

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

ПРОЦЕНКО МАКСИМ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 621.3.049.7

**ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ДЕТЕКТОРНИХ МОДУЛІВ
РАДІАЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків 2017

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки України
Невлюдов Ігор Шакирович,
Харківський національний університет
радіоелектроніки, завідувач кафедри
комп'ютерно-інтегрованих технологій,
автоматизації та мехатроніки

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

доктор фізико-математичних наук, професор
Пугач Валерій Михайлович,
Інститут ядерних досліджень НАН України,
завідувач відділом фізики високих енергій.

Захист відбудеться "___" _____ 2017 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, проспект Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки, за адресою: 61166, м. Харків, просп. Науки, 14.

Автореферат розіслано "___" _____ 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.т.н., доцент

Є. А. Разумов-Фризюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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, стріпові, 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 мікрострипові 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 мікрострипових 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 дозволяють 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 мікробірок 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 мікробірок; 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 COF-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 тривимірному монтажу з використанням інноваційної СОФ-технології;

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

- 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% (патент України на корисну модель № 104141 "Гнучкий багатошаровий 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 махатроніки ХНУРЕ та на кафедрі інформаційних технологій електронних засобів Запорізького національного технічного університету.

Застосування нових підходів та інноваційної СОФ-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 трека експерименту LHCb" (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 СБМ-КТС" (контракт №6g-09 від 09.07.2009 р.), ДКР "Розробка, виготовлення та поставка Демонстраторів 2-а і 2-б за проектом СБМ" (контракт №8r-09 від 06.10.2009 р.),

ДКР "Конструювання, виготовлення та поставка СВМ-STS Демонстраторів 2b-4" (контракт №9g-10 від 23.11.2010 р.), ДКР "Розробка, дослідження, виготовлення та поставка Демонстраторів 2a-1, 2a-2, 2a-3, 2a-4 та 2b-3 за проектом СВМ" (контракт №11r-010 від 04.05.2010 р.), ДКР "Розробка, виготовлення та поставка демонстраторів за проектом СВМ" (контракт №14r-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.

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 багатошарових структур ГЗЕ [1, 4, 7, 9, 18, 23, 24, 41], розробки та удосконалення ТП 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 освіти" (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).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та визначено завдання дослідження, викладено наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів, розглянуто особистий внесок здобувача, наведено дані про публікації та відомості про апробацію основних положень роботи.

У першому розділі, що має оглядово-аналітичний характер, відзначено, що існує велика кількість публікацій, присвячених питанням розробки та виготовлення ДМ РВ, проаналізовано стан проблеми і тенденції розвитку ТП виробництва ДМ.

На основі проведеного аналізу стану проблеми відзначено, що на практиці незамінними для створення функціонально складних електронних виробів з високими вимогами до радіаційної стійкості, термостійкості, швидкодії та довготривалої надійності є ГЗЕ на основі алюміній-поліімідних або мідь-поліімідних фольгованих або лакофольгових діелектриків.

Відзначено, що ключовими моментами у процесі створення нового покоління ГМ і ГЗЕ з покращеними експлуатаційними характеристиками є встановлення аналітичних залежностей між структурними, топологічними та електрофізичними параметрами пристроїв, а також дослідження ТП їх виготовлення та складання.

Наприкінці розділу сформульовано основні завдання дослідження.

У другому розділі уточнено математичну модель для дослідження впливу конструктивно-технологічних факторів на ємність ліній передач. Обґрунтовано доцільність використання в конструкції гнучких шлейфів (аналогових гнучких плат) сигнальних провідників з шириною 35-40 мкм та з кроком провідників 50-60 мкм.

Застосування довгих аналогових гнучких плат (ГП) у складі ДМ дозволяє розмістити електроніку зчитування за межами активної області детектування, що дозволяє мінімізувати масу ВТС 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. Відзначено, 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 багат шарова аналогова ГП повинна мати ємність не більше за 24,6 пФ або 0,49 пФ/см.

Під час передачі малопотужних сигналів між сенсорами та електронікою зчитування найбільш універсальною конструкцією ліній передачі 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 1.

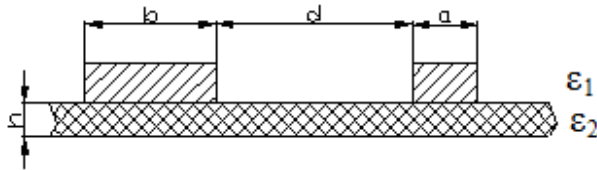


Рисунок 1 – Переріз ліній зв'язку

На рисунку 1 ϵ_1 – діелектрична проникність повітря або ізолюючої прокладки; ϵ_2 – діелектрична проникність підкладки.

