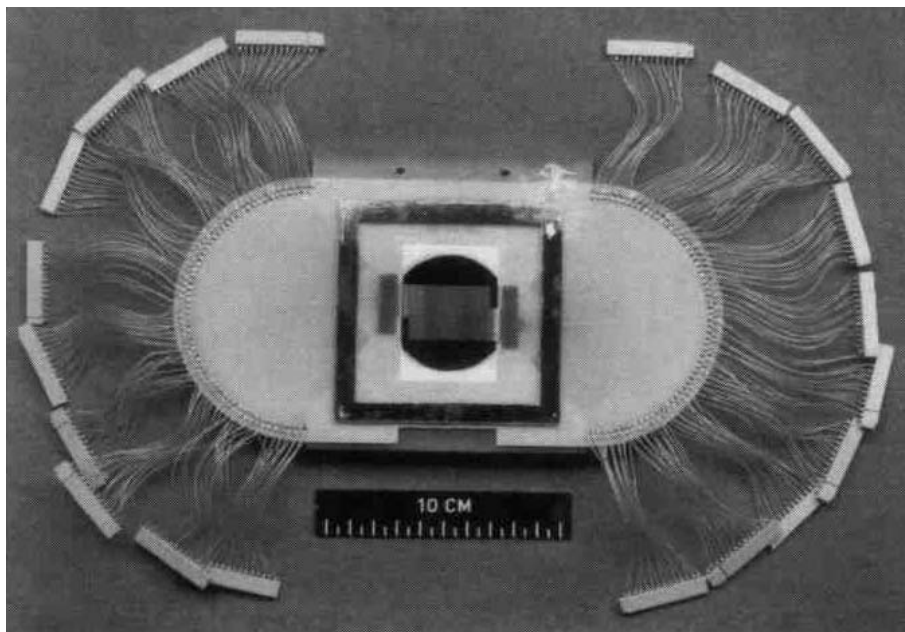


Рисунок 1.1 – Перший ДМ на основі стрипового сенсора

Розгалужувач на друкованій платі збільшував крок до величини, при якій можлива була пайка дротів, що ведуть до гібридної електронної системи. Зв'язок між сенсором і розгалужувачем був зроблений ультразвуковим зварюванням дротом. Необхідна повна площа для електроніки стрипового сенсора розміром $24 \times 36 \text{ мм}^2$ була приблизно один квадратний метр.

З введенням спеціально розробленої інтегральної електроніки для зчитування стрипових сенсорів, стало можливо зробити крок розташування елементів електроніки таким, що відповідає кроку зчитування сенсору, і прибрати розгалужувач з конструкції, значно зменшивши розміри ДМ. Стрипи детектора стали з'єднуватися безпосередньо з входами електроніки. Електронні мікросхеми зазвичай містили 64 або 128 каналів, що забезпечували посилення, фільтрацію, паралельне зберігання і послідовне зчитування сигналів. Зовнішній вигляд першого ДМ із застосуванням двосторонніх стрипових сенсорів, як

приклад розвитку мікострипових сенсорів та модулів на їх основі, що використовувалися в експериментах ФВЕ наведено на рисунку 1.2.

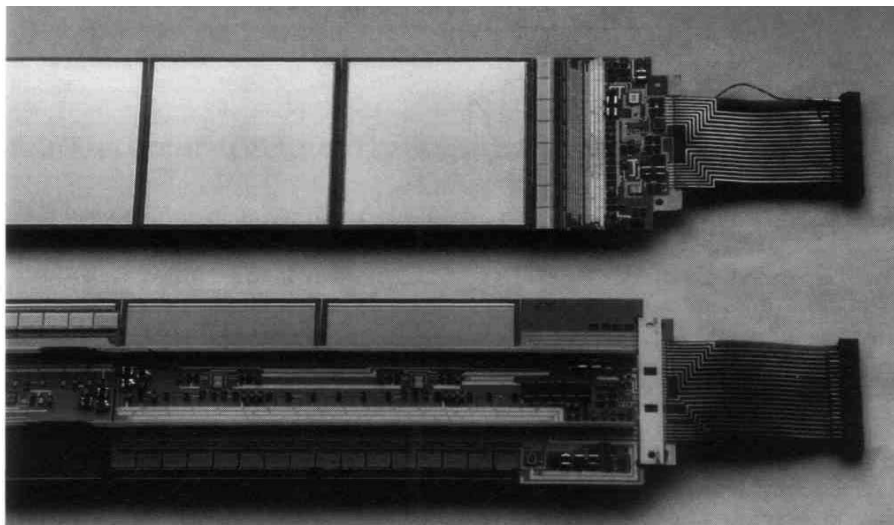


Рисунок 1.2 – Перший ДМ на основі двосторонніх стрипових сенсорів

В даному модулі використано двосторонні кремнієві сенсори розміром 6×6 см² з ємнісним зніманням сигналу, і з перпендикулярним напрямом стрипів на двох сторонах, який зчитувався мікросхемами CAMEX64.

Однаковий крок зчитування на сенсорі і в електроніці – 100 мкм, дозволив з'єднувати сенсор з електронікою зчитування безпосередньо ультразвуковим зварюванням дротом.

1.3 Огляд сучасних ДС та особливостей ДМ

На сьогоднішній день найбільших успіхів у напрямку створення ДС та ДМ досягли вчені та інженери, які приймали участь у створенні детекторних установок для експериментів ФВЕ на прискорювачі Великий Адронний Коллайдер (ВАК), що розташовується у європейському центрі ядерних досліджень CERN у м. Женева (Швейцарія) [1.6-1.10]. Схематичне зображення розташування основних детекторних установок експериментів на ВАК наведено на рисунку 1.3.

На ВАК створено наступні чотири основні детекторні установки (назви яких відповідають назвам експериментів) [1.6-1.9]: ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) – для вивчення взаємодії протон-протон; ALICE (A Large Ion Collider Experiment) – для вивчення взаємодії важких іонів; CMS (Compact Muon Solenoid) – для дослідження різних типів фізики, що можуть виникнути при значних енергіях взаємодії на ВАК; LHCb (Large Hadron Collider beauty experiment) – для вивчення В-мезонів.

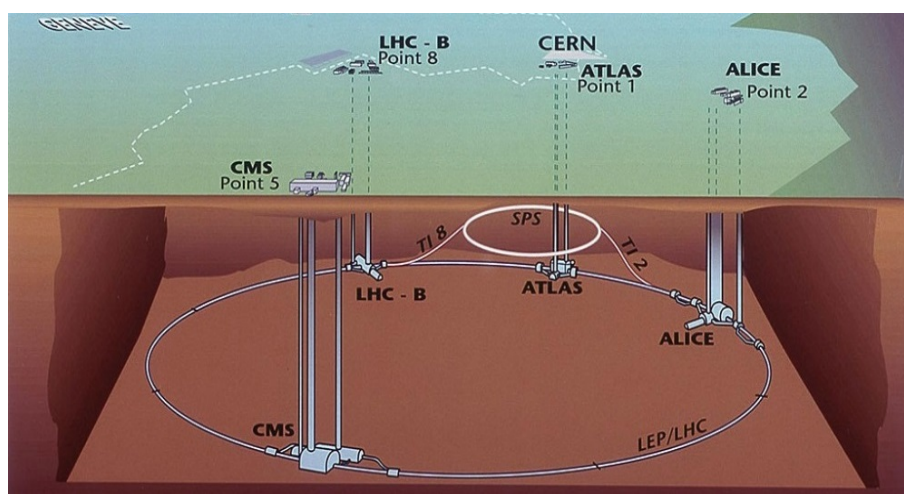


Рисунок 1.3 – Схематичне розташування експериментів на ВАК

В кожному з цих експериментів, незважаючи на різні завдання, використовувалися ДМ на основі стрипових або піксельних сенсорів.

На сьогоднішній день, враховуючи, що колабораціями ALICE, ATLAS, CMS та LHCb досягнуто значних успіхів та використано найновіші досягнення у галузі створення високотехнологічної техніки, для створення новітніх перспективних ДМ для модернізації існуючих та створення нових експериментів необхідно використовувати досвід цих колаборацій.

Детальний огляд ДС та ДМ наведено у Додатку Г.

Варто відзначити, що у роботах по розробці та виготовленню дрейфових та мікрострипових ДМ для експерименту ALICE приймали активну участь українські науковці [1.11-1.16].

1.4 Розробка вимог до створення новітніх ДМ

При розробці ДМ для систем детектування експериментів ФВЕ на основі кремнієвих сенсорів існує два підходи щодо розташування електроніки зчитування та обробки сигналів:

- розташування електроніки зчитування безпосередньо біля сенсору в зоні максимального радіаційного навантаження;
- розташування електроніки зчитування окремо від сенсору та у зоні меншого радіаційного навантаження.

Не зважаючи на те, що для ДМ, незалежно від використаного підходу при створенні, використовується радіаційностійка спеціалізована елементна база, загалом більш прийнятним є підхід, при якому електроніка обробки розташовується поза зоною максимального радіаційного навантаження. ДМ такого типу будуть використані при створенні кремнієвої трекової системи (КТС) міжнародного експерименту СВМ на прискорювальному комплексі FAIR у GSI (м. Дармштадт, Німеччина) [1.17]. Головною метою цього експерименту є дослідження зжатої баріонної матерії. Зовнішній вигляд детекторної установки експерименту СВМ схематично наведено на рисунку 1.4.

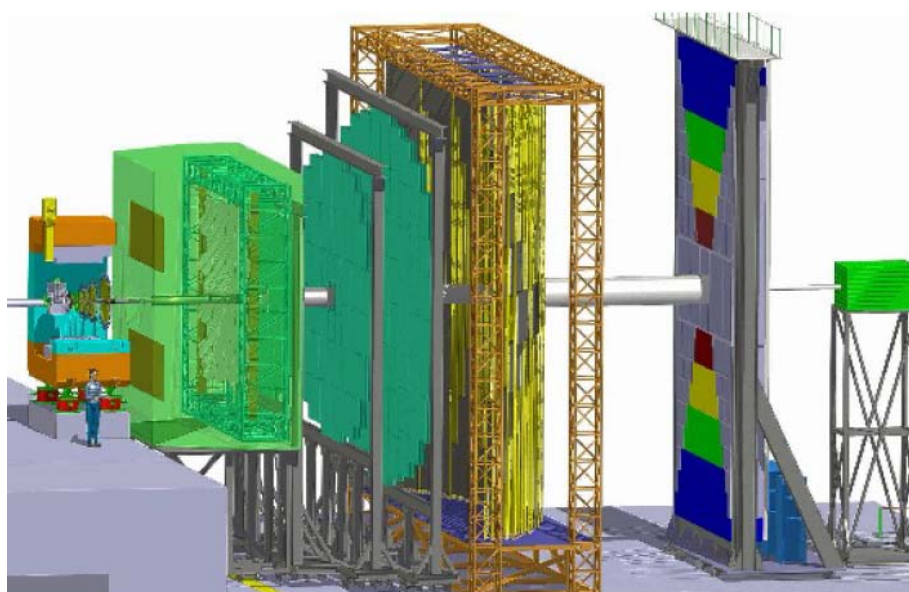


Рисунок 1.4 – Детекторна установка експерименту СВМ

Основною детекторною частиною експерименту СВМ є КТС і призначена вона для виміру траєкторій і моментів заряджених частинок, створених при взаємодії пучка важких іонів з мішенню (рисунок 1.5).

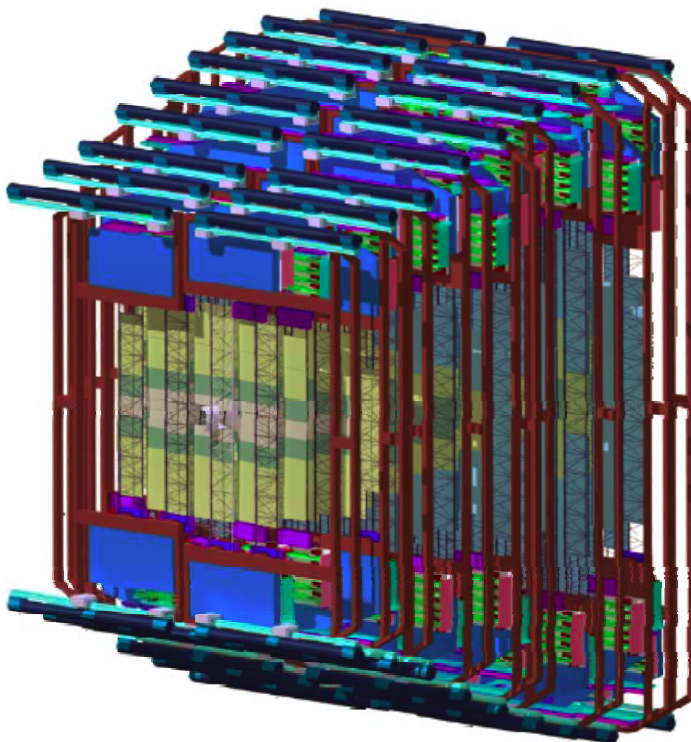


Рисунок 1.5 – Кремнієва трекова система експерименту СВМ

Основною складовою частиною КТС є ДМ з різною ефективною довжиною стрипів. Архітектура побудови КТС експерименту СВМ передбачає, що ДМ будуть складатися з одного або декількох послідовно з'єднаних чутливих елементів, сенсорів, і зчитуючої електроніки. При цьому електричне з'єднання обох сторін двосторонніх кремнієвих сенсорів передбачене в конструкції модулів. В якості чутливих елементів передбачається використання кремнієвих двосторонніх мікрострипових сенсорів з кроком розташування стрипів близько 50 мкм і кількістю 1024 стрипів з одного боку сенсора [1.17]. Загалом в КТС передбачається використання біля 1000 ДМ.

Складовою частиною побудови КТС є леддер (рисунок 1.6), який включає в себе різну кількість ДМ (до 10 од.).

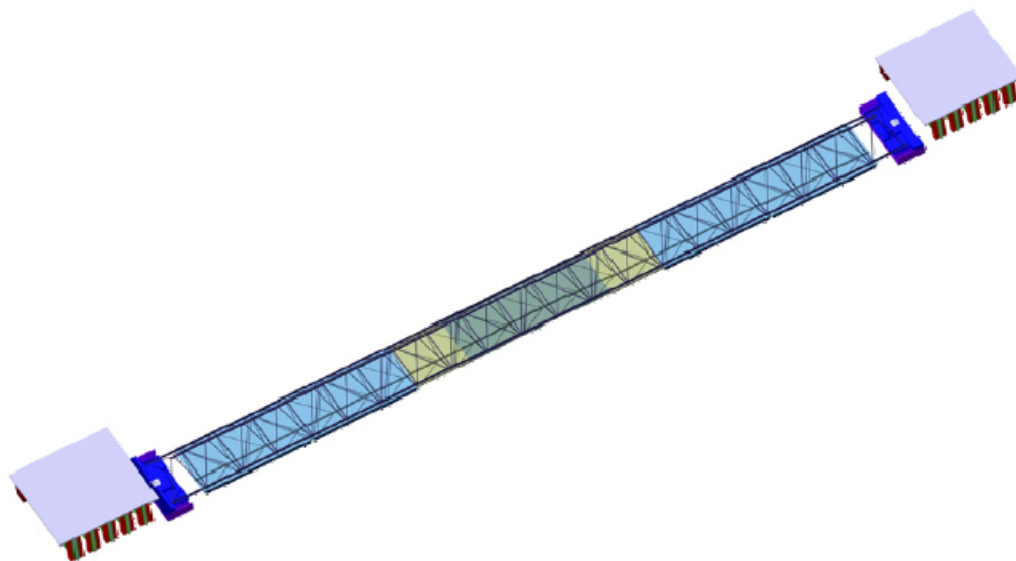


Рисунок 1.6 – Складова частина КТС – леддер

ДМ (рисунок 1.7), як було згадано раніше, містять головну чутливу частину – мікродриповий двосторонній кремнієвий сенсор і електроніку зчитування та обробки сигналів, які з'єднані багатошаровими ГЗЕ. В КТС передбачається використання одно- та двосенсорних модулів.

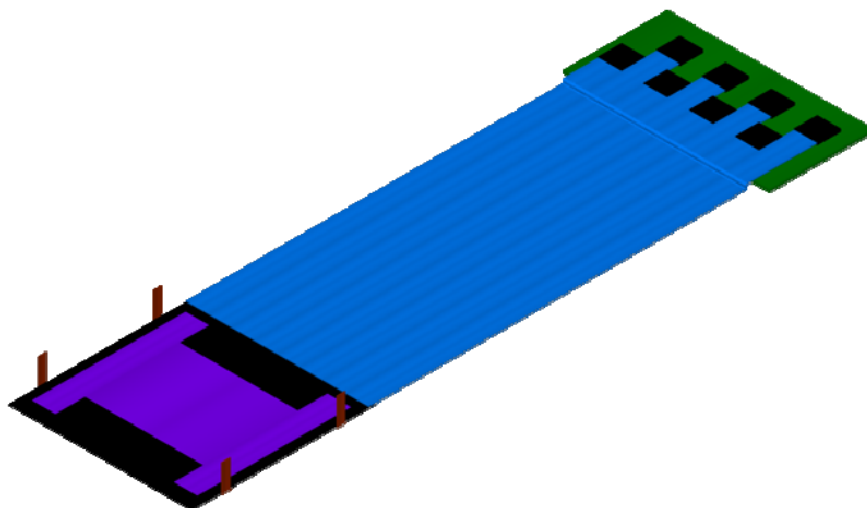


Рисунок 1.7 – Детекторний модуль експерименту СВМ

Вимоги до створення ДМ для експерименту СВМ потребують подальшого вдосконалення КТР ГЗЕ, в тому числі: ГЗЕ для сенсорів з кількістю

трас більше 1000, кроком 50 мкм та довжиною до 25 мм, багатошарових довгих ГЗЕ з кроком провідників 50 мкм та довжиною до 600 мм.

Вимоги об'ємних обмежень при розробці ДМ, зменшення порогу чутливості, покращення роздільної здатності з урахуванням жорстких радіаційних умов роботи модуля вимагають розгляду наступних надважливих проблем: оцінка ємнісних параметрів, вибір оптимальної конфігурації, моделювання об'ємного розташування компонентів ДМ, вибір їх оптимальної комутації.

Ключовим моментом при створенні нового покоління ГМ і ГЗЕ з покращеними експлуатаційними характеристиками є встановлення аналітичних залежностей між структурними, топологічними та електрофізичними параметрами пристроїв, дослідження технологічних процесів їх виготовлення та складання.

1.5 Розвиток технологій виробництва ДМ

1.5.1 COB-технологія

Спроба сумістити переваги гібридних технологій та дешевизну традиційного поверхневого монтажу (Surface Mount Tehnology, SMT) привела до створення в середині 1980-х років технології "кристал на платі" або "chip on board" (COB-технологія). Процес складання виробів за COB-технологією подібний до процесу складання гібридних мікросхем. У COB-технології в якості основи використовується друкована плата, а безкорпусні напівпровідникові кристали герметизуються заливкою (glob-top), в результаті виключається корпусування.

В даний час в деяких областях приладобудування COB-технологія вже фактично витіснила поверхневий монтаж. Швидкий розвиток COB-технології обумовлено мінімізацією масогабаритних характеристик кінцевого виробу і

максимізацією щільності розміщення компонентів. Площа, на якій розміщується кристал, зменшується в десятки разів тільки через відсутність корпусу. Додатковою перевагою COB-технології є той факт, що зварні з'єднання, що є основою складальної технології "кристал на платі", більш надійні при впливі вібраційних і термоциклічних навантажень, ніж паяні з'єднання, що застосовуються в технології поверхневого монтажу.

В даний час друковані плати для COB-технології практично не відрізняються від традиційних і на них можуть формуватися контактні площинки шириною до 100 мкм з кроком 150 мкм і менше. Однак, контактні площинки, що призначені для зварювання, вимагають спеціальної підготовки – на мідь осаджується шар хімічного нікелю товщиною 2-4 мкм, а на нього – шар хімічного золота товщиною від 0,1 до 0,2 мкм. Формування електричних зв'язків між выводами друкованих плат і контактними площинками кристалів у переважній більшості випадків здійснюється ультразвуковим зварюванням при використанні алюмінієвого дроту або термокомпресійного зварювання з використанням золотого дроту. Місця зварювання герметизують [1.18].

1.5.2 ТАВ-технологія

В середині 1980-х років була розроблена ще одна технологія монтажу, яка є комбінацією традиційної технології поверхневого монтажу (SMT) і COB-технології. Зазначена технологія отримала назву ТАВ-технології (Tape Automated Bonding) і призначалася для автоматизованого монтажу за допомогою стрічкових носіїв мікросхем з великою кількістю выводів. В цьому випадку виводи мікросхем зварюються з мідними контактними площинками рамок з выводами, які попередньо виготовлені на мідній стрічці з ізолюючим покриттям. Ці виводи потім паяють до металевих провідників на друкованій платі. На ТАВ-носіях широко застосовується монтаж спеціалізованих мікросхем та багатокристалних модулів. Складність ТАВ-технології полягає в

необхідності застосування спеціалізованого автоматизованого обладнання і в проблемах паяння виводів, розташованих з малим кроком. [1.19, 1.20].

В даний час в ряді галузей (медичному приладобудуванні, космічному приладобудуванні, в телекомунікаційній галузі, в експериментальній ядерній фізиці, в апаратурі військового застосування та ін.) все ширше використовуються надшвидкодіючі багатоканальні безкорпусні мікросхеми з кроком контактних площинок 50 мкм і менше, що відкриває можливість створення пристроїв з підвищеною функціональною ємністю. Як правило, до таких пристроїв пред'являються дуже жорсткі вимоги по масогабаритним характеристикам, обсягу та можливості компоновки виробу в трьох площинах у вигляді багатосарових блоків і пакетів [1.21-1.22]. Ні СОВ-технологія, ні тим більше, ТАВ-технологія вже не можуть задовільнити таким високим вимогам. На заміну прийшли нові КТР на основі технології "кристал на гнучкій платі" або "chip on flex" (COF-технологія) [1.23].

1.5.3 COF-технологія

На початковому етапі COF-технологія уявляла собою ту ж саму СОВ-технологію за винятком того, що комутаційні елементи виготовлялися з гнучких матеріалів. Збірка електронних пристроїв на ГЗЕ здійснювалася на тих же автоматичних лініях, які використовувалися у СОВ-технології і за допомогою тих же самих методів монтажу кристалів, пасивних компонентів і формування електричних з'єднань.

Гнучкі кабелі та плати виготовлялися на основі різних фольгових діелектричних матеріалів, таких як майлар, лавсан, поліетилен, поліпропілен, поліестер, поліімід та ін., в залежності від пропонованих до апаратури вимог. ГЗЕ з фольгових діелектриків на основі лавсану, поліетилену і т.д. менш дорогі, але можливості монтажу компонентів на них обмежені. У цьому випадку монтаж компонентів здійснюється за допомогою низькотемпературного паяння

або із застосуванням електропровідних адгезивів. На жаль, при обробці таких діелектричних матеріалів не вдалося, в повній мірі, застосувати методи мікроелектронної технології, заснованої на принципі інтегральної обробки матеріалів, та повністю виключити з ТП виготовлення гнучких плат і кабелів механічні операції формування наскрізних отворів [1.24]. Крім того, хоча матеріали типу поліетилену і поліпропілену характеризуються досить низькою діелектричною проникністю, й, відповідно, забезпечують добрі ємнісні характеристики ГЗЕ на їх основі, вони не є радіаційностійкими і не можуть забезпечити високу надійність та термін експлуатації електронних виробів з жорсткими вимогами до радіаційної стійкості.

Тільки фольговані полііміди виявилися практично незамінними для створення функціонально складних електронних виробів з високими вимогами до радіаційної стійкості, термостійкості, швидкодії і довготривалої надійності. Стабільність електричних і розмірних характеристик поліімідної основи обумовлює високу технологічність даного матеріалу. Температурна стабільність й висока термостійкість поліімідних гнучких плат дозволяє застосовувати високотемпературні (до 300°C) методи монтажу компонентів. До найважливіших характеристик поліімідних плівок слід віднести:

- здатність до однорідного травлення у лужних середовищах й можливість виборчого травлення;
- стійкість до тертя і високу міцність на розрив ($\sigma_p=175$ МПа) [1.25-1.26];
- незначне газовиділення [1.30];
- малу щільність ($\gamma=1,42$ г/см³) [1.25-1.30];
- низьку діелектричну проникність ($\epsilon=3,5$) [1.25-1.30];
- високу радіаційну стійкість (500 – 5000 Мрад [1.27, 1.30]);
- широкий діапазон робочих температур (-200 ÷ +400)°С [1.25-1.27, 1.29];
- високу електричну міцність (280-300 кВ/м) [1.25-1.29].

Важливим фактором, що сприяє розвитку COF-технології, послужила поява на світовому ринку серії поліімідів "Pyralux", фольгованих міддю, на основі поліімідних плівок типу Kapton, розроблених компанією DuPont Electronic Technologies, яка є провідним постачальником електронних матеріалів у світі. У фольгованих діелектриках "Pyralux LF" й "Pyralux FR" поліімідні плівки з'єднуються за допомогою акрилових адгезивів з мідною фольгою, яку відпалили, що дозволяє виготовити цілий ряд одно- й двобічних фольгованих діелектриків з широким діапазоном товщини мідних, адгезивних і поліімідних шарів [1.31]. Завдяки застосуванню таких матеріалів у виробках електронної техніки з'явилася можливість створення тривимірних конструкцій у вигляді двошарових або багат шарових структур малої товщини і площі, істотно знизити їх вагу і об'єм, а також підвищити їх функціональну ємність, швидкодію і надійність.

Найбільш вдало нові можливості COF-технології, що забезпечуються фольгованими поліімідами, були реалізовані в експериментальній ядерній фізиці. Сучасний розвиток ФВЕ, як зазначалося вище, вимагає використання багатоелементних (мікροстріпових, дрейфових, піксельних матричних та ін.) сенсорів, що супроводжується зростанням кількості каналів реєстрації подій. У таких міжнародних експериментах, як ATLAS, CMS, ALICE в CERN (Швейцарія), HERA-B в DESY (Німеччина), CBM в GSI (Німеччина) та ін., кількість каналів досягає сотень тисяч, а апаратура детекторної електроніки будується з використанням спеціалізованих інтегральних мікросхем високого і надвисокого ступеня інтеграції з кроком виводів 50 мкм і менше [1.32].

Використання в конструкціях ДМ гнучких плат і гнучких кабелів на основі мідь-поліімідних фольгованих діелектриків дозволило успішно вирішити проблему мінімізації обсягу ДС, забезпечити можливість тривимірного компонування ДМ і забезпечити їх складання без "мертвого простору" з високим енергетичною і просторовою роздільною здатністю.

Однак застосування фольгованих поліімідних плівок, що містять адгезив, не дало змоги у повній мірі реалізувати переваги COF-технології при складанні ДМ. З'єднання алюмінієвих контактних площинок кремнієвих сенсорів і мікросхем з покритими золотом мідними виводами гнучких плат і кабелів методом УЗ-зварювання з використанням алюмінієвого дроту зажадало застосування дуже високоточної і трудомісткої технологічної оснастки і значно ускладнило процес зварювання виводів кабелів з площинками двосторонніх сенсорів. Крім того, формування між'єднань гнучких кабелів і плат з сенсорами і мікросхемами за допомогою дроту обмежувало можливості зменшення габаритних розмірів і обсягу ДМ і вимагало підвищеної точності та обережності при проведенні процесів складання виробів, щоб не допустити деформації алюмінієвих дротів і закороток між ними (рисунок 1.8).

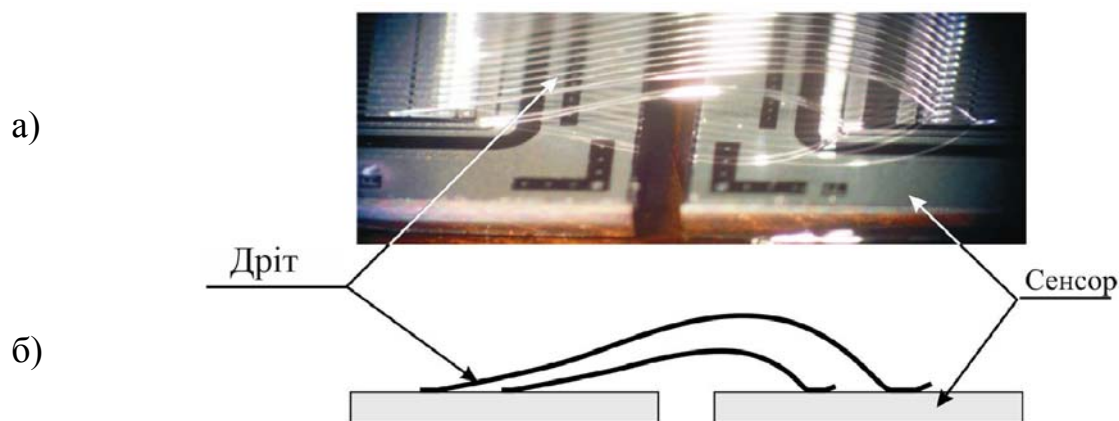


Рисунок 1.8 – Приклад дротової комутації сенсорів:

а) фотографія областей зварювання сенсорів, б) схематичний переріз областей зварювання

До недоліків фольгованих поліімідних плівок, що містять адгезив, можна також віднести досить малий діапазон робочих температур $-60^{\circ}\text{C} \div +125^{\circ}\text{C}$ [1.27-1.29]. Застосування адгезивів у фольгованих поліімідах також істотно ускладнює процес формування наскрізних отворів в системі "метал-адгезив-

поліімід" для міжшарових з'єднань через необхідність використання складних і важкокерованих процесів вскриття "вікон" в адгезивних шарах.

Ці недоліки були, в значній мірі, усунені після появи гнучких одне- й двобічних безадгезивних фольгованих діелектриків DuPont Pyralux на мідній основі [1.31]. Технологічна перевага таких матеріалів полягає в тому, що вони не містять адгезивних прошарків між міддю і поліімідом, але мають високу силу зчеплення між шаром міді і поверхнею поліімиду. Матеріали з безадгезивною і високоміцною структурою DuPont Pyralux AP і DuPont Pyralux AC є високотехнологічними при фотолітографії, груповому виборчому травленні наскрізних отворів у переходах і формуванні елементів топології дуже малих розмірів. Найбільш важливими характеристиками цих матеріалів є висока вибірковість при хімічній обробці поліімиду і міді; еластичність і механічна міцність поліімиду; висока термостійкість (350°C) і холодостійкість (-196°C) [1.31].

З огляду на хорошу адаптивність до фотохімічного виборчого травлення поліімиду безадгезивна структура матеріалу дозволяє повністю виключити з ТП виготовлення ГЗЕ застосування механічних операцій свердлення й фрезерування, замінюючи їх груповими процесами, і таким чином, скоротити технологічний цикл, знизити трудомісткість і, в кінцевому рахунку, зменшити вартість виготовлення виробів. Крім того, для мікросхем з високою щільністю й прицезійністю елементів топології при використанні зазначених матеріалів, виявилось доцільним застосування методів мікроелектронної технології, яка включає використання рідких фоторезистів, що володіють високою чутливістю й роздільною здатністю; використання практично всіх способів нанесення рідких фоторезистів (центрифугування, занурення, пульверизація); поєднання позитивних і негативних фоторезистів; застосування скляних і гнучких плівкових фотошаблонів; застосування установок з однобічним і двобічним експонуванням; застосування плазмохімічної й іоноплазменної виборчої обробки матеріалів [1.33].

Описані вище переваги безадгезивних мідь-поліімідних плівкових матеріалів були використані при створенні ГЗЕ для мікростріпових ДМ в міжнародному експерименті STAR в BNL (США) [1.34]. Можливість формування наскрізних отворів в шарах поліімиду дозволила відмовитися від застосування алюмінієвого дроту для з'єднання контактних площинок мікросхем і сенсорів з виводами комутуючих мідь-поліімідних плат і кабелів і здійснювати приєднання виводів безпосередньо до контактних площинок мікросхем і сенсорів за допомогою УЗ-зварювання через "вікна" в полііміді (рисунок 1.9).

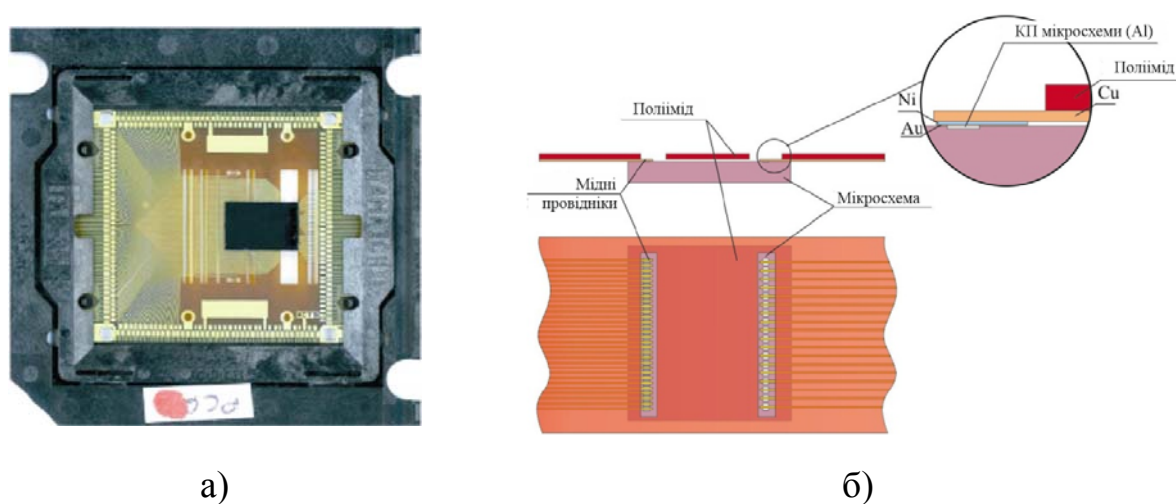


Рисунок 1.9 – Мікросхема на мідь-поліімідному носії:

а) фотографія (вид з боку мікросхеми); б) схематичне зображення зон зварювання носія з мікросхемою (вид з боку носія)

Способи формування міжз'єднань, що описані вище, забезпечили зменшення кількості зварних з'єднань у ДМ практично в два рази і дозволили значно спростити сам процес складання. При цьому в процесі складання повністю виключена можливість коротких замикань в областях зварювання контактних площинок сенсорів і мікросхем з провідниками гнучких кабелів і плат. Застосування гнучких плат спеціально для мікросхем дозволяє не тільки автоматизувати процес складання, а й забезпечити повний функціональний контроль мікросхем, у тому числі, за динамічними параметрами, і, таким

чином, виключити можливість появи браку через мікросхеми при подальшому складанні ДМ.

Проте, і в цьому випадку, залишилися невирішеними деякі проблеми, властиві традиційній СОФ-технології на основі мідь-поліімідних фольгованих діелектриків. Як і раніше, для забезпечення надійного безкорозійного з'єднання з алюмінієвими контактними площинками мікросхем і сенсорів на мідні провідники ГЗЕ необхідне нанесення додаткових шарів нікелю і золота, що ускладнює процес формування ГЗЕ. З цієї точки зору найбільш оптимальним варіантом подальшого вдосконалення СОФ-технології є застосування безадгезивних алюміній-поліімідних лакофольгових діелектриків.

1.5.4 СОФ-технологія на основі алюміній-поліімідних діелектриків

Безадгезивні алюміній-поліімідні лакофольгові діелектрики мають усі ті переваги, якими володіють і безадгезивні мідь-поліімідні матеріали. Однак цілий ряд їх переваг у порівнянні з мідь-поліімідними діелектриками дозволив істотно розширити можливості СОФ-технології на сучасному етапі. Перш за все, алюміній має високу корозійну стійкість. Крім того, алюміній має радіаційну довжину, яка майже в 6 разів перевищує радіаційну довжину міді ($X_{0Al} \approx 8,9$ см, $X_{0Cu} \approx 1,43$ см). Незважаючи на те, що алюміній в порівнянні з міддю має меншу механічну міцність ($\sigma_{pAl}=(10\div 40) \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$; $\sigma_{pCu}=(16\div 45) \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$), меншу теплопровідність ($\lambda_{TAl}=218$ Вт/(м·К); $\lambda_{TCu}=385$ Вт/(м·К)), питомий електричний опір приблизно в 1,6 рази більший питомого електричного опору міді ($\rho_{Al}=0,028$ мкОм·м; $\rho_{Cu}=0,017$ мкОм·м), важливе значення має той факт, що алюміній майже в 3,5 рази легше міді ($\gamma_{Al}=2,7$ г/см³, $\gamma_{Cu}=8,92$ г/см³). Завдяки малій щільності алюмінію забезпечується більша електрична провідність на одиницю маси, тобто, при однаковому номіналі опору й однаковій довжині алюмінієві провідники майже в два рази легше мідних, незважаючи на більший поперечний переріз. Таким чином, ГЗЕ на основі алюміній-поліімідних

лакофольгових діелектриків дозволяють ще більш мінімізувати масу речовини і робочий об'єм ДМ, що особливо перспективно для ДС з високою щільністю каналів інформації.

Алюмінієва СОF-технологія легко адаптується до існуючого автоматизованого устаткування УЗ-зварювання. При цьому забезпечується висока якість і надійність зварних з'єднань не тільки через те, що зварюються однорідні матеріали (алюмінієві контактні площинки електронних компонентів і алюмінієві провідники комутуючих елементів), але також і через те, що зварювальні електроди, які застосовуються у зварювальних установках, дозволяють забезпечити оптимальні режими процесів зварювання. Крім того, комутуючі елементи на основі безадгезивних алюміній-поліімідних діелектриків дозволяють значно поліпшити ємнісні характеристики електронних пристроїв. Завдяки ще одній позитивній властивості алюмінію – малій величині межі плинності ($\sigma_{0,2} = 2 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$) – є можливість в процесі УЗ-зварювання здійснювати з'єднання через глибокі (40÷70 мкм) "колодязі" в полііміді (рисунок 1.10). Це забезпечує зменшення вихідних ємностей в 5÷7 разів, що значно підвищує чутливість і роздільну здатність ДС.

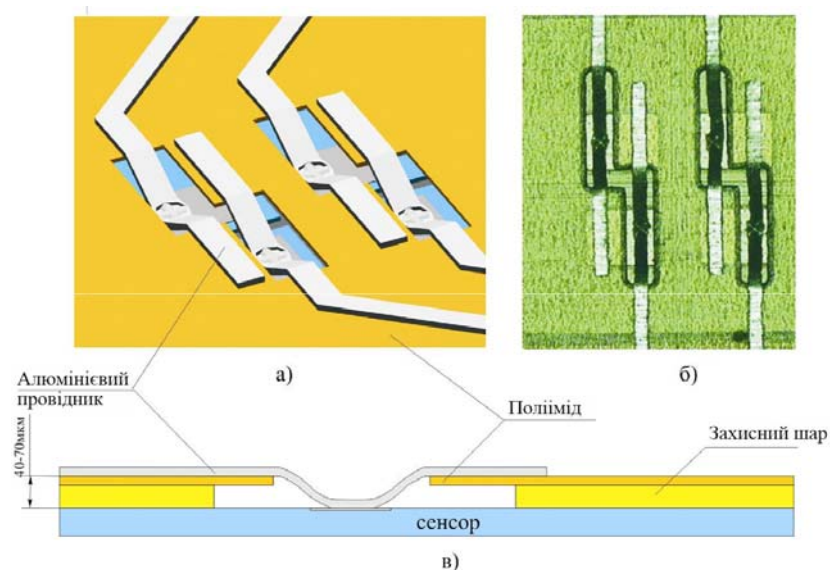
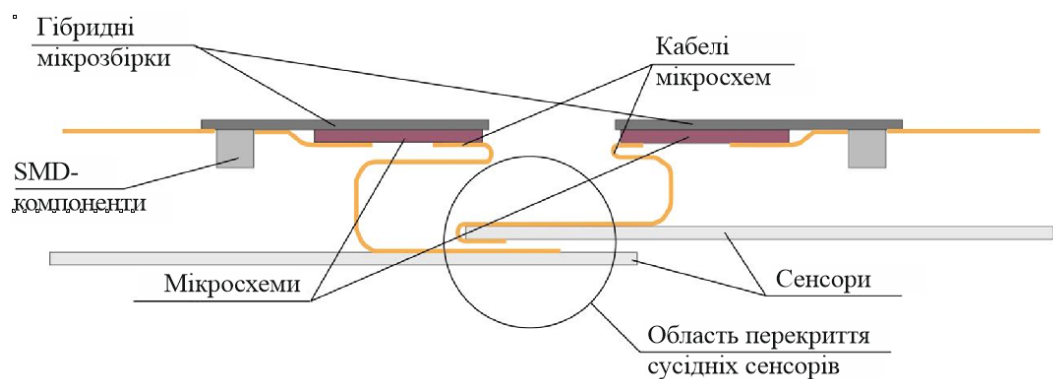
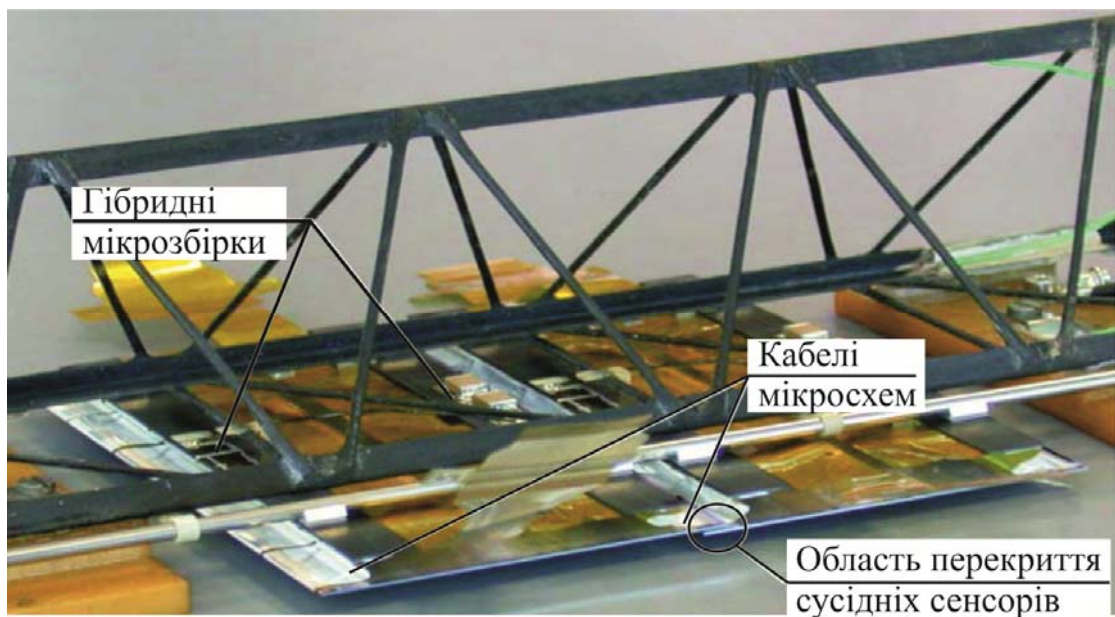


Рисунок 1.10 – Зварні з'єднання алюміній-поліімідного кабелю з сенсором: а) схематичне зображення області зварювання; б) фотографія області зварювання; в) схематичний переріз області зварювання

ГЗЕ на основі лакофольгових діелектриків характеризуються пластичністю, гнучкістю і стабільністю електричних характеристик і успішно заміняють дротяний монтаж при складанні ДМ. За рахунок компоновки в трьох площинах забезпечується перекриття сусідніх сенсорів у ДС що практично виключає "мертві зони", тобто зони, в яких не здійснюється детектування (рисунок 1.11).



а)



б)

Рисунок 1.11 – Просторова компоновка ДМ у складі ДС для виключення "мертвих зон" детектування: а) схема розташування сусідніх ДМ; б) фотографія фрагменту ДС з двома ДМ з сенсорами, що перекриваються

Компоновку, що описано, неможливо реалізувати при дротовому монтажі, так як у цьому випадку об'єкти зварювання повинні мати одностороннє розташування і практично неможливо змінити конфігурацію провідників після зварювання (рисунок 1.12).

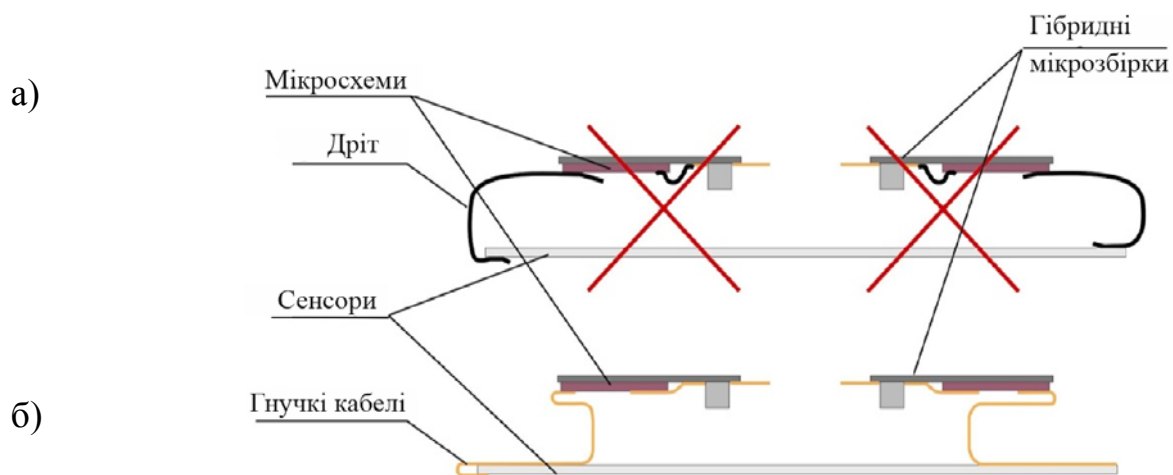


Рисунок 1.12 – Варіанти просторового розташування ГМ у ДМ: а) при використанні дротового монтажу; б) при використанні гнучких кабелів

1.6 Вибір та обґрунтування матеріалів для ГЗЕ

Галузь застосування фольгованих діелектриків, як безадгезивних, так і виготовлених з використанням адгезиву, постійно розширюється. Якщо ще кілька десятиків років тому основними споживачами таких матеріалів були виробники гнучких друкованих плат [1.32], то в даний час вони широко використовуються при виготовленні гнучких друкованих кабелів і шлейфів, гнучких поліімідних носіїв [1.34, 1.35], гнучких терморезисторів [1.36], мембран акустичних перетворювачів [1.37] і навіть фотоелектричних перетворювачів [1.38]. Важко назвати сучасну галузь науки і техніки, в якій не використовуються фольговані діелектрики. Це, як і раніше, радіоелектроніка, авіація, космонавтика, ядерні дослідження та навіть медицина.

За своєю структурною будовою фольговані діелектрики можуть бути двошаровими (безадгезивні матеріали), тришаровими, що мають структуру "метал - адгезив - полімер", і навіть багат шаровими [1.38].

В даний час безадгезивні фольговані діелектрики виготовляються двома методами – напиленням металевого шару на полімерну плівку [1.39] і нанесенням рідкого лаку на металеву фольгу з подальшим перетворенням його в полімерну плівку [1.40].

Безадгезивні фольговані діелектрики з напиленим металевим шаром, найчастіше алюмінієвим, використовуються для радіаційного захисту в скафандрах, електромагнітного екранування і виготовлення мембран акустичних перетворювачів. Однак, такі металеві плівки мають порівняно малу товщину, як правило близько мікрона, і для виготовлення з них елементів комутації для ДМ непридатні. Важливо також відзначити, що напилення є порівняно дорогим процесом і його використання в технології може істотно підвищити вартість виробів, що виготовляються.

Безадгезивні фольговані матеріали, одержувані нанесенням рідкого лаку на фольгу виготовляють в Росії ВАТ "НДІ електронних матеріалів" і ВАТ "Крон". В даний час ними в основному випускаються діелектрики лакофольгові типу ФДИ-АП50 і ФДИ-220 на поліімідній основі із зниженим ступенем імідазації. Вони мають товщину алюмінієвої фольги 30 мкм і поліімідної плівки 20 мкм. Однак ці матеріали є нестабільними, мають обмежений гарантійний термін зберігання (не більше 6 місяців) і дають велику усадку в процесі виготовлення виробів як після стравлювання фольги, так і при проведенні технологічних операцій термообробки. Остання обставина обумовлена тим, що вироби, виготовлені з лакофольгових діелектриків із зниженим ступенем імідазації, вимагають обов'язкової фінішної термообробки при температурах порядку 300°C для доведення імідазації до повної. Тому при виготовленні з таких матеріалів складних багатовивідних виробів, зокрема гнучких поліімідних носіїв для складання мікросхем [1.41, 1.42], мікрокабелів і

шлейфів, конструктори при їх проектуванні змушені враховувати попереджувальну поправку на усадку [1.43]. Проте нестабільність властивостей поліімідної основи цих виробів робить попереджувальне коригування недостатньо ефективним.

Постійне підвищення рівня інтеграції мікросхем, що збираються з використанням гнучких поліімідних носіїв і мікрокабелів, супроводжується збільшенням числа їхніх виводів до декількох сотень і диктує необхідність зменшення кроку виводів до 80 мкм [1.11], а часом і до 50 мкм [1.44-1.46]. Виготовлення таких складних багатовивідних виробів можливо тільки за рахунок істотного підвищення якості та стабільності властивостей лакофольгових діелектриків, а також зменшення товщини алюмінієвої фольги до 14 мкм [1.45]. В даний час вже ставиться завдання зменшення товщини фольги до 10 мкм.

Більш широка номенклатура фольгованих матеріалів представлена ТОВ НПП "Поліком" (РФ). Крім вищевказаних матеріалів із зниженим ступенем імідизації цим підприємством організований також і серійний випуск ряду фольгованих матеріалів з повним ступенем імідизації з товщинами алюмінієвої фольги 14, 20, 25 і 30 мкм. Дані матеріали використовуються для виготовлення гнучких поліімідних носіїв, шлейфів, мікрокабелів та інших виробів, що дозволяє обрати їх як основний матеріал для використання при виготовленні ГЗЕ ДМ.

Важливо також відзначити, що діелектрики, які випускаються ТОВ НПП "Поліком" мають більш високі якісні характеристики за рахунок [1.40]:

- обов'язкового проведення очищення, знежирення фольги і обдування (для видалення залишків розчинника і пилу) з ціллю поліпшення адгезії до неї поліімідної плівки;

- обов'язкової попередньої фільтрації поліімідного лаку з метою видалення домішок і бульбашок повітря;

– забезпечення рівномірної та одночасної температурної обробки всього рулону діелектрика, намотаного спільно з стрічкою корекса, з метою гарантованої рівномірності ступеня імідизації і відпалювання алюмінію для поліпшення його зварюваності;

- проведення термообробки у вакуумній камері або печі;
- доведення ступеня імідизації поліімідної плівки до 95-100%.

Вибір полімерів діелектричної основи для виготовлення фольгованих діелектриків достатньо широкий. Застосовуються самі різні матеріали: поліетилентерефталат (він же майлар або лавсан), поліімід (Каптон різних типів), поліефір, поліефірсульфон, поліпарабанова кислота, гнучкий епоксіпластик і навіть поліетилен. Але найбільше поширення набув поліімід внаслідок його виняткової здатності зберігати стабільність властивостей при високих температурах [1.47].

Порівняльні технічні характеристики властивостей матеріалів, що найбільш часто застосовуються в якості полімерної основи фольгованих діелектриків, наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики полімерної основи фольгованих діелектриків

Тип полімеру	Технічні характеристики				
	Міцність при розриві, МПа	Відносне подовження при розтягу, %	Електрична міцність, кВ/мм	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К	Діапазон робочих температур, °С
Поліімід	150 -180	60	280 - 300	0,14 - 0,20	-200 +400
Майлар	90	15	60	0,15	-20 +100

При використанні алюмінію в якості провідникового шару (товщиною від 14 до 30 мкм) в місцях з'єднання виводів з контактними площадками кристалів

утворюється однокомпонентна система Al-Al, що не вимагає створення додаткових виступів на кристалі [1.48]. У такій монометалічній системі виключається поява інтерметалічних сполук в твердій фазі при експлуатації приладів, в тому числі при підвищених температурах. Важливим є і те, що алюміній, який має малий заряд ядра ($Z=13$), не утворює при опроміненні вторинних ізотопів і стійкий до впливу радіації [1.48-1.50].

Комплексний облік всіх властивостей можливих матеріалів металевого і полімерного шарів фольгованих діелектриків, а також особливостей мікросхем і сенсорів дозволяє виділити в якості найбільш прийнятної при виготовленні ГЗЕ для виготовлення ДМ безадгезивний діелектрик типу алюміній-поліімід з повним ступенем імідизації. Це лакофольгові діелектрики типу ФДИ-А різних марок (ФДИ-А24, ФДИ-А32, ФДИ-А40 і ФДИ-А50), що виготовляються ТОВ НПП "Поліком".

1.7 Висновки за розділом та постановка завдань дослідження

1. Проведено аналіз КТР сучасних ДМ РВ та обґрунтовано засоби покращення електрофізичних, конструктивних і технологічних характеристик компонентів ДМ РВ.

2. Обґрунтовано вибір якості матеріалу для ГЗЕ безадгезивних діелектриків типу алюміній-поліімід з повним ступенем імідизації, які дозволять забезпечити:

– можливість складання компонентів ДМ як УЗ-зварюванням, так і, при необхідності, пайкою після додаткової обробки алюмінієвих виводів;

– високу надійність зварних з'єднань за рахунок утворення монометалічного з'єднання Al-Al, що не потребує створення додаткових виступів на кристалі;

– можливість роботи ГЗЕ, в умовах теплових і радіаційних навантажень;

– підвищення щільності монтажу за рахунок зменшення кроку виводів до 50 мкм.

3. Метою дисертаційної роботи є створення ТП виробництва ДМ РВ з високою щільністю монтажу компонентів у просторі, які дозволять зменшити багатократне розсіювання в шарах ВТС.

Досягнення поставленої мети здійснюється шляхом вирішення таких завдань:

- фізико-математичне моделювання залежності завадостійкості ліній передач ДМ від конструктивних параметрів і технології виготовлення та теоретичне обґрунтування покращення характеристик ДМ РВ за рахунок вдосконалення технології їх виготовлення;

- теоретичне та експериментальне дослідження ТП формування шарів ГЗЕ із високою щільністю розміщення провідників для виконання вимог експерименту СВМ;

- дослідження та розробка ТП складання ДМ з використанням інноваційної повністю алюмінієвої СОФ-технології складання;

- моделювання параметричної надійності, прогнозування показників надійності мікрозбірок та їх підтвердження у процесі випробувань;

- експериментальне дослідження параметрів і характеристик ДМ.

РОЗДІЛ 2 ОБҐРУНТУВАННЯ ПІДХОДІВ ДО СТВОРЕННЯ НОВИХ КТР ДМ РВ

2.1. Загальні вимоги до матеріалів підсистеми комутації ДМ РВ

Матеріали ДМ для забезпечення необхідної точності вимірювань параметрів частинок повинні мати високу жорсткість (високе значення модуля Юнга), нечутливість до змін температури (мала величина температурного коефіцієнта лінійного розширення ТКЛР), нечутливість до впливів вологості (низький коефіцієнт адсорбції вологи), високе значення радіаційної довжини X_0 і стабільність у часі.

