

І. Ш. НЕВЛЮДОВ, В. М. БОРЦОВ, І. Т. ТИМЧУК, М. А. ПРОЦЕНКО, Н. П. ДЕМСЬКА

НОВІТНІ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ НАДЛЕГКИХ ДЕТЕКТОРНИХ МОДУЛІВ ДЛЯ ФІЗИЧНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Одним з головних завдань покращення інформативності експериментів фізики високих енергій є зменшення маси речовини в об'ємі детектування для забезпечення зменшення можливого впливу на параметри часток, що досліджуються. Одночасно, передбачається збільшення інформативності досліджень, а саме роздільної здатності, таких досліджень, що в свою чергу призводить до значного збільшення інформаційних потоків та швидкості передачі та обробки інформації. Вирішення вищезазначених головних завдань удосконалення існуючих та створення новітніх експериментів в галузі фізики можливе за рахунок розробки новітніх конструктивно-технологічних рішень детекторних модулів, які є базовою комірною сучасних детекторних систем міжнародних фізичних експериментів. Конструктивні та технологічні підходи створення детекторних модулів, головним чином, визначають відповідність головним вимогам щодо маси матеріалу та швидкодії всієї детекторної системи. Досягнення вищезазначених вимог при створенні детекторних модулів можливе при використанні найновітніших напівпровідникових чутливих елементів (сенсорів) та багатошарових елементів комутації з алюмінієвими провідниковими шарами. **Предметом** даного дослідження є технології створення детекторних модулів з низьким рівнем маси матеріалу в об'ємі детектування з використання надсучасної тонкої напівпровідникової елементної бази. **Метою** даної роботи є створення та дослідження надлегких детекторних модулів та їх прототипів при високих швидкостях передачі інформації (понад 1 Гбіт/с). Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення наступних **завдань**: розглянути існуючі новітні напівпровідникові HV-MAPS сенсори; провести вибір та обґрунтування матеріалу елементів комутації; здійснити вибір структури та технології складання детекторних модулів. За результатами вибору найбільш оптимального методу створення електричних між'єднань між компонентами модулю, а саме технології складання, провести аналіз конструктивних та технологічних вимог до детекторних модулів для експерименту Mu3e, який дозволить визначити структуру та склад модулю. З урахуванням вищезазначених конструктивних особливостей, обраних матеріалів та технологій для відпрацювання та перевірки правильності вибору матеріалів та технології складання розробити та виготовити механічний макет детекторного модулю для експерименту Mu3e та прототип надлегкої багатошарової гнучкої плати для досліджень впливу на передачу сигналу при швидкостях понад 1 Гбіт/с. **Висновки**: при виконанні роботи розроблено, виготовлено та досліджено макети детекторних модулів та тестові багатошарові плати, що підтвердили очікувані результати. Отримані результати досліджень виготовлених зразків дозволяють припустити можливий подальший розвиток робіт в напрямку використання даних підходів при створенні інноваційних детекторних модулів не лише для експерименту Mu3e, а й для експериментів з подібними жорсткими вимогами щодо мінімізації маси матеріалу в об'ємі детектування та високої швидкості проходження сигналів, наприклад модернізація/удосконалення експерименту ATLAS на Великому Адронному Коллайдері у CERN.

Ключові слова: фізичний експеримент; детекторний модуль; кремнієвий сенсор; HV-MAPS; гнучка багатошарова плата; безадгезивний лакофольговий алюміній-поліімідний діелектрик.

Вступ

Незважаючи на значні досягнення останніх років в галузі фундаментальних фізичних досліджень, головним чином обумовлені дослідженнями на Великому Адронному Коллайдері у CERN (Женева, Швейцарія), провідні наукові центри та інститути не зупиняються на досягнутому і працюють над майбутніми удосконаленнями існуючих експериментів та над створенням нових. На сьогоднішній день активно виконуються роботи, спрямовані на модернізацію детекторних установок експериментів ALICE, LHCb, ATLAS на Великому Адронному Коллайдері. Також міжнародною науковою спільнотою створюється ряд нових експериментів, серед яких і експеримент Mu3e, спрямований на дослідження фізики розпаду мюонів [1].

Одним з найголовніших та найважливіших завдань при удосконаленні існуючих та створенні нових фізичних дослідних установок є вимога до детекторних модулів, які є основною базовою комірною детекторних установок, щодо забезпечення мінімізації маси речовини в об'ємі детектування, задля підвищення роздільної здатності та інформативності отриманих результатів. При цьому, з

урахуванням гігантських обсягів інформації, що зчитується та обробляється безпосередньо при здійсненні досліджень, ще одним важливим завданням є розробка детекторних установок та їх компонентів, що забезпечуватимуть необхідний високий рівень швидкості передачі інформації (понад 1 Гбіт/с) [2].

Вирішення вищезазначених головних завдань удосконалення існуючих та створення новітніх експериментів в галузі фізики можливе за рахунок використання найновітніших напівпровідникових чутливих елементів (сенсорів) та багатошарових елементів комутації з алюмінієвими провідниковими шарами.

Одним з типів матеріалів елементів комутації, що забезпечують найкращу відповідність вимогам та забезпечують мінімізацію матеріалу в об'ємі детектування, є безадгезивні лакофольгові діелектрики з провідним алюмінієвим шаром та діелектричним поліімідним шаром. Використання елементів комутації на основі алюміній-поліімідних структур дозволяє забезпечити високу технологічність виробів, високу радіаційну стійкість (до 5000 Мрад), що обумовлено малою щільністю матеріалів ($\gamma_{Al} = 2,7 \text{ г/см}^3$ $\gamma_{Pi} = 1,42 \text{ г/см}^3$), широким діапазоном їх робочих температур ($200 \div 400 \text{ }^\circ\text{C}$), великою радіаційною довжиною ($X_{0Al} = 8,7 \text{ см}$,

$X_{0_{pi}} = 28,4$ см), а також стабільністю електричних і розмірних характеристик і успішним застосуванням методів УЗ-зварювання з алюмінієвими контактними площинками напівпровідникових приладів.

Постановка задачі та мета досліджень

Одним з найамбітніших фізичних експериментів сьогодення, з точки зору мінімізації маси матеріалу в об'ємі детектування, є експеримент Mu3e, проведення якого планується в Інституті Пауля Шеррера (англ. Paul Scherrer Institute, скор. PSI), що розташований у м. Цюріх, (Швейцарія) на новітній експериментальній установці високої щільності мюонів (англ. а High Intensity Muon Beam, скор. HiMB), що забезпечуватиме інтенсивність потоку мюонів понад 109 мюон/с та забезпечить досягнення головних фізичних завдань експерименту [1]. Особливістю експерименту Mu3e є завдання забезпечити надзвичайно низький рівень маси матеріалу на рівні $\sim 0,1\%$ X_0 (для кожного шару), що є найкращим показником на сьогоднішній день для існуючих та новостворюваних фізичних експериментів. Для порівняння, аналогічна величина для експерименту ATLAS IBL становить $\sim 1,9\%$ X_0 , для існуючого експерименту CMS – $\sim 2,0\%$ X_0 , а для модернізованого експерименту CMS становитиме $\sim 1,1\%$ X_0 ; для існуючого експерименту ALICE – $\sim 1,1\%$ X_0 , для модернізованого експерименту ALICE становитиме $\sim 0,3\%$ X_0 , та експерименту BELLE II – $\sim 0,2\%$ X_0 [3]. Ще однією особливістю експерименту Mu3e є висока швидкість передачі даних на рівні 1,25 Гбіт/с [1]. Створенням цього експерименту зайняті науковці кількох провідних наукових центрів та інститутів Швейцарії та Німеччини [1]. Головними розробниками детекторної установки експерименту та детекторних модулів є фахівці Інституту Фізики Університету Гейдельбергу (Гейдельберг, Німеччина).