Методика розрахунку електричної ємності лінії зв'язку для моделі, представленої на рисунку 1, з використанням методу конформних перетворень, зводиться до наступних кроків:

- 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' :

$$k = \sqrt{m'}, \quad k_1 = \sqrt{m_1}, \quad m = \frac{a}{a+d}, \quad m_1 = \frac{(t_1 - t_2)(t_3 - t_2)}{(t_1 + t_2)(t_3 + t_2)}, \quad (1)$$

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

$$k' = \sqrt{1-k^2}, \quad k'_1 = \sqrt{1-k_1^2}; \quad (3)$$

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

$$\alpha = \arcsin(k), \quad \alpha_1 = \arcsin(k_1), \quad \alpha' = \arcsin(k'), \quad \alpha'_1 = \arcsin(k'_1); \quad (4)$$

- 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 $\epsilon_{\text{ефф}}$:

$$C_1 = 2 \frac{K}{K'}, \quad \epsilon_{\text{ефф}} = \epsilon_1 + \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{2} \frac{K_1}{K'_1} \frac{K'}{K}; \quad (5)$$

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

$$C_{\text{пог}} = 8,85 \cdot \epsilon_{\text{ефф}} \cdot C_1 \left(\frac{\text{пФ}}{\text{м}} \right). \quad (6)$$

Результати розрахунку ємнісних параметрів ліній зв'язку аналогової ГП з урахуванням прокладки (з різними значеннями діелектричної проникності ϵ_1) представлені на рисунку 2.

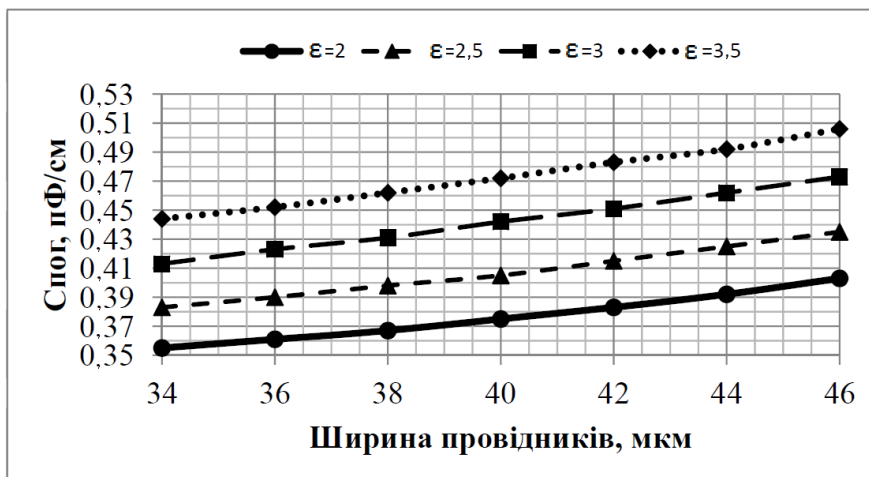


Рисунок 2 – Ємність ліній зв'язку

З рисунка 2 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 для ДМ з різними довжинами аналогових ГП з перфорованими прокладками наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – 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

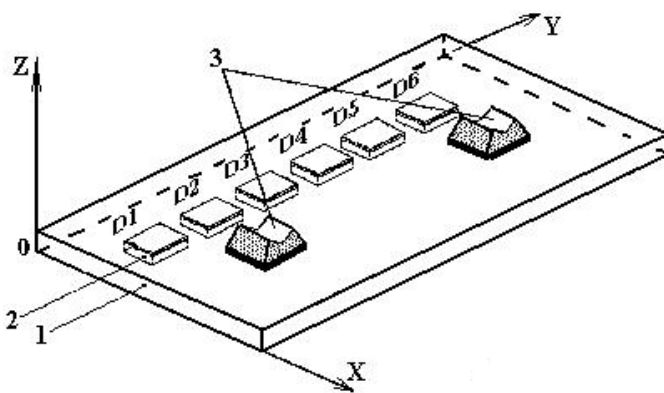
За результатами, наведеними в таблиці 1, можна зробити висновок, що основна мета розробки аналогових ГП – забезпечення відношення сигнал/шум вищого за 10 – досягнута.

У другому розділі також проведено дослідження температурного поля ГМ з використанням аналітичних методів стаціонарної теплопередачі з урахуванням теплофізичних властивостей вуглепластикового матеріалу, що раніше не використовувався як підкладка, за різного розташування напівпровідникових мікросхем, а також вивчено вплив товщини жорсткої основи на величину перегріву кристалів. За жорстку основу ГМ обрано вуглепластик, що має значну анізотропію теплофізичних властивостей ($\lambda_y \gg \lambda_x$) серед існуючих вуглепластиків (уздовж волокон $\lambda_y = 180$ Вт/(м·К) та 450 Вт/(м·К), поперек волокон $\lambda_x = 40$ Вт/(м·К)), що дозволяє здійснити ефективну теплопередачу за допомогою системи рідинного охолодження.

