Голові спеціалізованої вченої
ради Д 64.052.04
у Харківському національному
університеті радіоелектроніки
61166, м. Харків, просп. Науки, 14

ВІДГУК

офіційного опонента член-кор. НАН Украхни, доктора фізико-математичних наук, професора, завідувача відділом фізики високих енергій Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України Пугача Валерія Михайловича, на дисертаційну роботу Тимчука Ігоря Трохимовича на тему: «Конструктивно-технологічне забезпечення виробництва компонентів сенсорних систем детектування фізичних експериментів», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки

Актуальність теми дисертації

Забезпечення високої просторової роздільної здатності та мінімізація маси сенсорів з мікрокабельними сполученнями до електроніки входить до головних пунктів технічних завдань по створенню детекторних систем сучасних експериментів з фізики високих енергій. Досягнення цих цілей можливе в рамках розробки новітніх високотехнологічних детекторних модулів (ДМ) і компонентів детекторних лінійок (ДЛ) елементів комутації з безадгезивних лакофольгових діелектриків з провідним алюмінієвим шаром і діелектричним поліімідним шаром. Незважаючи на суттєві досягнення у цих галузях, питання створення нових конструктивів і розробки нових наукових положень із вдосконалення технології виготовлення елементів комутації та матеріалів для їх реалізації наразі не повністю вивчені, деталізовані та реалізовані. Наявним є протиріччя між необхідністю забезпечення надійного функціонування детекторних систем та вимогою мінімізації їх маси для зменшення спотворення треків заряджених частинок і обмеженістю наявних матеріалів та рішень до конструктивно-технологічного забезпечення виробництва компонентів таких систем.

Вищевказане свідчить про необхідність робіт по створенню нових високотехнологічних компонентів ДЛ та технологій їх виготовлення з нових матеріалів для експериментів з фізики високих енергій, що підтверджує **актуальність** роботи дисертанта Тимчука І.Т.

Дослідження, результати яких наведені в дисертаційній роботі Тимчука І.Т., впроваджені у виробництво у 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, Нідерланди), та США у LBNL (Національна лабораторія ім. Лоуренца в Берклі, США) при створенні компонентів удосконаленої Внутрішньої Трекової Системи міжнародного експерименту ALICE у ЦЕРН (м. Женева, Швейцарія).

Структура, завдання та короткий зміст роботи

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог державного стандарту, має необхідну структуру і складається з вступу, п'яти основних розділів, висновків, списку літератури та додатку. Стиль викладення матеріалів дисертації доказовий. Графічні матеріали відбивають досліджувані процеси. Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертації.

Метою роботи є створення високотехнологічних компонентів сенсорних систем детектування фізичних експериментів (на прикладі зовнішніх детекторних шарів Внутрішньої Трекової Системи експерименту ALICE та внутрішніх шарів експерименту MuSe) 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.

У вступі автором обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та визначено завдання досліджень, викладено наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів.

У першому розділі проведено огляд та аналіз вимог до компонентів та розглянуто шляхи удосконалення внутрішньої трекової системи (ВТС) експерименту ALICE у ЦЕРН (м. Женева). Вказано, що ВТС для високоефективної реконструкції треків заряджених частинок, утворених в результаті зіткнення ядер в точці взаємодії, включає кілька детекторних шарів, які складаються з детекторних лінійок (ДЛ) довжиною до 1,5 м. Головними складальними частинами, що впливають на мінімізацію речовини в об'ємі детектування, і, як результат, впливають на інформативність та достовірність вимірів, є детекторні модулі (ДМ) та кабелі живлення (КЖ). Виконаний огляд та аналіз існуючих методів вирішення цих завдань дозволив автору розробити концепцію створення компонентів ДЛ та сформулювати основні завдання досліджень.