Досягнення такого високого рівня показника матеріалу в об'ємі детектування та швидкості передачі даних можливе лише за рахунок використання надсучасної тонкої напівпровідникової елементної бази, елементів комутації з мінімально можливою масою матеріалу (при відповідності вимогам щодо опору електричних кіл, особливо живлення) та новітніх принципів та підходів до створення та складання детекторних модулів.

Вирішенню вищевказаних завдань, а саме розробці та дослідженню новітніх підходів та технологій створення детекторних модулів з низьким рівнем маси матеріалу в об'ємі детектування, присвячена робота.

Новітні напівпровідникові HV-MAPS сенсори

Як вказано вище, одним з шляхів забезпечення мінімізації матеріалу в об'ємі детектування є

використання надсучасної тонкої напівпровідникової елементної бази.

Напівпровідникові сенсори в детекторних системах використовуються в фізиці високих енергій вже понад п'ятдесят років. Основним матеріалом для сенсорів є кремній, завдяки таким властивостям як мала ширина забороненої зони, висока рухливість, досить великий час життя електронно-діркових пар, а також можливість роботи при кімнатній температурі. Для розробки кремнієвих сенсорів і детекторних модулів на їх основі, у фізиці високих енергій вкрай важливими стали дві обставини. По-перше, планарна технологія, яка дозволила створювати на поверхні кремнію досить складні структури; по-друге, поява мікромініатюрних інтегральних мікросхем, які стало можливо розташовувати в безпосередній близькості від сенсорів.

За функціональним принципом кремнієві сенсори розділяються на три основні типи: мікстрипові, дрейфові та піксельні. У зв'язку з тим, що піксельні кремнієві сенсори визначають відразу дві координати події при високій роздільній здатності за рахунок малих розмірів пікселів (десятки мікрон), вони знаходять все більше застосування в детекторних системах у експериментах фізики. Крім того, матричне розташування контактів забезпечує найбільшу щільність монтажу, максимальну кількість контактів на сенсорі. Крім цього, мінімальні перехідні ємності контактів у них кращі в порівнянні з іншими типами комутуючих елементів, що забезпечує працездатність при більш високих тактових частотах зовнішніх інформаційних магістралей, що є одним з найважливіших аспектів при збільшенні інформативності досліджень і, отже, значне збільшення інформаційних потоків. Матрична система виводів створює можливість розташування великої кількості між'єднань на обмеженій площі приймачів випромінювань.

Матричні піксельні кремнієві сенсори вперше були застосовані в детекторній системі експерименту ATLAS, який в даний час реалізований на Великому Адронному Колайдері (англ. Large Hadron Collider, скор. LHC) у CERN [4]. Також вони були застосовані в експериментах ALICE і CMS, які також реалізовані на цьому ж прискорювачі [5]. Мабуть, найбільш істотним в детектуючих системах є організація інтерфейсу між сенсором і електронікою зчитування (мікросхеми зчитування та обробки інформації), тобто вони, як правило, представляють собою окремі компоненти, які пов'язані між собою. При створенні детекторних модулів вищевказаних експериментів було використано гібридний підхід створення, а саме пасивні кремнієві піксельні сенсори з'єднувалися з активними мікросхемами обробки за рахунок матричного розташування кулькових виводів типу BGA (англ. Ball Grid Array) на мікросхемах [4, 5] (рис. 1, а). Ця технологія може бути вдосконалена шляхом зменшення товщини, як сенсора, так і мікросхеми, а також за рахунок зменшення кроку комутуючих кульок, наскільки це можливо. Проте, при такому підході для мінімізації маси матеріалу

існують технічні та технологічні обмеження, зокрема, крок комутуючих кулек не може бути таким малим, як це необхідно для сучасних детекторів, та товщина напівпровідникових приладів має свої технологічні обмеження.

Щоб вийти за межі цих обмежень і створити систему детектування надзвичайно високого рівня інтеграції та мінімальної товщини матеріалу, було

запропоновано революційне рішення цього завдання [6] за рахунок інтеграції сенсору (чутливої частини) і електроніки зчитування в єдиному моноклітному кремнієвому чутливому елементі (сенсорі). Такий підхід (рис. 1, б) був прийнятий і успішно реалізований при створенні КМОП моноклітних активних піксельних сенсорів (англ. CMOS Monolithic Active Pixels Sensors, скор. MAPS).

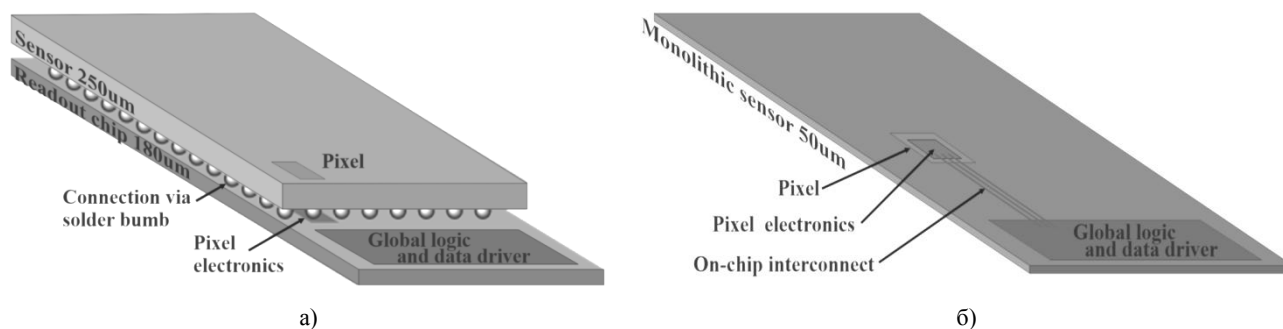


Рис. 1. Підходи створення піксельних модулів: а) гібридний; б) моноклітний

За останні 15 років світовими провідними науковими центрами та інститутами були проведені широкомасштабні розробки і дослідження для створення CMOS MAPS пристроїв. Це дозволило істотно підняти рівень технології створення таких моноклітних приладів і зробити можливим їх застосування в детекторних системах стеження і

виявлення елементарних частинок в експериментах фізики.

Прикладами практичної реалізації і досягнень у створенні вищевказаних напівпровідникових приладів є MAPS типу MIMOSA (рис. 2, а), MISTRAL (рис. 2, б), rALPIDE (рис. 2, в) і MuPix (рис. 2, г).