Здатність радіації проникати всередину матеріалу є функцією енергії, заряду і маси. На практиці глибина проникання важко піддається визначенню, так як деяка частина енергії первинного пучка може бути перетворена в енергію рентгенівських променів низької енергії.

Для того, щоб отримати інформацію про масу, заряд, момент і траєкторію частинок у трековій системі, необхідно забезпечити максимально можливу стабільність її конструкції об'ємом у декілька кубічних метрів при високому рівні радіації, температурних градієнтах, зміні вологості та зв'язаних з ними механічних напругах та повзучості у матеріалах.

Помилки при визначенні траєкторії частинок визначаються не тільки внутрішньою роздільною здатністю елементів детектування та електроніки, але й розсіюванням випромінювань у матеріалах несучої конструкції ДМ при значному тепловиділенні мікросхем, що забезпечують перетворення сигналу.

Для забезпечення високої роздільної здатності ДМ слід урахувати, що джерела помилок при вимірюванні заряду і траєкторії частинок визначаються багатократним розсіюванням у структурі ДМ, механічним позиціонуванням та стабільністю у тривимірному просторі. Як відомо, сумарний кут розсіювання θ_p зворотньопропорційний кореню квадратному з радіаційної довжини: $\theta_p \sim 1/\sqrt{x_0}$.

Сумарний кут θ_p при багатократному розсіюванні, обумовлений електромагнітною взаємодією часток з електронами та ядрами середи та визначається зі співвідношення (2.1):

$$\theta_p = \frac{0,014}{\beta\rho} \sqrt{\frac{L}{X_0}}, \quad (2.1)$$

де $\beta = v/c$; p – момент [ГеВ/с]; L – довжина в матеріалі, яку проходить частинка; X_0 – радіаційна довжина, фізична властивість матеріалу.

З наведеного виразу видно, що кут розсіювання зменшується із збільшенням радіаційної довжини ($\theta_p \sim X_0^{-1/2}$). Апроксимоване значення радіаційної довжини у метрах визначається виразом:

$$X_0 = 7,16 \frac{A}{\gamma Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})}, \quad (2.2)$$

де γ – щільність [Г/см³]; A – атомна маса; Z – атомний номер.

У першому наближенні радіаційна довжина X_0 обернено пропорційна добутку γZ^2 .

Для запобігання остаточної деформації у структурі матеріалу та забезпечення його часової стабільності, необхідно використовувати у конструкціях матеріалу в області пружності. Вібраційні джерела можуть викликати деформації у мікронному діапазоні. Тому необхідно максимізувати жорсткість конструкції, яка представляє собою добуток модуля Юнга E на довжину L . Беручи до уваги мінімізацію розброду вимірних значень параметрів часток, добуток $(E \cdot L)$ можна записати, як $(E \cdot X_0)$. Ця величина, що залежить тільки від матеріалу і може бути використана для усіх конструкційних матеріалів детекторного модулю. Такий критерій передбачає вибір матеріалів

трекової системи з високим значенням ($E \cdot X_0$). Жорсткі структури не потребують у спеціальній стабілізації при зміні умов навколишньої середовища.

Фізичні параметри та розраховані значення жорсткості ($E \cdot X_0$) матеріалів трекової системи, що широко прикладаються також у авіації та космічному приладобудуванні, наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Фізичні параметри матеріалів трекової системи

№	Параметр	Матеріал							
		Вугле-графіт	Al	Mo	Ni	Cu	Kapton	Sn-Bi	Епоху
1	Z	6	13	42	28	29	-	50	-
2	A	12,011	26,98	95,95	59,69	63,51	-	118,7	-
3	$\gamma, \text{г/см}^3$	2,22	2,7	10,2	8,96	8,92	1,42	7,29	2,2
4	$\rho, \text{мкОм} \cdot \text{м}$	-	0,028	0,055	0,068	0,017	10^{16}	0,113	-
5	ТКЛР $\alpha_{2 \cdot 10^6}, \text{град}^{-1}$	0.4-2,0	21	5,1	13	16,6	20	23	23-40
6	E, ГПа	540	70	322	196	129	3	54	35
7	$X_0, \text{м}$	0,23	0,087	0,0098	0,0145	0,0145	0,284	0,0091	0,13
8	$E X_0, \text{ГПа} \cdot \text{м}$	124,2	6,09	3,15	2,84	1,87	0,85	0,49	0,455

З таблиці 2.1 видно, що алюміній має радіаційну довжину яка майже в 6 раз перевищує радіаційну довжину міді ($X_{0\text{Al}}=8,7 \text{ см}$, $X_{0\text{Cu}}= 1,43 \text{ см}$). Незважаючи на те, що алюміній порівняно з міддю має меншу механічну міцність ($\sigma_{\text{pAl}}= (10-40) \text{ кг} \cdot \text{с/мм}^2$, $\sigma_{\text{pCu}}=(16-45) \text{ кг} \cdot \text{с/мм}^2$), меншою теплопровідністю ($\lambda_{\text{T Al}}=268 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $\lambda_{\text{T Cu}}= 385 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$), питомим опором в 1,6раз більшим питомого опору міді ($\rho_{\text{Al}}=0,028 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$, $\rho_{\text{Cu}}= 0,028 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$), важливе значення має той факт, що алюміній майже в 3,5 рази легший ніж мідь ($\gamma_{\text{Al}}= 2,7 \text{ г/см}^3$ $\gamma_{\text{Cu}}=8,92 \text{ г/см}^3$). Завдяки малій щільності алюмінію

забезпечується велика електрична провідність на одиницю маси, тобто при однокововому номіналі опору алюмінієві провідники в два рази легше ніж мідні, не зважаючи на великий поперечний переріз. Таким чином, ГЗЕ на основі алюміній-поліімідних лакофольгових діелектриків дозволяють ще більше мінімізувати масу речовин в робочому об'ємі, що особливо перспективно для детекторних систем з високою щільністю інформації.

2.2. Моделювання впливу конструктивно-технологічних факторів ГЗЕ на шумові характеристики сенсорів

Аналоговий сигнал від кремнієвого сенсора передається на електроніку зчитування, що містить мікросхем n-XUTER багат шаровою гнучкою платою (ГП) довжиною до 50 см і з кроком розташування виводів 58 мкм. Використання довгих аналогових ГП дозволяє розмістити електроніку зчитування за межами активної області детектування, що дозволяє мінімізувати масу КТС та забезпечити необхідну радіаційну довжину, а також спростити систему охолодження електроніки зчитування. Однак, такий підхід представляє собою значну технічну проблему – погіршення шумових характеристик кремнієвих сенсорів.

Одним з найбільш важливих аспектів під час проектування та технічної реалізації довгих аналогових ГП є ємність між провідниками, яка має бути як можна меншою. Під час проектування ДМ необхідно забезпечити співвідношення сигнал/шум краще за 10 після опромінення ДМ. На рисунку 2.1 наведено очікуваний рівень шуму як функція сумарної ємності кремнієвого сенсора та аналогової ГП [2.1]. За умови, що іонізуюча частинка створює 22000 електронів, проходячи через кремнієвий сенсор товщиною 300 мкм, і для збереження відношення сигнал/шум більшим за 10 загальна ємність має бути нижчою за 33 пФ. Ємність кремнієвого сенсора з довжиною стрипів 6 см складе

близько 8,4 пФ. Це означає, що багатошарова аналогова ГП повинна мати ємність не більше за 24,6 пФ або 0,49 пФ/см.

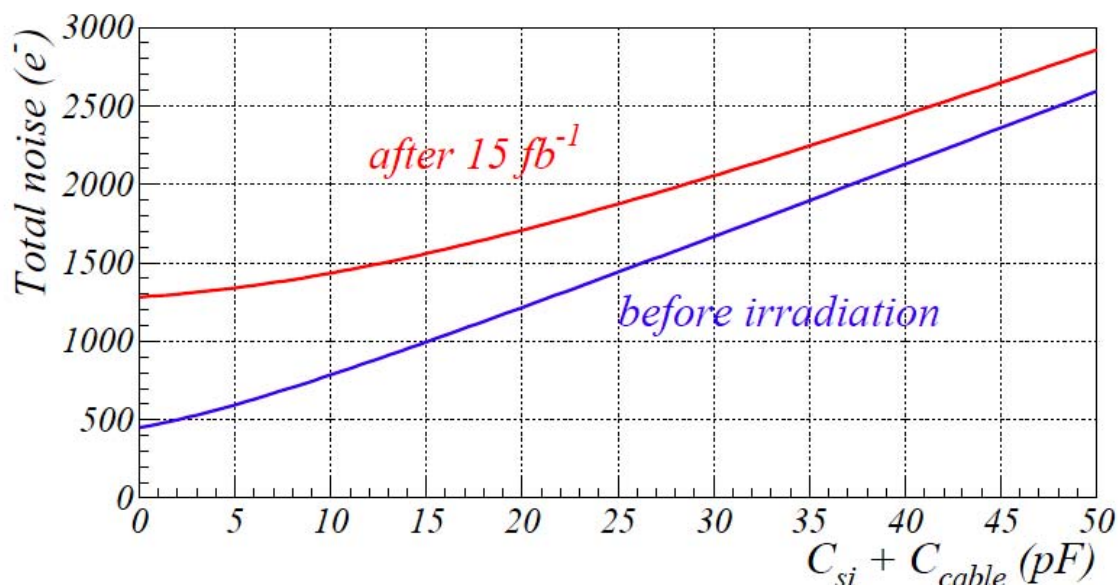


Рисунок 2.1 – Уровень шума как функция суммарной емкости кремниевого сенсора и аналоговой платы

Гнучка діелектрична підкладка ГП впливає на ємність. Поліімід з діелектричної проникністю 3,5 на частоті 1 МГц є радіаційностійким матеріалом. Це матеріал з гарними механічними і електричними властивостями. Хоча є матеріали, наприклад, поліетилен або поліпропілен, які використовуються при виготовленні ГП і забезпечують більш низьку діелектричну проникність, але вони не витримують жорсткі випромінювання рівня 10-15 Мрад, яким можуть бути опромінені складові КТС в експерименті СВМ. Отже, в якості діелектричної підкладки ГП слід обмежитися стандартним поліімідом.

У якості діелектричної прокладки між сигнальними шарами аналогової ГП запропановано використовувати сіткову поліімідну прокладку (ефективна діелектрична проникність полііміда знижується шляхом видалення матеріалу з прокладки).

Під час передачі малопотужних сигналів між сенсорами та електронікою зчитування найбільш універсальною конструкцією ліній передач є копланарно

пов'язані смужкові лінії зв'язку, які являють собою систему плівкових провідників, розташованих із зазором на одній із сторін діелектричної підкладки, і є відкритими лініями передачі. Структура аналогових ГП з провідниками кінцевої ширини представлена на рисунку 2.2. На рисунку 2.2 ϵ_1 – діелектрична проникність повітря або ізолюючої прокладки; ϵ_2 – діелектрична проникність підкладки.

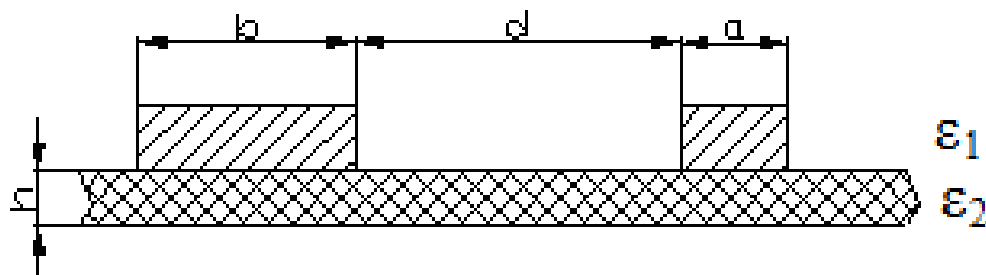


Рисунок 2.2 – Переріз ліній зв'язку

Методика розрахунку електричної ємності лінії зв'язку для моделі, представленої на рисунку 2.2, з використанням методу конформних перетворень, зводиться до наступних кроків [2.2-2.5]:

- розрахунок модулів k та k_1 , що визначаються геометричними розмірами розрахункового перерізу, а також додаткових модулів k' та k'_1 повних еліптичних інтегралів першого роду K та K' :

$$k = \sqrt{m'}, \quad k_1 = \sqrt{m_1}, \quad m = \frac{a}{a+d}, \quad m_1 = \frac{(t_1 - t_2)(t_3 - t_2)}{(t_1 + t_2)(t_3 + t_2)}, \quad (2.3)$$

$$t_i = \frac{\exp \lambda_i - 1}{\exp \lambda_i + 1}, \quad i = 1, 2, 3, \quad \lambda_1 = \frac{\pi(2b+d)}{2h}, \quad \lambda_2 = \frac{\pi d}{2h}, \quad \lambda_3 = \frac{\pi(2a+d)}{2h}, \quad (2.4)$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2}, \quad k'_1 = \sqrt{1 - k_1^2}; \quad (2.5)$$

- визначення модулярних кутів α і α_1 , а також додаткових модулярних кутів α' і α'_1 :

$$\alpha = \arcsin(k), \alpha_1 = \arcsin(k_1), \alpha' = \arcsin(k'), \alpha'_1 = \arcsin(k'_1); \quad (2.6)$$

- визначення еліптичних інтегралів першого роду K, K_1, K' і K'_1 як функції відповідного модулярного та додаткового модулярного кутів за таблицями повних еліптичних інтегралів першого роду;

- розрахунок ємнісного коефіцієнту C_1 і визначення ефективної діелектричної постійної $\varepsilon_{\text{ефф}}$:

$$C_1 = 2 \frac{K}{K'}, \varepsilon_{\text{ефф}} = \varepsilon_1 + \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) K_1 K'}{2 K'_1 K}; \quad (2.7)$$

- визначення значення погонної ємності $C_{\text{пог}}$:

$$C_{\text{пог}} = 8,85 \cdot \varepsilon_{\text{ефф}} \cdot C_1 \left(\frac{\text{пФ}}{\text{м}} \right). \quad (2.8)$$

Для оцінки ємності ліній зв'язку аналогової ГП використані наступні конструктивні вихідні дані:

- провідники сигнального шару представляють собою алюміній товщиною 14 мкм (ФДИ-А-24) і мають ширину (36 - 44) мкм;
- крок провідників сигнального шару – 116 мкм;
- в якості діелектрика сигнального шару використовується поліімід товщиною 10 мкм (ФДИ-А-24) з діелектричної проникністю $\varepsilon_2 = 3,5$;
- в якості діелектрика ізолюючої прокладки використовується поліімід (сіткова прокладка) товщиною 50 мкм (ПМА) з діелектричної проникністю $\varepsilon_1 = 2 \dots 3,5$.

З використанням описаної вище методики розрахунку, оцінені ємнісні параметри аналогової ГП як без урахування ізолюючої прокладки (рисунок 2.3), так і з її урахуванням (рисунок 2.4).



Рисунок 2.3 – Емність ліній зв'язку аналогової ГП без урахування ізолюючої прокладки

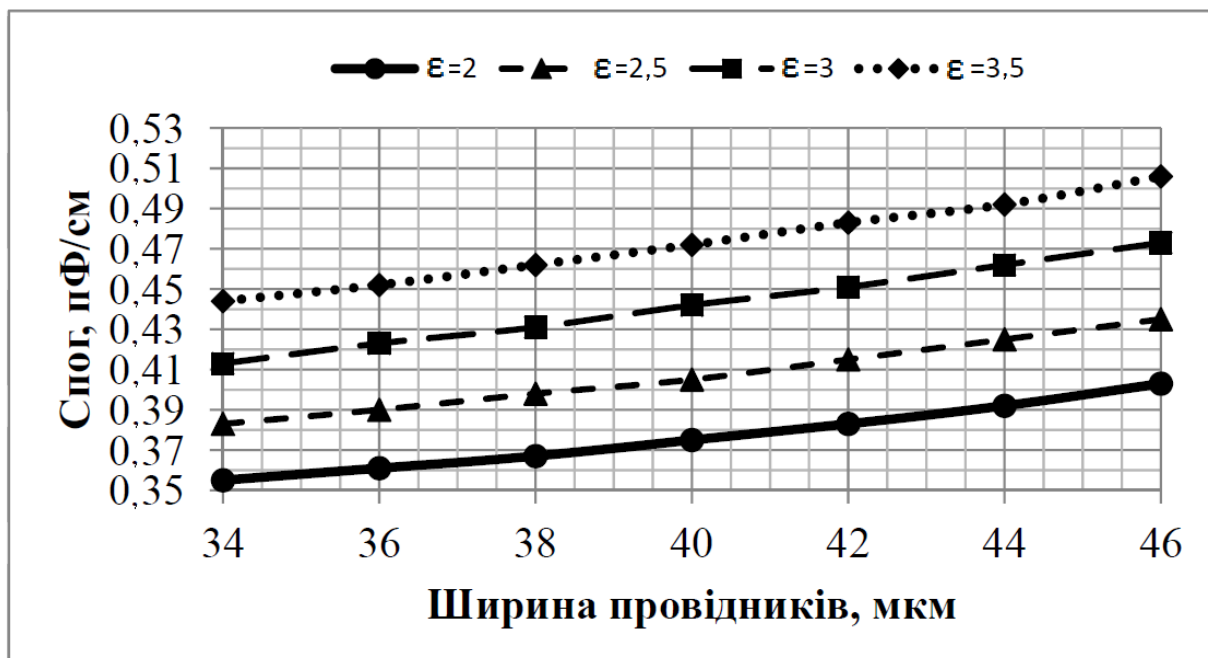


Рисунок 2.4 – Емність ліній зв'язку аналогової ГП з урахуванням ізолюючої прокладки

З рисунка 2.4 видно, що ємність ліній зв'язку аналогової ГП з урахуванням суцільної ізолюючої прокладки ($\epsilon_1 = 3,5$) становить $\sim (0,46 \div 0,5)$ пФ/см. У разі використання перфорованої ізолюючої прокладки ($\epsilon_1 = 2$) ємність ліній зв'язку може бути зменшена до значення $\sim (0,36 \div 0,39)$ пФ/см.

Отримані значення відношення сигнал/шум (див. рисунок 2.1) для ДМ з різними довжинами аналогових ГП з перфорованими прокладками наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Значення відношення сигнал/шум для ДМ з різними довжинами аналогових ГП

Довжина аналогової ГП, см	10	20	30	40	50
Ємність аналогової ГП, пФ	3,9	7,8	11,7	15,6	19,5
Сумарна ємність сенсора та аналогової ГП, пФ	12,3	16,2	20,1	24	27,9
Рівень шуму, e^-	1450	1650	1750	1850	2000
Відношення сигнал/шум	15,2	13,3	12,6	11,9	11

За результатами, наведеними в таблиці 2.2, можна зробити висновок, що основна мета розробки аналогових ГП – забезпечення відношення сигнал/шум вищого за 10 – може бути досягнута.

За результатами моделювання удосконалено гнучкий багатошаровий з'єднувальний шлейф (аналогову ГП), в якому сигнальні шари виконані з безадгезивних алюміній-поліімідних фольгових діелектриків, що дозволило на відміну від вже існуючих аналогів зменшити об'ємно-масові характеристики та товщину шлейфа в три рази, зменшити радіаційну довжину більш ніж у три рази, зменшити сумарну погонну ємність шлейфу на 15% (патент України на корисну модель № 104141 "Гнучкий багатошаровий з'єднувальний шлейф", дата реєстрації 12.01.2016 р.) [2.6].

2.3. Розрахунок товщини ДМ

Одним із завдань при проектуванні ДМ РВ є створення конструктивів з великою радіаційною довжиною, щоб ефекти багатократного розсіювання не приводили до спотворення треків. Для цих цілей в конструкції ДМ РВ передбачається використовувати матеріали з низькою щільністю.

Багаторазовий розкид значень обумовлений електромагнітною взаємодією з електронами і ядрами при проходженні середовища. Втрати енергії малі, проте значне розсіювання є джерелом значних помилок у визначенні траєкторії частинок. Підсумковий кут θ_p розсіювання визначається (2.1). Як показано в (2.2), у першому наближенні радіаційна довжина X_0 обернено пропорційна добутку γZ^2 .

Результати оцінки товщини конструкції ДМ РВ для експерименту СВМ в радіаційних довжинах наведені у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Оцінки товщини конструкції ДМ РВ

Об'єкт	Матеріал	Радіаційна довжина X_0 , см	Товщина X , мкм	X/X_0 , %
Сенсор	Кремній	9,77	280	0,287
Багатошарова аналогова ГП – N-сторона				
Перфорована прокладка	Поліімід	28,4	100	0,035
Аналогова ГП – верхній шар	Алюміній	8,7	14	0,016
	Поліімід	28,4	10	0,004
Перфорована прокладка	Поліімід	28,4	50	0,018
Аналогова ГП – нижній шар	Алюміній	8,7	14	0,016
	Поліімід	28,4	10	0,004
Перфорована прокладка	Поліімід	28,4	100	0,035
Екран	Алюміній	8,7	14	0,016
	Поліімід	28,4	10	0,004
Загалом для N-сторони			322	0,148

продовження табл. 2.3

Об'єкт	Матеріал	Радіаційна довжина X_0 , см	Товщина X , мкм	X/X_0 , %
Багатошарова аналогова ГП – Р-сторона				
Перфорована прокладка	Поліілід	28,4	100	0,035
Аналогова ГП – нижній шар	Поліілід	28,4	10	0,004
	Алюміній	8,7	14	0,016
Перфорована прокладка	Поліілід	28,4	50	0,018
Аналогова ГП – верхній шар	Поліілід	28,4	10	0,004
	Алюміній	8,7	14	0,016
Перфорована прокладка	Каптон	28,4	100	0,035
Екран	Поліілід	28,4	14	0,016
	Алюміній	8,7	10	0,004
Загалом для Р-сторони			322	0,148

З таблиці 2.3 видно, що в результаті вибору матеріалу шарів з більшими радіаційними довжинами виконується вимога до товщини матеріалу чутливого шару ДМ $X/X_0 \leq 1\%$ (максимальна товщина модуля становить $X/X_0 \approx 0,3\%$). При цьому товщина пакету ГЗЕ, які обслуговують один модуль, становить ≈ 650 мкм.

Розглянемо товщини секторів ледера, при установці декількох ДМ. Як відомо, максимальна кількість модулів, що встановлюються з однієї сторони ледера, становить 5 од. Схематично така конструкція представлена на рисунку 2.5.

Максимальна товщина пакету ГЗЕ, які виходять на електроніку обробки, що розташована на периферії ледеру, становить 3,5 мм. Обмеження по зазору, в який повинен проходити пакет ГЗЕ визначене як 3,6 мм. Отже, при створенні ДМ РВ для складання повного ледера КТС СВМ розроблена конструкція ГЗЕ може вважатися оптимальною.

Сектор 1	Сектор 2	Сектор 3	Сектор 4	Сектор 5	
X=280мм X/X0=0,29%	X=280мм X/X0=0,29%	X=280мм X/X0=0,29%	X=280мм X/X0=0,29%	X=280мм X/X0=0,29%	Сенсор
	X=700мм X/X0=0,3%	X=700x2=1400мм X/X0=0,3x2=0,6%	X=700x3=2100мм X/X0=0,3x3=0,9%	X=700x4=2800мм X/X0=0,3x4=1,2%	ГЗЕ
X=280мм X/X0=0,29%	X=980мм X/X0=0,59%	X=1680мм X/X0=0,89%	X=2380мм X/X0=1,19%	X=3080мм X/X0=1,49%	Всього

Рисунок 2.5 – Схема установки ДМ на ледер та товщини секторів, які формуються ДМ

2.4 Оцінка теплового режиму ГМ на піровуглецевій основі

Підвищений рівень температури гібридних ГМ ДМ є основним чинником, що збільшує імовірність виникнення відмов. Залежність інтенсивності відмов від температури T найчастіше виражають у вигляді, $\Lambda(T) = \Lambda(T_c)A^{(T-T_c)/10}$, де $\Lambda(T_c)$ – інтенсивність відмов при температурі середовища; A – множник, що показує, у скільки разів збільшується інтенсивність відмов при збільшенні температури на кожні 10 К. Зростання щільності упаковки складних систем і швидкодії компонентів зажадала від розробників вирішення задачі керування тепловідведенням.

Завдання полягало в дослідженні різних конструкцій ГМ, моделюванні температурних полів типових конструкцій з метою їх оптимізації по критеріях максимального направлено тепловідведення при мінімумі маси в робочому об'ємі ВТС.

Практичний інтерес представляє дослідження температурного поля вказаних ГМ з урахуванням теплофізичних властивостей матеріалу, що раніше не використовувався як підкладка, при різному розташуванні напівпровідникових мікросхем, а також вивчення впливу товщини жорсткої основи на величину перегріву кристалів [2.7, 2.8]. Як жорстка основа ГМ вибраний вуглепластик, що має значну анізотропію теплофізичних

властивостей ($\lambda_y \gg \lambda_x$, для різних вуглепластиків вздовж волокон $\lambda_y=180$ Вт/(м·К) та 450 Вт/(м·К), впоперек волокон $\lambda_x=40$ Вт/(м·К)), що дозволяє здійснити ефективне тепловідведення за допомогою системи рідинного охолодження. Потрібно зазначити, що даний матеріал характеризується досить високою жорсткістю: модуль пружності $E=500$ ГПа, радіаційна довжина $X_0=23$ см, щільність $\gamma=1,9$ г/см³, отже $E \cdot X_0=105$ ГПа·м, $E/\gamma=263$ МПа·м³/кг.

На рисунку 2.6 приведена схема конструкції ГМ, що розглядається

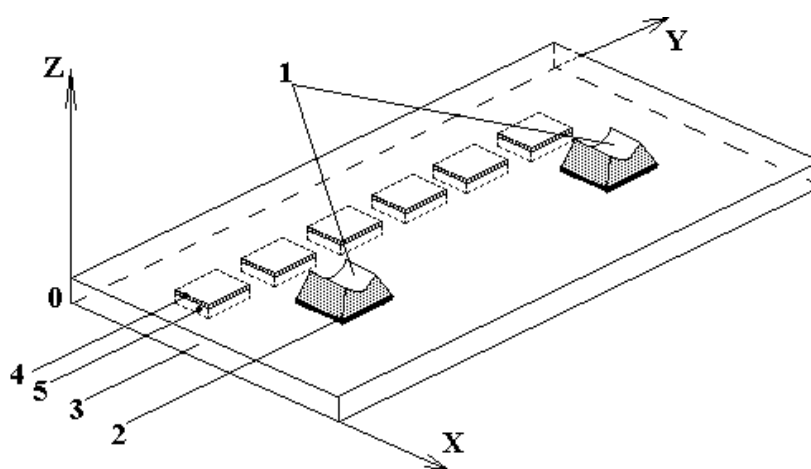


Рисунок 2.6 – Схематичне зображення конструкції ГМ

До теплопровідних елементів 1 системи рідинного охолодження за допомогою клею 2 кріпиться підкладка 3. На зворотній стороні підкладки за допомогою клею 4 встановлені кристали мікросхем 5.

При істотній анізотропії теплопровідності матеріалу підкладки на основі препрегів Thornel (C.F. Thornel K1100X pre sheet 1645-00-1041) доцільно провести суворий опис теплового режиму з урахуванням:

- перенесення теплоти по підкладці з реальною конфігурацією основних елементів;
- неоднорідних умов теплообміну підкладки із середовищем;
- локального відведення тепла по спеціальних виводах рідинного охолодження.

При аналізі теплового режиму мікросхем, що встановлені на загальну основу, температурне поле основи описують за допомогою моделі пластини з локальними джерелами теплоти і теплообміном на бічній поверхні [2.9-2.12]. Двовимірний розподіл перегріву в пластині знаходять шляхом рішення рівняння:

$$\lambda_x \frac{d^2 \vartheta}{dx^2} + \lambda_y \frac{d^2 \vartheta}{dy^2} + \frac{q(x, y)}{\delta} - \frac{\alpha}{\delta} \cdot \vartheta = 0, \quad 0 < x < l_x, \quad 0 < y < l_y, \quad (2.9)$$

де l_x, l_y – розміри пластини (рисунок 2.6); δ – товщина пластини; λ_x, λ_y – ефективна теплопровідність в напрямку осей x та y ; α – сума коефіцієнтів тепловіддачі з обох сторін бічної поверхні ($\alpha = \text{const}$); $q(x, y)$ – поверхнева щільність теплового потоку від локальних джерел, рівна нулю поза зонами розташування джерел і постійна в межах зони дії кожного j -го джерела:

$$q(x, y) = \sum_{j=1}^J q_j(x, y),$$

$$q_j(x, y) = \begin{cases} P_j / (\Delta x_j \cdot y_j) & \text{при } x_{j1} < x < x_{j2}, \quad y_{j1} < y < y_{j2}, \\ 0, & \text{поза джерелом.} \end{cases} \quad (2.10)$$

де P_j – тепловий потік, що розсівається з поверхні в середу.

У багатьох практично важливих випадках тепловіддачею з торців можна нехтувати в порівнянні з тепловіддачею на бічній поверхні, і тоді граничні умови мають вигляд:

$$\left. \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right|_{x=l_x} = \left. \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right|_{y=l_y} = 0. \quad (2.11)$$

Застосувавши до рівняння (2.9) кінцеві інтегральні перетворення по змінним x і y , отримаємо рівняння для зображення функції джерела $q(x, y)$.

Визначивши власні функції і власні числа і виконавши зворотний перехід в область зображень, отримаємо вираз для шуканого розподілу перегрівів.

При граничних умовах (1.11) зображення для одного j -го джерела має вигляд [2.12]:

$$\vartheta_{n,m} = \frac{4P_j}{\Delta x_j \Delta y_j \mu_n \beta_m} \cdot \cos(\mu_n x_{j0}) \cdot \cos(\beta_m y_{j0}) \cdot \sin(\mu_n \Delta x_j / 2) \cdot \sin(\beta_m \Delta y_j / 2) \quad (2.12)$$

і тоді перегрів можна визначити по формулі:

$$\begin{aligned} \vartheta(x, y) = & \frac{P_j}{\alpha l_x l_y} + \frac{4P_j}{l_x l_y \Delta y_j} \cdot \sum_{m=2}^{\infty} \frac{\cos(\beta_m y_{j0}) \cdot \sin(\beta_m \Delta y_j / 2)}{\beta_m (\alpha + \lambda_y \beta_m^2 \delta)} \cos(\beta_m y) + \\ & + \frac{4P_j}{l_x l_y \Delta x_j} \cdot \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\cos(\mu_n x_{j0}) \cdot \sin(\mu_n \Delta x_j / 2)}{\mu_n (\alpha + \lambda_x \mu_n^2 \delta)} \cos(\mu_n x) + \\ & + \frac{16P_j}{l_x l_y \Delta x_j \Delta y_j} \cdot \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=2}^{\infty} \frac{\sin(\mu_n \Delta x_j / 2) \cdot \sin(\beta_m \Delta y_j / 2)}{\mu_n \beta_m (\alpha + \lambda_x \mu_n^2 \delta + \lambda_y \beta_m^2 \delta)} \times \\ & \times \cos(\mu_n x_{j0}) \cos(\beta_m y_{j0}) \cos(\mu_n x) \cos(\beta_m y), \end{aligned} \quad (2.13)$$

де $\mu_n = (n-1) \cdot \pi / l_x$; $\beta_m = (m-1) \cdot \pi / l_y$; індекси m і n – величини, що визначають власні числа і власні функції характеристичного рівняння; x_j і y_j – координати меж джерела; $\Delta x_j = x_{j2} - x_{j1}$; $\Delta y_j = y_{j2} - y_{j1}$.

Розрахунки перегрівів для різних варіантів розташування мікросхем проведено з використанням пакету програм MathCAD при наступних даних:

- розмір вуглепластикової основи 73,1×6,5 мм;
- потужність, що виділяється кожною мікросхемою, рівна 0,4 Вт;
- розміри мікросхем $l_x \times l_y = 3,85 \times 11,1$ мм;
- розміри охолоджуючих блоків 3×4 мм;
- коефіцієнт теплообміну α прийнятий рівним $\alpha=2$ з боку мікросхем і $\alpha=10$ з боку охолоджуючих блоків;

– на основі встановлено 6 мікросхем, що визначають результуючу потужність хладагенту $\sim 2,4$ Вт.

Результати розрахунків наведено в таблицях 2.4 - 2.7. У таблиці 2.4 і таблиці 2.5 наведені залежності температури перегріву під мікросхемами від розташування джерела тепла на підкладці, від товщини підкладки і від анізотропії теплофізичних властивостей вуглепластикової основи. Дані в таблиці 2.4 отримані при максимальній теплопровідності вздовж довгої сторони підкладки ($\lambda_x=40$ Вт/(м·К), $\lambda_y=450$ Вт/(м·К)), дані в таблиці 2.5 – при максимальному тепловідведенні вздовж короткої сторони ($\lambda_x=450$ Вт/(м·К), $\lambda_y=40$ Вт/(м·К)).

Таблиця 2.4 – Температура перегріву під мікросхемами (при максимальній теплопровідності вздовж довгої сторони підкладки)

№	Товщина підложки, мм	Температура перегріву під мікросхемами (D1-D6)					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	0,1	9	16	31	31	16	9
2	0,17	5	10	19	19	10	5
3	0,3	3	6	11	11	6	3
4	0,5	2	4	7	7	4	2

Таблиця 2.5 – Температура перегріву під мікросхемами (при максимальній теплопровідності вздовж короткої сторони підкладки)

№	Товщина підложки, мм	Температура перегріву під мікросхемами (D1-D6)					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	0,1	49	91	195	195	91	49
2	0,17	35	67	142	142	67	35
3	0,3	18	41	91	91	41	18
4	0,5	10	26	58	58	26	10

У таблицях 2.6 та 2.7 наведена аналогічна залежність температур перегрівів для вуглепластикових основ з теплофізичними властивостями підкладок, запропонованими розробниками [3]. У таблиці 2.6 дані отримані для випадку $\lambda_x=35$ Вт/(м·К) та $\lambda_y=180$ Вт/(м·К), в таблиці 2.7 – для випадку $\lambda_x=180$ Вт/(м·К) и $\lambda_y=35$ Вт/(м·К).

Таблиця 2.6 – Температура перегріву під мікросхемами (при максимальній теплопровідності вздовж довгої сторони підкладки)

№	Товщина підложки, мм	Температура перегріву під мікросхемами (D1-D6)					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	0,1	17	33	67	67	33	17
2	0,17	10	20	42	42	20	10
3	0,3	6	13	25	25	13	6
4	0,5	4	8	15	15	8	4

Таблиця 2.7 – Температура перегріву під мікросхемами (при максимальній теплопровідності вздовж короткої сторони підкладки)

№	Товщина підложки, мм	Температура перегріву під мікросхемами (D1-D6)					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	0,1	54	98	210	210	98	54
2	0,17	36	71	154	154	71	36
3	0,3	22	47	102	102	47	22
4	0,5	12	30	66	66	30	12

На основі аналізу отриманих результатів можна сформулювати наступні закономірності:

– для одного і того ж розташування джерела тепла (мікросхеми) на підкладці температура перегріву ГМ значно нижче при умові максимальної теплопровідності вздовж довгої сторони підкладки ($\lambda_y > \lambda_x$);

– при ($\lambda_y > \lambda_x$) температура перегріву під мікросхемою для підкладки однієї і тієї ж товщини (наприклад, 0,17 мм) знижується в порівнянні з випадком $\lambda_y < \lambda_x$ в 6,7÷7,5 раз при $\lambda_y = 450$ Вт/(м·К) і в 3,5÷3,7 рази при $\lambda_y = 180$ Вт/(м·К);

– для одного і того ж розташування мікросхем збільшення товщини вуглепластикової основи від 0,1 мм до 0,5 мм призводить до зниження температури перегріву в ~4-4,5 разів.

На рисунку 2.7 наведена графічна залежність розподілу температури на поверхні вуглеграфітової основи товщиною 0,3 мм з встановленими на ньому мікросхемами і елементами тепловідведення.

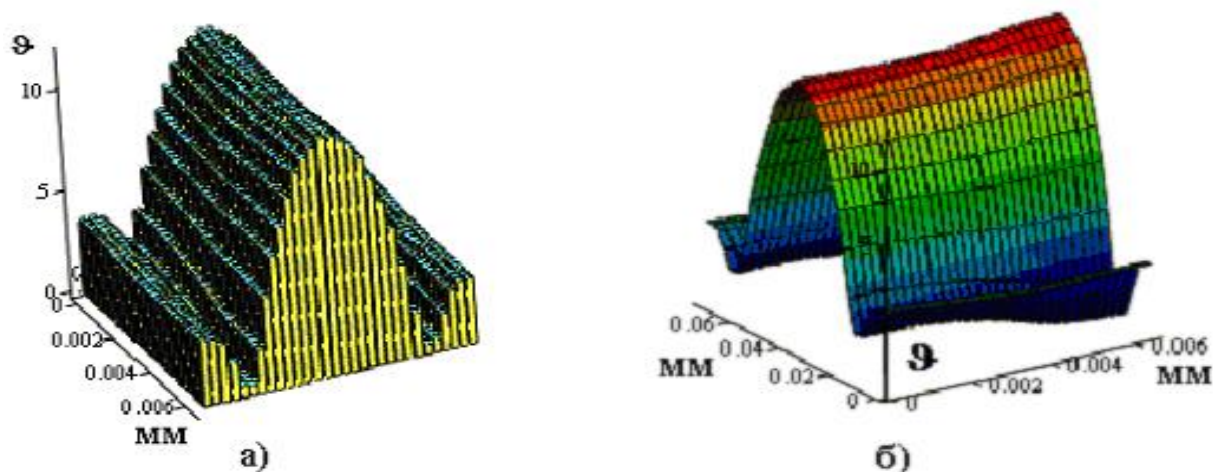


Рисунок 2.7 – Розподіл температури на поверхні піровуглецевої основи з встановленими мікросхемами та елементами тепловідведення: а) з боку розташування багатошарової гнучкої плати; б) з боку розташування мікросхем

Потрібно звернути увагу на істотну несиметричність температурного поля по довжині плати з явно вираженими мінімумами в області розташування елементів системи рідинного охолодження і максимумом перегріву між ними.

Таким чином, проведене моделювання розподілу теплових полів при максимальних значеннях потужностей тепловиділяючих елементів в типовій конструкції ГМ ДМ дозволило проаналізувати залежність величини перегрівів під мікросхемами від місця розташування теплового джерела, характеристик

теплообмінної системи, анізотропії теплофізичних властивостей і товщини жорсткої вуглепластикової основи.

З проведених досліджень видно, що для максимального тепловідведення доцільно використати вуглепластикові основи товщиною 0,3 мм і розташовувати мікросхеми вздовж довгої сторони основи з максимальним значенням теплопровідності ($\lambda_y=450$ Вт/(м·К)). При цьому температура перегріву поверхні ГМ при використанні рідинної системи охолодження не перевищує 11 градусів.

Використання фізико-математичного моделювання режимів роботи ГМ з урахуванням розбігу параметрів її елементів і моделювання можливих дефектів дозволяє проводити теплову діагностику якості об'єкта [2.14, 2.15], тобто ідентифікацію несправності об'єкта по тепловій картині, що є необхідною умовою забезпечення надійності ДМ в процесі експлуатації.

2.5 Висновки за розділом

На підставі результатів досліджень, викладених у даному розділі, можна зробити наступні висновки:

1. Уточнено математичну модель для дослідження впливу конструктивно-технологічних факторів на ємність ліній передач. Обґрунтовано доцільність використання в конструкції гнучких шлейфів сигнальних провідників з шириною 35-40 мкм та кроком провідників 50-60 мкм. Показано, що погонна ємність розглянутих шлейфів складає 0,35 пФ/см. Удосконалено гнучкий багатошаровий з'єднувальний шлейф, в якому сигнальні шари виконані з безадгезивних алюміній-поліімідних фольгових діелектриків, що дозволило на відміну від вже існуючих аналогів зменшити об'ємно-масові характеристики та товщину шлейфа в три рази, зменшити радіаційну довжину більш ніж у три рази, зменшити сумарну погонну ємність шлейфу на 15 %.

2. Досліджено конструкцію ГМ на високотеплопровідній вуглепластиковій основі з мікросхемами, які встановлені з використанням багатошарових ГЗЕ. Досліджено вплив параметрів і властивостей вуглепластикових підкладок з анізотропною теплопровідністю на тепловий режим ГМ. Показано, що максимальне тепловідведення забезпечується за товщини вуглепластикової основи не менше 300 мкм і розташування мікросхем уздовж довгої сторони підкладки з максимальним значенням теплопровідності $\lambda_y = 450 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Встановлено, що температура перегріву поверхні ГМ за умови використання системи рідинного охолодження не перевищує 11 градусів.

РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТП ФОРМУВАННЯ СЛОІВ ГЗЕ

3.1 Аналіз технологічних особливостей виготовлення ГЗЕ на основі безадгезивних лакофольгових діелектриків з алюмінієвим провідниковим шаром

Виготовлення ГЗЕ (гнучких носіїв, шлейфів та мікрокабелів) з безадгезивних лакофольгових діелектриків можливе двома методами [1.48]. При великих об'ємах випуску та порівняно малій кількості виводів (до 64), а також при розмірах до 200-250 мм перевагу мають високопродуктивні методи рулонної обробки, наприклад, з використанням лінії "Ладога" [3.1]. У разі малих об'ємів, а також при виготовленні складних виробів, що мають сотні виводів та розміри, що перевищують 200-250 мм, більш переважним стає так званий "планшетний" варіант технології. Це зумовлено тим, що при багаторазових перемотках стрічки діелектрика внаслідок її тертя опорними валками на захисному фоторезистивному шарі з'являються мікроподряпини, які на операціях травлення перетворюються на проколи в елементах конструкції виробів та навіть в розриви провідників. У свою чергу це, у випадку виготовлення складних багатовиводних виробів, приводить до різкого зменшення їх виходу придатних.

При ширині провідників 80 мкм і більше та при їх кроці більше 180 мкм "планшетний" варіант може бути легко реалізований шляхом використання спеціально розробленого багатокomпонентного травника алюмінію з кімнатною робочою температурою [3.2]. У іншому випадку потрібні травники алюмінію з більш високою роздільною здатністю. Зменшення ширини виводів ГЗЕ до декількох десятків мікрон та їх кроку до 50 і менше мікрон при одночасному збільшенні числа виводів до декількох сотень, крім вищевказаного, зумовлює необхідність суттєвого перегляду технології їх виготовлення.

Технологічний процес виготовлення елементів комутації на основі безадгезивних лакофольгових діелектриків типу алюміній-поліімід по "планшетному" варіанту методом двосторонньої фотолітографії та хімічного рідинного травлення включає такі основні операції:

- хімічна обробка матеріалу;
- двостороннє нанесення фоторезисту;
- двостороннє експонування;
- проявлення захисного рельєфу;
- травлення алюмінію;
- захист алюмінієвого шару;
- травлення полііміду;
- зняття фоторезисту;
- фінішна обробка;
- контроль якості та геометричних розмірів ГЗЕ.

Необхідність хімічної обробки зумовлена тим, що вихідний матеріал має залишкові механічні та жирові забруднення та певну неоднорідність поверхні, які знижують ефективність процесу фотолітографії та хімічного травлення та точність виготовлення елементів виробів. Достатньо ефективна обробка фольги запропонована в роботі [3.3]. Для цього заготовки рекомендовано обробляти в 5%-му розчині карбонату натрію ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) при температурі 60°C . Така обробка практично виключає підтравлювання діелектрика та покращує умови праці, так як содовий розчин у порівнянні з іншими є найменш шкідливим. Крім того, він легко відмивається водою. Після такої обробки поверхні алюмінію та полііміду стають гідрофільними, що є важливим для їхнього доброго змочування фоторезистом. Слід відмітити, що після обробки в содовому розчині на протязі 1,5-2 хвилин товщина діелектрика практично не змінюється (може зменшитись на долі мікрона), при цьому зберігаються його зовнішній вигляд та лінії прокату. Важливим є також повне видалення вологи з

діелектрика. Для цього проводять його термічну обробку при температурах 100 та 150°C.

В технологічному процесі виготовлення ГЗЕ застосовуються гарячі як лужні, так і кислі розчини. Захисна фоторезистивна плівка повинна бути стійкою до дії цих розчинів, а вихідний фоторезист повинен мати достатню роздільну здатність. Важливо також щоб захисний рельєф був еластичним і витримував багатократні перегини. Усім цим вимогам відповідає негативний фоторезист ФН-11С на основі циклокаучука з бісазідом у якості сенсibiliзуючої добавки та ксилолом у якості розчинника. Циклокаучуки у порівнянні з вихідними каучуками відрізняються значно меншою схильністю до набухання при проявленні та підвищеною адгезією до підкладок.

Для нанесення фоторезисту на гнучкі підкладки використовується метод занурення з їх вертикальним витягуванням зі світлочутливого розчину. Цей метод відрізняється простотою та високою продуктивністю. При цьому товщина шару фоторезисту, що наноситься, залежить від швидкості витягування та фізичних параметрів фоторезисту, таких як в'язкість та поверхневий натяг [3.4].

Для експонування можуть бути використані стандартні установки двостороннього експонування, що мають освітленість більше 20000 люкс. При цьому застосовують плівкові фотошаблони і спеціальну вакуумну раму, що виготовлена з використанням прозорих плівок з тисненням поверхні. При відкачці повітря з рами між двома плівками з тисненою поверхнею утворюються мікроканали, що забезпечують більш повне видалення повітря і, отже, більш якісний притиск фотошаблону до гнучкої підкладки зі світлочутливим шаром. Таким чином виключається утворення повітряних бульбашок, котрі подібно лінзам можуть спотворювати малюнок захисного рельєфу, що формується при експонуванні. Важливо відмітити необхідність постійного контролю освітленості і глибини вакууму у рамі, наприклад, за допомогою вакуумметра.

Під впливом ультрафіолетового опромінення фотоліз органічних азидів (у даному випадку 2,6-біс-(4-азидобензаль)-4-метилциклогексанон) проходить дісоціативно зі втратою молекул азоту і утворенням дінітренив. Нітрени є сильними електрофілами: вони приєднуються по кратним зв'язкам $C=C$, $C\equiv C$, ароматичним зв'язкам, впроваджуються в прості зв'язки $C-H$, $N-H$, $O-H$ та димеризуються [3.5]. В результаті реакції нітренив з молекулами циклокаучуку утворюється тримірна решітка, яка стає нерозчинною в органічних розчинниках. Цю властивість негативних фоторезистів і використовують при проявленні захисного рельєфу. Проявляють його, зважаючи на малу ширину провідників і зазорів між ними, послідовно у трьох порціях уайт-спіриту з наступною промивкою у бутилацетаті та сушкою у потоці теплого повітря. Термічне дублення отриманого захисного рельєфу проводять у два прийоми при температурі $100\pm 10^\circ C$ та $150\pm 10^\circ C$ з витримкою по годині при кожній температурі.

Травлення алюмінію є достатньо відпрацьованою технологічною операцією та відомо дуже багато розчинів як кислих, так і лужних. В мікроелектроніці при локальному травленні алюмінію найбільш часто використовується система травлення на основі ортофосфорної, азотної та оцтової кислот у різних співвідношеннях. Її перевагою є висока роздільна здатність, достатня при виготовленні міжз'єднань на напівпровідникових кристалах. Це пов'язане з тим, що така система має поліруючі властивості, за рахунок чого і досягається висока роздільна здатність при травленні металу. Тому ця система може бути взята за основу при травленні елементів з алюмінієвої фольги при малих ширинах та кроках виводів.

Особливістю виготовлення таких складних багатовиводних ГЗЕ з лакофольгових діелектриків є сумірність товщини фольги і ширини провідників з розмірами зерен цієї фольги та наявність мікрodefektів, що позначається на ефективності технологічного процесу та якості виробів. Тому дуже важливим при проведенні технологічного процесу стає 100% контроль підкладок після

проведення усіх технологічних операцій, особливо таких визначальних як травлення алюмінію.

Гарні результати при виготовленні складних багатовивідних ГЗЕ отримані при застосуванні травника, що складається з ортофосфорної та оцтової кислот з добавкою поверхнево-активної речовини.

Захист алюмінієвого шару після травлення може бути виконаний як концентрованим фоторезистом ФН-11СК, так і звичайним ФН-11С після підвищення його в'язкості до $14 \text{ мм}^2/\text{с}$ і більше. Фоторезист при цьому наноситься пензлем, після чого висушується на повітрі і в сушильній шафі при температурі $100 \pm 10^\circ\text{C}$.

Усі відомі травники полііміду ґрунтуються на реакції гідролізу імідних зв'язків. Для цього використовують луги, органічні аміни, гідразин або їх суміші. Усі ці речовини є сполуками з лужною реакцією. Вони активно взаємодіють з електронодефіцитними карбонільними атомами вуглецю.

Гарні результати при виготовленні складних багатовивідних ГЗЕ отримані при локальному травленні поліімідної плівки товщиною 10 - 20 мкм при застосуванні травника, що складається з моноетаноламіну, водного розчину гідрату окису калію та добавки триетаноламіну. Оскільки алюміній є амфотерним металом, то відкриті його ділянки також будуть травитись в цьому розчині. Підтравлюванню алюмінію провідників має перешкоджати попередньо нанесений фоторезистивний захисний шар. Проте, після того, як в поліімідній плівці витравляться вікна згідно топологічному малюнку виробу, почнеться процес підтравлювання розкритої алюмінієвої поверхні, який помітний візуально у вигляді так званого "спалаху". Після його візуальної фіксації підкладки витримують в розчині для травлення не більше 3-5 с в залежності від товщини поліімідної плівки, що травиться, оскільки підтрав поверхні металу може привести до неприпустимого зменшення товщини і навіть ширини алюмінієвих виводів і, в кінцевому підсумку, до браку виробів.

При виборі методу зняття фоторезисту потрібно виходити з його хімічної будови, розчинності в певних розчинниках, характеру фотохімічних або термічних процесів та стійкості матеріалів підкладки до певних розчинів та режимів обробки. Процес зняття фоторезисту з поверхні елементів ГЗЕ, що виготовляються з лакофольгових діелектриків, накладає ряд обмежень: механічний вплив має бути, по можливості, повністю виключений, так як при цьому тонкі і гнучкі елементи виробів можуть бути деформованими і навіть пошкодженими; застосування ультразвукових коливань також неприпустиме, так як це приводить до послаблення адгезії між шарами алюмінію та полііміду.

Гарні результати при виготовленні складних багатовивідних ГЗЕ отримані при знятті фоторезисту в спеціально розробленому для цього так званому "змиваючому" розчині "форсан-2", що випускається ООО "Скоропусковський синтез" (РФ). В його склад входять алкілбензоли та алкілбензолсульфо кислоти. Перед зануренням підкладок у цей розчин їх потрібно попередньо витримати декілька хвилин в толуолі або ксилолі для замочування. При такій обробці фоторезистивний шар на підкладках повністю розчиняється, після чого їх потрібно ретельно промити у декількох порціях толуолу або ксилолу та бутилацетаті. Після сушки підкладок у потоці теплого повітря їх передають на контрольні операції.

В технологічному процесі виготовлення ГЗЕ використовується багато різних хімічних речовин, в тому числі і органічні розчинники. Як уже вище зазначалося, наявність на поверхні виводів в місцях зварювання різних забруднень, а саме оксидів, адсорбованих газів, вологи та органічних забруднень може зашкодити проведенню процесів зварювання різних компонентів. Тому важливого значення набуває фінішна обробка, метою якої є видалення залишків травників, органічних розчинників та інших забруднень, які могли вестись на поверхню ГЗЕ в ході проведення технологічного процесу їх виготовлення. Така фінішна обробка проводиться у слабкому лужному розчині (3-5% розчин NaOH) при кімнатній температурі до моменту "спалаху".

Поверхня виробів при цьому підтрапляється і з неї при ретельній промивці змиваються усі забруднення. Варто зазначити, що така обробка є своєрідним тестом на чистоту готових виробів. У разі, коли від часу занурення ГЗЕ до "спалаху" минає відносно невеликий проміжок часу (до 10-12 с), вироби можна вважати чистими і після ретельної промивки і сушки їх можна передавати на подальші операції складання. В іншому випадку ГЗЕ повертають на повторну обробку у розчині для зняття фоторезисту ("форсан-2") та відповідних органічних розчинників. Після цього фінішну обробку проводять знову.

При контролі усі вироби ретельно візуально переглядаються на відповідність вимогам конструкторської документації, при цьому обов'язково проводиться вимірювання ширини виводів та інших контрольних елементів на відповідність цим вимогам. Для цього використовують мікроскопи різного типу, в тому числі з оптичними вимірювальними головками.

3.2 Технологічні послідовності виготовлення ГЗЕ ДМ

Проведений аналіз конструкцій ДМ РВ, розроблені вимоги до ДМ експерименту СВМ на основі стріпових сенсорів, особливості технології виготовлення ГЗЕ дозволили розробити технологічні послідовності виготовлення ГЗЕ та діелектричних прокладок, які, з наведенням технологічного обладнання для основних операцій, наведено у таблиці 3.1 та таблиці 3.2.

Технологічна послідовність виготовлення ГЗЕ на основі безадгезивних лакофольгових діелектриків типу ФДИ-А також наведена на рисунку 3.1.