У другому розділі розроблено фізико-топологічну модель КЖ, що дозволила визначити необхідні конструктивні особливості компонентів КЖ та обрати матеріали, які дозволяють

реалізувати КЖ. Враховуючи результати розрахунків і моделювання параметрів кабелів живлення, наявних алюміній-поліімідних матеріалів, визнано необхідним створити нові алюміній-поліімідні безадгезивні матеріали з товщиною алюмінієвої фольги 100 мкм.

На основі результатів моделювання, концепції реалізації компонентів детекторної лінійки та обраних матеріалів розроблено технологічний процес (ТП) складання КЖ на основі склеювання, ультразвукового зварювання та паяння. Розроблений ТП складання кабелю живлення відпрацьований та впроваджений у виробництво компонентів ДЛ для ВТС експерименту ALICE.

У третьому розділі наведені результати удосконалення існуючих ТП та створення нових ТП виготовлення компонентів ДЛ на основі безадгезивних алюміній-поліімідних матеріалів та розробки новітніх матеріалів і ТП виготовлення компонентів ДЛ на їх основі.

Для покращення якості алюміній-поліімідних матеріалів при їх виробництві удосконалено математичну модель вигину, викликаного зміною температури в процесі виготовлення двошарових плівкових безадгезивних алюміній-поліімідних структур. Ця математична модель пов’язує механічний момент вигину зі зміною температури, конструктивними розмірами та параметрами пружних шарів. Розроблена модель може бути використана для створення не лише алюміній-поліімідних матеріалів, а й інших двошарових безадгезивних плівкових матеріалів (наприклад, нікель-поліімідних матеріалів для гнучких нагрівачів наземного та космічного призначення). Результати досліджень впроваджені у виробництво, а саме у виробництво вихідного матеріалу для компонентів КЖ.

Для підвищення якості компонентів ДЛ 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.

Для реалізації поперечних кабелів для ДЛ, особливістю яких є необхідність забезпечення електричної ізоляції з обох боків провідного алюмінієвого шару, розроблено ТП створення вихідного тришарового поліімід-алюміній-поліімід матеріалу та ТП виготовлення виробів з такого матеріалу.

У четвертому розділі описано конструктивні й технологічні рішення створення надлегких детекторних модулів на основі новітніх кремнієвих піксельних сенсорів і безадгезивних алюміній-поліімідних діелектриків з мінімальною масою речовини. Реалізація таких ДМ здійснена за рахунок використання новітніх MAPS сенсорів типу ALPIDE та MuPix,

особливістю яких є зменшена товщина (від типового значення 300 мкм до 50 мкм) та розмір пікселю 30-50 мкм, а також надлегких багатошарових плат. Це дозволяє створити ДМ з радіаційною довжиною ~0,1 X_0.

У п'ятому розділі наведено результати створення та дослідження макетів та прототипів компонентів сенсорних систем, створених на основі розроблених та досліджених рішень. Дослідження проводитися як на вітчизняних підприємствах (ТОВ «НВП «ЛТУ») так і у європейських наукових закладах: Інститут фізики Університету Хайдельбергу (Німеччина), Національного Інституту Ядерної Фізики Італії INFN-Torino (Італія), ЦЕРН (Швейцарія). Отримані позитивні результати досліджень прототипів компонентів ДЛ дозволили використати розроблені рішення для створення компонентів ДЛ зовнішніх шарів удосконаленої внутрішньої трекової системи експерименту ALICE на Великому Адронному Коллайдері у ЦЕРН.

Наведені у ***висновках*** результати повно відображають суть дисертаційної роботи і мають практичне впровадження.

Наукова новизна результатів, що отримані у дисертаційній роботі

Найбільш важливі нові наукові результатами, отримані в дисертації:

– вперше розроблено ТП виготовлення кабелю живлення для зовнішніх MAPS детекторних шарів удосконаленої ВТС експерименту ALICE, що дозволило забезпечити падіння напруги живлення для сенсорів не більше 0,1 В на довжині 1,5 м з мінімальною масою матеріалу (~0,3 X_0) в об'ємі детектування;

– удосконалено ТП виготовлення ДМ на основі новітніх MAPS сенсорів, що дозволило створити надлегкі ДМ для експериментів ALICE та Mu3e з радіаційною довжиною 0,1-0,2 X_0;

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

– 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.

