

Голові спеціалізованої вченої ради
Д 64.052.04 у Харківському
національному університеті
радіоелектроніки

61166, м. Харків, просп. Науки, 14

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, доцента, професора кафедри інформаційно-управляючих систем, Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського Притчина Сергія Емільовича, на дисертаційну роботу Проценка Максима Анатолійовича "Технологія виробництва детекторних модулів радіаційного випромінювання", подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки

Актуальність теми.

В експериментальних дослідженнях в галузі фізики високих та надвисоких енергій широко використовуються багатоканальні детектори заряджених частинок і асоційована з ними електроніка зчитування з багаторівневими системами збору й обробки великих масивів фізичної інформації, які конструктивно виконані у вигляді модулів.

Розробка типових детекторних модулів (ДМ) пов'язана з необхідністю розв'язування задач мінімізації маси матеріалу в об'ємі блоків детектування, спрощення процесів складання при збереженні високого ступеня надійності, створення нового покоління гібридних мікрозбірок (ГМ) та гнучких з'єднувальних елементів (ГЗЕ), що особливо важливо для нових експериментів при вивченні властивостей матерії та її характеристик, які являються досяжними для експериментального дослідження і вимірювань, що дозволить прийти до кращого розуміння достовірності в теорії фізики елементарних частинок і високих енергій.

Таким чином розробка технологічних процесів (ТП) виробництва ДМ радіаційного випромінювання (РВ), які забезпечують задані характеристики і



завадостійкість ліній передач сигналів за максимально можливого відношення сигнал/шум, але не меншого, ніж 10-15, а також створити інноваційні багатопарові ГЗЕ великої довжини (до 600 мм) із кількістю провідників більше ніж 1000 та з кроком 50 мкм., *є актуальним завданням.*

Дослідження, результати яких викладені в дисертаційній роботі, проводилися відповідно до держбюджетних науково-дослідних робіт (ДНДР), які проводились на ДП Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування, ТОВ "Світлодіодні технології Україна" та у Харківському національному університеті радіоелектроніки і автор брав участь у виконанні даних робіт як виконавець та відповідальний виконавець: ДНДР "Розробка технології виготовлення мікрокабелів для проекту ALICE" (ДР №0104U006372), ДНДР "Розробка, моделювання та дослідження новітніх конструктивно-технологічних рішень детекторних модулів для систем детектування експериментів у галузі фізики високих енергій" (ДР №0113U008109), ДНДР "Розроблення дослідно-промислової технології створення базових високотехнологічних компонентів детекторних модулів для систем детектування часток в експериментах з фізики високих енергій" (ДР №0113U007364), *що також підтверджує актуальність роботи.*

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.

Виконані автором дослідження базуються на всебічному та ретельному огляді наукових та практичних досягнень в галузі технологій виготовлення ДМ РВ. В дисертації відзначена сукупність завдань для досягнення основної мети дисертаційної роботи, пов'язаної з створенням ТП виробництва ДМ РВ з високою щільністю монтажу компонентів у просторі, які дозволять зменшити багатократне розсіювання в шарах внутрішньої трекової системи (ВТС).

У першому розділі здобувачем проведено огляд сучасного стану та проблем розробки та виготовлення ДМ РВ, проаналізовано стан проблеми і тенденції розвитку ТП виробництва ДМ і проведено аналіз методів забезпечення радіаційної стійкості, термостійкості, швидкодії та довготривалої надійності ГЗЕ. Поставлені основні завдання дослідження: фізико-математичне моделювання залежності завадостійкості ліній передач ДМ від конструктивних параметрів і технології виготовлення та теоретичне обґрунтування покращення характеристик ДМ РВ за

рахунок вдосконалення технології їх виготовлення; теоретичне та експериментальне дослідження ТП формування шарів ГЗЕ із високою щільністю розміщення провідників для виконання вимог експерименту Compressed Baryonic Matter (CBM); дослідження та розробка ТП складання ДМ з використанням інноваційної повністю алюмінієвої технології складання "Chip-on-flex" (COF); моделювання параметричної надійності, прогнозування показників надійності мікросбірок та їх підтвердження у процесі випробувань; експериментальне дослідження параметрів і характеристик ДМ.

