

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

Розробка гнучкого радіаційно-стійкого мікроелектронного модуля

(тема)

Виконала: студентка 2 курсу II рівня вищої освіти групи ЕППМ-20-1

спеціальності 171– «Електроніка»
(код і повна назва спеціальності)

Падалко Є.О.
(прізвище, ініціали)

Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма «Електронні прилади та пристрої»
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Галат О.Б.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

Ігор БОНДАРЕНКО

(підпис)

2021 р

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____
Кафедра _____ Мікроелектроніки електронних приладів та пристроїв _____
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерській) _____
Спеціальність _____ 171 «Електроніка» _____
(шифр и назва)
Тип програми _____ освітньо-професійна _____
Освітня програма _____ «Електронні прилади та пристрої» _____
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри

_____ Ігор БОНДАРЕНКО
« _____ » _____ 2021р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Падалко Євгенії Олександрівні _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка гнучкого радіаційно-стійкого мікроелектронного модуля

затверджена наказом по університету від __ 8 __ 11 __ 2021 р. № 1667Ст_

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії ____ 20__ р.

3. Вихідні дані до роботи _____

3.1. Радіаційно-стійкий монолітний активний піксельний модуль

3.2 Матеріал контактних доріжок -алюміній

3.3 Стійкість до зміни температури у межах $-50\dots+100^{\circ}\text{C}$ _____

3.4 Водопоглинання не більше 1% _____

4.

Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

__ 1. Огляд аналогів _____

__ 2. Розробка експериментального макету _____

__ 3. Методика експериментальних досліджень _____

__ 4 Проведення і опис експерименту. _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) _____ Презентація _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
	1. Огляд аналогів	15.11	
	2. Розробка експериментального макету	20.11	
	3. Методика експериментальних досліджень	22.11	
	4 Проведення і опис експерименту	25.11	
	5. Обробка результатів	30.11	
	6. Оформлення пояснювальної записки	6.12	

Дата видачі завдання _____ 20__ р.

Студент _____

(підпис)

Керівник роботи _____ Олександр ГАЛАТ

(підпис) (посада, ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка магістерської кваліфікаційної роботи містить 76 с., 19 рис., 17 табл., 40 джерел.

ПІКСЕЛЬ, ДЕТЕКТОР, MAPS, МОДУЛЬ, ПОЛІМІД, ALICE, pTAV

Об'єкт дослідження – монолітні активні піксельні детекторні модулі для вимірювання енергії елементарних частинок та їх координат у фізиці високих енергій.

Предмет дослідження – конструктивно-технологічні рішення детекторних модулів на основі MAPS.

Мета роботи – теоретичне та експериментальне дослідження конструктивно-технологічних рішень алюміній – поліімідних MAPS модулів для фізичних експериментів, які дозволять забезпечити суттєве зменшення відносної радіаційної довжини конструкції модулів до 0,1-0,2 % X_0 , просторового дозволу до 5 мкм.

Методи дослідження – фізико-топологічні моделі, статистичний аналіз одержаних результатів з використанням стандартних методик, положення теорії факторного експерименту та метод термоциклічних випробувань.

Практичне значення одержаних результатів:

- досліджено та удосконалено спосіб виготовлення лакофольгових алюміній – поліімідних гнучких шаруватих матеріалів;
- досліджено та оптимізовано процеси ультразвукового зварювання багатошарових гнучких комутаційних плат;
- розроблено, виготовлено та досліджено макет детекторного модуля.

Результати дослідження апробовані на виробничій базі ТОВ “Науково-виробниче підприємство “ЛТУ”.

ABSTRACT

The explanatory note of the master's qualification work contains 76 pages, 19 figures, 17 tables, 40 sources.

PIXEL, DETECTOR, MAPS, MODULE, POLYIMIDE, ALICE, pTAB

The object of this research is the monolithic active pixel detector modules for measuring the energy of the elementary particles and their coordinates in high-energy physics.

The subject of this research is in the development of the design and technological solutions of the detector modules based on MAPS sensors.

The purpose of the master's qualification work is the theoretical and experimental study of the design and technological solutions of the aluminum – polyimide MAPS modules for physical experiments, which can provide a significant reduction in the relative radiation length for the modules up to 0.1-0.2% X_0 , and the spatial resolution up to 5 microns.

The research methods used are physical and topological modelling, statistical analysis of the results by the standard methods, the provisions of the theory of the factorial experiment and the method of the thermocycle tests.

Practical significance of the obtained results includes:

- the method of manufacturing the aluminum foil – polyimide flexible layered materials has been improved;
- the processes of the ultrasonic welding of multilayer flexible switching boards have been investigated and optimized;
- the model of the detector module has been developed, made and studied.

The results of the study had been tested on the production base of LLC "Research and Production Enterprise" LTU ".

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП.....	9
1 СТАН РОЗВИТКУ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ДЕТЕКТОРНИХ СИСТЕМ.....	11
1.1 Основні переваги і сучасний стан розвитку технології MAPS.....	11
1.2 Технологічні рішення для детекторних систем у інших експериментах на LHC.....	12
1.2.1 Загальні вимоги до детекторної апаратури на прикладі експерименту ALICE.....	12
1.2.2 Гібридні активні піксельні сенсори.....	14
1.2.3 Монолітні активні піксельні сенсори.....	19
1.3 Використання COF-технології для покращення параметрів ВТС.....	21
1.4 Основні особливості CMOS MAPS технології.....	22
1.5 Висновки по результатам аналітичного огляду.....	24
2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА.....	27
2.1 Постановка задач досліджень.....	27
2.2 Вибір методу виконання електричних з'єднань.....	28
2.2.1 Лазерна пайка.....	29
2.2.2 Автоматизоване точечне ультразвукове зварювання.....	31
2.3 Удосконалення способу виготовлення гнучкого шаруватого матеріалу для плат на алюмінієвій фользі.....	34
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....	37
3.1 Вибір конструктивно-технологічних рішень макету односенсорного детекторного модуля з MAPS сенсором.....	37
3.1.1 Вихідні дані для розробки макету детекторного модуля з MAPS сенсором.....	39

3.1.2	Опис конструкції дослідного зразку макета детекторного модуля на основі MAPS.....	41
3.2	Виготовлення гнучкого шаруватого матеріалу на алюмінієвій фользі.....	43
3.2.1	Вдосконалення способу виготовлення матеріалу.....	43
3.2.2	Типовий процес виготовлення плат на матеріалі	49
3.3	Визначення оптимального режиму УЗ зварювання.....	51
3.3.1	Критерії якості зварного з'єднання.....	51
3.3.2	Повний факторний експеримент.....	52
4	ВИПРОБУВАННЯ ДОСЛІДНИХ ЗРАЗКІВ.....	57
4.1	Випробування дослідних зразків матеріалу.....	57
4.1.1	Перевірка на час розчинення лакового покриття у моноетиноламіні.....	57
4.1.2	Перевірка на міцність зчеплення лакової плівки з фольгою.....	59
4.1.3	Перевірка на поглинання вологи.....	62
4.2	Прискорені випробування на циклічний вплив температур макета детекторного модуля.....	63
	ВИСНОВКИ.....	71
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	73
	ДОДАТОК А.....	77
	ДОДАТОК В.....	78

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І
ТЕРМІНІВ

- ALICE (A Large Ion Collider Experiment) – (експеримент на великому іонному колайдері);
- BGA (Ball Grid Array) – масив кульок;
- COB (Chip-on-Board) – кристал на жорсткій платі;
- COF (Chip-on-Flex) – кристал на гнучкій платі;
- HAPS (Hybrid Active Pixel Sensors) – гібридні активні піксельні сенсори;
- ITS (Inner Tracking System) – ВТС (Внутрішня Трекова Система);
- LHC (Large Hadron Collider) – ВАК (Великий адронний колайдер);
- MAPS (Monolithic Active Pixel Sensors) – монолітні активні піксельні сенсори;
- pTAB (Single point Tape Automated Bonding) – автоматизоване кріплення кристалів на стрічковому носії;
- SDD (Silicon Drift Detector) – кремнієвий дрейфовий детектор;
- SPD (Silicon Pixel Detector) – кремнієвий піксельний детектор;
- SSD (Silicon Strip Detector) – кремнієвий мікростріповий детектор;
- ДМФА – діметилформамід;
- КМОН – компліментарна структура метал-окисел-напівпровідник;
- ПАК – поліамідокислота.

ВСТУП

Протягом останніх десятиріч в ядерну електроніку інтенсивно впроваджується мікроелектроніка [1,2], що дозволяє забезпечити відповідність вимогам ядерної електроніки, що зростають. У експериментальних дослідженнях у галузі фізики високих і надвисоких енергій широко використовуються багатоканальні детектори заряджених частинок і електроніка зчитування та обробки інформації на основі сучасних напівпровідникових пристроїв, які конструктивно виконані у вигляді типових модулів. У зв'язку з гігантським об'ємом інформації, що зчитується, необхідно вирішувати проблеми, пов'язані з обміном даними між різноманітними пристроями і блоками електроніки в умовах жорстких часових обмежень. Крім того, при сумісному функціонуванні великої кількості детекторних модулів доводиться вирішувати проблему забезпечення завадостійкості пристроїв, які входять до них, і зниження завад, що створюються пристроями. Ці задачі послідовно вирішуються на системотехнічному, схемотехнічному і конструктивно-технологічному рівні [3,4].

Напівпровідникові сенсори в детекторних системах використовуються у фізиці високих енергій вже більше п'ятдесяти років. Основним матеріалом для сенсорів є кремній, завдяки таким його якостям, як невелика ширина забороненої зони, висока рухомість носіїв заряду, достатньо великий час життя електронно-діркових пар, а також можливість роботи за кімнатної температури. Для розробки кремнієвих сенсорів і детекторних модулів на їх основі для фізики високих енергій, є дві обставини. По-перше, це планарна технологія, що дозволяє створювати на поверхні кремнію достатньо складні структури; по-друге, це поява мікромініатюрних інтегральних мікросхем, які стало можливо розміщувати у безпосередній близькості до сенсорів.

Інноваційні рішення піксельних матричних детекторних модулів, які базуються на новому поколінні кремнієвих піксельних сенсорів, можуть бути

використані для створення нових і модернізації існуючих детекторних систем для експериментів у фізиці високих енергій [5, 6].

Мета роботи – теоретичне та експериментальне дослідження конструктивно-технологічних рішень алюміній – поліімідних MAPS модулів для фізичних експериментів, які дозволять забезпечити суттєве зменшення відносної радіаційної довжини конструкції модулів до 0,1-0,2 % X_0 , просторового дозволу до 5 мкм.

1 СТАН РОЗВИТКУ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ДЕТЕКТОРНИХ СИСТЕМ

1.1 Основні переваги і сучасний стан розвитку технології MAPS

За функціональним принципом кремнієві сенсори можна розділити на три основних типи: мікροстріпові, дрейфові і піксельні. У мікροстріпових, як і у дрейфових сенсорах, чутливою коміркою є “стріп” – полоса шириною до сотні мікрометрів і довжиною до десятків сантиметрів (при з’єднанні стріпів декількох сенсорів у лінійку). У дрейфових і піксельних детекторах чутлива комірка має величини довжини і ширини однієї розмірності, від декількох міліметрів до десятків мікрометрів. Піксельні системи застосовують в умовах високого завантаження подій, що дозволяє знизити частоту подій в одній комірниці. Зворотнім боком цієї переваги є необхідність зчитування великої кількості каналів інформації. Піксельний сенсор визначає одразу дві координати. У мікροстріпових детекторах для цього застосовуються двосторонні сенсори або два сенсора, розташовані “спина до спини” так, аби їх стріпи могли перетинатись.

Висока рухомість носіїв у кремнії забезпечує швидке збирання утвореного заряду. Для типових мікροстріпових детекторів цей час становить близько 10 нс. Малий коефіцієнт дифузії дозволяє транспортувати заряд на значні відстані без істотних втрат у точності координатних вимірювань, що дозволило успішно реалізувати розробку і створення кремнієвих дрейфових детекторів [2]. Крім того, застосування типових детекторних модулів дозволяє вирішити задачі мінімізації маси матеріалу в об’ємі детектування, спрощення і підвищення продуктивності процесів збірки при збереженні високої щільності і високого ступеню надійності монтажу при створенні нового покоління гібридних мікрозбірок і з’єднувальних кабелів. Однак, не дивлячись на значні досягнення в області розробки гібридних мікрозбірок і детекторних модулів різноманітних типів на їх основі, можливості створення нових, більш

досконалих конструкцій і технологій їх створення з застосуванням багатошарових гнучко-жорстких плат і гнучких з'єднувальних шлейфів в детекторних модулях ще далеко не повністю реалізовані.

Вищезазначений висновок у повній мірі можна віднести і до сучасних піксельних детекторних модулів. У зв'язку з тим, що піксельні кремнієві сенсори визначають відразу дві координати події при великій роздільній здатності за рахунок малих розмірів пікселей (десятки мікрометрів), у наш час вони знаходять все більше застосування у детекторних системах в експериментах фізики високих енергій. Матричне розташування контактів забезпечує найбільшу щільність монтажу, максимальну кількість контактів на площі сенсору. Крім того, мінімальні перехідні ємності контактів піксельних сенсорів є кращими, порівняно з іншими типами сенсорів, що забезпечує працездатність при більш високих тактових частотах зовнішніх інформаційних магістралей, що є одним з найважливіших аспектів при збільшенні інформативності досліджень, і, відповідно, значному збільшенні кількості інформаційних потоків. Матрична система виводів робить можливим розміщення великої кількості міжз'єднань на обмеженій площі приймачів випромінювання [7-9].

1.2 Технологічні рішення для детекторних систем у інших експериментах на LHC

1.2.1 Загальні вимоги до детекторної апаратури на прикладі експерименту ALICE.

Загальними вимогами до детектувальної апаратури можуть бути зведені до визначення типу частки (ідентифікації) та її кінематичних характеристик (енергії, імпульсу, та ін.). Тип частки може бути відомим, і тоді задача спрощується. У багатьох експериментах, особливо у фізиці високих енергій, використовуються великогабаритні і складні комплекси, які складаються з великої кількості детекторів різних типів. Такі комплекси фіксують майже всі

частки, що виникають протягом експерименту, і дають достатньо повне уявлення щодо явища, що вивчається [10].

Основними характеристиками детектора є ефективність (вірогідність реєстрації частки при попаданні її на детектор), часова роздільна здатність (мінімальний час, протягом якого детектор фіксує дві частки, як окремі) і час відновлення (час, протягом якого детектор після реєстрації частки або взагалі втрачає здатність до реєстрації наступної частки, або суттєво погіршує свої характеристики). Якщо детектор визначає енергію частки і (або) її координати, то він характеризується також енергетичною роздільною здатністю (точністю визначення енергії частки) і просторовою роздільною здатністю (точністю визначення координати частки). [10]

Кремнієві піксельні модулі використовуються, зокрема, у ВТС (внутрішній трековій системі) експерименту ALICE на Великому адронному колайдері. Детектор ALICE (A Large Ion Collider Experiment) – один з чотирьох детекторів загального призначення на Великому адронному колайдері (LHC). Він оптимізований для вивчення зіткнень важких іонів, а його головне призначення – дослідження сильно взаємодіючої матерії і кварк-глюонної плазми за екстремальних значень щільності енергії і температури у ядро-ядерних зіткненнях, комплексне дослідження адронів, електронів, мюонів і фотонів, що утворюються при зіткненнях важких ядер (Pb-Pb), включаючи процеси з найвищою множинністю, які можливі на LHC. Також на ньому вивчається фізика зіткнень з більш легкими іонами. Загальний вигляд структури детекторного комплексу ALICE наведено на (рис. 1.1) [11].

Основною задачею внутрішньої трекової системи є локалізація первинної вершини (місця первинного розпаду часток у результаті зіткнення) з роздільною здатністю менше 100мкм, реконструкція вторинних вершин розпаду, трекінг часток з імпульсами менше 200MeV/c, покращення роздільної здатності за імпульсами і кутами для часток, реконструйованих час-проекційною камерою, реконструкція часток, що пройшли через мертві зони час-проекційної камери.