Таблиця 3.1 – Технологічна послідовність виготовлення ГЗЕ на основі безадгезивних лакофольгових діелектриків типу ФДИ-А

№	Назва операції	Обладнання
1	Розрізання підкладки	
2	Очищення підкладки	Шафа витяжна типу ШВЛ-06
3	Термообробка підкладки	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
4	Двостороннє нанесення фоторезисту на підкладку	Установка нанесення фоторезисту типу НО 470
5	Сушіння підкладки	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
6	Двостороннє експонування шару фоторезисту	Установка експонування типу ТЕМП-1 або ЕМ-565
7	Проявлення фоторезисту	Шафа витяжна типу ШВЛ-06
8	Візуальний контроль	Мікроскоп ММУ-3
9	Задублювання	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
10	Травління алюмінію	Шафа витяжна типу ШВЛ-06
11	Візуальний контроль, ретушування	Мікроскоп ММУ-3
12	Захист алюмінію перед травлінням поліміду	Шафа витяжна типу ШВЛ-06
13	Травління поліміду	Шафа витяжна типу ШВЛ-06
14	Видалення фоторезисту	Шафа витяжна типу ШВЛ-06
15	Очищення	Шафа витяжна типу ШВЛ-06
16	Контроль зовнішнього вигляду та геометричних розмірів	Мікроскоп типу УИМ 21

Таблиця 3.2 – Технологічна послідовність виготовлення діелектричних прокладок ГЗЕ на основі поліамідної плівки типу ПП

№	Назва операції	Обладнання
1	Розрізання підкладки	
2	Очищення підкладки	Шафа витяжна типу ШВЛ-06
3	Термообробка підкладки	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
4	Двостороннє нанесення фоторезисту на підкладку	Установка нанесення фоторезисту типу НО470
5	Сушіння підкладки	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
6	Двостороннє експонування шару фоторезисту	Установка експонування типу ТЕМП-1 або ЕМ-565
7	Проявлення	Шафа витяжна типу ШВЛ-06
8	Візуальний контроль	Мікроскоп ММУ-3
9	Задублювання	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
10	Травління полііміду	Шафа витяжна типу ШВЛ-06
11	Видалення фоторезисту	Шафа витяжна типу ШВЛ-06
12	Очищення	Шафа витяжна типу ШВЛ-06
13	Контроль зовнішнього вигляду та геометричних розмірів	Мікроскоп типу УИМ 21

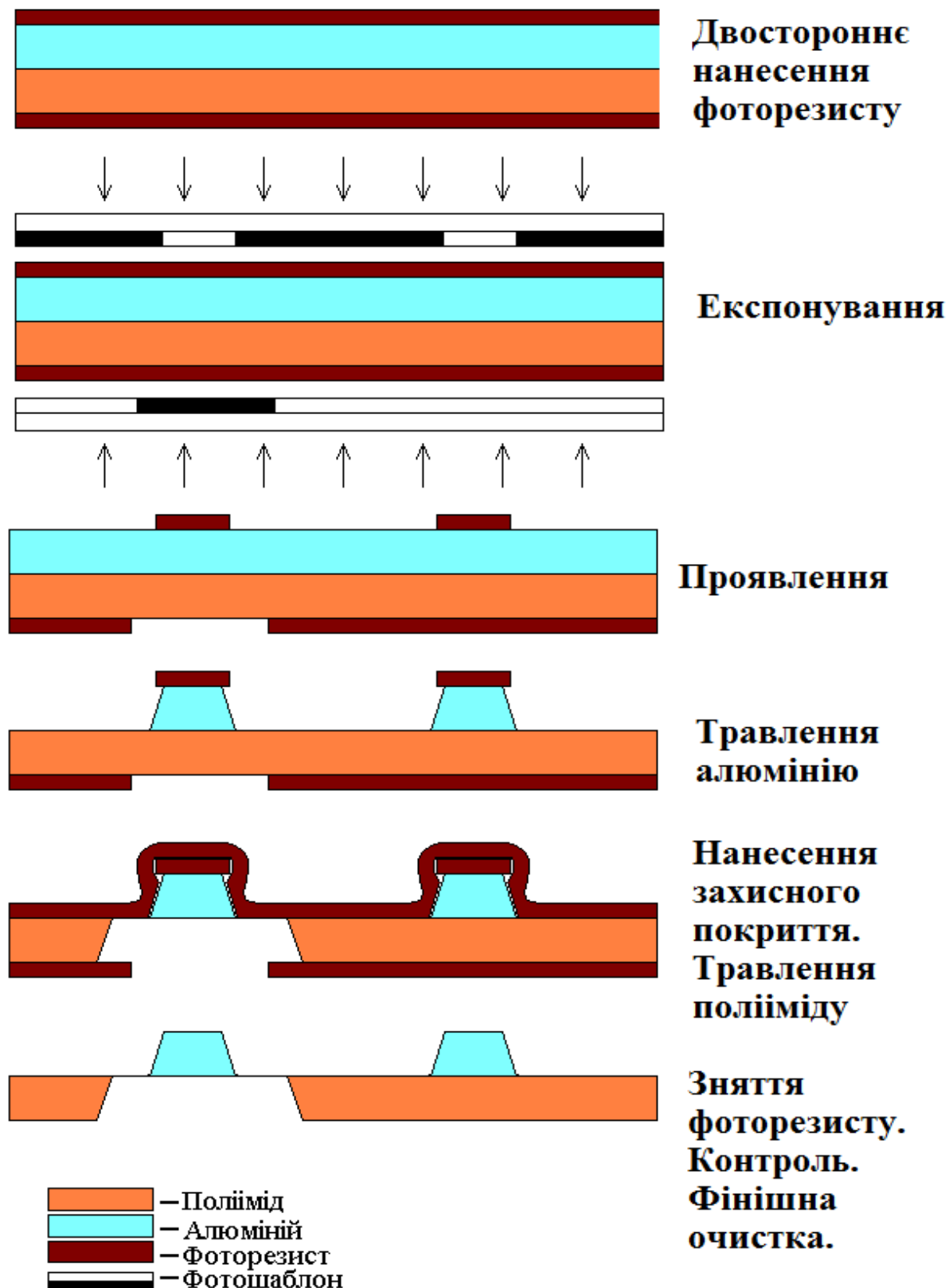


Рисунок 3.1 – Маршрут виготовлення ГЗЕ з алюміній-поліімідних діелектриків

3.3 Дослідження ТП виготовлення ГЗЕ підвищеної щільності розташування елементів

Для виконання підвищених вимог до ДМ, вони розробляються на основі нової надсучасної елементної бази, що, в свою чергу, вимагає розробки технології виготовлення ГЗЕ з кроком розташування провідників близько 50 мкм [3.6].

При використанні стандартних методів хімічного травлення виникають труднощі при виготовленні виробів з підвищеною щільністю із-за того, що травлення алюмінію – ізотропно. Через підтравлювання під фоторезистивну маску спостерігається трапецієвидний переріз провідника, так званий "клин травлення" (рисунок 3.2). Коефіцієнт підтравлювання визначається виразом:

$$k_{\text{тр}} = \frac{\delta}{h_{\text{Al}}}, \quad (3.1)$$

де δ – величина підтраву;

h_{Al} – товщина алюмінію, мкм.

Якщо $k_{\text{тр}}=1$, то має місце повністю ізотропне травлення і величина підтраву відповідає товщині плівки.

Величину підтраву необхідно визначати, використовую вираз:

$$\delta = \frac{d_m - L_1}{2}, \quad (3.2)$$

де d_m – розмір малюнка маски, мкм;

L_1 – величина основи провідника, мкм.

Чим більше підтрав, тим більше коефіцієнт підтравлювання і менше коефіцієнт анізотропії.

$$A_f = 1 - k_{\text{тр}}, \quad (3.3)$$

де A_f – коефіцієнт анізотропії.

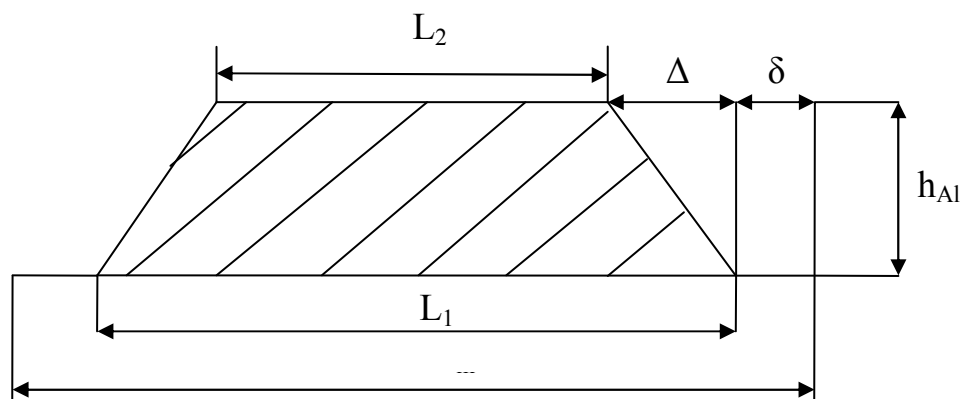


Рисунок 3.2 – Трапецієвидний переріз провідника, одержуваний при хімічному травленні

Технологія виготовлення ГЗЕ підвищеної щільності з кроком виводів 50 мкм вимагає високої анізотропії процесу і точності відтворення розмірів.

Існує кілька варіантів поліпшення роздільної здатності процесу травлення і підвищення коефіцієнта анізотропії при травленні. Одним з них є вибір оптимальних технологічних режимів формування фоторезистивної маски. Другий варіант – це облік факторів, що визначають швидкість і селективність процесу травлення. До таких факторів належать:

- вибір складу травника для відтворення розмірів і профілю країв елементів;
- оптимізація температурних режимів процесу;
- визначення ефективних поверхнево-активних речовин і вплив їх на процес травлення.

3.3.1 Вибір оптимальних технологічних режимів формування фоторезистивної маски

Для виготовлення елементів будь-якої конструкції необхідно формування такої фоторезистивної маски, яка дозволила б отримати розміри елементів з певною точністю і володіла певними властивостями, які зберігаються на всіх операціях фотографічних процесів. Одним з параметрів, що характеризують захисні властивості фоторезистивної маски, є її товщина, а точність виготовлення, багато в чому, залежить від правильного вибору часу

експонування та адгезії фоторезистивної маски до заготовки/підкладки. У практиці фотолітографії часто доводиться робити вибір між товщиною плівки фоторезисту, дефектністю, роздільною здатністю, враховуючи при цьому хімічну стійкість плівки фоторезисту. Всі ці фактори взаємообумовлені і пов'язані з технологічними режимами обробки.

Встановлено, що при маскуючому шарі негативного фоторезисту 1 мкм і менше спостерігається збільшення кількості дефектів, викликаних недостатньою стійкістю фоторезисту при травленні. У той же час фоторезистивний шар понад 1,8...2 мкм вимагає більшого часу експонування, прояву і має обмеження при відтворенні розмірів елементів при експонуванні.

В процесі проведення робіт вивчена залежність товщини фоторезистивної маски від швидкості нанесення фоторезисту і його в'язкості, а також залежність ширини провідників по фоторезистивній масці від часу експонування.

Дослідження проводилися на тестових зразках, виготовлених на лакофольговому діелектрику ФДИ-А-24. Для більш точного відтворення розмірів елементів використовували плівковий фотошаблон з кроком провідників 50 мкм, шириною провідників 35 мкм і зазором між провідниками 15 мкм.

Для відпрацювання режимів формування фоторезистивної маски було скомплектовано 2 партії по 25 штук в кожній з в'язкістю фоторезисту 15,2 мм²/с (ФН-11С і ФН-11СК 3:1) і 13,6 мм²/с (ФН-11С). В'язкість фоторезисту контролюється на вискозиметрі ВЗ-4. Партія 1 (в'язкість 15,2 мм²/с) – 1,1...1,25 мкм. Партія 2 (в'язкість 13,6 мм²/с) – 2,1...2,25 мкм.

Очищення заготовок проводилося в 5% розчині вуглекислого натрію (Na₂CO₃) при температурі 50°C протягом 1 хвилини. Термообробка – протягом 1 години при 100°C і протягом 1 години при 150°C. Нанесення фоторезисту здійснювалося методом витягування на установці НО-470. Швидкість нанесення фоторезисту змінювалася від 150 с до 350 с з інтервалом 50 с. Сушка фоторезисту – 30 хвилин при 100°C. Експонування проводилося на установці

двостороннього експонування EM-365 з використанням вакуумної рамки з механічним притиском, не менше 90 кПа. Освітленість 50...60 тис. люкс – постійна. Час експонування змінювався від 10 с до 30 с з інтервалом 5 с. Зразки проявлялися у трьох об'ємах уайт-спіриту по 1 хвилині в кожному і бутилацетаті – 20 с. Задублювання – 1 година при 100°C і 1 година при 150°C. Вимірювання товщини фоторезистивної маски і ширини провідників проводилися на мікроінтерферометрі МІН-4, з точністю до 0,3 мкм.

Результати вимірювань представлені в таблицях Д.1 і Д.2 (додаток Д). На підставі отриманих даних побудовані графіки залежності товщини фоторезистивної маски від швидкості нанесення фоторезисту і в'язкості, залежність ширини провідників від часу експонування (рисунки 3.2, 3.3).

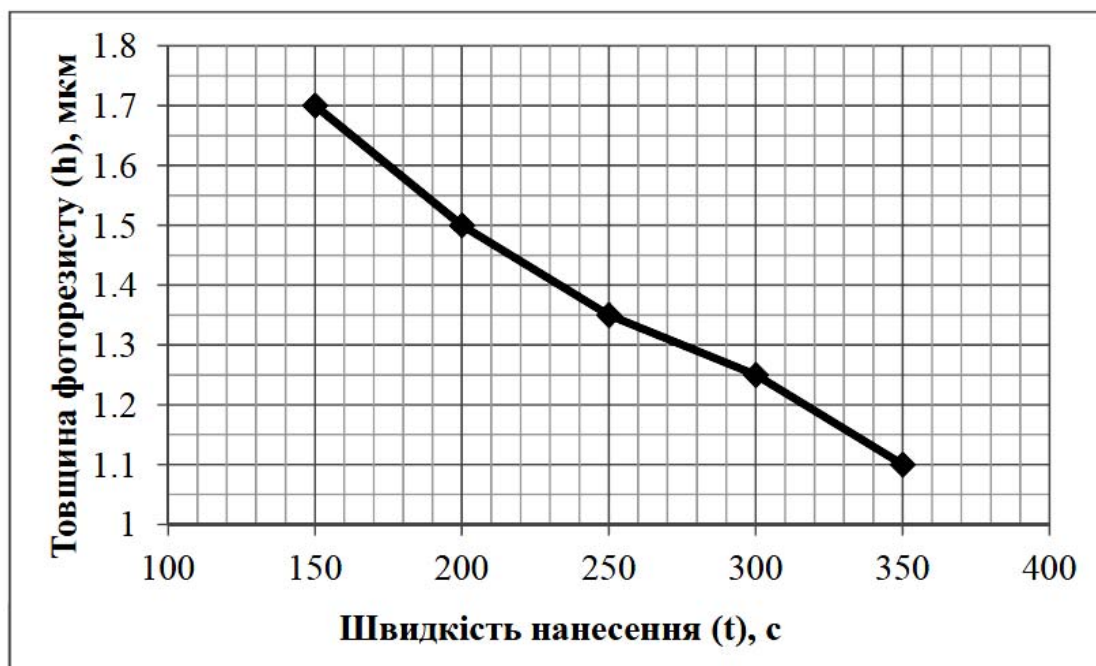


Рисунок 3.3 – Залежність товщини фоторезисту (h) від швидкості нанесення (t_n)

В результаті проведених робіт при виготовленні елементів з кроком виводів 50 мкм (ширина провідника 35 мкм, з зазором між ними 15 мкм) обрані оптимальні технологічні режими для формування фоторезистивної маски. Максимальна робоча товщина фоторезистивної маски 1,1...1,3 мкм, яка

формується швидкістю нанесення фоторезисту 250...300 с і в'язкістю 15,2 мм²/с. При товщині більше 1,3 мкм елементи не опрацьовуються або мають нечіткий край, розміри елементів на фоторезистивній масці не відповідають розмірам на фотошаблоні.

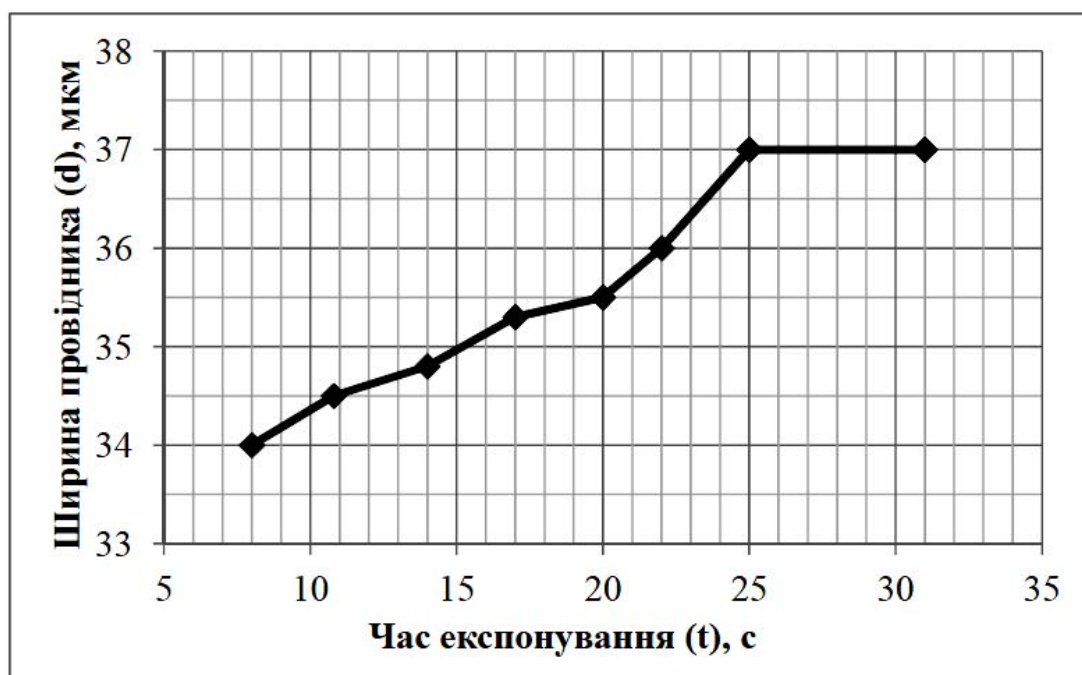


Рисунок 3.4 – Залежність ширини провідника по фоторезистивній масці (d) від часу експонування фоторезисту (t_3), в'язкістю 13,6 мм²/с і товщиною 1,3 мкм

Для відтворення точних розмірів елементів при обраній товщині фоторезисту, час експонування обмежений від 10 с до 20 с через невеликий зазор (15 мкм) між елементами. При більшому часі експонування зазори зменшуються, з'являються закоротки (залишки фоторезисту) між елементами.

Оптимальні режими формування фоторезистивної маски: в'язкість фоторезисту 15,2 мм²/с, швидкість нанесення 250...300 с, час експонування 10...20 с, освітленість 55... 60 тис. люкс.

3.3.2 Дослідження та удосконалення технологічного процесу травлення алюмінію

Травлення алюмінію може проводитися в лужному і кислотному середовищах. Травники на основі лугів не підходять, тому що лакофольговий діелектрик має поліімідне покриття, яке травиться в лугах, тому для травлення алюмінію вибираються кислотні травники.

Основним реагентом для травлення алюмінію в кислотних травниках є фосфорна кислота (H_3PO_4). Для дослідження вибираємо широко відомий в мікроелектроніці травник наступного складу: H_3PO_4 (76%), крижана оцтова кислота (CH_3COOH – 15%), концентрована азотна кислота (HNO_3 – 3%) і вода (H_2O – 5%).

Згідно з полярографічним дослідженням, процес травлення алюмінію складається з двох стадій – формування Al^{3+} і утворення AlPO_4 , контрольованих швидкостями відповідних реакцій: $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} \rightarrow \text{плівка} \rightarrow \text{розчинний } \text{AlPO}_4$. Вода у фосфорній кислоті перешкоджає розчиненню Al_2O_3 , але вона сприяє розчиненню вторинного продукту AlPO_4 .

Енергія активації травлення Al в $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{HNO}_3$ дорівнює 13,2 ккал/моль, що передбачає обмеження процесу швидкістю розчинення Al_2O_3 в H_3PO_4 . Газ, що виділяється, є сумішшю H_2 , NO і NO_2 . Адсорбція газів на поверхні алюмінію є постійною проблемою при використанні вузьких травителів. Бульбашки здатні уповільнити травлення, під ними утворюються острівці недотравленого металу.

Використовуючи основний процес травлення алюмінію, досліджуємо різні склади травників.

Дослідження процесу травлення проводилося на тестових зразках на лакофольговому діелектрику ФДИ-А-24. Кількість партій – 9 (по 3 зразка в кожній). Формування фоторезистивної маски здійснювалося за оптимально обраним режимом і плівковому фотошаблону з кроком провідників 50 мкм

(ширина провідників 35 мкм, зазор між ними 15 мкм). Товщина фоторезисту 1,2...1,3 мкм, ширина провідника по фоторезистивній масці 35...36 мкм. Після травлення зразків і сушки проводився візуальний контроль якості травлення під мікроскопом МБС-9. Ширина провідника вимірювалася на мікроінтерферометрі МНІ-4.

Для дослідження процесу травлення було обрано кілька складів травників. Травник №1 мав наступний склад: фосфорна кислота (H_3PO_4 – 76%), оцтова кислота (CH_3COOH – 15%), азотна кислота (HNO_3 – 3%) та вода (H_2O – 5%). Температура травлення – 60°C. Час травлення – 10 хвилин.

Після контролю зовнішнього вигляду були виявлені залишки металу на відкритих майданчиках, край нерівний, великі вириви на провідниках, розміри нижче допустимих по КД.

З метою оптимізації процесу травлення було виключно HNO_3 , як сильний окислювач і H_2O для збільшення швидкості травлення. Для рівномірності процесу травлення збільшена кількість оцтової кислоти, яка при дисоціації утворює H^+ . Оцтова кислота у травнику відіграє роль сповільнювача швидкості травлення. В наслідок її дисоціації з'являється додаткове число протонів ($\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{H}^+ + \text{CH}_3\text{COO}^-$), що, згідно принципу Ле-Шательє, змістить рівновагу в реакціях дисоціації основних компонентів вліво, зменшуючи їх активність в процесі розчинення. Таким чином, процес сповільнюється. Крім того, оцтова кислота має порівняно низьке значення діелектричної проникності ($\epsilon=6,2$), тому введення оцтової кислоти до складу розчину призводить до зниження його середньої діелектричної проникності і, в кінцевому рахунку, знижує ступінь дисоціації мінеральних кислот – травників, сповільнюючи їх реакцію взаємодії з речовиною. Тобто механізм дії сповільнювача має каталітичну природу. Сама речовина участі в процесі травлення не приймає.

З огляду на вищевикладене, було збільшено кількість оцтової кислоти в два рази, що дозволило також зробити травник менш в'язким, і випадання бульбашок зменшилося. Таким чином, отримано травник №2 наступного

складу: фосфорна кислота (H_3PO_4 – 65%), оцтова кислота (CH_3COOH – 35%), тобто 2:1. Температура травлення – $60^\circ C$. Час травлення: 20...25 хвилин.

Травник №3 має такий же склад. Для збільшення швидкості травлення температуру травлення було збільшено до $100^\circ C$. Час травлення при цьому становить від 1 хв. 50 с до 2 хв.

Візуальний контроль під мікроскопом показав наступне: нерівний край провідників, залишки металу відсутні, розмір провідників нижче допусків по КД і спостерігається нерівномірність ширини провідників.

Для рівномірності травлення по всій поверхні заготовки в травник №3 були введені поверхнево-активні речовини (ПАР). ПАР – це речовини з асиметричною молекулярною структурою, які здатні адсорбуватися на поверхні розділу фаз, внаслідок цього вони можуть знижувати поверхневу енергію і змінювати властивості травника.

З поверхнево-активних речовин обрано препарат ОС-20, який належить до оксіетілованих вищих жирних спиртів (основна домішка – поліетиленгліколь).

Молекули ПАР, такого як поліетиленгліколь, при додаванні в травник прикріплюються до країв фоторезисту, особливо недоекспонованного, і перешкоджають підтравлюванню під фоторезистивну маску незалежно від ширини зазору між елементами, тому процес травлення здійснюється по всій площі заготовки.

Для дослідження впливу ПАР в травнику алюмінію змінюємо процентний вміст ПАР (0,3%; 0,5%; 0,7%; 1%; 1,5%; 2%). Результати травлення наведені в таблицях Д.2 і Д.4 (додаток Д).

На підставі отриманих даних побудовано графік залежності ширини провідника від процентного вмісту ПАР у травнику (рисунок 3.5).

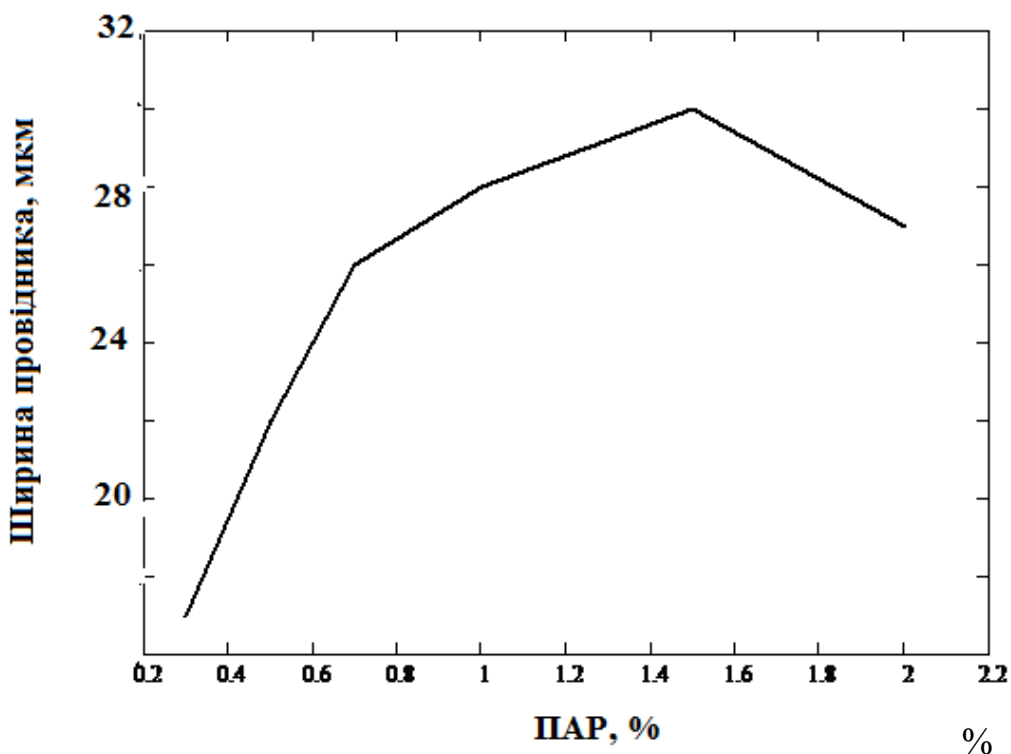


Рисунок 3.5 – Залежність ширини провідника (d) від процентного вмісту ПАР у травнику Al

При введенні ПАР до складу травника, процес травлення стабілізується. Аналіз отриманих даних дозволяє зробити висновок, що при додаванні поверхнево-активної речовини в процентному вмісті її 0,3%...0,5%, реакція протікає повільно, залишаються сліди нестравленого металу, провідники тонкі. При 2% вмісті ПАРи в складі травника реакція протікає бурхливо, процес травлення практично не контролюється.

Величина підтраву при 0,3%...0,5% ПАР становить 6...8 мкм на сторону, при 0,7%...1,5% ПАР – від 1,5 мкм до 3 мкм, а при 2% – 5,0 мкм.

Проведені дослідження показали, що при виготовленні елементів комутації з кроком провідників 50 мкм (ширина провідників 35 мкм, зазор між ними – 15 мкм) при обраних оптимальних режимах формування фоторезистивної маски і правильному підборі складу травнику алюмінію, коефіцієнт анізотропії становить 0,6...0,7.

Оптимальні режими виготовлення:

- нанесення фоторезисту 250...300 с, в'язкість 15,2 мм²/с;
- експонування 10...20 с, освітленість 55...60 тис. люкс;
- склад травника: H_3PO_4 : CH_3COOH = 2:1 + 0,7%...1,5% ПАР;
- температура травлення 100°C.

3.3.3 Дослідження та оптимізація технологічного процесу травлення поліімідної плівки

Згідно ТУ ИУО.037.042 метеріал ФДИ-А являє собою поліімідний діелектрик на алюмінієвій фользі, термічно імідизований при температурі 300°C протягом 30 хвилин. Проведення неповної імідизації необхідно для забезпечення локального травлення полііміда, оскільки повна імідизаційна форма важко піддається руйнуванню і має обмежену кількість нетоксичних за складом травників.

Травники для поліімідних плівок можуть бути на органічній і неорганічній основі. Поліімід активно розчиняють концентровані водні розчини гідроокисей лужних металів або розчини лугів в суміші з органічними з'єднаннями. Найпоширеніший травник полііміду – моноетаноламін, температура травлення якого – 140°C. Захисні властивості фоторезисту ФН-11 зберігаються при температурі 140°C тільки протягом 15...20 с і травлення не відрізняється стабільністю.

Було проведено пошук нових хімічних рецептур для травлення полііміду, які задовольняли б наступним вимогам:

- травник повинен бути монотоксичним і забезпечувати виборче травлення ізольованого полііміду при 300°C;)
- у процесі травлення маска фоторезисту ФН-11 повинна зберігати свої захисні властивості;
- процес взаємодії з алюмінієм був би загальмований.

Відповідно до теорії кислотно-основної взаємодії можна очікувати, що на відміну від водних, в безводних лужних розчинах на основі органічних розчинників процес іонної взаємодії луку з алюмінієм сповільнюється. При використанні в якості розчинника моноетаноламіна дія на алюміній повністю припиняється. Розчинність гідроксидів лужних металів у моноетаноламіні дуже обмежена. У безводному моноетаноламіні можна розчинити не більше 1,0...1,5% гідроксиду калію. Збільшення кількості гідроксиду калію прискорює процес травлення, що дозволяє зменшити температуру травлення до 100°C, при якій захисні властивості фоторезисту ФН-11 зберігаються довше, ніж при 140°C.

Експериментальним шляхом було підібрано травник полііміду, до складу якого входить моноетаноламін і водний розчин гідроксиду калію, для стабілізації процесу додається триетаноламін.

Склад травника:

- гідрат окису калію (KOH) – 300 гр;
- моноетаноламін ($\text{NH}_2(\text{CH}_2)_2\text{OH}$) – 250 мл;
- триетаноламін ($\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_3$) – 75 мл;
- вода (H_2O) – до 1 літра.

Температура травлення 100°C.

Даний травник монотоксичен, забезпечує виборче травлення полііміду, має високу швидкість травлення, що дозволяє зберегти захисні властивості фоторезисту. Недолік травника в тому, що він вступає в реакцію з алюмінієм.

Дослідження процесу травлення полііміду проводиться з метою можливості збереження максимальної ширини і товщини провідників в зоні зварювання під час травлення полііміду.

Для оптимізації процесу травлення полііміду досліджуємо вплив клину травлення, одержуваного при травленні алюмінію, на ширину провідників в процесі травлення полііміду, і вплив складу травника і технологічних режимів процесу травлення на товщину алюмінію в зоні зварювання.

Для виявлення впливу клину травлення, одержуваного при травленні алюмінію, захищаємо фоторезистом поверхню алюмінію і проводимо процес травлення поліїміду.

Ширина провідників і клин травлення зразків після травлення алюмінію представлені в таблицях 3.3. Травлення проведене у рекомендованому травнику при температурі 100°C. Після травлення поліїміду і видалення фоторезисту, вимірювалася ширина провідника і клин травлення на МІІ-4.

Таблиця 3.3 – Результати вимірювання ширини провідників після травлення поліїміду

№ зразка	Ширина провідника після травлення Al, мкм	Клин травлення, мкм	Ширина провідника після травлення поліїміду, мкм	Клин травлення після травлення поліїміду, мкм	Величина підтраву у процесі травлення поліїміду (Δ), мкм
4.1	17	7.5	13	3	4
4.2	19	8.5	14	4	5
4.3	17	7.5	12	3	5
5.1	23	8	18	3	5
5.2	21	6	16	2	4
5.3	21	6	17	3	3
6.1	28	4	25	1	3
6.2	29	4	27	2	2
6.3	26	3.5	24	1	2
7.1	30	4	29	0	1
7.2	28	5.5	25	1	3
7.3	28	4	26	1	2
8.1	31	5	29	0	2
8.2	30	5	28	1	2
8.3	30	4	29	0	1
9.1	29	2.5	28	0	1
9.2	27	2.5	26	0	0
9.3	27	2.5	26	0	1

За даними вимірювання можна зробити висновок, що ширина провідника в зоні зварювання залежить від величини клину, отриманого в процесі травлення алюмінію. При "клині травлення" 8...10 мкм ширина провідника зменшується на 4...5 мкм, при "клині травлення" 3...4 мкм – на 1...2 мкм або залишається незмінною.

При виготовленні елементів 30 мкм і менше, товщина алюмінію в зоні зварювання грає не останню роль. В процесі виготовлення зразки обробляються в лужних розчинах і підтравлюють поверхню алюмінію на операціях очищення. На операції фінішного очищення в 5% Na_2CO_3 швидкість травлення становить 0,25 мкм/хв. Найбільше знімання алюмінію спостерігається в процесі травлення полііміду. Для дослідження і відпрацювання режимів травлення комплектуємо партію заготовок в кількості 20 од. на лакофольговом діелектрику ФДІ-А-24, товщина полііміда 10 мкм. Формування фоторезистивної маски і травлення алюмінію проводиться за оптимально обраними режимами. Для травлення полііміду встановлюємо температуру травника 110°C, 100°C, 80°C, 65°C. Час травлення визначаємо по "спалаху", тобто початку травлення поверхні алюмінію з боку полііміду. Для повного стравлювання полііміду по всій поверхні зразка було обрано час "спалаху" 5 секунд. Швидкість травлення при 100°C (час травлення – 30 с, товщина полііміда – 10 мкм) становить 0,33 мкм/с. За 5 секунд стравлюється 1,65 мкм алюмінію. Товщина алюмінію в зоні зварювання при виготовленні може зменшитися на 2 мкм. Після травлення при заданих температурах заміряємо клин травлення на МІІ-4, розраховуємо швидкість травлення і всі дані заносимо в таблицю 3.4.

Аналіз отриманих результатів показує, що відмінність співвідношення гідрату окису і моноетаноламіну на клин травлення полііміду не позначається, а швидкість травлення збільшується при більшій кількості КОН, край нерівний, при більшій кількості моноетаноламіна – край розпливчастий.

Таблиця 3.4 – Результати процесу травлення при різних температурах травлення і складах травника

№ зразка	Склад травителю	Температура травлення, °С	Час травлення, с	Швидкість травлення, мкм/с	Товщина Al за 5с при травленні поліїмиду, мкм	Клин травлення поліїмиду, мкм
1	KOH (300гр), NH ₂ (CH ₂) ₂ OH (250 мл), N(C ₂ H ₅ O) ₃ (75 мл), H ₂ O (до 1 л)	110	15	0,67	3,35	25 – 28
2		110	18	0,55	2,75	25 – 30
3		110	15	0,67	3,35	25 – 30
4		100	30	0,33	1,67	13 – 15
5		100	25	0,40	2,00	15 – 16
6		100	25	0,40	2,00	13 – 14
7		80	65	0,15	0,77	20 – 23
8		80	75	0,13	0,67	20 – 25
9		80	65	0,15	0,77	20 – 23
10		65	120	0,08	0,41	35 – 38
11		65	125	0,08	0,40	35 – 40
12		65	120	0,08	0,41	35 – 40
13	NH ₂ (CH ₂) ₂ OH:	100	16	0,62	—	16 – 18
14	KOH 75%=1:1	100	15	0,67	—	17 – 18
15	2:1	100	27	0,37	—	18 – 20
16	2:1	100	30	0,33	—	18 – 20
17	3:1	100	43	0,23	—	14 – 16
18	3:1	100	45	0,22	—	14 – 15
19	1:2	100	13	0,78	—	14 – 16
20	1:2	100	14	0,71	—	15 – 16

Виявлено, що на клин травлення полііміду впливає температура травника. Мінімальний клин травлення спостерігається при температурі 100°C і становить 13...15 мкм, при температурі вище і нижче 100°C клин травлення збільшується.

За таблицею вибираємо температуру травлення 80°C, товщина алюмінію в зоні зварювання зменшується на 0,7 мкм. Клин травлення збільшується до 25 мкм.)

Для підтвердження правильності вибору режимів травлення перевірена міцність з'єднань при УЗ-зварюванні. Для перевірки зварюваності елементів зразки обрано з однаковою шириною і такі, які травилися при температурі 80°C і 100°C. Результати заносимо у таблиці 3.5 і 3.6.

Зварювання проводилось електродом фірми GAISER. Режим зварювання: $F = 4,5$ г, $P = 0,8$ од., $\tau = 2,5$ од. [3.7-3.10].

Таблиця 3.5 – Результати міцності зварних з'єднань на провідниках з різною товщиною алюмінію в зоні зварювання (температура травлення 100°C)

Зразок №4 (ширина провідників 29 мкм)	Зразок №5 (ширина провідників 29 мкм)	Зразок №6 (ширина провідників 30 мкм)
5,0 + по пр	4,5 + по пр	5,0 + по пр
4,0 + по пр	4,8 + по св	5,0 + по пр
5,0 + по пр	4,5 + по св	5,0 + по пр
4,5 + по пр	5,0 + по св	4,8 + по св
5,0 + по св	4,5 + по св	4,5 + по св
4,5 + по пр	5,0 + по пр	5,0 + по пр
4,5 + по пр	5,0 + по пр	4,5 + по пр
5,0 + по пр	4,0 + по св	4,5 + по св
4,0 + по пр	4,0 + по св	4,5 + по св
5,0 + по св	3,5 + по пр	5,0 + по пр

Таблиця 3.6 – Результати міцності зварних з'єднань на провідниках з різною товщиною алюмінію в зоні зварювання (температура травлення 80°C)

Зразок №7 (ширина провідників 30 мкм)	Зразок №8 (ширина провідників 30 мкм)	Зразок №9 (ширина провідників 28 мкм)
5,5 + по пр	5,0 + по пр	5,5 + по пр
5,5 + по пр	5,0 + по пр	5,5 + по пр
5,0 + по пр	6,0 + по пр	5,0 + по св
5,0 + по пр	5,5 + по пр	4,5 + по св
4,5 + по пр	5,5 + по св	4,5 + по св
5,8 + по св	5,0 + по пр	4,5 + по пр
5,5 + по пр	5,8 + по св	5,0 + по пр
5,5 + по пр	4,5 + по пр	4,0 + по пр
5,0 + по пр	5,5 + по пр	5,0 + по св
5,5 + по св	5,5 + по пр	4,5 + по пр

З табличних даних зварюваність на зразках, які травилися при температурі від 80°C і вище, становить в середньому 5,5 гр, обривів провідників не спостерігалось. Тому клин 25 мкм, що отримується при травленні полііміду при температурі 80°C, задовільняє технічним вимогам виготовлення ГЗЕ з кроком 50 мкм на лакофольговому діелектрику ФДИ-А-24.

При дослідженні процесу виготовлення ГЗЕ з кроком 50 мкм і менше хімічним способом дає можливість отримати елементи шириною 30...31 мкм, з анізотропією процесу – 0,7.

3.4 Висновки за розділом

На підставі результатів досліджень, викладених у даному розділі, можна зробити наступні висновки:

1. Досліджено переваги використання ГЗЕ в конструкціях ДМ РВ, виготовлених з безадгезивних лакофольгових алюміній-поліімідних діелектриків. Вперше було реалізовано ГЗЕ з безадгезивних алюміній-

поліімідних фольгових діелектриків з кроком розташування провідників 50 мкм та менше.

2. Під час виготовлення елементів із кроком виводів 50 мкм (ширина провідників 35 мкм, проміжки 15 мкм) обрані оптимальні технологічні режими для формування фоторезистивної маски. Максимальна робоча товщина фоторезистивної маски 1,1...1,3 мкм, яка формується швидкістю нанесення фоторезисту 250...300 с і кінематичною в'язкістю 15,2 мм²/с, час експонування 10...20 с, освітленість 55...60 тис. люкс.

3. Проведені дослідження показали, що під час виготовлення ГЗЕ з кроком провідників 50 мкм (ширина провідників 35 мкм, проміжок між ними – 15 мкм) за обраних оптимальних режимів формування фоторезистивної маски і правильного підбору складу травника алюмінію коефіцієнт анізотропії становить 0,6...0,7.

Оптимальні режими виготовлення ГЗЕ:

- склад травника: $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{CH}_3\text{COOH} = 2 : 1 + 0,7...1,5 \%$ ПАР;
- температура травлення 100 °С;
- час травлення 2 хв.

РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТП СКЛАДАННЯ ДМ

4.1 Послідовність складання ДМ для експерименту СВМ

КТС є основною частиною експерименту СВМ [1.17, 4.1]. Однією з ключових вимог до КТС є мінімізація маси речовини в області детектування для досягнення вимірювання моментів частинок з роздільною здатністю близько 1%. Виконання цієї вимоги може бути забезпечено застосуванням тонких мікрострипових кремнієвих сенсорів, а також ГЗЕ на основі легких безадгезивних алюміній-поліімідних діелектриків.

Основною складовою частиною КТС є леддер (рисунок 4.1) [4.2], який включає в себе різну кількість ДМ з різною ефективною довжиною стрипів. ДМ можуть складатися з одного або декількох послідовно з'єднаних тонких двосторонніх сенсорів і електроніки зчитування. При цьому має бути виконано механічне та електричне з'єднання обох сторін тонкого кремнієвого сенсора.

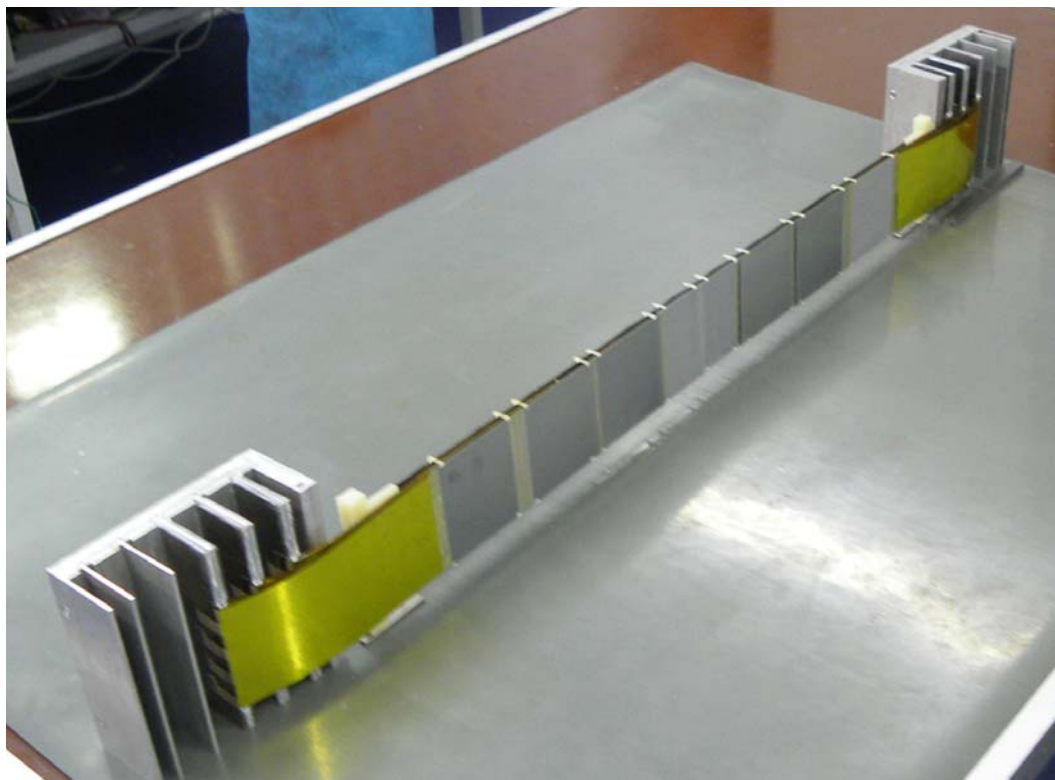


Рисунок 4.1 – Макет леддера КТС СВМ

Застосування прецизійних ГЗЕ на основі алюміній-поліімідних діелектриків дозволяє повністю виключити дротяний монтаж, спростити процес збирання багатошарових детекторних структур, забезпечити мінімальні масогабаритні характеристики та високощільний монтаж, значно покращити характеристики пристроїв, що розробляються.

Найбільш надійним способом формування з'єднань алюмінієвих провідників між собою, з кристалами сенсорів і мікросхемами є УЗ-зварювання [1.11, 4.3].

Вищевказані вимоги до ДМ можуть бути виконані при використанні інноваційної алюмінієвої СОФ-технології складання [1.16, 4.4-4.6].

Алюмінієва СОФ-технологія цілком адаптується до існуючого автоматизованого обладнання ультразвукового зварювання. При цьому забезпечується висока якість і надійність зварних з'єднань не тільки з-за того, що зварюються однорідні матеріали (алюмінієві контактні площинки електронних компонентів ті алюмінієві провідники комутуючих елементів), але також і з-за того, що зварні електроди, які застосовуються у зварювальних установках, дозволяють забезпечити оптимальні режими процесів зварювання.

ГЗЕ на основі лакофольгових діелектриків ФДИ-А-50 та ФДИ-А-24 характеризуються пластичністю та гнучкістю. За рахунок компонування у трьох площинах забезпечується перекриття сусідніх сенсорів у детектуючих системах, що практично виключає "мертві зони", тобто ті зони, у яких не здійснюється детектування. Описане компонування неможливо реалізувати при дротяному монтажі, так як у цьому випадку об'єкти зварювання повинні мати одностороннє розташування і практично неможливо змінити конфігурацію провідників після зварювання.

Технологія УЗ-зварювання з використанням автоматизованого обладнання FK Delvotec 6400, Kulicke&Soffa 8090 та ін. дозволяє забезпечити точність позиціонування при зварюванні не гірше ± 3 мкм.

Тип застосовуваних установок значною мірою визначає надійність зварних з'єднань, а, отже, і всього виробу в цілому, і трудомісткість операції зварювання. При зварюванні на установках з ручним керуванням для забезпечення якісних зварних з'єднань оператору необхідно візуально забезпечити суміщення зварювального інструменту з кожним виводом ГЗЕ з дуже високою точністю ($\pm 2\div 3$ мкм), що є досить складним процесом, а з урахуванням дуже великої кількості зварних з'єднань (1024 з'єднань тільки з однієї сторони сенсору) практично нездійсненно. Неточне суміщення зварювального інструменту при зварюванні з виводом або можливе його зрушення в момент зварювання значно погіршує якість зварного з'єднання, а, отже, і надійність всього виробу. У разі застосування автоматичних зварювальних установок необхідно суміщувати тільки 2 або 4 вивода з 1024, а поєднання з кожним наступним виводом при зварюванні здійснюється автоматично відповідно до заданої програми з необхідною точністю, яка для сучасних установок становить $\pm 2,5\div 3$ мкм. При цьому кількість точок зварювання в програмі може досягати десятків тисяч.

Другим не менш важливим фактором при виготовленні ДМ є трудомісткість. Процес створення одного зварного з'єднання методом УЗ-зварювання складається з двох етапів. Першим етапом є безпосередньо процес зварювання (тривалість зварювального імпульсу), який з урахуванням застосовуваних матеріалів і конструктивних особливостей розроблюваних ДМ, може становити 0,01-0,1 с і не значно змінюється для установок з ручним керуванням і автоматичних установок. Другий етап – процес позиціонування та суміщення зварювального інструменту (електрода) з областю зварювання в значній мірі визначає трудомісткість при зварюванні і суттєво відрізняється для установок з ручним керуванням і автоматичних установок. Досвід виготовлення ДМ з ГЗЕ на основі лакофольгових діелектриків показує, що в залежності від геометричних розмірів і товщини виводів цей етап при зварюванні на установках з ручним керуванням або напівавтоматичних

установках, може становити від 2 до 10 с (наприклад, для виводів розташованих з кроком 200-500 мкм – 2-3 с, з кроком 80-100 мкм – 4-6с, з кроком 45-60 мкм – 8-10 с). У разі застосування автоматичних установок тривалість другого етапу становить всього 0,06-0,3 с.

З огляду на час зварювання для установок з ручним керуванням і автоматичних установок та кількості зварних з'єднань в ДМ, що становить від 4000 (для односенсорного ДМ) до 8000 (для двосенсорного ДМ), час тільки зварювання одного ДМ на установці з ручним керуванням становитиме не менше 9 годин, а на автоматичній установці – всього 30 хвилин, тобто трудомісткість в разі застосування автоматичних установок в 18 разів нижче. Але при цьому слід враховувати той факт, що не тільки зварювання визначає трудомісткість складання детекторних модулів, а необхідно враховувати ще й інші операції (суміщення, приклейка, захист зварних з'єднань і т.п.), які також вимагають значних витрат часу.

Беручи до уваги час зварювання на установках з ручним керуванням і автоматичних установках серійне виробництво ДМ в необхідній кількості при забезпеченні високого ступеня надійності можливе тільки за умови використання автоматичної зварювальної установки та використання безруйнівних методів контролю зварних з'єднань.

Для виготовлення ДМ РВ на основі дводностороннього мікрострипового сенсору було розроблено технологічну послідовність його складання (з застосуванням СОФ-технології), що наведена на рисунку 4.2 та таблиці Ж.1 (додаток Ж). Також у таблиці Ж.1 наведено технологічне обладнання для виконання основних технологічних операцій.

Розроблена послідовність була використана при складанні макетів і експериментальних зразків ДМ для експерименту СВМ [4.7-4.16].

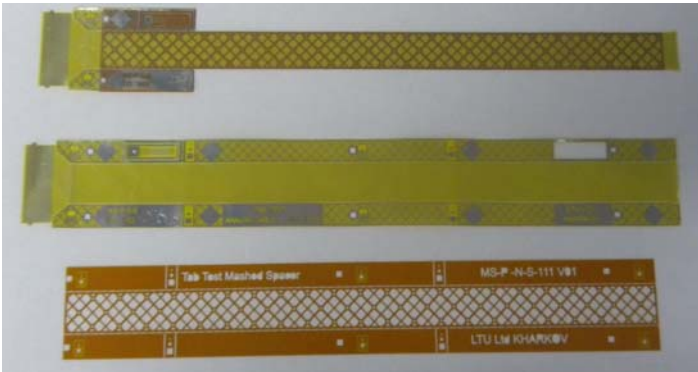

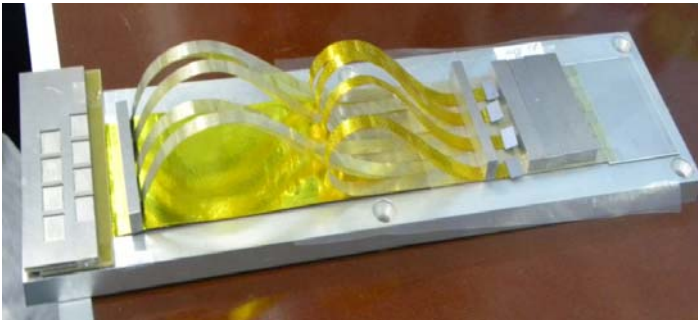


- а)  Складання аналогових гнучких плат з прокладками діелектричними (32 од.) і плат екрануючих Р та N-типу (2 од.)
- б)  Складання аналогових гнучких плат з мікросхемами (16 од.)
- в)  Складання плат обробки інформації для Р і N сторони
- г)  Складання аналогових гнучких плат з N-стороною сенсора
- д)  Складання аналогових гнучких плат з Р-стороною сенсора

Рисунок 4.2 – Технологічна послідовність складання ДМ

4.2 Визначення оптимальних режимів УЗ-зварювання ГЗЕ та безруйнівний метод контролю

Гнучкі з'єднання звичайно використовуються як в виробках, що вимагають динамічних функцій, таких як струменеві принтери, так і в плоских структурах, таких як карти пам'яті і дисплеї [4.17, 4.18]. Зазвичай у якості стандартного матеріалу гнучких плат для автоматичного зварювання використовують поліімід в якості основи та мідь в якості провідників.

Однак, надзвичайно легкі конструкції можуть бути реалізовані за допомогою тонкого алюмінію замість міді. Крім того, будучи м'якше, ніж мідь, алюміній, дозволяє делікатний процес зварювання з низькою силою навантаження на інструмент і меншою вихідною потужністю УЗ-генератора, навіть при кімнатній температурі [4.19]. Таким чином, алюмінієва СОF-технологія є привабливою технологією для мініатюрних компонентів з критичними термо-механічними характеристиками. Слід зазначити, що процес УЗ-зварювання забезпечує безсвинцеві сполуки.

Оптичні методи, що забезпечують безруйнівні засоби для гарантування якості в процесі виробництва мікроелектроніки, як правило, здійснюються пристроями 2D-візуалізації [4.20-4.21]. Скануючий інтерферометр білого світла (SWLI) – це швидкий і точний метод 3D-контролю [4.22]. Цей метод може виявитися корисним у випадках, коли з'єднання є оптично доступними після зварювання. Метою даної роботи є перевірка застосовності SWLI для експрес-контролю якості зварних з'єднань. Single-point TAB (spTAB, одноточкове УЗ-зварювання) було використано для складання дослідних зразки для дослідження на розрив і оптичного 3D дослідження та були використані для встановлення кореляції між оптично виміряною висотою зварних з'єднань і силою руйнування виміряної під час тестів.

4.2.1 Скануючий інтерферометр білого світла

Широкопasmовова інтерференція може бути використана для топографічних характеристик механічних і електричних компонентів [4.23]. Останнім часом використання джерела білого світла замість вузькоспasmового лазера для цих цілей збільшилося. Найголовнішою властивістю інтерферометра білого світла є той факт, що широкопasmове джерело дозволяє позбутися неоднозначності фази, властивих лазерними інтерферометрами. Впровадження нових джерел світла, наприклад синіх та білих світлодіодів, використання швидких цифрових камер, здатних захоплювати порівняно великі області поверхні зразка і збільшення обчислювальної потужності комп'ютерів прискорило інтерес до розробки автоматизованих інтерференційних профілометрів білого світла з високим дозволом і коротким часом вимірювання.

Прилад, який використовувався під час досліджень був створений в університеті Гельсінкі [4.24].

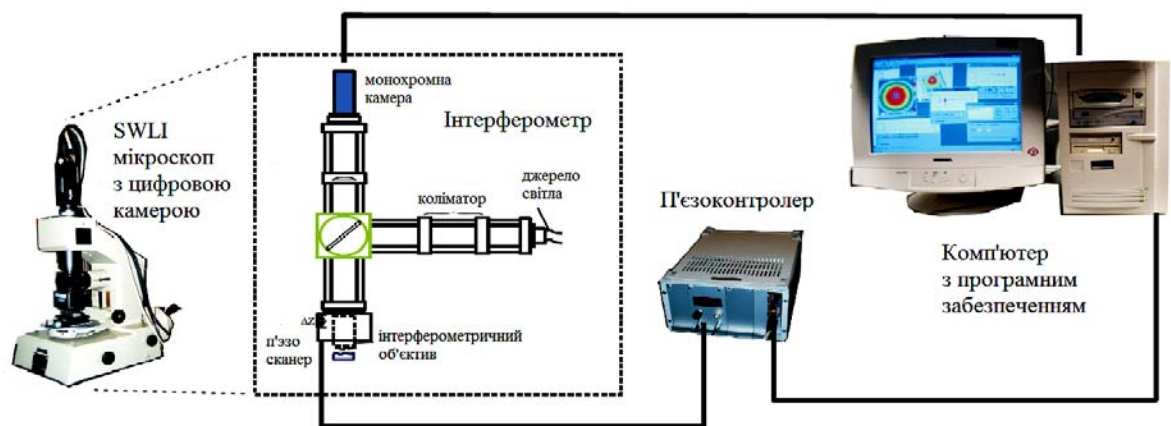


Рисунок 4.3 – Скануючий інтерферометр білого світла (SWLI)

На рисунку 4.3 зображено схематичне креслення пристрою. Інтерференційні смуги на поверхні були створені за допомогою об'єктиву мікроскопа (Nikon 10x або 50x), що обладнані вбудованим інтерферометром марки Mitau. Для підсвічування білого світла використовувались кварцові галогенні лампи (проекційний світильник, Philips 6958). П'єзоелектричний

сканер переміщував об'єктив в Z-напрямку з кроком 68 нм. На кожному кроці інтерференційний образ відображався цифровою камерою (Pulnix, типу ТМ 6710, 120 кадрів/с).