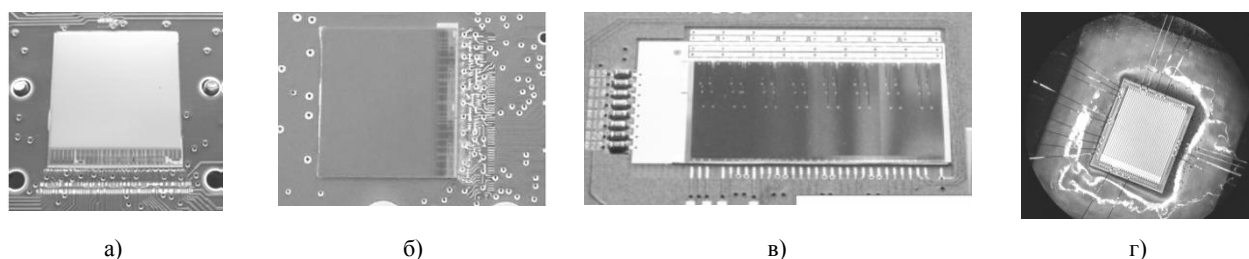


Рис. 2. Прототипи MAPS приладів

Найновішою розробкою MAPS є прилади типу HV-MAPS (англ. High Voltage-MAPS), представником яких є MuPix [7, 8]. Схематично HV-MAPS наведено на рис. 3.

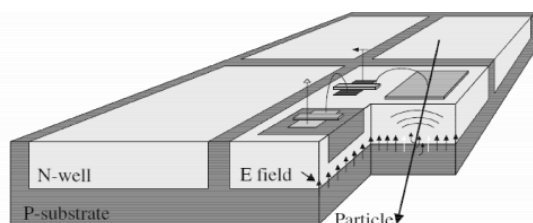


Рис. 3. Схематичне зображення HV-MAPS [6]

Особливістю таких HV-MAPS є їх створення з використанням AMS/IBM 180-нм КМОП комерційного процесу, кваліфікований для "високої" напруги до 120 В. Такий підхід дозволив підвищити швидкістю до 50-100 нс у порівнянні з іншими MAPS приладами, для яких цей показник становить кілька сотень наносекунд. З урахуванням того, що активна область є дуже тонкою, такі прилади можуть бути

виготовлені з товщиною на рівні 50 мкм та менше. Вищевказані особливості HV-MAPS роблять їх ідеально прийнятними для відстеження часток з низьким моментом при дуже високих швидкостях.

Серію прототипів HV-MAPS типу MuPix було досліджено у відповідних лабораторіях групою Mu3e Інституту Фізики Університету Гейдельбергу в тісній співпраці з Іваном Перічем (Інститут Технологій Карлсруе, Німеччина) та були проведені випробування на пучку в таких наукових центрах як CERN, DESY та PSI. В теперішній час досліджується прототип MuPix 7, який буде використано для створення детекторних модулів експерименту Mu3e.

Вибір та обґрунтування матеріалу елементів комутації

Як вказано вище, одним із шляхів забезпечення мінімізації матеріалу в об'ємі детектування є використання надсучасної тонкої напівпровідникової елементної бази.

Враховуючи жорсткі вимоги щодо мінімізації матеріалу в об'ємі детектування експерименту МуЗе, у якості комутаційних елементів, що відповідають вимогам, обрані багат шарові гнучкі плати на основі безадгезивних лакофольгових діелектриків з алюмінієвим провідним шаром.

Галузь застосування фольгованих діелектриків, як безадгезивних, так і виготовлених з використанням адгезиву, постійно розширюється. Якщо ще кілька десятків років тому основними споживачами таких матеріалів були виробники гнучких друкованих плат [9], то в даний час вони широко використовуються при виготовленні RFID-антен, різного типу міток для захисту товарів від крадіжок, гнучких друкованих кабелів і шлейфів, гнучких поліімідних носіїв, гнучких терморезисторів, мембран акустичних перетворювачів і навіть фотоелектричних перетворювачів. Важко назвати сучасну галузь науки і техніки, в якій не використовуються фольговані діелектрики. Це, як і раніше, радіоелектроніка, авіація, космонавтика, ядерні дослідження та навіть медицина.

За своєю структурною будовою фольговані діелектрики можуть бути двошаровими (безадгезивні матеріали), тришаровими, що мають структуру "метал – адгезив – полімер", і навіть багат шаровими. Враховуючи радіаційне навантаження на елементи комутації при проведенні фізичних експериментів, нестійкість адгезиву при технологічних процесах виготовлення виробів, необхідність здійснення ультразвукового зварювання плат через отвори в полііміді прийнятними для виготовлення мікрокабелів є лише безадгезивні двошарові фольговані діелектрики.

В даний час безадгезивні фольговані діелектрики виготовляються двома методами – напиленням металевому шару на полімерну плівку і нанесенням рідкого лаку на металеву фольгу з подальшим перетворенням його в полімерну плівку.

Безадгезивні фольговані діелектрики з напиленим металевим шаром, найчастіше алюмінієвим, використовуються для радіаційного захисту в скафандрах, електромагнітного екранування і виготовлення мембран акустичних перетворювачів. Однак, такі металеві плівки мають порівняно малу товщину, як правило близько мікрона, і для виготовлення з них елементів комутації для детекторних модулів непридатні. Важливо також відзначити, що напилення є порівняно дорогим процесом і його використання в технології може істотно підвищити вартість виробів, що виготовляються.

Безадгезивні фольговані матеріали, одержувані нанесенням рідкого лаку на фольгу, виготовляються в РФ ОАТ "НИИ электронных материалов" та ОАТ "Крон". В даний час ними в основному випускаються діелектрики лакофольгові типу ФДИ-АП50 і ФДИ-220 на поліімідній основі із зниженим ступенем імідазації. Вони мають товщину алюмінієвої фольги 30 мкм і поліімідної плівки 20 мкм. Однак ці матеріали є нестабільними, мають обмежений гарантійний термін зберігання не більше 6 місяців і дають велику усадку в

процесі виготовлення виробів як після стравлювання фольги, так і при проведенні технологічних операцій термообробки. Остання обставина обумовлена тим, що вироби, виготовлені з лакофольгових діелектриків із зниженим ступенем імідазації, вимагають обов'язкової фінішної термообробки при температурах порядку 300°C для доведення імідазації до повної. Тому при виготовленні з таких матеріалів складних багатовивідних виробів, зокрема мікрокабелів і шлейфів, при їх проектуванні необхідно враховувати попереджувальну поправку на усадку. Проте нестабільність властивостей поліімідної основи цих виробів робить попереджувальне коригування недостатньо ефективним.

Постійне підвищення рівня інтеграції мікросхем, що збираються з використанням гнучких поліімідних носіїв і мікрокабелів, супроводжується збільшенням кількості їхніх виводів до декількох сотень і диктує необхідність зменшення кроку виводів до 80 мкм, а часом і до 50 мкм [10]. Виготовлення таких складних багатовивідних виробів можливо тільки за рахунок істотного підвищення якості та стабільності властивостей лакофольгових діелектриків, а також зменшення товщини алюмінієвої фольги до 14 мкм [10].