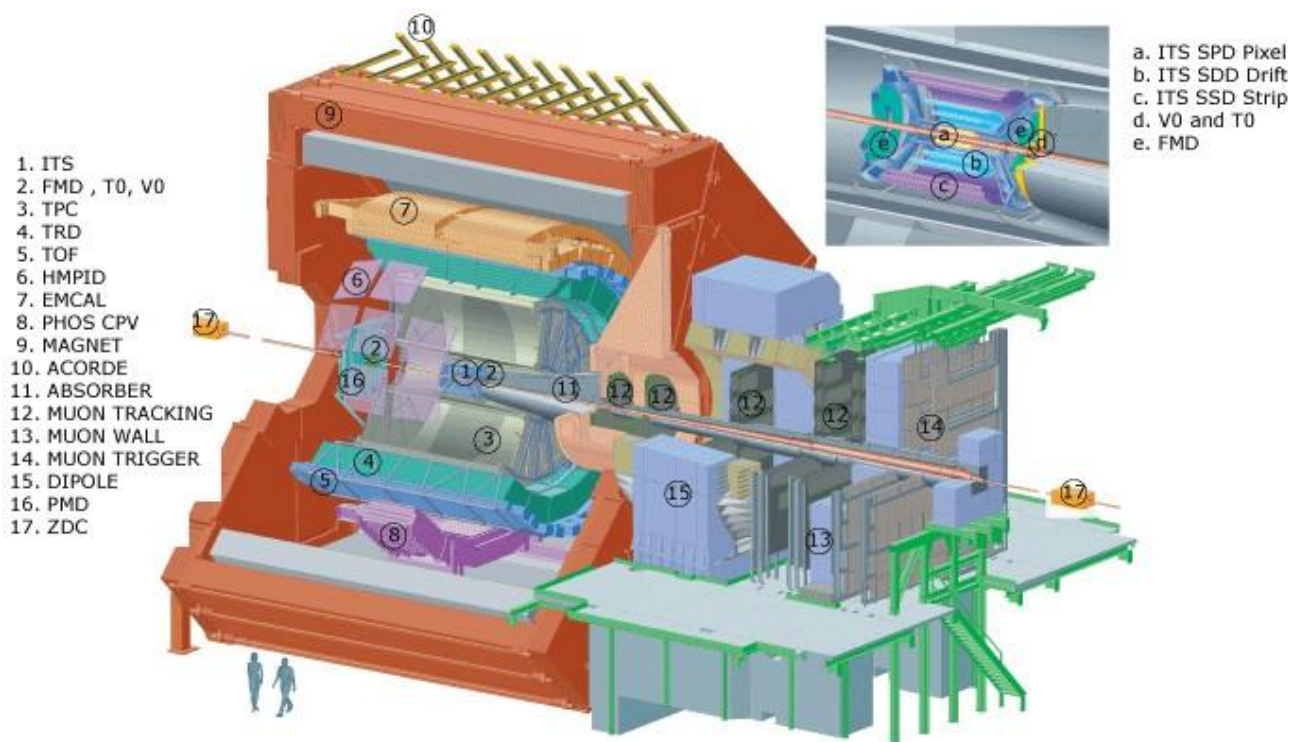


Рисунок 1.1 – Детекторний комплекс ALICE

Перша модифікація BTC складалася з 6 шарів кремнієвих детекторів, при чому два внутрішніх шари склали кремнієві піксельні детектори (SPD), наступні два шари – кремнієві дрейфові детектори(SDD), два зовнішні шари – кремнієві мікροстріпові детектори (SSD). Друга модифікація BTC вже мала 7 шарів кремнієвих детекторів [12], що дозволило значно покращити точність визначення треків часток системою.

1.2.2 Гібридні активні піксельні сенсори.

Матричні гібридні піксельні кремнієві сенсори (HAPS) вперше були застосовані в детекторній системі експерименту ATLAS на Великому Адронному Колайдері (англ. Large Hadron Collider, скор. LHC) у Європейському ядерному центрі CERN (Женева, Швейцарія). Вони були застосовані і в експериментах ALICE, LHCb і CMS, які також проводились на прискорювачі LHC [11].

В конструкції піксельних сенсорів було застосовано матричне розташування кулькових виводів типу BGA (англ. Ball grid array – масив кульок), яке забезпечило ряд очевидних переваг:

- мінімальна площа монтажного поля комутаційної плати;
- кращі умови забезпечення функціональної продуктивності електронних модулів за рахунок менших паразитних ефектів при швидкодіючих операціях;
- спрощення технології поверхневого монтажу на комутуючий елемент за рахунок використання процесів оплавлення припою при груповому нагріві;
- великий процент виходу придатних виробів готової продукції.

Для приєднання об'ємних кулькових виводів використовують розповсюджений і добре відомий метод пайки, однак, у даному випадку, монтаж сенсорів з такими выводами пов'язаний з суттєвими додатковими капіталовкладеннями в обладнання для забезпечення позиціювання виводів на платі і тестування якості паяних з'єднань, не доступних для візуалізації. При цьому постійно існує небезпека втрати якості з'єднань через важко контрольовані процеси пайки (рисунки 1.2, 1.3). Обмежена довжина виводів не забезпечує демпфування для компенсації неузгодженості температурних розширень матеріалів у міжз'єднаннях і не забезпечує необхідну для особливих умов стійкість до механічних впливів, які можуть деформувати підкладки. Через це перелік матеріалів для використання у таких конструкціях є дуже обмеженим і всі вони мають досить високу вартість. Тенденція до подальшого зменшення кроку виводів (менше ніж 1 мм) ще більше загострює цю проблему [8].

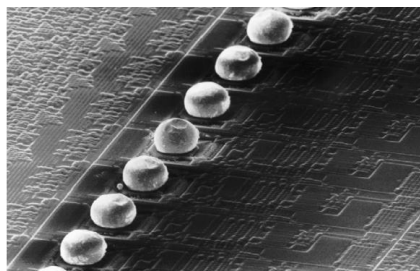


Рисунок 1.2 – Припойні кулькові виводи на мікросхемі Omega3 (експеримент ALICE) [11]

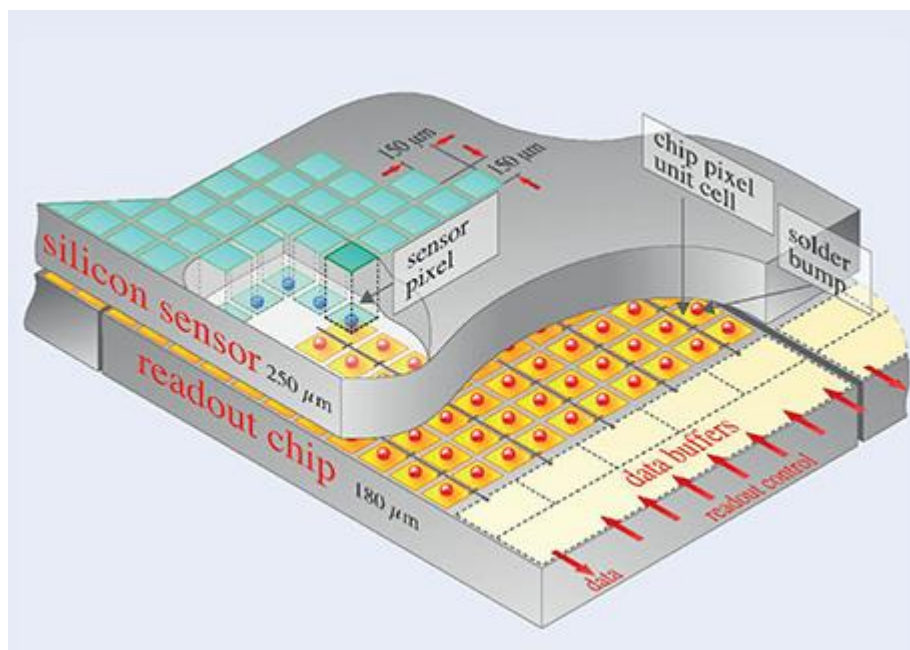


Рисунок 1.3 – Твердотілі гібридні піксельні детектори [13]

Альтернативною технологією для створення детекторних модулів є COF-технологія (англ. Chip-on-Flex – кристал на гнучкій платі). Застосування такої технології за допомогою процесів ультразвукового зварювання гнучких одно- і багатошарових плат дозволяє забезпечити демпфування для компенсації неузгодженості температурних розширень матеріалів у міжз'єднаннях між плоскими контактними площадками жорстких сенсорів і гнучкими платами у детекторних модулях. У цьому випадку немає необхідності застосування технології BGA або COB (англ. Chip-on-Board – кристал на жорсткій платі) – технології збірки. Крім того, суттєво спрощується процес виготовлення кремнієвих матричних сенсорів, оскільки немає необхідності у формуванні жорстких матричних об'ємних кулькових виводів на контактних площадках сенсорів і в лудженні контактних площадок на елементів комутації [11].

При безпосередньому монтажі кремнієвих піксельних матричних сенсорів на плату становить значний інтерес застосування у якості комутуючих елементів гнучких фольгованих діелектриків. Гнучкі друковані плати на їх основі – це різноманітні системи гнучких комутуючих елементів, які можуть містити одно-, дво- і багатошарові структури міжз'єднань. Їх конструкції

можуть бути повністю гнучкими або являти собою комбінацію жорстких і гнучких частин.

Застосування у конструкції детекторних модулів і в гібридних мікрозбірках гнучких плат і гнучких кабелів (шлейфів) на основі мідь-поліімідних фольгованих діелектриків дозволило у деякій мірі вирішити проблему мінімізації об'єму детекторних систем в експериментах фізики високих енергій [14]. Реалізувати можливість тривимірної компоновки детекторних модулів і забезпечити їх збірку без “мертвого простору” з високою енергетичною і просторовою роздільною здатністю. Однак застосування адгезованих чи неадгезованих фольгованих міддю поліімідних плівок не дозволило в повній мірі реалізувати переваги COF-технології при збірці детекторних модулів. Залишились невирішеними деякі проблеми, присутні традиційній COF-технології на основі мідь-поліімідних фольгованих діелектриків. Для забезпечення надійного безкорозійного з'єднання з алюмінієвими контактними площадками мікросхем і сенсорів необхідним є нанесення додаткових шарів нікелю і золота на мідні провідники гнучких плат і кабелів, що ускладнює і робить дорожчим процес формування гнучких комутуючих елементів. Крім того, формування за допомогою ультразвукового зварювання міжз'єднань гнучких кабелів з сенсорами і мікросхемами за допомогою алюмінієвого дроту обмежує можливість зменшення габаритних розмірів і об'єму детекторних модулів і потребує підвищеної точності і обережності при проведенні процесів збірки виробів, аби не допустити деформації алюмінієвих дровових міжз'єднань і закороток між ними [15].

З цієї точки зору найбільш оптимальним варіантом подальшого вдосконалення COF-технології збірки для пристроях ядерної електроніки є застосування безадгезивних алюміній-поліімідних лакофольгових діелектриків, тобто алюмінієвої COF-технології. Безадгезивні алюміній-поліімідні матеріали [16]. Однак, цілий ряд їх додаткових переваг у порівнянні з мідь-поліімідними фольгованими діелектриками дозволяє суттєво розширити можливості COF-технології на поточному етапі.

Основні переваги алюміній-поліімідних лакофольгових діелектриків:

- алюміній має високу корозійну стійкість;
- алюміній має радіаційну довжину, яка майже у 6 разів перевищує радіаційну довжину міді ($X_{0Al} \approx 8,9$ см, $X_{0Cu} \approx 1,43$ см);

- не дивлячись на те, що алюміній, порівняно з міддю має меншу механічну міцність ($\sigma_{pAl} = (10-40) \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$; $\sigma_{pCu} = (16-45) \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$), меншу теплопровідність ($\lambda_{TAl} = 218$ Вт/(м·К); $\lambda_{TCu} = 385$ Вт/(м·К)), питомий електричний опір приблизно у 1,6 разів більше за питомий електричний опір міді ($\rho_{Al} = 0,028$ мкОм·м; $\rho_{Cu} = 0,017$ мкОм·м), важливе значення має факт того, що алюміній майже у 3,5 рази легший за мідь ($\gamma_{Al} = 2,7$ г/см³, $\gamma_{Cu} = 8,92$ г/см³) і більш ніж у 2 рази дешевший;

- завдяки малій щільності алюмінію, забезпечується більше електрична провідність на одиницю маси (тобто, при однаковому номіналі опору і однаковій довжині, провідники з алюмінію є майже у два рази легшими за мідні, не дивлячись на те, що перші мають більший поперечний переріз).

Елементи для комутації на основі алюміній-поліімідних лакофольгових діелектриків дозволяють ще більше мінімізувати масу речовини в об'ємі детектування і розміри детекторних модулів, що є особливо перспективним для детекторних систем з високою щільністю каналів інформації. Алюмінієва СОФ-технологія збірки легко адаптується до існуючого промислового автоматизованого обладнання ультразвукового зварювання алюмінієвих плоских виводів. При цьому забезпечується висока якість і надійність зварних з'єднань завдяки тому, що зварюються однорідні матеріали (алюмінієві контактні площадки електронних компонентів і алюмінієві провідники елементів комутації). Крім того, елементи комутації на основі безадгезивних алюміній-поліімідних діелектриків дозволяють значно покращити ємнісні характеристики електронних пристроїв. Завдяки ще одній якості алюмінію – малій величині межі плинності ($\sigma_{0,2} = 2 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$) – є можливість у процесі ультразвукового зварювання здійснювати безпосереднє з'єднання плоских

алюмінієвих виводів з контактними площадками сенсорів через глибокі (до 100 мкм) “криниці” у поліїміді. Це забезпечує зменшення вихідних ємностей сенсорів від 5 до 7 разів, що значно підвищує чуттєвість і роздільну здатність детекторних систем [16].

1.2.3 Монолітні активні піксельні сенсори.

Сенсори елементарних часток, пов’язані з первинною електронікою зчитування і обробки інформації, які використовуються для детекторних систем виявлення і відстеження подій в експериментах в області фізики елементарних часток, мають дуже жорсткі вимоги в плані інтеграції, товщини матеріалу, швидкості зчитування, споживання енергії і радіаційної стійкості. Розробка сенсорів на основі кремнієвої напівпровідникової технології і електроніки зчитування на основі КМОН-технології, а саме спеціалізованих інтегральних мікросхем (ASIC), у 1980-х роках призвела до революції у створенні таких систем детектування. Кремнієві мікостріпові і піксельні сенсори є серцевиною більшості детекторних систем стеження, які використовуються у фізиці елементарних часток у наш час. Проте, існують можливості подальшого вдосконалення цієї технології [12].

Мабуть найбільш суттєвим у детекторних системах є організація інтерфейсу між сенсором і електронікою зчитування, оскільки вони, як правило, є окремими компонентами, пов’язаними між собою. Наприклад, піксельні кремнієві детектори, що використовуються у внутрішніх шарах детекторних систем експериментів ATLAS, CMS, LHCb та ALICE на LHC, складаються з кремнієвих піксельних детекторів, які змонтовані за допомогою кулькових виводів на кристалах КМОН електроніки зчитування [11].

Ця технологія може бути вдосконалена методом потоншення, як сенсора, так і мікросхеми зчитування (ASIC), а також за рахунок зменшення кроку комутуючих кульок, наскільки це можливо. Але при такому підході існують технічні і технологічні обмеження, зокрема, крок комутуючих кулькових

виводів не можу бути настільки малим, наскільки це необхідно для сучасних детекторів. Щоб вийти за межі цих обмежень і створити систему детектування, наприклад, вищого ступеню інтеграції і мінімальної товщини матеріалу, необхідним був розвиток нових методів і технологій.

Оптимальним способом досягнення цієї мети є інтеграція сенсора і електроніки зчитування і обробки для створення єдиного монолітного кремнієвого пристрою виявлення. Такий підхід було прийнято і успішно реалізовано при створенні КМОН монолітних активних піксельних сенсорів (англ. CMOS Monolithic Active Pixels Sensors, MAPS). За останні 15 років у світі були проведені широкомасштабні дослідження і розробки для створення MAPS приладів. Це дозволило суттєво підняти рівень технології створення таких монолітних приладів і зробити можливим їх застосування у детекторних системах фізики елементарних часток. Прикладами практичної реалізації і досягнень у створенні вищезазначених напівпровідникових приладів є MAPS типу MIMOSA (рисунок 1.4 (а)), MISTRAL (рисунок 1.4(б)), ALPIDE (рисунок 1.4(в)) і MuPix (рисунок 1.4(г)).

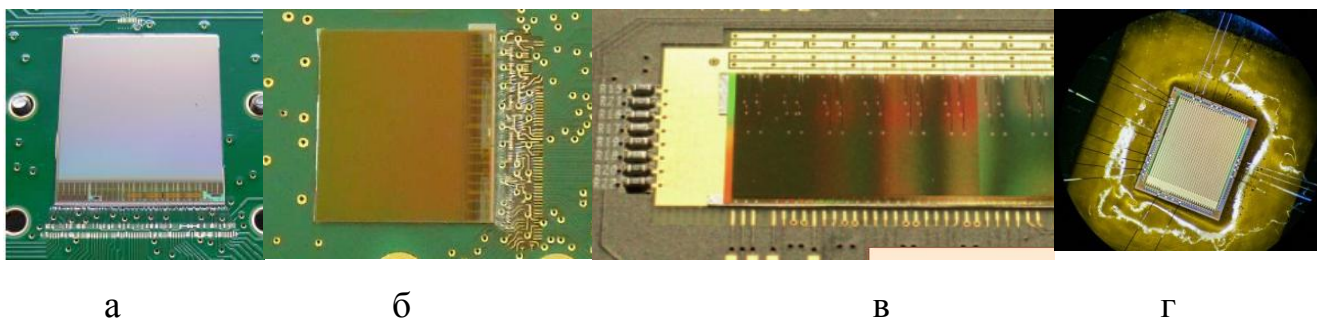


Рисунок 1.4 – Прототипи MAPS приладів

MAPS типу ALPIDE, виконані за радіаційно стійкою 0,18 мкм технологією компанії TowerJazz, були обрані у якості основних чутливих елементів для всіх піксельних шарів внутрішньої трекової системи нового експерименту ALICE [12]. Даний напівпровідниковий прилад являє собою кремнієвий чіп площею $(15 \times 30) \text{ мм}^2$. В ньому сформовано кремнієвий високоомний епітаксійний шар (активний сенсорний об'єм), матрицю діодів

(пікселів) для збору заряду з кроком близько 30 мкм, і електроніку, що виконує підсилення, оцифровку і відокремлення корисного сигналу на фоні шумів. При цьому зчитується інформація про проходженні частинок крізь пікселі (рисунок 1.5).