Таким чином, спосіб вимірювання рельєфу поверхні полягає у визначенні положення максимуму видимості одночасно для масиву точок зображення. Також було розроблено програмне забезпечення для інтерферометра, яке забезпечувало управління приладом та процедурою захоплення, тобто конвертування даних зображення для їх представлення в різних графічних форматах.

4.2.2 Одноточкове автоматичне зварювання

Тонкі алюмінієві провідники на поліімідній гнучкій платі виступали в якості провідників досліджуваних компонентів [4.25, 4.26]. Провідники можуть бути приєднані ультразвуковим зварюванням до алюмінієвих КП на кремнієвих кристалах або на іншу гнучку плату через витравлені отвори в полііміді.

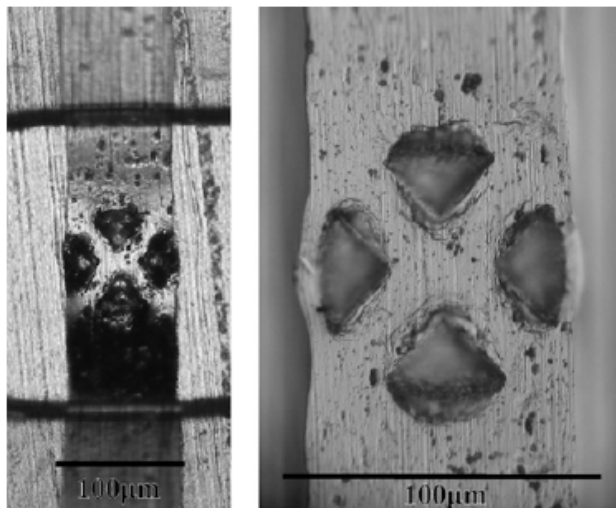


Рисунок 4.4 – Вигляд зварного з'єднання:

- а) Х-подібне одноточкове УЗ-з'єднання;
- б) збільшене зображення відбитку зварювального інструмента

В дослідженні був розглянутий випадок з'єднання алюмінієвих провідників товщиною 14 мкм (матеріал ФДИ-А-24) та шириною 80 мкм з КП гнучкої плати з товщиною алюмінію 20 мкм, товщиною полііміду 30 мкм (матеріал ФДИ-А-50).

Зображення одноточкового УЗ-з'єднання наведено на рисунку 4.4.

4.2.3 Обладнання для одноточкового автоматизованного зварювання

Для УЗ-зварювання були використані полуавтоматична установка (Kulicke&Soffa 4523AD) та автоматична установка (FK Delvotec 6400) з частотою УЗ-генератора 60 кГц. З установкою були проведені незначні доопрацювання – знято кріплення котушки з дротом і замінений зварювальний інструмент на спеціальний для одноточкового зварювання (№ 1183-02205B-750-TIC-SDFA, Gaiser Tools Company) [4.27]. У ході експерименту змінювалися три різних параметри процесу зварювання, в тому числі зусилля навантаження зварювального інструменту (BF), вихідна потужність УЗ-генератора (USP) та час зварювання (UST). Залежність між фізичними величинами та відносними одиницями зварювальної установки для усіх параметрів процесу зварювання: зусилля навантаження зварювального інструменту ($91,5x + 92,8 \pm 5$ мН); час зварювання ($10,3x + 31,2 \pm 5$ мс); вихідна потужність УЗ-генератора ($0,13x$ Вт), де x -значення відповідного параметра.

4.2.4 Механізм руйнування зварних з'єднань

Гарне зварне з'єднання витримує тягове зусилля більше ніж сам вивід що зварюється. Під час зсуву виводу, це призводить до розриву виводу, як правило, на кордоні між звареним з'єднанням та рештою вивода. Для дротяних зварних з'єднань таке руйнування називається "зламати каблук" [4.28]. Для досліджуваних зварних з'єднань плоских виводів для такого типу руйнування прийнято термін "розрив". Зазвичай виникають два механізми розриву зварних з'єднань (рисунок 4.5): "відшарування" та "розрив". Під час зварювання гнучких виводів, на відміну від дроту, може спостерігатися часткове відшарування, або частковий розрив [4.28].

У першому випадку кількість матеріалу звареної частини виводу, що залишалася на КП, як правило, була менше, ніж 20% від початкового об'єму

зварного з'єднання (рисунок 3, а). У другому випадку був великий залишок зварного з'єднання в центральній частині КП (рисунок 3, б).

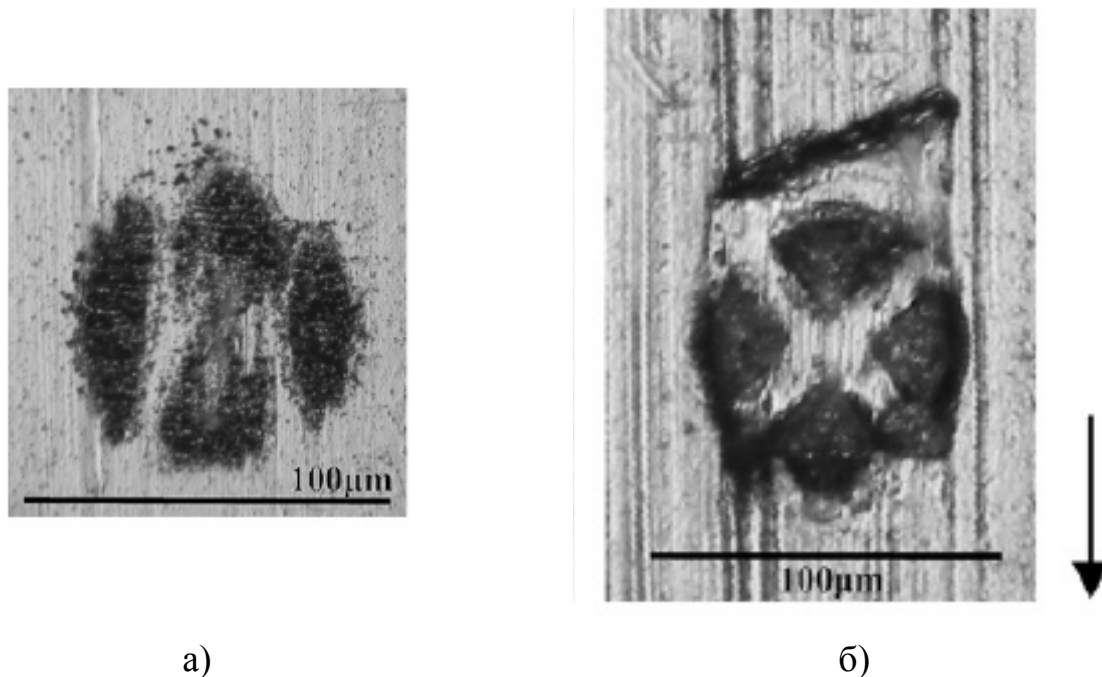


Рисунок 4.5 – Тип руйнування зварних з'єднань плоских виводів:

а) "відшарування"; б) "розрив"

4.2.5 Якість зварних з'єднань

Основним показником якості зварного з'єднання є його міцність. До міцності зварних з'єднань широко застосовуються вимоги стандарту MIL–STD 883F [4.29]. Відповідно до цього стандарту мінімально допустима міцність зчеплення для прямокутного алюмінієвого виводу не повинна перевищувати 40 мН, але враховуючи критичність відмов зварних з'єднань у досліджуємих ДМ, приймаємо значення мінімальної міцності зварних з'єднань 85 мН.

Якісне зварне з'єднання має бути без тріщин, викликаних процесом УЗ-зварювання (рисунок 4.4, а). Максимальна ширина зварних з'єднань не повинна

перевищувати ширину виводу на 10-20. Міцність зварних з'єднань (зусилля руйнування) має бути не менше 85 мН.

4.2.6 Факторний експеримент

Для планування експериментів і використання методів поверхонь відгуку (RS-методів) існують комерційні програми, [4.30, 4.31]. В цьому дослідженні застосовувалося програмне забезпечення компанії MathWorks [4.32], з метою зменшення витрат на програмне забезпечення і поліпшення ТП по забезпеченню якості. Була розроблена програма у пакеті Matlab для аналізу результатів та їх візуалізації. Для перевірки розробленого алгоритму був використаний статистичний пакет Matlab Toolbox.

Факторний експеримент включає в себе контрольовані зміни вхідних параметрів процесу для того, щоб при мінімальній кількості вимірювань математично визначити передатну функцію системи. Вхідні параметри процесу зварювання іменуються факторами, в той час як виходи – відгуками: зусилля руйнування (Pull Force – PF), висота зварного з'єднання (Bond Height – BH).

Фактори, як правило, оцінюються в два або більше рівнів. На рисунку 4.6 показана схема типового процесу УЗ-зварювання. Як і в інших мікроелектронних процесах, дослідження параметрів УЗ-зварювання можуть проводитися з використанням теорії повного факторного експерименту [4.31].



Рисунок 4.6 – Схема типового процесу УЗ-зварювання

В розробленому експерименті (таблиця 4.1) використовувалися три вхідних фактори (BF, USP, UST) з трьома рівнями кожен (1, 0, +1). Параметри УЗ-зварювання (у машинних одиницях) змінювалися наступним чином: $BF = 0,6 \div 1,2$, $USP = 1,64 \div 2,03$ і $UST = 1,5 \div 3,5$. Ці значення відповідають $BF = 148 \div 203$ мН, $USP = 0,21 \div 0,26$ Вт і $UST = 47 \div 67$ мс (див. п. 4.2.3).

Для визначення оптимальних параметрів зварних з'єднань платформа Simulink [4.32] представляє набір з 12 експериментальних серій. Для кожного набору параметрів УЗ-зварювання було виконано по 15 зварних з'єднань, які були перевірені за допомогою SWLI (вимірювання висоти зварних з'єднань) і перевірена міцність зварних з'єднань їх руйнуванням. Всього для визначення поверхні відгуку було зроблено 180 індивідуальних зварних з'єднань. Крім того було виконано 30 зварних з'єднань для перевірки оптимального вибору параметрів.

Таблиця 4.1 – Результати планування експерименту за допомогою пакету Matlab Simulink toolbox mbcmodel

№ серії	Параметри УЗ-зварювання								
	Simulink (1, 0, +1)			у машинних одиницях			в одиницях СІ		
	BF	USP	UST	BF	USP	UST	BF, мН	USP, Вт	UST, мс
1	-1	-1	-1	0,60	1,64	1,50	147,70	0,21	46,65
2	0	1	0	0,90	2,03	2,50	175,15	0,26	56,95
3	0	0	1	0,90	1,84	3,50	175,15	0,24	67,25
4	0	-1	-1	0,90	1,64	1,50	175,15	0,21	46,65
5	-1	-1	0	0,60	1,64	2,50	147,70	0,21	56,95
6	1	1	1	1,20	2,03	3,50	202,60	0,26	67,25
7	1	1	-1	1,20	2,03	1,50	202,60	0,26	46,65
8	-1	0	-1	0,60	1,84	1,50	147,70	0,24	46,65
9	1	0	0	1,20	1,84	2,50	202,60	0,24	56,95
10	-1	1	1	0,60	2,03	3,50	147,70	0,26	67,25
11	0	0	0	0,90	1,84	2,50	175,15	0,24	56,95
12	1	-1	1	1,20	1,64	3,50	202,60	0,21	67,25

Після процесу УЗ-зварювання кожне зварне з'єднання було відскановано інтерферометром білого світла для отримання 3D профілю. На рисунку 4.7 профіль типового зварного з'єднання.

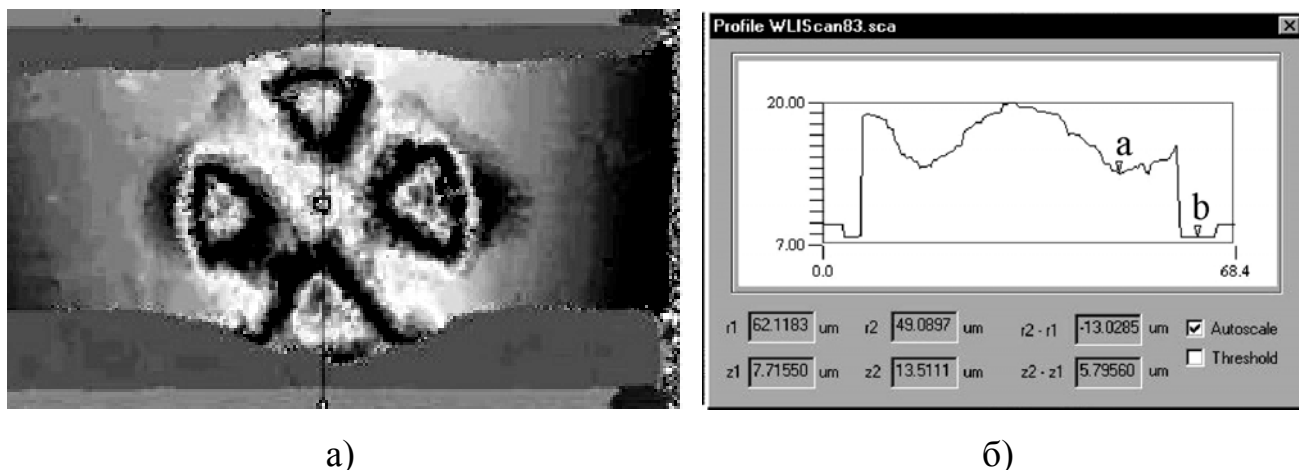


Рисунок 4.7 – Зварне з'єднання (а) та профіль зварного з'єднання (б)

Висота зварних з'єднань була визначена як відстань між базовою (КП) і середня Z-позиція кінчика інструменту (рисунок 4.8).

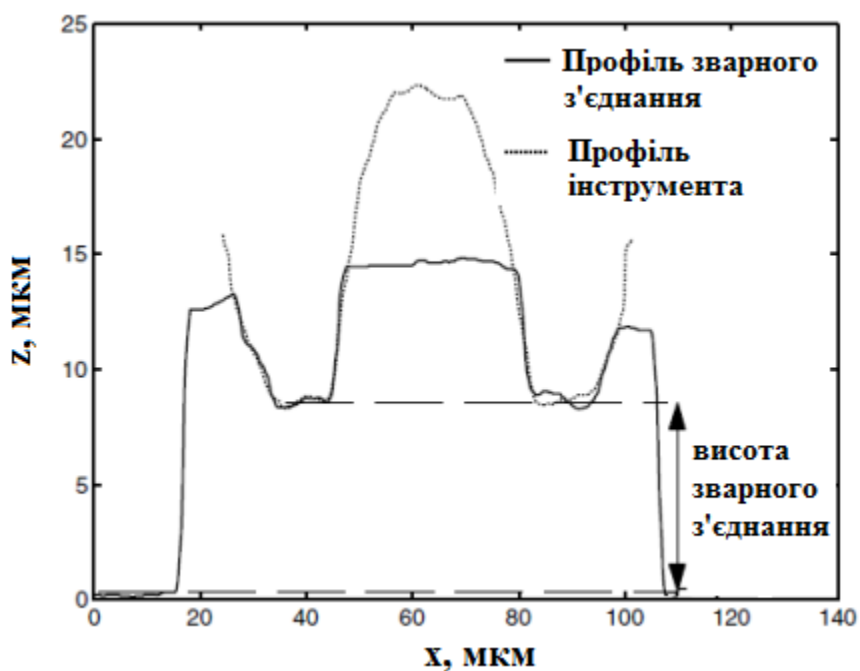


Рисунок 4.8 – Висота зварного з'єднання

Зусилля руйнування вимірювалися з використанням електронних вагів (Precisa 1620C, Precisa Instrument AG, Швейцарія). Зсув тестових виводів було виконано стандартним гаком (F&K Delvotec Pull-Haken WEP-00001). Гак підіймався зі швидкістю $(4,78 \pm 0,08 \text{ мкм/с})$ під кутом щодо поверхні зварного з'єднання $(5 \pm 0,5^\circ)$.

Отриманий набір даних було проаналізовано за допомогою інструментів RS toolbox [4.32]. У інтерактивному графічному інтерфейсі rstool надана можливість знайти поверхні відгуку та відповідні параметри для використовуваних факторів (BF, USP, UST) з довірчим інтервалом 95%. Зв'язок між параметрами УЗ-зварювання та силою руйнування і висотою зварних з'єднань був знайдений шляхом встановлення залежності параметрів УЗ-зварювання і відповідного повного квадратичного полінома. Прогнозоване зусилля руйнування (міцність зварного з'єднання) згідно розробленої моделі:

$$PF = a_1 + a_2 \cdot BF + a_3 \cdot USP + a_4 \cdot UST + a_5 \cdot BF \cdot USP + a_6 \cdot BF \cdot UST + a_7 \cdot USP \cdot UST + a_8 \cdot BF^2 + a_9 \cdot USP^2 + a_{10} \cdot UST^2. \quad (4.1)$$

Аналогічна залежність, але з іншими коефіцієнтами, описує прогнозовану висоту зварного з'єднання:

$$BH = b_1 + b_2 \cdot BF + b_3 \cdot USP + b_4 \cdot UST + b_5 \cdot BF \cdot USP + b_6 \cdot BF \cdot UST + b_7 \cdot USP \cdot UST + b_8 \cdot BF^2 + b_9 \cdot USP^2 + b_{10} \cdot UST^2. \quad (4.2)$$

4.2.7 Результати факторного експерименту

Сукупність експериментальних параметрів показана в таблиці 4.1, а отримані результати вимірювання висоти та зусилля руйнування зварних з'єднань наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Експериментальні результати вимірювання висоти та зусилля руйнування зварних з'єднань

№ серії	Середнє значення зусилля руйнування, мН	Відхилення значення зусилля руйнування, ± мН	Середнє значення висоти зварного з'єднання, мкм	Відхилення значення висоти зварного з'єднання, ± мкм
1	135,62	29,76	8,08	1,09
2	146,71	29,02	6,77	0,98
3	146,45	22,40	7,27	0,98
4	137,43	18,56	8,33	0,73
5	131,64	17,46	8,27	0,76
6	149,2	19,33	5,58	0,85
7	100,02	27,15	7,94	0,70
8	123,00	15,61	8,43	0,77
9	143,89	24,63	7,21	1,37
10	120,59	22,94	7,55	0,58
11	150,03	31,14	7,67	0,91
12	139,84	12,53	7,14	0,88

Після завантаження даних з таблиці 4.2 в Matlab rstool і застосування до них повного квадратичного полінома була отримана залежності між параметрами УЗ-зварювання і зусиллям руйнування та висотою зварних з'єднань (таблиця 4.3). Діагностичні параметри моделі R^2 вказують на те, що модель відтворюється майже у 99% випадків.

При побудові цих моделей в контурних діаграмах можна визначити УЗ-параметри для зварних з'єднань з найбільшим зусиллям руйнування. Базуючись на результатах, наведених на рисунках 4.9-4.11, максимальне зусилля руйнування близько 155 мН досягається з наступними параметрами: навантаження інструменту 1 од. (185 мН); потужність УЗ-генератора 1,91 од.

(0,25 Вт) та час зварювання 3 од. (65 мс). Як можна помітити, вибір параметрів УЗ-зварювання поблизу цих значень гарантує, що всі зварні з'єднання є більш міцними, ніж мінімально необхідно. Зокрема, вибране порогове значення 85 мН досягається в широкому діапазоні параметрів.

Таблиця 4.3 – Залежності між параметрами УЗ-зварювання і зусиллям руйнування та висотою зварних з'єднань

Параметри	Коефіцієнт	Зусиллям руйнування	Коефіцієнт	Висота
Постійна	a_1	-16,90	b_1	-18,23
BF	a_2	179,03	b_2	3,49
USP	a_3	141,42	b_3	27,42
UST	a_4	-37,46	b_4	1,96
BF·USP	a_5	0,03	b_5	-1,91
BF·UST	a_6	34,96	b_6	-1,65
USP·UST	a_7	40,71	b_7	-1,23
BF ²	a_8	-139,49	b_8	1,54
USP ²	a_9	-69,71	b_9	-6,81
UST ²	a_{10}	-12,35	b_{10}	0,26
R ²		0,9895		0,9907

Висота зварних з'єднань, що відповідає тим параметрам, які забезпечують максимальне зусилля руйнування ($6,91 \pm 1,80$ мкм). Хоча максимальна міцність досягається при зазначених вище параметрах, був обраний інший набір параметрів, тому що необхідно дотримуватися чотирьох додаткових міркувань, а саме: якщо зварне з'єднання занадто глибоке, або якщо потужність УЗ-генератора надто висока, поверхня КП може бути пошкодженою [4.19]; якщо зварні з'єднання є занадто широкими, це може призвести до короткого замикання сусідніх зварних з'єднань; час зварювання має важливе значення для

підвищення ефективності виробництва (враховуючи що чутливість відгуку до зміни часу зварювання менше, ніж для двох інших параметрів); висока потужність ультразвуку викликає тріщини в зварних з'єднаннях [4.19], тому потужність УЗ-генератора повинна бути зведена до мінімуму.

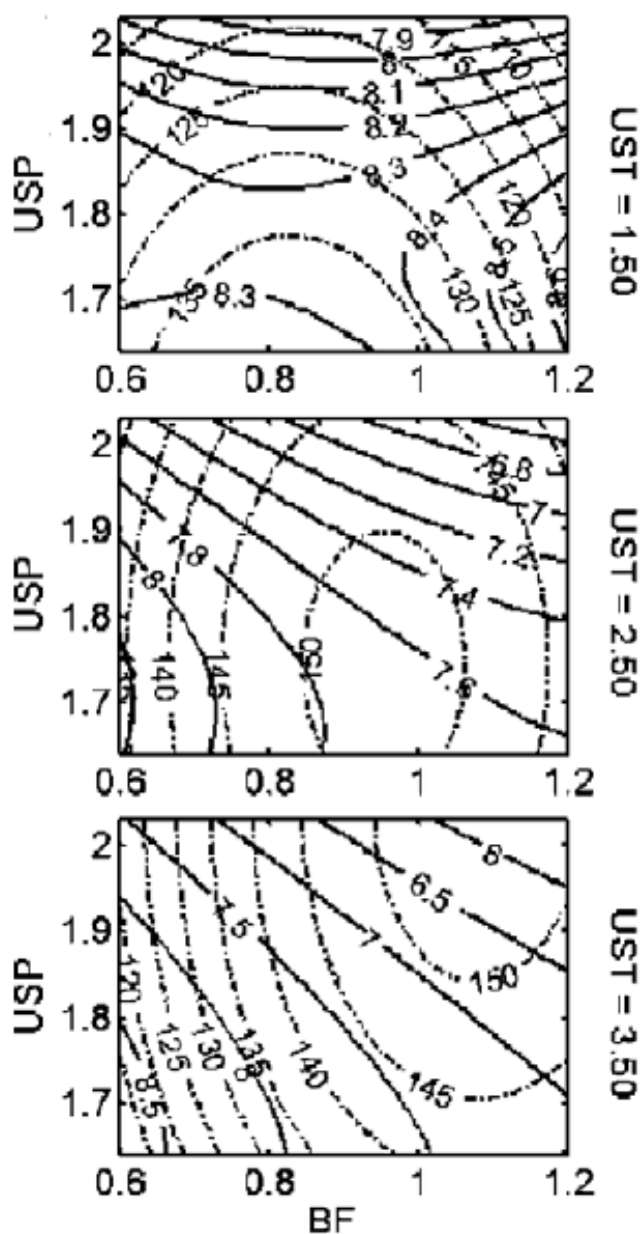


Рисунок 4.9 – Зусилля руйнування (пунктирна лінія) та висота зварного з'єднання (суцільна лінія) за фіксованих значень часу зварювання

Максимальне зусилля руйнування, з врахуванням наведених вище міркувань, були обрані наступні оптимальні параметри: навантаження інструменту 1 од. (185 мН); потужність УЗ-генератора 1,91 од. (0,25 Вт) та час зварювання 2,5 од. (60 мс), які відповідають висоті зварного з'єднання ($7,22 \pm 1,80$ мкм) і зусиллю руйнування (149 ± 46 мН). З рисунків 4.9-4.10 можна зробити висновок, що чутливість зусилля руйнування є найбільшою для зміни навантаження інструменту (зміна PF на 8,5% при зміні BF на 10%) і трохи менше для зміни потужність УЗ-генератора та часу зварювання (зміна PF на 6,5% і 5,5% при зміні UST та USP на 10%).

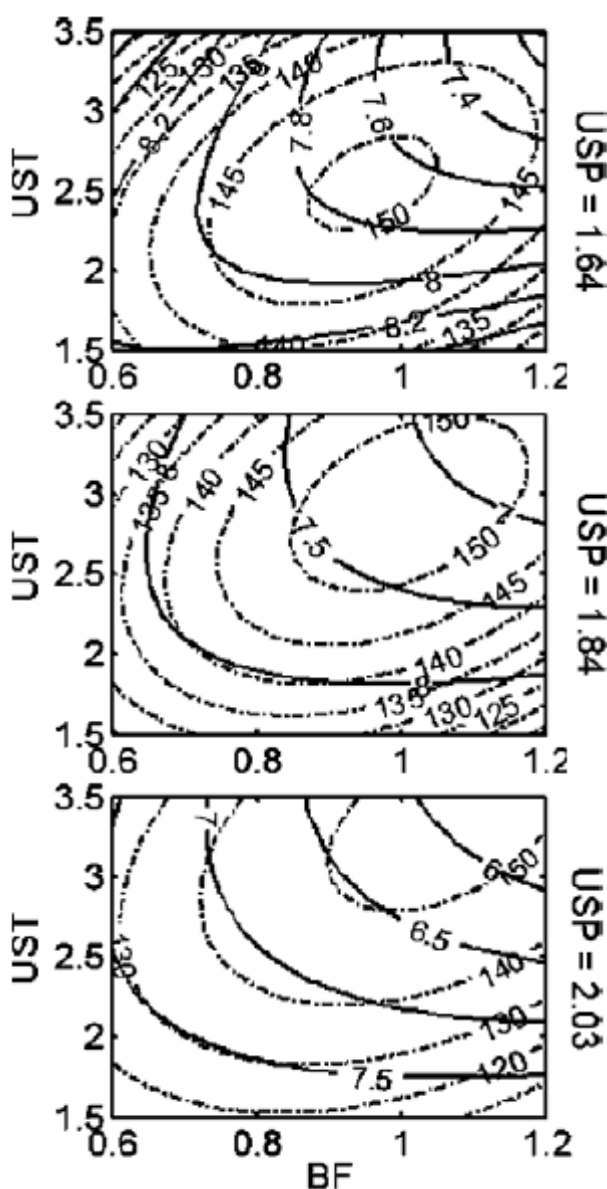


Рисунок 4.10 – Зусилля руйнування (пунктирна лінія) та висота зварного з'єднання (суцільна лінія) за фіксованих значень потужності УЗ-генератора

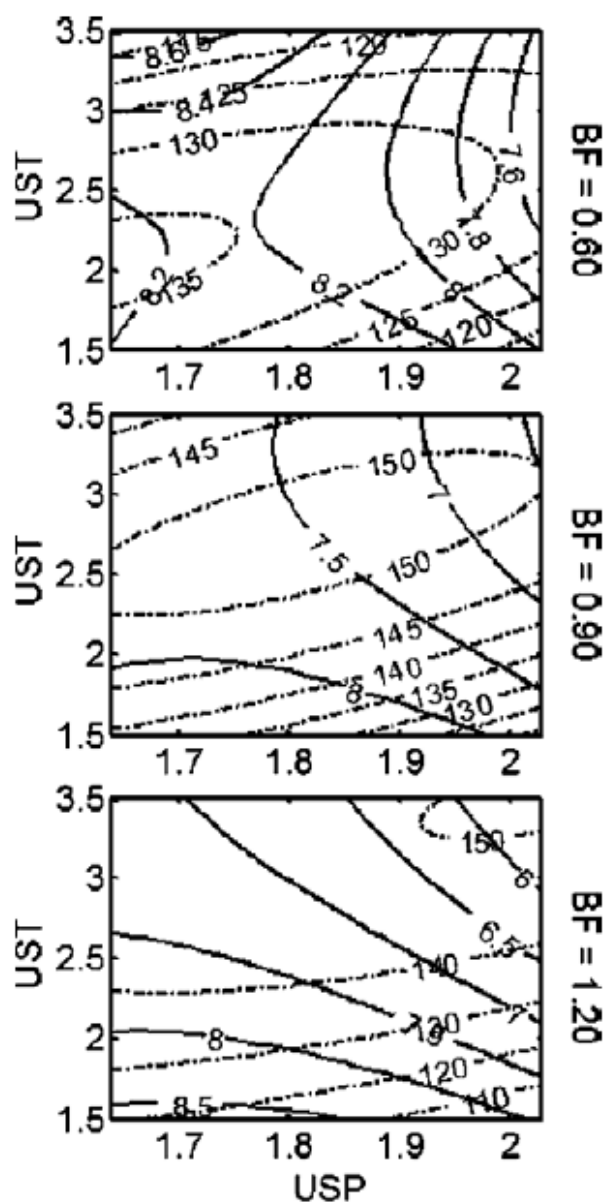
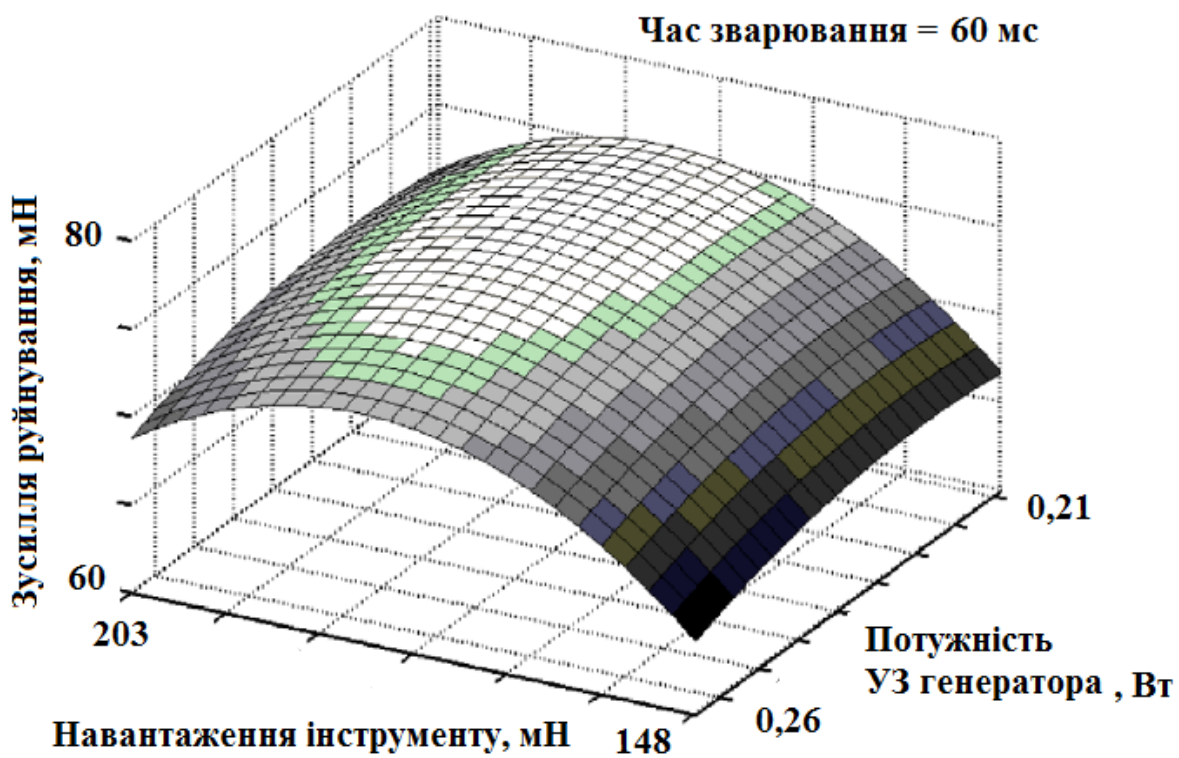
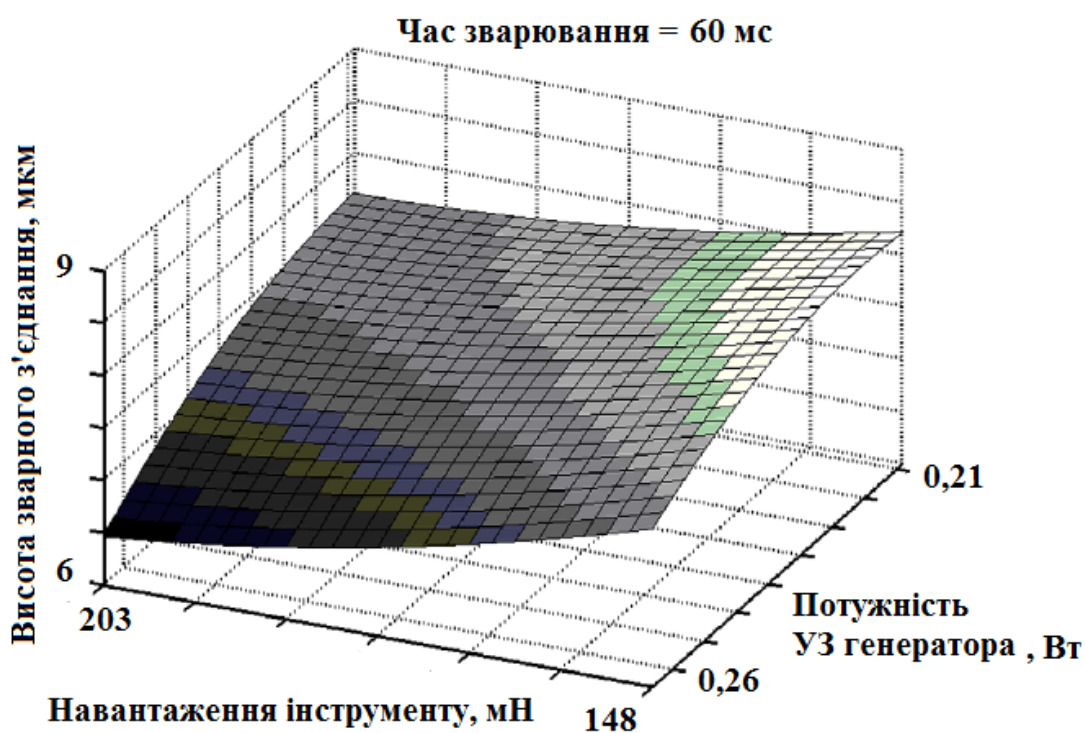


Рисунок 4.11 – Зусилля руйнування (пунктирна лінія) та висота зварного з'єднання (суцільна лінія) за фіксованих значень навантаження інструменту

Отримані 3D залежності зусилля руйнування з'єднань і висоти з'єднань від основних параметрів процесу зварювання представлено на рисунку 4.12.



а)



б)

Рисунок 4.12 – Залежності зусилля руйнування з'єднань (а) та висоти з'єднань (б) від основних параметрів процесу УЗ-зварювання

Для підтвердження результатів, отриманих методом поверхні відгуку, була проведена перевірка, яка складалась з 30 зварних з'єднання. Ці зварні з'єднання були зроблені з використанням оптимальних параметрів. Після чого були виміряні висоти та зусилля руйнування зварних з'єднань. Для перевірки застосовувались чотири різних ГЗЕ.

На рисунку 4.13 наведено результати перевірки: всі зварні з'єднання з висотою ($7,22 \pm 1,80$ мкм) мають зусилля руйнування більше 103 мН, що відповідає результатам теоретичних досліджень.

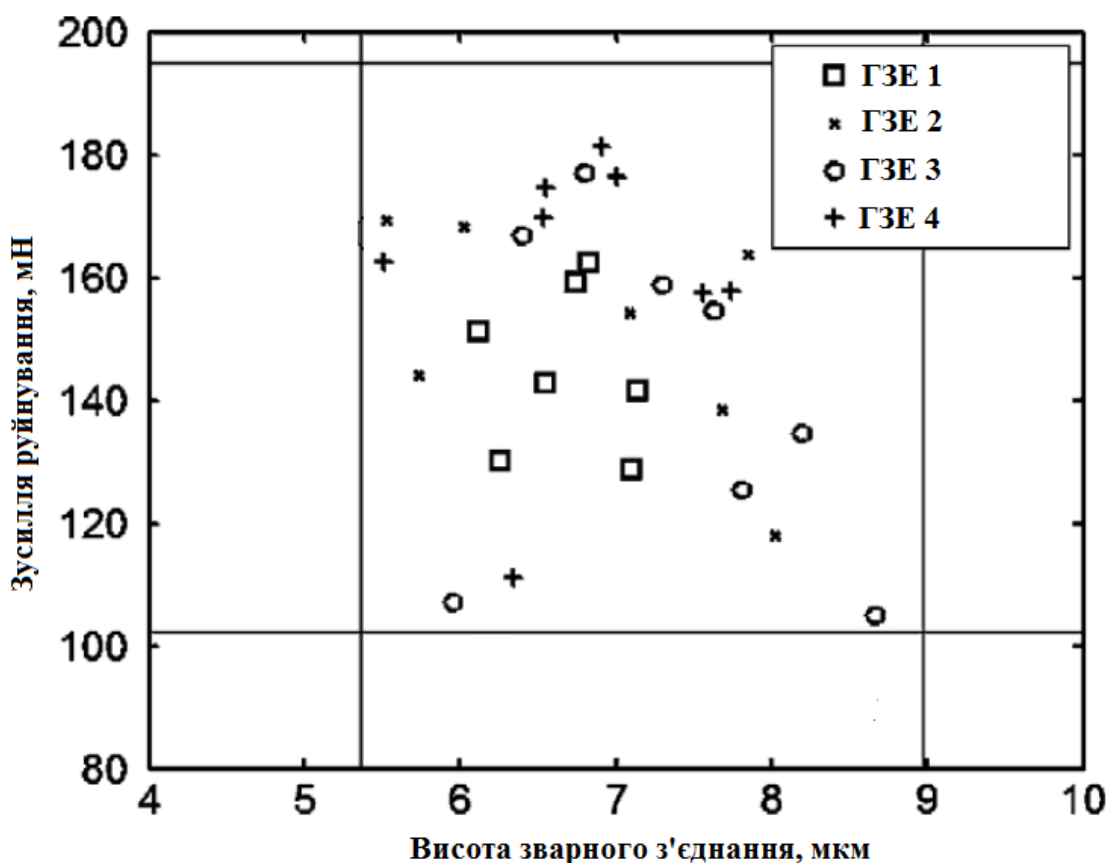


Рисунок 4.13 – Результати перевірки розробленої експериментально-статистичної моделі

Результати свідчать про те, що скануючий інтерферометр білого світла здатний оцінювати якість одоточкових зварних з'єднань. Це особливо важливо під час УЗ-зварювання компонентів детекторних модулів. Безруйнівний SWLI-

метод є економічний та швидкий і може застосовуватися для поточного контролю якості в процесі складання ГЗЕ УЗ-зварюванням.

4.3 Висновки за розділом

На підставі результатів досліджень, викладених у даному розділі, можна зробити наступні висновки:

1. Трудомісткість складання ДМ для експерименту СВМ в разі застосування автоматичних установок може бути знижена більш ніж в 10 разів.

2. Використовуючи план експерименту та статистичні інструменти можна оптимізувати параметри процесу одноточкового УЗ-зварювання з використанням відносно невеликої кількості зварних з'єднань.

3. За рахунок вимірювання висоти зварних з'єднань за допомогою скануючого інтерферометру білого світла, можна безруйнівним методом забезпечити контроль їх якості. Зокрема, для досліджуваних зразків, при висоті зварного з'єднання ($7,22 \pm 1,80$ мкм) забезпечувалася міцність з'єднань понад 85 мН.

РОЗДІЛ 5 ВИПРОБУВАННЯ ДОСЛІДНИХ ЗРАЗКІВ МІКРОЗБІРОК НА НАДІЙНІСТЬ

5.1 Стан проблеми дослідження надійності. Обґрунтування переліку і обсягу випробувань мікробірок

Все різноманіття досліджень надійності спрямоване на вирішення трьох наступних проблем:

- оцінка та прогнозування надійності виробів на етапах проектування (апріорні методи);
- експериментальна оцінка показників надійності, тобто підтвердження проектного рівня надійності за результатами випробувань і експлуатації (апостеріорні методи);
- вжиття заходів щодо досягнення і забезпечення заданого рівня надійності шляхом оптимізації (оптимізаційні задачі).

Основним методом, який дозволяє визначити реальний рівень надійності об'єктів, представляється оцінка показників надійності об'єктів за результатами випробувань (експлуатації). При цьому достовірність оцінки показників надійності визначається обсягом статистичних даних про відмови, який забезпечується відповідною кількістю зразків, поданих на випробування або перебувають під наглядом, а також тривалістю випробувань (спостережень).

Завдання встановлення закономірностей виникнення відмов та оцінки кількісних показників надійності може вирішуватися двома шляхами. У разі використання імовірнісних концепцій відмови розглядаються як абстрактні випадкові події, а різноманітні фізичні стани виробу зводяться до двох станів: справності і несправності.

Методологія отримання кінцевих результатів про надійність виробів полягає в тому, що на підставі випробувань або експлуатації отримують статистику відмов виробів. Потім вибирають на підставі відомих статистичних

критеріїв згоди модель розподілів випадкових величин, розроблену в теорії ймовірностей, беруть її в якості теоретичної моделі розподілу ймовірностей безвідмовної роботи (моделі надійності) і на її базі визначають необхідні кількісні показники надійності.

Необхідно відзначити, що переважно розвинені статистичні методи оцінки надійності, що ввійшли в основні нормативні документи, недостатньо ефективні при оцінці надійності знову розроблювальних високонадійних або одиничних виробів. На практиці, як правило, має місце ситуація, коли на випробування (спостереження в процесі експлуатації) може бути представлена мала вибірка виробів, яка не забезпечує достатнього обсягу статистичних даних про відмови, що дозволяє в рамках суворого статистичного підходу оцінити шукані показники надійності. Більш того, поширеною видається ситуація, коли протягом тривалого часу взагалі не спостерігається відмов.

Другий шлях встановлення кількісних показників надійності заснований на вивченні механіко-фізико-хімічних властивостей і деяких фізичних параметрів виробів, що характеризують стан останніх, з використанням статистичних методів. При дослідженні надійності виробів електронної техніки (ВЕТ) найбільш поширений метод "фізики відмов", який полягає у встановленні аналітичних залежностей між показниками надійності і швидкістю протікання фізико-хімічних процесів на підставі детерміністичних кінетичних рівнянь, в якості яких зазвичай використовують співвідношення Арреніуса, рівняння дифузії й ін.

При зростаючій ступені інтеграції ВЕТ і підвищенні надійності елементів, підтвердження надійності виробів методом повних випробувань на напрацювання в нормальних умовах неможливе. Застосування традиційних статистичних методів оцінки якості та надійності виробів електронної техніки підвищеної функціональної складності (ВЕТ ПФС) не має практичного сенсу через складне випробувальне обладнання, надійність якого сумірна з надійністю випробовуваних ВЕТ ПФС, а також у зв'язку з обмеженим обсягом

випуску ВЕТ ПФС, сумірного з кількістю виробів для випробувань на надійність і великих енергетичних і економічних витрат.

Одним з напрямків вирішення даної проблеми є пошук шляхів удосконалення методів оцінки, зокрема, проведення прискорених випробувань у форсованих режимах і застосування розрахунково-експериментальних методів з використанням результатів форсованих випробувань [5.1-5.17]. При цьому важливе значення набуває використання апріорної інформації про процеси деградації елементів, з яких складаються ВЕТ.

В даний час випробування надійності виробів базуються на дослідженні механізму відмов, для чого проводяться невеликі за обсягом прискорені випробування та випробування на руйнування з метою вивчення особливостей деградаційних процесів, виявлення причин і механізмів відмов, розробки практичних заходів для виключення або зменшення відмов. Прискорене накопичення інформації базується на тій обставині, що в більш важких умовах навантаження відмови відбуваються частіше. До таких важких умов відносяться: високотемпературні режими, термоциклювання, електричні навантаження, механічні прискорення, вібрації, вплив вологості, вплив іонізуючих випромінювань. Для успішного проведення випробувань на надійність необхідно, щоб механізм виникнення відмов при важких умовах був близький до фізичного механізму відмов при нормальних умовах. Тільки тоді можливий перерахунок статистичних даних, отриманих у важких умовах, у показники надійності виробів при нормальних умовах експлуатації.

Побудова методів прискорених форсованих випробувань (ПФВ) – складна і комплексна проблема, яка потребує вирішення багатьох взаємопов'язаних завдань, до яких відносяться:

- розробка методик попередніх досліджень;
- збір апріорної інформації про об'єкт випробувань;
- вибір форсованого режиму або режимів;

- встановлення способу розрахунку показників надійності за результатами форсованих випробувань;

- оцінка точності та достовірності отриманих результатів.

Режими ПФВ необхідно вибирати з урахуванням кінетики зміни характеристик, діапазону робочих температур і максимальної величини навантажень, що не перевищують гранично допустимі.

Проблемі прискореної оцінки надійності ВЕТ присвячена велика кількість публікацій [5.1-5.17]. Проте в кожному конкретному випадку, виходячи з періоду життєвого циклу виробу, конкретних умов експлуатації, особливості конструкції, недостатності інформації про процеси деградації, необхідно правильно вибирати той чи інший метод прискореної оцінки надійності.

Метою досліджень роботи, що описана в даному розділі є:

- вибір методу прискорених форсованих випробувань;
- обґрунтування режимів випробувань;
- дослідження за допомогою прискорених форсованих випробувань надійності гібридних мікрозбірок, що входять до складу детекторних модулів для міжнародного експерименту ALICE;

- експериментальна оцінка довговічності виробів;
- підтвердження відповідності мінімального значення напрацювання виробу до відмови терміну експлуатації.

Для досліджень використані мікрозбірки детекторного модуля, режими експлуатації яких задані технічними вимогами. Відомі такі умови експлуатації виробів [5.18, 5.19]:

- температура роботи пристрою – плюс 20°C;
- відносна вологість – 45-65%;
- тривалість експерименту ALICE – 10 років (87600 годин);
- інтегральна доза випромінювання за 10 років експерименту – 3 крад ($\sim 3 \cdot 10^{11}$ нейтр/м²).

Дослідні зразки мікрозбірок представляли собою багатошарову плату, отриману методом УЗ-зварювання і склеюванням трьох гнучких плат на основі алюміній-поліімідного лакофольгового діелектрика, приклеєну до жорсткої вуглепластикової основи THORNEL K1100. На поверхню отриманої гнучко-жорсткої плати монтуються за допомогою приклеювання і ультразвукового зварювання гнучкі носії з навісними резисторами і конденсаторами.

Для оцінки показників надійності мікрозбірок доцільно застосовувати фізико-статистичні методи, які найбільш повно враховують конструктивні особливості гнучких плат, технологію їх виготовлення і види відмов. Дані методи оцінки та прогнозування надійності засновані на детальному дослідженні фізичної природи і причин відмов, а також докладному вивченні структур придатних (що не відмовили) виробів з метою виявлення прихованих дефектів, які можуть призвести до відмов при експлуатації.

Основним завданням фізичного напряму дослідження надійності є вивчення деградаційних процесів в елементах, що визначають надійність пристроїв, побудова фізико-математичної моделі виникнення відмов. Встановлення фізичної моделі починається з вивчення процесів формування елементів і процесів деградації в елементах при дії на останні різних факторів (температура, навантаження, вологість, лінійні прискорення, вібрації та ін). Фізична модель відмови служить основою при виборі контрольованих параметрів, на її основі розробляються програми прискорених випробувань.

5.2 Аналіз фізики та механізмів відмов мікрозбірок

Попередній аналіз причин і природи відмов проводився з метою вибору найбільш ефективних методів побудови моделей деградаційних процесів і відмов, вибору найбільш інформативних планів випробувань для визначення кількісних показників надійності.

Серед причин виникнення відмов важливе місце займає старіння системи. Дійсно, наскільки досконалою не була б конструкція системи і її елементів і технологія їх виробництва, з плином часу матеріали, з яких зроблені елементи і їх з'єднання, зазнають незворотні зміни, які породжуються корозією, зносом, накопиченням деформацій і втоми, дифузією одного матеріалу до іншого, електроміграцією і т. д. В одній системі, навіть в одному елементі, ці процеси взаємодіють, накладаються і, в кінцевому рахунку викликають зміну робочих характеристик. Щоб система в цілому і її елементи були працездатні, робочі характеристики їх повинні лежати в певних межах, які визначаються призначенням системи. Коли робоча характеристика виходить за задані межі, елемент (система) починає працювати незадовільно, і це класифікується як відмова.

Як відомо, відмови виробів електронної техніки поділяються на параметричні ("поступові") і катастрофічні ("раптові"). Параметричні відмови викликаються виходом за межі допуску параметрів – критерію придатності (ПКП). Перебуваючи в стані параметричної відмови ВЕТ, як правило, зберігають свою працездатність, але його вихідні характеристики такі, що можуть призвести до порушення працездатності елемента, підключеного слідом за елементом, що знаходяться в стані параметричної відмови. Катастрофічні відмови викликаються порушенням фізичної структури і припиненням виконання хоча б однієї з основних функцій призначення ВЕТ. Природа параметричних і катастрофічних відмов однакова [5.20]. В її основі лежать незворотні процеси деградації, які відбуваються в матеріалах, з яких виготовлені ВЕТ. Тільки в разі катастрофічної відмови процес деградації в результаті випадкового збігу обставин або протікає дуже швидко або плавно змінює неконтрольований визначальний параметр, який призводить до стрибкоподібної зміни контрольованого параметру, і тому сам факт появи відмов представляється "раптовим". У випадку параметричної відмови

визначальний параметр, що викликає відмову, постійно контролюється і його наближення до граничного стану не є несподіваним.

Зі сказаного вище випливає, що більш загальним є підхід до побудови математичних моделей відмов з позицій їх загальної фізичної природи. Деградаційні процеси – це цілком певні фізичні (механічні, механіко-фізичні, хімічні, фізико-хімічні, механо-фізико-хімічні і т. д.) процеси. Не вдаючись у деталі, можна відзначити одну загальну властивість всіх деградаційних процесів і моменту появи відмови – їх випадковий характер.

Механізм руйнування і довговічності матеріалів визначається поступовим накопиченням дефектів: деформацій і тріщин в матеріалах. Локальні дефекти матеріалу, створюючи локальні перенапруження, стають центрами руйнування. Зовнішні фактори, що впливають на матеріал, можуть суттєво вплинути на величину напрацювання до відмови t_n . В даний час експериментально отримана залежність між ресурсом матеріалу, напругою і температурою [5.21]:

$$t_n = \tau_0 \exp((W_0 - \gamma\sigma) / (RT)), \quad (5.1)$$

де R – універсальна газова постійна; W_0 – початкова енергія активації процесу руйнування при напрузі $\sigma=0$, постійна для даного матеріалу в широкій області температур; $(W_0 - \gamma\sigma)$ – енергія активації руйнування (W_{ap}); τ_0 – параметр, що збігається за значенням з періодом власних теплових коливань атомів кристалічної решітки твердого тіла ($\tau_0=10^{-12} \div 10^{-14}$ с); γ – характеристика чутливості матеріалу до напруги; t_n – напрацювання на відмову.

Вираз (5.1) характеризує кінетичний процес руйнування, та показує, що руйнування зразка слід розглядати як процес, в якому за рахунок теплових флуктуацій долається потенційний бар'єр W_0 , зменшений в результаті дії напруги на величину $\gamma\sigma$.

У металів руйнування визначається, в основному, двома процесами: розривом міжатомних зв'язків за рахунок флуктуацій і спрямованої дифузії вакансій до тріщин. Перший процес описується рівнянням (5.1). Порушення суцільності металу з точки зору дифузії відбувається в результаті дифузії вакансій до тріщин, тобто зростання тріщин за рахунок припливу вакансій. Дифузійний механізм характеризується наступною температурно-часовою залежністю міцності [5.21]:

$$\begin{aligned} \tau &= c((kT)^2 E / (\sigma^3 a^4 D)) \exp(-\sigma a^3 \sqrt{n_0} / (kT)), \text{ або} \\ \tau &= c((kT)^2 E / (\sigma^3 a^4 D_0)) \exp(U_D - \sigma a^3 \sqrt{n_0} / (kT)), \end{aligned} \quad (5.2)$$

де D – коефіцієнт об'ємної самодифузії, що дорівнює $D = D_0 \exp(U_D / (kT))$; U_D – енергія активації самодифузії; n_0 – кількість вакансій, що об'єдналися; a – атомний розмір; σ – діюча напруга; E – модуль пружності; c – числова константа.

Формули (5.1), (5.2) пояснюють фізику механізмів руйнування в залежності від температури. Проте проведення інженерних розрахунків за цими формулами не представляється можливим, тому що відсутня інформація про значення констант, що використовуються в цих виразах.

Для металевих струмопровідних доріжок гнучких плат одночасна присутність в ізоляційному зазорі вологи, розчинених забруднень і електричної напруги створює умови для протікання електролізу, що є основою електрохімічного процесу відмови. В результаті електролізу провідник-анод розчиняється, віддаючи воді позитивно заряджені іони металу, які, прямуючи до провідника-катода, відновлюються на ньому до металевого стану, утворюючи в ізоляційному зазорі перемички дендритоподібної структури, що проводять струм. Поява таких перемичок підкоряється закону Арреніуса [5.22]. Електрохімічна ерозія, що протікає в умовах одночасного впливу електричної

напруги і вологи, призводить до зниження механічної міцності, що може викликати розриви контактних площинок і струмопровідних доріжок.

Для доріжок гнучких плат, що проводять струм, в залежності від умов експлуатації або випробувань можуть спостерігатися наступні види відмов: розрив провідника або збільшення його опору; коротке замикання між сусідніми провідниками, відшарування провідника від підкладки або відшарування нанесеного шару Ni від поверхні Al-провідника; зміна кольору поверхні окремих ділянок без помітної зміни електричних властивостей. Зазначені відмови є наслідком протікання деградаційних процесів, основними з яких є процеси дифузії, електродифузії, хімічної та електрохімічної корозії. Так, під впливом струмів підвищеної щільності, підвищених температур, а також в результаті тривалого впливу температурних і електричних навантажень можливі обриви металізації в результаті електроміграції і вигорання місць підвищеної щільності струму, що утворюються в місцях стоншення плівки, при зміні конфігурації струмоведучих доріжок, в місцях підвищеної дефектності структури. При цьому можливі обриви, викликані корозією Al при неякісному захисному покритті і забрудненні поверхні.

Основними джерелами відмов ізоляційних матеріалів є локальні дефекти діелектрика, місцеві розшарування, сторонні включення або забруднення. Підвищена пористість (водопоглинення) тонких фольгованих матеріалів сприяє інтенсивному поглинанню вологи.

