

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

**ТИМЧУК ІГОР ТРОХИМОВИЧ**

УДК 621.3.049.7

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
ВИРОБНИЦТВА КОМПОНЕНТІВ СЕНСОРНИХ СИСТЕМ  
ДЕТЕКТУВАННЯ ФІЗИЧНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків 2019

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор,  
Лауреат Державної премії в галузі науки і  
техніки України

**Невлюдов Ігор Шакирович,**  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки, завідувач кафедри  
комп'ютерно-інтегрованих технологій,  
автоматизації та мехатроніки.

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

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

Захист відбудеться « 19 » грудня 2019 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, проспект Науки, 14.

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

Автореферат розіслано « 15 » листопада 2019 р.

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

Є. А. Разумов-Фризюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Одними з найголовніших завдань у процесі створення сенсорних систем детектування часток сучасних фізичних експериментів є підвищення їх роздільної здатності та забезпечення мінімізації маси матеріалу в об'ємі детектування. Вирішення цих завдань можливе за рахунок розробки новітніх високотехнологічних детекторних модулів (ДМ) і компонентів детекторних лінійок (ДЛ) з використанням найновітніших надтонких (50-100 мкм) напівпровідникових сенсорів і розробки нових компонентів ДМ та ДЛ на основі елементів комутації з безадгезивних лакофольгових діелектриків з провідним алюмінієвим шаром і діелектричним поліімідним шаром.

Аналіз стану проблеми дозволив зробити висновок, що, незважаючи на суттєві досягнення у галузі створення ДМ, ДЛ та їх компонентів, питання створення нових конструктивів і розробки нових наукових положень із вдосконалення технології виготовлення елементів комутації та матеріалів для їх реалізації не повністю вивчені, деталізовані та реалізовані. Так для створення новітніх детекторних установок відсутній підхід, що орієнтується на теоретичному обґрунтуванні принципів створення оптимальних конструктивно-технологічних рішень (КТР) високотехнологічних багатокомпонентних кабелів живлення (КЖ), що забезпечуватимуть необхідне мінімальне падіння напруги живлення компонентів сенсорних систем детектування відповідно до критеріїв мінімізації маси в робочому об'ємі детекторного блока та підвищення ступеня відповідності експлуатаційних параметрів заданим значенням.

Так, однією з особливостей створення зовнішніх детекторних шарів модернізованої Внутрішньої Трекової Системи (ВТС) експерименту ALICE у Європейській організації з ядерних досліджень CERN (Швейцарія) є значна довжина (біля 1,5 м) детекторних лінійок. При цьому, для функціонування сенсорів, має бути забезпечено падіння напруги живлення не більше 0,1 В на всій довжині ДЛ. Водночас, компоненти, що використовуються, мають бути реалізовані з матеріалів, які забезпечуватимуть мінімізацію маси речовини в об'ємі детектування. Для реалізації вищевказаних завдань необхідно виконати теоретичні й практичні дослідження технологій створення таких КЖ та матеріалів для їх реалізації. Також, враховуючи конструктивну складність і високу вартість ДЛ для ВТС, ще одним з важливих завдань є розробка КТР КЖ, що передбачатимуть, за необхідності, можливість ремонту або заміни ДМ у складі ДЛ. Для вирішення цього завдання необхідно розробити концепцію складання таких ДЛ.

Іншим ключовим аспектом створення зовнішніх детекторних шарів модернізованої ВТС експерименту ALICE та експерименту Mu3e є вибір та обґрунтування конструктивно-технологічних рішень створення удосконалених детекторних модулів для забезпечення радіаційної довжини модулів на рівні 0,1-0,2  $X_0$ . Для реалізації вищевказаного завдання необхідно виконати теоретичні та практичні дослідження технологічних процесів (ТП) створення таких модулів та їх компонентів.

При цьому, дотепер, номенклатура наявних алюміній-поліімідних матеріалів є надзвичайно малою та недостатньою для реалізації компонентів сенсорних систем,

що обумовлює необхідність розробки нових та удосконалення існуючих технологічних процесів створення таких матеріалів і виробів на їх основі.

Тобто, незважаючи на значні досягнення у створенні детекторних систем фізичних експериментів, залишається протиріччя між необхідністю забезпечення параметрів функціонування та якості компонентів детекторних систем і водночас мінімізацією їх маси для зменшення впливу на інформативність досліджень і обмеженістю наявних матеріалів та рішень до конструктивно-технологічного забезпечення виробництва компонентів таких систем.

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

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Наукові дослідження дисертаційної роботи проводилися у Харківському національному університеті радіоелектроніки (ХНУРЕ) та у ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ». Результати дисертаційної роботи отримано в рамках таких науково-дослідних робіт:

– НДР «Створення мікромініатюрних компонентів електромеханічних інтелектуальних технологічних засобів промислового обладнання та робототехніки» (ДР №0115U002433), *замовник Міністерство освіти і науки України;*

– НДР «Розробка, моделювання та дослідження новітніх конструктивно-технологічних рішень детекторних модулів для систем детектування експериментів у галузі фізики високих енергій» (ДР №0113U008109), *замовник Державне агентство з питань науки, інновацій та інформатизації України;*

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

– НДР «Розробка технології виготовлення мікрокабелів для проекту ALICE» (ДР №0104U006372), *замовник Міністерство освіти і науки України.*

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

**Мета роботи та задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є створення високотехнологічних компонентів сенсорних систем детектування фізичних експериментів (на прикладі зовнішніх детекторних шарів Внутрішньої Трекової Системи експерименту ALICE та внутрішніх шарів експерименту Mu3e) за рахунок розробки технологічних процесів виготовлення безадгезивних плівкових алюміній-поліімідних матеріалів та виробництва компонентів детекторних лінійок, з метою мінімізації маси матеріалу в об'ємі детектування та забезпечення необхідних електричних параметрів компонентів для функціонування чутливих елементів.

Досягнення поставленої мети роботи досягається шляхом вирішення таких завдань:

– аналіз вихідних даних і вимог для удосконалення ВТС експерименту ALICE та аналіз вимог до ДЛ для створення зовнішніх детекторних шарів;

– розробка ТП складання детекторного модуля на основі надсучасних кремнієвих MAPS сенсорів із використанням повністю алюмінієвої технології складання «Chip-on-flex» (COF);

- розробка моделі впливу розмірів елементів гнучких плат в області зварювання на надійність міжшарового з'єднання у компонентах ДЛ;
- створення фізико-топологічної моделі КЖ та моделювання електричних параметрів кабелю;
- розробка технологічного процесу складання КЖ;
- математичне моделювання та вибір параметрів двошарових алюміній-поліімідних матеріалів для реалізації шарів кабелю живлення для ДЛ;
- дослідження залежності усадки компонентів (одношарових елементів комутації) ДЛ у процесі їх виробництва від товщини діелектричних і провідникових шарів;
- розробка нового технологічного процесу створення тришарового матеріалу поліімід-алюміній-поліімід та ТП виготовлення компонентів ДЛ на його основі;
- експериментальні дослідження макетів і прототипів ДМ, КЖ та ДЛ.

**Об'єкт дослідження** – технологічні процеси виготовлення детекторних лінійок для детекторних систем фізичних експериментів.

**Предмет дослідження** – параметри технологічних процесів виготовлення компонентів детекторних лінійок для детекторних систем фізичних експериментів.

**Методи досліджень.** Під час проведення дисертаційних досліджень використовувалися: методи математичного та комп'ютерного моделювання – для розробки моделі впливу розмірів елементів на надійність міжшарового з'єднання у багатошарових елементах комутації; теорія пружності – для розробки моделі вигину двошарових фольгових структур діелектрик-метал; положення теорії факторного експерименту – для визначення залежності усадки компонентів (одношарових елементів комутації) ДЛ у процесі їх виробництві від товщини діелектричних і провідникових шарів; метод експериментальних досліджень і статистичний аналіз отриманих результатів.

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

- вперше розроблені ТП виготовлення КЖ для практичної реалізації систем детектування фізичних експериментів (детекторної лінійки довжиною понад 1,5 м для зовнішніх MAPS детекторних шарів удосконаленої ВТС експерименту ALICE) з використанням спеціалізованих кабелів живлення, що дозволили забезпечити падіння напруги живлення для сенсорів не більше 0,1 В на довжині 1,5 м з мінімальною масою матеріалу ( $\sim 0,3 X_0$ ) в об'ємі детектування;
- удосконалено ТП виготовлення ДМ на основі новітніх MAPS сенсорів, що дозволили реалізувати надлегкі ДМ для експериментів ALICE та Mu3e з радіаційною довжиною 0,1-0,2  $X_0$ , що вдвічі-втричі краще ніж у існуючих аналогів;
- удосконалено модель впливу розмірів елементів на надійність міжшарового з'єднання у багатошарових елементах комутації для використання під час складання компонентів ДЛ, що дозволило визначити конструктивні обмеження компонентів ДЛ які були впроваджені у виробництво компонентів ДЛ;
- удосконалено модель вигину гнучкого двошарового матеріалу діелектрик-провідник для застосування під час виготовлення алюміній-поліімідного матеріалу, в якій на відміну від існуючої, розглянуто спільну дію температури і механічної

сили, що дозволило визначити оптимальні параметри товщин шарів у процесі виготовлення вихідного матеріалу для створення компонентів ДЛ;

- удосконалено модель усадки компонентів (одношарових елементів комутації) ДЛ у процесі їх виробництва від товщини діелектричних і провідникових шарів, що дозволило визначити конструктивні обмеження для розробки компонентів ДЛ і ДМ та забезпечити виробництво якісних компонентів ДЛ;

- удосконалено ТП виготовлення виробів на основі двошарових алюміній-поліімідних безадгезивних матеріалів для реалізації КЖ, що дозволило виготовляти вироби з мінімальною шириною провідникових елементів 200 мкм за товщини шару алюмінієвої фольги 100 мкм та проміжку між провідниками 150-200 мкм, які були використані при створенні КЖ;

- вперше розроблено ТП виготовлення тришарового безадгезивного матеріалу поліімід-алюміній-поліімід і ТП виготовлення гнучких компонентів з зазначеного матеріалу, що дозволило виготовляти вироби з алюмінієвої фольги із двосторонньою ізоляцією поліімідом, а саме поперечні кабелі для ДЛ експерименту ALICE.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Практичне значення мають такі результати дисертаційної роботи:

- розроблено та впроваджено у виробництво ТП створення компонентів ДЛ для практичної реалізації детекторної лінійки довжиною понад 1,5 м для зовнішніх MAPS детекторних шарів удосконаленої ВТС експерименту ALICE;

- розроблено, відпрацьовано та впроваджено у виробництво ТП виготовлення тришарового безадгезивного матеріалу поліімід-алюміній-поліімід та ТП виготовлення компонентів ДЛ на основі тришарового безадгезивного матеріалу для зовнішніх детекторних шарів експерименту ALICE;

- впроваджено у виробництво ТП виготовлення безадгезивного алюміній-поліімідного матеріалу з товщиною провідникових шарів 50-100 мкм;

- розроблено і впроваджено у виробництво кабель живлення для забезпечення живлення новітніх сенсорів у складі ДЛ зовнішніх шарів експерименту ALICE;

- отримані практичні результати дозволили здійснити постачання біля 16 тисяч високотехнологічних компонентів вітчизняними підприємствами для створення удосконаленої ВТС експерименту ALICE вартістю понад 200 тис. євро.