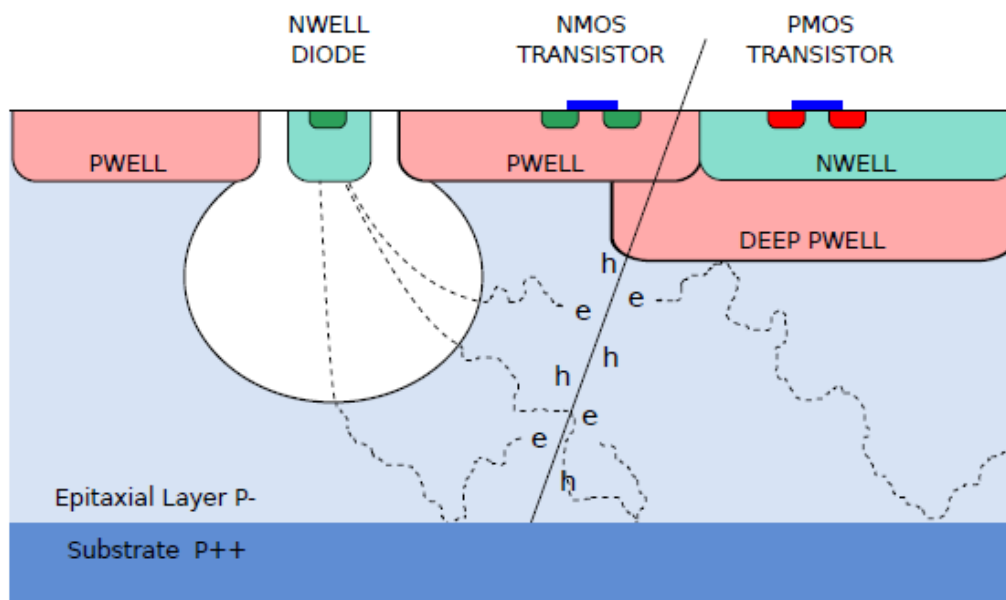


Рисунок 1.5 – Схема поперечного перерізу MAPS сенсора

1.3 Використання COF-технології для покращення параметрів BTC

Інноваційна алюмінієва COF-технологія збірки піксельних матричних детекторних модулів на основі нового покоління кремнієвих піксельних сенсорів може бути з успіхом застосована для модернізації вже існуючого міжнародного експерименту ALICE на LHC в CERN [17]. Основною задачею нового експерименту ALICE є вивчення властивостей матерії, зокрема, кварк-глюонної плазми. При цьому головною чутливою областю детекторної системи в експерименті ALICE є внутрішня трекова система (BTC), яка складається з детекторних модулів, розташованих навколо точки взаємодії частинок. Покращення показників BTC, що модернізується, порівняно з існуючими у теперішній час передбачено за рахунок реалізації наступних основних підходів:

- 1) покращення параметрів системи за рахунок:
 - наближення детекторних модулів до точки взаємодії частинок (внутрішній шар) до 23 мм замість 39 мм;
 - зменшення співвідношення радіаційної довжини X/X_0 для внутрішніх шарів з 1,14% до 0,3%;
 - зменшення розміру пікселя з (50x425) мкм до (30x30) мкм;
- 2) підвищення ефективності відстежування траєкторії частинок за рахунок:
 - збільшення кількості шарів у детекторних модулях з 6-ти до 7-ми шарів;
 - заміна дрейфових і мікροстріпових кремнієвих сенсорів на піксельні сенсори;
- 3) підвищення швидкості зчитування і обробки інформації при взаємодії частинок з 1 кГц до більш ніж 100 кГц.

З вищеназваних шляхів вдосконалення експерименту найбільш важливими і тими, що визначають технічний результат, є зменшення радіаційної довжини X/X_0 майже у 4 рази і зменшення площі пікселя більш ніж у 20 разів (і, відповідно, збільшення кількості пікселів на одиницю площі чутливого елемента).

Таким чином, одним з основних умов, котрі, перед усім, дозволять здійснити вищевказані покращення детекторної системи в експерименті ALICE і є застосування надсучасних інтегрованих кремнієвих піксельних сенсорів, а також використання переваг алюмінієвої COF-технології збірки.

1.4 Основні особливості CMOS MAPS технології

Завдяки тому, що норма проектування сучасних КМОН мікросхем складає 0,18 мкм, а товщина підзатворного окислу у МОН приладах – менш ніж 4 нм, очікується, що нові КМОН структури дозволяють підвищити радіаційну стійкість мікросхем. Відповідно, підвищуються їх надійність і стійкість до

загальної поглиненої дози (випромінювання) у порівнянні з іншими КМОН технологіями. Наприклад, для норми проектування 0,35 мкм, що до теперішнього часу є базовою технологією для виробництва КМОН сенсорів для досліджень в області елементарних частинок.

Малі розміри транзисторів і велика кількість шарів металізації (до шести) дозволяють реалізувати високий ступінь інтеграції і низьку потужність цифрових схем. Це важливо, оскільки більша частина цифрових схем (наприклад, схеми пам'яті) має бути розташована на периферії піксельної матриці і їх площа повинна бути зведена до мінімуму, аби зменшити розміри нечутливої частини сенсора настільки, наскільки це можливо.

Мікросхеми виготовляють на пластинах з епітаксійним шаром товщиною до 40 мкм і з питомим опором від 1 кОм·см до 6 кОм·см. За такого опору тонкі епітаксійні шари можуть бути повністю збіднені при подачі невисокої зворотної напруги зміщення. Це забезпечує вище відношення сигнал/шум і високі опори областей, які не підпадають під дію іонізуючого випромінювання.

Доступ до найсучасніших технологій формування топології мікросхем, що забезпечують задані норми проектування, дозволяє виготовлення якісних піксельних сенсорів на кремнієвих пластинах діаметром до 200-250 мм. Внаслідок цього різниця чутливостей між сусідніми чіпами на пластині є мінімальною, що полегшує підбір сенсорів для детекторної системи.

Наявність глибокого р-карману з покращеними властивостями дозволяє виготовляти піксельні структури із значно ширшими функціональними можливостями. Це є унікальною особливістю даної технології і є ключовими рішенням для створення малопотужної архітектури зчитування інформації. Глибокий р-карман в області структур польових транзисторів дозволяє зменшити ємність чутливих електродів і, відповідно, знизити споживання електроенергії в електроніці зчитування і обробки сигналів. n-область, розташована у р-канальному МОН-транзисторі, формується над глибоким р-карманом. Електрони, створені часткою при проходженні через сенсор, відбиваються від р-n переходу між епітаксійною областю та областю глибокого

p-карману і збираються чутливою областю діода. Величина зібраного заряду потім перетворюється (зчитується) для оцінки ефективності детектування і оцінки співвідношення сигнал/шум за допомогою КМОН-комірки, введеної у піксель.

Щоб мінімізувати матеріалоємність внутрішньої трекової системи, інтегрований піксельний матричний сенсор повинен бути якомога тоншим. Його мінімальна товщина визначається товщиною епітаксійного шару (номінальна товщина – 18 мкм) плюс товщина шарів КМОН структури (близько 10 мкм). Виготовлення такого сенсору виконується шляхом потоншення базової товщини кремнієвої пластини з тильного боку до необхідної безпечної товщини, яка складає близько 50 мкм [12].

1.5 Висновки по результатам аналітичного огляду

У результаті проведеного аналітичного огляду стану розвитку сучасних матричних піксельних детекторних технологій було проведено порівняльну оцінку основних показників і відмінностей різних процесів збірки матричних піксельних детекторних модулів (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Порівняльна оцінка основних параметрів піксельних детекторних модулів для різних типів сенсорів і технологій їх збірки

№ з/п	Основні параметри піксельних модулів і особливості технології збірки	Од. вим.	Тип технології збірки		
			BGA-технологія збірки	Частково алюмінієва СОФ-технологія Збірки з дротом	Повністю алюмінієва СОФ-технологія збірки з плоскими выводами (очікуваний результат)
1	2	3	4	5	6
1	Тип піксельного сенсора	-	HAPS	MAPS	MAPS
2	Товщина сенсора	мкм	490	50-100	50-100
3	Зниження матеріалоємності	разів	-	5-8	5-10

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6
4	Розміри пікселя	мкм	425 x 50	28 x 28	28 x 28
5	Матеріал комутаційної плати модуля	-	Фольгований міддю поліїмід	Фольгований міддю поліїмід	Фольгований алюмінієм поліїмід
6	З'єднання між елементами	-	Кульки Ag-Sn	Алюмінієвий дріт	Алюмінієві пласкі виводи
7	Спосіб з'єднання виводів елементів	-	Пайка	Ультразвукове зварювання	Ультразвукове зварювання
8	Радіаційна довжина металевих шарів комутаційної плати	см	Мідь $\approx 1,43$	Мідь $\approx 1,43$	Алюміній $\approx 8,9$
9	Просторова роздільна здатність модуля	мкм	10-15	5-10	5-10
10	Питома радіаційна довжина модуля	% X_0	1,14	0,3	0,1-0,2
11	Зниження трудомісткості виготовлення модуля	%	-	20	40

З аналізу даних у таблиці 1.1, можна зробити висновок, що конструктивно-технологічні, фізико-технічні параметри та надійність піксельних багатосенсорних модулів, виготовлених з застосуванням процесів ультразвукового зварювання і алюмінієвої COF-технології збірки, мають суттєві переваги, при чому не тільки перед піксельними детекторними модулями, виготовленими з застосуванням технології BGA, а і перед COF-технологією збірки з алюмінієвим дротом та з застосуванням традиційних мідь-поліїмідних плат комутації.

В ООВ “Науково-виробниче підприємство “ЛТУ”” вперше в Україні розроблено, впроваджено і опановано виробництво нових типів шаруватих матеріалів для гнучких і гнучко-жорстких алюміній-поліїмідних безадгезійних багатошарових друкованих плат із зменшеною вартістю у порівнянні зі світовими аналогами [11, 13]. На основі цих матеріалів розроблені і впроваджені у виробництво технології виготовлення друкованих

багатошарових друкованих кабелів електроживлення і багатошарових плат комутації для детекторних модулів.

Інноваційні повністю алюмінієві MAPS піксельні детекторні модулі на чіпах ALPIDE 4 дозволять забезпечити рекордні для напівпровідникових детекторів показники: питому радіаційну довжину MAPS модулів не більше ніж $0,1-0,2 \% X_0$, просторову роздільну здатність до 5-10 мкм при мінімально можливій масі, суттєве зменшення електроспоживання і трудомісткості виготовлення модулів.

2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

2.1 Постановка задач досліджень

Виходячи з викладеної у попередньому розділі інформації, сформульовано наступні задачі проведення теоретичних і експериментальних досліджень у магістерській атестаційній роботі:

- розробка конструктивно-технологічних рішень створення прототипу односенсорного детекторного модуля з функціональним матричним MAPS сенсором ALPIDE 4;

- розробка способу виготовлення гнучкого шаруватого матеріалу для плат і кабелів на алюмінієвій фользі товщиною 14 мкм;

- розробка технологічних схем виготовлення односенсорного MAPS модуля і його компонентів на основі алюмінієвої COF-технології збірки;

- відпрацювання, дослідження і оптимізація технологічних режимів збірки компонентів односенсорного модуля, у тому числі відпрацювання режимів зварювання;

- виготовлення і дослідження гнучкого шаруватого матеріалу на алюмінієвій фользі товщиною 14 мкм для чіп-кабелів MAPS сенсорів;

- виготовлення і дослідження макету односенсорного модуля і його компонентів.

Основною метою роботи є розробка принципів створення односенсорних MAPS модулів і конструктивно-технологічних рішень їх компонентів на основі алюмінієвої COF-технології збірки для детекторних систем у фізичних експериментах.

Зниження матеріалоємності і маси детекторних шарів внутрішньої трекової системи (ВТС) детекторів є особливо важливим для покращення роздільної здатності для візуалізації подій зіткнення елементарних часток з поверхнею чутливих елементів. В цілому, зниження загальної кількості

матеріалу дозволяє суттєво покращити відстежування треків досліджуваних часток і його роздільну здатність.

2.2 Вибір методу виконання електричних з'єднань

При розробці високотехнологічних виробів, якими є детекторні модулі, важливим фактором є вибір оптимального метода створення електричних між'єднань для забезпечення відповідності достатньо жорстким вимогам і гарантії високої довготривалої надійності.

Порівняльну характеристику параметрів електричних виробів із з'єднаннями, виконаними різними методами, наведено у таблиці 2.1 [18 19, 20].

Паяні електричні з'єднання знайшли найширше застосування завдяки таким властивостям, як низький і стабільний електричний опір, широка номенклатура металів, що з'єднуються, простота автоматизації, контролю та ремонту. Недоліки паяних з'єднань пов'язані з високою вартістю кольорових металів, що використовуються, необхідністю видалення залишків флюса, низькою термостійкістю.

Зварювальні електричні з'єднання у порівнянні з паяними з'єднаннями мають наступні переваги: більш висока механічна міцність, відсутність присадочного матеріалу, менша контактна площа. До недоліків зварювальних з'єднань слід віднести: критичність вибору комбінації матеріалів, збільшення перехідного опору через утворення інтерметалідів, складність групового з'єднання і ремонту.

Таблиця 2.1 – Параметри електричних з'єднань

Вид з'єднання	Перехідний опір $R_{\text{пер}}$, мОм	Міцність P , МПа	Інтенсивність відмов $1 \cdot 10^{-9}$, ч ⁻¹	Тепловий опір $R_{\text{т}}$, °С/Вт
Зварювання	0,01—1	100—500	0,1—3,0	0,001
Накрутка	1—2	60—80	0,2—0,5	0,0005
Пайка	2—5	40—50	1—10	0,002
Обтискання	1—10	20—50	2—5	0,001
Струмопровідний клей	(1—10) Ом·м	5—10	50	5,0

Беручи до уваги вимоги і особливості конструктивно-технологічних рішень жорстко-гнучких піксельних детекторних модулів, для модернізації BTC експерименту ALICE було обрано два метода створення електричних між'єднань: лазерна пайка і точечне ультразвукове зварювання. Такий вибір пояснюється тим, що всі з'єднувальні площадки MAPS сенсора розташовані з одного боку на верхній його поверхні (рисунок 1.4(в)).

2.2.1 Лазерна пайка.

Як було вказано вище, одним з можливих методів створення електричних між'єднань в детекторних модулях вибрано метод лазерної пайки. Контактні площадки на піксельному сенсорі для з'єднань лазерною пайкою виготовляються з алюмінію, потім на них осаджують шари Ni/Au для подальшого спаювання Sn/Ag кульок. Лазерна пайка має промислове застосування і може бути використана для з'єднання контактних площадок монолітних піксельних сенсорів з металевими шарами гнучких комутаційних плат через наскрізні отвори у шарах поліїмиду за допомогою паяльних кульок. Кульки розплавляють локально лазерним випромінюванням, як схематично зображено на рисунку 2.1. Це дозволяє зменшити теплові перенавантаження структур детекторних модулів, оскільки тепло виділяється у малій області, обмеженій розмірами контактних площадок. При цьому, як показали дослідження даної технології, при паянні тонких (50 мкм) напівпровідникових приладів можливе виникнення локального перегрівання приладів у місцях пайки, що призводить до появи тріщин та інших пошкоджень кремнієвих приладів.

Однією з ключових особливостей лазерної пайки є необхідність дуже ретельного контролю процесу нагріву області пайки. Розміри плями лазерного променя мають бути оптимізовані з розмірами паяльних кульок (сотні мкм), а область нагрівання має мати ту ж розмірність, що і розміри отворів у гнучких платах.

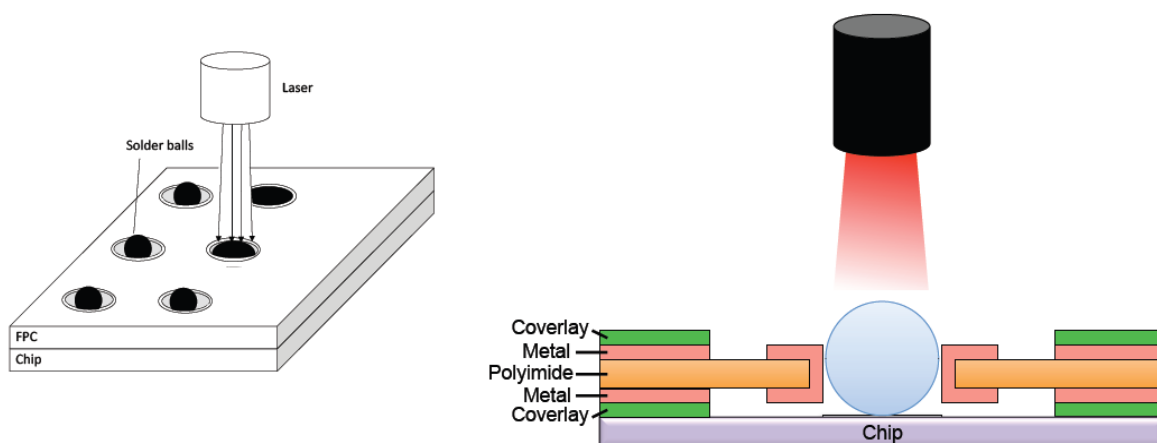


Рисунок 2.1 – Схема лазерної пайки [19]

Лазерна пайка потребує високої точності виготовлення технологічної оснастки, необхідної для позиціонування і розміщення мікрокульок припою.