Поширеним дефектом високовольтової поліімідної ізоляції є повітряні (газові) включення, наявність яких призводить до суттєвого спотворення напруженості електричного поля. Так як діелектрична проникність ϵ газу менше, ніж ϵ діелектрика, включення виявляються під більшим електричним навантаженням. Максимальна напруженість поля E_{\max} у включенні залежить від співвідношення діелектричних проникностей і питомих опорів газу та твердого діелектрика, виду прикладеної напруги, а також від розмірів і форми включення.

Деградація захисних діелектричних шарів багато в чому визначається їх вологостійкістю. Процес руйнування захисних властивостей покривних плівок складається з двох стадій. Перша з них починається зі зволоження (змочування), набухання і дифузії молекул води в мікропорах. Цей відносно повільний процес забезпечує розвиток другої стадії – швидке переміщення гідратованих іонів крізь набряклі покриття як по водного розчину. Механізм дифузії, набухання і гідратації лакової плівки підкоряється закону Арреніуса.

У нероз'ємних контактних з'єднаннях (зварних, паяних, клейових) спостерігається, як мінімум, два джерела виникнення напружень, які можуть викликати передчасне утворення дефектів. Це напруження, що виникають в паяному вузлі, зварному шві, клейовому з'єднанні в результаті деформацій або втоми і термічні напруги, що виникають в результаті охолодження з'єднання після формування контакту. Причинами деградаційних відмов є поступове погіршення електричних властивостей контактних з'єднань, зростання їх опору і шумів, зменшення міцності (зусилля відриву), що може бути обумовлено технологічними дефектами, утворенням інтерметалічних сполук на межі розподілу контактуючих матеріалів, дифузією матеріалів і формуванням пустот.

Мала механічна міцність обумовлена різною формою контактуючих елементів, порушенням технологічного процесу, застосуванням неякісних вихідних матеріалів, забрудненням контактних площинок залишками фоторезистів, продуктами травлення при фотолітографії і т. п. Істотний вплив на міцність і надійність контактів надає якість виконання таких операцій як УЗ-зварювання, паяння, склеювання (дотримання температурного і часового режиму, підбір достатнього питомого тиску). Додатковими факторами, що знижують міцність з'єднання, є механічні пошкодження і підтравлювання контактних площинок в процесі фотолітографії, що призводять до зменшення площі контакту.

При утворенні паяних з'єднань (ПЗ) протікає процес дифузії, який визначається першим і другим законами Фіка. При взаємному прямо протилежному дифузійному проникненні компонентів їх потоки не рівні один одному. В результаті виникає некомпенсований потік вакансій, що призводить до пружно-пластичного зміщення кристалічних шарів (ефект Кіркендалла). Крім того, внаслідок дифузії в області контакту припою і матеріалу провідника можуть утворюватися тріщини, причиною яких є різниця атомних обсягів атомів, що дифундують, різниця швидкості міграції окремих атомів (ефект Френкеля). Причиною відмови ПЗ може бути також розтріскування сплаву вздовж кордону розділу між фазами Pb та Sn. Розвиток тріщин обумовлюється як невідповідністю температурних коефіцієнтів багат шарової плати і виводів навісних компонентів, так і деякими фізичними характеристиками мікроструктури сплаву Pb-Sn, які можуть служити визначальними параметрами при прогнозуванні безвідмовності ПЗ.

Необхідно враховувати деградаційні процеси внаслідок повзучості і втоми. Матеріали, що знаходяться під навантаженням, повільно деформуються безперервно і необоротно у часі. Це явище відомо під назвою повзучості і навіть при слабкому навантаженні помітно проявляється при температурах $T \geq 0,6T_{пл}$. Повзучість припоїв завжди має місце, оскільки температура початку повзучості для них $\sim 0^\circ\text{C}$: наприклад, для ПОС-61 $T = 0,6 \cdot (183 + 273) = 273,6 \text{ K} \approx 0^\circ\text{C}$. При цьому повзучість можлива за рахунок ваги власних компонентів. До повзучості також вельми схильні клейові з'єднання. Якщо повзучість велика, вона призводить до зміни форми і до руйнування з'єднання. На третій стадії повзучості на ПЗ утворюється сітка тріщин і фаза закінчується крихким зломом [5.23].

Опір матеріалів багаторазовому впливу короткочасно прикладених навантажень визначають втомну міцність. При теплозмінах в контактних з'єднаннях з різнорідних матеріалів виникають змінні температурні напруги, що циклічно змінюються в часі, при цьому відбувається чергування процесів

холодного наклепу та релаксації напруг, що призводить до поступового накопичення пошкоджень, зростання субмікронних тріщин, утворення макротріщин, їх розповсюдженню і руйнування. Особливо актуальним цей процес деградації є для електронної апаратури, виконаної методом друкованого монтажу.

Основною причиною обривів і коротких замикань у ПЗ є електрохімічна корозія, що представляє собою процес переносу іонів свинцю в електроліті під дією зовнішнього електричного зміщення. Мігруючи до ділянок металізації, які перебувають під негативним потенціалом, іони відновлюються там до атомів і осідають у вигляді дендритів. Останнє може призвести до збільшення струмів витоку аж до короткого замикання (при малих відстанях між ділянками металізації.)

Для зварних з'єднань характерна дія термомеханічних напружень. Зварні з'єднання є більш жорсткими, ніж сполуки, отримані пайкою, отже, вони більш схильні до руйнувань при термоциклюванні. Зварні з'єднання володіють невеликою межею втомних напруг; вони характеризуються зниженою міцністю при температурі більше 170°C.

Для клейових з'єднань самим жорстким видом температурних випробувань є циклічні випробування при різкому перепаді температур. При цьому більш небезпечний перепад у бік низьких температур, оскільки жорсткість клею і величина перенапруги зростають, тоді як при підвищенні температури напруги знижуються. При великій швидкості зміни температури клеї можуть не витримати виникаючих напруг. При температурі нижче температури склування жорсткість клею зростає, тому напруги, що виникають із-за відмінності температурних коефіцієнтів клею і матеріалів, що склеюються, при швидкій зміні температур зростають. При періодичній зміні температури в клейових з'єднаннях виникають циклічні внутрішні напруги і відбувається більш швидкий розвиток процесу втоми, ніж при дії статичних сил. Клейові з'єднання володіють більшою втомною міцністю, ніж зварні і паяні [5.24].

Основні характеристики складових процесів деградації багат шарових плат наведені в таблиці 5.1 [5.23].

Таблиця 5.1 – Основні характеристики складових процесів деградації багат шарових плат

Тип процесу деградації	Енергія активації E_{aj} , eВ	Коефіцієнт варіації, V_{oj}	Пайова участь в узагальненому процесі деградації, P_{oj}
1. Електрохімічна корозія	0,45	1,1	0,60
2. Дифузія домішок	0,5	0,5	0,25
3. Деградація захисних діелектричних покриттів	0,003	0,8	0,10
4. Деградація ізоляційних матеріалів	0,9	0,7	0,01
5. Повзучість припою	0,6	0,4	0,04

Аналіз основних процесів деградації багат шарових гнучких плат показав, що більшість з них є термоактивуючими. Тому для прискореної оцінки надійності рекомендується метод форсованих випробувань або при підвищеній температурі навколишнього середовища, або при зміні температур. При цьому важливе значення набуває використання апріорної інформації про кінетику деградаційних процесів. Слід також враховувати, що коефіцієнт варіації є досить стійкою характеристикою типових фізичних процесів деградації і в меншій мірі залежить від конструктивних тонкощів, тому він з достатньою для інженерної практики точністю може бути оцінений на аналогах об'єктів.

5.3 Побудова моделі параметричної надійності, імітаційні випробування зразків та прогнозування показників надійності мікрозбірок

Кожному поколінню виробів повинна відповідати якісно нова методологія досліджень на надійність, що є наслідком принципу відповідності рівня виробництва рівню надійності. Досвід показує, що найбільш ефективним, якщо не єдиним підходом при вивченні надійності сучасних мікроелектронних виробів є так званий імітаційний підхід [5.25-5.31], в основі якого лежать машинні методи моделювання деградаційних процесів, машинні методи випробувань, прогнозування надійності виробів.

Одним з можливих варіантів побудови кількісної моделі надійності є метод параметричної надійності [5.25-5.31], який характеризує можливість пристрою зберігати рівень робочого параметра $x(t)$ в полі допуску (α, β) протягом необхідного часу при заданих режимах і умовах роботи. В принципі метод параметричної надійності корисний у всіх випадках, коли в мікроелектронному виробі є деградаційні процеси, пов'язані із зміною складу і поведінки матеріалу і властивостей поверхні.

Вибір параметру для дослідження залежить від конкретного схемотехнічного рішення виробу, отже при прогнозуванні надійності мікрозбірок в якості визначального параметру розглядалося зусилля відриву F зварних з'єднань Al-Al, як найбільш численних в мікрозбірці, що розробляється.

Для вирішення поставленої задачі прогнозування надійності використані експериментальні дані вимірювання F в з'єднаннях Al-Al при використанні гнучких з'єднувальних елементів для складання детекторного модулю. Експериментальні дані містять відомості про режими процесу УЗ-зварювання та аналізі характеру відриву. Обробка даних натурних експериментів (4 сукупності однотипних зварних з'єднань) дозволяє визначити математичне сподівання $\overline{F_0}$, дисперсію D_{F_0} та середньоквадратичне відхилення σ_{F_0} :

$$\bar{F}_0 = \sum_{j=1}^{10} F_j + \sum_{m=1}^{14} F_m + \sum_{k=1}^6 F_k + \sum_{l=1}^{21} F_l; \quad (5.3)$$

$$D_{F_0} = \frac{\sum_{i=1}^{51} F_i^2}{51} - \bar{F}_0^2; \quad (5.4)$$

$$\sigma_{F_0} = \sqrt{D_{F_0}}, \quad (5.5)$$

а також закон розподілу випадкової величини \bar{F}_i . Як показали експерименти щодо визначення закону розподілу F_0 по вибірці з 51 зразка розподіл F_0 описується логарифмічно нормальним законом з параметрами $\bar{F}_0 = 6,75$ г; $D_{F_0} = 1,2175$; $\sigma_{F_0} = 1,103$; $\overline{\ln F_0} = 1,896$; $\sigma_{\ln F_0} = 0,164$.

Прийmemo за основу дифузійну модель деградації. Як показав аналіз, причинами відмови зварних з'єднань можуть бути поява механічних напружень в місцях контактів із-за впливу сил і моментів, що виникають під час процесу контактування; зсувні зусилля в місцях контактів, які виникають внаслідок різних ТКЛР виводів і захисного покриття; пористість, дефекти, мікротріщини через порушення температурного і часового режимів зварювання, недостатнього питомого тиску. Зменшення механічної міцності зони зварювання може відбуватися із-за процесу дифузійної пористості і зародження мікротріщин, що призводить до зменшення площі контактування S , зростання механічних напружень σ і зниження зусилля відриву F . При цьому, при натурних випробуваннях, необхідно знати критерій відмови $F_{\text{від}}$, який визначався авторами [5.30] при діаметрі контакту 40 мкм. У своїх розрахунках при тангенціальному додатку зусилля до зварного з'єднання і діаметрі контакту 50 мкм за описаних умов прийняті наступні дані:

$$\bar{F}_{\text{отк}} = 1,25 \text{ г}; \quad \sigma_{F_{\text{отк}}} = 0,1225; \quad \overline{\ln F_{\text{отк}}} = 0,223; \quad \sigma_{\ln F_{\text{отк}}} = 0,098.$$

Пропонована модель може бути формалізована. Дійсно, оскільки зусилля відриву з'єднання дорівнює $F = \sigma S$, то зміна \bar{F} в часі t при даній температурі T описується виразом:

$$\int_{F_0}^{F_\tau} dF_T = \int_0^\tau \sigma(t) \frac{\partial S}{\partial t} dt + \int S(t) \frac{\partial \sigma}{\partial t} dt, \quad (5.6)$$

де F_0 и F_τ – зусилля відриву в моменти $t=0$ и $t=\tau$.

Для рішення даного рівняння необхідно знати $\sigma(t)$, $S(t)$, $\frac{\partial \sigma}{\partial t}$ та $\frac{\partial S}{\partial t}$.

Оскільки об'єм пор, що виникають внаслідок утворення накопичення вакансій і переміщення дислокацій в процесі самодифузії атомів, пропорційний об'єму дифузійної зони, можна записати:

$$S(\tau) = S_0 - \alpha S_0 H, \quad (5.7)$$

де S_0 и $S(\tau)$ – площа контакту при $t=0$ и $t=\tau$; α [см⁻¹] – коефіцієнт пропорційності; H – товщина дифузійного шару:

$$H = D^{*1/2} t^{1/2}, \quad (5.8)$$

де D^* – коефіцієнт самодифузії атомів Al:

$$D^* = D_0 e^{-\frac{E_a}{kT}}, \quad (5.9)$$

де D_0 – коефіцієнт самодифузії атомів Al при нескінченно великій температурі; E_a – енергія активації процесу самодифузії. Дані про величину D_0 та E_a по літературним джерелам [5.32-5.36] наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Значення коефіцієнту самодифузії атомів Al та енергії активації процесу самодифузії

T, °C	E _a			D ₀ , см/с	Посилання
	ккал/(г·ат)	кДж/(г·ат)	еВ		
721-966	45,3	189,7	1,964	0,265	[5.34], с. 929
450-660	–	142,35	1,474	–	[5.35]
–	–	134,81	1,396	0,4	
660	31,655		1,343	–	[5.36], с. 44
660	34		1,474	–	
450-650 D _{T1} =10 ⁻¹⁰ см ² /с D _{T2} =10 ⁻⁸ см ² /с расчеты по D _{T1} и D _{T2}	34	–	1,323	0,171	
330-460 D _{T1} =10 ⁻¹² см ² /с D _{T2} =10 ⁻¹⁰ см ² /с	30,5	–	1,323	0,1	[5.36], с. 39
–	–	–	1,25	–	[5.37], с. 99
T ₁ =462 D ₁ =10 ⁻¹⁰ см ² /с T ₂ =655 D ₂ =10 ⁻⁸ см ² /с			1,48	0,507	[5.37], с. 22

Вважаючи, що параметри дифузійного процесу D₀ і E_a розподілені нормально, отримуємо, що величина D* повинна описуватися логарифмічно нормальним розподілом. Обробка вихідних літературних даних [5.32-5.36] показала, що: $\overline{E}_a = 1,397 \text{ эВ}$; $\sigma_{E_a} = 0,06914$; $\overline{D}_0 = 0,234 \text{ см}^2/\text{с}$; $\sigma_{D_0} = 0,1297$.

Підставляючи (4.7) в (4.8) і диференціюючи за часом, отримаємо:

$$\begin{aligned} S(t) &= S_0 - \alpha S_0 D^{*1/2} t^{1/2}; \\ dS(t) &= -\frac{1}{2} \alpha S_0 D^{*1/2} t^{-1/2}. \end{aligned} \quad (5.10)$$

Враховуючи, що $t \sim \frac{H^2}{D^*}$, можна вважати, що $\Delta\sigma / \Delta t \sim D^*$ або:

$$\frac{\partial\sigma(t)}{\partial t} = \gamma D^*. \quad (5.11)$$

Після інтегрування рівняння (4.11) отримаємо:

$$\sigma(t) = \sigma_0 + \gamma D^* t,$$

де σ_0 – міцність з'єднання при $t=0$.

Підстановка (5.7), (5.8), (5.10), (5.11) в (5.6) та інтегрування приводять до основного рівняння для визначення часу напрацювання на відмову:

$$\begin{aligned} \Delta F = F_\tau - F_0 &= \gamma S_0 D^* t - \alpha \gamma S_0 D^{*3/2} t^{3/2} - \alpha \sigma_0 S_0 D^{*1/2} t^{1/2} = \\ &= \gamma S_0 D^* t - \alpha \gamma S_0 D^{*3/2} t^{3/2} - \alpha F_0 D^{*1/2} t^{1/2}. \end{aligned} \quad (5.12)$$

Коефіцієнти α и γ можна визначити, якщо відомі ΔF для різних часів, вирішуючи систему рівнянь:

$$\begin{aligned} a_1 &= \gamma b_1 - \alpha \gamma c_1 - \alpha d_1; \\ a_2 &= \gamma b_2 - \alpha \gamma c_2 - \alpha d_2. \end{aligned} \quad (5.13)$$

Тут a_i, b_i, c_i, d_i – вільні члени і члени при α и γ . Для кількісної оцінки α и γ використовуємо дані, що відображають часову залежність зусилля відриву при відпалі зварних з'єднань з $S_0 \approx 2000 \text{ мкм}^2$ (діаметр контакту 50 мкм); (див. таблицю 5.3 та рисунок 5.1).

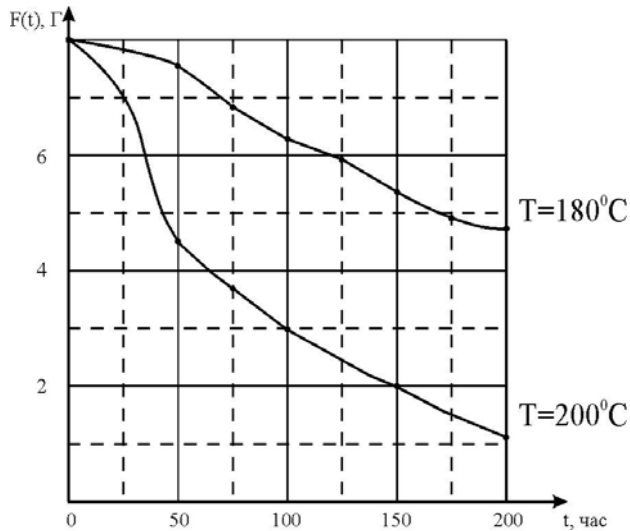


Рисунок 5.1 – Часова залежність зусилля відриву при відпалі зварних з'єднань

Таблиця 5.3 – Часова залежність зусилля відриву при відпалі зварних з'єднань

T°C	F(t) при різному часі $t_{\text{відп.}}$, час					
	50	75	100	125	150	200
200	4,5	3,7	3,3	3,0	2,0	1,3
180	7,5	6,9	6,5	6,0	5,5	4,8

Оскільки більшість деградаційних процесів у мікроелектронних виробках протікає в часі з прискоренням, має нелінійний характер, то в якості загальної статистичної моделі розвитку відмови можна прийняти віялову функцію з ненульовим розкидом, що описує процес руху фізичного параметру F до випадкової межі $F_{\text{відм.}}$:

$$F(t) = F(0) \exp(-Vt), \quad (5.14)$$

де $F(0)$ – випадкове початкове значення фізичного параметру виробу; V – випадкова величина, що характеризує швидкість зміни його логарифму, що має математичне очікування \bar{V} і середньоквадратичне відхилення σ_V :

Таким чином, можна записати:

$$\ln F(t) = \ln F(0) - Vt; \quad (5.15)$$

звідки витікає, що:

$$V = \left\{ \frac{\ln[F(t)]}{\ln[F(0)]} \right\} / t, \text{ або } \left\{ \frac{\ln[F(t)]}{\ln[F(0)]} \right\}_{T_1=200^\circ\text{C}} = \nu_0 e^{-\frac{E_a}{kT_1}} \cdot t.$$

Оскільки справедливий вираз $\left\{ \frac{\ln[F(t)]}{\ln[F(0)]} \right\}_{T_2} = \nu_0 e^{-\frac{E_a}{kT_2}} \cdot t$, то можна за

даними, що маємо, розрахувати залежність $F(t)$ для будь-якої температури при $E_a=1,397\text{эВ}$.

Для визначення α і γ використовувалися дані, що приведені в таблиці 5.3 для відпалу при $T=200^\circ\text{C}$. Результати розрахунків α і γ для основного рівняння (5.12) представлені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Результати розрахунків α і γ

№ з/п	Параметри					
	t_1 , год.	t_2 , год.	F_1 , г	F_2 , г	α , см^{-1}	γ , $\text{г}\cdot\text{см}^{-4}$
1	75	150	3,7	2	$7,98 \cdot 10^4$	$1,718 \cdot 10^{11}$
2	50	200	4,5	1,3	$4,44 \cdot 10^4$	$1,021 \cdot 10^{12}$
3	100	200	3,0	1,3	$4,44 \cdot 10^4$	$1,114 \cdot 10^{12}$

Таким чином можна записати $\bar{\alpha} = 5,62 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$; $\bar{\gamma} = 6,447 \cdot 10^{12} \text{ г}\cdot\text{см}^{-4}$.

Для визначення середнього часу напрацювання на відмову і визначення закону розподілу цієї величини були застосовані машинні випробування зразків з урахуванням розкиду параметрів, що входять у вираз (5.12), а саме F_0 , S_0 і D^* . Машинний експеримент проводився на вибірці з 1000 "зразків" на ПК з використанням програм MatCAD. При цьому на ЕОМ вираховувався час t (рівняння (5.12) для $F_{\text{відм}} = 1,25 \text{ г}$. Вибір параметрів рівняння (5.12) проводився

методом Монте-Карло. Результати машинного розрахунку часу напрацювання на відмову для ряду температур наведені в таблиці 5.5.

Обробка отриманих результатів показала, що розподіл \bar{t} може бути описано усіченим логарифмічно нормальним законом з інтервалом $\bar{t} \pm 2\sigma_{\text{int}}$. Враховуючи 2σ інтервал, мінімальний час до відмови для даної технології виготовлення з'єднань можна визначити за формулою:

$$t_{\text{min}} = \bar{t} e^{-2\sigma_{\text{int}}} \quad (5.16)$$

Таблиця 5.5 – Результати розрахунку часу напрацювання на відмову

Параметри \ $T_{\text{відп.}}, ^\circ\text{C}$	125	180	200
\bar{t} , год	$1,1102 \cdot 10^5$	797	209
σ_{int}	0,04	0,029	0,028
t_{min} , год	$0,802 \cdot 10^5$	752	198

5.4 Прискорені форсовані випробування мікрозбірок та оцінювання показників надійності за результатами випробувань

Прискорені форсовані випробування проводилися з метою отримання інформації про стійкість мікрозбірок при дії навантажень, що перевищують експлуатаційні режими для:

- експериментальної оцінки довговічності виробу та підтвердження відповідності мінімального значення роботи виробу без відмови терміну експлуатації;
- виявлення потенційно ненадійних елементів модуля міжнародного експерименту ALICE.

В якості об'єкта досліджень використані зразки гнучко-жорстких мікрозбірок детекторного модуля SDD, що входять до складу дрейфового детекторного модуля міжнародного експерименту ALICE, які містять комплект елементів і навісних компонентів, режими роботи яких задані технічними вимогами.

Випробуванню піддавалися зразки мікрозбірок двох типів:

- мікрозбірка права (рисунок 5.2, а);
- мікрозбірка ліва (рисунок 5.2, б).

Габаритні розміри мікрозбірок: $(85,3 \times 42,2 \times 1,9)$ мм.

Структурна схема мікрозбірки наведена на рисунку 5.3, а характеристики складових частин наведена в таблиці 5.6.

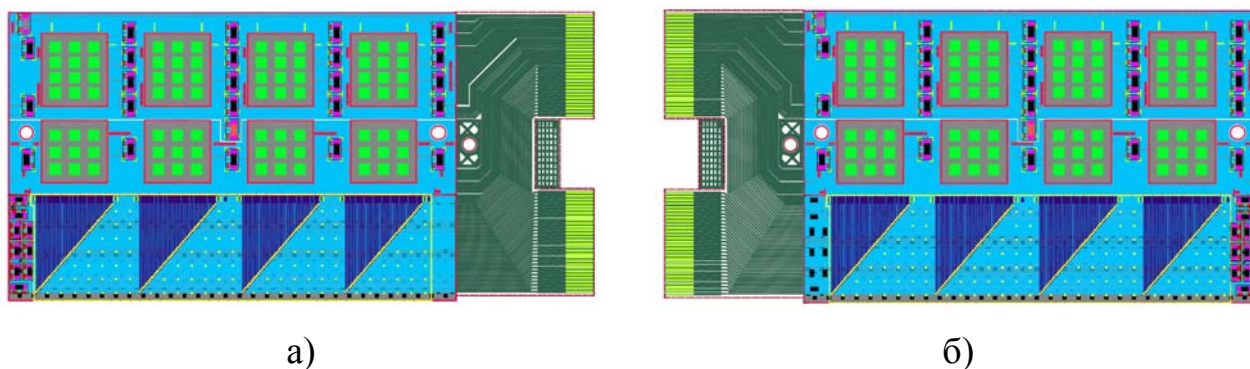


Рисунок 5.2 – Гнучко-жорсткі мікрозбірки: а) права; б) ліва

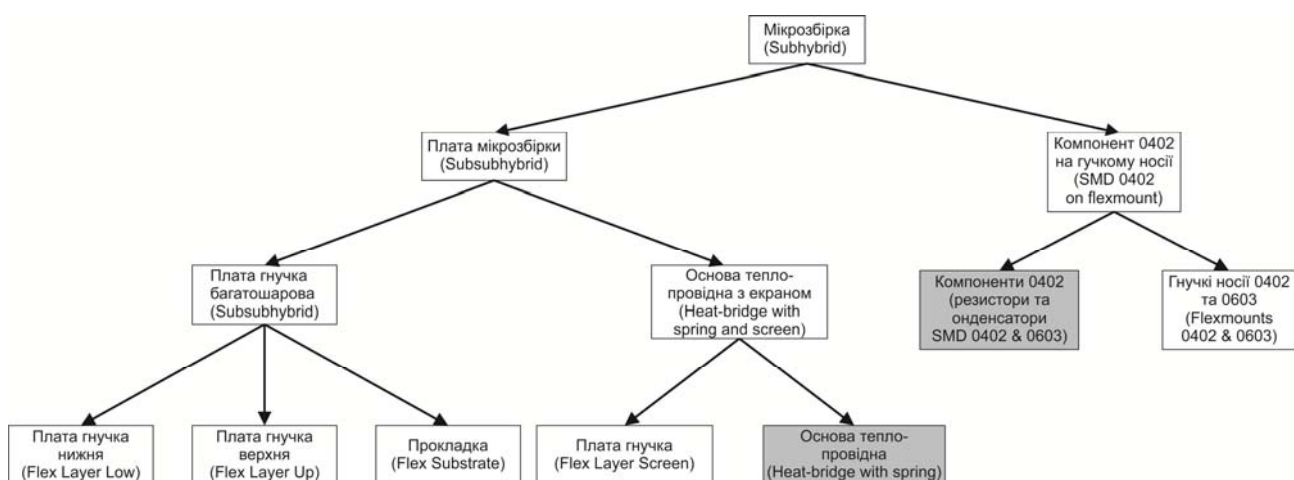


Рисунок 5.3 – Структурна схема мікрозбірки

Таблиця 5.6 – Характеристика складових частин мікробірок

Найменування	Матеріал	Додаткові покриття	Примітки
Плата гнучка "екран"	діелектрик лакофольговий ФДИ-А-50	осаджений Ni (в зоні установки мікросхем)	поліімідний носій з шаром Al-комутації
Плата гнучка нижня		осаджений Ni (в зоні тестування)*	поліімідний носій з Al-комутацією і вікнами в полііміді під зварювання з платою гнучкою "екран"
Плата гнучка верхня		–	поліімідний носій з Al-комутацією і вікнами в полііміді під зварювання з платою гнучкою нижньою
Прокладка	поліімідна плівка ПМ марки А	–	поліімідна плівка з вікнами під приклеювання до плати гнучкої нижньої
Основа теплопровідна	вуглепластик THORNEL K-1100	–	жорстка основа на основі високотеплопровідного вуглепластику
Гнучкі носії 0402 і 0603	діелектрик лакофольговий ФДИ-А-50	осаджений Ni-SnBi (в зоні пайки навісних компонентів)	поліімідний носій з КП (Al – Ni – SnBi) під пайку навісних компонентів і вікнами в полііміді під зварювання з платою гнучкою нижньою
Компоненти 0402 і 0603 (резистори і конденсатори)	–	–	–

*Примітка: У мікробірці правій провідники, що використовуються для контролю якості зварних з'єднань і для контролю функціонування детекторного модуля, розташовуються з правого боку; у мікробірці лівій – відповідно з лівого.

Як зазначено вище, досліджувана мікробірка являє собою багатошарову гнучку плату (БГП), отриману зварюванням і склеюванням верхньої і нижньої гнучких плат (ГП), а також приклеюванням прокладки з боку нижньої гнучкої плати. Потім БГП монтується за допомогою приклеювання і ультразвукового зварювання на жорстку теплопровідну основу з приклеєним "екраном". На поверхню отриманої гнучко-жорсткої плати здійснюється монтаж гнучких носіїв з навісними резисторами і конденсаторами за допомогою приклеювання і ультразвукового зварювання. Навісні компоненти приєднуються до контактних площин гнучкого носія пайкою (рисунк 5.4).

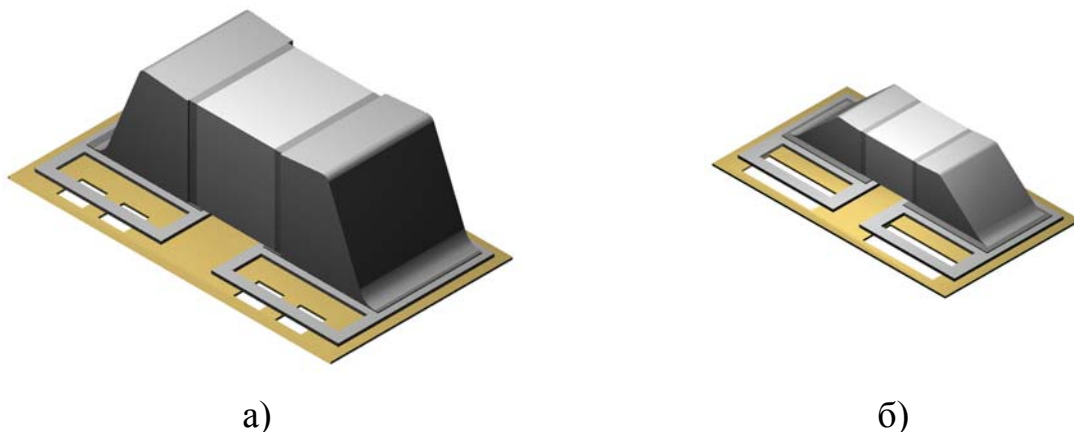


Рисунок 5.4 – Гнучкі носії з навісними компонентами двох типів:
а) конденсатори 0603 (1000 нФ); б) резистори 0402 (100 Ом)

Мікрозбірка містить:

- клейових з'єднань – 285 (з'єднання нижньої і верхньої ГП, з'єднання прокладки і нижньої ГП, клейові з'єднання при установці БГП та екрануючої ГП на теплопровідну жорстку основу; клейові з'єднання при монтажі гнучких носіїв з навісними компонентами і при захисті місць УЗ-зварювання);

- зварних з'єднань – 423 (з'єднання нижньої і верхньої ГП з екрануючої ГП, з'єднання при монтажі гнучких носіїв з навісними компонентами на плату мікрозбірки);

- паяних з'єднань – 68 (при установці навісних компонентів на гнучкі носії – по 2 на кожен компонент).

Для обґрунтованого вибору параметрів випробувального режиму були проаналізовані властивості матеріалів, які входять до складу мікрозбірки.

Для виконання клейових з'єднань використовуються різні клеї.

Клей УП-10-14-2 (епоксидно-каучуковий холодного затвердіння, підвищеної еластичності) застосовується для:

- склеювання гнучких плат між собою;
- приклеювання екрануючої гнучкої ГП до теплопровідної основи;
- приклейки БГП до основи з "екраном".

Згідно ТУ 6-10-14792, клейові з'єднання тривало витримують:

- вплив температур від мінус 60°C до плюс 120°C;
- багаторазове термоциклювання;
- ударні і вібраційні навантаження.

Клей Еро-Тек Н70Е-4 (теплопровідний, електроізоляційний, епоксидний, двокомпонентний) застосовується для:

- приклеювання навісних компонентів до гнучкого носія;
- приклеювання гнучких носіїв з навісними компонентами при виготовленні мікрозбірки.

Клей розроблений спеціально для установки навісних компонентів на друковані плати і інші підкладки.

Згідно специфікації (ТУ), клейові з'єднання можуть витримати:

- 100 термоциклов з тривалістю більше 10 хвилин в температурному інтервалі: мінус 65°C ÷ плюс 150°C;
- робочі температури: плюс 150°C (безперервно); плюс 300°C ÷ плюс 400°C (короткочасно).

Для пайки навісних компонентів до контактних площин гнучких носіїв застосовано припій ПОС-60 (ГОСТ 21931-76) близький до евтектичного (60% Sn+40% Pb) з температурою солідуса 183°C і температурою ліквідусу 190°C, що забезпечує високу пластичність і вакуумну щільність паяних з'єднань.

Пайка виводів навісних компонентів припоєм ПОС-60 здійснюється до контактних площинок зі структурою Al (30 мкм) + бар'єрний шар Ni (~2 мкм) + SnBi(~7 мкм). В результаті пайки в паяних з'єднаннях присутній Ві, який навіть у незначних кількостях (частки %) значно уповільнює можливий розпад $\text{Sn}_{\text{біл}} \rightarrow \text{Sn}_{\text{сір}}$, сприяє подрібненню структури Sn, затримує ріст зерен при тривалих витримках при підвищених температурах, а також збільшує змочуваність при пайці.

Паяні з'єднання можуть витримати: термоциклювання в інтервалі мінус 20°C ÷ плюс 100°C [5.37]; мінус 60°C ÷ плюс 80°C ($\Delta T/\Delta t = 10^\circ\text{C}/\text{хв}$,

вакуум) [1.30]; мінус 60°C ÷ плюс 125°C [5.38]; мінус 196°C ÷ плюс 70°C (тривалості циклу $t_{ц1} = 4,0$ хв., $t_{ц2} = 8,0$ хв.) [5.39]; мінус 50°C ÷ плюс 150°C [5.40].

Для оцінювання показників надійності проводилися ПФВ, які ґрунтуються на впливі підвищених значень чинників, що прискорюють фізико-хімічні процеси старіння і деградації виробів, що призводить до підвищення ймовірності відмовних станів. В якості фактора, що форсує, обрана температура. Зв'язок між швидкістю деградаційних процесів і температурою описується рівнянням Арреніуса, що для визначення інтенсивності відмов може бути представлено у вигляді [5.3, 5.23, 5.41, 5.42]:

$$\lambda_1 / \lambda_2 = 1^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)}, \quad (5.17)$$

де λ_1 – інтенсивність відмов в умовах випробувань при T_1 ; λ_2 – інтенсивність відмов в умовах експлуатації при T_2 ; E_a – енергія активації деградаційного процесу ($0,7 < E_a < 1$ эВ) [5.23, 5.42], k – постійна Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К = $8,625 \cdot 10^{-5}$ эВ/К).

З виразу (5.17) можна розрахувати коефіцієнт прискорення K_T у залежності від температури проведення форсованих випробувань і необхідної температури експлуатації виробу.

При $T_1 = 90^\circ\text{C}$ (363 К), $T_2 = 20^\circ\text{C}$ (293 К), $E_a = 0,7$ эВ величина коефіцієнта прискорення визначається з виразу:

$$K_T = \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right] = \exp \left[\frac{0,7}{8,625 \cdot 10^{-5}} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{363} \right) \right] = e^{5,34} \approx 208.$$

Виходячи з заданого терміну експлуатації виробів (10 років) в умовах міжнародного експерименту ALICE, з урахуванням властивостей

застосовуваних матеріалів, а також базуючись на рекомендаціях міжнародних і вітчизняних стандартів [1.30, 5.43-5.46], для дослідження надійності мікрозбірок обраний метод термоциклічних випробувань для перевірки технологічних процесів і матеріалів.

Параметри випробувального режиму при впливі циклічної зміни температури при нормальному атмосферному тиску (рисунок 5.5):

- максимальна температура в термоциклі, T_{\max} плюс 90°C ;
- мінімальна температура в термоциклі, T_{\min} плюс 5°C ;
- швидкість зміни температури dT/dt $8,5^{\circ}\text{C}/\text{хв}$
- витримка при T_{\max} і при T_{\min} , t_v 3 хв.

Робота виробів в умовах зміни температур супроводжується явищем термічної втоми з характерним чергуванням процесів холодного наклепу та релаксації напруг (повзучості). Ущільнення робочих циклів інтенсифікує процеси втомних руйнувань. Періодичні впливи температури призводять до багаторазових змін механічних напружень в матеріалах і з'єднаннях, що викликано розходженням їх температурних коефіцієнтів лінійного розширення. Це веде до появи залишкових дефектів структури матеріалів і деформацій у вузлах.

Важливими чинниками у формуванні граничних пошкоджень при термовтомленості є тривалість циклу t_c і час витримки t_v при T_{\max} , так як основна релаксація напруг і розвиток деформації повзучості відбувається в перші хвилини витримки [5.39-5.48]. При термонавантаженні виробів циклами малої тривалості, за обраний час випробувань зростають і число циклів, і циклічна деформація повзучості, що обумовлює мінімальний час до руйнування, тобто надійність і довговічність виробів, схильних до термоциклювання, визначається пружнопластичним станом, обумовленим температурно-тимчасовим режимом. Цикл без t_v при T_{\max} не містить деформації повзучості. Саме з цих міркувань, а також дотримуючись рекомендацій міжнародних і вітчизняних стандартів [5.43-5.46], вибрано при T_{\max} і T_{\min}

значення часу витримки $t_b = 3$ хв. В результаті тривалість термоциклу при випробуваннях становить $t_{ц} = 26$ хвилин (рисунок 5.5).

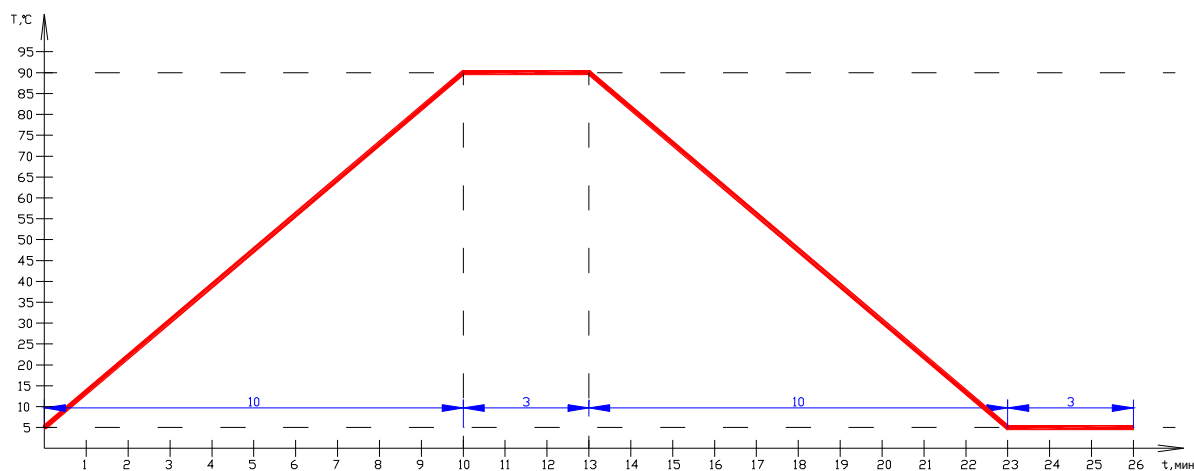


Рисунок 5.5 – Параметри випробувального режиму при дії циклічної зміни температури

Для прискорених випробувань при виборі температури в якості фактора, що форсує, показано [5.36], що коефіцієнт форсування (прискорення по температурі) визначається виразом:

$$K_{уТ} = \frac{N_{\text{практ}}}{N_{\text{випр}}} = \left(\frac{\Delta T_{\text{випр}}}{\Delta T_{\text{практ}}} \right)^2, \quad (5.18)$$

де $N_{\text{практ}}$ і $N_{\text{випр}}$ – відповідно кількість циклів до відмови на практиці (в умовах експлуатації) і при випробуваннях; $\Delta T_{\text{практ}}$ і $\Delta T_{\text{випр}}$ – максимальний перепад температур в умовах експлуатації і при випробуваннях.

При відомих умовах експлуатації пристрою і умов випробувань на термоциклювання алгоритм оцінки необхідної кількості циклів $N_{\text{випр}}$, відповідного напрацювання до відмови виробу при експлуатації в нормальних умовах, зводиться до наступного:

– за відомим $\Delta T_{\text{випр}}$ і $\Delta T_{\text{практ}}$ – визначається коефіцієнт форсування по температурі. Оскільки температурний діапазон експлуатації мікробірок у

складі детекторних модулів на практиці складає $(20\pm 5)^\circ\text{C}$, то $\Delta T_{\text{практ}} = 10^\circ\text{C}$. Обраний діапазон зміни температури в термоциклі плюс 5°C ÷ плюс 90°C визначає величину $\Delta T_{\text{випр}} = 85^\circ\text{C}$. Отже, коефіцієнт прискорення по температурі буде дорівнювати:

$$K_{\text{уТ}} = \left(\frac{\Delta T_{\text{випр}}}{\Delta T_{\text{практ}}} \right)^2 = \left(\frac{85}{10} \right)^2 \approx 72;$$

– за відомою величиною тривалості циклу $t_{\text{ц}}$ (хв) визначаємо коефіцієнт прискорення часу (кількість циклів в годину):

$$K_{\text{уТ}} = \frac{60}{t_{\text{ц}}} = \left(\frac{60}{26} \right) \approx 2,3; \quad (5.19)$$

– визначаємо максимальну кількість випробувальних термоциклів, відповідне десятирічному терміну ($10 \cdot 365 \cdot 24 = 87600$ годин) експлуатації пристрою. Для обраних режимів випробувань необхідна мінімальна кількість випробувальних термоциклів, що підтверджує десятирічний термін роботи пристрою без відмов дорівнює:

$$N_{\text{випр}} = \frac{N_{\text{практ}}}{K_{\text{уТ}} \cdot K_{\text{уТ}}} = \frac{87600}{K_{\text{уТ}} \cdot K_{\text{уТ}}} = \frac{87600}{72 \cdot 2,3} \approx 529. \quad (5.20)$$

Випробування мікробірок (для випробувань використані 2 мікробірки) на вплив циклічної зміни температури проводилися протягом 770 термоциклів з тривалістю одного циклу $t_{\text{ц}} = 26$ хвилин і включали кілька періодів по 11-13 термоциклів в періоді. Після кожного випробувального періоду проводилися:

- візуальний контроль зовнішнього вигляду мікробірок за допомогою мікроскопа МБС-9;
- автоматизований контроль цілісності струмопровідних ланцюгів і оцінка якості ізоляції;
- вимірювання номіналів навісних компонентів (резисторів і конденсаторів).

За результатами перерахованих вище перевірок приймали рішення про те, сталася відмова чи ні. В якості критерію відмови приймався стан мікробірки, при якому має місце:

- істотна зміна зовнішнього вигляду всієї мікробірки в цілому і нероз'ємних контактних з'єднань зокрема;
- розриви ланцюга (відсутність контактного з'єднання – зварювання, пайки);
- зміна номіналів навісних компонентів більш ніж на 10%.

Випробування мікробірок на вплив циклічної зміни температури проводили на випробувальній базі НІР (Гельсінський інститут фізики, Фінляндія). Для випробувань використана кліматична камера ESPEC ENX12-7.5 CWL (ESPEC North America, США) (рисунок 5.6).

Характеристики кліматичної камери представлені в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Характеристики кліматичної камери

Параметр	Значення
Габаритні розміри випробувальної камери, см	60×74×85
Внутрішній об'єм випробувальної камери, л	300
Діапазон змін температури, °С	мінус 70 ÷ плюс 150
Швидкість змін температури, °С/хв.	10
Система охолодження	водяне охолодження з циркулюючим компресором



Зразки були розташовані в алюмінієвий тонкостінний коробок, на дно якого була прокладена прокладка з полііміду (рисунок 5.7). Додатково між мікробірками були зроблені перегородки з поліімідного скотча для запобігання дотику мікробірок один з одним та зі стінками коробка.

Рисунок 5.6 – Кліматична камера
ESPEC ENX12-7.5 CWL



Рисунок 5.7 – Розміщення зразків у тарі для випробувань

Мікробірки в тарі розміщувалися в кліматичній камері на спеціально змонтованій балці (рисунок 5.8) в підвішеному стані (для усунення вібрацій під час проведення термоциклів).

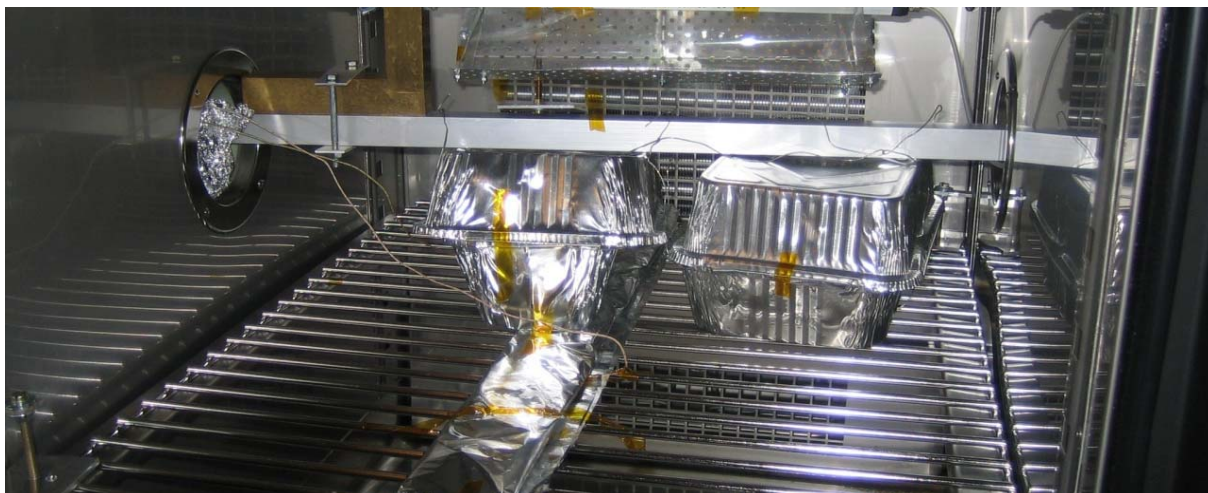


Рисунок 5.8 – Розміщення тари із зразками у кліматичній камері

Після проведення випробувань на вплив циклічної зміни температури контроль зовнішнього вигляду продемонстрував деякий незначний вигин мікробірок. Перевірки до випробувань і після випробувань цілісності електричних ланцюгів, наявності контактних паяних і зварних з'єднань не виявили ніяких змін. Результати контролю номіналів навісних компонентів наведені в таблиці 5.8.

Аналіз одержаних результатів випробувань дозволяє зробити висновок про те, що так як незначні зміни зовнішнього вигляду мікробірок не призвели до відмови електричних параметрів, то можна вважати, що мікробірки витримали прискорені випробування на вплив циклічної зміни температури (770 циклів) при нормальному атмосферному тиску, а кількість відмов дорівнює нулю.

Таблиця 5.8 – Результати контролю номіналів навісних компонентів

№ з/п	Позначення	Номінал	Результати вимірювань			
			мікрозбірка ліва		мікрозбірка права	
			до випробувань	після випробувань	до випробувань	після випробувань
1	C1	1000 нФ±10%	1060	1040	1050	1030
2	C2, C5, C10, C15, C20	4 мкФ±10%	4,08	3,81	4,04	3,75
3	C3, C8, C13, C18, C23	4 мкФ±10%	3,98	3,83	4,05	3,73
4	C4, C9, C14, C19, C24	4 мкФ±10%	4,05	3,77	4,06	3,78
5	C6	0,8 мкФ±10%	0,84	0,78	0,83	0,78
6	C7	0,8 мкФ±10%	0,82	0,78	0,76	0,73
7	C11	0,8 мкФ±10%	0,81	0,77	0,80	0,75
8	C12	0,8 мкФ±10%	0,82	0,77	0,83	0,78
9	C16	0,8 мкФ±10%	0,80	0,76	0,81	0,76
10	C17	0,8 мкФ±10%	0,81	0,76	0,79	0,74
11	C21	0,8 мкФ±10%	0,81	0,77	0,81	0,76
12	C22	0,8 мкФ±10%	0,81	0,76	0,84	0,79
13	R1	100 Ом±5%	101	102	101	102
14	R2	100 Ом±5%	100	100	100	101
15	R4	100 Ом±5%	101	100	101	102
16	R3	100 Ом±5%	102	102	100	101
17	R9	100 Ом±5%	101	100	101	102
18	R8	100 Ом±5%	101	101	101	102
19	R6	100 Ом±5%	101	101	100	101
20	R7	100 Ом±5%	102	102	101	101
21	R5	100 Ом±5%	102	102	102	102
22	T1	10 кОм±5%	10,27	10,21	10,09	9,88

Оцінка інтенсивності відмов в умовах експлуатації за результатами прискорених випробувань невеликих вибірок з одиничними відмовами проводилася за допомогою виразу для функції розподілу часу до відмови по критерію χ^2 (хі-квадрат), що найбільш часто застосовується при оцінці надійності мікроелектронних виробів [5.23, 5.41]:

$$\lambda_2 = \frac{\chi^2}{2N \cdot t \cdot K_y}, \quad (5.21)$$

де N – кількість мікробірок, які піддавалися прискореним випробуванням; t – тривалість випробувань; K_y – коефіцієнт прискорення інтенсивності відмов ($K_y = K_{yT} \cdot K_{yt} = 72 \cdot 2,3 \approx 165$).

Для невеликих вибірок виробів з одиничними відмовами використовують розрахунки по критерію χ^2 при довірчих інтервалах 0,6 і 0,9 [5.23, 5.41, 5.49]. При цьому, згідно ГОСТ 25359-82 [5.49], значення довірчої ймовірності 0,6 є більш прийнятним.

При нульовому числі відмов і довірчій ймовірності 0,6, значення $\chi^2=1,833$. Тоді при кількості випробовуваних мікробірок $N=2$, часу випробувань $t = 770 \cdot 26 = 20020$ хв = 333,67 годин, коефіцієнті прискорення $K_y = 165$ інтенсивність відмов мікробірки в робочих умовах, відповідно до виразу (5.21) складе:

$$\lambda_2 = \frac{1,833}{2 \cdot 2 \cdot 333,67 \cdot 165} \approx 8,32 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}.$$

При цьому час напрацювання на відмову складе:

$$t_n = \frac{1}{\lambda_2} = \frac{1}{8,32 \cdot 10^{-6}} = 120143 \text{ год} = 13,7 \text{ років}.$$

Слід зазначити, що наведене значення t_n свідомо занижене, оскільки із-за економічної доцільності вибиралася мала кількість мікробірок для випробувань ($N = 2$).

Можна запропонувати й інший варіант для оцінки показників надійності мікробірок. У відповідності з ГОСТ 27410-87 [5.50] якщо розглядати мікробірку як унікальний виріб, то єдиним застосовуваним в даному випадку методом оцінки показників надійності є розрахунково-експериментальний метод, що враховує експериментальні значення надійності складових частин виробу. При цьому інтенсивність відмов при нульовому числі відмов, згідно ГОСТ В 20.57.404-81 [5.51] оцінюється виразом:

$$\lambda = \frac{0,69}{t_{\text{сум}}}, \quad (5.22)$$

де $t_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n t_i$; t_i – час напрацювання до відмови i -го виробу; n – кількість спостережуваних виробів (у даному випадку складових частин, що спостерігаються).

При випробуваннях в кожній мікробірці контролювалося 423 зварних і 68 паяних з'єднань, тобто 491 спостережувана складова частина в кожній мікробірці і 982 – у двох випробуваних виробах. Так як випробування протягом 770 циклів з тривалістю циклу, що дорівнює 26 хвилин, визначають час випробувань кожної складової частини 333,67 год, то $t_{\text{сум}} = 982 \cdot 333,67 \text{ год} = 327663,94 \text{ год}$.

Отже, інтенсивність відмов буде дорівнювати:

$$\lambda = \frac{0,69}{327664} = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1},$$

час напрацювання на відмову складе величину:

$$t_n = 1/\lambda = 476190,4 \text{ год} \approx 54 \text{ роки.}$$

5.5 Висновки за розділом

На підставі результатів досліджень, викладених у даному розділі, можна зробити наступні висновки:

1. Запропонована дифузійна модель відказів зварних з'єднань, згідно якій основну роль в зменшенні зусилля руйнування грає ефект дифузійної пористості. Дана модель дозволила розрахувати час безвідмовної роботи елементів за допомогою машинних випробувань вибірки з 1000 "зразків". Показано, що середній час напрацювання на відмову \bar{t}_n складає $\sim 10^5$ годин (більш ніж 10 років).

2. Обґрунтовані параметри дослідних режимів при дії циклічної зміни температури при нормальному атмосферному тиску, базуючись на рекомендаціях міжнародних і вітчизняних стандартів та беручи до уваги фізико-механічні властивості матеріалів, що застосовані в мікробірках.

3. Прискорені випробування мікробірок впродовж кількості випробувальних термоциклів $N_{\text{ц}} = 770$ (які еквівалентні десятирічному терміну експлуатації виробу в нормальних умовах) не викликали відмов. Оцінювання інтенсивності відмов λ в умовах експлуатації за критерієм χ^2 , що є найбільш поширеним для мікроелектронних виробів, показало, що $\lambda = 8,24 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$, а час напрацювання на відмову складає величину $t_n = 13,7$ років.

РОЗДІЛ 6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДМ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ТП

6.1 Вимірювання параметрів експериментального зразка детекторного модуля

Вигляд експериментального зразка детекторного модуля (ЕЗ ДМ) наведено на рисунку 6.1.