Більш широка номенклатура фольгованих матеріалів представлена ТОВ НВП "Поліком", РФ. Крім вищевказаних матеріалів із зниженим ступенем імідазації цим підприємством організований також і серійний випуск ряду фольгованих матеріалів з повним ступенем імідазації з товщинами алюмінієвої фольги 14, 20, 25 і 30 мкм, а також нікелевої фольги – 7 мкм і мідної фольги – 20 мкм. Дані матеріали використовуються для виготовлення гнучких поліімідних носіїв, шлейфів, мікрокабелів, мембран акустичних перетворювачів, терморезисторів та інших виробів, що дозволяє обрати їх як основний матеріал для використання при виготовленні елементів комутації детекторних модулів. Важливо також відзначити, що діелектрики, які випускаються ТОВ НВП "Поліком", мають більш високі якісні характеристики за рахунок [11]:

- обов'язкового проведення очищення, знежирення фольги і обдування (для видалення залишків розчинника і пилу) з метою поліпшення адгезії до неї поліімідної плівки;

- обов'язкової попередньої фільтрації поліімідного лаку з метою видалення домішок і бульбашок повітря;

- забезпечення рівномірної та одночасної температурної обробки всього рулону діелектрика, намотаного спільно з стрічкою корекса, з метою гарантованої рівномірності ступеня імідазації і відпалювання алюмінію для поліпшення його зварюваності;

- проведення термообробки у вакуумній камері або печі;

- доведення ступеня імідазації поліімідної плівки до 95 – 100%.

Вибір полімерів діелектричної основи для виготовлення фольгованих діелектриків достатньо

широкий. Застосовуються самі різні матеріали: поліетилентерефталат (він же майлар або лавсан), поліімід (Картон різних типів), поліефір, поліефірсульфон, поліпарабанова кислота, гнучкий епоксіпластик і навіть поліетилен. Найбільше поширення набув поліімід внаслідок його виняткової здатності зберігати стабільність властивостей при високих температурах. Крім того, поліімідні плівки характеризуються найціннішими властивостями, такими як:

- висока електрична міцність (280 – 300 кВ/мм);
- мала густина ($\rho = 1,42$ г/см³);
- висока радіаційна стійкість (500 – 5000 Мрад);
- низька діелектрична проникність ($\epsilon = 3,5$);
- відносно висока, в порівнянні з другими полімерами, теплопровідність (150 – 180 Вт/м·К);
- висока механічна міцність в поєднанні з еластичністю;

- температурний коефіцієнт лінійного розширення полііміду майже такий же, як і у металів, що застосовуються для виготовлення виводів гнучких друкованих кабелів, шлейфів і гнучких поліімідних носіїв (алюмінію і міді);

- поліімідні плівки піддаються травленню в сильнолужних розчинах, що при необхідності дає можливість отримувати в них наскрізні отвори;

- газовиділення поліімідних плівок незначне, що дозволяє проводити вакуумне наплення на них різних металів і навіть виготовляти багатошарові гнучкі друковані плати.

При використанні алюмінію в якості провідникового шару (товщиною від 14 до 30 мкм) в місцях з'єднання виводів з контактними площадками кристалів утворюється одноконпонентна система Al-Al, що не вимагає створення додаткових виступів на кристалі. У такій монометалічній системі виключається поява інтерметалічних сполук в твердій фазі при експлуатації приладів, в тому числі при підвищених температурах. Важливим є і те, що алюміній, який має малий заряд ядра ($Z = 13$), не утворює при опроміненні вторинних ізоотопів і стійкий до впливу радіації, а при більш низькій, порівняно з міддю провідності, дає вигоду за масою приблизно в 2 рази при однаковому номіналі опорі провідників. Важливо також відзначити, що технологія фотолітографічного травлення по алюмінію досить добре відпрацьована.

Відносно висока вартість лакофольгового діелектрика типу алюміній-поліімід обумовлена високою вартістю радіаційностійкої елементної бази, при виготовленні якої, в основному, і застосовуються дані матеріали.

Комплексний огляд та аналіз всіх властивостей можливих матеріалів металевого і полімерного шарів фольгованих діелектриків, а також особливостей напівпровідникових компонентів детекторних модулів дозволяє виділити в якості найбільш прийнятної при виготовленні елементів комутації детекторних модулів безадгезивний діелектрик типу алюміній-поліімід з повним ступенем імідазації. Це лакофольгові діелектрики типу ФДІ-А різних марок

(ФДІ-А-24 і ФДІ-А-50), що виготовляються ТОВ НВП "Поліком".

Використання таких матеріалів дозволяє:

- забезпечити високу надійність зварних з'єднань за рахунок утворення монометалічного з'єднання Al-Al, що не потребує створення додаткових виступів на кристалі;

- забезпечити широку номенклатуру товщин, як провідникового шару алюмінію (14, 20, 25 і 30 мкм), так і поліімідної основи, чим суттєво розширює можливості розробників при проектуванні виробів з даних матеріалів;

- забезпечити можливість складання компонентів детекторних модулів, як ультразвуковим зварюванням, так і, при необхідності, пайкою після додаткової обробки алюмінієвих виводів за відомим способом або електрохімічної обробкою;

- підвищити щільність монтажу за рахунок зменшення ширини виводів виробів до 30–40 мкм і їхнього кроку до 50–80 мкм [10];

- забезпечити можливість роботи елементів комутації в умовах теплових і радіаційних навантажень [10].

Варто відзначити обставину, що на сьогоднішній день наявні для використання лише кілька типів безадгезивних лакофольгових діелектриків (ФДІ-А-20, ФДІ-А-24 та ФДІ-А-50) з товщиною алюмінієвого шару 10-30 мкм, а поліімідного – 10-20 мкм, які можуть бути використані для виготовлення шарів одно- та багатошарових гнучких мікрокабелів та плат, а це накладає певні обмеження на їх використання (особливо при необхідності забезпечення меншого опорі провідникових структур, що може бути реалізовано лише за рахунок збільшення товщини алюмінієвого провідного шару). Враховуючи такі обставини в теперішній час фахівцями ТОВ "Світлодіодні технології Україна" та Харківського національного університету радіоелектроніки, здійснюється ряд конструкторсько-технологічних робіт та технологічних досліджень, спрямованих на розробку технології виготовлення безадгезивних алюміній-поліімідних лакофольгових матеріалів з використанням вихідної алюмінієвої фольги різної товщини. В теперішній час проводяться дослідження створення матеріалу з товщиною алюмінієвої фольги 15, 50 та 100 мкм, що обумовлено наявною необхідністю використання таких матеріалів для створення компонентів детекторних модулів для експериментів фізики високих енергій, а саме для модернізованої Внутрішньої трекової системи експерименту ALICE [12] та CBM [13]. При цьому реалізація діелектричного поліімідного шару передбачається за рахунок використання рідких поліімідних лаків типу АД-9103 та PureML-5069, що забезпечуватиме товщину діелектричного шару в межах 5–50 мкм. Роботи по створенню безадгезивного лакофольгового матеріалу з товщиною алюмінієвої фольги 15 мкм проводяться спільно з фахівцями наукового центру GSI (Дармштадт, Німеччина) та Інституту Фраунгофера (Дрезден, Німеччина). Варто відзначити, що однією з особливостей вищезначених

робіт зі створення безадгезивних матеріалів, є роботи спрямовані на створення безадгезивних алюміній-поліімідних матеріалів з алюмінієвої фольги з діелектричним поліімідним шаром з обох боків. Матеріали такого типу на сьогоднішній день відсутні, а враховуючи конструктивні та технологічні вимоги до компонентів детекторних модулів, такі матеріали дозволятимуть реалізувати нові конструктивні та технологічні підходи до створення детекторних модулів та їх компонентів.