Не дивлячись на очевидні переваги лазерної пайки, вона має суттєві недоліки. Основні недоліки лазерної пайки це:

- потреба у використанні обладнання високої точності для пайки (необхідна точність позиціонування лазера – одиниці мікрон);
- необхідність забезпечення високої площинності положення гнучкої плати відносно напівпровідникового приладу (сенсора) і повторюваності зазору між ними (що складно виконати при збірці багатосенсорних модулів);
- наявність теплового впливу безпосередньо на напівпровідниковий прилад, з врахуванням товщини MAPS близько 50 мкм може призвести до механічних пошкоджень останнього;
- потреба у високій точності виготовлення як плати, так і отворів для розташування кульок припою, щоб виключити часткове оплавлення припою або прожиг сенсора;
- відсутність можливості візуального контролю якості паяних з'єднань;
- висока складність якісного проведення ремонтних робіт.

2.2.2 Автоматизоване точечне ультразвукове зварювання.

Альтернативною технологією, що не має недоліків лазерної пайки, є автоматизована технологія з'єднань алюмінієвих плоских стрічкових виводів гнучких комутаційних плат з контактними площадками кремнієвих піксельних сенсорів за допомогою точечного ультразвукового зварювання. Ця технологія отримала назву SpTAB (Single point Tape Automated Bonding) і за своєю суттю є алюмінієвою COF-технологією збірки. Цю технологію було успішно застосовано для створення мікростріпових і дрейфових детекторних модулів для внутрішньої трекової системи експерименту ALICE [21]. Основними особливостями даного методу є застосування безадгезивних лакофольгових алюміній-поліімідних діелектриків і SpTAB технології приєднання алюмінієвих виводів до контактних площадок напівпровідникових приладів (сенсори, мікросхеми обробки). Схематично основні варіанти реалізації з'єднань багатошарової плати (верхнього і нижнього шарів) до напівпровідникового приладу і з'єднання між шарами всередині плати наведені на рисунку 2.2.

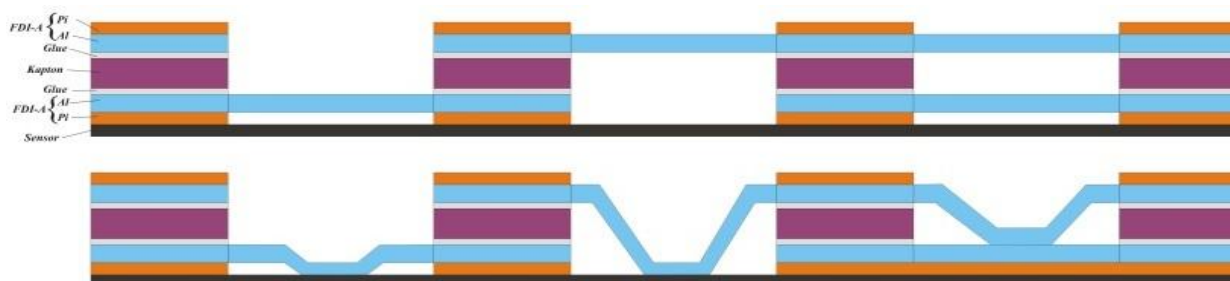


Рисунок 2.2 – Види з'єднання багатошарової плати до напівпровідникового приладу і з'єднання між шарами всередині плати: приєднання нижнього шару до приладу (зліва), приєднання верхнього шару до приладу, міжшарове з'єднання (справа) [19]

Вибір вищеназваної технології має суттєві переваги, основними з яких є:

- ультразвукове зварювання алюмінієвих виводів гнучких комутаційних плат до алюмінієвих контактних площадок піксельних чипів забезпечує однорідність, високу надійність і механічно міцне з'єднання;

- відсутність важких металів (Au, Sn), присутніх при паянні;
- відсутність необхідності обслуговування контактних площадок напівпровідникових приладів, що дозволяє зменшити витрати на виготовлення цих приладів;
- використання цієї технології для безпосереднього з'єднання шарів багатошарових гнучких комутаційних плат між собою і з контактними площадками піксельних чипів;
- можливість використання стандартного промислового автоматизованого обладнання для основних процесів збірки (зварювання, приклейка і інкапсуляція).

У таблиці 2.2 наведено порівняння основних особливостей технологій лазерної пайки і ультразвукового зварювання для застосування в детекторних піксельних модулях для вдосконалення експерименту ALICE.

Таблиця 2.2 – Основні особливості технологій лазерної пайки і ультразвукового зварювання

Лазерна пайка	УЗ зварювання
1	2
На піксельний сенсор з Al контактами, вкритими Ni-Au, за допомогою кульок припою Sn-Ag діаметром 200 мкм, встановлюється гнучка плата з двостороннього фольгованого міддю полііміда. Отвір під пайку у гнучкій платі має покриття Ni-Au	До Al-контактів піксельного чіпа приварюються пласкі виводи багатошарової гнучкої плати з фольгованого алюмінієм полііміда
Товщина Cu – 18 мкм, Ni – ~ 8 мкм; Au – одиниці нм	Товщина Al – 30 мкм
Питомий електричний опір припою Sn-Ag, Ом•см $\sim 13,1 \cdot 10^{-6}$	Питомий електричний опір алюмінію, Ом•см $\sim 4,3 \cdot 10^{-6}$
Радіаційна довжина міді, см $X_{0Cu} \sim 1,43$	Радіаційна довжина алюмінію, см $X_{0Al} \sim 8,9$
Час створення одного паяного контакту, с ~ 12	Час створення одного звареного контакту, с ~ 1
Високотемпературний вплив лазера на точки пайки (локальне нагрівання місця пайки)	Відсутність теплового впливу на піксельний чіп
Відсутність механічної дії на піксельний чіп	Наявність механічної дії на піксельний чіп при проведенні УЗ зварювання виводів плати з контактами чіпа
Відсутність можливості візуального контролю суміщення плати і мікросхеми в процесі пайки	Можливість візуального контролю суміщення плати і мікросхеми в процесі зварювання

Продовження таблиці 2.2

1	2
Складна система суміщення, установки кульок припою і їх фіксації. Потреба у спеціальному обладнанні для тестування якості паяних з'єднань, недоступних для візуалізації	Процеси УЗ зварювання адаптовані для застосування промислових автоматизованих зварювальних установок типів FK Delvotec-6400, Kulicke&Soffa 8090 та ін.
Висока вартість та трудомісткість збірки піксельних модулів	Відносно низька вартість та трудомісткість збірки піксельних модулів
Постійна небезпека втрати якості паяних з'єднань. Немає 100% гарантії якості сплавлення контактних площадок сенсора і плати	Можливість швидкого ремонту зварних з'єднань без погіршення контактних характеристик в процесі виготовлення піксельного модуля
У паяних з'єднаннях не забезпечується стійкість до механічних і термоциклічних впливів через різні КТЛР (коефіцієнти теплового розширення) матеріалів, що використовуються	У зварних з'єднаннях забезпечується висока стійкість до механічних і термоциклічних впливів. (У однородному зварному з'єднанні відсутня неузгодженість КТЛР матеріалів, що використовуються)

З аналізу особливостей технології лазерної пайки і ультразвукового зварювання (таблиця 2.2) можна зробити висновок, що конструктивно-технологічні, фізико-технічні параметри і параметри надійності піксельних детекторних модулів, виготовлених із застосуванням процесів ультразвукового зварювання, мають ряд переваг перед піксельними детекторними модулями, виготовленими із застосуванням процесів лазерної пайки. Особливо це стосується радіаційної довжини детекторних модулів на гнучких багатошарових платах з алюмінієвої фольги, котра має у 6 разів більшу радіаційну довжину за мідну фольгу, їх високої стійкості до механічних і термоциклічних впливів, продуктивності процесу збірки, а також більш високої електропровідності зварених з'єднань у порівнянні з паяними з'єднаннями із застосуванням Sn-Ag.

2.3 Удосконалення способу виготовлення гнучкого шаруватого матеріалу для плат на алюмінієвій фользі

У теперішній час актуальною є проблема створення гнучких фольгованих шаруватих матеріалів, які були б дешевими, мали широку номенклатуру і могли

б бути технологічно швидко виготовлені. Це пов'язано з тим, що існуючі гнучкі фольговані шаруваті матеріали, які використовуються для виготовлення друкованих плат і шлейфів, передбачають їх виготовлення через застосування трудомісткої і довготривалої у плані часу технології високої вартості разом з складним для обслуговування спеціалізованим обладнанням.

З попереднього рівня техніки є відомим гнучкий шаруватий матеріал, описаний у роботі [22]. У патенті описано спосіб отримання рулонного фольгованого поліїміду з товщиною мідного шару $5 \pm^3_1$ мкм з високою міцністю зчеплення міді і поліїміду. При цьому на мідну плівку було нанесено клейку речовину, плівку з клейкою речовиною нагрівали і ламінували принаймні з одного боку мідної фольги методом їх сумісного пресування. Нагрів поліїмідної плівки з клейкою речовиною проводився у чотири стадії: на першій за температури $35 \pm 5^\circ\text{C}$, на другій – за $45 \pm 5^\circ\text{C}$, на третій і четвертій – за $55 \pm 5^\circ\text{C}$ за швидкості протягування 4-6 м/хв. Далі поверхні поліїмідної плівки з клейкою речовиною і мідної фольги, які з'єднували, обробляли важкими прискореними іонами аргона, а потім проводили ламінування поліїмідної плівки мідною фольгою товщиною $5 \pm^3_1$ мкм з їх попереднім нагріванням до $120 \pm 5^\circ\text{C}$.

Недоліком вищевказаного технічного рішення є значна залежність якості рулонного шаруватого матеріалу від швидкості протягування поліїміду. При малих і високих швидкостях протягування властивості адгезива погіршуються. Ще одним суттєвим недоліком є висока складність спеціалізованого обладнання для виготовлення шаруватого фольгованого поліїміда, який потребує застосування пресового і вакуумного обладнання. Такий спосіб отримання рулонного фольгованого міддю поліїміду не має можливості виготовлення шаруватого матеріалу з різними товщинами шарів фольги та поліїміду та з застосуванням різних матеріалів фольг для різних функціональних застосувань друкованих плат. При цьому, через наявність адгезивного шару, такий шаруватий матеріал не може працювати у діапазоні температур від -200°C до $+250^\circ\text{C}$.

Ще одним відомим технічним рішенням є спосіб, що описано у роботі [23]. Сутність способу в тому, що на поверхні металевої фольги формується шар поліїмідного покриття. Спочатку проводять очищення і знежирення металевої фольги і наносять на металічну фольгу поліїмідний лак товщиною від 5 до 150 мкм. Потім виконують його попереднє підсушування за температури від 40 до 100 °С.

При цьому прикладають натягувальну силу шляхом намотки металічної фольги з нанесеним поліїмідним покриттям сумісно з прокладочною полімерною стрічкою корекса товщиною від 100 до 400 мкм за температури від 120 до 230°С до ступеню полімеризації поліїмідного покриття 60-70%. Заключна сушка виконується за температури від 295 до 350°С до заданого ступеня полімеризації поліїмідного покриття 95-100%, потім проводиться охолодження. Недоліком даного технологічного рішення є висока складність спеціалізованого обладнання для виготовлення гнучкого лакофольгового матеріалу. Також даний спосіб не має можливості виготовлення шаруватого матеріалу тільки у необхідних для конкретного виробу товщинах шарів поліїмідну і фольги. Технологічний процес є довгочасним і має високу вартість.

Задачею пропонованого у даній роботі технічного рішення є створення такого способу виготовлення гнучкого лакофольгового шаруватого алюміній-поліїмідного матеріалу, який забезпечить використання простішої, маловитратної і відтворюваної технології виготовлення шаруватих матеріалів з необхідною товщиною (24 мкм, де товщина алюмінієвого шару – 14 мкм, ширина поліїмідного шару – 10 мкм), які працюють у діапазоні температур від -200°С до +250°С. При цьому бажано виключити використання складного в експлуатації спеціалізованого обладнання високої вартості, у тому числі вакуумного і пресового обладнання.

Поставлену задачу може бути вирішено відповідно з патентом компанії ООВ “НВП “ЛТУ”” [24] за рахунок того, що на алюмінієву фольгу після очищення за допомогою аплікатора буде наносити поліїмідний лак з одночасним прикладенням натягувальної сили перед сушкою і

дегідроклізацією лакового поліїмідного покриття з наступною сушкою з плавним підвищенням температури із швидкістю 2,5–5,0 °С на хвилину від кімнатної і до $(90\pm 10)^\circ\text{C}$ і з витримкою за цієї температури протягом 25 ± 5 хвилин і наступною дегідроклізацією лакового поліїмідного покриття з плавним підвищенням температури із швидкістю 2,5–5,0 °С на хвилину до 300–350 °С і витримкою за цієї температури протягом 30–40 хвилин.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

В процесі виконання експериментальної частини роботи були виконані наступні етапи:

- вибрані КТР макета односенсорного детекторного модуля;
- відпрацьовано режими виготовлення нучкого шаруватого матеріалу для плат на алюмінієвій фользі;
- вибрано оптимальні режими УЗ зварювання за допомогою повного факторного експерименту.

3.1 Вибір конструктивно-технологічних рішень макету односенсорного детекторного модуля з MAPS сенсором

Найважливішим фізичним параметром детекторних систем, що обмежує їх просторову роздільну здатність, є загальна вага базових комірок – детекторних модулів. Основні вимоги при створенні детекторних модулів – забезпечення високої модульності, мінімізація радіаційної довжини усіх складових частин конструкції, що знаходяться у робочому об'ємі на шляху часток, при забезпеченні необхідних характеристик та активному відведенні тепла від електроніки зчитування. Важливою проблемою при розробці детекторних модулів є узгодження електричних параметрів ліній зв'язку з мікросхемами обробки інформації і зниження рівня індукованих у лініях полях. Висока швидкість зчитування даних вимагає забезпечення обробки декількох сотень або й тисяч каналів.

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 елементи комутації на основі алюміній-поліімідних або мідь-поліімідних фольгованих або лакофольгових діелектриків. Для вибору найбільш оптимальних підходів при створенні сучасних детекторних модулів у першому розділі проведено огляд існуючих детекторних модулів.

При розробці детекторних модулів для систем детектування експериментів фізики високих енергій 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.

Для розробки обрано типопредставник детекторного модуля на основі монолітних активних піксельних сенсорів (MAPS) – розташування електроніки обробки в зоні максимального радіаційного навантаження. Детекторні модулі такого типу використані при модернізації внутрішньої трекової системи експерименту ALICE на БАК [12].

Головним чутливим елементом детекторних модулів є MAPS, розмірами 15мм×30 мм, що схематично показано на рисунку 3.1 з наведенням назв вихідних контактних площинок.

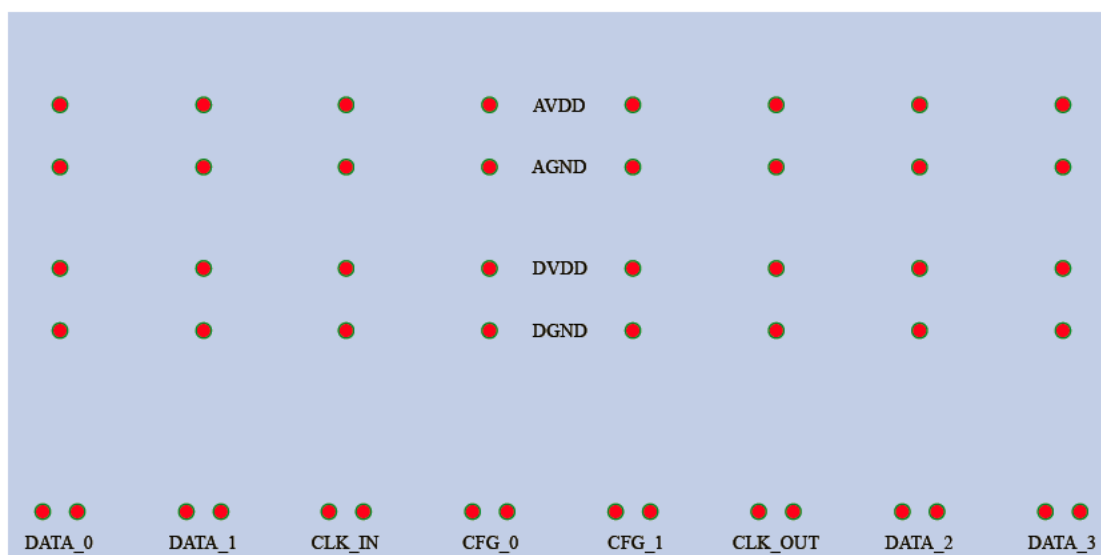


Рисунок 3.1 – Розташування контактних площинок на монолітному активному піксельному сенсорі ALPIDE 4

Гнучка друкована плата призначена для забезпечення електричної комутації між MAPS. Схематичний розріз прототипу гнучкої багатошарової плати наведено на рисунку 3.2.