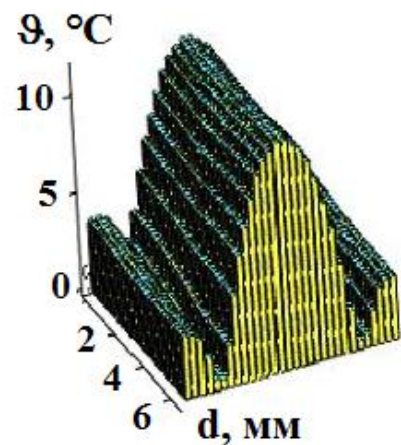
Для вирішення задачі керування тепловідводом у ДМ досліджено теплові режими ГМ на вуглепластикових підкладках з анізотропною теплопровідністю (рисунок 3, а). Під час аналізу теплового режиму мікросхем 2, встановлених на загальну основу 1, температурне поле плати описано з використанням моделі пластини з локальними джерелами теплоти і теплообміном на бічній поверхні. Отримано залежності температури перегріву під мікросхемами від розташування джерела тепла на підкладці, від товщини підкладки та від анізотропії теплофізичних властивостей вуглепластикової основи.

Встановлено, що для максимального тепловідводу в ДМ доцільно використовувати вуглепластикові основи товщиною більш ніж $0,3$ мм і розташовувати мікросхеми уздовж довгої сторони підкладки з максимальним значенням теплопровідності $\lambda_y = 450$ Вт/(м·К). Залежності розподілу температури на поверхні вуглепластикової основи товщиною $0,3$ мм зі встановленими на ньому мікросхемами 2 й елементами тепловідводу 3 наведено на рисунку 3, б.

Показано, що для розробленої конструкції ДМ температура перегріву поверхні ГМ за умови використання системи рідинного охолодження не перевищує 11 °С.



а)



б)

Рисунок 3 – Гібридна мікробірка: а) схема компоновки ГМ; б) залежність розподілу температури на поверхні вуглепластикової основи

Третій розділ присвячений дослідженню процесу рідинного хімічного травлення алюміній-поліімідних діелектриків під час виготовлення ГЗЕ.

За умови використання стандартних методів хімічного травлення виникають труднощі під час виготовлення виробів із підвищеною щільністю, оскільки травлення алюмінію є ізотропним. Через підтравлювання під фоторезистивну маску спостерігається трапецієподібний переріз провідника, так званий "клин травлення". Існує кілька варіантів поліпшення роздільної здатності процесу травлення та підвищення коефіцієнта анізотропії під час травлення. Одним з них є вибір оптимальних технологічних режимів формування фоторезистивної маски (рисунки 4 і 5). 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 (ПАР) і їх впливу на процес травлення.

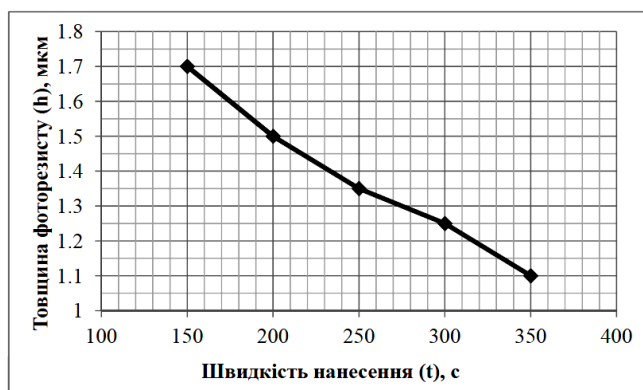


Рисунок 4 – Залежність товщини фоторезисту (h) від швидкості його нанесення (t)

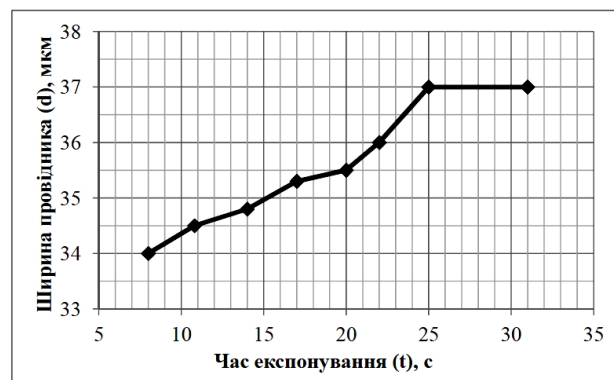


Рисунок 5 – Залежність ширини провідника по фоторезистивній масці (d) від часу експонування фоторезисту (t)

У результаті проведених робіт 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.