З урахуванням вимог щодо мінімізації матеріалу в об'ємі детектування експерименту МуЗе, високої щільності розташування контактних площинок компонентів детекторних модулів, а, відповідно, і високої щільності розташування провідників на елементах комутації та вищеписаних переваг лакофольгових безадгезивних матеріалів у якості комутаційних елементів детекторних модулів обрано багат шарові гнучкі плати з провідниковими шарами на основі лакофольгового діелектрику типу ФДІ-А-24 [14]. Використання лакофольгового діелектрику типу ФДІ-А-24 у якості матеріалу для виготовлення компонентів (одно- та багат шарових елементів комутації) детекторних модулів експерименту МуЗе перевірено та підтверджено розробкою, виготовленням, дослідженням та впровадженням у виробництво подібних виробів для експериментів

фізики високих енергій, а саме для ALICE, CBM та LHCb [5, 10, 15, 16].

Вибір технології складання детекторних модулів

При розробці високотехнологічних виробів, якими є детекторні модулі, надзвичайно важливим є вибір найбільш оптимального методу створення електричних між'єднань між компонентами модулю, а саме технології складання.

Порівняльна характеристика параметрів електричних з'єднань, виконаних різними методами, наведена в табл. 1. Паяні електричні з'єднання знайшли найширше застосування завдяки наступним перевагам: низькому і стабільному електричному опору, широкій номенклатурі металів, що сполучаються, легкості автоматизації, контролю та ремонту. Недоліки паяних з'єднань пов'язані з високою вартістю використовуваних кольорових металів, необхідністю видалення залишків флюсу, низькою термостійкістю. Зварні електричні з'єднання в порівнянні з паяними сполуками мають наступні переваги: більш висока механічна міцність, відсутність присадочного матеріалу, менша площа контакту. До недоліків слід віднести: критичність при виборі поєднань матеріалів, збільшення перехідного опору через утворення інтерметалідів, складність групового контактування і ремонту.

Таблиця 1. Параметри електричних з'єднань

Вид з'єднання	Перехідний опір, мОм	Міцність, МПа	Інтенсивність відмов, $1 \cdot 10^{-9} \text{ год}^{-1}$	Тепловий опір, $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$
Зварювання	0,01 – 1	100 – 500	0,1 – 3,0	0,001
Накручування	1 – 2	60 – 80	0,2 – 0,5	0,0005
Паяння	2 – 5	40 – 50	1 – 10	0,002
Обжимання	1 – 10	20 – 50	2 – 5	0,001
Струмопровідним клеєм	(1 – 10) Ом·м	5 – 10	50	5,0

Дуже важливим фактором при розробці та створенні високотехнологічних детекторних модулів, якими є модулі експерименту МуЗе, є вибір оптимального методу створення електричних між'єднань компонентів детекторних модулів для забезпечення відповідності досить жорстким вимогам при гарантуванні високої довгострокової надійності.

З огляду на вимоги і особливості конструктивно-технологічних рішень піксельних детекторних модулів, використання напівпровідникових HV-MAPS сенсорів та безадгезивних лакофольгових алюміній-поліімідних діелектриків, для створення модулів експерименту МуЗе було обрано автоматизоване ультразвукове контактне мікрозварювання, що дозволяє здійснювати високонадійне автоматизоване з'єднання алюмінієвих плоских стрічкових виводів гнучких комутаційних плат до контактних площинок кремнієвих піксельних сенсорів за допомогою ультразвукового зварювання. Ця технологія отримала назву SpTAB (Single point Tape Automated Bonding). Основні варіанти реалізації міжелементних з'єднань SpTAB технологією схематично наведено на рис. 4.

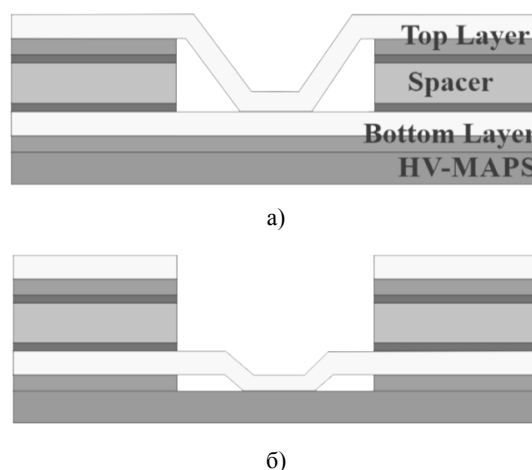


Рис. 4. Схематичне зображення міжелементних з'єднань, створених SpTAB технологією: а) між шарами гнучкої плати; б) між гнучкою платою та HV-MAPS

Sp-TAB технологія була успішно застосована авторським колективом при створенні мікстрипових і дрейфових детекторних модулів для діючої в даний

час внутрішньої трекової системи в експерименті ALICE [5].

Вищевказана технологія має істотні переваги, основними з яких є:

- використання цієї технології для безпосереднього з'єднання шарів багатшарових гнучких комутаційних плат між собою і з контактними площинками HV-MAPS (відсутність необхідності використання дротяних перемичок);

- ультразвукове зварювання алюмінієвих виводів гнучких комутаційних плат до алюмінієвих контактних площинок HV-MAPS забезпечує однорідність, високонадійне та механічно стабільне з'єднання;

- відсутність важких металів (Au, Sn), присутніх при пайці;

- відсутність необхідності обслуговування контактних площинок напівпровідникових приладів, що дозволяє зменшити витрати на їх виготовлення;

- можливість використання стандартного промислового автоматизованого обладнання для основних процесів складання (зварювання, приклеювання і інкапсуляція).

Експериментальні дослідження та отримані результати

Експериментальні дослідження створення детекторних модулів для експерименту Mu3e включали в наступні основні етапи:

- визначення структури та складу детекторного модулю;

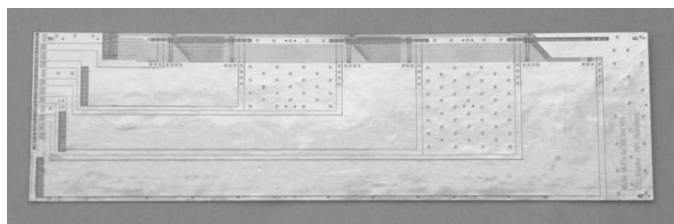
- розробка, виготовлення компонентів та складання механічного макету детекторного модулю для перевірки правильності вибору матеріалів та технології складання;

- розробка, виготовлення та дослідження багатшарової тестової плати при швидкості передачі інформації 1,25 Гбіт/с;

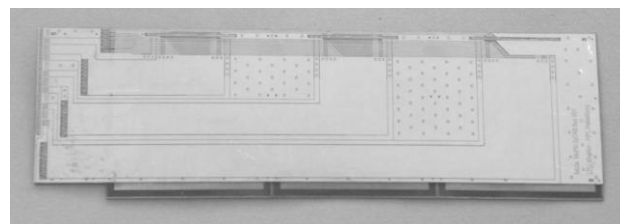
- аналіз отриманих даних.

Структура та склад детекторного модулю

Проведений аналіз конструктивних та технологічних вимог до детекторних модулів експерименту Mu3e дозволив визначити структуру (поперечний переріз наведено на рис. 5) та склад модулю.