Результати досліджень впроваджено на вітчизняних підприємствах, таких як ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ» (м. Харків) та ДП «Науково-дослідний інститут мікроприладів» (м. Київ), а також у науково-дослідних інститутах Європи, а саме у NIKHEF (Національний інститут субатомної фізики, англ. National Institute for Subatomic Physics, Нідерланди), та США у LBNL (Національна лабораторія ім. Лоуренса в Берклі, англ. Lawrence Berkeley National Laboratory, США), і у навчальному процесі на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки ХНУРЕ, що підтверджено відповідними актами.

Також результати дисертаційної роботи використано під час виконання таких дослідно-конструкторських робіт (ДКР):

- ДКР з розробки та поставки силових кабелів (кабелів живлення), кабелів зміщення та поперечних кабелів (контракти № СА6934581 від 15 вересня 2017 р. та

№ SA7063678 від 16 січня 2018 р) – замовник Європейська організація з ядерних досліджень (CERN), (м. Женева, Швейцарія);

– ДКР з виготовлення та постачання гнучких друкованих плат з алюмінієвим провідним шаром та демонстраторів (контракт №043018 від 30 квітня 2018 р.) – замовник Інститут Фізики Гайдельбергського Університету (м. Гайдельберг, Німеччина).

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

**Особистий внесок здобувача** полягає в постановці й обґрунтуванні завдань дослідження, виборі об'єкта, предмету та методів досліджень, обґрунтуванні результатів досліджень. Вирішення завдань, що представлені в роботі, виконані автором самостійно або за його безпосередньої участі. Дисертант вирішував питання розробки, дослідження та реалізації компонентів і прототипів компонентів ДЛ та ДМ [1-3, 6, 7, 15-17, 18], розробки та дослідження матеріалів [4, 11, 14], розробки та удосконалення ТП виготовлення та складання компонентів ДЛ [5, 8-10, 12-13, 19-26]. Здобувач брав особисту участь в обробці й обговоренні результатів, підготовці публікацій і в усіх етапах впровадження у виробництво отриманих результатів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних та всеукраїнських науково-технічних і науково-практичних конференціях із публікацією у відповідних збірниках: 11-th Workshop on electronics for LHC and future Experiments (2005, м. Гейдельберг, Німеччина); IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2009, м. Орlando, штат Флоріда, США; 2010, м. Ноксвілл, штат Теннессі, США); XIV, XV, XVI та XVII конференції з фізики високих енергій, ядерної фізики та прискорювачів (2016, 2017, 2018, 2019 рр., м. Харків, Україна).

**Публікації.** Результати досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано в 21 наукові праці (серед них 6 включено до міжнародної науково-метричної бази даних Scopus), у тому числі 3 статті у закордонних журналах та 7 – у збірниках тез доповідей на міжнародних і всеукраїнських конференціях. Серед публікацій – 6 статей у наукових фахових виданнях України з технічних наук. Результати досліджень також були захищені 5 патентами України (з яких 1 заявка на патент України). Також результати роботи обговорювалися в рамках 6 міжнародних науково-технічних семінарів і пленарних засідань у CERN в рамках проекту ALICE ITS Upgrade.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків і списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 178 сторінок, з них 8 сторінок – список використаних джерел (75 найменувань) та 5 сторінок - 1 додаток. Дисертація містить 64 рисунки та 24 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У першому розділі, що має оглядово-аналітичний характер, розглянуто шляхи удосконалення ВТС міжнародного експерименту ALICE у CERN, проведено огляд та аналіз вимог до компонентів ВТС. На основі проведеного аналізу визначено, що ВТС включає кілька детекторних шарів, які реалізуються за рахунок створення ДЛ довжиною до 1,5 м. Головними ключовими частинами, що впливають на мінімізацію речовини в об'ємі детектування, і, як результат, впливають на інформативність та достовірність досліджень, є ДМ та КЖ. Поведений огляд та аналіз дозволив розробити концепцію створення компонентів ДЛ для забезпечення відповідності вимогам ВТС та сформулювати основні завдання дослідження.

У другому розділі розроблено КТР кабелю живлення для ВТС експерименту ALICE, головними особливостями яких є:

- усі компоненти КЖ реалізуються з матеріалів, що дозволять мінімізувати масу речовини в об'ємі детектування (безадгезивні алюміній-поліімідні діелектрики, поліімідні плівки);
- КЖ включає два провідних шари (заземлення та шар кіл живлення) та обертаючі шари для з'єднання з ДМ у ДЛ;
- провідний шар заземлення реалізовано як суцільний шар, а провідний шар кіл живлення реалізовано у вигляді сегментованого виробу;
- зовнішні контактні області КЖ реалізовано з використанням зовнішніх обертаючих кабелів;
- електричне з'єднання компонентів КЖ здійснюється методом ультразвукового зварювання;
- з'єднання КЖ з ДМ у ДЛ здійснюється за рахунок застосування спеціалізованих поперечних кабелів, що забезпечують ремонтпридатність ДЛ.

З урахуванням розробленої концепції реалізації ДЛ, КТР КЖ та вимоги щодо необхідності забезпечення падіння напруги живлення для ДМ у ДЛ не більше 0,1 В (за довжини біля 1,5 м) розроблено фізико-топологічну модель КЖ, що дозволила визначити необхідні конструктивні особливості компонентів КЖ та обрати матеріали, які дозволять реалізувати КЖ. Особливістю моделі для КЖ є те, що поверхня провідного шару кіл живлення максимально заповнена провідним алюмінієвим шаром. Схематично фрагмент топології провідного шару наведено на рис.1. У процесі моделювання параметрів КЖ враховується використання міжсегментних кабелів і зовнішніх обертаючих шарів.

Під час моделювання падіння напруги на КЖ враховується, що додаткове падіння напруги буде на поперечних кабелях і додатковому вихідному кабелі і становитиме біля 20 мВ, тому падіння напруги на КЖ не має перевищувати 80 мВ.



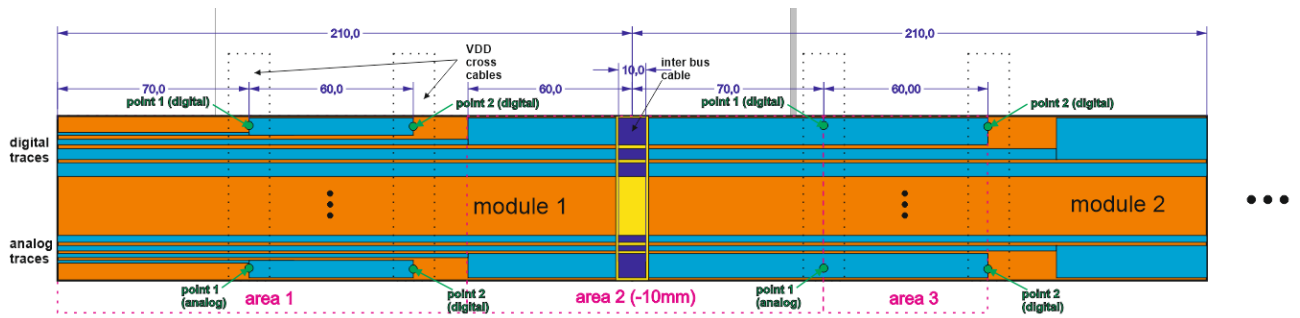


Рисунок 1 – Фрагмент топології КЖ, використаний під час моделювання параметрів кабелю

Моделювання параметрів КЖ здійснюється для аналогових і цифрових кіл живлення за значень струмів  $I_{\psi}=0,8$  А,  $I_a=0,18$  А (згідно з вимогами BTC ALICE). Також для порівняння, моделювання здійснювалося для варіанта КЖ сегментованого та суцільного (верхні шари живлення) для визначення різниці показників.

Результати розрахунків і моделювання параметрів КЖ наведено на рис. 2.