У процесі досліджень було обрано травник наступного складу: фосфорна кислота (H₃PO₄ – 65%) і оцтова кислота (CH₃COOH – 35%). Для рівномірності травлення по всій поверхні заготовки до складу травника також введено ПАР (речовини з асиметричною молекулярною структурою, які здатні адсорбуватися на поверхні розділу фаз, внаслідок чого можуть знижувати поверхневу енергію і змінювати властивості травника). Серед ПАР обрано препарат ОС-20, який належить до оксипропанолів (основна домішка – поліетиленгліколь).

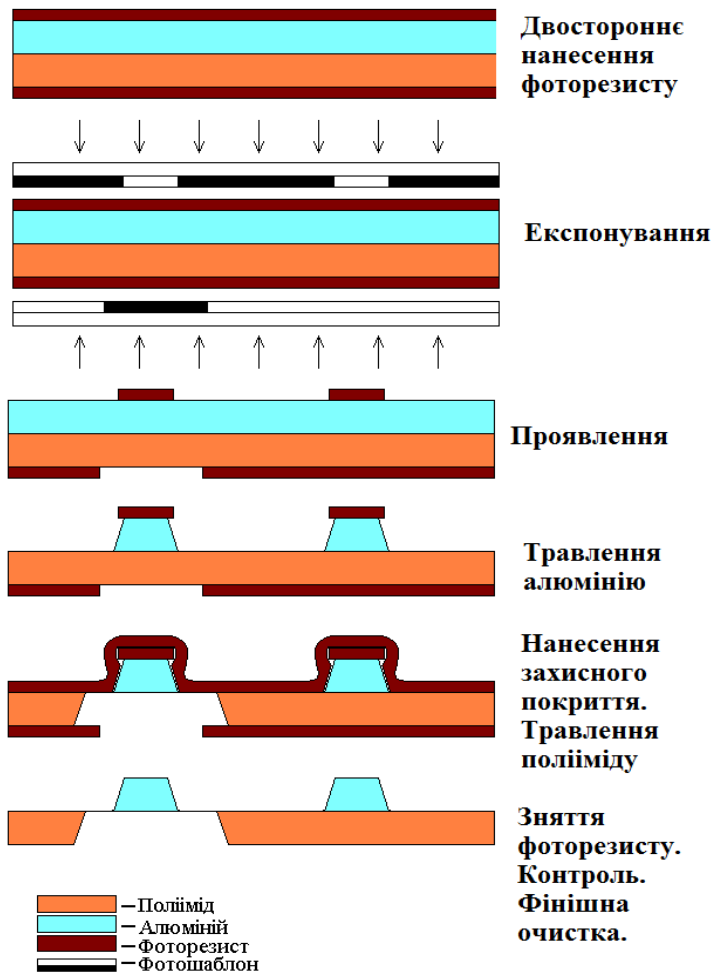


Рисунок 6 – Маршрут виготовлення ГЗЕ з алюміній-поліїмідних діелектриків

У четвертому розділі на основі теорії повного факторного експерименту розроблено експериментально-статистичну модель визначення оптимальних технологічних режимів УЗ-зварювання ГЗЕ з безадгезивних алюміній-поліїмідних фольгових діелектриків на автоматизованому обладнанні:

$$PF = -16,90 + 179,03 \cdot BF + 141,42 \cdot USP - 37,46 \cdot UST + 0,03 \cdot BF \cdot USP + 34,96 \cdot BF \cdot UST + 40,71 \cdot USP \cdot UST - 139,49 \cdot BF^2 - 69,71 \cdot USP^2 - 12,35 \cdot UST^2, \quad (7)$$

де PF – механічна міцність зварного з'єднання; BF – зусилля навантаження зварювального інструменту; USP – вихідна потужність УЗ-генератора; UST – час зварювання.

Для контролю якості зварних з'єднань було застосовано скануючий інтерферометр білого світла (SWLI) – рисунок 7.

У ході експерименту змінювалися три різних параметри процесу зварювання, в тому числі зусилля навантаження зварювального інструменту, вихідна потужність УЗ-генератора та час зварювання. Скануючий інтерферометр білого світла було використано для того, щоб виміряти висоту зварного з'єднання (рисунок 8) з метою співставлення цього параметру з силою руйнування зварного з'єднання:

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: $H_3PO_4 : CH_3COOH = 2 : 1 + 0,7...1,5 \% \text{ ПАР}$;
- температура травлення $100^\circ C$;
- час травлення 2 хв.

Розроблений маршрут виготовлення ГЗЕ з алюміній-поліїмідних діелектриків наведено на рисунку 6.

$$BH = -18,23 + 3,49 \cdot BF + 27,42 \cdot USP + 1,96 \cdot UST - 1,91 \cdot BF \cdot USP - 1,65 \cdot BF \cdot UST - 1,23 \cdot USP \cdot UST - 1,54 \cdot BF^2 - 6,81 \cdot USP^2 + 0,26 \cdot UST^2, \quad (8)$$

де BH – висота зварного з'єднання.