а)



б)

Рис. 6. Механічний макет детекторного модуля: а) гнучка тришарова плата; б) складений механічний макет модуля

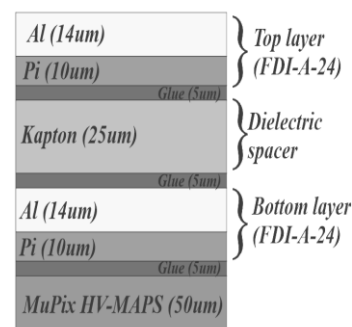


Рис. 5. Структура детекторного модулю

Вищеописана структура, що визначалась з урахуванням матеріалів, які виробляються промислово, дозволила забезпечити показник матеріалу в об'ємі детектування на рівні $\sim 0,115\% X_0$.

Щодо особливостей складу детекторного модуля варто відзначити наступні особливості:

- передбачено використання детекторних модулів двох типів: для внутрішніх піксельних шарів (inner pixel layer), що міститимуть 6 HV-MAPS та для зовнішніх шарів (outer pixel layer), які міститимуть 9 HV-MAPS;

- нижній шар багатшарової гнучкої плати містить, головним чином, сигнальні кола й кола живлення та виготовляється з алюміній-поліімідного діелектрику типу ФДІ-А-24 (алюміній 14 мкм, поліімід 10 мкм);

- верхній шар містить кола живлення та також виготовляється з алюміній-поліімідного діелектрику типу ФДІ-А-24;

- для забезпечення необхідної величини імпедансу передбачено використання діелектричної прокладки з поліімідної плівки товщиною 25 мкм.

Розробка механічного макету детекторного модулю

З урахуванням вищезначених конструктивних особливостей, обраних матеріалів та технологій для відпрацювання та перевірки правильності вибору матеріалів та технології складання було розроблено та виготовлено механічний макет детекторного модуля для експерименту Mu3e. Для складання модулю було використано тришарову плату (рис. 6, а) на основі безадгезивного лакофольгового діелектрику (провідні шари) й поліімідної діелектричної прокладки, та макети HV-MAPS й друковану жорстку плату. Складений механічний макет модуля наведено на рис. 6, б.

Створений механічний макет детекторного модулю підтвердив правильність обраних матеріалів та технології складання.

Розробка тестової багатшарової гнучкої плати

Для виконання наступного етапу досліджень було проведено розроблення, виготовлення та складання спеціалізованої тестової плати для дослідження проходження сигналів за швидкості 1,25 Гбіт/с та впливу плати на передачу сигналу.

Тестову плату розроблено з урахуванням обраної структури з двома провідниковими шарами на основі безадгезивного лакофольгового діелектрику та поліімідної діелектричної прокладки (рис. 7, а). Після виготовлення шарів та безпосередньо складання багатшарової плати було здійснено монтаж багатшарової плати на спеціально розроблену жорстку друковану плату (рис. 7, б). Після монтажу гнучкої плати на жорстку друковану плату було здійснено монтаж ВЧ роз'ємів (рис. 7, в).

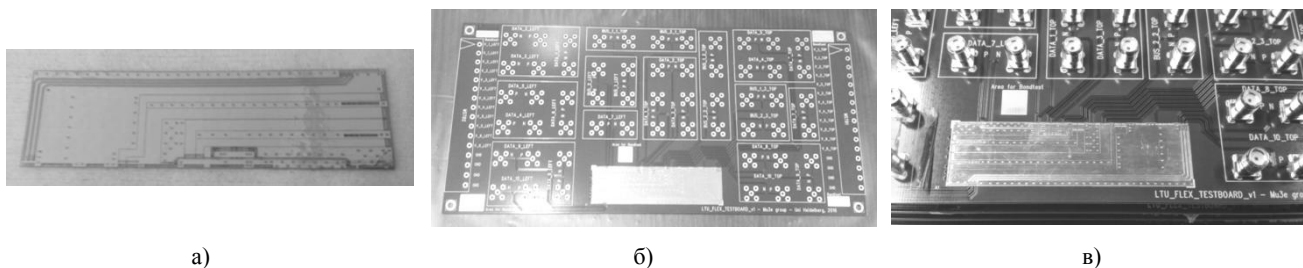


Рис. 7. Тестова багатшарова плата для досліджень: а) тестова плата; б) плата змонтована на друковану плату; в) фрагмент плати із змонтованими роз'ємами

Дослідження та аналіз отриманих результатів

Для оцінки функціонування тестової плати при швидкості передачі інформації 1,25 Гбіт/с в Інституті Фізики Університету Гейдельбергу були проведені відповідні дослідження глазової діаграми (Eye Diagram), яка наведена на рис. 8.

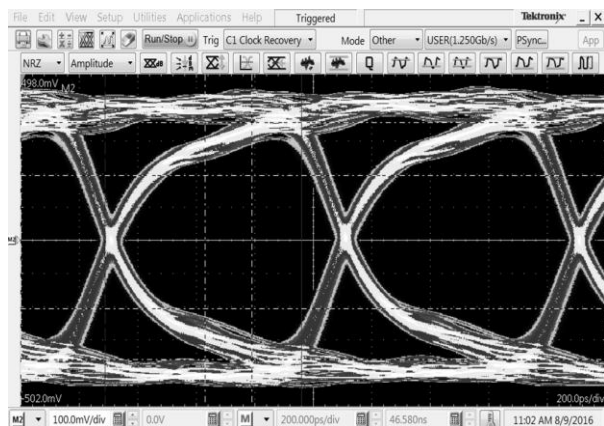


Рис. 8. Глазкова діаграма тестової плати

Дослідження проводились при швидкості передачі сигналів 1,25 Гбіт/с та заданому рівні параметру прийняття помилкового біту інформації (англ. Bit Error Ratio, скор. BER), що становив $BER < 2 \cdot 10^{-13}$ при довірчій ймовірності (параметр CL) 95%. Отримані результати були позитивними і бітових помилок не було відзначено.

Продовжені дослідження для швидкості проходження сигналу на рівні 2,5 Гбіт/с також показали позитивні результати та відсутність бітових помилок (за $BER < 3 \cdot 10^{-13}$ при $CL=95\%$), що дозволило зробити висновок про можливість використання таких гнучких багатшарових плат не лише на швидкості передачі сигналів 1,25 Гбіт/с, що вимагається для реалізації в експерименті Mu3e, а й у

інших експериментах з більшою швидкістю передачі сигналів.

Висновки

Стрімкий розвиток рівня техніки і технологій, особливо мікроелектроніки, а також підвищення вимог до детекторних систем в міжнародних експериментах фізики елементарних частинок є дуже значним поштовхом для розробки новітніх конструктивно-технологічних рішень детекторних модулів. Одним з найамбітніших експериментів є експеримент з дослідження мюонів Mu3e, що відзначається надвисокими вимогами щодо мінімізації маси матеріалу в об'ємі детектування ($\sim 0,1\% X_0$) та планованою швидкістю передачі сигналів на рівні 1,25 Гбіт/с. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження показали, що при використанні надсучасних тонких HV-MAPS типу MuPix товщиною 50 мкм та багатшарових плат з провідниковими шарами на основі алюміній-поліімідних безадгезивних фольгових діелектриків типу ФДІ-А-24 та діелектричної прокладки можливо досягнути показника маси матеріалу в об'ємі детектування на рівні $\sim 0,115\% X_0$. При цьому дослідження проходження сигналу через тестові багатшарові плати показали позитивні результати (відсутність бітових помилок) не лише на швидкості 1,25 Гбіт/с, але й для 2,5 Гбіт/с.