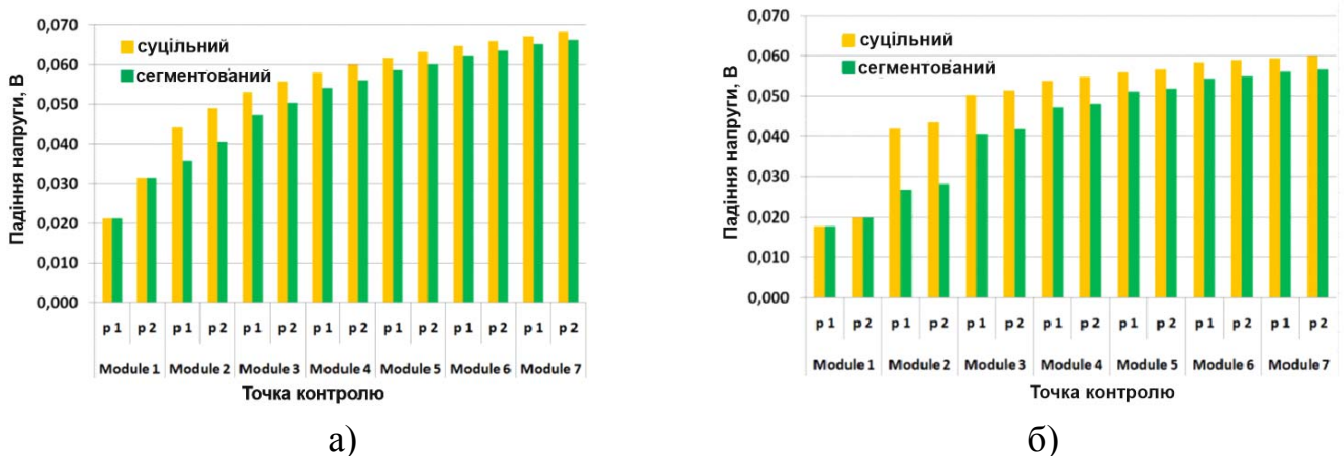


Рисунок 2 – Результати моделювання параметрів (падіння напруги) КЖ:  
а) цифрові кола; б) аналогові кола

Проведені розрахунки та моделювання дозволили визначити, що:

- товщина провідних шарів КЖ (шари заземлення та кіл живлення) – 100 мкм;
- матеріал провідних шарів – алюміній;
- обрані конструктивні параметри КЖ та матеріали дозволяють забезпечити падіння напруги живлення для 7-го модуля  $<70$  мВ (за  $I_{\psi}=0,8$  А,  $I_a=0,18$  А).

Враховуючи вищенаведені результати розрахунків і моделювання параметрів кабелів живлення, наявних алюміній-поліімідних матеріалів (товщина алюмінію 14 мкм і 30 мкм) визначено необхідність створення нових алюміній-поліімідних безадгезивних матеріалів з товщиною алюмінієвої фольги 100 мкм.

Проведений аналіз існуючих технологій, матеріалів та вимог для компонентів КЖ дозволив розробити ТП виготовлення двошарового алюміній-поліімідного матеріалу з товщиною алюмінієвої фольги 100 мкм з використанням аплікатору. Розроблений ТП включає такі технологічні операції:

- хімічне очищення підкладки у розчині NaOH за  $T = 50$  °C,  $t = 10$  с;

- нанесення рідкого поліімідного лаку аплікатором, товщина щілини 20 товщин покриття, швидкість переміщення аплікатору 2 см/с;
- попереднє підсушування підкладки за  $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$  протягом  $t = 10\text{ хв}$ ;
- імідизація поліімідного шару за  $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$  протягом  $t = 30\text{ хв}$ ;
- вихідний контроль підкладки.

Для нанесення використовується рідкий поліімідний електроізоляційний лак АД-9103 ИС, що призначений для виробництва поліімідних плівок та фольгованих діелектриків.

Розроблено ТП та впроваджено у виробництво компонентів КЖ.

На основі отриманих результатів моделювання, концепції реалізації компонентів детекторної лінійки, обраних матеріалів розроблено ТП складання КЖ на основі склеювання, ультразвукового зварювання та паяння.

ТП складання включає такі етапи та операції:

- 1) виготовлення компонентів (провідні шари, захисні шари, зовнішні шари, міжсегментні кабелі);
- 2) складання верхніх сегментів (приклеювання захисних шарів, приклеювання, зварювання зовнішніх шарів);
- 3) монтаж верхніх складених сегментів на нижній шар (склеювання верхніх сегментів на нижній шар, склеювання та зварювання поперечних кабелів, склеювання захисних шарів тильних);
- 4) монтаж міжсегментних кабелів (приклеювання, зварювання міжсегментних кабелів, приклеювання захисних міжсегментних шарів);
- 5) монтаж навісних компонентів;
- 6) вихідний контроль (геометричних розмірів, електричних параметрів).

Розроблений ТП складання кабелю живлення відпрацьований та впроваджений у виробництво компонентів ДЛ для ВТС експерименту ALICE.

Оцінюючи вищенаведені результати, можна зробити висновок, що завдання досягнуто та КТР КЖ розроблено.

**Третій розділ** присвячений удосконаленню існуючих ТП виготовлення компонентів ДЛ на основі безадгезивних алюміній-поліімідних матеріалів та розробці новітніх матеріалів і ТП виготовлення компонентів ДЛ на їх основі.

Як було вказано в розділі 2, для реалізації КЖ для ВТС експерименту ALICE із забезпеченням необхідного низького рівня падіння напруги розроблено ТП виготовлення двошарового безадгезивного алюміній-поліімідного матеріалу з товщиною алюмінієвої фольги 100 мкм. У ході відпрацювання ТП було відзначено складнощі, які обумовлені зміною форми (згортанням) підкладок алюміній-поліімідного матеріалу залежно від товщини поліімідного покриття після термообробки (імідизації) підкладки. Такий недолік унеможлилював або значно ускладнював подальший процес виготовлення компонентів (гнучких плат) для КЖ. Для усунення або мінімізації вищевказаної проблеми удосконалено математичну модель вигину, викликаного зміною температури в процесі виготовлення двошарових плівкових безадгезивних алюміній-поліімідних структур. Різні коефіцієнти лінійного розширення шарів призводять до порушення компланарності структури. Встановлено зв'язок вигину поліімід-алюмінієвої структури з параметрами матеріалів, розмірами шарів і змінами температури.

Існуюча модель використовує загальні гіпотези теорії вигину про існування нейтрального шару вигнутої структури, нормальності та відсутності вигину всіх нормалей до деформованої нейтральної поверхні та відсутності тиску сусідніх шарів один на одного (рис. 3).

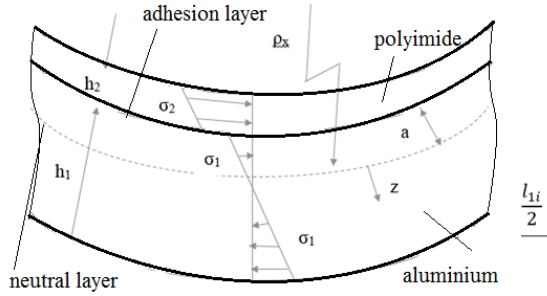


Рисунок 3 – Вигнута двошарова структура: характерні шарі, розміри та напруження в шарах

однаковими. Індекс  $t$  віднесено до температурної дії,  $M$  – дії механічної сили. Для алюмінієвого шару:  $\varepsilon_1^{t+M} = \frac{\sigma_1}{E_1} + \alpha_1 \cdot \Delta t$ , для поліімідного шару:  $\varepsilon_2^{t+M} = \frac{\sigma_2}{E_2} + \alpha_2 \cdot \Delta t$ . Більш того, нормальні сили в структурі дорівнюють нулю  $F = \sigma_1^{(t+M)} \cdot h_1 + \sigma_2^{(t+M)} \cdot h_2 = 0$ . Рішення системи вищенаведених рівнянь дає

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1^{(t+M)} &= - \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta t}{h_1 \cdot \left( \frac{1}{E_1 \cdot h_1} + \frac{1}{E_2 \cdot h_2} \right)} \\ \sigma_2^{(t+M)} &= - \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta t}{h_2 \cdot \left( \frac{1}{E_1 \cdot h_1} + \frac{1}{E_2 \cdot h_2} \right)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Підсумовування напружень  $\sigma_1^{t+M}$  і  $\sigma_2^{t+M}$  за товщиною шарів  $h_1$  і  $h_2$  призводить до пари сил з плечем  $\frac{h_1 + h_2}{2}$ . Момент пари сил дорівнює:  $M_x^{t+M} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \Delta t}{\left( \frac{1}{E_1 \cdot h_1} + \frac{1}{E_2 \cdot h_2} \right)} \cdot \frac{(h_1 + h_2)}{2}$

Тепер можливо виділити дію вигину за рахунок температури:  $M_x^{(1)} = M_x^{(t+M)} - M_x^{(M)}$

Величина напружень, які викликані зміною температури, розраховується у вигляді різниці  $\sigma_i^{(t+M)}$  та  $\sigma_i^M$ :

$$\sigma_1^{(t)} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta t}{h_1 \cdot \left( \frac{1}{E_1 \cdot h_1} + \frac{1}{E_2 \cdot h_2} \right)} \cdot \left[ \frac{1}{h_1} - \frac{(h_1 + h_2) \cdot E_1 \cdot z}{2 \cdot (E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2)} \right], \quad (2)$$

$$\sigma_2^{(t)} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta t}{h_2 \cdot \left( \frac{1}{E_1 \cdot h_1} + \frac{1}{E_2 \cdot h_2} \right)} \cdot \left[ \frac{1}{h_2} + \frac{(h_1 + h_2) \cdot E_2 \cdot z}{2 \cdot (E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2)} \right]. \quad (3)$$

Кривизна структури поліімід-алюміній у процесі охолодження  $\Delta t$  від температури імідизації до нормальної температури визначається виразом

$$\frac{1^{(v)}}{\rho_x} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta t \cdot (h_1 + h_2)}{2 \cdot \left( \frac{1}{E_1 \cdot h_1} + \frac{1}{E_2 \cdot h_2} \right) \cdot (E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2)} \quad (4)$$

Ця математична модель двошарових алюміній-поліімідних структур пов'язує механічний момент вигину зі зміною температури, конструктивними розмірами та параметрами пружних шарів. Це дозволяє розрахувати всі параметри напружено-деформованого стану двошарової структури: радіус кривизни, положення нейтральної поверхні щодо адгезійної поверхні шарів, розподілу напружень і сил, що діють у матеріалах. Окрім цього, розроблена модель може бути використана під час створення не лише алюміній-поліімідних матеріалів, а й інших двошарових безадгезивних плівкових матеріалів (наприклад, нікель-поліімідних матеріалів для гнучких нагрівачів наземного та космічного призначення).