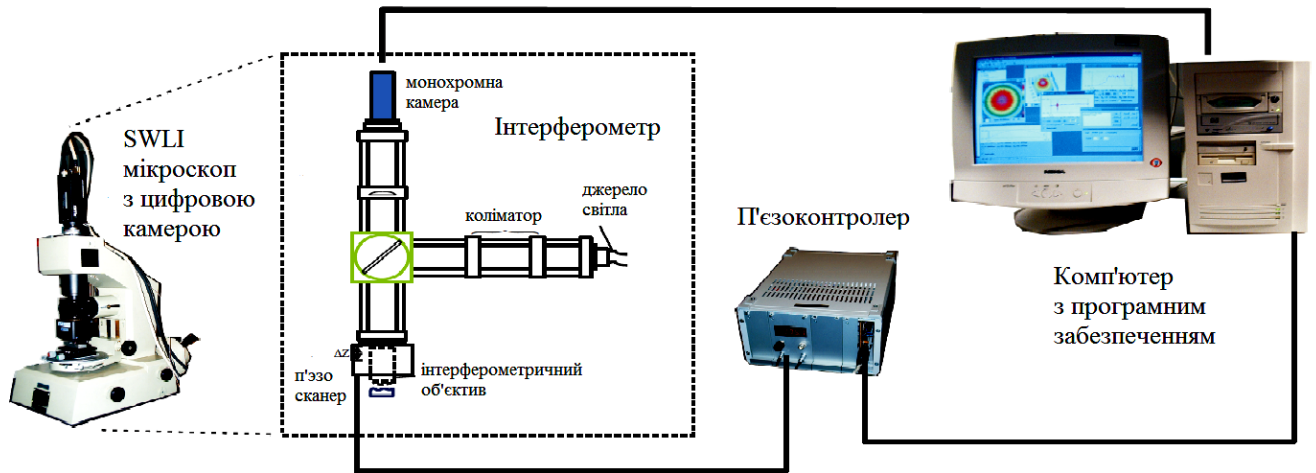


Рисунок 7 – Скануючий інтерферометр білого світла

Усі зварні з'єднання з висотою $(7,22 \pm 1,80)$ мкм мали міцність на розрив, що перевищує 85 мН. Це було підтверджено за допомогою окремого вимірювання, де зусилля руйнування зварних з'єднань порівнювалося з відповідною висотою, що була зафіксована раніше.

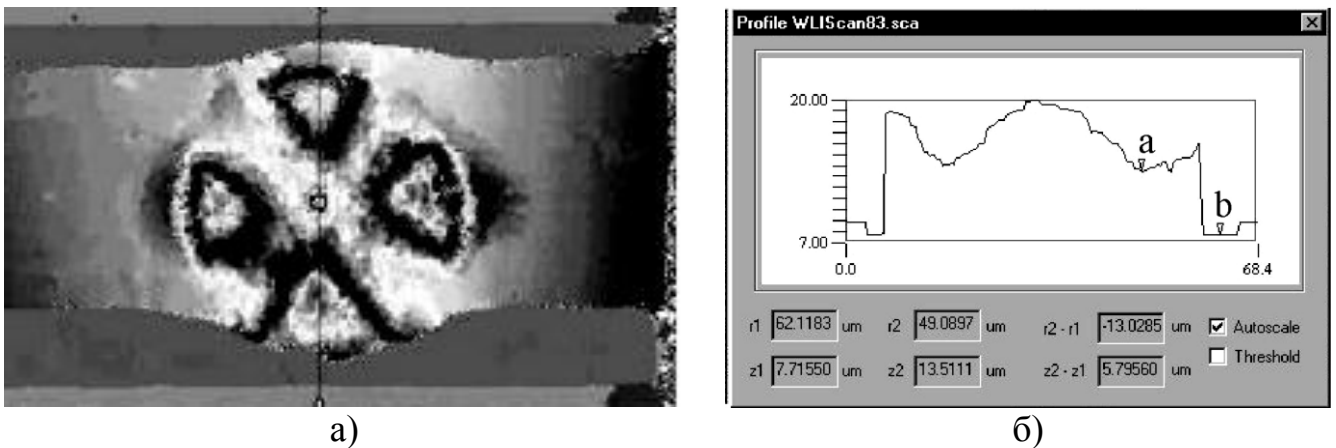


Рисунок 8 – Зварне з'єднання (а) та профіль зварного з'єднання (б)

Отримані залежності зусилля руйнування з'єднань і висоти з'єднань від основних параметрів процесу зварювання представлено на рисунку 9.