При виконанні роботи розроблені, виготовлені та досліджені макети детекторних модулів та тестові плати для досліджень, що підтвердили очікувані результати. Отримані результати досліджень виготовлених зразків дозволяють припустити можливий подальший розвиток робіт в напрямку використання даних підходів при створенні інноваційних детекторних модулів не лише для

експерименту Mu3e, а й для експериментів з подібними жорсткими вимогами щодо мінімізації маси матеріалу в об'ємі детектування та високої швидкості проходження сигналів, наприклад модернізація/удосконалення експерименту ATLAS на LHC у CERN.

Окрім вищенаведеного варто відзначити, що отримані результати дозволяють показати наявність комерційного наукового вітчизняного потенціалу, наразі у Харківському національному університеті радіоелектроніки та ТОВ "Світлодіодні технології Україна" (м. Харків, Україна), у створенні сучасних мікроелектронних комутаційних елементів на основі лакофольгових діелектриків з алюмінієвою

комутацією та технологій їх складання з надсучасною напівпровідниковою елементною базою, придатних для використання в конструкціях високотехнологічних систем детектування для міжнародних експериментів в галузі фізики. Роботи у напрямку створення новітніх високотехнологічних детекторних модулів і їх компонентів сприяють значній інтеграції та подальшому поглибленню співпраці українських вчених та інженерів з провідними європейськими дослідними центрами та інститутами, що ще значною мірою поглиблює інтеграцію України до Європейської наукової співдружності.

Список літератури

1. Blondel, A., Bravar, A., Pohl, M. et al. (2012), Research Proposal for an Experiment to Search for the Decay $\mu \rightarrow eee$, Paul Sherrer Institute (PSI), December 2012, 104 p.
2. Kosenko, V., Persyanova, E., Belotskyu, O., Malyeyeva, O. (2017), "Methods of managing traffic distribution in information and communication networks of critical infrastructure systems", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 2 (2), P. 48–55. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.2.048>.
3. Berger, N., Dittmeier, S., Henkelmann, L., Herkert, A., Aeschbacher, F. M., Ng, Y. W., Wiedner, D. (2016), "Ultra-low material pixel layers for the Mu3e experiment", *Journal of Instrumentation*, No. 11 (12). DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/12/C12006>.
4. Abelev, Betty B. I. et al. (2014), "Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking System", *Journal of Physics G : Nuclear and Particle Physics*, 195 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/0954-3899/41/8/087002>.
5. Dellacasa, G. et al. (1999), (ALICE Collaboration), ALICE technical design report of the inner tracking system (ITS), CERN/LHCC 99-12, June 1999. 373 p.
6. Aamodt, K. (Oslo U.) et al. (2008), "The ALICE experiment at the CERN LHC", *Journal of Instrumentation*, JINST 3, 159 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08002>.
7. Gaycken, G., Besson, A., Gay, A., Gornushkin, Y., Grandjean, D., Guilloux, F., Szelezniak, M. (2006), Monolithic active pixel sensors for fast and high resolution vertex detectors, 13th International Workshop on Vertex Detectors - VERTEX 2004, Sep 2004, Menaggio - Como, Italy, 560, P. 44–48.
8. Perić, I. (2007), "A novel monolithic pixelated particle detector implemented in high-voltage CMOS technology", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, No. 582 (3), P. 876–885. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.07.115>.
9. Perić, I., Kreidl, C., & Fischer, P. (2011), "Particle pixel detectors in high-voltage CMOS technology - new achievements", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, No. 650 (1), P. 158–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.11.090>.
10. Гуськов Г. Я., Блинов Г. А., Азаров А. А. Монтаж микроэлектронной аппаратуры. Москва : Радио и связь, 1986. 176 с.
11. Борщев В. Н., Антонова В. А., Листратенко А. М. и др. Комплексный подход к выбору конструктивно-технологических решений гибко-жестких одноканальных модулей для комптоновской медицинской томографии. *Сцинтилляционные материалы : Инженерия, устройства, применение*. Харьков. 2009. С. 111–127.
12. Плис Н. И., Вербицкий В. Г., Жора В. Д. и др. Технология сборки микросхем на гибком полиимидном носителе. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2010. № 5–6. С. 43–45.
13. Abelev, V. et al. (2013), "(The ALICE Collaboration) The ALICE Collaboration Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking System", *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, [CERN-LHCC-2013-024] 06.12.2013, 181 p.
14. Technical Design Report for the CBM. Silicon Tracking System (STS). The CBM Collaboration. GSI Report 2013 – GSI Darmstadt, Germany, December 2012. 175 p.
15. ЮУО.037.042 ТУ Технические условия. Диэлектрик лакофольговый ФДИ.
16. Borshchov, V. M., Heuser, J. M., Murin, Yu. A. et al. (2010), Development of ultra-thin cables for the CBM Silicon Tracking System, CBM Progress Report .2009 – GSI Darmstadt, Germany, 15 p.
17. Кандыбей С. С., Тымчук И. Т., Проценко М. А. Разработка и тестирование прототипа базового детекторного модуля для модернизации внутреннего трекера эксперимента LHCb. Тезисы докладов XIV Конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям. ННЦ ХФТИ, 2016. С. 31.

References

1. Blondel, A., Bravar, A., Pohl, M. et al. (2012), *Research Proposal for an Experiment to Search for the Decay $\mu \rightarrow eee$* , Paul Sherrer Institute (PSI), December 2012, 104 p.
2. Kosenko, V., Persyanova, E., Belotskyu, O., Malyeyeva, O. (2017), "Methods of managing traffic distribution in information and communication networks of critical infrastructure systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (2), P. 48–55. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.2.048>.
3. Berger, N., Dittmeier, S., Henkelmann, L., Herkert, A., Aeschbacher, F. M., Ng, Y. W., Wiedner, D. (2016), "Ultra-low material pixel layers for the Mu3e experiment", *Journal of Instrumentation*, No. 11 (12). DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/12/C12006>.