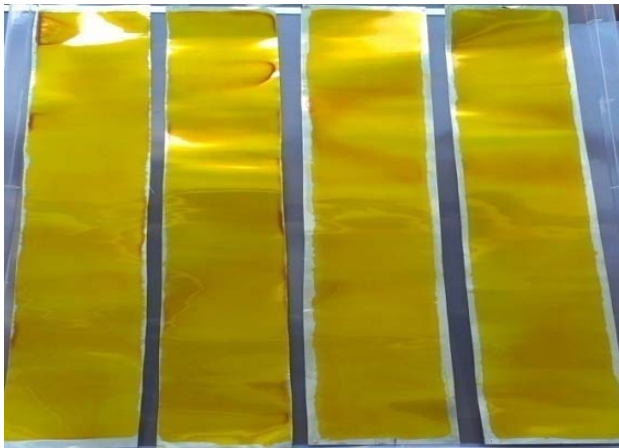


Рисунок 4 – Зразки вихідного алюміній-поліімідного матеріалу для виготовлення компонентів кабелів живлення з товщиною шару алюмінію 100 мкм (розмір підкладок 120 мм × 500 мм)

Розроблена математична модель разом з експериментальними дослідженнями зразків алюміній-поліімідних матеріалів з різною товщиною фольги та поліімідного шару дозволили визначити оптимальні практичні товщини поліімідного шару для алюмінієвої фольги різної товщини: алюміній 100 мкм – поліімід 25-30 мкм, алюміній 50 мкм – поліімід 15-20 мкм, алюміній 30 мкм – поліімід 8-10 мкм.

Результати досліджень впроваджені у виробництво, а саме у виробництво вихідного матеріалу для верхніх шарів КЖ (шар кіл живлення). Зразки вихідного матеріалу наведено на рис. 4.

Результати розробки ТП (описано в розділі 2) та конструктивних параметрів алюміній-поліімідних матеріалів дозволили впровадити у виробництво вихідний матеріал компонентів кабелів живлення. При цьому для виготовлення компонентів кабелів живлення на основі безадгезивних алюміній-поліімідних матеріалів з товщиною фольги 100 мкм і мінімальною шириною провідника біля 200 мкм з відстанню між сусідніми провідниками 200 мкм необхідним виявилось удосконалення існуючого ТП.

Для виготовлення подібних виробів використовуються методи фотолітографії та хімічного рідинного травлення. Основні етапи ТП виготовлення компонентів КЖ з алюміній-поліімідних матеріалів наведено на рис. 5.

Під час застосування стандартних методів рідинного хімічного травління у процесі виготовлення компонентів КЖ виникають труднощі, пов'язані з тим, що

мінімальний проміжок між провідниковими елементами та мінімальна ширина провідника становлять 200 мкм за товщини провідного шару 100 мкм.

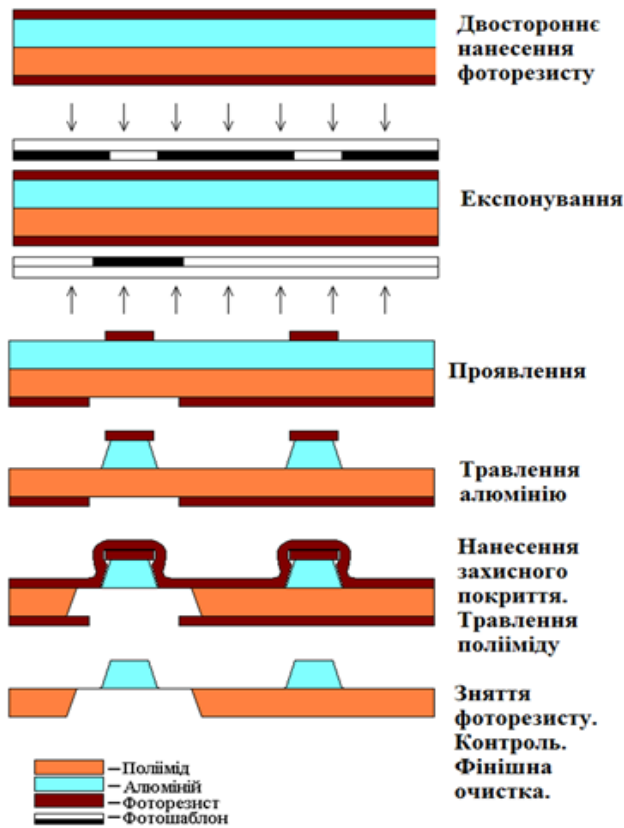


Рисунок 5 – Технологічний процес виготовлення компонентів КЖ з алюміній-поліїмідних діелектриків

режими операцій, що наведені на рис. 6.

При розробці ТП було отримано наступні удосконалені технологічні травники та режими для наступних операцій:

1) травління алюмінієвого шару: травник 2 об.час.  $\text{H}_3\text{PO}_4$  : 1 об.час.  $\text{CH}_3\text{COOH}$  : 3% об. ПАВ ОС-20 (розчин 0,1%): 3% об.  $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ ,  $T = 96^\circ\text{C}$ ,  $t = 17$  хв;

2) травління поліїмідного шару: травник 300г  $\text{KOH}$ : 350мл  $\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$ : 75мл  $\text{C}_6\text{H}_{15}\text{NO}_3 + 250$  мл  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $T = 80^\circ\text{C}$ ,  $t = 120$  с;

3) вихідне хімічне очищення: травник 500мл  $\text{H}_3\text{PO}_4$ : 300мл  $\text{CH}_3\text{COOH}$ : 100  $\text{H}_2\text{O}$ : 1,5мл ПАВ ОС-20 (розчин 1%),  $T = 80^\circ\text{C}$ ,  $t = 5$  с.

Впровадження у виробництва вищенаведеного удосконаленого технологічного процесу дозволило забезпечити виготовлення компонентів КЖ з товщиною провідного шару 100 мкм із мінімальною шириною провідникового елемента 200 мкм та відстанню між сусідніми провідниками 200 мкм (рис. 7).

Для реалізації таких виробів необхідним є вибір оптимальних технологічних режимів формування фоторезистивної маски та оптимізація факторів, що визначають швидкість і селективність процесу травлення, а саме:

– вибір складу травника для відтворення розмірів і профілю країв елементів;

– вибір ефективних поверхнево-активних речовин (ПАР) і дослідження їх впливу на процес травлення та дослідження їх впливу на процес травління,

– оптимізація температурних режимів процесу травління провідних шарів.

Проведені дослідження та оптимізація ТП виготовлення компонентів КЖ з товщиною провідного шару 100 мкм дозволили визначити необхідні технологічні

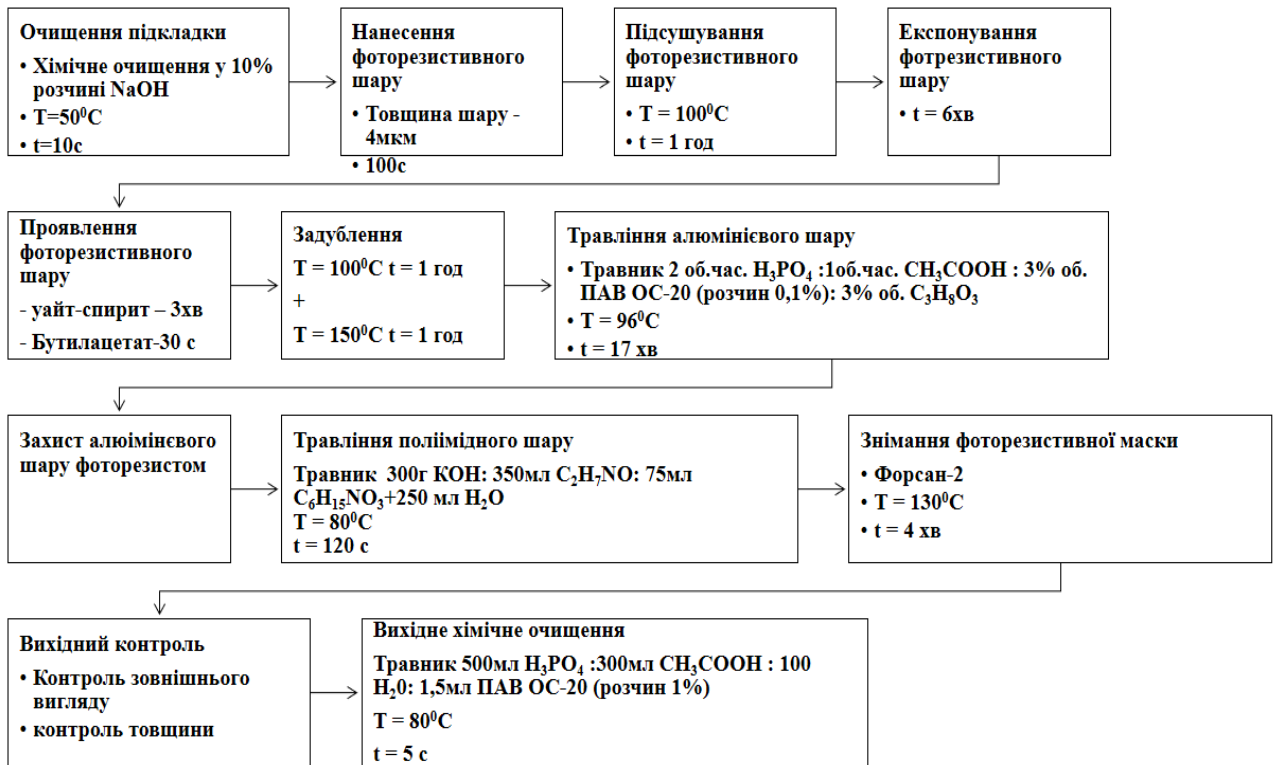


Рисунок 6 – Технологічний процес виготовлення компонентів КЖ з уточненими та оптимізованими технологічними режимами та травниками

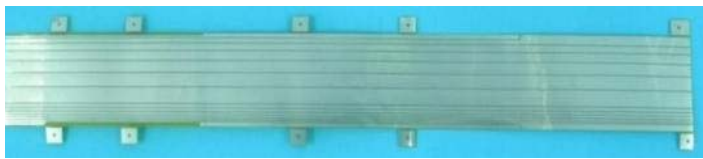


Рисунок 7 – Дослідний зразок сегменту верхнього шару кіл живлення кабелю живлення (мінімальна ширина провідника 200 мкм, товщина провідного шару 100 мкм)

Під час створення компонентів кабелів живлення, особливо в процесі подальшого їх складання, надзвичайно важливим є забезпечення розмірної стабільності та повторюваності таких виробів. Як відомо, алюміній-поліімідні матеріали характеризуються усадкою (зменшенням розмірів), що насамперед обумовлено значною

кількістю термообробок і видаленням диметилформаміду з поліімідного шару, тому надзвичайно важливим є прогнозування розмірів виробів, що будуть отримані після виготовлення, на етапі розробки та проектування.