Таким чином, висока надійність з'єднань забезпечувалася в експериментально встановленому діапазоні оптимальних технологічних режимів УЗ-зварювання: навантаження інструменту 185 мН; потужність УЗ-генератора 0,25 Вт та час зварювання 60 мс. Результати експериментів збігаються із даними, отриманими у результаті теоретичних досліджень.

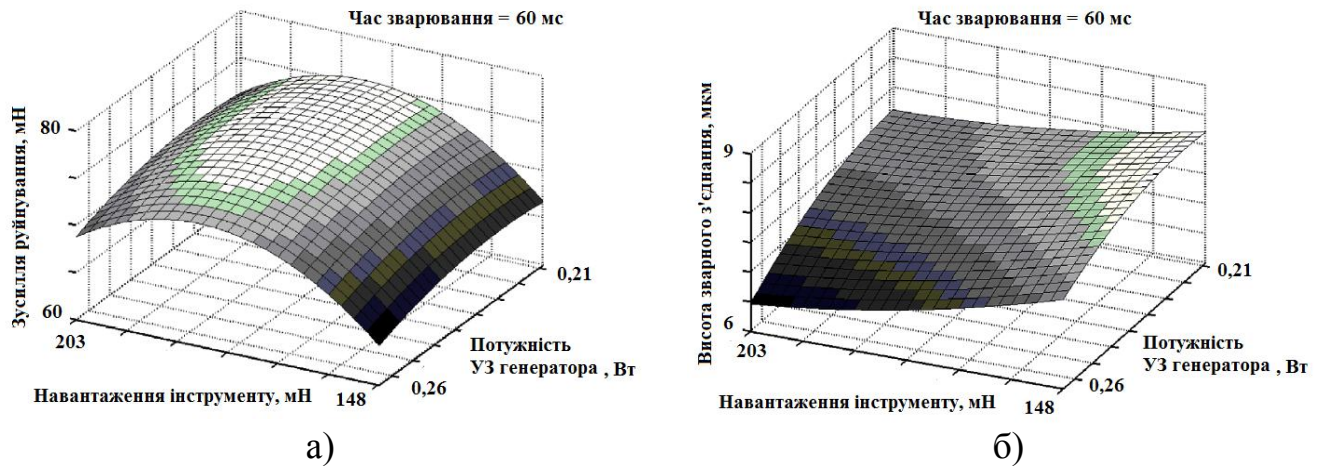


Рисунок 9 – Залежності зусилля руйнування з'єднань (а) та висоти з'єднань (б) від основних параметрів процесу УЗ-зварювання

У п'ятому розділі проведено аналіз причин і природи відмов виробів електронної техніки підвищеної функціональної складності з метою вибору найбільш ефективних методів побудови моделей деградаційних процесів, а також вибору найбільш інформативних планів випробувань для визначення кількісних показників надійності виробів.

За результатами аналізу запропоновано дифузійну модель відмов зварних з'єднань, згідно якій основну роль у зменшенні зусилля їх руйнування відіграє ефект дифузійної пористості. Дана модель дозволила розрахувати час безвідмовної роботи зварних з'єднань за допомогою машинних випробувань вибірки з 1000 "зразків". Показано, що середній час напрацювання на відмову \bar{t}_n складає $\sim 10^5$ годин.

З метою отримання інформації про стійкість мікробірок за умови дії навантажень, що перевищують експлуатаційні режими, для експериментальної оцінки довговічності виробу та підтвердження відповідності значення часу роботи виробу без відмови терміну експлуатації та виявлення потенційно ненадійних елементів ДМ для експерименту ALICE проводилися прискорені форсовані випробування.

Виходячи з заданого терміну експлуатації виробів (10 років) в умовах експерименту ALICE, з урахуванням властивостей застосовуваних матеріалів, а також базуючись на рекомендаціях міжнародних і вітчизняних стандартів, для дослідження надійності мікробірок обрано метод термоциклічних випробувань.

Параметри випробувального режиму за умови впливу циклічної зміни температури за нормального атмосферного тиску (рисунок 10):

- максимальна температура в термоциклі, T_{\max} – плюс 90 °С;
- мінімальна температура в термоциклі, T_{\min} – плюс 5 °С;
- швидкість зміни температури dT/dt – 8,5 °С/хв;
- витримка за T_{\max} і за T_{\min} , t_b – 3 хв.

Випробування мікробірок (для випробувань використані 2 мікробірки – рисунок 11) на вплив циклічної зміни температури проводилися протягом 770 термоциклів із тривалістю одного циклу $t_{\text{ц}} = 26$ хвилин і включали кілька періодів по 11-13 термоциклів у періоді.