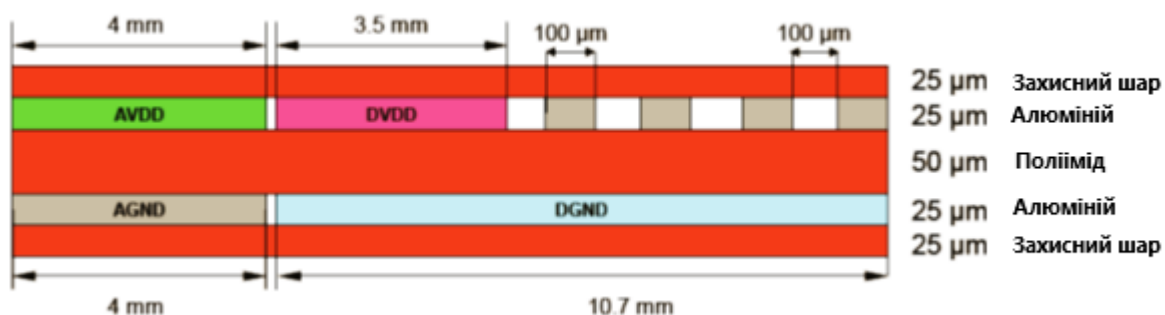


Рисунок 3.2 – Схематичний розріз гнучкої багатошарової плати

Розташування шарів забезпечує необхідні параметри модулю щодо хвильового опору. Більш детально особливості модернізації ВТС описано в [12].

3.1.1 Вихідні дані для розробки макету детекторного модуля з MAPS сенсором.

Проведений в першому розділі аналіз фізичних та технічних вимог до модернізації ВТС експерименту ALICE та детекторних модулів для ВТС

дозволяє сформулювати нижченаведені вимоги до типопредставника макету детекторного модуля на основі MAPS сенсорів.

- Вимоги до складу (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Компоненти, які повинен включати типопредставник модуля:

Макет MAPS	1 одиниця
Багатошарова збірна гнучка плата	1 одиниця

- Вимоги до конструкції компонентів (елементів комутації) (таблиця 3.2).

Компоненти типопредставника детекторного модуля повинні відповідати нижченаведеним вимогам.

Таблиця 3.2 – Вимоги до компонентів типопредставника детекторного модуля

Макет сенсора	
Габаритні розміри, мм×мм×мм	15×30×0,05
Кількість контактних площадок, од.	50
Розташування контактних площадок	згідно топології
Діаметр контактних площадок, мм	0,2
Багатошарова збірна гнучка плата	
Кількість шарів, од.	3
Склад плати (типи шарів)	2 сигнальних, 1 ізоляційний
Мінімальна ширина провідників, мм	0,1
Мінімальний крок розташування провідників, мм	0,2
Матеріал сигнальних шарів	ФДІ-А-50, (ФДІ-А-24)
Матеріал діелектричного шару	плівка ПП
Метод з'єднання шарів	склеювання, ультразвукове зварювання
Конструкція одношарових плат повинна дозволяти здійснювати електричний контроль на цілісність електричних кіл.	

- Вимоги до послідовності складання макета детекторного модулю.

Для розробки ескізної конструкторської документації розроблено технологічну послідовність складання макету детекторного модуля на основі піксельних сенсорів, що наведена у таблиці 3.3. Також у таблиці наведено технологічне обладнання для виконання основних технологічних операцій.

Таблиця 3.3 – Послідовність складання макету детекторного модуля

№	Назва операції	Обладнання
1	Склеювання одношарової нижньої плати та діелектричної прокладки	диспенсер WP1900
2	Склеювання одношарової верхньої плати та нижньої плати з діелектричною прокладкою	диспенсер WP1900
3	Ультразвукове зварювання верхньої та нижньої одношарових плат	установка зварювання типу УЗСМ або Delvotek 6400
4	Електричний контроль	Комплекс контролю
5	Захист зварних з'єднань	диспенсер WP1900
6	Полімеризація клею	шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
7	Електричний контроль	комплекс контролю
8	Встановлення та позиціонування макету MAPS	мікроскоп типу МБС-10
9	Встановлення багатошарової збірної плати	мікроскоп типу МБС-10
10	Ультразвукове зварювання багатошарової плати до макету MAPS	установка зварювання типу УЗСМ або Delvotek 6400
11	Електричний контроль	комплекс контролю
12	Захист зварних з'єднань	диспенсер WP1900
13	Полімеризація клею	шафа сушильна типу СНО 145/350 И4П
14	Електричний контроль	комплекс контролю

3.1.2 Опис конструкції дослідного зразку макета детекторного модуля на основі MAPS.

В рамках виконання роботи розроблено конструкцію макета детекторного модуля на основі MAPS та комплект конструкторської документації (додаток В), склад якої наведено на рисунку 3.3.

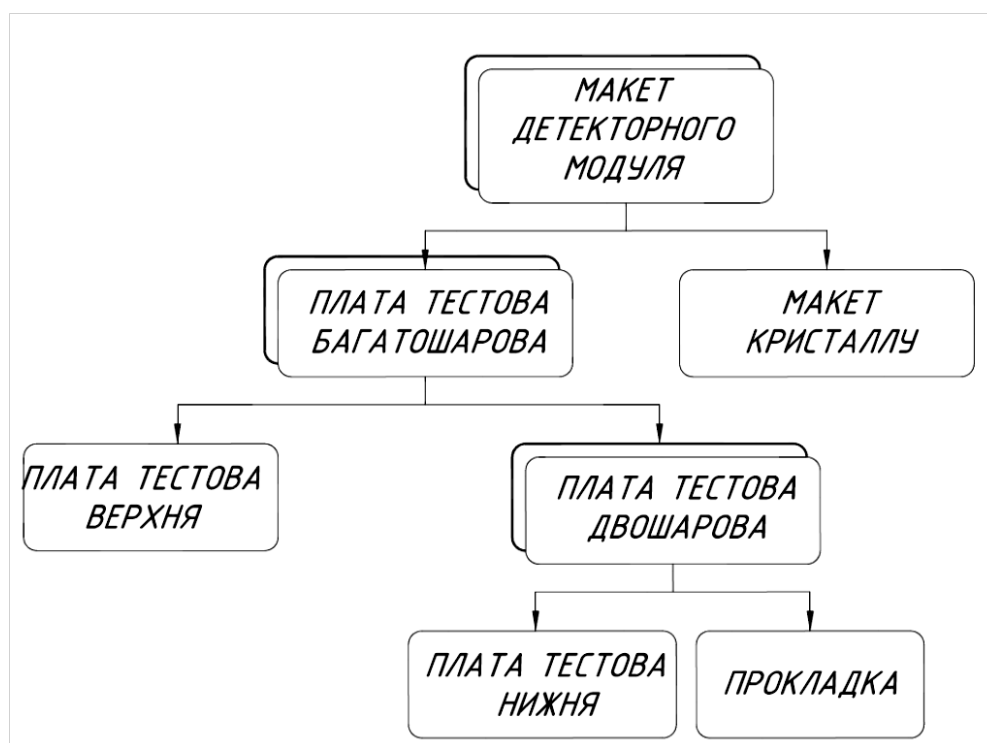


Рисунок 3.3 – Склад конструкторської документації на макета детекторного модуля на основі MAPS

3.2 Виготовлення гнучкого шаруватого матеріалу на алюмінієвій фользі

Як і кремнієві детектори, кабелі живлення мають відповідати наступним вимогам:

- висока швидкість роботи;
- можливість точної синхронізації між собою;
- висока радіаційна стійкість (елементарні частки, що народжуються у результаті зіткнень є жорсткою радіацією);
- низьке енерговиділення (система охолодження займає робочий об'єм детекторних систем).

Вищезазначеним вимогам відповідає гнучкий шаруватий матеріал на основі фольги з поліімідним покриттям.

Існуючі гнучкі фольговані шаруваті матеріали, які використовуються для виготовлення друкованих плат і шлейфів, передбачають їх виготовлення через

застосування трудомісткої і довготривалої у плані часу технології з складним для обслуговування спеціалізованим обладнанням.

3.2.1 Вдосконалення способу виготовлення матеріалу.

Запропоноване технічне рішення [24] дозволило створити спосіб виготовлення гнучкого лакофольгового шаруватого алюміній-поліімідного матеріалу, який забезпечив використання простішої, мало-витратної і відтворюваної технології виготовлення шаруватих матеріалів з необхідними геометричними розмірами, які працюють у діапазоні температур від -200°C до $+250^{\circ}\text{C}$. При цьому було виключено використання вакуумного і пресового обладнання.

Для нанесення поліімідної плівки було запропоновано використати лак АД 9103 ИС, який є розчином поліпіромеллітамідокислоти (ПАК) у диметилформаміді (ДМФА). Вміст сухого залишку в лаку складає 12-14%. Лак АД-9103 ИС призначений для виготовлення плівок і фольгованих діелектриків. Він має високу в'язкість і гарну стійкість до кислот, що використовуються у виробництві друкованих плат, що дозволяє його використання при виробництві гнучких друкованих плат фотохімічним методом.

Для забезпечення необхідної для використання у виробництві плат фотохімічним методом стійкості поліімідного покриття до кислот, ступінь імідизації ПАК повинен становити 95-100%. Вибір температури режиму імідизації було виконано на основі даних щодо залежності ступеню імідизації від часу термічної обробки при різних температурах, наведених у [25] (рисунок 3.4).

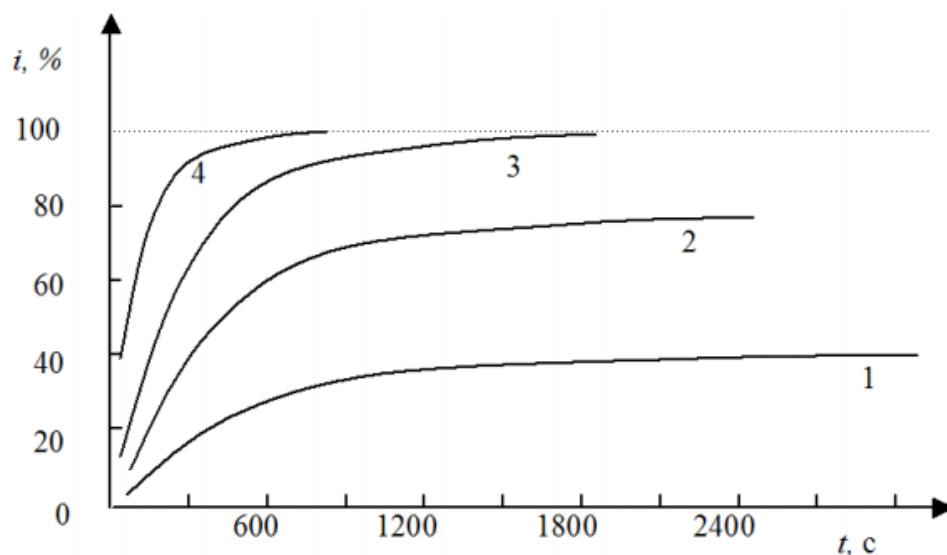


Рисунок 3.4 – Залежність ступеню імідизації (i) від часу обробки (за температури ($^{\circ}\text{C}$): 1 – 180; 2 – 250; 3 – 300; 4- 475. (За товщини плівки 1-1,1 мкм після 100% імідизації)

Спосіб виготовлення матеріалу, запропонований у технічному рішенні [24], передбачав тривалість процесу імідизації ПАК від 20 до 30 хвилин за температури від 300 до 350 $^{\circ}\text{C}$.

Експериментальним шляхом при відпрацюванні режимів виготовлення гнучкого шаруватого матеріалу для плат і кабелів на алюмінієвій фользі, було виявлено, що для імідизації плівки товщиною від 200 до 220 мкм (товщина до імідизації) до ступеню імідизації 95-100%, тривалість термічної обробки слід збільшити до 65 \pm 10 хвилин і проводити її за температури від (310 \pm 10) $^{\circ}\text{C}$. Це безпосередньо пов'язано з параметрами обладнання, яке використовувалось під час експерименту, такими як розподілення тепла у електричній сушильній шафі: чим більшим є внутрішній об'єм шафи, тим більшою є нерівномірність розподілення тепла в ньому, що необхідно враховувати. Також, швидкість, з якою ПАК досягає потрібного ступеню імідизації, очевидно, залежить від товщини шару лаку на заготівці.

У результаті відпрацювання було отримано наступні умови і технологічні режими виготовлення гнучкого шаруватого матеріалу для плат і кабелів на алюмінієвій фользі.

Для уникнення забруднення фольги (і нанесеного на неї лакового покриття), процедуру нанесення лаку на фольгу проводити у чистій кімнаті (<3500 часток/дм³) з наявністю витяжки над робочим місцем. Температура у приміщенні $+25\pm 7^\circ\text{C}$, відносна вологість повітря 45-80%.

Чистота діелектриків, що виготовляються забезпечується чистотою матеріалів, що використовуються, технологічного і досліджувального обладнання, інструментів і спецодягу.

Лист фольги з алюмінієвого сплаву (тип А5) необхідного розміру очищується, встановлюється в оснащенні, що дозволяє прикласти до листа силу натягування. Далі за допомогою аплікатора (тип ELCOMETER 3508&3560) наносять поліімідний лак (АД 9103 ИС) потрібної товщини (для даного експерименту – товщини 220 мкм). Після цього фольгу закріплюють в оснащенні (скло термостійке х 1, алюмінієвий профіль х 2, біндери х 4) і ставлять в сушильну шафу з витяжкою (електропіч лабораторна типу СНО 5.5.5/4И1), у якій підтримується температура $100-120^\circ\text{C}$. Дверцята шафи залишають відкритими для забезпечення кращого відтоку парів (у витяжку над шафою).

Кожна заготовка (кожен лист фольги з нанесеним на нею лаком) для підсушки лакового покриття повинна пробути у шафі з відкритими дверцятами за температури $(110\pm 10)^\circ\text{C}$ не менше 30 хвилин. Після цього температуру у шафі піднімають до $(310\pm 10)^\circ\text{C}$ зі швидкістю близько $2,5^\circ\text{C}$ на хвилину протягом 1,5 годин. Далі заготовки витримують у шафі за температури $300-320^\circ\text{C}$ протягом 1-1,15 годин, що забезпечує імідізацію лакового покриття близько 95-100%.

Після завершення процесу імідізації шафу відкривають і починається процес охолодження закріплених на оснащенні заготовок. Коли заготовки на оснащенні охолоджуються до температури $20-80^\circ\text{C}$, їх витягають з шафи і знімають оснащення, яке забезпечувало натягувальну силу.

Після цього необхідно обрізати місця, де алюмінієва фольга не вкрита шаром полііміду і запакувати матеріал, аби запобігти потраплянню на нього пилу, вологи і т.п..

Загальний вигляд технологічного маршруту виготовлення гнучкого шаруватого матеріалу для плат і кабелів на алюмінієвій фользі наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Виготовлення матеріалу лакофольгового з одностороннім поліімідним покриттям

№	Назва операції	Обладнання і матеріали	Технологічні режими
1	2	3	4
1	Нарізка заготовок	Стіл монтажний СМП-21, провідна фольга алюмінієва потрібної товщини	Комплектація партії заготовок (нарізка заготовок з необхідними геометричними розмірами з рулону фольги)
2	Хімічна очистка	Шафа витяжна ШВЛ ТУ У 143 11749.008-2000, розчин NaOH 10%, заготовки з операції 1	Обробити заготовки в 10% розчині натрію гідроксиду
3	Термічна обробка	Шафа сушильна електрична СНО 175/350И4А, заготовки з операції 2	Сушка заготовок після хімічного очищення
4	Нанесення електроізолюючого лаку	Шафа витяжна ШВЛ ТУ У 143 11749.008-2000, аплікатор АУ-1, лак електроізолюючий АД 9103 ИС, комплект оснащення для прикладення натягувальної сили на заготовку (комплект скла термостійкого необхідних геометричних розмірів, профіль алюмінієвий, біндери металеві), заготовки з операції 3	Встановити необхідну ширину зазору в аплікаторі, нанести лак АД 9103 ИС на заготовки, закріпити заготовки в оснащенні для прикладення натягувальної сили
5	Підсушка лаку	Шафа сушильна електрична СНО 175/350И4А, заготовки з операції 4	Підсушити лак на заготовках за температури 100-120°C протягом 30-40 хвилин
6	Імідизація ПАК	Шафа сушильна електрична СНО 175/350И4А, заготовки з операції 5	Імідизація лаку на заготовках (нагрівання до температури 300-320°C протягом 1,5 годин, потім витримка температури 300-320°C протягом 1 години)

Продовження таблиці 3.4

1	2	3	4
7	Візуальний контроль	Оснащення для прикладення натягу вальної сили, стіл монтажний СМП-21, заготовки з операції 6	Після охолодження заготовок до температури 20-80°C, зняти заготовки з оснащення і виконати видалення залишків не вкритого поліїмідом алюмінію, провести візуальний контроль якості поліїмідного покриття, відрізати 2 тестових зразки розміром 10смх4см від 2 різних заготовок партії для подальшого проведення контролю ступеню імідизації
8	Контроль товщини	Індикатор багатооборотний 1-МИГ-О, стіл монтажний СМП-21, заготовки з операції 7	За допомогою індикатора багатооборотного контролювати товщину поліїмідного покриття на відповідність вимогам
9	Запакування заготовок	Контейнери/паketи із замком-слайдером потрібних геометричних розмірів, заготовки з операції 7	Запакувати партію заготовок у контейнер/паket із замком-слайдером, щоб уникнути потрапляння на них пилу, вологи, та захистити від механічних пошкоджень. На паketі вказати номер партії та дату виготовлення
10	Контроль ступеню імідизації	Тара скляна лабораторна, шафа витяжна ШВЛ ТУ У 143 11749.008-2000, електрична піч для нагрівання СНО 175/350И4А, секундомір, моноетаноламін, термометр, 2 тестових заразка розміром 10смх4см від 2 різних заготовок партії з операції 7	Провести контроль ступеню імідизації заготовок партії шляхом розчинення поліїмідного покриття у моноетаноламіні.