Для вирішення вищевказаної проблеми за результатами повного факторного експерименту розроблено експериментально-статистичну модель впливу товщини поліімідного шару на усадку розмірів шлейфів залежно від розмірів елементів (ступеня витравлювання алюмінієвого шару) та товщини фольги:

$$\hat{y} = 77,425 - 12,5x_1 + 43,5x_2 + 26,425x_3 + 4,65x_2x_3,$$

де  $\hat{y}$  – усадка матеріалу;  $x_1$  – товщина алюмінію;  $x_2$  – товщина полііміду;  $x_3$  – ступінь витравлювання фольги.

Для проведення досліджень було розроблено та виготовлено дослідні зразки (рис. 8) за різних комбінацій вищевказаних факторів (товщина алюмінію 30 - 100 мкм; товщина поліімідну 10-50 мкм; ступінь витравлювання фольги 25-75%).

Згідно з розробленою концепцією створення детекторної лінійки ВТС експерименту ALICE з'єднання КЖ з ДМ здійснюється за допомогою поперечних кабелів. Особливістю даних кабелів є необхідність забезпечення електричної ізоляції з обох боків провідного алюмінієвого шару. Сьогодні подібні матеріали відсутні на ринку. Для реалізації таких поперечних кабелів необхідно вирішити завдання розробки ТП створення вихідного тришарового поліімід-алюміній-поліімід матеріалу та технологічного процесу виготовлення виробів з такого матеріалу.

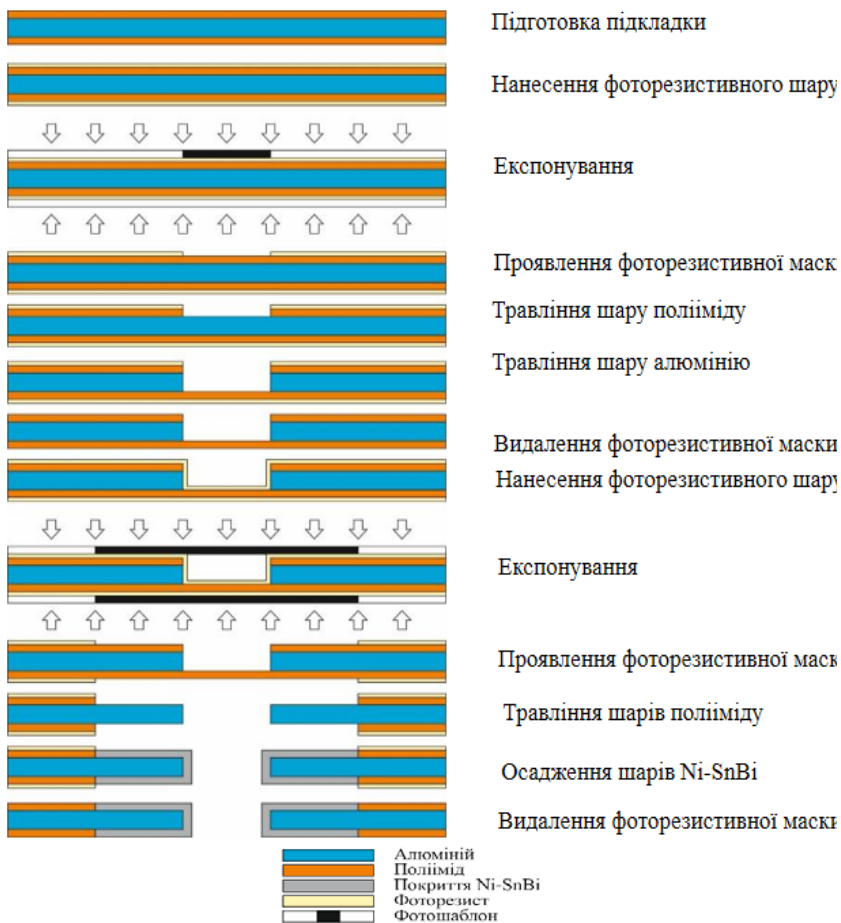


Рисунок 10 – ТП виготовлення виробів з матеріалу поліімід-алюміній-поліімід

розробка технологічного процесу створення виробів на основі тришарового безадгезивного матеріалу поліімід-алюміній-поліімід, тому що такі ТП наразі відсутні. Розробка ТП базується на типових операціях виготовлення виробів з безадгезивних алюміній-поліімідних матеріалів. ТП наведено на рис. 10.

Дослідні зразки поперечних кабелів, виготовлених з розробленого матеріалу та за вищенаведеним ТП наведені на рис. 11.



Рисунок 8 – Дослідні зразки для вимірювання усадки

Проведений аналіз існуючих технологій створення алюміній-поліімідних безадгезивних діелектриків і практичний досвід створення алюміній-поліімідних безадгезивних матеріалів дозволив розробити ТП їх виготовлення, який включає наступні етапи:

- хімічне очищення алюмінієвої фольги у розчині NaOH,  $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 10\text{ с}$ ;
- нанесення шару поліімідного лаку (занурення),  $t = 55\text{ с}$ , в'язкість 15 с;
- підсушування підкладки за  $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$  протягом  $t = 60\text{ хв}$ ;
- імідизація поліімідного шару за  $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 30\text{ хв}$ ;
- вихідний контроль.

Для успішної реалізації поперечних кабелів необхідним кроком є



Рисунок 11 – Дослідні зразки поперечних кабелів: а) підкладка з поперечними кабелями; б) одиничний поперечний кабель; в) структура поперечного кабелю

Отримані вищенаведені результати, а саме розроблені матеріали, моделі та ТП виготовлення компонентів КЖ, дозволяють зробити висновок, що завдання досягнуто та вирішено завдання створення компонентів КЖ.

У четвертому розділі описано конструктивні й технологічні рішення створення надлегких детекторних модулів на основі надновітніх кремнієвих піксельних сенсорів і безадгезивних алюміній-поліімідних діелектриків.

Під час створення детекторних модулів з мінімальною масою речовини головними чинниками, що впливають на масу речовини, є безпосередньо чутливі елементи (сенсори) та елементи комутації компонентів модуля (багатошарова плата).

Щоб вийти на необхідний рівень роздільної здатності і мінімальної товщини матеріалу, провідними європейськими науковими центрами було запропоновано революційне вирішення цього завдання за рахунок інтеграції сенсора (чутливої частини) і електроніки зчитування в єдиному монолітному кремнієвому чутливому елементі (сенсорі). Такий підхід був прийнятий і успішно реалізований під час створення КМОН монолітних активних піксельних сенсорів (англ. CMOS – Monolithic Active Pixels Sensors, скор. MAPS). Так для експерименту ALICE було розроблено та впроваджено у виробництво MAPS-сенсори ALPIDE. Паралельно з розробкою сенсорів ALPIDE здійснено розробку високовольтних сенсорів (HV-MAPS) типу MuPix для експерименту Mu3e. Особливістю таких сенсорів є товщина 50 мкм та розмір пікселю 30-50 мкм.

У процесі використання тонких сенсорів наступним важливим завданням є можливість зменшення речовини в детекторному модулі за рахунок удосконалення комутаційної частини модуля, а саме гнучкої багатошарової плати. Проведений аналіз вимог і конструктивно-технологічних рішень дозволив визначити базовий підхід до складу багатошарової плати. Розроблені конструктивно-технологічні рішення детекторних модулів дозволили визначити склад багатошарової плати, яка має включати:

- верхній шар з безадгезивного алюміній-поліімідного діелектрика;
- проміжний шар – прокладка (поліімідна плівка);
- нижній шар з безадгезивного алюміній-поліімідного діелектрика.

Склад багатошарової плати (на прикладі модуля для експерименту Mu3e) наведено на рис. 12.



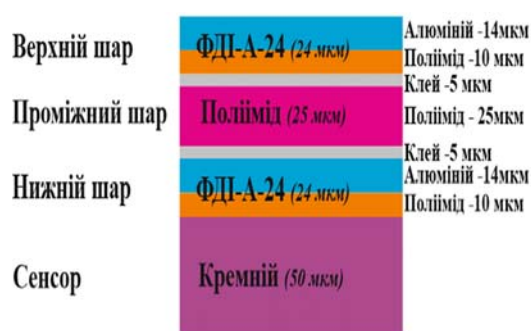


Рисунок 12 – Склад детекторного модулю та структура багат шарової плати

Вищенаведена структура дозволяє реалізувати надлегкі ДМ з радіаційною довжиною  $\sim 0,1 X_0$ .

Для створення вищевказаних ДМ розроблено ТП складання, що включає такі основні операції:

- склеювання нижнього шару з прокладкою;
- склеювання і зварювання верхнього шару з двошаровою платою;
- паяння навісних компонентів на тришарову плату;
- склеювання і ультразвукове зварювання плати з сенсорами.

Як метод електричної комутації в процесі створення детекторних модулів і їх компонентів використано ультразвукове мікрозварювання (SpTAB). Особливістю обраного методу складання модулів та їх компонентів є ультразвукове зварювання плоских виводів через вікна в поліімідному шарі. Надзвичайно важливим є вибір оптимальних розмірів провідників та вікна у шарі поліімиду залежно від товщини між шарами, що зварюються. З метою вирішення цього питання розроблено модель впливу розмірів елементів плати в області зварювання на подовження алюмінієвого провідника для вибору оптимальних розмірів.

У процесі міжшарового ультразвукового зварювання алюмінієвих провідників в алюміній-поліімідних багат шарових структурах у місці зварювання спостерігається два види деформації, які можуть привести до руйнування провідника: вигин у центральній зоні зварювання та вигин провідника на краях вікна в поліімідному шарі.