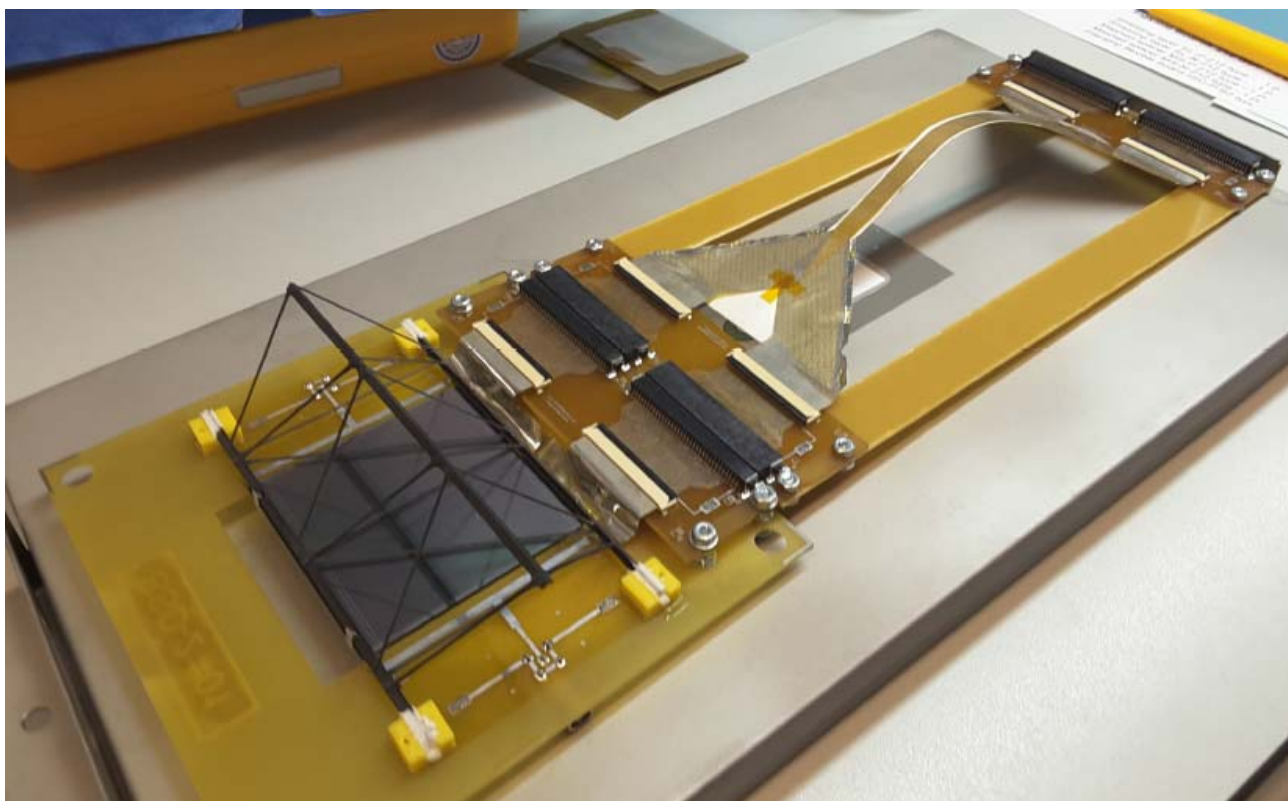


Рисунок 6.1 – ЕЗ ДМ для експерименту СВМ

Вимірювання параметрів ЕЗ ДМ виконано в Міжнародній міжурядовій науково-дослідній організації "Об'єднаний інститут ядерних досліджень" (м. Дубна, РФ) у відділі НМВКТС лабораторії ЛФВЕ [6.1]. Вигляд ЕЗ ДМ у складі лабораторного станду наведено на рисунку 6.2, а у складі випробувальної станції на рисунку 6.3.

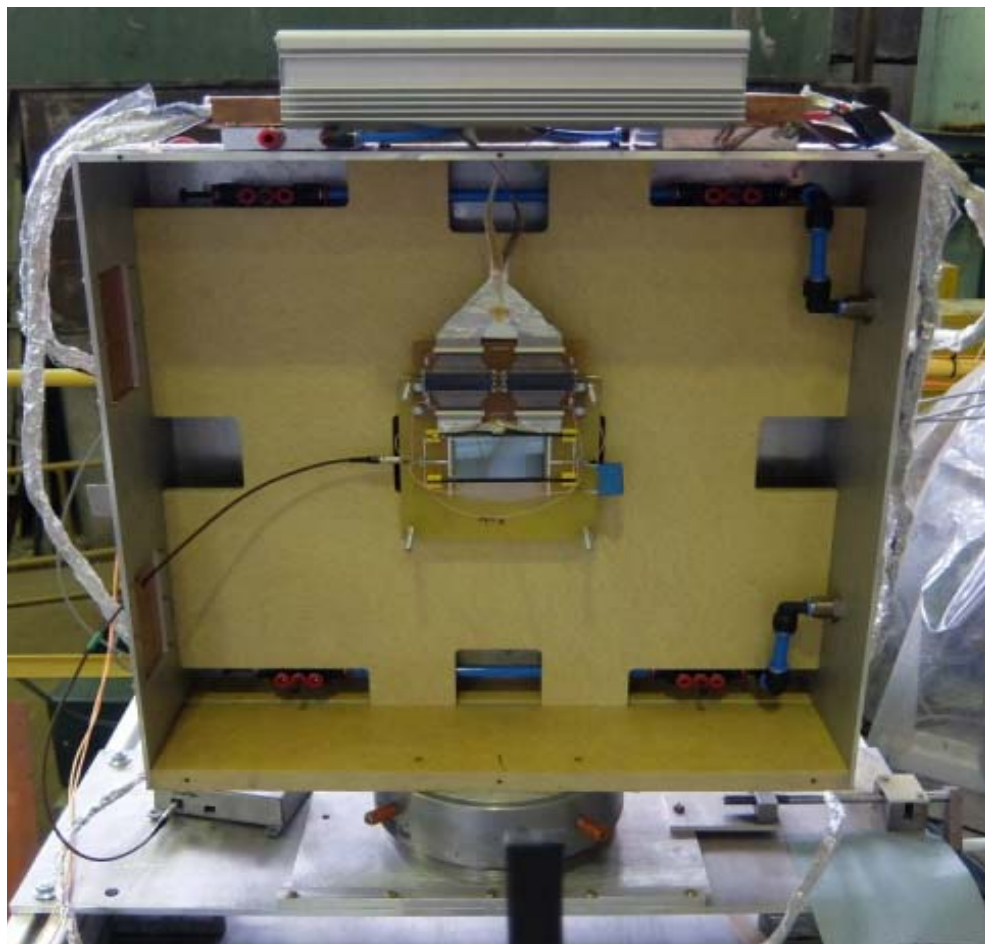


Рисунок 6.2 – ЕЗ ДМ у складі лабораторного стенду

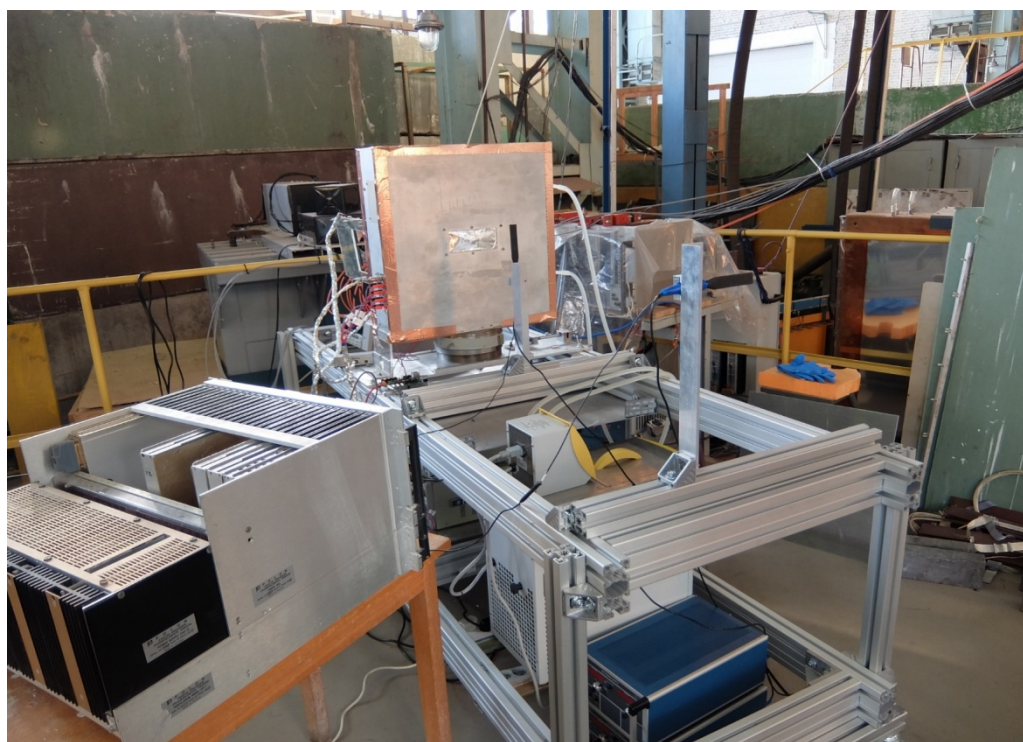


Рисунок 6.3 – ЕЗ ДМ у складі випробувальної станції

Випробування ЕЗ ДМ відбувались з застосуванням дейтронного пучка з енергією 3,5 GeV та інтенсивністю $2 \cdot 10^5$ дейтронів за секунду.

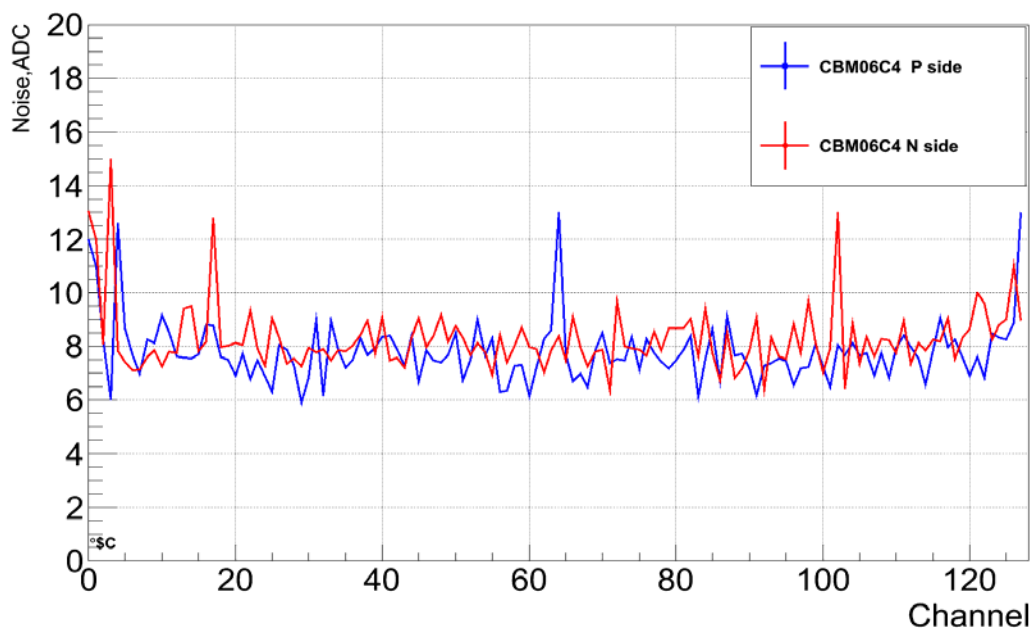


Рисунок 6.4 – Рівень шуму в ЕЗ ДМ, що досліджувався

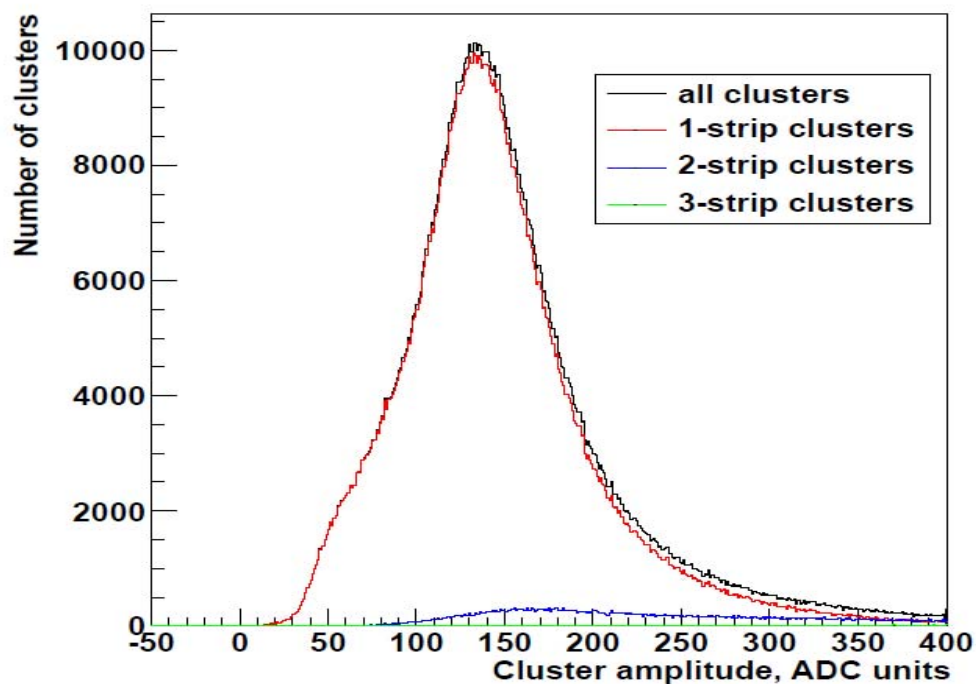


Рисунок 6.5 – Амплітуда сигналу в ЕЗ ДМ, що досліджувався

У процесі вимірювання параметрів ЕЗ ДМ було визначено відношення сигнал/шум, яке склало 16,8 для Р-сторони сенсора та 17,1 для N-сторони сенсора, що відповідає поставленому завданню дослідження (рисунки 6.4, 6.5).

На підставі позитивних результатів випробувань ЕЗ ДМ та його компонентів ТП виготовлення ДМ РВ рекомендовані для комплектації детекторних станцій експерименту СВМ у науковому GSI Центрі із дослідження важких іонів ім. Гельмгольца (м. Дармштадт, Німеччина).

6.2 Застосування розробленої технології

Окрім вищезазначених напрямків використання результатів роботи варто відзначити те, що розроблені технології також використовувалися при створенні виробів ракетно-космічної техніки : Спосіб виготовлення гнучкого модуля сонячної батареї: патент України на винахід № 85333: МПК (2006) H01L 31/04 / В. М. Борщов, О. М. Лістратенко, В. А. Антонова, І. Т. Тимчук, Г. В. Буєров, Я. Я. Костишин, М. А. Проценко; заявл. 10.12.2007 р.; опубл. 12.01.2009 р., Бюл. №1. – 4 с. [6.2].

Спосіб виготовлення гнучкого модуля сонячної батареї, заснований на послідовно-паралельній комутації сонячних елементів між собою за допомогою гнучкої друкованої плати з алюміній-поліімідного фольгованого діелектрика, що включає формування фотолітографічним способом в алюмінієвому шарі фольгованого діелектрика смужок для паралельного з'єднання та гнучких виводів для послідовного з'єднання сонячних елементів, формування в поліімідному шарі вікон для з'єднання зварюванням, формування петель термомеханічних компенсаторів у гнучких виводах для послідовного з'єднання сонячних елементів, механічне та електричне з'єднання тильних контактних площинок сонячних елементів з алюмінієвими смужками гнучкої друкованої плати по всій площі сонячного елемента із кроком 1-10 мм і гнучких виводів із фронтальними контактними площадками сусідніх сонячних елементів,

приклеювання до фронтальної поверхні кожного сонячного елемента захисних скляних пластин, який відрізняється тим, що гнучку друковану плату виготовляють з алюміній-поліімідного лакофольгового діелектрика, у якому формують вікна для розміщення сонячних елементів і вікна для формування петель термомеханічних компенсаторів в шарі поліімідного лаку, формують перфораційні отвори в алюмінієвих смужках, наносять на алюмінієві смужки і гнучкі виводи в областях з'єднання з контактними площинками сонячних елементів додаткові шари нікелю товщиною від 2 до 4 мкм, на друкованій платі формують локальні багатошарові контакти складу Ni-SnBi для послідовного та паралельного з'єднання модулів у сонячній батареї пайкою.

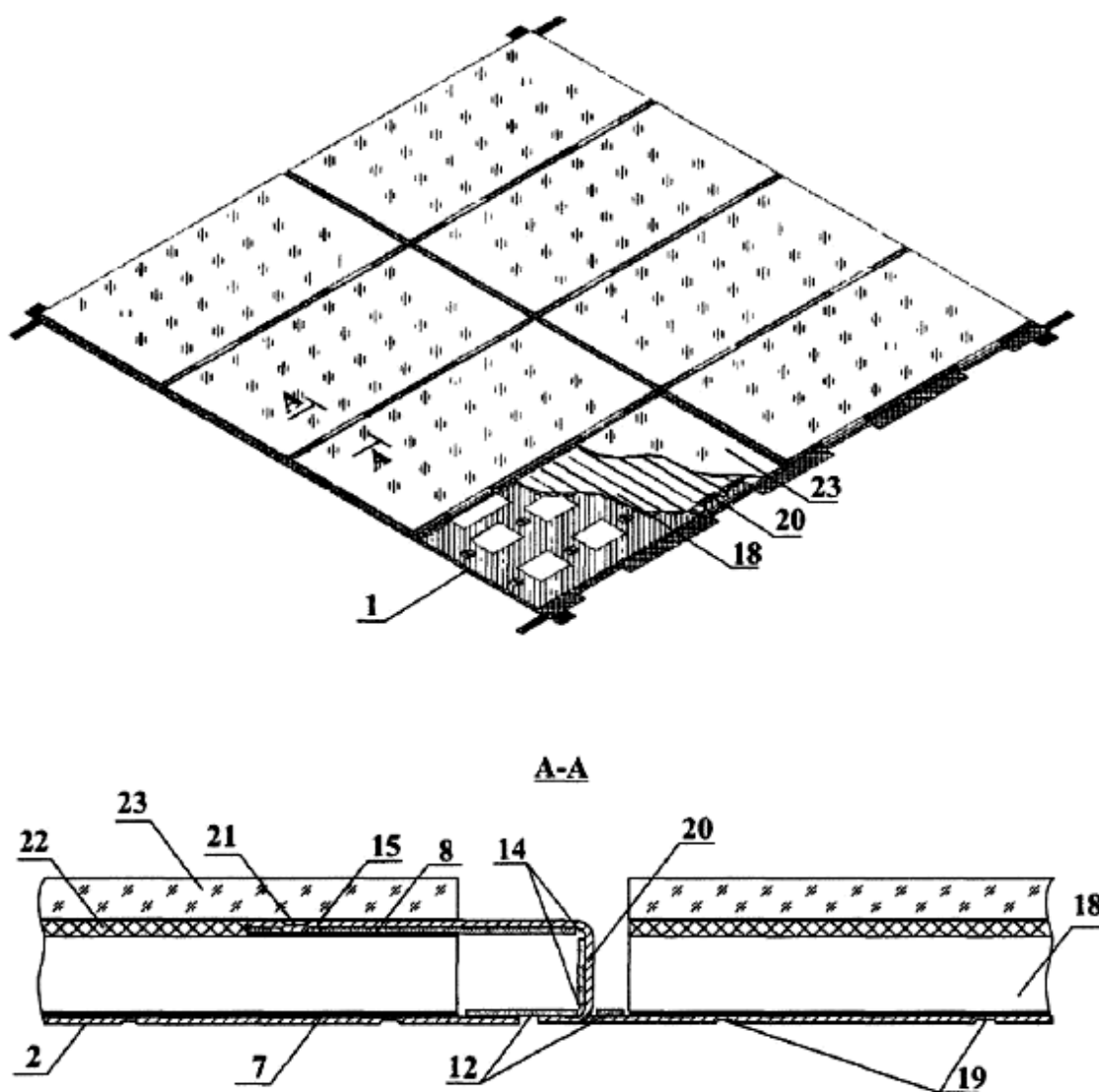


Рисунок 6.6 – Гнучкий модуль сонячної батареї

На рисунку 6.6 схематично зображений гнучкий модуль сонячної батареї.

Позиціями позначені:

- 1 – гнучка друкована плата;
- 2 – шар алюмінію;
- 3 – алюмінієві смужки для паралельного з'єднання сонячних елементів;
- 4 – гнучкі виводи для послідовного з'єднання сонячних елементів;
- 5 – області зварювання гнучкої друкованої плати на тильні контактні площинки сонячних елементів;
- 6 – області зварювання гнучкої друкованої плати на фронтальні контактні площинки сонячних елементів;
- 7 – тильні контактні площинки сонячних елементів;
- 8 – фронтальні контактні площинки сонячних елементів;
- 9 – перфораційні вікна в шарі алюмінію;
- 10 – контактні площинки для послідовного з'єднання модулів у сонячній батареї;
- 11 – контактні площинки для паралельного з'єднання модулів у сонячній батареї;
- 12 – шар полііміду;
- 13 – посадкові вікна в шарі полііміду для сонячних елементів;
- 14 – вікна в шарі полііміду для формування петель термокомпенсаторів;
- 15 – вікна в шарі полііміду для зварювання гнучких виводів на фронтальні контактні площинки сонячних елементів;
- 16 – додаткові шари Ni в областях зварювання;
- 17 – додаткові шари Ni-SnBi для пайки;
- 18 – сонячні елементи;
- 19 – зварні з'єднання смужок алюмінію з тильними контактними площинками сонячних елементів;
- 20 – петлі термомеханічних компенсаторів;

21 – зварні з'єднання гнучких контактів із фронтальними контактними площинками сонячних елементів;

22 – оптично прозорий клей;

23 – захисні скляні пластини.

Розроблені технології застосовувалися також при створенні світлодіодних пристроїв: Спосіб виготовлення гнучкого світлодіодного модуля: патент України на винахід № 83968: МПК (2006) H01L 27/15 / В. М. Борщов, О. М. Лістратенко, Я. Я. Костишин, Г. В. Буєров, М. А. Проценко, І. Т. Тимчук; заявл. 20.08.2007 р.; опубл. 26.08.2008 р., Бюл. №16. – 6 с. [6.3].

Спосіб виготовлення гнучкого світлодіодного модуля, що включає формування гнучкої комутуючої плати, встановлення та з'єднання світлодіодних приладів електричною схемою на гнучкій комутуючій платі, встановлення комутуючої плати зі світлодіодними приладами на теплопровідні основи, які розміщені на відстані одна від одної, який відрізняється тим, що гнучку комутуючу плату виготовляють з лакофольгового діелектрика, у якій методом фотолітографії в металевому шарі формують гнучкі виводи для з'єднання з фронтальними контактами і плоскі площадки для з'єднання з тильними контактами напівпровідникових кристалів світлодіодів, а в шарі діелектрика – вікна для з'єднання зварюванням, одночасно в гнучкій платі формують розгортки рефлекторів-коліматорів, на гнучку плату встановлюють кристали світлодіодів, фронтальні і тильні контакти яких електрично і механічно з'єднують із платою точковим зварюванням через вікна в діелектрику, причому фронтальні контакти з'єднують із гнучкими виводами, а тильні контакти з'єднують із плоскими площадками в окремих точках по сітці із кроком від 150 до 800 мкм по всій площі кристала, гнучку комутуючу плату зі світлодіодними кристалами встановлюють на теплопровідні основи точковим зварюванням через вікна в діелектрику в окремих точках по периметру кожного світлодіодного кристала на відстані 150-300 мкм від краю кристала, потім з

розгорток на комутуючій платі формують рефлектори-коліматори для кожного світлодіодного кристала, у рефлекторах-коліматорах формують первинні оптичні системи.

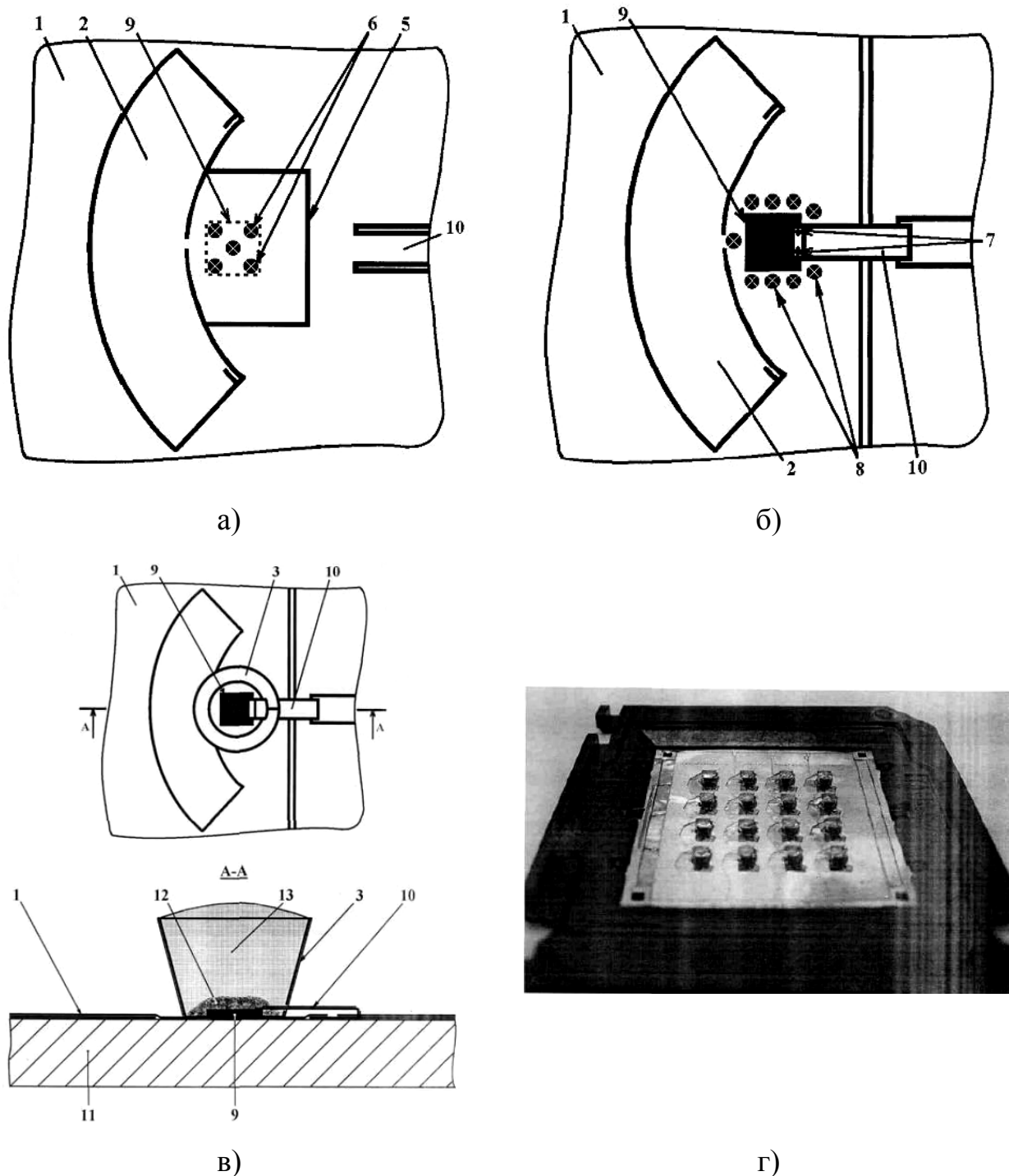


Рисунок 6.7 – Гнучкий світлодіодний моуль

а) фрагмент гнучкої комутуючої плати з кристалом світлодіода, встановленим зварюванням, вид з тильної сторони; б) фрагмент комутуючої

плати з кристалом світлодіода, встановленої на теплопровідну основу зварюванням, вид із фронтальної сторони; в) фрагмент модуля зі світловипромінюючим світлодіодним приладом; г) фотографія світлодіодного модуля

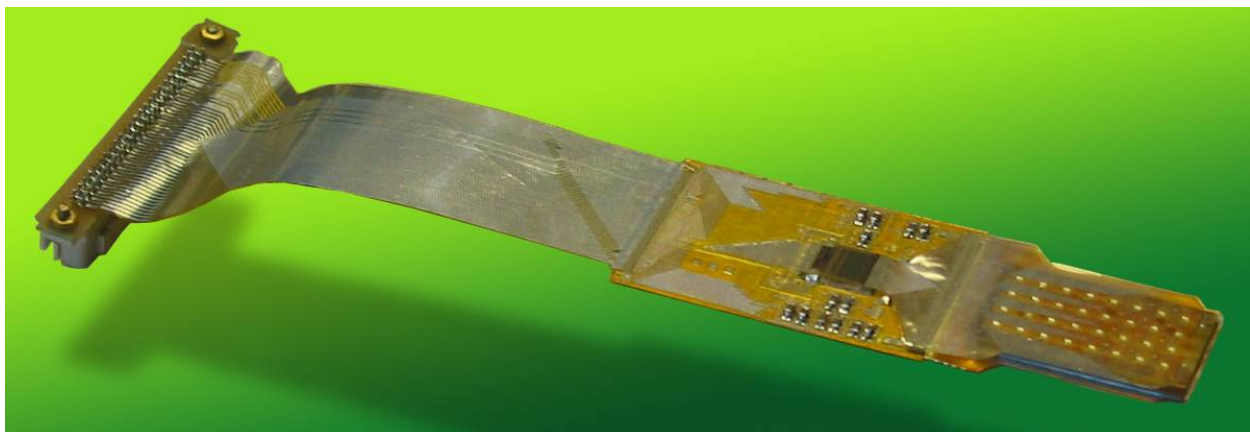
На рисунку 6.7 зображений гнучкий світлодіодний модуль.

Позиціями позначені:

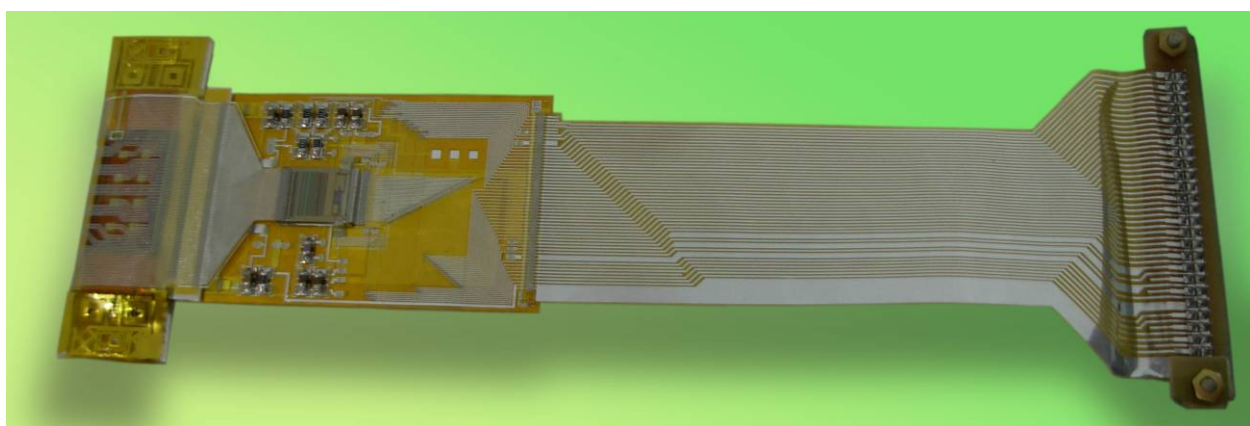
- 1 – гнучка комутуюча плата;
- 2 – розгортка рефлектора-коліматора;
- 3 – рефлектор-коліматор;
- 4 – світловипромінюючий світлодіодний прилад;
- 5 – вікно в шарі діелектрика для з'єднання зварюванням;
- 6 – точки зварювання гнучкої комутуючої плати з тильним контактом напівпровідникового кристала світлодіода;
- 7 – точки зварювання гнучкого виводу комутуючої плати з фронтальним контактом напівпровідникового кристала світлодіода;
- 8 – точки зварювання гнучкої комутуючої плати з теплопровідною основою;
- 9 – кристал світлодіода;
- 10 – гнучкий вивід комутуючої плати для з'єднання з фронтальним контактом світлодіодного кристала;
- 11 – теплопровідна основа;
- 12 – органічний люмінофор;
- 13 – оптично прозора кремнійорганічна композиція.

Також базуючись на науково-технічному доробку, набутому при розробці координатних детекторних модулів для міжнародних експериментів ALICE та CBM, було розроблено і досліджено мініатюрні одно- і багатодетекторні детекторні модулів для використання в модифікованих як ПЕТ і ОФЕКТ медичних томографах (рисунок 6.8), так і в зондах ендоректального

застосування. При цьому досягнуто обсяг детектування більше ніж до 90% активного детектора, підвищено чутливість у 20-40 разів, забезпечено субміліметрова роздільна здатності, знижено час комп'ютерної обробки даних, а отже, і променевого навантаження на пацієнта в процесі обстеження [6.4-6.10].



а)



б)

Рисунок 6.8 – Детекторні модулі для використання в модифікованих ПЕТ і ОФЕКТ медичних томографах:

а) однодетекторний модуль; б) багатодетекторний модуль

Варто відзначити надзвичайну вагомість розробки технології виробництва новітніх високотехнологічних ДМ РВ і їх компонентів, що сприятиме значній інтеграції та подальшому поглибленню співпраці

українських мікроелектронних підприємств з провідними європейськими дослідними центрами та лабораторіями, що ще значною мірою поглибить інтеграцію України до Європейської співдружності.

6.3 Висновки за розділом

На підставі результатів досліджень, викладених у даному розділі, можна зробити наступні висновки:

1. Із використанням удосконалених технологій були виготовлені дослідні зразки ДМ РВ для експерименту СВМ, які підтвердили результати теоретичного розрахунку – відношення сигнал/шум вище за 10.

2. ТП виготовлення та складання ДМ РВ та їх компонентів впроваджено в ТОВ "Світлодіодні технології Україна" (м. Харків) і в GSI Центрі із дослідження важких іонів ім. Гельмгольца (м. Дармштадт, Німеччина).

3. Результати дисертаційних досліджень впроваджені у навчальному процесі на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки ХНУРЕ та на кафедрі інформаційних технологій електронних засобів Запорізького національного технічного університету, що підтверджено відповідними актами.

Виходячи з отриманих результатів, можна зробити висновок, що всі поставлені задачі дослідження виконані та мету дослідження досягнуто.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено задачу теоретичного та експериментального дослідження ТП виготовлення ДМ РВ та їх компонентів.

Отримано наступні основні результати:

1. Вперше запропоновано та впроваджено у виробництво ТП виготовлення новітніх тривимірних ДМ РВ, які на відміну від існуючих реалізують мінімальну радіаційну довжину (зменшено товщину матеріалу шарів ВТС на ~30 %, що призвело до зменшення багатократного розсіювання в шарах ВТС і підвищення ефективності реконструкції треків частинок) та високу щільність монтажу компонентів.

2. Уточнено математичну модель для дослідження впливу конструктивно-технологічних факторів на ємність ліній передач. Обґрунтовано доцільність використання в конструкції гнучких шлейфів сигнальних провідників з шириною 35-40 мкм та кроком провідників 50-60 мкм. Показано, що погонна ємність розглянутих шлейфів складає 0,35 пФ/см. Удосконалено гнучкий багат шаровий з'єднувальний шлейф, в якому сигнальні шари виконані з безадгезивних алюміній-поліімідних фольгових діелектриків, що дозволило на відміну від вже існуючих аналогів зменшити об'ємно-масові характеристики та товщину шлейфа в три рази, зменшити радіаційну довжину більш ніж у три рази, зменшити сумарну погонну ємність шлейфу на 15 %.

3. Досліджено переваги використання ГЗЕ в конструкціях ДМ РВ, виготовлених з безадгезивних лакофольгових алюміній-поліімідних діелектриків. Вперше було реалізовано ГЗЕ з безадгезивних алюміній-поліімідних фольгових діелектриків з кроком розташування провідників 50 мкм та менше.

4. Набув подальшого розвитку метод вибору оптимальних технологічних режимів УЗ-зварювання на основі теорії повного факторного експерименту. Удосконалено ТП УЗ-зварювання ГЗЕ з безадгезивних алюміній-поліімідних

фольгових діелектриків на автоматизованому обладнанні, що дозволило покращити відтворюваність з'єднань і підвищити продуктивність складання ДМ більш ніж у 10 разів.

5. Розроблено, досліджено та реалізовано конструкцію ГМ на високотеплопровідній вуглепластиковій основі з мікросхемами, які встановлені з використанням багатошарових ГЗЕ. Досліджено вплив параметрів і властивостей вуглепластикових підкладок з анізотропною теплопровідністю на тепловий режим ГМ. Показано, що максимальне тепловідведення забезпечується за товщини вуглепластикової основи не менше 300 мкм і розташування мікросхем уздовж довгої сторони підкладки з максимальним значенням теплопровідності $\lambda_y = 450 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Встановлено, що температура перегріву поверхні ГМ за умови використання системи рідинного охолодження не перевищує 11 градусів.

6. Запропоновано дифузійну модель відмов зварних з'єднань, згідно якої основну роль у зменшенні зусилля руйнування відіграє ефект дифузійної пористості. Ця модель дозволила розрахувати час безвідмовної роботи елементів за допомогою машинних випробовувань вибірки з 1000 "зразків". Показано, що середній час напрацювання на відмову складає $\sim 10^5$ годин (більше 10 років).

7. Прискорені випробування мікробірок впродовж кількості випробувальних термоциклів $N_{\text{ц}} = 770$ не викликали відмов. Оцінено інтенсивність відмов мікробірок в умовах експлуатації за критерієм χ^2 , що дорівнює $\lambda = 8,32 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$, а час їх напрацювання на відмову $t_{\text{н}} = 13,7$ років.

8. Із використанням удосконалених технологій були виготовлені дослідні зразки ДМ РВ для експерименту СВМ, які підтвердили результати теоретичного розрахунку – відношення сигнал/шум вище за 10.

9. ТП виготовлення та складання ДМ РВ та їх компонентів впроваджено в ТОВ "Світлодіодні технології Україна" (м. Харків) і в GSI Центрі із дослідження важких іонів ім. Гельмгольца (м. Дармштадт, Німеччина).

10. Результати дисертаційних досліджень впроваджені у навчальному процесі на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки ХНУРЕ та на кафедрі інформаційних технологій електронних засобів Запорізького національного технічного університету, що підтверджено відповідними актами.

Виходячи з отриманих результатів, можна зробити висновок, що всі поставлені задачі дослідження виконані та мету дослідження досягнуто.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Перелік використаних джерел до розділу 1

1. Акимов Ю.К., Игнатъев О.В., Калинин А.И., Кушнирук В.Ф. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 344 с.
2. Lutz G. Semiconductor radiation detectors. – Springer, 1999. – 350 с.
3. Re V., Kirkby D., Bruinsma M. et al. Lessons Learned From BaBar Silicon Vertex Tracker, Limits, and Future Perspectives of the Detector // IEEE Trans. on Nuclear Science. – 2005. – Vol. 52, No. 3. – С. 787 - 792.
4. J.M. McKenzie, D.A. Bromley Gold Surface Barrier Si-Diode, Bull. Am. Phys. Soc.4 (1959) – 422 с.
5. E. Belau, R. Klanner, G. Lutz, et al. Charge collection in silicon strip detectors// Nucl. Instr. & Meth. 214 – 1983 – С. 253 - 260.
6. L. Evans, P. Bryant. LHC Machine // Journal of Instrumentation, 3, S08001-2008 – 164 с.
7. The ATLAS Collaboration . The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider// Journal of Instrumentation, 3 S08003 – 2008 – 437 с.
8. The ALICE Collaboration . The ALICE experiment at the CERN LHC// Journal of Instrumentation, 3 S08002 – 2008 – 159 с.
9. The CMS Collaboration. The CMS experiment at the CERN LHC // Journal of Instrumentation, 3 S08004 – 2008 – 361 с.
10. The LHCb Collaboration. The LHCb Detector at the LHC// Journal of Instrumentation, 3 S08005 – 2008 – 217 с.
11. M. Oinonen, V. Borshchov, I. Tymchuk et al. ALICE Silicon Strip Detector Module Assembly with Single-Point TAB Interconnections//11-th Workshop on electronics for LHC an future Experiments. LECC 2005, Heidelberg, Germany, 12-16 September 2005 – Book of abstracts.– С.92-97.

12. M. Bregant, V. Borshchov, , G. Zinovjev et al Assembly and validation of the SSD silicon microstrip detector of ALICE// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2006. – A566. – C. 18-21.

13. The ALICE vertex detector: Focus on the micro-strip layers/ M. Bregant, V. Borshchov, M.Protsenko, et al.// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2006.–A569.–C.29-32.

14. Assembly and validation of the ALICE silicon microstrip detector/ M. Bregant, V. Borshchov, I. Tymchuk et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2006.–A570.–C.312-316.

15. Inside the ALICE experiment – Silicon Strip Detector modules from the Helsinki Institute of Physics/ M. Oinonen , V. Borshchov, G.Zinovjev et al. // Proceedings of the XLI Annual Conference of the Finnish Physical Society. – Tallinn, Estonia, March 15–17. – 2007. – C.322

16. Алюминиевая “Chip on flex” (COF) технология в радиационном приборостроении/ Н.В. Замирец, В.Н. Борщев, А.М. Листратенко, В.А. и др. // Технология приборостроения. – 2007. – №2. – с.3-9.

17. The CBM Collaboration. Technical Design Report for the CBM Silicon Tracking System (STS).– GSI-2013-05499– 2013 – 167 с.

18. Фарассат Ф., Валев С. “Кристалл на плате” (COB): новая эра сборочной технологии// Технологии в электронной промышленности. – 2005. – № 6. – С. 71 -76.

19. Handbook of tape automated bonding. - New York: Van Nostrand Reinhold (edited by John H. Lau). – 1991. – 645 p.

20. Сборка демонстратора трековой системы.
URL: <http://www.inaeksu.vstu.vinnica.ua/kafs/mpa/microproc/r2.htm#2.1>.

21. Still A. CDF Run II silicon tracking projects // Nucl. Instr. and Meth. – 2000. – A 447. – P. 1 – 8.
22. Merkel P. et al. CDF Run IIb Silicon Detector: The Innermost Layer// IEEE Transactions on nuclear science. – 2004. – Vol. 51, No 5. – P. 2215-2219.
23. Tricomi A. The CMS Inner Tracker Silicon Microstrip Modules: Production and test// Nucl. Instr. and Meth. – 2007. – A 570. – P. 248 – 252.
24. List B. The H1 silicon tracker // Nucl. Instr. and Meth. – 2005. – A 549. – P. 33 – 36.
25. Бюллер К.-У. Тепло- и термостойкие полимеры / Под ред. Я.С. Выгодского. – М.: Химия, 1984. – 1056 с.
26. Бессонова М.И., Котон М.М. Полиимиды – класс термостойких полимеров / Под. ред. М.И. Бессоновой. – Л.: Наука, 1983. – 307 с..
27. Астахин В.В., Трезвов В.В., Суханов И.В. Электроизоляционные лаки, пленки и волокна. – М.: Химия, 1986. – 158 с.
28. Александрова Л.Г. Перспективные разработки в области гибких фольгированных диэлектриков // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 1995. – № 1. – С. 38 – 40.
29. Гончарова Т.С. Полиимидные пленки в качестве межслойных изолирующих и пассивирующих слоев ИС // Зарубежная электронная техника. – 1989. – №8 (339). – С.53-82.
30. ECSS-Q-70-71A Space product assurance. Data for selection of space materials and process. – P. 197.
31. DuPont Pyralux Flexible Circuit Materials. URL: www.dupont.com/fcm.
32. Аткин Э.В., Бочаров Ю.И., Симаков А.Б. Проектирование БИС считывания сигналов микростриповых детекторов по субмикронной КМОП технологии // Труды XLVIII научной конференции МФТИ “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук”, Москва-Долгопрудный, 25–26 ноября. – 2005. – Ч. II Общая прикладная физика. – С. 110 – 111.

33. Пырченков В., Смирнов В. Гибкие микропечатные платы (Базовый технологический процесс). URL: <http://www.ipmce.ru/articles/gibkie-microplaty/>.
34. Гуськов Г.Я., Блинов Г.А., Газаров А.А. Монтаж микроэлектронной аппаратуры. – Москва: Радио и связь, 1986.
35. Воженин И.Н., Блинов Г.А., Коледов Л.А. и др. Микроэлектронная аппаратура на бескорпусных интегральных микросхемах. – Москва: Радио и связь, 1985.
36. Д. Динев и др. Технология изготовления гибких терморезисторов на полиимидной основе// Технология и конструирование в электронной аппаратуре. –2013. – Вып. 1. – С 38 - 41.
37. К.К. Баклаев, А.В. Воробьев, В.Д. Жора. Низкоомные акустические мембраны на полиимидной основе. Труды XIV междунар. научн.-практ. конф. “Совр. информ. и электр. технологии ”. – Одесса. – 2013. – С 248 - 250.
38. Вербицкий В.Г., Плис Н.И., Жора В.Д. и др. Сравнительный анализ методов сборки микросхем на гибких полиимидных носителях// Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2013. – Вып. 5. – С 37 - 41.
39. Thermal and electrical insulation films and tapes. URL: http://www.cgstape.com/doc/film_cm.htm.
40. Патент России 2240921. Способ получения полиимидного материала/ В.Н. Воробьев, А.В. Воробьев. – Оpubл. 27.11.2004.
41. А. с. 1 781 733 СССР. Способ сборки интегральных схем.// Шеревеня А.Г., Тучинский И.А., Жора В.Д. МКИ Н01L 23/00. Оpubл. 15.12.92. Бюл. № 46.
42. Н.И. Плис, В.Г. Вербицкий, В.Д. Жора и др. Технология сборки микросхем на гибком полиимидном носителе.// Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2010. – №. 5-6. – С.43- 45.
43. Жора В.Д., Шеревеня А.Г., Сергиенко З.А. и др. Влияние конструктивно-технологических факторов на динамику усадки гибких

носителей для ИС.// Электронная техника, Сер. 7, ТОПО. – 1991. – Вып. 2. – С. 40-45.

44. Development of thin multi-line cables for the STS micro-strip detector modules / V. N. Borshchov, O. M. Listratenko, M. A. Protsenko, I. T. Tymchuk // CBM Progress Report 2007. – GSI Darmstadt, Germany. – 2008 – P. 34-35.

45. Development of ultra-thin cables for the CBM Silicon Tracking System / V. M. Borshchov, J. M. Heuser, Yu. A. Murin, M. A. Protsenko et al. // GSI Scientific Report 2009, FAIR-EXPERIMENTS-70. – GSI Darmstadt, Germany. – 2010 – P. 72.

46. Борщев В.Н., Антонова В.А., Листратенко А.М. и др. Комплексный подход к выбору конструктивно-технологических решений гибко-жестких однодетекторных модулей для комптоновской медицинской томографии.//Сцинтилляционные материалы. Инженерия, устройства, применение. Харьков. – 2009. – С.111 – 127.

47. Бессонов М.И., Котон М.М., Кудрявцев В.В., Лайус Л.А. Полиимиды – класс термостойких полимеров. – Ленинград: Наука, 1983.

48. Перевертайло В.Л., Жора В.Д., Грунянская В.П. и др. Применение гибких носителей при сборке кремниевых детекторов// Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2009. – №1 (79). – С. 40 - 44.

49. Борщев В.Н., Листратенко А.М., Антонова В.А. и др. Светодиодные модули на основе алюминиевой “chip on flex” (COF) технологии// Світлотехніка та електроенергетика. – 2008. – №4. – С. 31-37.

50. Borshchov V., Voiko A., Kiprich S., Kaurova L., Listratenko S., Protsay G., Reznik A., Starkov V. Aluminium microcable technology for the ALICE silicon strip detector: a status report// 8-th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Colmer, 9-13 September 2002. – A 41.

Перелік використаних джерел до розділу 2

1. D0-L0 Conceptual Design Report. - Version 2.5, 2003.
2. Иоссель Ю.А. и др. "Расчёт электрической ёмкости", Л, Энергоиздат, Ленинград. отделение, 1981, 288 с.
3. Проценко М. А. Исследование оптимальных конструкций гибких кабелей микроstriпового детекторного модуля для эксперимента СВМ и оценка их емкостных параметров / М. А. Проценко // Технология приборостроения. – 2007. – № 1. – С. 16-21.
4. Климова Л. В. Анализ частотных свойств гибких коммутационных плат / Л. В. Климова, М. А. Проценко // Технология приборостроения. – 2006. – № 2. – С. 22-26.
5. Исследование зависимости емкостных параметров гибких алюминий-полиимидных коммутационных плат от их конструктивных особенностей / М. А. Проценко, И. Т. Тимчук, И. С. Хатнюк // Сборник материалов 15-го Юбилейного международного молодежного форума "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке". – 18-20 апреля 2011 г., – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. – С. 79-80.
6. Гнучкий багатосаровий з'єднувальний шлейф: патент України на корисну модель № 104141: МПК H05K 1/11 (2006.01) / В. М. Борщов, В. Г. Кучеренко, О. М. Лістратенко, Г. І. Нікітський, М. А. Проценко, І. Т. Тимчук; заявл. 24.07.2015 р.; опубл. 12.01.2016 р., Бюл. №1. – 4 с.
7. Анализ современных технологий изготовления гибридных микросборок / И. Ш. Невлюдов, М. А. Проценко, И. С. Хатнюк, Р. Ю. Аллахверанов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Специальный выпуск "Новые технологии в машиностроении". Сборник научных трудов. Выпуск 3 (63). – 2010. – С. 200-207.

8. Антонова В.А., Борщев В.Н., Резник А.П. Оценка теплового режима гибридной интегральной микросхемы на углепластиковом основании // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн.сб. – 2003. – Вып. 135. – С. 166 - 171.
9. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы теории теплопроводности. –М.: Высш.шк., 1982. – 327 с.
10. Дульнев Г.Н., Семьяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. - Л.: Энергия, 1968. – 360 с.
11. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Высш.шк., 1984. – 247 с.
12. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.
13. ATLAS Inner Detector Technical Design Report // ATLAS TDR5, CERN/LHCC 97-17. – 1997. – Vol2. –866 p.
14. Вавилов .П. Тепловые методы контроля композиционных структур и изделий радиоэлектроники. – М.: Радио и связь, 1984. –153 с.
15. Ага Г.Б., Перевезенцев А.П. Применение аналитических методов для контроля диагностики плат РЭА по их тепловой картине // Электронная техника. Сер 8. Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания. – 1990. –Вып. 2 (139). – С. 54 - 56.

Перелік використаних джерел до розділу 3

1. Белевич Г.М., Полушкин Д.С., Соколов А.В. и др. Рулонный метод изготовления безадгезивных алюминиевых выводов.// Электронная промышленность. – 1977. – Вып. 3. – С. 6 - 11.
2. А.с. 566866 (СССР). Раствор для травления алюминия/ Кидалюк В.Н., Жора В.Д., Масенко В.К и др. МКИ С09К 13/00. Опубл. 30.07.77. Бюл. № 28.

3. Шеревеня А.Г., Жора В.Д., Тучинский И.А. Сборка ИС на гибком носителе с использованием высокопроизводительной рулонной технологии. / Научно-технические достижения: Межотр. науч.-техн. сборник./ – М. –ВИМИ. – 1989. – Вып. 2. – С. 45 - 48.
4. Дерягин Б.В., Леви С.М. Физико-химия нанесения тонких слоев на движущуюся подложку. –М.: Изд-во АН СССР. – 1959. – 208 с.
5. Светочувствительные полимерные материалы. Под ред. А.В. Ельцова. – Совм. изд. СССР и ЧССР. – Л.: Химия. – 1985. – С. 296.
6. Development and test of micro-cables for thin silicon detector modules in a prostate probe / С. Lacasta, V. Borshchov, A. Listratenko, M. Protsenko et al. // Nuclear Science Symposium Conference Record, 2008 IEEE NSS-MIC. – Dresden, Germany. – 19-25 October 2008. – P. 1126-1129.
7. Исследования и выбор оптимальных технологических режимов сварки для автоматизации монтажа гибких-алюминий полиимидных микрокабелей / В.Н. Борщев, И.Ш. Невлюдов, М.А. Проценко, И.Т. Тымчук, И.С. Хатнюк // Технология приборостроения. – 2011. – №1 – С. 3-8.
8. Improvement of ultra-light microcables production at LTU for the CBM Silicon Tracking System/ V. M. Borshchov, I. T. Tymchuk, M. A. Protsenko, J. Eschke et al. // GSI Scientific Report 2014, MU-NQM-CBM-46. – GSI Darmstadt, Germany. – 2015. – P. 83.
9. Pre-series production of microcables for STS detector modules at LTU Ltd / V. M. Borshchov, Yu. A. Murin, M. A. Protsenko, I. T. Tymchuk et al. // GSI Scientific Report 2015, MU-NQM-CBM-1. – GSI Darmstadt, Germany. – 2016. – P. 1.
10. Исследование и выбор оптимальных технологических режимов изготовления гибких коммутационных структур для современных микроэлектронных систем / В. Н. Борщев, И. Ш. Невлюдов, М. А. Проценко, И. С. Хатнюк // Сборник материалов VII Международной конференции

"Стратегия качества в промышленности и образовании". – 3-10 июня 2011 г., Варна, Болгария. – Том 3. – С. 34-37.

Перелік використаних джерел до розділу 4

1. Investigation of the compressed baryonic matter at the GSI accelerator complex / V. P. Ladygin, V. N. Borshchov, Yu. A. Murin, M. A. Protsenko et al. // Book of abstracts of the XXIII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems (Baldin ISHEPP XXIII). – 19-24 September, 2016., Dubna, Russia, – P. 92 (EPJ Web Conf. Volume 138. – 2017. – 10 p.).

2. The first mock-up of a CBM-STS full-scale ladder / V. M. Borshchov, Yu. A. Murin, G. I. Nikitskiy, M. A. Protsenko et al. // CBM Progress Report 2014. – GSI Darmstadt, Germany. – 2015. – P. 49.

3. Борщев В.Н. Физико-механические свойства микроэлектронных элементов коммутации на основе пленочной коммутации алюминий – полиимид. / В.Н. Борщев, В.Е. Старков, В.И. Степаненко // Функциональные материалы. – 2003. – Вып. 2. - С. 391-400.

4. Innovative microelectronic technologies for high-energy physics experiments / V. M. Borshchov, O. M. Listratenko, M. A. Protsenko et al. // Functional materials. – 2017. – Vol. 24, № 1. – P. 143-153.

5. Новітні підходи створення надлегких детекторних модулів для фізичних експериментів / В. М. Борщов, І. Т. Тимчук, М. А. Проценко // Тезиси докладов XV Конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям. – 21-24 марта 2017 г., Харьков: ННЦ ХФТИ. – С. 105-106.

6. Исследование возможности использования "chip on flex" технологии для сборки микрострипового детекторного модуля / М. А. Проценко, И. Т. Тимчук, И. С. Хатнюк // Сборник материалов 14-го Международного молодежного форума "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке". – 18-20 марта 2010 г., Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. – С. 422.

7. Design and assembly of STS Demonstrator Module 0-B / V. M. Borshchov, J. M. Heuser, M. A. Protsenko, I. T. Tymchuk et al. // CBM Progress Report 2008. – GSI Darmstadt, Germany. – 2009. – P. 12.

8. Prototyping of the CBM-STS module / V. M. Borshchov, Yu. A. Murin, J. M. Heuser, M. A. Protsenko et al. // CBM Progress Report 2009. – GSI Darmstadt, Germany. – 2010. – P. 17.

9. The MPD detector at the NICA heavy-ion collider at JINR / Kh. U. Abraamyan, V. N. Borshchov, M. A. Protsenko, I. T. Tymchuk et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2011. – A 628. – P. 99-102.

10. Prototyping of the CBM STS module / V. M. Borshchov, Yu. A. Murin, M. A. Protsenko, I. T. Tymchuk et al. // CBM Progress Report 2010. – GSI Darmstadt, Germany. – 2011. – P. 17.

11. A First experience in prototyping sensitive modules for CBM STS / Yu. A. Murin, V. M. Borshchov, M. A. Protsenko, I. T. Tymchuk et al. // CBM Progress Report 2011. – GSI Darmstadt, Germany. – 2012. – P. 19.

12. Full-size silicon microstrip sensors for the CBM Silicon Tracking System / J. M Heuser, V. M. Borshchov, M. Protsenko, I. Tymchuk et al. // GSI Scientific Report 2012, PHN-NQM-EXP-16. – GSI Darmstadt, Germany. – 2013. – P. 45.