Другий розділ присвячено розробці математичної моделі для дослідження впливу конструктивно-технологічних факторів на ємність ліній передач. Обґрунтовано доцільність використання в конструкції гнучких шлейфів (аналогових гнучких плат) сигнальних провідників з шириною 35-40 мкм та з кроком провідників 50-60 мкм. В результаті теоретичних досліджень запропоновано застосування довгих аналогових гнучких плат у складі ДМ, що дозволяє розмістити електроніку зчитування за межами активної області детектування і таким чином мінімізувати масу ВТС та забезпечити необхідну радіаційну довжину багат шарових плат, а також спростити систему охолодження електроніки зчитування, що дозволяє забезпечити відношення сигнал/шум вищого за 10.

У третьому розділі здобувачем проведено дослідження процесу рідинного хімічного травлення лакофольгових алюміній-поліімідних діелектриків під час виготовлення ГЗЕ. За умови використання стандартних методів хімічного травлення виникають труднощі під час виготовлення виробів із підвищеною щільністю, оскільки травлення алюмінію є ізотропним. У результаті проведених робіт під час виготовлення елементів із кроком виводів 50 мкм (ширина провідників 35 мкм, проміжки 15 мкм) обрані оптимальні технологічні режими для формування фоторезистивної маски. У процесі досліджень було обрано і досліджено травник наступного складу: фосфорна кислота (H_3PO_4 – 65%) і оцтова кислота (CH_3COOH – 35%) з введенням ефективних поверхнево-активних речовин (ПАР). Проведені дослідження показали, що під час виготовлення ГЗЕ з кроком провідників 50 мкм за обраних оптимальних режимів формування фоторезистивної маски і правильного підбору складу травника алюмінію коефіцієнт анізотропії становить близько 0,7.

Четвертий розділ присвячено розробленню на основі теорії повного факторного експерименту експериментально-статистичної моделі визначення оптимальних технологічних режимів ультразвукового (УЗ) зварювання ГЗЕ з безадгезивних алюміній-поліімідних фольгових діелектриків на автоматизованому обладнанні. У ході експерименту змінювалися три різних параметри процесу зварювання, в тому числі зусилля навантаження зварювального інструменту, вихідна потужність УЗ-генератора та час зварювання. Отримані залежності зусилля руйнування з'єднань і висоти з'єднань від основних параметрів процесу зварювання. Таким чином була забезпечена висока надійність з'єднань в експериментально встановленому діапазоні оптимальних технологічних режимів УЗ-зварювання: навантаження інструменту 185 мН; потужність УЗ-генератора 0,25 Вт та час зварювання 60 мс. Результати експериментів збігаються із даними, отриманими у результаті теоретичних досліджень.

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

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

З метою отримання інформації про стійкість мікробірок за умови дії навантажень, що перевищують експлуатаційні режими, для експериментальної оцінки довговічності виробу та підтвердження відповідності значення часу роботи виробу без відмови терміну експлуатації та виявлення потенційно ненадійних елементів ДМ для експерименту ALICE проводилися прискорені форсовані випробування. Оцінка інтенсивності відмов мікробірок в умовах експлуатації за результатами прискорених випробувань дозволила підтвердити час напрацювання на відмову не менш, ніж 13,7 років, що задовольняє заданому терміну експлуатації виробів (10 років) в умовах фізичного експерименту.

Шостий розділ дисертаційної роботи містить результати експериментальних досліджень, що відповідають меті роботи. Для проведення експериментальних досліджень були виготовлені з використанням впроваджених ТП експериментальні зразки (ЕЗ) ДМ РВ для експерименту СВМ. У процесі вимірювання параметрів ЕЗ ДМ було визначено відношення сигнал/шум, яке склало 16,8 для Р-сторони сенсора та 17,1 для N-сторони сенсора, що відповідає поставленому завданню дослідження.

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

Достовірність одержаних результатів.

Достовірність результатів дослідження забезпечується наступним:

- використанням методу конформних перетворень – для розрахунку електричної ємності лінії зв'язку; аналітичних методів стаціонарної теплопередачі – для дослідження температурного поля ГМ; положень теорії факторного експерименту – для визначення оптимальних технологічних режимів УЗ-зварювання; методів математичного та комп'ютерного моделювання – для розробки моделі деградаційних процесів і прогнозування надійності зварних з'єднань; методу термоциклічних випробувань – для дослідження надійності мікрозбірок; методу експериментальних досліджень і статистичного аналізу отриманих результатів;

- підтвердженням теоретичних результатів у моделюючих та експериментальних дослідженнях;

- достатнім рівнем апробації та освітленням у наукових виданнях.

Наукова новизна досліджень.