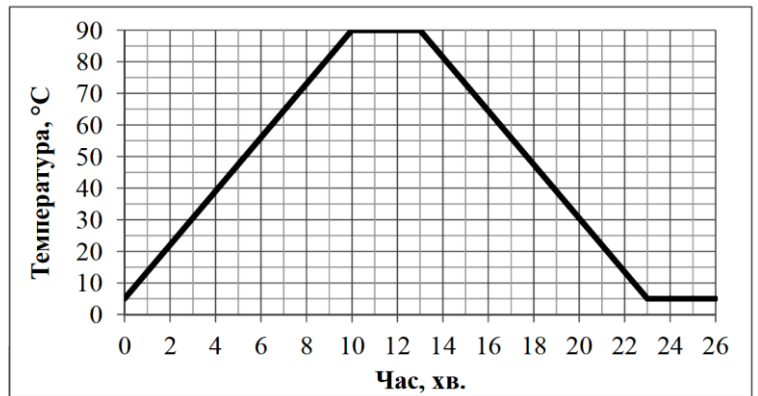


Рисунок 10 – Параметри випробувального режиму за дії циклічної зміни температури

Після кожного випробувального періоду проводилися: візуальний контроль зовнішнього вигляду мікробірок за допомогою мікроскопа МБС-9; автоматизований контроль цілісності струмопровідних кіл і оцінка якості ізоляції; вимірювання номіналів навісних компонентів (резисторів і конденсаторів).



Рисунок 11 – Розміщення зразків у тарі для випробувань

Аналіз одержаних результатів випробувань дозволив зробити висновок про те, що мікробірки витримали прискорені випробування на вплив циклічної зміни температури (770 циклів) за нормального атмосферного тиску, а кількість відмов дорівнює нулю.

Оцінка інтенсивності відмов мікробірок в умовах експлуатації за результатами прискорених випробувань невеликих вибірок з одиничними відмовами проводилася за допомогою виразу для функції розподілу часу до відмови за критерієм χ^2 (хі-квадрат), що найбільш часто застосовується для оцінки надійності мікроелектронних виробів:

$$\lambda = \frac{\chi^2}{2N \cdot t \cdot K_y} = \frac{1,833}{2 \cdot 2 \cdot 333,67 \cdot 165} \approx 8,32 \cdot 10^{-6} \text{ (год}^{-1}\text{)}, \quad (9)$$

де N – кількість мікробірок, які підлягали прискореним випробуванням; t – тривалість випробувань ($t = 770 \cdot 26 = 20020$ хв = 333,67 годин); K_y – коефіцієнт прискорення інтенсивності відмов ($K_y = K_{yT} \cdot K_{yt} = 72 \cdot 2,3 \approx 165$).

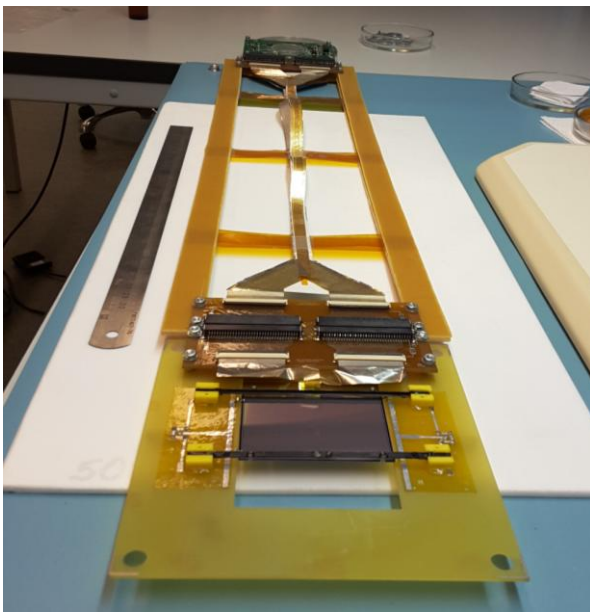
При цьому час напрацювання на відмову склав:

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

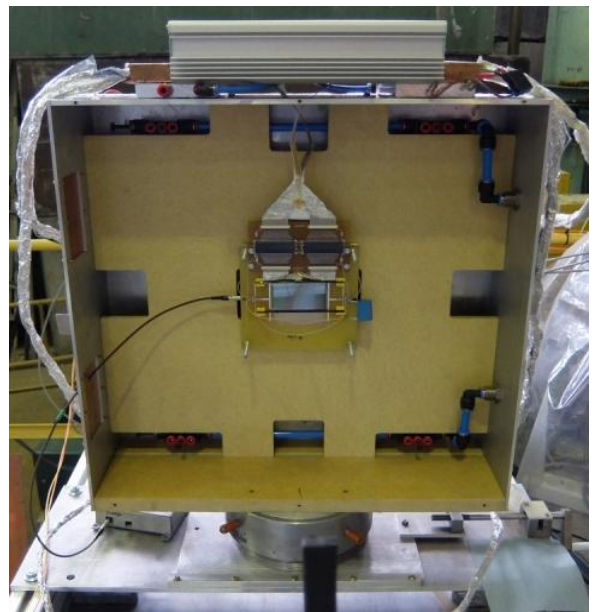
У шостому розділі наведено результати вимірювання параметрів експериментального зразка (ЕЗ) ДМ для експерименту СВМ, виготовленого з використанням впроваджених ТП.