Приклад технології, відпрацьований у даному розділі, демонструє перспективи розвитку технологій виготовлення фольгованого поліїмиду у вигляді заготовок (відносно) невеликих геометричних розмірів (а не рулонів поліїмиду). Такий спосіб виготовлення є вигідним для створення невеликих партій поліїмідних матеріалів з різними геометричними розмірами, різними товщинами та призначеннями. Створення невеликої партії такого матеріалу є особливо зручним для експериментальних досліджень. Традиційна рулонна

технологія зазвичай не має можливості створення дуже малих партій, оскільки одним з етапів виготовлення для неї є промотування рулону полііміду протягом певної дистанції, що забезпечує охолодження після імідизації і вплив на механічні напруги всередині поліімідного матеріалу.

Для виготовлення малих партій можна було б використати технологію центрифугування, але вона не забезпечує достатню для новітніх вимог рівномірність товщини плівки по площі заготовки.

Перспективним рішенням для нанесення таких матеріалів було б використання автоматичних установок (рисунок 3.5), призначених для нанесення плоских електродів для літій-йонних батарей та точного (за товщиною) нанесення різних плівок. Такі установки зазвичай оснащені вакуумним столиком (що дозволяє обійтись без оснащення для прикладення натягувальної сили під час нанесення лаку) і забезпечують рівномірну швидкість проїзду аплікатора, яку легко контролювати і вимірювати.



Рисунок 3.5 – Установка Large Tape Casting Coater (14” W x 40” L) with Heatable Vacuum Bed with Doctor Blade – MSK-AFA-L1000

Ще одним рішенням для покращення точності нанесення покриття є використання аплікаторів з цифровими мікрометричними головками (на стандартних аплікаторах використовуються механічні мікрометричні головки),

які дозволяють точно вимірювати товщину зазору, який встановлено на аплікаторі (мінусом такого рішення може є те, що вони будуть більш чутливими до агресивних хімічних речовин, які можуть на них потрапити при виконанні операції нанесення поліімідного лаку).

3.2.2 Типовий процес виготовлення плат на матеріалі .

Типовий технологічний маршрут виготовлення плат для макету типопредставника детекторного модулю на основі піксельних сенсорів на матеріалі лакофольговому з одностороннім поліімідним покриттям (товщина матеріалу – 24 мкм) фотохімічним методом наведено у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Типовий технологічний маршрут виготовлення плат на гнучкому шаруватому матеріалі

№	Назва операції	Обладнання і матеріали	Технологічні режими
1	2	3	4
1	Комплектація	Стіл монтажний СМП-21, лакофольговий діелектрик ЛТУ-А-1-24	Комплектувати партію плат гнучких (відрізати заготовки необхідних геометричних розмірів)
2	Хімічне очищення	Шафа витяжна ШВЛ ТУ У 143 11749.008-2000, заготовки з операції 1, розчин NaOH 10%, секундомір	Обробка заготовок у 10% розчині NaOH протягом 3-5 секунд за температури розчину 48-50°C
3	Термічна обробка	Шафа сушильна електрична СНО 175/350И4А, заготовки з операції 2	Сушити заготовки за температури 100°C протягом 60 хвилин, потім за температури 150°C протягом 60 хвилин
4	Нанесення фоторезисту	Установка нанесення фоторезисту BUNGARD RDC 21К, шафа витяжна ШВЛ ТУ У 143 11749.008-2000, заготовка з операції 3, фоторезист	Нанесення фоторезисту (суміш ФН-11С і ФН-11С-К), який має в'язкість 15,4-15,6 мм ² /сек на заготовки
5	Сушка після нанесення фоторезисту	Шафа сушильна електрична СНО 175/350И4А, шафа витяжна ШВЛ ТУ У 143 11749.008-2000, заготовки з операції 4	Сушити заготовки протягом 60 хвилин за температури 95-99°C
6	Експонування контактне	Установка двостороннього експонування BUNGARD EXP8000, заготовки з операції 5	Експонувати фоторезист на заготовках протягом 3 хвилин (з обох боків одночасно)

Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
7	Проявлення фоторезисту	Шафа витяжна ШВЛ ТУ У 143 11749.008-2000, уайт-спірит, бутил, заготовки з операції 6	Проявити фоторезист на заготовках за допомогою уайт-спіриту (2 x 3 хвилини) та бутилу (2 x 15 сек)
8	Задублювання	Шафа сушильна електрична СНО 175/350И4А, заготовки з операції 7	Задубити фоторезист на заготовках (тримати в шафі сушильній за температури 100°C протягом 60 хвилин; після цього – за температури 150°C 60 хвилин)
9	Хімічне травлення алюмінію	Шафа витяжна ШВЛ ТУ У 143 11749.008-2000, шафа сушильна електрична СНО 175/350И4А, розчин для травлення (суміш ортофосфорної (H ₃ PO ₄) і оцетової (CH ₃ COOH) кислот), заготовки з операції 7	Травлення алюмінію на заготовках протягом 2-2,5 хвилин за температури 98-100°C
10	Ретушування поліміду	Шафа витяжна ШВЛ ТУ У 143 11749.008-2000, шафа сушильна електрична СНО 175/350И4А, стіл монтажний СМП-21, фоторезист, заготовки з операції 9, мікроскоп МБС-9	Провести ретушування заготовок фоторезистом (суміш ФН-11С і ФН-11С-К) з боку поліімідної плівки
11	Захист алюмінію фоторезистом	Шафа витяжна ШВЛ ТУ У 143 11749.008-2000, шафа сушильна електрична СНО 175/350И4А, заготовки з операції 10, фоторезист	Захистити фоторезистом (суміш ФН-11С і ФН-11С-К) поверхню заготовок з боку алюмінію
12	Травлення хімічне поліміду	Шафа витяжна ШВЛ ТУ У 143 11749.008-2000, шафа сушильна електрична СНО 175/350И4А, стіл монтажний СМП-21, розчин для травлення (КОН+моноетиноламін+триетаноламін+вода), заготовки з операції 11	Травити поліімідну плівку на заготовках за температури розчину 65-70°C
13	Видалення фоторезисту	Шафа витяжна ШВЛ ТУ У 143 11749.008-2000, форсан, ксилол, бутилацетат, заготовки з операції 12	Видалити фоторезист з заготовок (форсан, нагрітий до температури 130-135°C, потім послідовно за кімнатної температури ксилол і бутилацетат)
14	Візуальний контроль	Стіл монтажний СМП-21, плати на заготовках з операції 13, мікроскоп МБС-9	Перевірити зовнішній вигляд плат
15	Контроль габаритно-приєднувальних розмірів	Вимірювальний мікроскоп універсальний УИМ-21, плати на заготовках з операції 14	Перевірити габаритно-приєднувальні розміри плат

Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
16	Хімічне очищення	Шафа витяжна ШВЛ ТУ У 143 11749.008-2000, шафа сушильна електрична СНО 175/350И4А, 3% розчин натрію гідроксиду (NaOH)	Обробити плати на заготівках в 3% розчині NaOH
17	Пакування	Стіл монтажний СМП-21, плати з операції 16, контейнери/пакети із замком-слайдером потрібних геометричних розмірів	Покласти плати в пакувальну тару

3.3 Визначення оптимального режиму УЗ зварювання

Якість і надійність зварних з'єднань, виконаних методом УЗ зварювання, визначається правильним підбором технологічних режимів зварювання. Зварювання при неоптимальних технологічних режимах може привести до значного погіршення якості зварного з'єднання і, можливо, виходу пристрою з ладу.

Для забезпечення високої продуктивності процесів складання при виготовленні компонентів ліній сенсорів і MAPS MCM, УЗ зварювання доцільно виконувати на автоматизованих установках зварювання, таких як Delvotec 5430 (рисунок 3.5), Delvotec 6400 або Delvotec G5, межі технологічних режимів яких дозволяють виконувати зварювання при виготовленні компонентів MAPS модулів.



Рисунок 3.5 – Автоматична установка для УЗ зварювання Delvotec 5430

3.3.1 Критерії якості зварного з'єднання

Найбільш інформативними критеріями якості зварного з'єднання є його зовнішній вигляд і міцність. Зварене з'єднання при цьому має мати чіткий вдавлений відбиток торця електрода з хрестоподібним виступом, утвореним канавками на пласкому алюмінієвому виводі. При цьому діаметр відбитка зварного з'єднання може бути на 20% більшим за ширину плаского виводу.

За характером руйнування зварних з'єднань при прикладеному навантаженні всі режими зварювання можна поділити на 3 типи:

- значення параметрів є недостатніми для утворення міцного з'єднання, є можливим відшаровування виводу від контактної площадки (при огляді контактних площадок після відшаровування виводів можна побачити невеликі островки зон “схоплювання”, розташовані по всій площі контакту);

- значення параметрів є близькими до оптимальних, міцність досягає максимальних величин (якщо відірвати такий вивід після зварювання, можна побачити, що зони “схоплювання” заповнюють майже всю площу контакту);

- значення параметрів приводять до надмірної деформації виводу, що у свою чергу призводить до зменшення поперечного перерізу виводу на площі зварювання, що призводить до розриву виводу.

Звідки можна зробити висновок, що загальна площа зварного з'єднання виводу з контактною площадкою майже не залежить від зміни режимів зварювання, але від останніх залежить процент заповнення площі з'єднання зонами “схоплювання”.

3.3.2 Повний факторний експеримент

Для визначення оптимального режиму УЗ зварювання було використано методику повного факторного експерименту. Сутність цього експерименту полягає у дослідженні впливу ряду факторів z_i на деяку величину y . У даному розділі цей експеримент використано для дослідження впливу таких параметрів

як вихідна потужність УЗ-генератора, час зварювання і зусилля навантаження зварювального інструменту на міцність звареного з'єднання.

Автоматична установка для зварювання типу Delvotec 6400 має можливість встановлення значень потужності від 0 до 5 та навантаження від 15 до 150 у відносних одиницях установки. Експериментально було виявлено, що для виконання достатньо міцних зварених з'єднань, потужність має бути в межах від 1,6 до 2,0, час у межах від 1,5 до 3,5, а навантаження – від 0,6 до 1,2.

За методикою, описаною у [26], почнемо розрахунок оптимального режиму зварювання. Оскільки досліджуватиметься вплив 3 факторів, експерименти будуть поставлені за методикою ПФЕ 2^3 за наступним планом:

- кодування змінних (таблиця 3.6);
- матриці планування ПФЕ 2^3 в закодованих змінних з врахуванням парних взаємодій (таблиця 3.7), доповнення матриці стовбцем середніх значень відклику (відклик у данному випадку – результат вимірювання параметру у на практиці, при відповідних значеннях змінних z_i);
- обчислення коефіцієнтів регресії (таблиця 3.8);
- перевірка обчислених коефіцієнтів на значимість (для цього визначається дисперсія відтворюваності), отримання рівняння регресії у закодованих змінних;
- перевірка отриманого рівняння на адекватність (за допомогою критерію Фішера);
- інтерпретація отриманої моделі;
- запис рівняння регресії в натуральних змінних.

Таблиця 3.6 – Кодування змінних

Фактор	Потужність	Час	Навантаження
Центр плану z_{i-0}	1,8	2,5	0,9
Інтервал варіювання dz_i	0,2	1	0,3
Нижній рівень фактору z_{i-}	1,6	1,5	0,6
Верхній рівень фактору z_{i+}	2	3,5	1,2

Таблиця 3.7 – Матриця планування для обробки результатів

№	Фактори			Взаємодії				Результати випробувань, Г			Середнє результатів, Г
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₁ x ₂	x ₁ x ₃	x ₂ x ₃	x ₁ x ₂ x ₃	y ₁	y ₂	y ₃	y _{ср}
1	1	1	1	1	1	1	1	125	145	160	143
2	-1	1	1	-1	-1	1	-1	110	120	130	120
3	1	-1	1	-1	1	-1	-1	145	165	180	163
4	-1	-1	1	1	-1	-1	1	85	100	105	97
5	1	1	-1	1	-1	-1	-1	115	135	150	133
6	-1	1	-1	-1	1	-1	1	90	105	115	103
7	1	-1	-1	-1	-1	1	1	135	150	170	152
8	-1	-1	-1	1	1	1	-1	80	95	105	93

Таблиця 3.8 – Обчислення коефіцієнтів

b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁₂	b ₁₃	b ₂₃	b ₁₂₃
125.63	22.29	-0.63	5.21	-8.96	0.21	1.46	-1.88

Згідно з отриманим у результаті розрахунків критерієм, значимими є коефіцієнти, які є більшими за модулем ніж 6.41, тобто коефіцієнти b₀, b₁ і b₁₂. Тоді отримане рівняння має вигляд (3.1, 3.2):

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (3.1)$$

$$y = 125.63 + 22.29 \cdot x_1 - 8.96 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (3.2)$$

Порівнюючи розрахункове і табличне значення критерію Фішера, маємо ($F_{\text{табл}} = 2.74$) > ($F_{\text{розр}} = 0.60$), що свідчить про те, що отримане рівняння (3.2) є адекватним.

З рівняння (3.2) видно, що максимальне значення міцності зварного з'єднання досягається при максимальному (з досліджених) значенню потужності і мінімальній (з досліджених) тривалості зварювання. Це видно на графіку залежності міцності з'єднання від потужності і часу зварювання, побудований на основі рівняння (3.2), переведеного до натуральних змінних, наведено на рисунку 3.6.

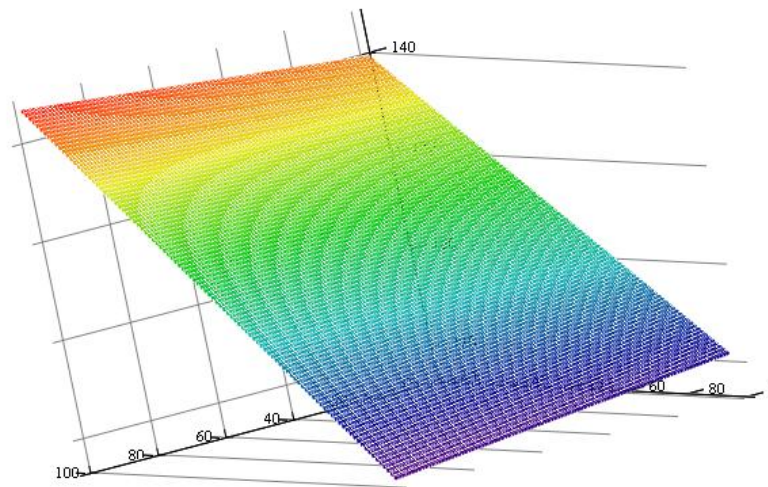


Рисунок 3.6 – Графік залежності міцності з'єднання від потужності і часу зварювання

Визначимо оптимальне значення параметру x_3 (навантаження). З таблиці 3.8 видно, що наступним за величиною модуля (після вказаних у рівнянні 3.1) коефіцієнтом є b_3 , коефіцієнт перед параметром x_3 . Додавши його до рівняння 3.1, отримаємо:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (3.3)$$

$$y = 125.63 + 22.29 \cdot x_1 + 5.21 \cdot x_3 + -8.96 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (3.4)$$

З рівняння 3.4 видно, що коефіцієнт перед $x_3 > 0$, тож максимальне значення міцності може бути отримане при максимальному (серед досліджених) значенні навантаження. Щоб довести це, побудуємо графік залежності міцності звареного з'єднання від навантаження (при сталих $x_1 = 2$, $x_2 = 1.5$) у натуральних змінних (рисунок 3.7).

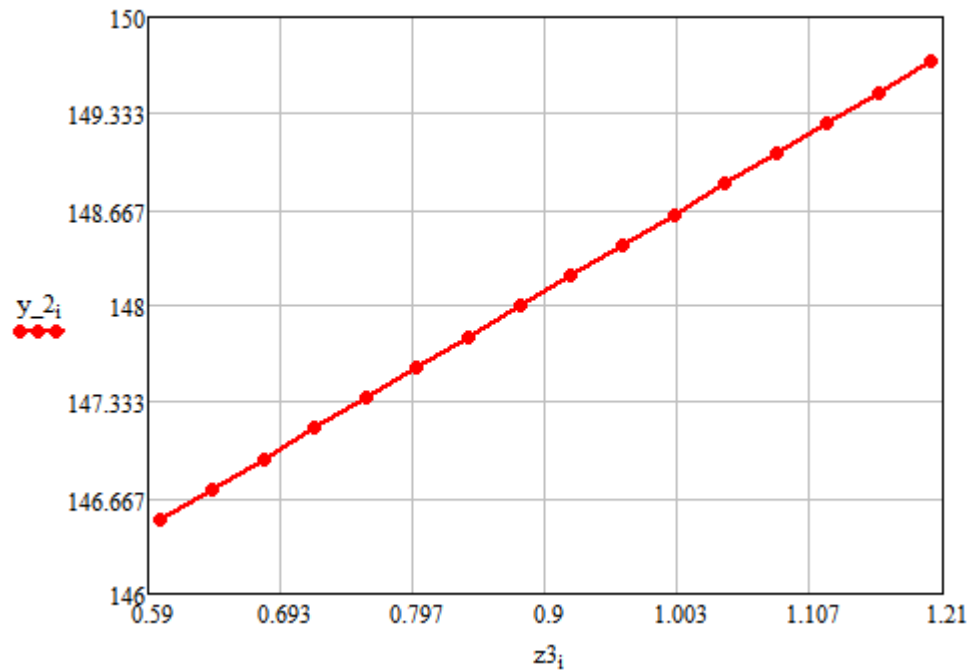


Рисунок 3.7 – Графік залежності міцності звареного з'єднання від навантаження (при сталих $z_1 = 2$, $z_2 = 1.5$) у натуральних змінних

З рисунку 3.7 видно, що максимальне розрахункове значення міцності звареного з'єднання дійсно досягається при значенні навантаження 1.2 Н і складає 149.7 г. У таблиці 3.9 наведені отримані оптимальні значення параметрів УЗ зварювання і абсолютні значення параметрів, обчислені з відносних одиниць установки.