У ході використання різних значень товщини провідника отримано залежність мінімально допустимого радіусу вигину алюмінієвого провідника на краях зварювального вікна, яка дозволила зробити висновок, що даний тип деформації майже не впливає на деформацію провідника в цілому, оскільки мінімально допустимі радіуси вигину провідника залишаються вкрай малими і таким чином даний тип деформацій не може викликати руйнування провідника.

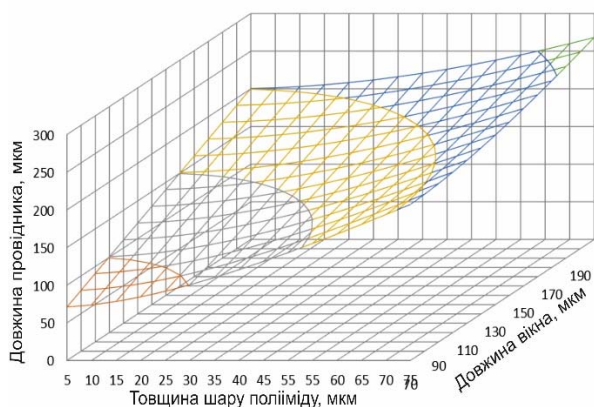


Рисунок 16 – Залежність подовження провідника від ширини зварювального вікна і товщини шару поліімиду

Моделювання другого типу деформації дозволило отримати залежності подовження провідника від ширини зварювального вікна та товщини шару поліімиду (рис. 16).

Отримані результати моделювання дозволили визначити оптимальні конструктивні параметри зон зварювання компонентів детекторних модулів (для ширини провідника 100 мкм – довжина вікна не менше 250 мкм, для ширини провідника 40 мкм – довжина вікна не менше 100 мкм).

Розроблені конструктивні й технологічні рішення створення надлегких ДМ на основі надновітніх кремнієвих піксельних сенсорів і безадгезивних алюміній-поліімідних діелектриків дозволяють зробити висновок, що завдання вирішено.

У п'ятому розділі наведено результати створення та дослідження макетів та прототипів компонентів сенсорних систем, створених на основі та досліджених рішень.

Для перевірки правильності обраних КТР кабелів живлення було розроблено, виготовлено та досліджено прототип КЖ (рис. 17). Дослідження падіння напруги (рис. 18) дозволили підтвердити правильність обраних рішень і забезпечення падіння напруги, що не перевищує 0,08 В для аналогових та цифрових кіл КЖ. Дослідження проводилися для двох вихідних площинок цифрових кіл (M1-1, M1-2 – площинки першого модуля і т.д.) та однієї площинки для аналогових кіл (M1 – площинки першого модуля і т.д.) для усіх семи ДМ у ДЛ.

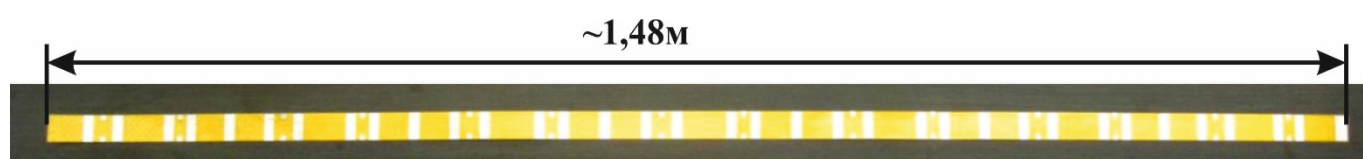


Рисунок 17 – Прототип кабелю живлення

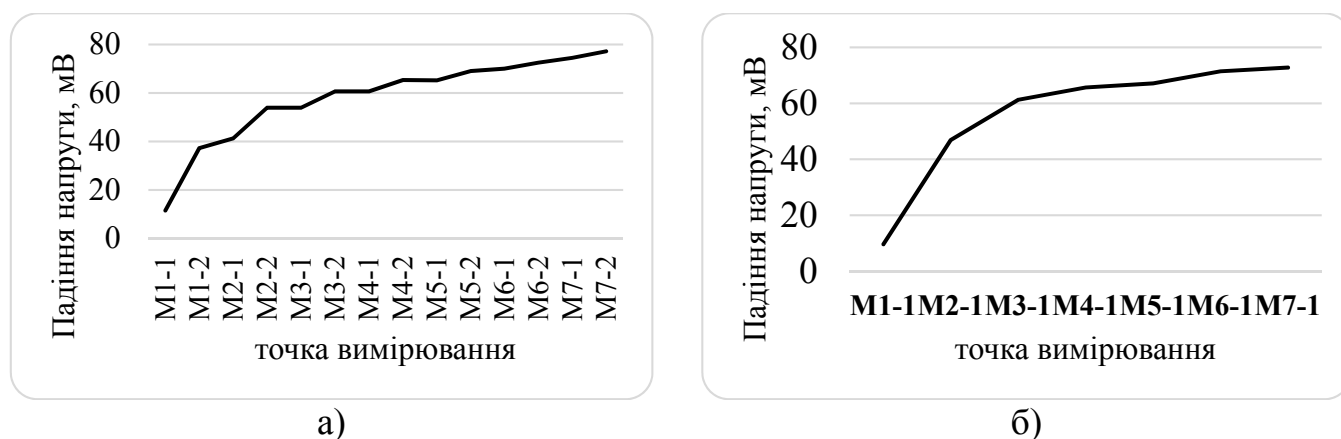


Рисунок 18 – Результати дослідження падіння напруги прототипу кабелю живлення: а) аналогові кола; б) цифрові кола

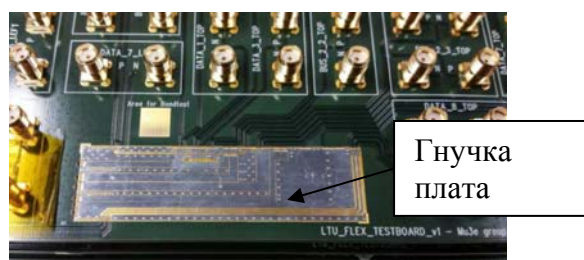


Рисунок 19 – Прототип надлегкої гнучкої плати на тестовій друкованій платі

Для дослідження вірності обраних рішень створення надлегких ДМ для фізичних експериментів було розроблено та досліджено прототип надлегкої багатошарової гнучкої плати (ГП) для експерименту МуЗе. Дослідження прототипу гнучкої багатошарової плати (рис. 19) здійснювалися спільно з фахівцями Інституту фізики Університету Хайдельбергу (Німеччина).

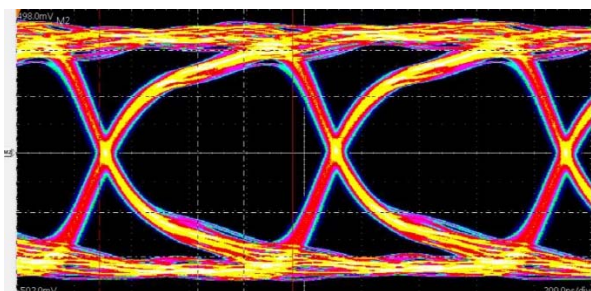


Рисунок 20 – Глазкова діаграма тестової плати

дослідження для швидкості проходження сигналу на рівні 2,5 Гбіт/с також показали позитивні результати, що дозволило зробити висновок про можливість використання таких гнучких багат шарових плат і в інших експериментах з більшою швидкістю передачі сигналів.

ТП складання надлегкого детекторного модуля було перевірено та підтверджено на макеті ДМ внутрішнього детекторного шару експерименту Mu3e (рис. 21).

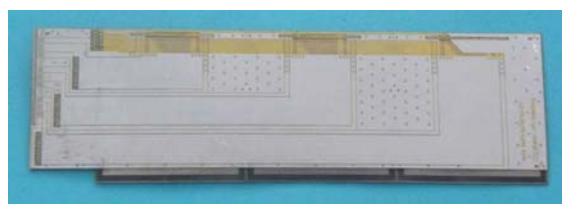


Рисунок 21 – Макет надлегкого модуля для експерименту Mu3e

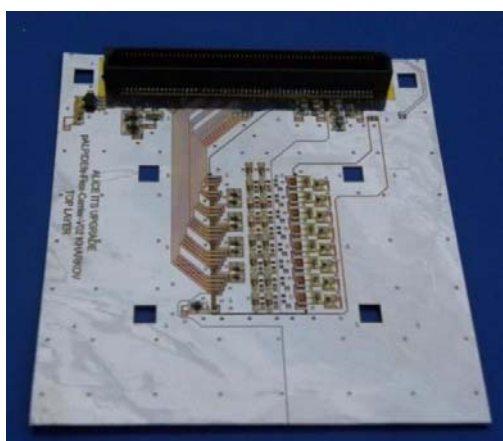


Рисунок 22 – Прототип детекторного модуля для експерименту ALICE

Для перевірки правильності розроблених рішень створення удосконалених детекторних модулів для експерименту ALICE було розроблено та досліджено функціональний прототип детекторного модуля (рис. 22).

Функціональні дослідження прототипу здійснювалися у CERN згідно з програмами та методиками, розробленими для експерименту ALICE. Результати досліджень (рис. 23) підтвердили правильність розроблених і використаних КТР.