13. An assembly concept for modules of the CBM Silicon Tracking System / C. J. Schmidt, V. M. Borshchov, M. Protsenko, I. Tymchuk et al. // CBM Progress Report 2012. – GSI Darmstadt, Germany. – 2013 – P. 18.

14. Full-size prototype microstrip sensors for the CBM Silicon Tracking System / J. Heuser, V. M. Borshchov, I. Tymchuk, M. Protsenko et al. // GSI Scientific Report 2013, NQM-CBM-11. – GSI Darmstadt, Germany. – 2014. – P. 26.

15. First mock-up of the CBM STS module based on a new assembly concept / V. M. Borshchov, C. J. Schmidt, I. T. Tymchuk, M. A. Protsenko et al. // CBM Progress Report 2013. – GSI Darmstadt, Germany. – 2014. – P. 41.

16. Сборка демонстратора трековой системы для международного эксперимента по исследованию сжатой барионной материи / В. Н. Борщев,

И. Ш. Невлюдов, М. А. Проценко и др. // Вестник Национального технического университета "ХПИ": Тематический выпуск "Технологии в машиностроении". – 2011. – Вып. № 40. – С. 165-173.

17. J. Fjelstad, Flexible Circuitry–Technology Background and Important Fundamental Issues, Basics of Flexible Circuits, 2003.

18. H. Kristiansen, J. Liu, IEEE Trans. Compon. Pack. Manuf. Technol. A 21 (June) (1998) 208–214.

19. G. Harman, Wire Bonding in Microelectronics Materials, Processes, Reliability, and Yield, second ed., McGraw-Hill, 1997, ISBN 0-07-032619-3, pp. 290.

20. A. Carrass, V.P. Jaecklin, Analytical methods to characterize the interconnection quality of gold ball bonds, in: EuPac 1996 Proceedings of the Second European Conference on Electronic Packaging Technology and Eighth International Conference on Interconnection Technology in Electronics, 1996.

21. M.G. Pecht, Influence of Temperature on Microelectronics and System Reliability, CRC Press, 1997.

22. James C. Wyant, Proc. SPIE 4737 (July) (2002) 98 – 107.

23. R. Windecker, M. Fleischer, K. Koë rner, H.J. Tiziani, Opt. Laser Eng. 36 (2001) 141–154.

24. J.P. Aaltonen, I.V. Kassamakov, R. Kakanakov, M.V. Luukkala, Coherence microscopy in industrial manufacture, robotics and imaging, TUKEVA Research Programme on Future Mechanical Engineering 2000–2003, November 2003, ISBN 952-5376-07-9, pp. 120 - 126.

25. Исследования и выбор оптимальных технологических режимов сварки для автоматизации монтажа гибких алюминий-полиимидных микрокабелей / В. Н. Борщев, И. Ш. Невлюдов, М. А. Проценко и др. // Технология приборостроения. – 2011. – № 1. – С. 3-8.

26. Использование метода планирования экспериментов при оптимизации процесса микромонтажа многослойных конструкций гибких коммутационных

структур / И. Ш. Невлюдов, М. А. Проценко, И. С. Хатнюк, Л. С. Федосеев // Вестник Национального технического университета "ХПИ". Тематический выпуск "Новые решения в современных технологиях". – 2012. – Вып. № 9. – С. 30-35.

27. Gaiser Tools Company. URL: <http://www.gaisertool.com/catalog/7.pdf>.

28. A.P. de Haas et al., Very low mass microcables for the ALICE silicon strip detector, Fifth Workshop on Electronics for the LHC Experiments (LEB 99), 20–24 September 1999, Snowmass, Colorado, in: "Snowmass 1999, Electronics for LHC experiments", pp. 143 - 146.

29. Test Method Standard, Microcircuits, MIL-STD-883F, Method 2011.7, 22 March 1989, Department of Defence, USA.

30. W.K. Shu, Fine pitch wire bonding development using statistical design of experiment, in: Proceedings of the 45th Electronic Components and Technology Conference, ECTC'95, 1995, pp. 91–101.

31. T.J. Green, R.G. Launsby, Using DOE to reduce costs and improve the quality of microelectronics manufacturing processes, in: Proceedings of the 27th International Symposium on Microelectronics ISHM'94, 1994, pp. 60–65.

32. The MathWorks, Inc. software MATLAB and Simulink. For details, refer to Statistics Toolbox for use with MATLAB.

Перелік використаних джерел до розділу 5

1. Перроте А.И., Карташов Г.Д., Цветаев К.П. Основы ускоренных испытаний радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Сов. радио, 1968. – 224 с.

2. Пешес Л.Я., Степанова М.Д. Основы теории ускоренных испытаний на надежность. – Минск: Наука и техника, 1972. – 168 с.

3. Карташов Г.Д. Форсированные испытания. Надежность технических систем: Справочник/Под ред. И.А. Ушакова. – М: Радио и связь, 1985 – 352 с.

4. Загребельный Н.Г., Моисеев Н.Г., Нойверт Л.М. Методы ускоренной оценки надежности ИЭТ// Электронная техника. Сер. 8 Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания. – 1990. – Вып. 12 (139). – С. 41-45.

5. Окунь П.И., Манулик С.А., Сахащик А.Г., Смирнов А.Н. Методика проведения ускоренных форсированных испытаний тестовых структур//Электронная техника. Сер. 8. – 1990. – Вып. 2 (139). – С. 6-8.

6. Босих Е.Н., Голубев В.В., Попов В.Н. Методология ускоренных испытаний микросхем на надежность на основе использования моделей ускорения механизмов отказов//Электронная техника. Сер. 8. – 1986. – Вып. 2 (119). – С. 44-48.

7. Куликов И.В. Возможность оценки уровня надежности изделий с учетом интенсивности их старения//Надежность и контроль качества. – 1989. – №11.– с.19-25.

8. Федухин А.В. Расчетно-экспериментальный метод оценки надежности электронной техники по результатам форсированных испытаний// Надежность и контроль качества. – 1989. – №9.– с.8-11.

9. Манулик С.А. Использование модели отказов при оценке результатов ускоренных испытаний//Надежность и контроль качества. – 1987. – №1.– с. 24-30.

10. Федухин А.В., Бутенко Е.В. Ускоренная оценка надежности изделий электронной техники// Математические машины и системы. – 1997.– №2.– с. 84-93.

11. Федухин А.В. Ускоренная оценка надежности типовых функциональных блоков средств вычислительной техники// Математические машины и системы. – 1998.– №1.– с. 108-112.

12. Федухин А.В. Методы ускоренной оценки надежности СВТ. Классификация, основные понятия и определения// Математические машины и системы. – 2001.– №1,2.– с. 194-204.

13. Федухин А.В. Атомодельность форсированных испытаний на надежность// Математические машины и системы. – 2002.– №2.– с. 185-192.

14. Федухин А.В. Ускоренные определительные испытания в форсированных режимах// Математические машины и системы. – 2003. – №3. – с. 148 - 154.

15. Стрельников В.П. Прогнозирование надежности электронных систем при отсутствии отказов с использованием дополнительной априорной информации// Математические машины и системы. – 2003.– №3, 4.– с. 226 - 231.

16. Форсированные испытания гибридных микросборок / В. А. Антонова, В. Н. Борщев, А. М. Листратенко, М. А. Проценко и др. // Технология приборостроения. – 2003. – № 1. – С. 52-55.

17. Разработка метода ускоренных испытаний элементов гибких коммутационных плат на надежность и отказоустойчивость / И. Ш. Невлюдов, М. А. Проценко, И. С. Хатнюк // Материалы X Международной научно-технической конференции "Физические процессы и поля технических и биологических объектов". – 4-6 ноября, 2011 г., Кременчук. – С. 22-23.

18. ALICE Technical Proposal for A Large Ion Collider Experiment at the CERN LHC. CERN/LHCC/95-71, LHCC/P3-15 December 1995.

19. ALICE Technical Design Report of the Inner Tracking System (ITS). CERN/LHCC 99/12.

20. Погребинский С.Б., Стрельников В.П. Проектирование и надежность многопроцессорных ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988.– 168с.

21. Кубарев А.И. Надежность в машиностроении. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 224 с.

22. Сильченко Н.С., Кириленко В.М. Полимерные диэлектрики. – Киев: Техника, 1977. – 160 с.

23. Стрельников В.П., Федухин А.В., Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – Киев: Логос, 2002. – 483 с.

24. Кузнецов О.А., Погалов А.И. Прочность паяных соединений. – М.: Машиностроение, 1987. – 112 с.
25. Пролейко В.М. Имитационные методы в теории надежности// Электронная техника. Сер. 8. – 1981. – Вып. 4 (90). – С. 3-5.
26. Алексанян И.Т., Кривошапко В.М. Моделирование параметрических отказов и изучение надежности интегральных схем//Электронная техника. – Сер. 8. – 1981.– Вып. 4 (90).– С. 52 - 58.
27. Алексанян И.Т. Методологические основы имитационного направления в теории надежности высоконадежных изделий//Электронная техника. Сер. 8. – 1981. – Вып. 4 (90). – С. 7 - 10.
28. Алексанян И.Т., Кривошапко В.М., Романов А.А. Построение модели параметрической надежности ИС по данным о деградации их характеристик и имитация испытаний на ЭВМ//Электронная техника. Сер. 3 Микроэлектроника. – 1979. – Вып. 1 (79). – С. 15 - 19.
29. Алексанян И.Т., Кривошапко В.М., Рубаник Ю.Т. Моделирование электромиграционных отказов элементов ИС на ЭВМ//Электронная техника. Сер. 8 Управление качеством и стандартизация. – 1976. – Вып. 6 (48). – С. 39-47.
30. Алексанян И.Т., Григорашвили Ю.Е. Диффузионная модель отказов термокомпрессионных соединений в ИС//Электронная техника. Сер. 8 – 1976. – Вып. 6 (48). – С. 34 - 38.
31. Алексанян И.Т., Кривошапко В.М., Муравьева Г.Н. Прогнозирование индивидуальной надежности лазером методом машинных испытаний//Электронная техника. Сер. 8. – 1984. – Вып.4 (109). – С. 3-6.
32. Справочник химика (второе издание) в 5-ти т. – Л.: Химия, 1965. – Т. 3. – 1005 с.
33. Физико-химические свойства элементов. – Киев: Наукова думка, 1965. – 807 с.

34. Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
35. Старк Дж. П. Диффузия в твердых телах. – М.: Энергия, 1980. – 240 с.
36. Чеботин В.Н. Физическая химия твердого тела. – М.: Химия, 1982. – 320 с.
37. Quality Reliability //Booklet of Philips Electronic Manufacturing Technology, 1995.
38. Скопенко А.И., Махненко В.И. Упругопластическая деформация паяных соединений полупроводниковых приборов при циклических теплосменах// Автоматическая сварка. – 1974. – №3 (252). – С. 33 - 36.
39. Отчет №81058759 о НИР „Исследование влияния конструктивных и технологических факторов на прочность паяных соединений СВЧ-микросборок (шифр „Цикл”)”.– М.:МИЭТ, 1982. – 139 с.
40. Suzuki K., Suzuki O., Kamagata M. at al. Conductive Adhesive Materials for Lead Solder Replacement// IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing Technology. Part A. –1998. – Vol 21, №2. – P. 252 - 258.
41. Романов В. Количественная оценка надежности интегральных схем по результатам форсированных испытаний// Chip-News Украина/Инженерная электроника. – 2003. – №10(30). – с. 7 - 9.
42. Гродзенский С.Я. Физические методы обеспечения и оценки надежности электронных приборов// Обзоры по электронной техники, Сер.1. Электроника СВЧ. – 1981. – Вып.8 (797). – 56 с.
43. ГОСТ 28219-89 (СТМЭК 68-2-33-71) Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Руководство по испытаниям на смену температуры (выбор соответствующих параметров).
44. ГОСТ 28209-89 (МЭК 68-2-14-84) Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Испытание N: смена температуры.

45. MIL STD-883E Test Method Standard Microcircuits /Method 1010.7 – Temperature cycling.

46. ECSS-Q-70-04A Space product assurance – Thermal cycling test for screening of space materials and process (Гарантирование космической продукции. Термоциклические испытания для проверки технологических процессов и материалов, используемых в космосе).

47. Кузнецов О.А., Погалов А.И., Сергеев В.С. Прочность элементов микроэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1990. – 144 с.

48. Дульнев Р.А., Котов П.И. Термоциклическая усталость. – М.:Машиностроение, 1980.– 200 с.

49. ГОСТ 25359-82 Изделия электронной техники. Общие требования по надежности и методы испытаний.

50. ГОСТ 27.410-87 Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность.

51. ГОСТ В 20.57.404-87 Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы и оборудование военного назначения. Методы оценки соответствия требованиям надежности.

Перелік використаних джерел до розділу 6

1. Assembly of demonstrators for laboratory and in-beam tests at JINR LHEP / A. Sheremetev, M. Protsenko, I. Tymchuk, A. Zavalnyuk et al. // CBM Progress Report 2016. – GSI Darmstadt, Germany. – 2017. – P. 49.

2. Спосіб виготовлення гнучкого модуля сонячної батареї: патент України на винахід № 85333: МПК (2006) H01L 31/04 / В. М. Борщов, О. М. Лістратенко, В. А. Антонова, І. Т. Тимчук, Г. В. Буєров, Я. Я. Костишин, М. А. Проценко; заявл. 10.12.2007 р.; опубл. 12.01.2009 р., Бюл. №1. – 4 с.

3. Спосіб виготовлення гнучкого світлодіодного модуля: патент України на винахід № 83968: МПК (2006) H01L 27/15 / В. М. Борщов,

О. М. Лістратенко, Я. Я. Костишин, Г. В. Буєров, М. А. Проценко, І. Т. Тимчук; заявл. 20.08.2007 р.; опубл. 26.08.2008 р., Бюл. №16. – 6 с.

4. Ескіз та опис багатошарової гнучкої комутаційної плати для піксельних матричних детекторів радіаційного випромінювання в позитронно-емісійній та комптонівській медичній томографії: свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 15116 / В. М. Борщов, О. М. Лістратенко, В. А. Антонова, М. А. Проценко, В. Є. Старков; дата реєстрації: 22.12.2005 р.

5. Гибко-жесткие однодетекторные модули для комптоновской медицинской томографии / В. А. Антонова, А. М. Листратенко, И. Т. Тымчук, М. А. Проценко и др. // Прикладная радиоэлектроника. – 2008. – Том 7, № 4. – С. 367-371.

6. Многосенсорные сверхминиатюрные блоки и многодетекторные модули для медицинских зондов эндоректального применения / В. Н. Борщов, В. А. Антонова, М. А. Проценко, И. Т. Тымчук и др. // Технология приборостроения. – 2009. – № 2. – С. 3-7.

7. Development and test of TAB bonded micro-cables for silicon detectors in a Compton prostate probe / C. Lacasta, V. Borshchov, M. Protsenko et al. // Nuclear Science Symposium Conference Record, 2005 IEEE NSS-MIC. – Fajardo, Puerto Rico. – 23-29 October 2005. – Vol. 5. – P. 3032-3035.

8. Development and test of TAB bonded silicon PAD detectors and micro-cables for the construction of silicon probes for imaging / V. Linhart, V. Borshchov, M. Protsenko et al. // Nuclear Science Symposium Conference Record, – Orlando, FL, 2009 IEEE NSS-MIC. – 24 October – 1 November 2009. – P. 2423-2426.

9. Detection tests of imaging devices based on silicon pixel-array detectors assembled using Tape Automated Bonding and microcable technologies / V. Linhart, V. Borshchov, M. Protsenko et al. // Nuclear Science Symposium Conference Record, – Knoxville, TN, 2010 IEEE NSS-MIC. – 30 October – 6 November 2010. – P. 3194-3196.

10. Разработка и тестирование прототипа базового детекторного модуля для модернизации внутреннего трекера эксперимента LHCb / С. С. Кандыбей, И. Т. Тымчук, М. А. Проценко // Тезисы докладов XIV конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям. – 22-25 марта 2016 г., Харьков: ННЦ ХФТИ. – С. 31-32.

ДОДАТОК А
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор

ООО "Світлодіодні технології Україна"

Г.І. Нікітський

« 20 » _____ 2017 р.

АКТ

**про впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття ступеня кандидата технічних наук
Проценка Максима Анатолійовича**

Комісія у складі голови: Першого заступника директора - Головного конструктора – д.т.н., проф. Борщова В.М. та членів комісії: Заступника директора з виробництва – Тимчука І.Т., начальника відділу комутаційних плат – Кушнірук Р.А., начальника відділу мікроелектронних пристроїв – Жупинського В.О. склала акт про впровадження у виробництво в ООО "Світлодіодні технології Україна" результатів дисертаційної роботи Проценка М.А. на тему "Технологія виробництва детекторних модулів радіаційного випромінювання", а саме:

- математичної моделі для покращення завадостійкості ліній передач детекторних модулів радіаційного випромінювання (ДМ РВ), яка дозволила врахувати вплив конструктивних та технологічних параметрів виготовлення гнучких з'єднувальних елементів (ГЗЕ);
- технологічних процесів (ТП) виробництва шарів ГЗЕ, які дозволили вперше реалізувати багатошарові ГЗЕ довжиною понад 50 см та кроком розташування провідників 50 мкм;
- ТП автоматизованого ультразвукового зварювання багатошарових ГЗЕ та безруйнівного методу контролю зварних з'єднань.





Отриманий позитивний науково-технічний ефект дозволив забезпечити необхідні параметри ДМ РВ на рівні кращих світових досягнень при виконанні ряду міжнародних контрактів, а також підвищити відсоток виходу придатних ДМ РВ та їх складальних вузлів. Економічний ефект склав ~300 тис. гривень.

У процесі виконання робіт отримано патент України на корисну модель № 104141 "Гнучкий багатошаровий з'єднувальний шлейф" виданий 12.01.2016 р.

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

Голова комісії:

Члени комісії:

	В.М. Борщов
	І.Т. Тимчук
	Р.А. Кушнірук
	В.О. Жупинський

Approved
 GSI Helmholtz
 für Schwerionenforschung GmbH
 Planckstraße 1
 64291 Darmstadt
 Deutschland

8.11.2017

ACT of use
of Ph.D. work results of Protsenko M.A.
„Technological processes of manufacture of radiation detector modules”.

By this act it is confirmed that at study of design-technological solutions, development, manufacture and supply of experimental samples of the detector modules (demonstrators) and their components for the Compressed Baryonic Matter experiment (the CBM) at performing works under the Contracts P602 dated June 1, 2013, P635 dated 01.06.2014 and nr.1 dated May 9, 2016 between the "LED Technology Ukraine" Ltd, Ukraine and GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research GmbH (GSI), Germany, the following results of the Ph.D. work of Protsenko M.A. were used:

- technological processes for production of single- and multilayered flexible ultra-light fine pitch microcables (interconnection elements) based on aluminum-polyimide adhesiveless foiled dielectrics which allow to realize resolution of interconnection at detector modules about 50 μm ;
- theoretical and experimental research of innovative COF-assembly technology and assembly processes of abovementioned flexible microcables for three-dimensional detector modules.

Obtained successful test results of experimental samples of the detector modules (demonstrators) allow to conclude acceptability of abovementioned single- and multilayered flexible ultra-light fine pitch microcables (interconnection elements) based on aluminum-polyimide adhesiveless foiled dielectrics and assembly processes at creation of detector modules for Silicon Tracking System of the CBM experiment at GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research GmbH (GSI).

This act is drawn up for specialized academic council on thesis defense and is not the basis for financial obligations.

Head of GSI Detector Laboratory
 GSI Helmholtzzentrum
 für Schwerionenforschung GmbH
 Planckstrasse 1, D-64291 Darmstadt,
 Germany



Dr. Christian J. Schmidt

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ДП Науково-дослідний
інститут мікроприладів
НТК "Інститут монокристалів"
НАН України


О.І.Радкевич
« » _____ 2017 р.

АКТ

**про впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття ступеня кандидата технічних наук
Проценка Максима Анатолійовича**

Комісія у складі голови: начальника відділу, к.т.н. Жори Володимира Дмитровича, членів комісії: начальника відділу, к.т.н. Попова Володимира Михайловича, старшого наукового співробітника Грунянської Валентини Петрівни, склала акт про впровадження у виробництво на ДП Науково-дослідний інститут мікроприладів НТК "Інститут монокристалів" НАН України результатів дисертаційної роботи Проценка М.А. на тему "Технологія виробництва детекторних модулів радіаційного випромінювання", подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 технологія, обладнання та виробництво електронної техніки.

Склад впровадження: технологічні процеси виробництва надлегких плоских гнучких з'єднувальних елементів (ГЗЕ) з безадгезивних алюміній-поліімідних фольгових діелектриків з високою щільністю розташування провідників, які дозволили зменшити крок розташування провідників, у тому числі до 50 мкм, та суттєво збільшити кількість провідників, при необхідності, до 1026. Отриманий результат задовольняє вимогам до ГЗЕ для послідовного з'єднання сучасних мікрострипових сенсорів у складі детекторних модулів радіаційного випромінювання для експерименту Compressed Baryonic Matter (CBM) з кроком розташування контактних площин до 50 мкм та підвищеною просторовою роздільною здатністю.

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

Голова комісії:

Члени комісії:



В.Д. Жора

В.М. Попов

В.П. Грунянська

ЗАТВЕРДЖУЮ

проректор з НМР
Харківського національного
університету радіоелектроніки

Рубан І.В.
« _____ » _____ 2017 р.

**Акт**

з впровадження у навчальний процес
результатів дисертаційної роботи
Проценка Максима Анатолійовича

Комісія у складі голови: декана факультету Автоматики і комп'ютеризованих технологій – д.т.н., проф. Филипенка Олександра Івановича, членів комісії: д.т.н., проф. кафедри комп'ютерно – інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки (КІТАМ) Цимбала Олександра Михайловича, д.т.н., проф. кафедри КІТАМ Палагіна Віктора Андрійовича, заступника завідувача кафедри КІТАМ з наукової роботи – к.т.н., проф. кафедри КІТАМ Євсєєва Владислава В'ячеславовича, к.т.н., доц. кафедри КІТАМ Пономарьової Ганни Вікторівни, к.т.н., доц. кафедри КІТАМ Разумова – Фризьюка Євгенія Анатолійовича, склала акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Проценка М.А. на тему «Технологія виробництва детекторних модулів радіаційного випромінювання», 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 Проценка М.А. впроваджені у навчальний процес на кафедрі КІТАМ з дисциплін: «Мехатронні пристрої робототехнічних систем», «Фізико – хімічні основи технології ЕА», «Проектування мікросистемної техніки» для студентів спеціальностей 151 – Автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології та 172 – Телекомунікації та радіотехніка, спеціалізацій «Радіоелектронні апарати» та «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки».

Голова комісії

О.І. Филипенко

Члени комісії

О.М. Цимбал

В.А. Палагін

В.В. Євсєєв

Г.В. Пономарьова

Є.А. Разумов - Фризьюк



впровадження результатів дисертаційної роботи
Проценка Максима Анатолійовича

Комісія у складі голови: декан факультету радіотехніки та телекомунікацій – к.т.н., доц. Кабака Владислава Семеновича та членів комісії: в. о. завідувача кафедри «Інформаційні технології електронних засобів» к.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. Фурманової Наталії Іванівни, склала акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Проценка М.А. на тему «Технологія виробництва детекторних модулів радіаційного випромінювання», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки у навчальний процес Запорізького національного технічного університету.

Склад впровадження:

- методика технологічних процесів виготовлення детекторних модулів радіаційного випромінювання (ДМРВ) з використанням інноваційної алюмінієвої "Chip-on-flex"-технології складання;
- лабораторний зразок детекторного модуля для експерименту Compressed Barionic Matter (CBM).

Комісія встановила, що результати дисертаційної роботи Проценка М.А. впроваджені у навчальний процес кафедри «Інформаційні технології електронних засобів» Запорізького національного технічного університету при проведенні лабораторного практикуму з дисципліни «Радіотехнічні пристрої» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Голова комісії

В.С. Кабак

Члени комісії:

Г.М. Шило

О.Ю. Фарафонов

Н.І. Фурманова

ДОДАТОК Б
СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Патенти та авторські свідоцтва

1. Гнучкий багатошаровий з'єднувальний шлейф: патент України на корисну модель № 104141: МПК H05K 1/11 (2006.01) / В. М. Борщов, В. Г. Кучеренко, О. М. Лістратенко, Г. І. Нікітський, М. А. Проценко, І. Т. Тимчук; заявл. 24.07.2015 р.; опубл. 12.01.2016 р., Бюл. №1. – 4 с.

2. Спосіб виготовлення гнучкого світлодіодного модуля: патент України на винахід № 83968: МПК (2006) H01L 27/15 / В. М. Борщов, О. М. Лістратенко, Я. Я. Костишин, Г. В. Буєров, М. А. Проценко, І. Т. Тимчук; заявл. 20.08.2007 р.; опубл. 26.08.2008 р., Бюл. №16. – 6 с.

3. Спосіб виготовлення гнучкого модуля сонячної батареї: патент України на винахід № 85333: МПК (2006) H01L 31/04 / В. М. Борщов, О. М. Лістратенко, В. А. Антонова, І. Т. Тимчук, Г. В. Буєров, Я. Я. Костишин, М. А. Проценко; заявл. 10.12.2007 р.; опубл. 12.01.2009 р., Бюл. №1. – 4 с.

4. Ескіз та опис багатошарової гнучкої комутаційної плати для піксельних матричних детекторів радіаційного випромінювання в позитронно-емісійній та комптонівській медичній томографії: свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 15116 / В. М. Борщов, О. М. Лістратенко, В. А. Антонова, М. А. Проценко, В. Є. Старков; дата реєстрації: 22.12.2005 р.

Статті в іноземних виданнях

5. Assembly and validation of the SSD silicon microstrip detector of ALICE / M. Bregant, V. Borshchov, M. Protsenko, I. Tymchuk et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2006. – A 566. – P. 18-21.

6. The ALICE vertex detector: Focus on the micro-strip layers / M. Bregant, V. Borshchov, M. Protsenko, I. Tymchuk et al. // Nuclear Instruments and Methods

in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2006. – A 569. – P. 29-32.

7. Development of thin multi-line cables for the STS micro-strip detector modules / V. N. Borshchov, O. M. Listratenko, M. A. Protsenko, I. T. Tymchuk // CBM Progress Report 2007. – GSI Darmstadt, Germany. – 2008 – P. 34-35.

8. Design and assembly of STS Demonstrator Module 0-B / V. M. Borshchov, J. M. Heuser, M. A. Protsenko, I. T. Tymchuk et al. // CBM Progress Report 2008. – GSI Darmstadt, Germany. – 2009. – P. 12.

9. Development of ultra-thin cables for the CBM Silicon Tracking System / V. M. Borshchov, J. M. Heuser, Yu. A. Murin, M. A. Protsenko et al. // GSI Scientific Report 2009, FAIR-EXPERIMENTS-70. – GSI Darmstadt, Germany. – 2010 – P. 72.

10. Prototyping of the CBM-STS module / V. M. Borshchov, Yu. A. Murin, J. M. Heuser, M. A. Protsenko et al. // CBM Progress Report 2009. – GSI Darmstadt, Germany. – 2010. – P. 17.

11. The MPD detector at the NICA heavy-ion collider at JINR / Kh. U. Abraamyan, V. N. Borshchov, M. A. Protsenko, I. T. Tymchuk et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2011. – A 628. – P. 99-102.

12. Prototyping of the CBM STS module / V. M. Borshchov, Yu. A. Murin, M. A. Protsenko, I. T. Tymchuk et al. // CBM Progress Report 2010. – GSI Darmstadt, Germany. – 2011. – P. 17.

13. A First experience in prototyping sensitive modules for CBM STS / Yu. A. Murin, V. M. Borshchov, M. A. Protsenko, I. T. Tymchuk et al. // CBM Progress Report 2011. – GSI Darmstadt, Germany. – 2012. – P. 19.

14. Full-size silicon microstrip sensors for the CBM Silicon Tracking System / J. M Heuser, V. M. Borshchov, M. Protsenko, I. Tymchuk et al. // GSI Scientific Report 2012, PHN-NQM-EXP-16. – GSI Darmstadt, Germany. – 2013. – P. 45.

15. An assembly concept for modules of the CBM Silicon Tracking System / C. J. Schmidt, V. M. Borshchov, M. Protsenko, I. Tymchuk et al. // CBM Progress Report 2012. – GSI Darmstadt, Germany. – 2013 – P. 18.

16. Full-size prototype microstrip sensors for the CBM Silicon Tracking System / J. Heuser, V. M. Borshchov, I. Tymchuk, M. Protsenko et al. // GSI Scientific Report 2013, NQM-CBM-11. – GSI Darmstadt, Germany. – 2014. – P. 26.

17. First mock-up of the CBM STS module based on a new assembly concept / V. M. Borshchov, C. J. Schmidt, I. T. Tymchuk, M. A. Protsenko et al. // CBM Progress Report 2013. – GSI Darmstadt, Germany. – 2014. – P. 41.

18. Improvement of ultra-light microcables production at LTU for the CBM Silicon Tracking System / V. M. Borshchov, I. T. Tymchuk, M. A. Protsenko, J. Eschke et al. // GSI Scientific Report 2014, MU-NQM-CBM-46. – GSI Darmstadt, Germany. – 2015. – P. 83.

19. The first mock-up of a CBM-STS full-scale ladder / V. M. Borshchov, Yu. A. Murin, G. I. Nikitskiy, M. A. Protsenko et al. // CBM Progress Report 2014. – GSI Darmstadt, Germany. – 2015. – P. 49.

20. Pre-series production of microcables for STS detector modules at LTU Ltd / V. M. Borshchov, Yu. A. Murin, M. A. Protsenko, I. T. Tymchuk et al. // GSI Scientific Report 2015, MU-NQM-CBM-1. – GSI Darmstadt, Germany. – 2016. – P. 1.

21. Assembly of demonstrators for laboratory and in-beam tests at JINR LHEP / A. Sheremetev, M. Protsenko, I. Tymchuk, A. Zavalnyuk et al. // CBM Progress Report 2016. – GSI Darmstadt, Germany. – 2017. – P. 49.

Статті у наукових фахових виданнях

22. Форсированные испытания гибридных микросборок / В. А. Антонова, В. Н. Борщев, А. М. Листратенко, М. А. Проценко и др. // Технология приборостроения. – 2003. – № 1. – С. 52-55.

23. Климова Л. В. Анализ частотных свойств гибких коммутационных плат / Л. В. Климова, М. А. Проценко // Технология приборостроения. – 2006. – № 2. – С. 22-26.

24. Проценко М. А. Исследование оптимальных конструкций гибких кабелей микрострипового детекторного модуля для эксперимента СВМ и оценка их емкостных параметров / М. А. Проценко // Технология приборостроения. – 2007. – № 1. – С. 16-21.

25. Алюминиевая "Chip on flex" (COF) технология в радиационном приборостроении / Н. В. Замирец, В. Н. Борщев, М. А. Проценко, И. Т. Тымчук и др. // Технология приборостроения. – 2007. – № 2. – С. 3-9.

26. Гибко-жесткие одноканальные модули для комптоновской медицинской томографии / В. А. Антонова, А. М. Листратенко, И. Т. Тымчук, М. А. Проценко и др. // Прикладная радиоэлектроника. – 2008. – Том 7, № 4. – С. 367-371.

27. Многосенсорные сверхминиатюрные блоки и многоканальные модули для медицинских зондов эндоректального применения / В. Н. Борщев, В. А. Антонова, М. А. Проценко, И. Т. Тымчук и др. // Технология приборостроения. – 2009. – № 2. – С. 3-7.

28. Анализ современных технологий изготовления гибридных микросборок / И. Ш. Невлюдов, М. А. Проценко, И. С. Хатнюк, Р. Ю. Аллахверанов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Специальный выпуск "Новые технологии в машиностроении". Сборник научных трудов. Выпуск 3 (63). – 2010. – С. 200-207.

29. Исследования и выбор оптимальных технологических режимов сварки для автоматизации монтажа гибких алюминий-полиимидных микрокабелей / В. Н. Борщев, И. Ш. Невлюдов, М. А. Проценко и др. // Технология приборостроения. – 2011. – № 1. – С. 3-8.

30. Сборка демонстратора трековой системы для международного эксперимента по исследованию сжатой барионной материи / В. Н. Борщев, И. Ш. Невлюдов, М. А. Проценко и др. // Вестник Национального технического университета "ХПИ": Тематический выпуск "Технологии в машиностроении". – 2011. – Вып. № 40. – С. 165-173.

31. Использование метода планирования экспериментов при оптимизации процесса микромонтажа многослойных конструкций гибких коммутационных структур / И. Ш. Невлюдов, М. А. Проценко, И. С. Хатнюк, Л. С. Федосеев // Вестник Национального технического университета "ХПИ". Тематический выпуск "Новые решения в современных технологиях". – 2012. – Вып. № 9. – С. 30-35.

32. Innovative microelectronic technologies for high-energy physics experiments / V. M. Borshchov, O. M. Listratenko, M. A. Protsenko et al. // Functional materials. – 2017. – Vol. 24, № 1. – P. 143-153.

Міжнародні науково-технічні та науково-практичні конференції

33. ALICE Silicon Strip Detector Module Assembly with Single-Point TAB Interconnections / M. Oinonen, V. Borshchov, I. Tymchuk, M. Protsenko et al // Book of abstracts of the 11-th Workshop on electronics for LHC and future Experiments. – Heidelberg, Germany. 12-16 September 2005. – P. 92-97 (*включено до міжнародних науково-метричних баз даних Scopus, Researchgate та PIIЦ*).

34. Development and test of TAB bonded micro-cables for silicon detectors in a Compton prostate probe / C. Lacasta, V. Borshchov, M. Protsenko et al. // Nuclear Science Symposium Conference Record, 2005 IEEE NSS-MIC. – Fajardo, Puerto Rico. – 23-29 October 2005. – Vol. 5. – P. 3032-3035.

35. Inside the ALICE experiment – Silicon Strip Detector modules from the Helsinki Institute of Physics / M. Oinonen, M. Protsenko, H. Seppänen, I. Tymchuk et al. // Proceedings of the XLI Annual Conference of the Finnish Physical Society. – Tallinn, Estonia, 15-17 March 2007. – P. 322.

36. Development and test of micro-cables for thin silicon detector modules in a prostate probe / C. Lacasta, V. Borshchov, A. Listratenko, M. Protsenko et al. // Nuclear Science Symposium Conference Record, 2008 IEEE NSS-MIC. – Dresden, Germany. – 19-25 October 2008. – P. 1126-1129.

37. Комплексный подход к выбору конструктивно-технологических решений гибко-жестких однодетекторных модулей для комптоновской медицинской томографии / В. Н. Борщов, В. А. Антонова, М. А. Проценко и др. // Сборник материалов Международной конференции "Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационных технологий". – Харьков: "ИСМА". – 2009. – С. 111-127.

38. Development and test of TAB bonded silicon PAD detectors and micro-cables for the construction of silicon probes for imaging / V. Linhart, V. Borshchov, M. Protsenko et al. // Nuclear Science Symposium Conference Record, – Orlando, FL, 2009 IEEE NSS-MIC. – 24 October – 1 November 2009. – P. 2423-2426.

39. Исследование возможности использования "chip on flex" технологии для сборки микрострипового детекторного модуля / М. А. Проценко, И. Т. Тимчук, И. С. Хатнюк // Сборник материалов 14-го Международного молодежного форума "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке". – 18-20 марта 2010 г., Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. – С. 422.

40. Detection tests of imaging devices based on silicon pixel-array detectors assembled using Tape Automated Bonding and microcable technologies / V. Linhart, V. Borshchov, M. Protsenko et al. // Nuclear Science Symposium Conference Record, – Knoxville, TN, 2010 IEEE NSS-MIC. – 30 October – 6 November 2010. – P. 3194-3196.

41. Исследование зависимости емкостных параметров гибких алюминий-полиимидных коммутационных плат от их конструктивных особенностей / М. А. Проценко, И. Т. Тимчук, И. С. Хатнюк // Сборник материалов 15-го Юбилейного международного молодежного форума "Радиоэлектроника и

молодежь в XXI веке". – 18-20 апреля 2011 г., – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. – С. 79-80.

42. Исследование и выбор оптимальных технологических режимов изготовления гибких коммутационных структур для современных микроэлектронных систем / В. Н. Борщев, И. Ш. Невлюдов, М. А. Проценко, И. С. Хатнюк // Сборник материалов VII Международной конференции "Стратегия качества в промышленности и образовании". – 3-10 июня 2011 г., Варна, Болгария. – Том 3. – С. 34-37.

43. Разработка метода ускоренных испытаний элементов гибких коммутационных плат на надежность и отказоустойчивость / И. Ш. Невлюдов, М. А. Проценко, И. С. Хатнюк // Материалы X Международной научно-технической конференции "Физические процессы и поля технических и биологических объектов". – 4-6 ноября, 2011 г., Кременчук. – С. 22-23.

44. Investigation of the compressed baryonic matter at the GSI accelerator complex / V. P. Ladygin, V. N. Borshchov, Yu. A. Murin, M. A. Protsenko et al. // Book of abstracts of the XXIII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems (Baldin ISHEPP XXIII). – 19-24 September, 2016., Dubna, Russia, – P. 92 (EPJ Web Conf. Volume 138. – 2017. – 10 p.

Всеукраїнські та міжрегіональні конференції й інші видання

45. Разработка и тестирование прототипа базового детекторного модуля для модернизации внутреннего трекера эксперимента LHCb / С. С. Кандыбей, И. Т. Тымчук, М. А. Проценко // Тезисы докладов XIV конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям. – 22-25 марта 2016 г., Харьков: ННЦ ХФТИ. – С. 31-32.

46. Новітні підходи створення надлегких детекторних модулів для фізичних експериментів / В. М. Борщов, І. Т. Тимчук, М. А. Проценко // Тезисы докладов XV Конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям. – 21-24 марта 2017 г., Харьков: ННЦ ХФТИ. – С. 105-106.

ДОДАТОК В
ПАТЕНТИ ТА АВТОРСЬКІ СВДОЦТВА









УКРАЇНА
Міністерство освіти і науки України
Державний департамент інтелектуальної власності

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір
 № 15116

Ескіз та опис багат шарової гнучкої комутаційної плати для нікельних матричних детекторів радіаційного випромінювання в позитронно-емісійній та комп'ютерській медичній томографії

(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Боршов Вячеслав Миколайович, Лістратенко Олександр Михайлович, Антонова Валентина Антонівна, Проценко Максим Анатолійович, Старков Володимир Євгенович**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Боршов Вячеслав Миколайович, вул. Кольцівська, 16, м. Харків, 61013; Лістратенко Олександр Михайлович, пр. Гагаріна, 176, к. 7, кв. 7, м. Харків, 61124; Антонова Валентина Антонівна, пр. Перемоги, 57, кв. 40, м. Харків, 61174; Проценко Максим Анатолійович, вул. Барабашова, 46-А, кв. 77, м. Харків, 61168; Старков Володимир Євгенович, вул. 23 Серпня, 81, кв. 40, м. Харків, 61018; Державне підприємство Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування, вул. Примакова, 40/42, м. Харків, 61010**

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації

22.12.2005

Голова Державного департаменту
 інтелектуальної власності



М.В.Паладій

ДОДАТОК Г

ОГЛЯД СУЧАСНИХ ДЕТЕКТОРНИХ СИСТЕМ

1 ЕКСПЕРИМЕНТ ATLAS

1.1 Детекторна система експерименту ATLAS

ДС експерименту ATLAS (рисунок Г.1) складається з багатьох частин, кожна з яких виконує свої певні завдання та виконана за різними технологіями для відповідності поставленим завданням. Загальні розміри ДС становлять 25 м в вишину, 44 м в довжину, а загальна вага біля 7000 тон [1.7].

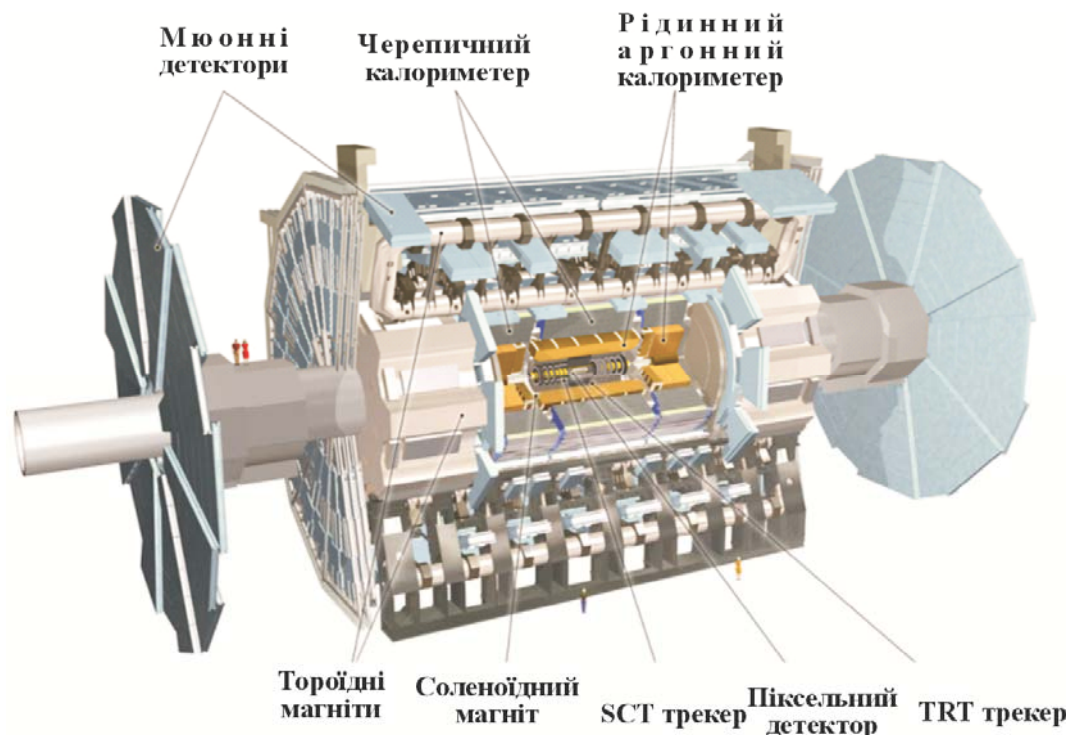


Рисунок Г.1 – Детекторна система експерименту ATLAS

ДС ATLAS складається з ряду великих концентричних циліндрів навколо точки взаємодії, де стикаються протонні пучки. Він може бути розділений на чотири головні частини: внутрішній детектор, калориметри, мюонний спектрометр і магнітні системи. Кожен з них у свою чергу зроблений з шарів,

що повторюються. Детектори доповнюють один одного: внутрішній детектор точно відстежує частинки, калориметри вимірюють енергію частинок, що легко зупиняються, мюонна система робить додаткові виміри високопроникаючих мюонів. Дві системи магніта відхиляють заряджені частинки у внутрішньому детекторі і мюонному спектрометрі, дозволяючи виміряти їх імпульси.

Для аналізу важливо розглянути внутрішній детектор, до складу якого входять піксельні та стрипові сенсори та ДМ на їх основі. Внутрішній детектор починається в декількох сантиметрах від осі пучка протонів, має зовнішній радіус 1,2 метра і довжину каналу пучка сім метрів. Його основна функція – відстежувати заряджені частинки, виявляючи їх взаємодію з речовиною в окремих точках, розкриваючи детальну інформацію про тип частинки і її імпульс. Магнітне поле, що оточує увесь внутрішній детектор, примушує заряджені частинки відхилятися; напрям кривої показує заряд частинки, а міра кривизни – імпульс частинки.

Внутрішній детектор складається з трьох частин:

– піксельний детектор (Pixel Detector, PD) – внутрішня частина детектора, містить три шари і три диски на кожній заглушці (загалом 1744 модулі, розміром два на шість сантиметрів кожен);

– напівпровідникова система стеження (Semi-Conductor Tracker, SCT) – середній компонент внутрішнього детектора. Принципово і функціонально подібний до піксельного детектора, але відрізняється довгими вузькими смугами замість маленьких пікселів, покриваючи великі області. SCT – найкритичніша частина внутрішнього детектора для основного дослідження в площині, перпендикулярній пучку, оскільки вимірює частинки по набагато більшій області, ніж піксельний детектор, з частішою вибіркою точок і приблизно рівною точністю. SCT складається з чотирьох подвійних шарів кремнієвих смуг, має 6,2 мільйонів каналів зчитування і загальну площу 61 квадратний метр;

– трековий детектор перехідного випромінювання (Transition radiation tracker, TRT) – найбільш віддалений компонент внутрішнього детектора, є комбінацією трекового детектора і детектора перехідного випромінювання. TRT складається з великого числа дрейфових трубок.

1.2 Детекторні модулі експерименту ATLAS

У внутрішньому детекторі використовуються два типи ДМ:

- піксельні – у піксельному детекторі PD;
- стрипові – у напівпровідниковій системі стеження SCT.

На рисунку Г.2 [1.7] наведено схематично склад та зовнішній вигляд ДМ піксельного сенсора (де flex – гнучка багатошарова плата, glue – клей, barrel pigtail – вихідний кабель, NTC – термістор, sensor – сенсор, FEs – мікросхеми зчитування, decoupling capacitors – конденсатори, type0 connector – з'єднувач типу 0, HV guard ring – високовольтні охоронні кільця, MCC – мікросхема контролю модулю).

Модуль складається з наступних компонентів:

- 16 мікросхем обробки інформації кожна з яких має 2880 чутливих каналів;
- кульки для з'єднання (In або PbSn), які з'єднують канали мікросхем з елементами піксельних сенсорів;
- піксельний сенсор розмірами 63,4 мм×24,4 мм;
- гнучко-жорстка друкована плата на основі мідь-поліімідних фольгованих діелектриків з мікросхемою керування та іншими компонентами.

З'єднання сенсору з мікросхемами здійснюється паянням кульок припою, а з'єднання мікросхем з мікрозбіркою – ультразвуковим зварюванням дротом.

Матеріалом сенсора є кремній 250 мкм товщиною. Загалом модуль містить приблизно 47000 пікселів (кожен 50 на 400 мікрометрів). Дрібний розмір пікселю розроблений для надзвичайно точного дослідження дуже

близько до точки взаємодії. Всього у піксельного ДМ є більш ніж 80 мільйонів каналів зчитування.

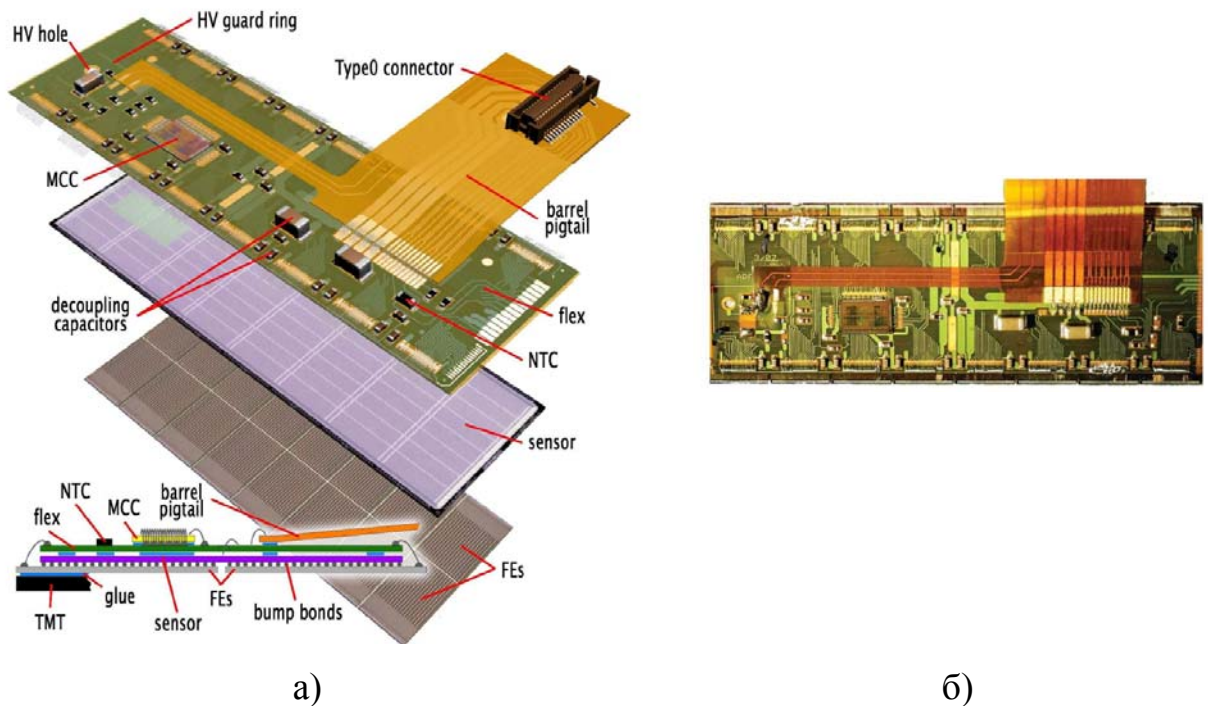


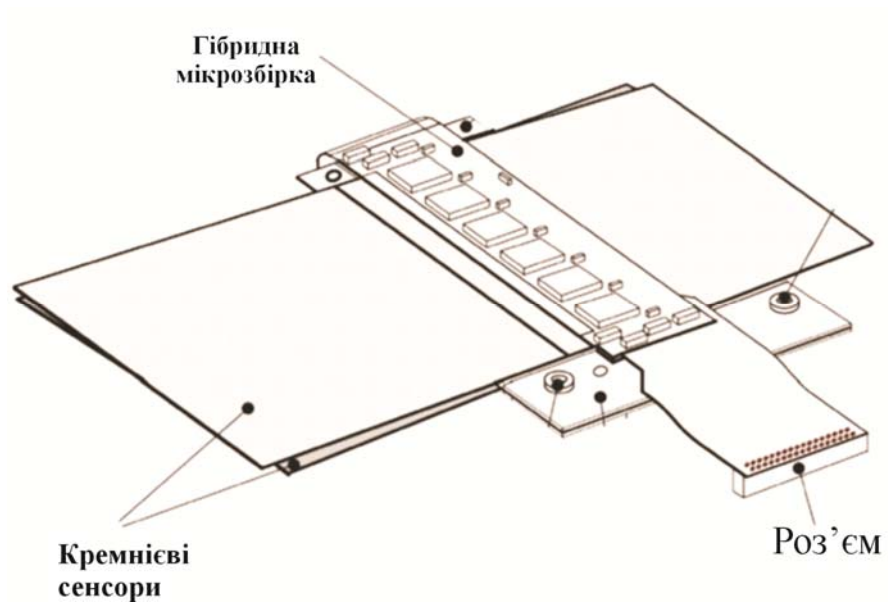
Рисунок Г.2 – Схематичне зображення піксельного модулю:

а) склад та компоненти; б) зовнішній вигляд

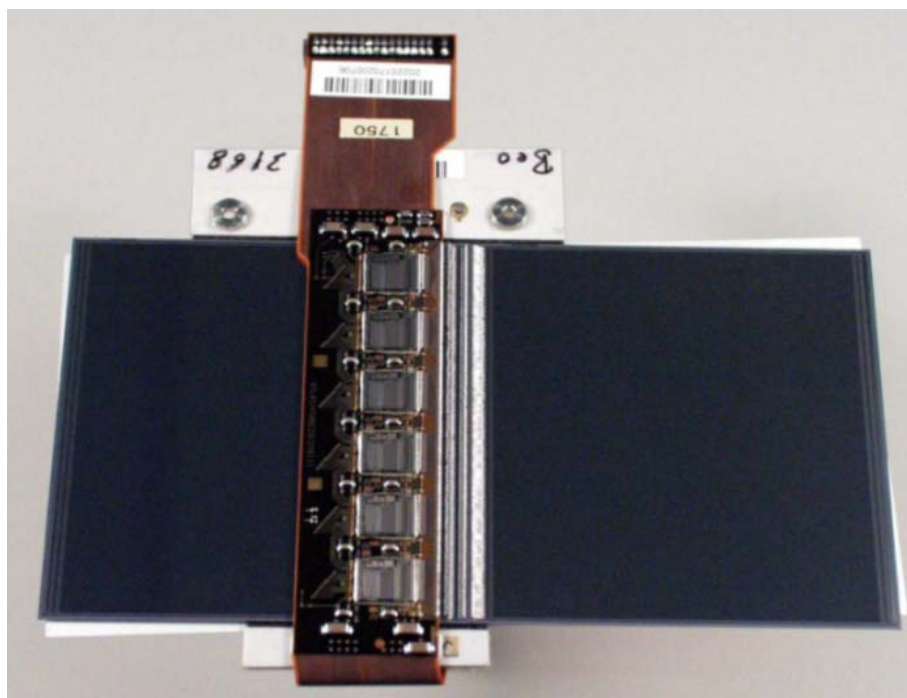
У напівпровідниковій системі стеження використані мікрострипові детекторні модулі, загальною кількістю 4088 од. двох типів: для бочкового детектору та для дискових детекторів. Склад та зовнішній вигляд мікрострипового ДМ для бочкового детектору наведено на рисунку Г.3 [1.7].

Склад та зовнішній вигляд мікрострипових модулів різних типів для дискового детектору наведено на рисунку Г.4.

Головними складовими частинами даних ДМ є мікрострипові сенсори та ГМ з мікросхемами обробки інформації. У даних мікрострипових ДМ електричне з'єднання компонентів здійснено ультразвуковим зварюванням дротом з застосуванням технології "кристал на платі" або "chip on board" (COB-технології).