Таблиця 3.9 – Оптимальні значення параметрів УЗ зварювання (у відносних одиницях установки)

Параметр	Потужність	Час	Навантаження
Відносна величина	2	1.5	1.2
Абсолютне значення	0.26 Вт	46.65 мс	202.6 мН

4 ВИПРОБУВАННЯ ДОСЛІДНИХ ЗРАЗКІВ

4.1 Випробування дослідних зразків матеріалу

Загальними вимогами до діелектриків є:

- стійкість до підвищених температур;
- постійність геометричних розмірів;
- високі механічні і електричні якості у тяжких умовах навколишнього середовища;
- сумісність з існуючими процесами обробки гнучких друкованих плат;
- збереження характеристик протягом всього строку експлуатації при змінах температури навколишнього середовища як мінімум від -40°C до $+45^{\circ}\text{C}$

Таблиця 4.1 – Основні вимоги до матеріалу (що перевіряються регулярно)

Показник	Значення	Одиниці виміру	% партії, який йде на випробування
Міцність зчеплення лакової плівки з фольгою на полосі шириною 3мм	$>15-25$ або $0.15-0.25$	г або Н	15
Поглинання вологи після 24 годин	<1	%	15
Питомий поверхневий електричний опір	$>10^{13}$	Ом	15
Питомий об'ємний електричний опір	$>10^{14}$	Ом·см	15
Опір ізоляції	$>10^{11}$	Ом	15
Час розчинення лакового покриття у моноетиноламіні за температури $(140\pm 2)^{\circ}\text{C}$	>100	сек	15

4.1.1 Перевірка на час розчинення лакового покриття у моноетиноламіні.

Час розчинення лакового покриття у моноетаноламіні перевіряють на 3 тестових зразках розміром $(60\pm 3)\times(30\pm 3)$ мм у стакані хімічному без перемішування моноетаноламіну (рисунок 4.1).

Нерухомо закріплений у вертикальному положенні зразок наполовину занурюють у моноетаноламін, який має температуру $(140\pm 2)^{\circ}\text{C}$. Відлік часу

травлення проводиться за допомогою секундоміру з моменту занурення зразка у моноетиноламін до повного розчинення лакового покриття, що визначається візуально за зникненням жовтого кольору з поверхні фольги. Випробування проводять послідовно на 3 зразках. Результати випробувань наведені у таблиці 4.2.



Рисунок 4.1 – Зразок лакового покриття, вертикально занурений у моноетиноламін

Таблиця 4.2 – Результати перевірки на час розчинення лакового покриття у моноетиноламіні

№ тестового зразка	Товщина зразка, мкм	Час розчинення покриття, сек
1	25 мкм	100 сек
2	28 мкм	120 сек
3	26 мкм	115 сек

З таблиці 4.2 видно, що усі зразки успішно пройшли випробування. Товщину зразку було виміряно за допомогою індикатора багатооборотного 1-МИГ-О. Вимірювання товщини зразка потрібне, оскільки швидкість

розчинення лакового покриття залежить не тільки від ступеню імідизації ПАК, а й від товщини покриття.

4.1.2 Перевірка на міцність зчеплення лакової плівки з фольгою

Міцність зчеплення лакової плівки з фольгою визначають на 5 зразках шириною 3 мм і довжиною від 80 до 120 мм методом відшаровування під кутом 180°. На зразках, які підготовлені до випробувань згідно з методикою, описаною у ГОСТ 10316-78 [27] і приклеєні з боку лакового покриття до жорсткої підкладки, проводять випробування за допомогою грамометра за швидкості відшаровування близько 50 мм/хв.

Для випробування кінець фольгової стрічки вручну відшаровують від поліімідної плівки, залишивши не менше 30 мм довжини фольгової стрічки нерозшарованою (рисунок 4.2). У процесі випробування зразка на довжині 25-30 мм фіксують (за допомогою грамометра (діапазон вимірювання використаного грамометра: від 0,1 до 15,0 г)) мінімальне і максимальне зусилля розшаровування. Міцність зчеплення лакової плівки з фольгою визначають як середнє арифметичне максимального і мінімального зусиль розшаровування.

За результат приймають середнє арифметичне значення п'яти паралельних вимірів. Якщо під час підготовки або випробування зразка фольга обривається, зразок слід забракувати і замінити іншим.

Таблиця 4.3 – Підготовка і проведення експериментальних досліджень міцності зчеплення лакової плівки з фольгою

№	Назва операції	Обладнання і матеріали	Технологічні режими
1	2	3	4
1	Хімічне очищення	Шафа витяжна ШВЛ ТУ У 143 11749.008-2000, заготівка лакофольгова з поліімідним покриттям (з одного боку), розчин NaOH 10%, секундомір	Обробка заготівки у 10% розчині NaOH протягом 3-5 секунд за температури розчину 48-50°C

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4
2	Термічна обробка	Шафа сушильна електрична СНО 175/350И4А, заготівка з операції 1	Сушити заготівку за температури 100°C протягом 60 хвилин, потім за температури 150°C протягом 60 хвилин
3	Нанесення фоторезисту	Установка нанесення фоторезисту BUNGARD RDC 21K, шафа витяжна ШВЛ ТУ У 143 11749.008-2000, заготівка з операції 2, фоторезист	Нанесення фоторезисту (суміш ФН-11С і ФН-11С-К), який має в'язкість 15,4-15,6 мм ² /сек на заготівку
4	Сушка після нанесення фоторезисту	Шафа сушильна електрична СНО 175/350И4А, шафа витяжна ШВЛ ТУ У 143 11749.008-2000, заготівка з операції 3	Сушити заготівку протягом 60 хвилин за температури 95-99°C
5	Експонування контактне	Установка двостороннього експонування BUNGARD EXP8000, заготівка з операції 4	Експонувати фоторезист на заготівці протягом 3 хвилин (з обох боків одночасно)
6	Проявлення фоторезисту	Шафа витяжна ШВЛ ТУ У 143 11749.008-2000, уайт-спірит, бутил, заготівка з операції 5	Проявити фоторезист на заготівці за допомогою уайт-спіриту (2 x 3 хвилини) та бутилу (2 x 15 сек)
7	Задублювання	Шафа сушильна електрична СНО 175/350И4А, заготівка з операції 6	Задубити фоторезист на заготівці (тримати в шафі сушильній за температури 100°C протягом 60 хвилин. Після цього – за температури 150°C 60 хвилин)
8	Хімічне травлення алюмінію	Шафа витяжна ШВЛ ТУ У 143 11749.008-2000, шафа сушильна електрична СНО 175/350И4А, розчин для травлення (суміш ортофосфорної (H ₃ PO ₄) і оцетової (CH ₃ COOH) кислот), заготівка з операції 7	Травлення алюмінію на заготівці протягом 2-2,5 хвилин за температури 98-100°C
9	Видалення фоторезисту	Шафа витяжна ШВЛ ТУ У 143 11749.008-2000, форсан, ксилол, бутилацетат, заготівка з операції 8	Видалити фоторезист з заготівок (форсан, нагрітий до температури 130-135°C, потім послідовно за кімнатної температури ксилол і бутилацетат)

Продовження таблиці 4.3

10	Фіксація заготовки	Стіл монтажний СМП-21, скло, скотч, заготовка з операції 9	Закріпити заготовку на склі скотчем рівно, так щоб скотч не торкався ділянок фольги
11	Випробування на міцність зчеплення фольги і поліімідного покриття	Грамометр, стіл монтажний СМП-21, закріплена на склі заготовка з операції 10	Вручну відшарувати від поліімідної плівки ділянку фольги, за допомогою грамометра на участку 25-30 мм виміряти максимальне і мінімальне зусилля відшаровування



Рисунок 4.2- Вигляд тестової плати для перевірки адгезії після проведення експерименту

Таблиця 4.4 – Результати проведення експериментального дослідження міцності зчеплення лакової плівки з фольгою

№ зразку	Зусилля відшаровування фольги, г		Середнє арифметичне вимірів, г
	Мінімальне	Максимальне	
1	25	35	30
2	30	35	32,5
3	35	40	37,5
4	25	35	30
5	30	35	32,5
Середнє арифметичне усіх вимірів, г			32,5

З результатів експерименту, наведених у таблиці 4.4, видно, що усі досліджені зразки успішно пройшли випробування і отриманий гнучкий шаруватий матеріал має достатньо високе значення адгезії поліімідної плівки до алюмінію.

4.1.3 Перевірка на поглинання води

Перевірка діелектриків на поглинання води проводиться у відповідності із стандартом IPC-TM-650, метод тестування 2.6.2 [28].

Обладнання: ваги лабораторні загального призначення 2-го класу точності з найбільшою вагою зважування 200 г.

Зразки лакофольгового матеріалу вирізають у формі квадрата із стороною, рівною (50 ± 1) мм. Поверхня зрізів повинна бути гладкою. Перед проведенням випробування зразки сушать за температури $(50 \pm 2)^\circ\text{C}$ протягом (24 ± 1) годин, а потім охолоджують в ексікаторі за температури $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$. Після охолодження зразки виймають з ексікатора і зважують (не пізніше ніж через 5 хвилин після того, як їх вийняли з ексікатора).

Підготовлені зразки швидко занурюють у дистильовану воду і витримують за температури $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ протягом (24 ± 1) годин. Після цього зразки виймають з води, витирають чистою сухою тканиною або фільтровальною бумагою і зважують (не пізніше ніж через 1 хвилину після того, як їх вийняли з води).

Маса води, що була поглинута зразком, визначається за формулою (4.1):

$$X_{1,2} = m_2 - m_1, \quad (4.1)$$

де m_1 – маса зразка перед зануренням у воду, мг;

m_2 – маса зразка після вийняття його з води, мг.

Масу води, що була поглинена зразком, на одиницю його поверхні для кожного зразка у $\text{мг}/\text{см}^2$, визначають за формулою (4.2):

$$M_S = \frac{m_2 - m_1}{A}, \quad (4.2)$$

де A – поверхня зразка, см^2 .

Масова доля води, яка була поглинена зразком, у процентах, визначається за формулою (4.3):

$$M_{\%} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100\%, \quad (4.3)$$

Поглинання вологи контролюється на трьох зразках. За результат випробувань приймається середнє арифметичне значення трьох вимірювань з точністю до 0.1%. Результати випробувань наведено у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Результати проведення випробування на поглинання вологи

№ зразка	Маса до занурення, мг	Маса після занурення, мг	Маса води, що була поглинена зразком, мг	Маса води, поглинена зразком, у $\text{мг}/\text{см}^2$	Масова доля води, поглинена зразком, %
1	0,1652	0,1663	0,0011	$4,4 \cdot 10^{-5}$	0,7
2	0,1792	0,181	0,0018	$7,2 \cdot 10^{-5}$	1
3	0,1611	0,1625	0,0014	$5,6 \cdot 10^{-5}$	0,9
Середнє арифметичне масової долі води з точністю до 0.1%					0,9
Поверхня кожного із 3 зразків має розмір A (см^2)					25

З результатів досліджень, наведених у таблиці 4.5, видно, що усі зразки успішно пройшли випробування.

4.2 Прискорені випробування на циклічний вплив температур макета детекторного модуля

При оцінці надійності знову розроблювальних або одиничних виробів переважно розвинені статистичні методи оцінки надійності, що ввійшли в основні нормативні документи, є недостатньо ефективні. На практиці, як правило, на випробування представлена мала вибірка виробів, що не забезпечує достатнього обсягу статистичних даних про відмови, що дозволяє в рамках

строго імовірнісного підходу оцінити шукані показники надійності. Більше того, розповсюдженим представляється випадок, коли протягом тривалого часу взагалі не спостерігається відмов.

Одним з напрямків вирішення даної проблеми є пошук шляхів удосконалювання методів оцінки надійності, зокрема, проведення прискорених випробувань у форсованих режимах і застосування розрахунково-експериментальних методів з використанням результатів випробувань [29-32].

У теперішній час випробування виробів на надійність будуються на дослідженні механізмів відмов, для чого проводяться невеликі за обсягом прискорені випробування й випробування на руйнування з метою вивчення особливостей деградаційних процесів, виявлення причин і механізмів відмов і розробки практичних мір для виключення або зменшення відмов.

Метою даної частини роботи було дослідження з використанням методу форсованих прискорених випробувань надійності макета детекторного модуля. Дослідження спрямовані на виявлення потенційно ненадійних елементів, підтвердження стійкості обраних конструктивно-технологічних рішень й одержання експериментальної оцінки довговічності виробів.

З урахуванням властивостей матеріалів, що застосовуються, базуючись на рекомендаціях міжнародних і вітчизняних стандартів [11, 33-34], для дослідження надійності розроблювальних виробів обраний метод випробувань на вплив циклічної зміни температури при нормальному атмосферному тиску. Метод прискорених форсованих випробувань і його режими вибирали з урахуванням кінетики зміни характеристик, діапазону робочих температур для використовуваних матеріалів, максимальної величини навантажень, що не перевищують гранично припустимі [35].

При виборі температури як форсуючого фактору урахували, що зв'язок між швидкістю деградаційних процесів і температурою описується законом Арреніуса, що для визначення інтенсивності відмов може бути представлений у вигляді [29, 36] (4.4):

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)}, \quad 4.4)$$

- 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 ($0,4 < E_a < 1$ eВ);
 k – постійна Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К = $8,625 \cdot 10^{-5}$ eВ/К).

При обґрунтуванні параметрів випробувальних режимів виходили з того, що робота виробів в умовах зміни температур визначається явищем термічної втоми з характерним чергуванням процесів холодного наклепу й високотемпературного відпалювання, що супроводжується релаксацією напруг. Періодичні впливи температури призводять до багаторазової зміни механічних напруг у матеріалах і з'єднаннях, що викликає виникнення залишкових дефектів структури матеріалів і деформацій у вузлах, зародження втомливих мікротріщин.

Важливим фактором у формуванні ушкоджень при термічній утомі є тривалість циклу $t_{\text{ц}}$ і час витримки $t_{\text{в}}$ при максимальній температурі циклу T_{max} . Це пояснюється тим, що основна релаксація напруг і розвиток деформації повзучості, що супроводжується статичними ушкодженнями, відбуваються в перші хвилини витримки при T_{max} [35, 37]. Цикл без $t_{\text{в}}$ не містить деформації повзучості. Ущільнення робочих циклів інтенсифікує процеси втомливих руйнувань.

Параметри випробувального режиму при впливі циклічної зміни температури при нормальному атмосферному тиску обрані наступні:

- максимальна температура у термоциклі, T_{max} – плюс 120°C;
- мінімальна температура в термоциклі, T_{min} – плюс 20°C;
- час нагрівання й охолодження, t – 5 хв;
- швидкість зміни температури, $\frac{dT}{dt}$ – 20°C/хв;
- витримка при T_{max} і T_{min} , $t_{\text{в}}$ – 5 хв.

У результаті тривалість термоцикла при випробуваннях становить $t_{\text{ц}} = 20$ хв (рисунок 4.3).

Загальний методологічний підхід до оцінки довговічності випробовуваних виробів базується на тому, що залежність довговічності виробів від навантажувального впливу описується співвідношенням [38] (4.5):

$$N_{\text{вип}} = N_{\text{г}} \left(\frac{S_{\text{г}}}{S_{\text{вип}}} \right)^m, \quad (4.5)$$

де N (довговічність у циклах або годинах;

S – навантаження;

індекс “г” відноситься до стандартних або “робочих” умов;

індекс “вип” – до умов при випробуваннях.

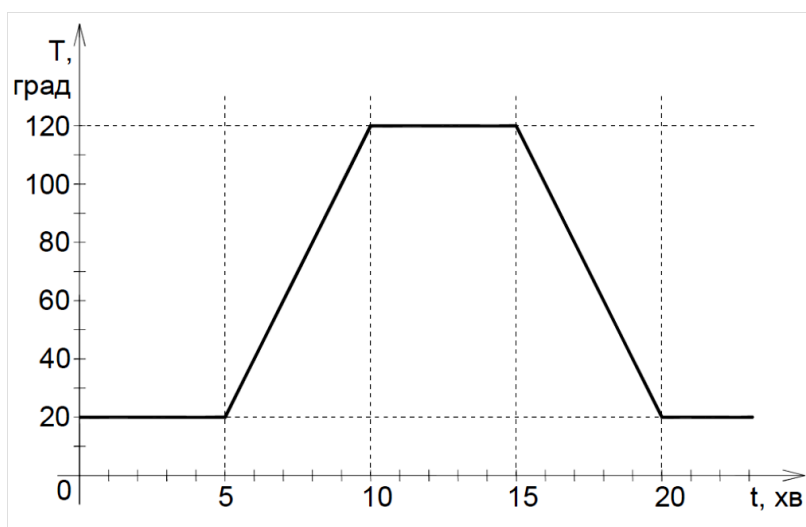


Рисунок 4.3 – Параметри випробувального режиму під час впливу циклічної зміни температури

Для прискорених випробувань аналогічних виробів при виборі температури як форсуючого фактору коефіцієнт прискорення по температурі $K_{\text{уТ}}$ визначається виразом [39] (4.6):

$$K_{\text{уТ}} = \frac{N_{\text{практ}}}{N_{\text{вип}}} = \left(\frac{\Delta T_{\text{вип}}}{\Delta T_{\text{практ}}} \right)^2, \quad (4.6)$$

де $\Delta T_{\text{практ}}$ й $\Delta T_{\text{вип}}$ – відповідно, максимальний перепад температур на практиці (в умовах експлуатації) і при випробуваннях;

$N_{\text{практ}}$ й $N_{\text{вип}}$ – кількість циклів до відмови в умовах експлуатації й при випробуваннях.