Вимірювання параметрів ЕЗ ДМ (рисунок 12) виконано в Міжнародній міжурядовій науково-дослідній організації "Об'єднаний інститут ядерних досліджень" (м. Дубна, РФ) у відділі НМВКТС лабораторії ЛФВЕ.

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.



а)



б)

Рисунок 12 – ЕЗ ДМ для експерименту СВМ:

а) вид ЕЗ ДМ; б) розташування ЕЗ ДМ у складі вимірювальної установки

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).

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

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 багат шарових 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 махатроніки 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 поставленні задачі дослідження виконані та мету дослідження досягнуто.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Патенти та авторські свідоцтва

1. Гнучкий багат шаровий 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 багат шарової 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 (включено до міжнародних науково-метричних баз даних Scopus, Researchgate та PИИЦ).

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 (включено до міжнародних науково-метричних баз даних Scopus, Researchgate та PИИЦ).

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 (*включено до міжнародної науково-метричної бази даних Researchgate*).

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 (*включено до міжнародних науково-метричних баз даних Scopus, Researchgate та PIHL*).

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 (*включено до міжнародної науково-метричної бази даних Researchgate*).

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 (*включено до міжнародної науково-метричної бази даних Researchgate*).

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 (*включено до міжнародної науково-метричної бази даних Researchgate*).

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 микроstriпового детекторного модуля для эксперимента CBM 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 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.

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 (включено до міжнародної науково-метричної бази даних *Scopus*).

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 *PIHЦ*).

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 (включено до міжнародних науково-метричних баз даних *Scopus*, *Researchgate* та *PIHЦ*).

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 (включено до міжнародних науково-метричних баз даних *Scopus* та *Researchgate*).

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 (включено до міжнародних науково-метричних баз даних *Scopus*, *Researchgate* та *PIHЦ*).

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 (включено до міжнародної науково-метричної бази даних *Scopus* та *PIHЦ*).

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.) (включено до міжнародної науково-метричної бази даних Scopus та PИИЦ).

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. Тимчук, 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.

АНОТАЦІЯ

Проценко М. А. Технологія виробництва детекторних модулів радіаційного випромінювання. – Рукопис.

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 багатошарових ГЗЕ з урахуванням усадки матеріалу, похибки геометричних розмірів елементів, клена 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.

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.

АННОТАЦІЯ

Проценко М. А. Технологія виробництва детекторних модулів радіаційного випромінювання. – Рукопись.

Дисертація на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 – технология, оборудование и производство электронной техники. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков, 2017 г.

В диссертационной работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований новых технологических процессов (ТП) производства детекторных модулей (ДМ) радиационных излучений (РИ).

Разработана модель, с использованием которой установлены аналитические взаимосвязи между структурными, топологическими и электрофизическими параметрами ДМ и гибких соединительных элементов (ГСЭ) и исследованы зависимости помехозащищенности линий передач ДМ от конструктивных параметров и технологии изготовления. Разработаны оптимальные конструктивно-технологические решения ГСЭ в соответствии с критериями минимизации массы в рабочем объеме детекторного блока.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования ТП изготовления многослойных ГСЭ с учетом усадки материала, погрешности геометрических размеров элементов, клена травления алюминия. Определены оптимальные режимы и выбраны маршрутные схемы изготовления ГСЭ с шагом расположения проводников 50 мкм и менее.

Усовершенствованы ТП УЗ сварки ГСЭ из безадгезивных алюминий-полиимидных фольговых диэлектриков на автоматизированном оборудовании, что позволило улучшить воспроизводимость соединений и повысить производительность сборки ДМ более чем в 10 раз.

Разработана диффузионная модель отказов сварных соединений, согласно которой основную роль в уменьшении усилия разрушения играет эффект диффузионной пористости.

Проведенные ускоренные испытания микросборок на влияние циклически изменяющейся температуры отказов не вызвали, подтвердив время наработки на отказ $t_n = 13,7$ лет.

Экспериментально исследованы параметры и характеристики реализованных на практике экспериментальных образцов ДМ.

Ключевые слова: детекторные модули радиационного излучения, гибкие соединительные элементы, алюминий-полиимидные лакофольговые диэлектрики, углепластиковые основания, COF-технология сборки, ультразвуковая сварка.

SUMMARY

Protsenko M. A. The technology for the production of radiation detector modules. – 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.

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.