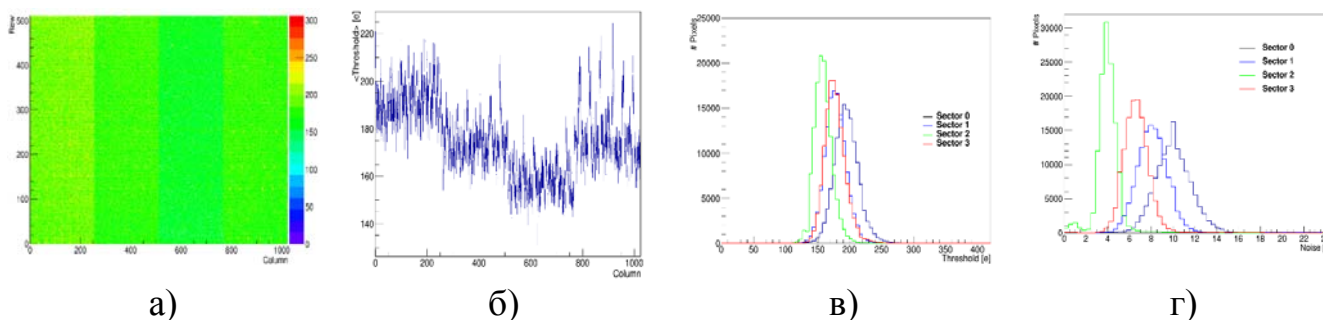
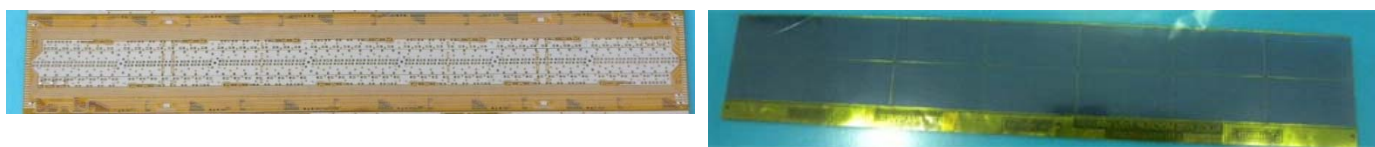


Рисунок 23 – Результати функціональних досліджень прототипу детекторного модуля у CERN: а) карта чутливості сенсора; б) чутливість каналів; в) розподіл чутливості; г) розподіл шуму

ТП складання детекторного модуля також було перевірено та підтверджено на макеті детекторного модуля зовнішніх детекторних шарів експерименту ALICE (рис. 24), який включав гнучку багат шарову плату та 14 макетів сенсорів ALPIDE товщиною 50 мкм.



а)

б)

Рисунок 24 – Повномасштабний макет ДМ для експерименту ALICE:

а) вигляд з боку плати; б) вигляд з боку сенсорів

На основі отриманих позитивних результатів виготовлено прототипу детекторної лінійки (рис. 25) та проведено її дослідження (функціональні дослідження прототипу здійснювалися у підрозділі Національного Інституту Ядерної Фізики Італії INFN-Torino згідно з програмами та методиками, розробленими для експерименту ALICE). Результати досліджень (рис. 26) підтвердили правильність розроблених і використаних КТР компонентів ДЛ.



Рисунок 25 – Прототип ДЛ для ВТС експерименту ALICE

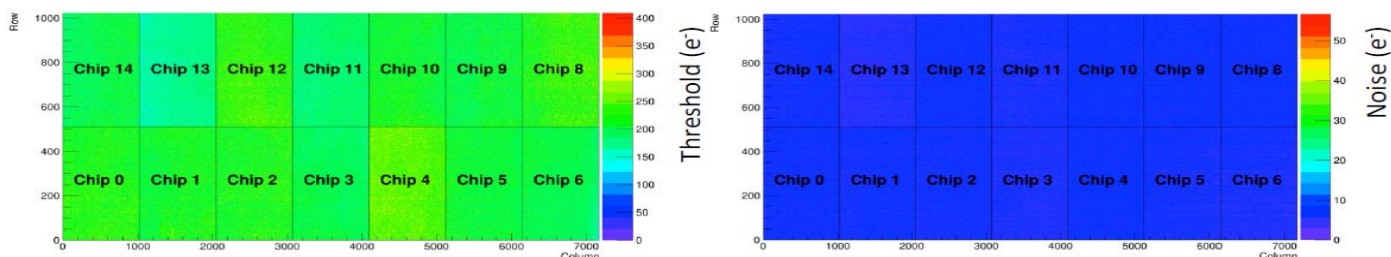


Рисунок 26 – Результати функціональних випробувань прототипу ДЛ:

а) карта чутливості; б) карта шуму

Дослідження прототипу детекторної лінійки підтвердили падіння напруги на кабелі живлення менше 0,1 В.

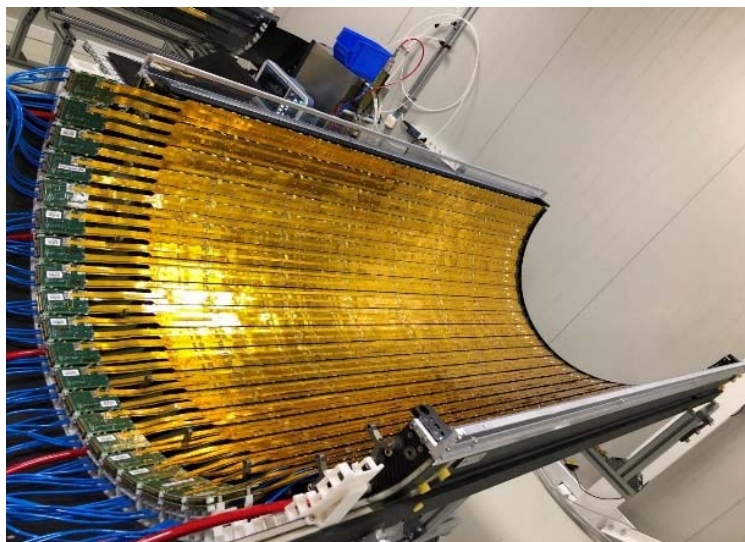


Рисунок 27 – Півциліндр зовнішнього детекторного шару удосконаленої ВТС експерименту ALICE

Отримані позитивні результати роботи та функціональних досліджень прототипів компонентів ДІ дозволили використати розроблені рішення для створення компонентів ДІ зовнішніх шарів удосконаленої внутрішньої трекової системи експерименту ALICE (рис. 27).

Позитивні результати досліджень макетів та прототипів компонентів сенсорних систем, впровадження їх у виробництво, дозволяють зробити висновок про виконання завдань розділу та загалом дисертаційної роботи.

## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

У дисертаційній роботі вирішено завдання конструктивно-технологічного забезпечення виробництва компонентів сенсорних систем детектування фізичних експериментів.

Отримано такі основні результати:

1. Запропоновано нове конструктивно-технологічне забезпечення та розроблені технологічні процеси створення компонентів детекторних лінійок для практичної їх реалізації для зовнішніх MAPS детекторних шарів удосконаленої ВТС експерименту ALICE з використанням спеціалізованих кабелів живлення, які забезпечили падіння напруги живлення чутливих елементів не більше 0,1 В на довжині 1,5 м за мінімальної маси матеріалів у об'ємі детектування.

2. Визначено конструктивні та фізико-технологічні обмеження, поведено моделювання параметрів у процесі створення детекторних модулів і кабелів живлення та вперше розроблено, відпрацьовано і впроваджено у виробництво технології їх виготовлення, що включають:

– технологію створення тришарового безадгезивного лакофольгового матеріалу поліїмід-алюміній-поліїмід і виробів на його основі;

– технологію виготовлення безадгезивного алюміній-поліїмідного лакофольгового матеріалу з товщиною провідникових шарів 50-100 мкм та виробів на його основі;

– технологію складання багатошарових кабелів живлення для забезпечення живлення детекторних модулів на новітніх MAPS-сенсорах у складі детекторних лінійок зовнішніх шарів ВТС експерименту ALICE;

– технологію складання алюмінієвих багатосенсорних MAPS детекторних модулів на гнучких багатошарових носіях.

3. Із використанням розроблених та удосконалених технологій були виготовлені макети й прототипи ДМ та ДЛ на основі тонких MAPS-сенсорів та проведені їх експериментальні дослідження, що показали позитивні результати.

4. Результати досліджень впроваджено на вітчизняних підприємствах (ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ» ,м. Харків, ДП «Науково-дослідний інститут мікроприладів», м. Київ), а також у науково-дослідних інститутах Європи, у NIKHEF (Національний інститут субатомної фізики, Нідерланди), та США, у LBNL (Національна лабораторія ім. Лоуренса в Берклі, США).

5. Підсумком роботи стали розроблені та впроваджені у виробництво технології створення компонентів ДЛ для практичної реалізації детекторних лінійок для зовнішніх MAPS детекторних шарів удосконаленої ВТС експерименту ALICE (CERN, Швейцарія), що дозволило вітчизняним підприємствам поставити біля 16 тисяч компонентів вартістю понад 200 тис. євро.

Оригінальність і науково-технічна новизна розроблених технологій підтверджена патентами України.

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

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### ***Патенти***

1. Патент України на винахід № 95190 «Мікроелектромеханічний багатозондовий підмикальний пристрій» / В. М. Борщов, Л. Д. Кошій, О. М. Лістратенко, І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін, М. А. Проценко, Є. А. Разумов-Фризюк, С. М. Тертишний, І. Т. Тимчук – заявл. 31.05.2010 р.; опубл. 11.07.2011 р., Бюл. №13. – 4 с.

2. Патент України на винахід № 97538 «Мікроелектромеханічний багатозондовий контактний пристрій» / В.М. Борщов., Л. Д. Кошій, О. М. Лістратенко, І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін, М. А. Проценко, Є. А. Разумов-Фризюк, С. М. Тертишний, І. Т. Тимчук – заявл. 19.03.2010 р.; опубл. 27.02.2012 р., Бюл. №2. – 5 с.

3. Патент України на корисну модель № 104141 «Гнучкий багатозондовий з'єднувальний шлейф» / В. М. Борщов, В. Г. Кучеренко, О. М. Лістратенко, Г. І. Нікітський, М. А. Проценко, І. Т. Тимчук; заявл. 24.07.2015 р.; опубл. 12.01.2016 р., Бюл. №1. – 4 с.

4. Патент України на корисну модель № 119126 «Спосіб виготовлення гнучкого шаруватого матеріалу для виробів на основі фольги» / В. М. Борщов, Л. В. Клімова, О. М. Лістратенко, Г. І. Нікітський, М. А. Проценко, І. Т. Тимчук, О. О. Фомін; заявл. 10.04.2017 р.; опубл. 11.09.2017 р., Бюл. №17. – 5 с.

5. Заявка на патент України на корисну модель «Багатосенсорний модуль на гнучкій комутаційній платі» / В. М. Борщов, О. М. Лістратенко, М. А. Проценко, І. Т. Тимчук, Г. І. Нікітський, О. В. Суддя; подано 07.08.2019 р.; прийнято 30.08.2019, реєстрац. номер заявки а 2019 09175.