Крім цього необхідно враховувати при термоциклюванні прискорення деградаційних процесів за часом. При цьому коефіцієнт прискорення за часом (кількість циклів у годину) має величину (4.7):

$$K_{yt} = \frac{60}{t_{\text{ц}}}, \quad (4.7)$$

де $t_{\text{ц}}$ – тривалість випробувального циклу, хв.

За результатами прискорених випробувань, відповідно до методики, викладеної авторами у [35], можна визначити величину $N_{\text{практ}}$, що характеризує або наробок виробів на відмову в умовах експлуатації (якщо відмова спостерігалася), або час безвідмовної роботи за нормальних умов (якщо відмов не було), еквівалентне кількості проведених випробувальних термоциклів $N_{\text{вип}}$. Розрахунок $N_{\text{практ}}$ проводиться за формулою (4.8):

$$N_{\text{практ}} = N_{\text{вип}} \cdot K_{yT} \cdot K_{yt}. \quad (4.8)$$

Для обраних режимів випробувань $t_{\text{ц}} = 20$ хвилин, а діапазон зміни температури у термоциклі $+20^{\circ}\text{C} \div +120^{\circ}\text{C}$ визначаємо величину $\Delta T_{\text{вип}} = 100^{\circ}\text{C}$. Оскільки температурний діапазон експлуатації виробів у складі детекторних модулів на практиці становить $(20 \pm 3)^{\circ}\text{C}$, то $\Delta T_{\text{практ}} = 4^{\circ}\text{C}$. Отже:

$$K_{yT} = \left(\frac{\Delta T_{\text{вип}}}{\Delta T_{\text{практ}}} \right)^2 = \left(\frac{100}{6} \right)^2 = 277,7; \quad K_{yt} = \frac{60}{20} = 3,0,$$

і формула (4.8) для розрахунку $N_{\text{практ}}$ (у годинах) запишеться у вигляді (4.9):

$$N_{\text{практ}} = 277,7 \times 3 \times N_{\text{вип}} = 833 \times N_{\text{вип}}. \quad (4.9)$$

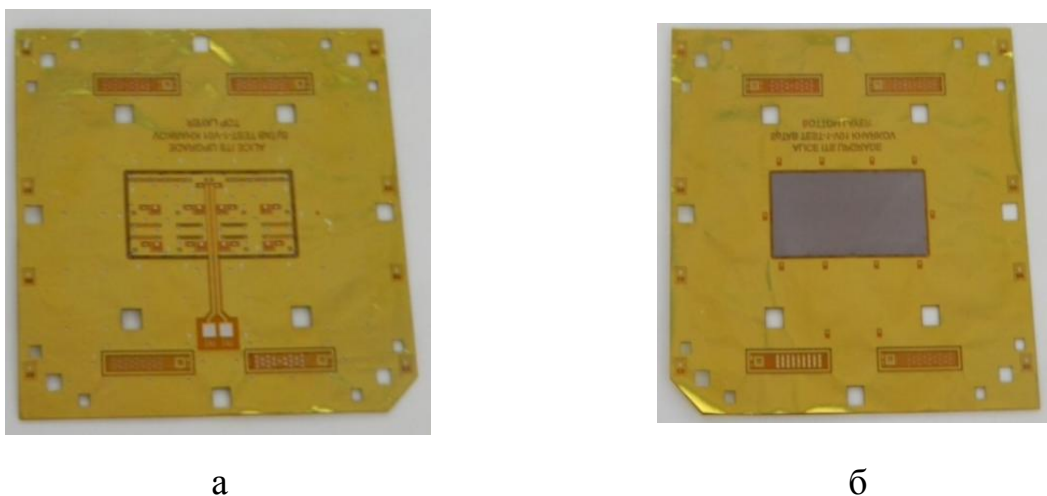
Випробування на вплив циклічної зміни температури проводилися з використанням пічі ультрачервоного нагріву з примусовим охолодженням.

На рис. 4.4 представлений макет детекторного модуля, отриманий ультразвуковим зварюванням і склеюванням гнучких плат на основі

лакофольгового діелектрику, на поверхні якого за допомогою приклеювання й УЗ-зварювання здійснюється монтаж кремнієвого кристалу.

Для приклеювання шарів та захисту зварних з'єднань у зборці використано клей УП-10-14-2, що витримує, згідно ТУ, вплив температур від -60°C до $+120^{\circ}\text{C}$; багаторазові термоцикли, ударні й вібраційні навантаження.

Проведений аналіз властивостей матеріалів, що застосовуються, і послужив базою для вибору випробувальних режимів.



а

б

а – вид зверху; б – вид знизу

Рисунок 4.4 – Макет детекторного модуля

Випробування виробів на термоциклювання включали 70 термоциклів ($N_{\text{вип}}=70$) із тривалістю одного циклу $t_{\text{ц}} = 20$ хвилин, які склалися з періодів по 10 – 12 термоциклів у періоді. Після кожного випробувального періоду проводили:

- візуальний контроль зовнішнього вигляду виробу за допомогою мікроскопа МБС-9;

- контроль цілісності струмопровідних кіл.

За результатами перерахованих вище перевірок приймалося рішення про наявність відмови.

Як критерій відмови приймали стан виробу, для якого спостерігалися:

– істотна зміна зовнішнього вигляду всього виробу в цілому й нероз'ємних контактних з'єднаннях зокрема;

– розрив електричного кола, відсутність контактного з'єднання.

Після проведення випробувань на вплив циклічної зміни температури (70 циклів) при нормальному атмосферному тиску з параметрами випробувального режиму, наведеними на рис. 4.3, контроль зовнішнього вигляду продемонстрував лише деякий незначний вигин багат шарової плати.

Перевірка до випробувань і після випробувань цілісності електричних кіл, наявності контактних зварних з'єднань, також не виявили істотних змін (див. рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – Вимірювання електричного опору ланцюгів макета детекторного модуля

Таким чином, зміни зовнішнього вигляду, що спостерігалися, до електричної відмови не призвели. Можна вважати, що після впливу 70 термоциклів кількість відмов дорівнює нулю. З використанням виразу (4.4) можна розрахувати час безвідмовної роботи пристрою:

$$N_{\text{практ}} = \frac{833 \cdot N_{\text{вип}}}{365 \cdot 24} = \frac{833 \cdot 70}{365 \cdot 24} = 6,65 \text{ років.}$$

Оцінку інтенсивності відмов λ_2 в умовах експлуатації за результатами

прискорених випробувань невеликих вибірок з одиничними відмовами можна одержати за допомогою функції розподілу часу до відмови за критерієм χ^2 (хі-квадрат), що найбільш часто застосовується при оцінці надійності мікроелектронних виробів [29, 36] (4.10):

$$\lambda_2 = \frac{\chi^2}{2n \cdot t \cdot K_y}, \quad (4.10)$$

де n – кількість виробів (елементів, технологічних структур якості), які піддавалися прискореним випробуванням;

K_y – коефіцієнт прискорення інтенсивності відмов ($K_y = K_{ут} \cdot K_{yt} = 833$);

t – час випробувань.

Для невеликих вибірок виробів з одиничними відмовами використовують розрахунки за критерієм χ^2 при довірчих інтервалах 0,6 й 0,9 [29, 36]. При цьому, відповідно до ГОСТ 25359-82 [40], значення довірчої ймовірності 0,6 є більш переважним.

При нульовому числі відмов і довірчій ймовірності 0,6 значення критерію “хи – квадрат” $\chi^2 = 1,833$. Тоді при кількості випробовуваних виробів $n = 2$, коефіцієнті прискорення $K_y = K_{ут} \cdot K_{yt} = 833$, час випробувань $t = 70 \cdot 20 = 1400$ хв = 23,3 годин, інтенсивність відмов мікробірок λ_2 у робочих умовах, відповідно до виразу (4.10), дорівнює:

$$\lambda_2 = \frac{1,833}{2 \cdot 2 \cdot 23,3 \cdot 833} = 2,36 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}.$$

При цьому час наробку на відмову складе:

$$t_n = \frac{1}{\lambda_2} = \frac{1}{2,36 \cdot 10^{-5}} = 42354 \text{ год} = 4,8 \text{ років}.$$

Необхідно підкреслити, що наведене значення t_n свідомо занижене, оскільки через економічну доцільність для випробувань вибиралася мала кількість виробів ($n = 2$) і порівняно мала тривалість випробувань на циклічний вплив температур ($t=23,3$ години).

ВИСНОВКИ

В ході виконання магістерської кваліфікаційної роботи вирішено задачу теоретичного та експериментального дослідження створення конструктивно-технологічних рішень (КТР) алюміній – поліїмідних MAPS модулів для фізичних експериментів.

Отримано наступні основні результати.

Аналітичний огляд показав, що інноваційні повністю алюмінієві детекторні модулі на основі MAPS дозволять забезпечити рекордні для напівпровідникових детекторів показники: питому радіаційну довжину не більше ніж 0,1-0,2 % X_0 , просторову роздільну здатність до 5-10 мкм при мінімально можливій масі, суттєвому зменшенню електроспоживання і трудомісткості виготовлення модулів.

Удосконалено спосіб та розроблена технологічна послідовність виготовлення гнучкого лакофольгового шаруватого алюміній-поліїмідного матеріалу, який забезпечив використання простішої, відтворюваної технології виготовлення шаруватих матеріалів з необхідними параметрами, які працюють у діапазоні температур від -200°C до $+250^{\circ}\text{C}$.

За допомогою методу повнофакторного експерименту встановлено оптимальні значення режимів ультразвукового зварювання, які забезпечили міцність одержуваних мікроз'єднань на рівні 150 г.

Вибрані КТР макета типопредставника детекторного модуля на основі MAPS, розроблено ескізну конструкторську документацію та технологічну послідовність складання макета.

Відповідно до розроблених КТР та результатів проведених експериментальних досліджень було виготовлено компоненти та виконано складання макета детекторного модуля на виробничій базі ТОВ “Науково-виробниче підприємство “ЛТУ” (м. Харків, Україна).

Проведені прискорені випробування макета детекторного модуля впродовж 70 випробувальних термоциклів не викликали відмов, що

підтвердило на практиці вірність розроблених КТР. Розраховано час безвідмовної роботи пристрою, який склав 6,65 років.

Результати даної розробки мають перспективи практичного застосування для всіх областей радіаційного приладобудування, зокрема: індивідуальна дозиметрія; медична та промислова томографія; фізика високих енергій; апаратура космічного застосування.

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



ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Цитович А.П. Ядерная электроника / А.П. Цитович// Учебное пособие для вузов.– М.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
2. Чилингаров А.Г. Координатные полупроводниковые детекторы в физике элементарных частиц: Препр. / СО АН СССР. Институт ядерной физики;– Новосибирск: 1990. –65 с.
3. Волин М.Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре / 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Радио и связь,1981. – 296 с.
4. Князев А.Д., Кегичев Л.Н., Петров Б.В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. – М.: Радио и связь, 1982. – 224 с.
5. G. Onyshchenko N.Guriev. N. Starzhinskiy, I. Zenya, V. Ryzhikov, A. Zhukov, G. Bendeberya, N. Slipchenko, A. Galat. The use of chalcogenide scintillators on the basis of A₂B₆ compounds for sensors of ionizing radiations” SCINT-2013, Shanghai, China.
6. А.С. Сорока, Б.Г. Бородин, А.Б. Галат. Микроволновые детекторы ионизирующих излучений. ХНУРЭ, 2010.
7. Медведев А.М. Сборка и монтаж электронных устройств/А.М. Медведев// Москва: Техносфера, 2007. – 256 с.
8. Романова М.П. Сборка и монтаж интегральных микросхем: учебное пособие /М.П. Романова. – Ульяновск :УлГТУ, 2008. – 95 с.
9. Ланин В.Л., Достанко А.П., Телеш Е.В. Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники / В.Л. Ланин//Минск: Изд. ЦентрБГУ, 2007. – 574 с.
10. Б. С. Ишханов, И. М. Капитонов, Э. И. Кэбин. «Частицы и ядра. Эксперимент». М.: Издательство МГУ, 2005.
11. Technical Design Report of the Inner Tracking System (ITS) CERN /LHCC 99–12 ALICE TDR 4, 18 June 1999. – 360 p.

12. Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking System (ITS) CERN-LHCC-2013-024 / ALICE-TDR-017,29 November 2013.– 189 p.

13. Chris Damerell (from Rutherford Applied Laboratory (RAL)) “Tracking the rise of pixel detectors” 2 July 2021, Cerncourier magazine.

14. Медведев А., Мылов Г., Семенов П., Сержантов А. Конструирование гибких и гибко-жестких печатных плат/ А. Медведев// Компоненты и технологии.– 2008.- № 6.– С. 147-160.

15. Lutz J.R., Arnold L., Baudot I. et al. TAB bonded SSD module for the STAR and ALICE trackers // Proceedings of the fifth Workshop on Electronics for LHC Experiments, Crakow, Poland, 11 – 15 September. – 2000. – P. 152-156.

16. Замирец Н.В., Борщев В.Н., Листратенко А.М., Антонова В.А., Семенов Л.П., Проценко М.А., Тымчук И.Т. Алюминиевая "Chip on flex" (COF) технология в радиационном приборостроении/ Н.В. Замирец// Технология приборостроения. – 2007. – № 2. – С. 3-9.

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

18. Достанко А.П., Пикуль М.И., Хмыль А.А. Технология производства ЭВМ.– Мн.: Вышэйшая школа, 2004. – 347 с.

19. Технология поверхностного монтажа: Учеб.пособие / Кундас С.П., Достанко А.П., Ануфриев Л.П. и др. – Мн.: «Армита – Маркетинг, Менеджмент», 2000.

20. Технология радиоэлектронных устройств и автоматизация производства: Учебник/ А.П. Достанко, В.Л. Ланин, А.А. Хмыль, Л.П. Ануфриев; Под общ. ред. А.П. Достанко. – Мн.: Выш. шк., 2002.

21. The ALICE Collaboration . The ALICE experiment at the CERN LHC// Journal of Instrumentation, 3 S08002 – 2008 -159 с.

22. Патент РФ №2021150 «Способ получения фольгированного полиимида» МПК В32В31/08, дата публикации 15.10.1994г.

23. Патент РФ №2240921 «Способ получения гибкого лакофольгового материала» МПК В32В15/08, дата публикации 27.11.2004г.

24. Патент Украины на полезную модель № 119126 «Способ изготовления гибкого слоистого материала для изделий на основе фольги». Дата регистрации 11.09.2017г.

25. С.Ф. Сенько, А.В. Емельянов. Влияние режимов формирования полиимидной пленки на электрофизические характеристики многоуровневой металлизации субмикронных БИС, Физико-технический институт НАН Беларуси, НПО «Интеграл».

26. Соколовская И.Ю. Полный факторный эксперимент. Методические указания для самостоятельной работы студентов. – Новосибирск: НГАВТ, 2010. – 36 с.

27. ГОСТ 10316-78 Гетинакс и стеклотекстолит фольгированные. Технические условия. Министерство электротехнической промышленности СССР. 1979 г.

28. IPC-TM-650 Test methods manual. – 11 p.

29. Стрельников В. П., Федухин А. В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – Киев: Логос, 2002. – 483 с.

30. Карташов Г. Д. Форсированные испытания. Надежность технических систем. Справочник / Под ред. И. А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 352 с.

31. Федухин А. В. Методы ускоренной оценки надежности СВТ. Классификация, основные понятия и определения // Математические машины и системы. – 2001. – № 1, 2. – С. 194 – 204.

32. Пешес Л. Я., Степанова М. Д. Основы теории ускоренных испытаний на надежность. – Минск: Наука и техника, 1972. – 168 с.

33. ALICE Tehnical Desinge Report on Forward Detectors: FMD, TO and VO//CERN – LHCC –2004-025, ALICE TRD – 011, 10 September 2004.

34. ГОСТ 28209-89 (МЭК 68-2-14-84). Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Испытание N: смена температуры. –М.: Изд-во стандартов, 1989. – 16 с.

35. ECSS-Q-70-71A Space product accuracy. Data for selection of space materials and processes. – 130 p

36. MIL-STD-883 E Test Method Standart Microcircuit. Method 1010. 7–Temperature cycling. – 5 p.

37. Форсированные испытания гибридных микросборок // В. А. Антонова, В. Н. Борщев, Г. В. Буеров, Д. В. Исиченко, Л. В. Климова, Я. Я. Костышин, А. М. Листратенко, М. А. Проценко // Технология приборостроения. – 2003. – № 1. – С. 52 – 55.

38. Романов В. Количественная оценка надежности интегральных схем по результатам форсированных испытаний // Chip-News Украина / Инженерная микроэлектроника. – 2003. – № 10 (30). – С. 7 – 9.

39. Дульнев Р. А., Котов П. И. Термическая усталость металлов. – М.: Машиностроение. – 1980. – 2000 с.

40. ГОСТ 25359-82 Изделия электронной техники. Общие требования по надежности и методы испытаний.