Основними узагальненими новими науковими результатами можна вважати:

- вперше запропоновано технологічні процеси виготовлення ДМ РВ з використанням інноваційної алюмінієвої СОФ-технології складання, які на відміну від відомих дозволяють забезпечити високу щільність монтажу компонентів і

зменшити масу речовини в робочому об'ємі на ~30% (що призведе до зменшення багатократного розсіювання в шарах ВТС);

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

- удосконалено методи обліку значень похибок геометричних розмірів елементів гнучких плат, клину травлення алюмінію, маршрутні схеми та режими процесів виробництва, що дозволило зменшити крок розташування провідників ГЗЕ з безадгезивних алюміній-поліімідних фольгових діелектриків з 80 мкм до 50 мкм та менше, які відповідають кроку стрипів сучасних сенсорів;

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

Повнота викладу основних результатів.

Основні наукові положення, результати, висновки та рекомендації дисертаційної роботи отримані автором самостійно. За темою дисертації автором опубліковано 46 наукових праць (серед них 14 включено до міжнародних науково-метричних баз даних Scopus, Researchgate та РІНЦ), у тому числі 17 праць у закордонних журналах та 14 – у збірниках тез доповідей на міжнародних і всеукраїнських конференціях. Серед публікацій – 11 статей у наукових фахових виданнях України з технічних наук. Результати досліджень також були захищені 3 патентами України та 1 свідоцтвом авторського права на твір.

Опубліковані праці повністю освітлюють матеріали дисертаційної роботи.

Велика кількість та аналіз змісту наукових праць та апробацій засвідчують про повноту викладення в опублікованих роботах основних результатів дисертації.

Основні результати дисертаційної роботи здобувача пройшли всебічну апробацію на достатній кількості наукових конференцій.

Автореферат дисертації повністю відповідає змісту дисертаційної роботи, висвітлює основні отримані результати, зроблені висновки.

Оцінка змісту дисертації.

Слід відзначити, що робота Проценка М.А. являє собою закінчене і цілісне дослідження з чіткою структурою і логічним викладом матеріалу, написана технічно грамотно. Вона узагальнює і розвиває дослідження автора, започатковані у науково-дослідних роботах.

Дисертаційне дослідження направлено на розробку технологічних процесів для промислового виробництва приладів електронної техніки, чим відповідає формулі та другому пункту паспорта спеціальності 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки.

Оформлення дисертації в цілому відповідає вимогам п.п. 9, 11-14 "Порядку присудження наукових ступенів". Стиль викладання матеріалів досліджень, наукових положень і висновків забезпечує доступність їх сприйняття.

Разом з тим дисертація має ряд недоліків та зауважень:

- в матеріалах дисертації не розглянуто можливість використання процесів лазерної літографії для формування електропровідного рисунка ГЗЕ;

- не досліджено вплив оптичної щільності шару емульсії гнучких фотошаблонів на якість формування електропровідного рисунка ГЗЕ;

- в дисертації не достатньо детально розглянуто методи нанесення рідинних фоторезистів на заготовки ГЗЕ;

- не описана можливість застосування "сухих" (іонних, іонно-плазменних) процесів очистки поверхонь алюмінієвих провідників і їх вплив на якість процесів ультразвукового зварювання;

- у роботі присутні деякі недбалості, стилістичні та орфографічні некоректності, не всі позначення включені до переліку умовних позначень, символів, скорочень і термінів, деякі рисунки виконані з недостатньою якістю (наприклад: рис.2.5, стр 65, рис. 5.3, стр 143).

Проте, зазначені недоліки і зауваження не впливають на загальний науковий рівень дисертаційної роботи та можна зробити висновок, що дисертація

Проценка М.А. є закінченою науково-дослідною роботою, в якій отримані не захищенні раніше нові науково обґрунтовані розробки, що в сукупності вирішують актуальну проблему розробки та реалізації технології виробництва детекторних модулів радіаційного випромінювання.

Загальні висновки.

За актуальністю теми, ступенем обґрунтованості та достовірності результатів, науковою новизною та практичною значимістю одержаних результатів дисертаційна робота Проценка М.А. відповідає вимогам п. 9, 11-14 "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами) щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, та пункту 2 паспорта спеціальності, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки.

Офіційний опонент:

Доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри інформаційно-управляючих систем,
Кременчуцького національного університету
імені Михайла Остроградського

 С. Е. Притчин

Підпис засвідчую:

Вчений секретар
Кременчуцького національного університету
імені Михайла Остроградського

 Т. Ф. Козловська