Наведені автором результати досліджень мають достатнє теоретичне обґрунтування, і є вкладом в теорію та практику вирішення завдань щодо створення технологічних процесів виробництва компонентів детекторних систем для детектування заряджених частинок в сучасних фізичних експериментах

Практичне значення результатів

Практичне значення роботи підтверджується тим, що ***результати роботи впроваджено*** у виробництво 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, Нідерланди), та США у LBNL (Національна лабораторія ім. Лоуренца в Берклі, США).

Обґрунтованість та достовірність наукових положень і висновків

Обґрунтованість наукових положень та висновків підтверджується коректним застосуванням методів математичного та комп'ютерного моделювання – для розробки моделі впливу розмірів елементів на надійність міжшарового з'єднання у багатошарових елементах комутації; теорії 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.

Нові положення, що виносяться на захист, досить повно відображені у 21 науковій праці та в презентацій на 6 міжнародних науково-технічних семінарах і пленарних засідань у ЦЕРН в рамках проекту ALICE ITS Upgrade.

У дисертаційній роботі Тимчука І.Т. є окремі ***недоліки,*** серед них такі:

1. У дисертаційній роботі недостатньо розкрито питання порівняння маси матеріалу для випадку реалізації КЖ на основі мідних провідних шарів.

2. Чіткість деяких рисунків недостатня.

3. В деяких рисунках та таблицях в авторефераті та у дисертації використано позначення англійською мовою, які варто було б замінити на позначення українською мовою.

4. У дисертації деякі таблиці створені не оптимально, що призвело до вказання значень маленьким шрифтом (таблиці з результатами розрахунків падіння напруги аналогових та цифрових кіл сегментованого КЖ).

5. У тексті дисертації присутні незначні описки.

Означені недоліки ***не є принциповими*** і не впливають на основні результати роботи.

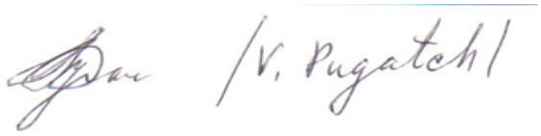
Загальні висновки

Незважаючи на вказані незначні недоліки, стверджую, що дисертація є ***завершеною працею***, містить нові наукові та практичні результати, що в сукупності розв'язують задачу розробки та створення високотехнологічних компонентів сенсорних систем детектування заряджених частинок у фізичних експериментах, що підтверджено на прикладі реалізації ДЛ для зовнішніх детекторних шарів Внутрішньої Трекової Системи експерименту ALICE (ЦЕРН).

Обраний напрямок досліджень та отримані результати відповідають паспорту спеціальності 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки (п. 2 – Розроблення нових технологічних процесів для промислового виробництва приладів електронної техніки, приладів контролю (вимірювання) параметрів електронної техніки та п. 3 напрямків досліджень – нові технологічні процеси й апаратура для промислового виробництва елементів функціональної електроніки (транзисторів, мікросхем, збірок, фотоелементів, п'єзоперетворювачів, термоелементів, сенсорних елементів).

За актуальністю, науковим і прикладним рівнем, новизною та практичною спрямованістю отриманих результатів ***дисертація відповідає вимогам*** п.п. 9, 11-14 "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 щодо кандидатських дисертацій, а її автор Тимчук Ігор Трохимович

заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки.



Офіційний опонент:
Член-кор. НАН України
Доктор фізико-математичних наук, професор,
завідувач відділом фізики високих енергій
Інституту ядерних досліджень НАН України В.М. Пугач

Підпис В.М. Пугача
засвідчую:
Вчений секретар
Інституту ядерних досліджень НАН України Н.Л. Дорошко
канд. фіз.-мат. наук