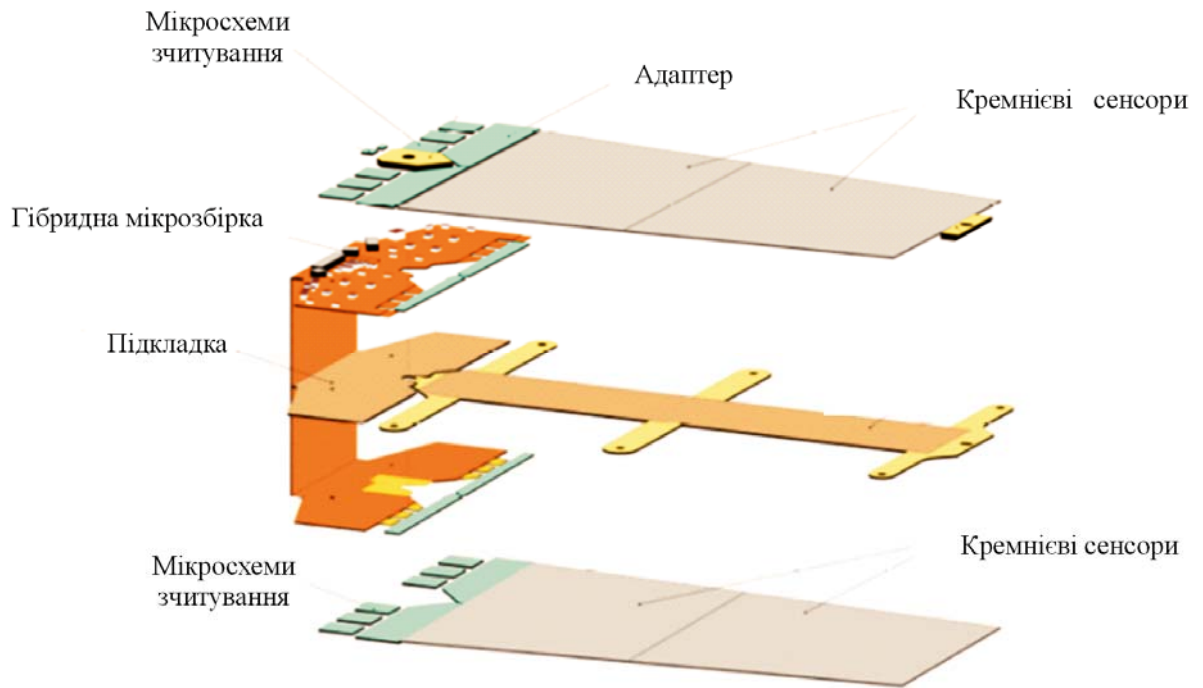


а)

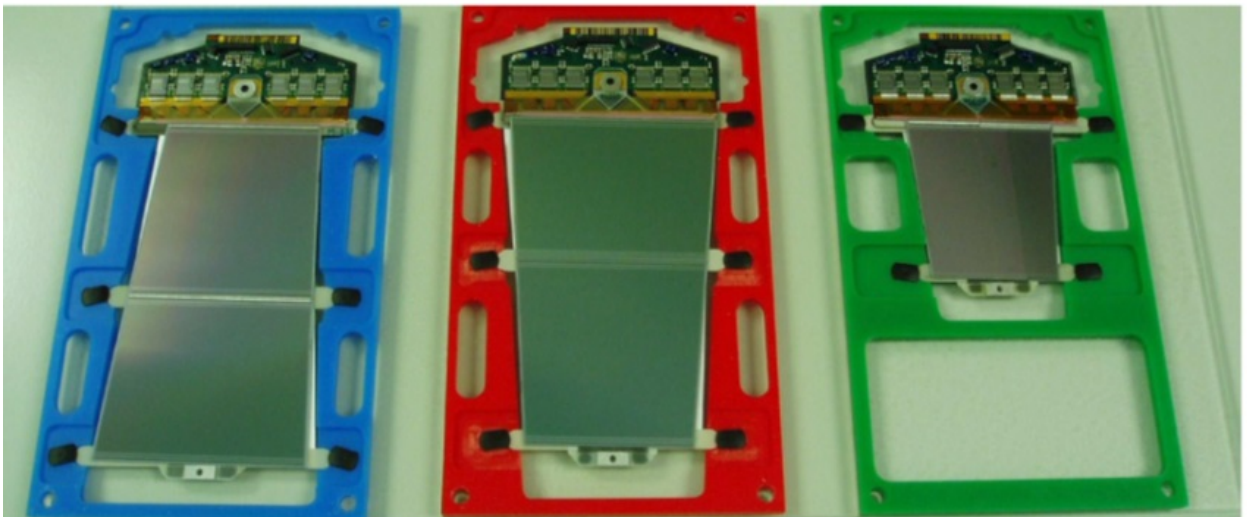


б)

Рисунок Г.3 – Мікростриповий ДМ напівпровідникової системи стеження: а) склад; б) зовнішній вигляд



а)



б)

Рисунок Г.4 – Мікрострипові детектори напівпровідникової системи стеження: а) склад; б) зовнішній вигляд

Більш детально особливості побудови детекторної установки експерименту ATLAS та ДМ описано в [1.7].

2 ЕКСПЕРИМЕНТ ALICE

2.1 Детекторна система експерименту ALICE

ДС експерименту ALICE (рисунок Г.5) [1.8] оптимізована для дослідження взаємодії важких іонів та складається з багатьох частин, кожна з яких виконує свої певні завдання та виконана за різними технологіями для відповідності поставленим завданням. Загальні розміри детектору становлять 16 м в вишину, 25 м в довжину, а загальна вага понад 10000 тон [1.8].

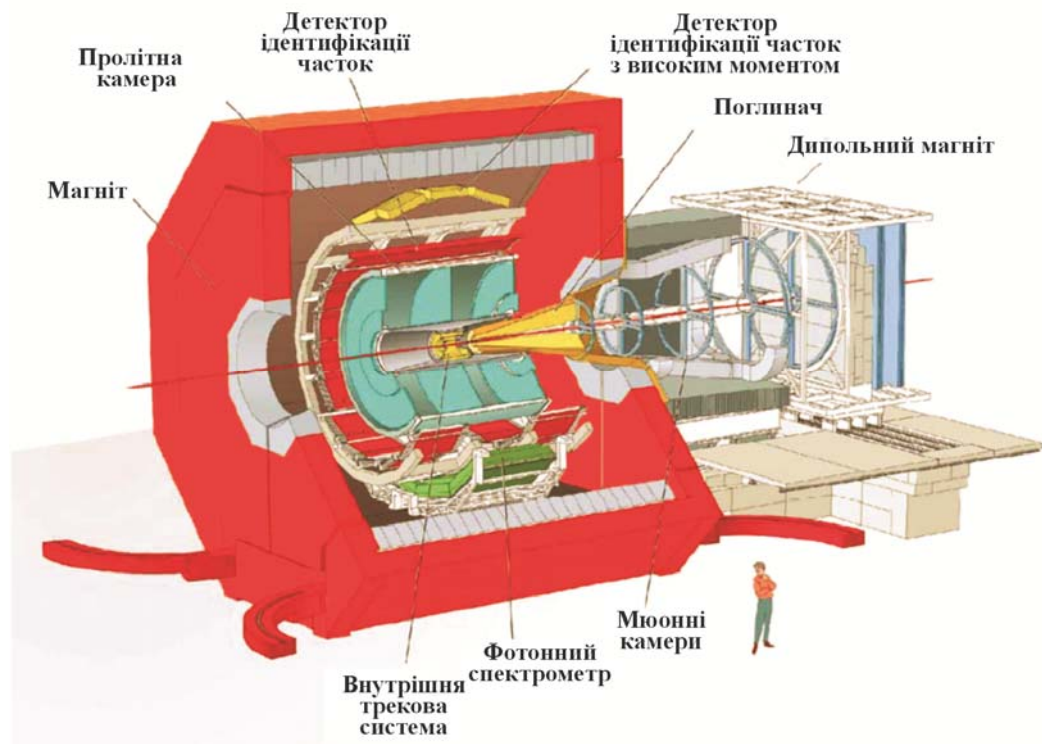


Рисунок Г.5 – Детекторна система експерименту ALICE

Як і більшість детекторів ВАК, ДС експерименту ALICE включає різні за призначенням частини, але головною чутливою частиною детектору є внутрішня трекова систем (Inner Tracking System, ITS), яка створена на основі ДМ мікрострипових, дрейфових та піксельних сенсорів.

2.2 Детекторні модулі експерименту ALICE

Головними чутливими елементами ВТС є піксельні, мікрострипові та дрейфові ДМ. Найближче до зони взаємодії часток розташовані внутрішні шари, виконані на піксельних сенсорах, що обумовлено їх надзвичайно високою роздільною здатністю. Зображення ДМ на основі кремнієвих піксельних сенсорів наведено на рисунку Г.6 [1.8].

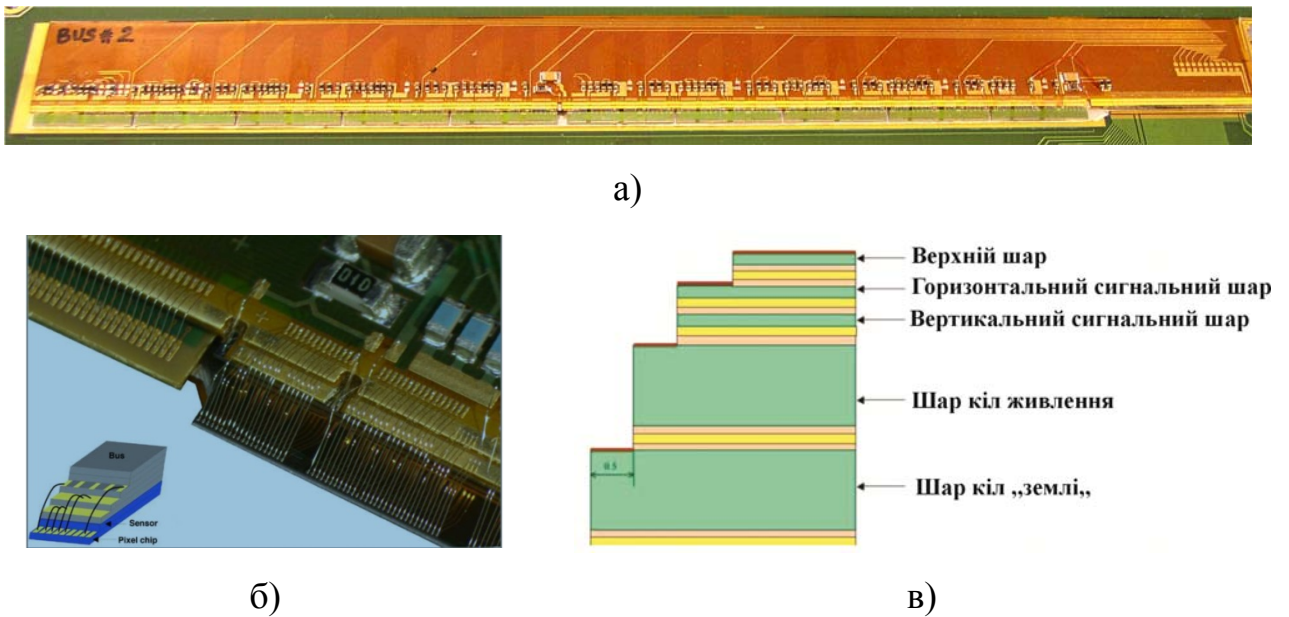
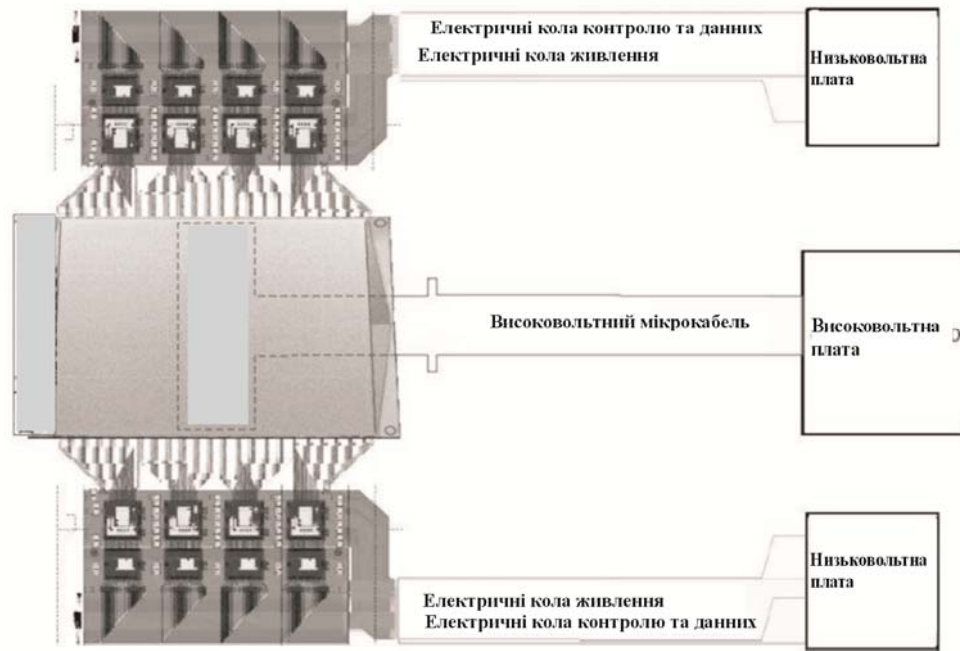


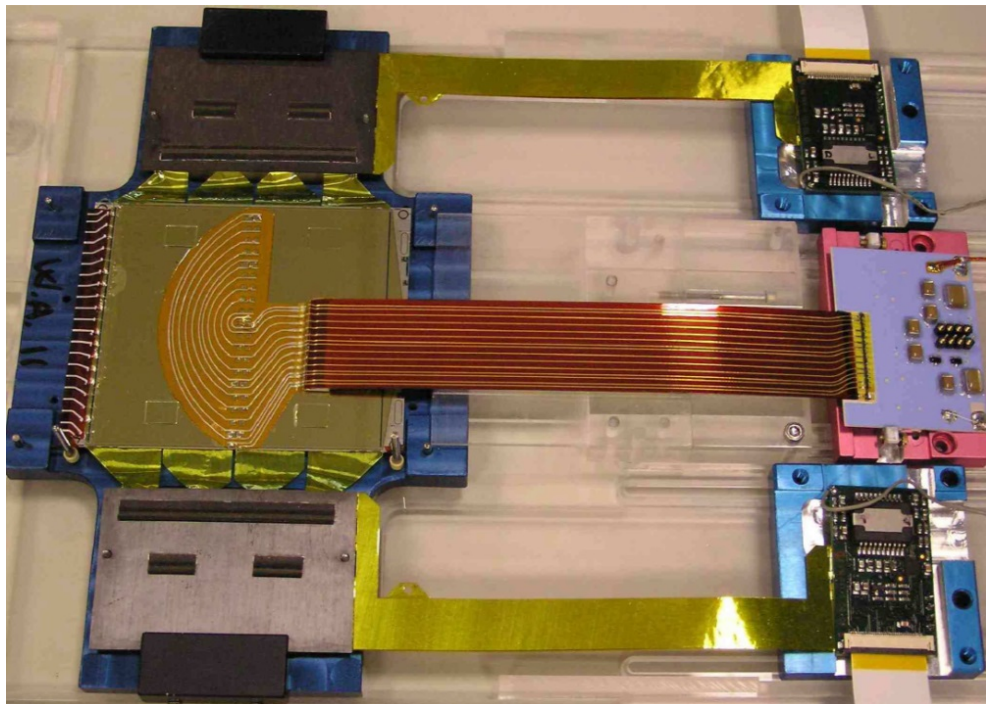
Рисунок Г.6 – Піксельний ДМ: а) зовнішній вигляд; б) зона з'єднання мікросхем з багатошаровою платою; в) склад багатошарової плати

До складу ДМ входять: піксельних сенсор, мікросхеми обробки інформації та багатошарова плата. З'єднання сенсорів з мікросхемами здійснюється паянням кульок припою, а з'єднання мікросхем з багатошаровою платою – ультразвуковим зварюванням дротом. Багатошарова гнучка плата виконана на основі алюміній-поліімідних адгезивних фольгових діелектриків.

Середні шари ВТС виконані з використанням дрейфових ДМ. Склад та зовнішній вигляд дрейфових ДМ наведено на рисунку Г.7.



а)



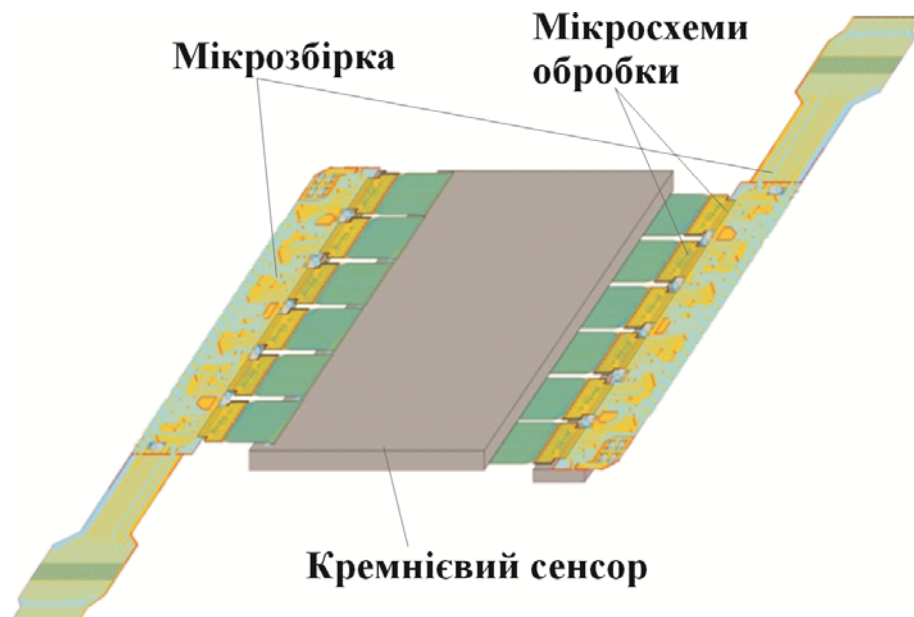
б)

Рисунок Г.7 – Дрейфовий ДМ: а) склад; б) зовнішній вигляд

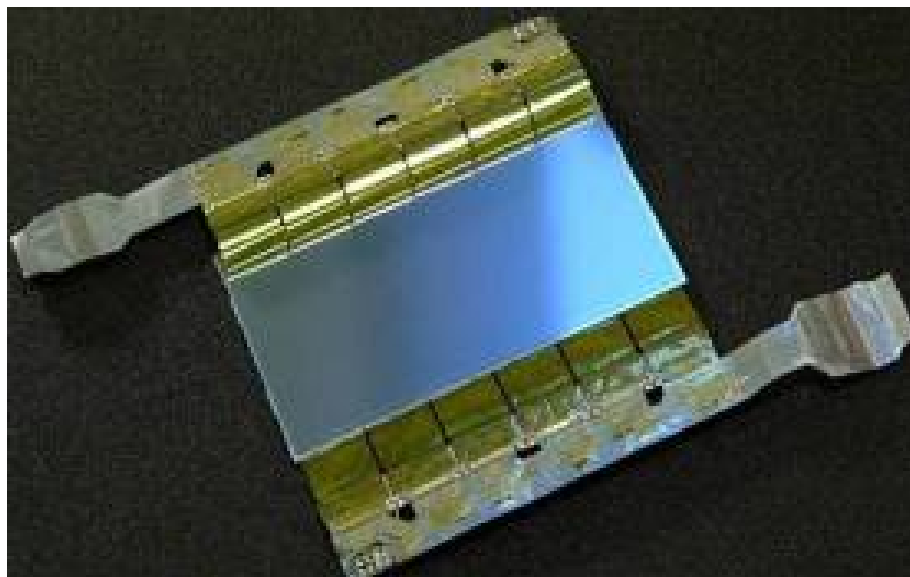
ДМ включає дрейфовий кремнієвий сенсор, мікробірки з мікросхемами зчитування й високовольтні та низьковольтні плати. Комутація компонентів ДМ виконана на безадгезивних лакофольгових діелектриках. З'єднання

елементів комутації з компонентами – одноточковим ультразвуковим зварюванням (Single Point TAB (SpTAB)-технологія) безпосередньо провідників елементів комутації до компонентів ДМ (сенсорам, мікросхемам).

Зовнішні шари внутрішньої трекової системи виконані на основі мікрострипових ДМ, склад та зовнішній вигляд яких наведено на рисунку Г.8.



а)



б)

Рисунок Г.8 – Мікростриповий ДМ: а) склад; б) зовнішній вигляд

ДМ включає мікостриповий кремнієвий сенсор, мікрозбірки з мікросхемами зчитування. Комутація компонентів, як і у випадку дрейфових ДМ, виконана на безадгезивних лакофольгових діелектриках. З'єднання елементів комутації з компонентами – ультразвуковим зварюванням безпосередньо провідників елементів комутації до компонентів ДМ.

Більш детально особливості побудови детекторної установки експерименту ALICE та ДМ описано в [1.8].

3 ЕКСПЕРИМЕНТ CMS

3.1 Детекторна система експерименту CMS

ДС експерименту CMS призначена для дослідження різних типів фізики, які могли б бути виявлені в енергетичних зіткненнях у ВАК [1.9]. Деякі з цих досліджень полягають в підтвердженні або поліпшених вимірах параметрів Стандартної Моделі, тоді як багато інших – у пошуках нової фізики. Загальний вигляд ДС з наведенням основних складових частин наведено на рисунку Г.9.

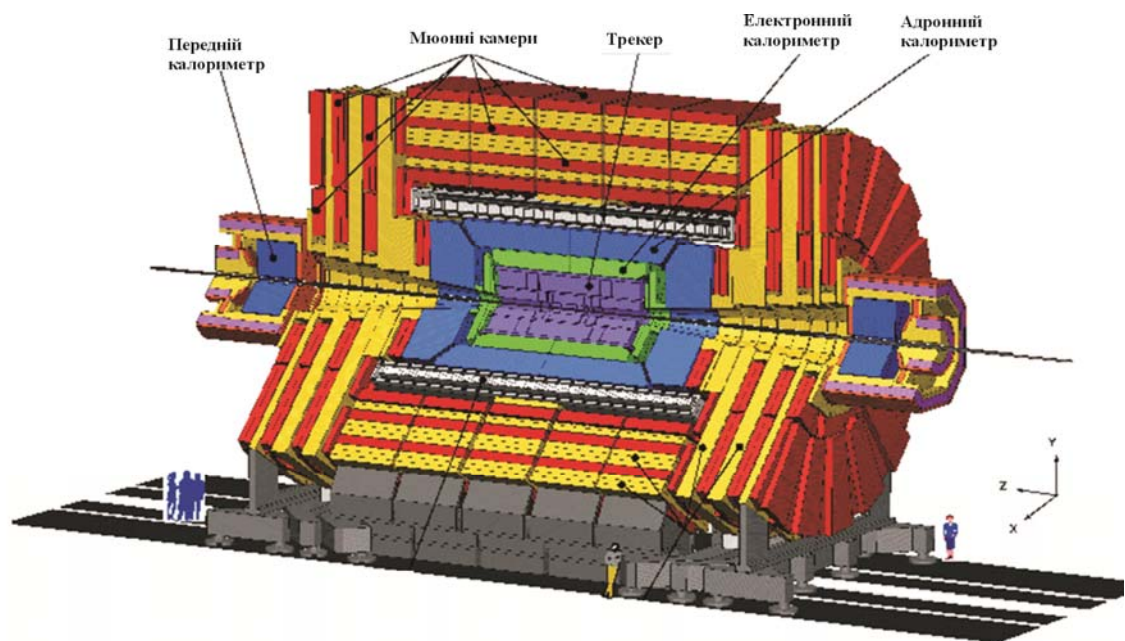


Рисунок Г.9 – Детекторна система експерименту CMS

3.2 Детекторні модулі експерименту CMS

У ДС експерименту CMS, як і у більшості експериментів, піксельні та мікострипові ДМ використані при створенні ВТС, яка розташована найближче до зони зіткнення частинок. ВТС включає піксельний детектор та кремнієвий стриповий трекер.

Склад та зовнішній вигляд піксельного ДМ наведено на рисунку Г.10.

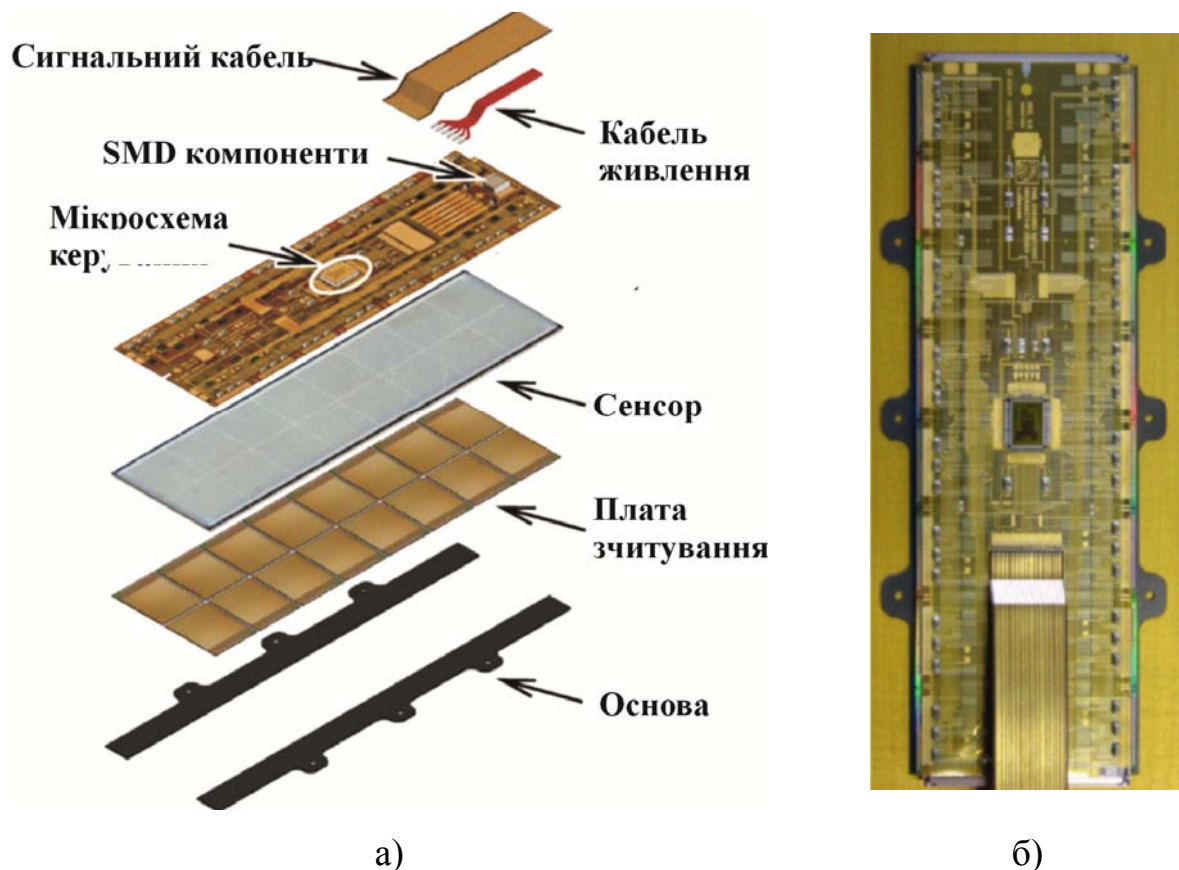
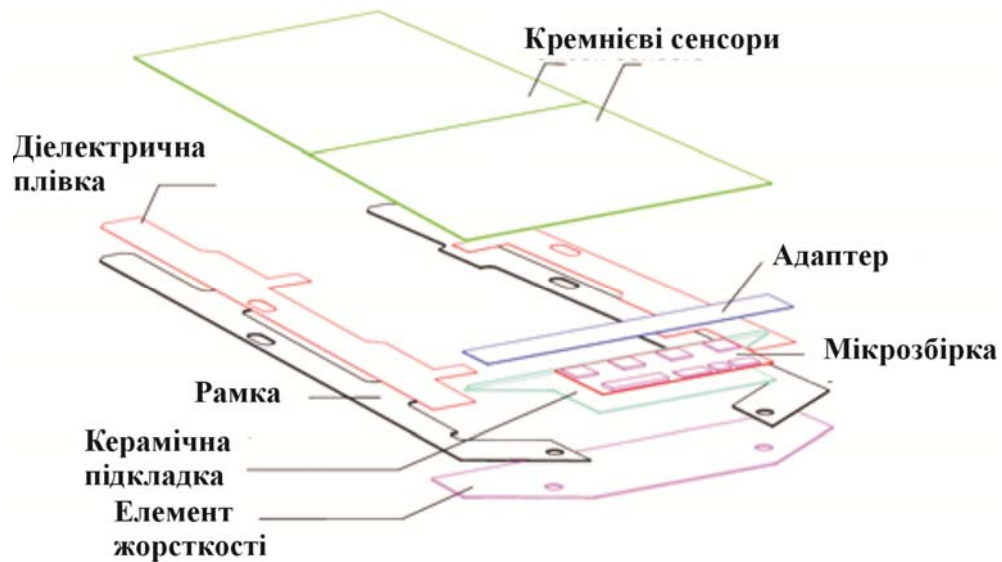


Рисунок Г.10 – Піксельний ДМ: а) склад; б) зовнішній вигляд

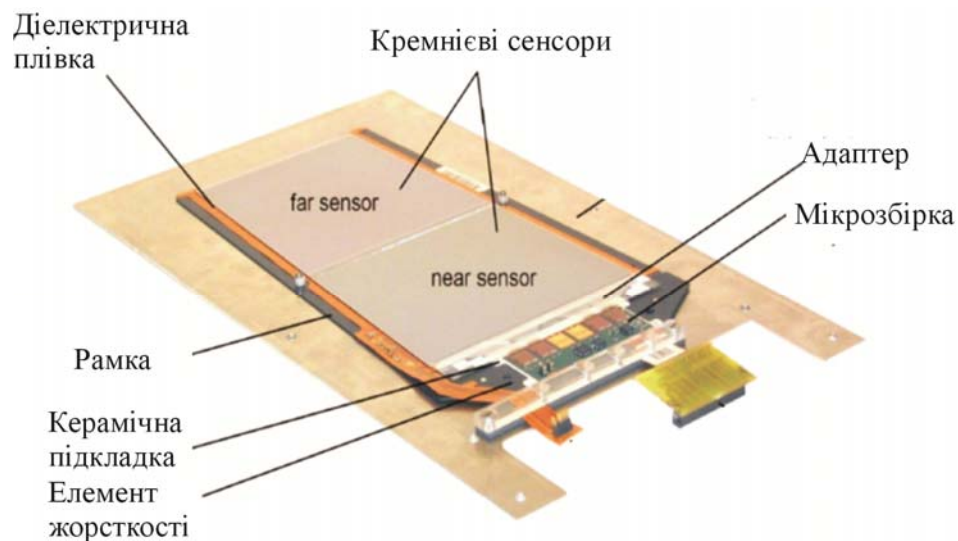
ДМ включає піксельних сенсор, 16 мікросхем зчитування та тришарову гнучку друковану плату, виготовлену на основі мідь-поліімідних адгезивних фольгованих діелектриків. З'єднання сенсорів з мікросхемами здійснюється паянням кульок припою, а з'єднання мікросхем з багатошаровою платою – УЗ-зварюванням дротом.

Стриповий трекер включає мікострипові ДМ, склад та зовнішній вигляд яких наведено на рисунку Г.11.

Головними складовими частинами даного ДМ є мікрострипові сенсори (1 або 2 на модуль) з кількістю стрипів 512 або 768 та ГМ з мікросхемами обробки інформації, виконана на основі мідь-поліімідних адгезивних фольгованих діелектриків. Електричне з'єднання компонентів у даних мікрострипових ДМ здійснено УЗ-зварюванням дротом з застосуванням СОВ-технології.



а)



б)

Рисунок Г.11 – Мікростриповий ДМ: а) склад; б) зовнішній вигляд

Більш детально особливості побудови детекторної установки експерименту CMS та ДМ описано в [1.9].

4 ЕКСПЕРИМЕНТ LHCb

4.1 Детекторна система експерименту LHCb

ДС LHCb сама маленька з чотирьох основних детекторів на БАК і оптимізована для вивчення В-мезонів, тобто частинок, що містять b-кварк (так званий "чарівний" кварк) [10]. Детекторна установка LHCb (рисунок Г.12) представляє собою одноплечовий спектрометр, здатний реєструвати треки часток у діапазоні кутів від 15 до 300 мрад.

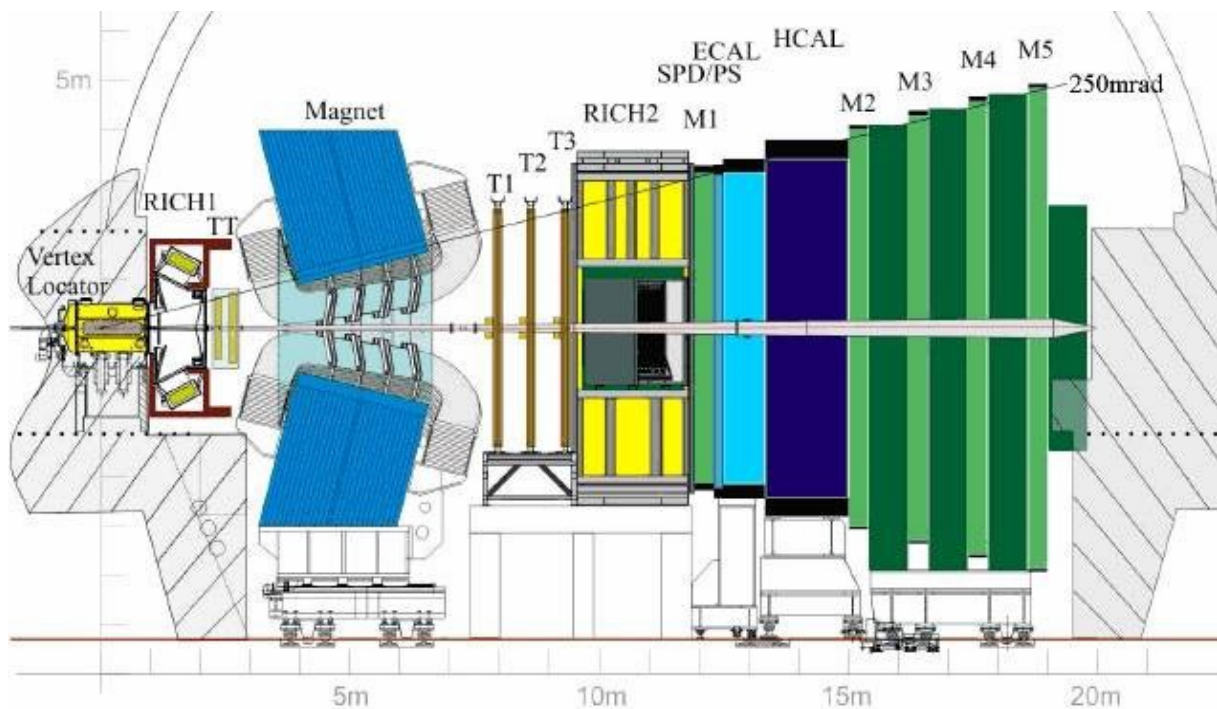


Рисунок Г.12 – Загальний вигляд детекторної системи LHCb.

ДС LHCb складається з вершинного локатора VELO; першого черенковського детектора RICH1; тригерного трекера TT (Trigger Tracker), який розташований між RICH1 і дипольним магнітом; другого черенковського детектора RICH2; трьох станцій трекерів T1-T3 розміщених між дипольним магнітом і RICH2, кожна станція складається з внутрішнього трекера IT (Inner Tracker), розташованого поблизу іонопровода, і OT (Outer Tracker). Далі

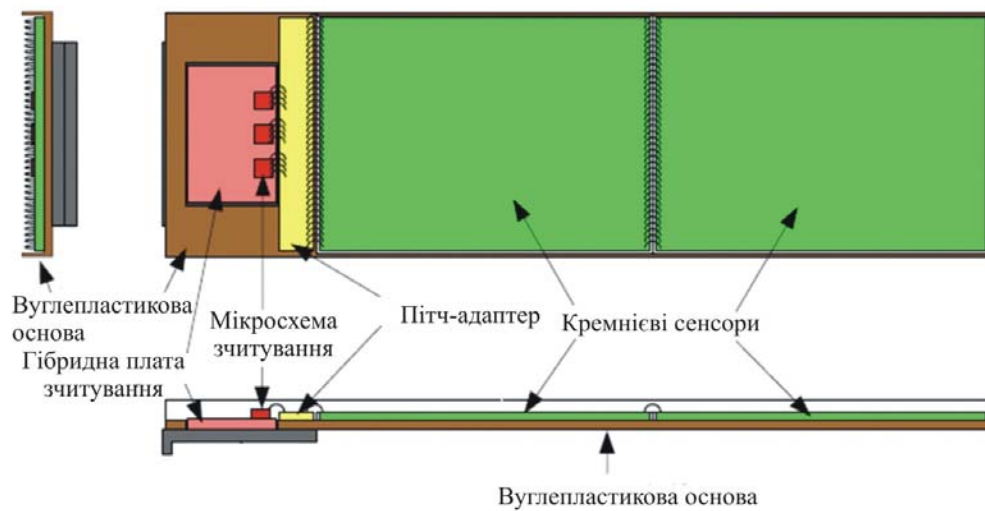
розташовані електромагнітний (ECAL) і адронний калориметри (HCAL); перед ECAL розташовані сцинтиляційно-падовий (SPD) і предлівневий (PS) детектори. Мюонна система складається з чотирьох секцій. Секція M1 розташована перед калориметрами, секції M2-M5 – після калориметрів. На відміну від найбільших детекторів ATLAS і CMS, які з усіх боків оточують місце зіткнення протонів (тобто володіють високою "герметичністю"), ДС LHCb має вид конусу, на вістрі якого відбуваються зіткнення зустрічних пучків. Довжина ДС складає 21 метр, а його маса – 5600 тонн.

4.2 Детекторні модулі експерименту LHCb

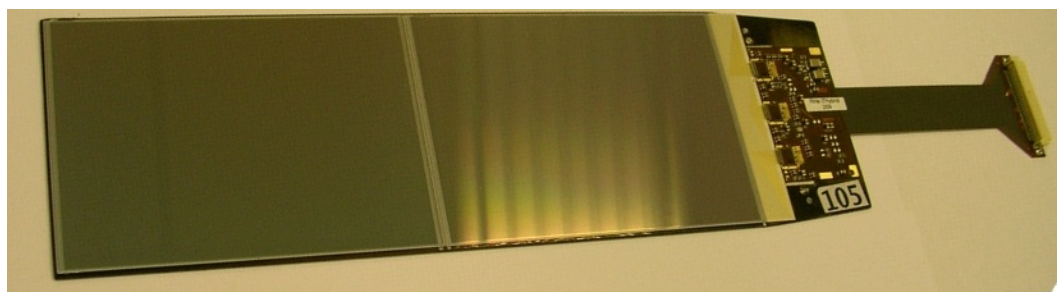
В детекторній установці LHCb використані мікрострипові ДМ у внутрішніх трекаерах, що призначені для визначення імпульсів вторинних частинок, що створюються не лише в результаті безпосередньо pp-зіткнення, а й розпаду B-мезонів. Склад та зовнішній вигляд мікрострипового ДМ наведено на рисунку Г.13.

Головними складовими частинами даного ДМ є мікрострипові сенсори (1 або 2 на модуль) з кількістю стрипів 384 та ГМ з мікросхемами обробки інформації. Мікрозбірка виготовлена з використанням мідь-поліімідних адгезивних фольгованих діелектриків. Електричне з'єднання компонентів у даних мікрострипових ДМ здійснено УЗ-зварюванням дротом з застосуванням COB-технології.

Більш детально особливості побудови ДС експерименту LHCb та ДМ описано в [1.10].



а)



б)

Рисунок Г.13 – Мікростриповий ДМ: а) склад; б) зовнішній вигляд

ДОДАТОК Д
РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ
ФОТОРЕЗИСТИВНОЇ МАСКИ

Таблиця Д.1 – Формування фоторезистивної маски провідників з шагом 49 мкм на фоторезисті в'язкістю 15,2 с

№ зразка	Швидкість нанесення, с	Час експонування, с	Товщина фоторезисту, мкм	Ширина провідника, мкм	Примітки
1.1	150	10	1,6 – 1,7	—	зазори, що не опрацьовуються
1.2		15		—	
1.3		20		—	
1.4		25		35	нечіткий край
1.5		30		35	
1.6	200	10	1,4 – 1,5	34 – 33	нечіткий край)
1.7		15		34	
1.8		20		34	
1.9	200	25	1,4 – 1,5	35 – 36	нечіткий край
1.10	200	30	1,4 – 1,5	35 – 36	нечіткий край
1.11	250	10	1,2 – 1,3	34 – 35	з'являються закоротки. В процесі експонування провідник пересвідчуються і ширина провідника по фоторезистивній масці збільшується
1.12		15		35	
1.13		20		35 – 36	
1.14		25		36 – 37	
1.15		30		36 – 37	
1.16	300	10	1,2 – 1,3	34 – 35	з'являються закоротки. В процесі експонування провідник пересвідчуються і ширина провідника по фоторезистивній масці збільшується
1.17		15		35	
1.18		20		35 – 36	
1.19		25		36 – 37	
1.20		30		36 – 38	

продовження табл. Д.1

№ зразка	Швидкість нанесення, с	Час експонування, с	Товщина фоторезисту, мкм	Ширина провідника, мкм	Примітки
1.21	350	10	1,0 – 1,1	34 – 35	закоротки
1.22		15		34 – 35	
1.23		20		34 – 35	
1.24		25		35 – 36	
1.25		30		36 – 37	

Таблиця Д.2 – Формування фоторезистивної маски провідників з шагом 49 мкм на фоторезисті в'язкістю 13,6 с

№ п/п	Швидкість нанесення, с	Час експонування, с	Товщина фоторезисту, мкм	Ширина провідника, мкм	Примітки
2.1	150	10	1,0 – 1,1	34 – 35	закоротки
2.2		15		34 – 35	
2.3		20		34 – 35	
2.4		25		36 – 37	
2.5		30		36 – 37	
2.6	200	10	0,8 – 0,9	34 – 35	
2.7		15	0,8 – 0,9	35 – 34	
2.8	200	20	0,8 – 0,9	35 – 36	
2.9	200	25	0,8 – 0,9	35 – 36	закоротки
2.10	200	30	0,8 – 0,9	35 – 36	
2.11	250	10	0,8 – 0,9	34	закоротки
2.12		15		35	
2.13		20		35	
2.14		25		35 – 36	

продовження табл. Д.2

№ п/п	Швидкість нанесення, с	Час експонування, с	Товщина фоторезисту, мкм	Ширина провідника, мкм	Примітки
2.15		30		35 – 36	
2.16	300	10	0,6 – 0,7	34 – 35	зазори, що не опрацьовуються
2.17		15		—	
2.18		20		—	
2.19		25		—	
2.20		30		—	
2.21	350	10	0,6 – 0,7	34 – 35	зазори, що не опрацьовуються
2.22		15		—	
2.23		20		—	
2.24	350	25	0,6 – 0,7	—	зазори, що не опрацьовуються
2.25		30		—	

ДОДАТОК Е
РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТРАВЛЕННЯ
АЛЮМІНІЮ

Таблиця Е.1 – Результати дослідження процесу травлення алюмінію при різних складах травників

№ партії	№ зразка	Склад травника	Температура, °С	Час травлення	Ширина провідників	
					Основа провідника, L ₁	Вершина провідника, L ₂
1	1.1	H ₃ PO ₄ (76%):	60	18 хв. 10 с	—	—
	1.2	CH ₃ COOH (15%):		18 хв. 30 с	—	—
	1.3	HNO ₃ (3%): H ₂ O (5%)		18 хв. 25 с	—	—
2	2.1	H ₃ PO ₄ :CH ₃ COOH = 2:1	60	22 хв.	—	—
	2.2			22 хв. 30 с	—	—
	2.3			22 хв. 10 с	—	—
3	3.1	H ₃ PO ₄ :CH ₃ COOH = 2:1	100	2 хв.	23	14
	3.2			2 хв. 5 с	17	10
	3.3			1 хв. 5 с	20	10

продовження табл. Е.1

№ партії	№ зразка	Склад травника	Температура, °С	Час травлення	Ширина провідників	
					Основа провідника, L ₁	Вершина провідника, L ₂
4	4.1	H ₃ PO ₄ :	100	2 хв. 20 с	15	0
	4.2	CH ₃ COOH= 2:1+0,3%		2 хв. 17 с		
	4.3	ПАР		2 хв. 23 с		
5	5.1	H ₃ PO ₄ :	100	1 хв. 50 с	21	5
	5.2	CH ₃ COOH= 2:1+0,5%		2 хв.		
	5.3	ПАР		2 хв. 5 с		
6	6.1	H ₃ PO ₄ :	100	1 хв. 30 с	18	4,5
	6.2	CH ₃ COOH= 2:1+0,7%		1 хв. 25с		
	6.3	ПАР		1 хв. 35 с		
7	7.1	H ₃ PO ₄ :	100	1 хв. 27 с	20	3,5
	7.2	CH ₃ COOH= 2:1+1%		1 хв. 30 с		
	7.3	ПАР		1 хв. 28 с		

продовження табл. Е.1

№ партії	№ зразка	Склад травника	Температура, °С	Час травлення	Ширина провідників	
					Основа провідника, L ₁	Вершина провідника, L ₂
8	8.1	H ₃ PO ₄ :	100	1 хв. 15 с	29	20
	8.2	CH ₃ COOH= 2:1+1,5%		1 хв. 20 с	28	21
	8.3	ПАР		1 хв. 22 с	28	20
9	9.1	H ₃ PO ₄ :	100	1 хв. 3 с	22	4,0
	9.2	CH ₃ COOH= 2:1+2%		1 хв. 10 с	20	5,0
	9.3	ПАР		1 хв. 7 с	20	5,0

Таблиця Е.2 – Результати дослідження процесу травлення алюмінію

№ партії	№ зразка	Величина підтраву, мкм	Величина клину травлення, мкм	Коефіцієнт підтравлювання	Коефіцієнт анізотропії
		$\delta = (d_m - L_1)/2$	$\Delta = (L_1 - L_2)/2$	$k_{тр} = 8/h_{Al}$	$A_x = 1 - k_{тр}$
		3	4	5	6
1	1.1	—	—	—	—
1	1.2	—	—	—	—

продовження табл. Е.2

№ партії	№ зразка	Величина підтраву, мкм	Величина клину травлення, мкм	Коефіцієнт підтравлювання	Коефіцієнт анізотропії
		$\delta = (dm - L1)/2$	$\Delta = (L1 - L2)/2$	$k_{тр} = 8/hAl$	$A_x = 1 - k_{тр}$
1	1.3	—	—	—	—
2	2.1	—	—	—	—
2	2.2	—	—	—	—
2	2.3	—	—	—	—
3	3.1	6	4,5	0,43	0,57
3	3.2	9	4,0	0,64	0,36
3	3.3	7,5	5,0	0,53	0,47
4	4.1	10	7,5	0,71	0,29
4	4.2	8	8,5	0,57	0,43
4	4.3	10	7,5	0,71	0,29
5	5.1	7,0	8	0,50	0,50
5	5.2	8,5	6	0,61	0,39
5	5.3	8,5	6	0,61	0,39
6	6.1	4,5	4,0	0,37	0,68
6	6.2	4,0	4,0	0,25	0,75
6	6.3	5,5	3,5	0,39	0,61
7	7.1	3,5	4,0	0,25	0,75
7	7.2	4,5	5,5	0,32	0,68
7	7.3	4,5	4,0	0,32	0,68
8	8.1	3,0	5	0,20	0,80
8	8.2	3,5	5	0,25	0,75
8	8.3	3,5	4,0	0,25	0,75

продовження табл. Е.2

№ партії	№ зразка	Величина підтраву, мкм	Величина клину травлення, мкм	Коефіцієнт підтравлювання	Коефіцієнт анізотропії
		$\delta = (dm-L1)/2$	$\Delta = (L1-L2)/2$	$k_{тр} = 8/hA1$	$A_x = 1-k_{тр}$
9	9.1	4,0	2,5	0,28	0,72
9	9.2	5,0	2,5	0,36	0,60
9	9.3	5,0	2,5	0,36	0,64

ДОДАТОК Ж
ТЕХНОЛОГІЧНА ПОСЛІДОВНІСТЬ СКЛАДАННЯ ДМ

Таблиця Ж.1 – Технологічна послідовність складання ДМ на основі двостороннього мікростипового сенсору

№	Назва операції	Обладнання
1	<i>Складання аналогових гнучких плат з прокладками діелектричними (32 од.)</i>	
1.1.	Приклеювання прокладок сіткових до аналогових гнучких плат верхніх та нижніх	Диспенсер типу WP1900
1.2	Полімеризація клею	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
1.3	Візуальний контроль	Мікроскоп типу МБС-9
2	<i>Складання плат екрануючих Р та N-типу (2 од.)</i>	
2.1.	Приклеювання прокладок сіткових до плат екрануючих	Диспенсер типу WP1900
2.2	Полімеризація клею	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
2.3	Візуальний контроль	Мікроскоп типу МБС-9
3	<i>Складання аналогових гнучких плат з мікросхемами (16 од.)</i>	
3.1	Зварювання аналогових гнучких плат нижніх з мікросхемами	Установка УЗ зварювання типу FK Delvotec 6400 або EM4370
3.2	Електричний контроль	Комплекс контролю
3.3	Захист зварних з'єднань та підклеювання аналогових гнучких плат верхніх на мікросхеми	Диспенсер типу WP1900

продовження табл. Ж.1

№	Назва операції	Обладнання
3.4	Зварювання аналогових гнучких плат верхніх з мікросхемами	Установка УЗ зварювання типу FK Delvotec 6400 або EM4370
3.5	Електричний контроль	Комплекс контролю
3.6	Захист зварних з'єднань	Диспенсер типу WP1900
3.7	Полімеризація клею	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
3.8	Електричний контроль	Комплекс контролю
3.9	Суміщення та склеювання аналогових гнучких плат між собою (верхня та нижня)	Диспенсер типу WP1900
3.10	Полімеризація клею	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
4	<i>Складання плати обробки інформації для N сторони</i>	
4.1	Встановлення мікросхем з аналоговими гнучкими платами на посадкові місця плати	
4.2	Суміщення аналогових гнучких плат з сенсором, суміщення мікросхем з посадковими місцями плати	Мікроскоп типу МБС-9
4.3	Приклеювання плати екрануючої N типу до аналогових гнучких плат верхніх	Диспенсер типу WP1900
4.4	Полімеризація клею	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
4.5	Нанесення клею на перший ряд посадкових місць для мікросхем	Диспенсер типу WP1900
4.6	Встановлення мікросхем на перший ряд посадкових місць	

продовження табл. Ж.1

№	Назва операції	Обладнання
4.7	Полімеризація клею	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
4.8	Зварювання вихідних КП мікросхем на КП плати	Установка УЗ зварювання типу УЗСМ або EM4370
4.9	Електричний контроль	Комплекс контролю
4.10	Захист зварних з'єднань	Диспенсер типу WP1900
4.11	Полімеризація клею	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
4.12	Електричний контроль	Комплекс контролю
4.13	Нанесення клею на другий ряд посадкових місць для мікросхем	Диспенсер типу WP1900
4.14	Встановлення мікросхем на другий ряд посадкових місць	
4.15	Полімеризація клею	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
4.16	Зварювання вихідних КП мікросхем на КП плати	Установка УЗ зварювання типу FK Delvotec 6400 або EM4370
4.17	Електричний контроль	Комплекс контролю
4.18	Захист зварних з'єднань	Диспенсер типу WP1900
4.19	Полімеризація клею	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
4.20	Електричний контроль	Комплекс контролю
4.21	Перевертання підбірки	
4.22	Приклеювання прокладки сіткової до аналогових гнучких плат нижніх	Диспенсер типу WP1900

продовження табл. Ж.1

№	Назва операції	Обладнання
4.23	Полімеризація клею	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
4.24	Перевертання підбірки на лицьову сторону	
5	<i>Складання плати обробки інформації для Р сторони</i>	
5.1	Встановлення мікросхем з аналоговими гнучкими платами на посадкові місця плати	
5.2	Суміщення аналогових гнучких плат з сенсором, суміщення мікросхем з посадковими місцями плати	Мікроскоп типу МБС-9
5.3	Приклейка прокладки сіткової до аналогових гнучких плат верхніх	Диспенсер типу WP1900
5.4	Полімеризація клею	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
5.5	Нанесення клею на перший ряд посадкових місць для мікросхем	Диспенсер типу WP1900
5.6	Встановлення мікросхем на перший ряд посадкових місць	
5.7	Полімеризація клею	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
5.8	Зварювання вихідних КП мікросхем на КП плати	Установка УЗ зварювання типу FK Delvotec 6400 або EM4370
5.9	Електричний контроль	Комплекс контролю
5.10	Захист зварних з'єднань	Диспенсер типу WP1900
5.11	Полімеризація клею	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
5.12	Електричний контроль	Комплекс контролю

продовження табл. Ж.1

№	Назва операції	Обладнання
5.13	Нанесення клею на другий ряд посадкових місць для мікросхем	Диспенсер типу WP1900
5.14	Встановлення мікросхем на другий ряд посадкових місць	
5.15	Полімеризація клею	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
5.16	Зварювання вихідних КП мікросхем на КП плати	Установка УЗ зварювання типу FK Delvotec 6400 або EM4370
5.17	Електричний контроль	Комплекс контролю
5.18	Захист зварних з'єднань	Диспенсер типу WP1900
5.19	Полімеризація клею	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
5.20	Електричний контроль	Комплекс контролю
5.21	Перевертання підбірки	
5.22	Приклеювання плати екрануючої Р типу до аналогових гнучких плат нижніх	Диспенсер типу WP1900
5.23	Полімеризація клею	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
5.24	Перевертання підбірки на лицьову сторону	
6	<i>Складання аналогових гнучких плат з N - стороною сенсора</i>	
6.1	Приклеювання та суміщення аналогових гнучких плат нижніх на N -сторону сенсора	Диспенсер типу WP1900, мікроскоп типу МБС-9
6.2	Зварювання аналогових гнучких плат нижніх на N - сторону сенсора	Установка УЗ зварювання типу FK Delvotec 6400 або EM4370
6.3	Візуальний контроль	Мікроскоп типу МБС-9

продовження табл. Ж.1

№	Назва операції	Обладнання
6.4	Електричний контроль	Комплекс контролю
6.5	Захист зварних з'єднань та приклеювання аналогових гнучких плат верхніх на N - сторону сенсора	Диспенсер типу WP1900
6.6	Зварювання аналогових гнучких плат верхніх на N - сторону сенсора	Установка УЗ зварювання типу FK Delvotec 6400 або EM4370
6.7	Візуальний контроль	Мікроскоп типу МБС-9
6.8	Електричний контроль	Комплекс контролю
6.9	Захист зварних з'єднань	Диспенсер типу WP1900
6.10	Полімеризація клею	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
6.11	Електричний контроль	Комплекс контролю
7	<i>Складання аналогових гнучких плат з Р - стороною сенсора</i>	
7.1	Перевертання підбірки на Р- сторону	
7.2	Приклеювання та суміщення аналогових гнучких плат нижніх на Р -сторону сенсора	Диспенсер типу WP1900, мікроскоп типу МБС-9
7.3	Зварювання аналогових гнучких плат нижніх на Р-сторону сенсора	Установка УЗ зварювання типу FK Delvotec 6400 або EM4370
7.4	Візуальний контроль	Мікроскоп типу МБС-9
7.5	Електричний контроль	Комплекс контролю
7.6	Захист зварних з'єднань та приклеювання аналогових гнучких плат верхніх на Р- сторону сенсора	Диспенсер типу WP1900

продовження табл. Ж.1

№	Назва операції	Обладнання
7.7	Зварювання аналогових гнучких плат верхніх на Р-сторону сенсора	Установка УЗ зварювання типу FK Delvotec 6400 або EM4370
7.8	Візуальний контроль	Мікроскоп типу МБС-9
7.9	Електричний контроль	Комплекс контролю
7.10	Захист зварних з'єднань	Диспенсер типу WP1900
7.11	Полімеризація клею	Шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
7.12	Електричний контроль	Комплекс контролю