### ***Статті в іноземних виданнях***

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

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

8. The ALICE Collaboration Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking System / B. Abelev, V. N. Borshchov, O. M. Listratenko, M. A. Protsenko, I. T. Tymchuk and the ALICE Collaboration // (CERN-LHCC-2013-024/ALICE-TDR-017) – Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, Volume 41, Number 8, August 2014, P. 70-71 (включено до міжнародної науково-метричної бази даних Scopus).

#### ***Статті у наукових фахових виданнях***

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

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

11. Новые конструктивно-технологические решения пленочных электронагревателей космического назначения / В. Н. Борщев, А. М. Листратенко, И. Т. Тымчук и др.// Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.- техн. сб. – 2015. – Вып. 182. – С. 137 – 143.

12. Innovative microelectronic technologies for high-energy physics experiments / V. M. Borshchov, O. M. Listratenko, I. T. Tymchuk et al. // Functional materials. – 2017. – Vol. 24, № 1. – P. 143-153 (включено до міжнародної науково-метричної бази даних Scopus).

13. Новітні конструктивно-технологічні рішення надлегких детекторних модулів для фізичних експериментів/ І. Ш. Невлюдов, В. М. Борщов, І. Т. Тимчук, М. А. Проценко, Н. П. Демська// Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. – 2018. – № 3 (5) – С.67-77

14. Mathematical model of bending two-layer film aluminium-polyimide structure due to temperature changes / I. Sh. Nevliudov, V. M. Borshchov, I. T. Tymchuk et al. // Functional materials. – 2019. – Vol. 26, № 2. – P. 342-346 (включено до міжнародної науково-метричної бази даних Scopus).

#### ***Міжнародні науково-технічні та науково-практичні конференції***

15. ALICE Silicon Strip Detector Module Assembly with Single-Point TAB Interconnections/ M. Oinonen, V. Borshchov, I. Tymchuk et al // Book of abstracts of the 11-th Workshop on electronics for LHC and future Experiments. – Heidelberg, Germany, 12-16 September 2005. – P. 92-97 (включено до міжнародної науково-метричної бази даних Scopus).

16. Development and test of TAB bonded silicon PAD detectors and micro-cables for the construction of silicon probes for imaging / V. Linhart, V. Borshchov, I. Tymchuk et al. // Nuclear Science Symposium Conference Record, – Orlando, FL, 2009 IEEE NSS-MIC. – 24 October – 1 November 2009. – P. 2423-2426 (включено до міжнародної науково-метричної бази даних Scopus).

17. Detection tests of imaging devices based on silicon pixel-array detectors assembled using Tape Automated Bonding and microcable technologies / V. Linhart, V. Borshchov, I. Tymchuk et al. // Nuclear Science Symposium Conference Record, – Knoxville, TN, 2010 IEEE NSS-MIC. – 30 October – 6 November 2010. – P. 3194-3196 (включено до міжнародної науково-метричної бази даних Scopus).

***Всеукраїнські та міжрегіональні конференції й інші видання***

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

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

20. Technological support of components creation for upgraded ITS of ALICE experiment on LHC / V. Borshchov, I. Tymchuk, M. Protsenko // Тезисы докладов XVI Конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям. – 20-23 марта 2018 г., Харьков: ННЦ ХФТИ. – С. 97.

21. Design-technological aspects of high granularity detector modules creation for physics experiments / V. Borshchov, I. Tymchuk, M. Protsenko // Тезисы докладов XVII Конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям. – 26-29 марта 2019 г., Харьков: ННЦ ХФТИ. – С. 95.

***Міжнародні науково-технічні та науково-практичні семінари та пленарні засідання в CERN в рамках проекту ALICE ITS Upgrade***

22. SpTAB bonding status/ I. Tymchuk, V. Borshchov, WP4 Meeting, 8 квітня 2014 – CERN <https://indico.cern.ch/event/305194/contributions/701454/>

23. Development of OB dummy module based on SpTAB assembly techniques/ I. Tymchuk, V. Borshchov / ITS Plenary Meeting 16 лютого 2015 – CERN <https://indico.cern.ch/event/374202/contributions/885735/>

24. ITS - Power Bus Prototypes @ Kharkiv / I. Tymchuk/ ITS-MFT Plenary Meeting 9-10 жовтня 2015 – CERN <https://indico.cern.ch/event/460509/contributions/1963069/>

25. Power Bus Prototypes/ I. Tymchuk/ ITS Plenary Meeting 15-16 лютого 2016 – CERN <https://indico.cern.ch/event/496575/contributions/1174665/>

26. OB Power Bus Production / I. Tymchuk/ ITS-MFT Plenary Meeting 5-6 вересня 2016 – CERN <https://indico.cern.ch/event/566532/contributions/2292101/>

**АНОТАЦІЯ**

**Тимчук І. Т. Конструктивно-технологічне забезпечення виробництва компонентів сенсорних систем детектування фізичних експериментів. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки. – Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, 2019 р.



У роботі вирішено науково-прикладне завдання конструктивно-технологічного забезпечення створення високотехнологічних компонентів сенсорних систем детектування фізичних експериментів за рахунок розробки КТР і ТП виробництва вищезгаданих компонентів.

Вперше розроблені КТР та ТП виготовлення спеціалізованих КЖ, що дозволили забезпечити падіння напруги живлення сенсорів не більше 0,1 В на довжині 1,5 м за мінімальної маси матеріалу ( $\sim 0,3 X_0$ ) в об'ємі детектування; удосконалено ТП виготовлення ДМ на основі новітніх MAPS сенсорів, що дозволили реалізувати надлегкі ДМ для експериментів ALICE та Mu3e з радіаційною довжиною 0,1-0,2  $X_0$ , що вдвічі-втричі краще ніж у існуючих аналогів.

Удосконалено модель вигину гнучкого двошарового матеріалу діелектрик-провідник для застосування в ході виготовлення алюміній-поліімідного матеріалу, удосконалено модель усадки компонентів ДЛ від товщини шарів.

Вперше розроблено ТП виготовлення тришарового безадгезивного матеріалу поліімід-алюміній-поліімід і ТП виготовлення гнучких компонентів з цього матеріалу.

З використанням розроблених технологій виготовлені та експериментально досліджені макети та прототипи ДМ, КЖ та ДЛ на основі MAPS-сенсорів.

Результати роботи впроваджені у виробництво компонентів детекторних лінійок для детекторних шарів експерименту ALICE (CERN, Швейцарія), що дозволило вітчизняним підприємствам поставити біля 16 тисяч компонентів вартістю понад 200 тис. євро.

*Ключові слова: детекторна лінійка, детекторні модулі, кабель живлення, алюміній-поліімідні безадгезивні матеріали, технологічний процес.*

## АННОТАЦИЯ

**Тимчук И. Т. Конструктивно-технологическое обеспечение производства компонентов сенсорных систем детектирования физических экспериментов. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 – технология, оборудование и производство электронной техники. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков, 2019

В работе решена научно-прикладная задача конструктивно-технологического обеспечения создания високотехнологических компонентов сенсорных систем детектирования физических экспериментов за счет разработки КТР и ТП производства вышеупомянутых компонентов.

Впервые разработаны КТР и ТП изготовления специализированных кабелей питания, которые позволили обеспечить падение напряжения питания сенсоров не более 0,1 В на длине 1,5 м при минимальной массе материала ( $\sim 0,3 X_0$ ) в объеме детектирования; усовершенствованы ТП изготовления детекторных модулей (ДМ) на основе новейших MAPS сенсоров, которые позволили реализовать сверхлегкие ДМ для экспериментов ALICE и Mu3e с радиационной длиной 0,1-0,2  $X_0$ , что в 2-3 раза лучше чем у существующих аналогов.

Усовершенствована модель изгиба гибкого двухслойного материала диэлектрик-проводник для применения при изготовлении алюминий-полиимидного материала, усовершенствована модель усадки компонентов ДЛ от толщины слоев.

Впервые разработаны ТП изготовления трехслойного безадгезивного материала полиимид-алюминий-полиимид и ТП изготовления гибких компонентов из этого материала.

С использованием разработанных технологий изготовлены и экспериментально исследованы макеты и прототипы ДМ, КП и ДЛ на основе MAPS-сенсоров.

Результаты работы внедрены в производство компонентов детекторных линеек для детекторных слоев эксперимента ALICE (CERN, Швейцария), что позволило отечественным предприятиям поставить около 16000 компонентов стоимостью свыше 200 тыс. евро.

*Ключевые слова: детекторная линейка, детекторные модули, кабель питания, алюминий-полиимидной безадгезивные материалы, технологический процесс.*

## SUMMARY

**Тымчук І. Т. Design-technological assurance of components production of detecting sensor systems for physics experiments. – Manuscript.**

Thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.27.06 – Technology, equipment and production of electronic equipment. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2019.

Scientific and applied problem of design - technological assurance of high-tech components production of detecting sensor systems for physics experiments is solved in the work on development of design-technological solutions (DTS) and technological processes (TP) of aforementioned components production and new adhesiveless flexible aluminum-polyimide materials for components of detector strings (DS).

New DTS and TP for production of specialized power buses (PB) were developed, which allowed to ensure voltage drop for power supply of sensors no more than 0,1 V at length of 1,5 m with lower material budget ( $\sim 0,3 X_0$ ) in detecting volume; improved TP of manufacturing detector modules (DM) based on the newest MAPS sensors, which allowed to realize ultra-light DM with radiation length of 0,1-0,2  $X_0$  for ALICE and Mu3e experiments, what is 2-3 times better than existing analogues.

Model of bending of flexible dielectric-conductor two-layer material for using in manufacture of aluminum-polyimide material is improved; model of shrinkage components of detector string depending from thickness of layers is improved.

New TP of manufacturing three-layer adhesiveless polyimide-aluminum-polyimide material and manufacturing of flexible components of such material were developed.

Using developed technologies, mock-ups and prototypes of DM, PB and DS based on thin MAPS sensors were manufactured and investigated.

Results of the work were implemented into production of components of detector string for detector layers of ALICE experiment (CERN, Switzerland), which allowed to domestic companies to supply about 16 thousands of components with cost more than 200,000 Euro.

*Keywords: detector string, detector modules, power bus, aluminium-polyimide adhesiveless materials, technological process.*