4. Abelev, Betty B. I. et al. (2014), "Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking System", *Journal of Physics G : Nuclear and Particle Physics*, 195 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/0954-3889/41/8/087002>.
5. Dellacasa, G. et al. (1999), (ALICE Collaboration), *ALICE technical design report of the inner tracking system (ITS)*, CERN/LHCC 99-12, June 1999. 373 p.
6. Aamodt, K. (Oslo U.) et al. (2008), "The ALICE experiment at the CERN LHC", *Journal of Instrumentation*, JINST 3, 159 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08002>.
7. Gaycken, G., Besson, A., Gay, A., Gornushkin, Y., Grandjean, D., Guilloux, F., Szelezniak, M. (2006), "Monolithic active pixel sensors for fast and high resolution vertex detectors", *13th International Workshop on Vertex Detectors - VERTEX 2004*, Sep 2004, Menaggio - Como, Italy, No. 560, P. 44–48.
8. Perić, I. (2007), "A novel monolithic pixelated particle detector implemented in high-voltage CMOS technology", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, No. 582 (3), P. 876–885. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.07.115>.
9. Perić, I., Kreidl, C., & Fischer, P. (2011), "Particle pixel detectors in high-voltage CMOS technology - new achievements", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, No. 650 (1), P. 158–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.11.090>.
10. Guskov, G. Ya., Blinov, G. A., Gazarov, A. A. (1986), *Montazh mikroelektronnoy apparatury*, Moscow : Radio i svyaz, 176 p.
11. Borshev, V. N., Antonova, V. A., Listratenko, A. M. i dr. (2009), "Kompleksnyiy podhod k vyбору konstruktivno-tehnologicheskikh resheniy gibko-zhestkikh odnodetkornykh moduley dlya komptonovskoy meditsinskoy tomografii", *Stintillyatsionnyye materialy : Inzheneriya, ustroystva, primenenie*, Kharkiv, P. 111–127.
12. Plis, N. I., Verbitskiy, V. G., Zhora, V. D. i dr. (2010), "Tehnologiya sborki mikroschem na gibkom poliimidnom nositele", *Tehnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, No. 5–6, P. 43–45.
13. Abelev, B. et al. (2013), "(The ALICE Collaboration) The ALICE Collaboration Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking System", *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, [CERN-LHCC-2013-024] 06.12.2013, 181 p.
14. *Technical Design Report for the CBM, Silicon Tracking System (STS)*, The CBM Collaboration, GSI Report 2013 – GSI Darmstadt, Germany, December 2012, 175 p.
15. YIUO.037.042 TU Tehnicheskie usloviya, Dielektrik lakofolgovyy FDI.
16. Borshchov, V. M., Heuser, J. M., Murin, Yu. A. et al. (2010), Development of ultra-thin cables for the CBM Silicon Tracking System, CBM Progress Report .2009 – GSI Darmstadt, Germany, 15 p.
17. Kandybey, S. S., Tymchuk, I. T., Protsenko, M. A. (2016), "Razrabotka i testirovaniye prototipa bazovogo detektornogo modulya dlya modernizatsii vnutrennego tretera eksperimenta LHCb", *Tezisyi dokladov XIV Konferentsii po fizike vyisokih energiy, yadernoy fizike i uskoritelyam*, NNTs HFTI, Kharkiv, P. 31.

Надійшла (Received) 01.09.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Невлюдов Ігор Шакирович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, м. Харків, Україна; e-mail: igor.nevliudov@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9837-2309>.

Невлюдов Ігорь Шакирович – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, заведующий кафедрой компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, г. Харьков, Украина.

Nevliudov Igor – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radioelectronics, Head at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

Борщов Вячеслав Миколайович – доктор технічних наук, професор, ТОВ "Світлодіодні технології Україна", Перший заступник директора-Головний конструктор, м. Харків, Україна; e-mail: viatcheslav.borshchov@cern.ch; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5579-8932>.

Борщов Вячеслав Николаевич – доктор технических наук, профессор, ООО "Светлодиодные технологии Украина", Первый заместитель директора-Главный конструктор, г. Харьков, Украина.

Borshchov Viatcheslav – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, LED Technologies of Ukraine Ltd, First Deputy Director - Chief Designer, Kharkiv, Ukraine.

Тимчук Ігор Трохимович – Харківський національний університет радіоелектроніки, молодший науковий співробітник кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, м. Харків, Україна; e-mail: ihor.tymchuk@cem.ch; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6436-7253>.

Тимчук Ігорь Трофимович – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, младший научный сотрудник кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, г. Харьков, Украина.

Tymchuk Ihor – Kharkiv National University of Radioelectronics, Junior Researcher at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

Проценко Максим Анатолійович – кандидат технічних наук, ТОВ "Світлодіодні технології Україна", Заступник директора-заступник Головного конструктора, м. Харків, Україна; e-mail: max.protsenko.1978@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9313-1701>.

Проценко Максим Анатольевич – кандидат технических наук, ООО "Светлодиодные технологии Украина", Заместитель директора-заместитель Главного конструктора, г. Харьков, Украина.

Protsenko Maksym – PhD (Engineering Sciences), LED Technologies of Ukraine Ltd, Deputy Director-Deputy Chief Designer, Kharkiv, Ukraine.

Демська Наталія Павлівна – Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, м. Харків, Україна; e-mail: demska.nataliia@nure.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9931-9964>.

Демская Наталья Павловна – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, старший преподаватель кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, г. Харьков, Украина

Demska Nataliia – Kharkiv National University of Radioelectronics, Senior Lecturer at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

НОВЕЙШИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ СВЕРХЛЕГКИХ ДЕТЕКТОРНЫХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Одной из главных задач улучшения информативности экспериментов физики высоких энергий является уменьшение массы вещества в объеме детектирования для обеспечения уменьшения возможного влияния на параметры исследуемых частиц. Одновременно, предусматривается увеличение информативности исследований, а именно разрешительной способности, таких исследований, что, в свою очередь приводит к значительному увеличению информационных потоков и скорости передачи и обработки информации. Решение вышеуказанных главных задач совершенствования существующих и создания новых экспериментов в области физики возможно за счет разработки новых конструктивно-технологических решений детекторных модулей, которые являются базовой ячейкой современных детекторных систем международных физических экспериментов. Конструктивные и технологические подходы создания детекторных модулей, главным образом, определяют соответствие главным требованиям по массе материала и быстродействию всей детекторной системы. Достижения вышеприведенных требований при создании детекторных модулей возможно при использовании новейших полупроводниковых чувствительных элементов (сенсоров) и многослойных элементов коммутации с алюминиевыми проводящими слоями. **Предметом** данного исследования являются технологии создания детекторных модулей с низким уровнем массы материала в объеме детектирования с использованием сверхсовременной тонкой полупроводниковой элементной базы. **Целью** данной работы является создание и исследование сверхлегких детекторных модулей и их прототипов при высоких скоростях передачи информации (более 1 Гбит/с). Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **задач**: рассмотреть существующие новейшие полупроводниковые HV-MAPS сенсоры; провести выбор и обоснование материала элементов коммутации; осуществить выбор структуры и технологии сборки детекторных модулей. По результатам выбора наиболее оптимального метода создания электрических межсоединений между компонентами модуля, а именно технологии сборки, провести анализ конструктивных и технологических требований к детекторным модулям для эксперимента Mu3e, который позволит определить структуру и состав модуля. С учетом вышеуказанных конструктивных особенностей, выбранных материалов и технологий для отработки и проверки правильности выбора материалов и технологии сборки разработать и изготовить механический макет детекторного модуля для эксперимента Mu3e и прототип сверхлегкой многослойной гибкой платы для исследований влияния на передачу сигнала при скоростях более 1 Гбит/с. **Выводы**: при выполнении работы разработаны, изготовлены и исследованы макеты детекторных модулей и тестовые многослойные платы, которые подтвердили ожидаемые результаты. Полученные результаты исследований изготовленных образцов позволяют предположить возможное дальнейшее развитие работ в направлении использования данных подходов при создании инновационных детекторных модулей не только для эксперимента Mu3e, но и для экспериментов с подобными жесткими требованиями по минимизации массы материала в объеме детектирования и высокой скорости прохождения сигналов, например модернизация / усовершенствование эксперимента ATLAS на Большом адронном коллайдере в CERN.

Ключевые слова: физический эксперимент; детекторный модуль; кремниевый сенсор; HV-MAPS; гибкая многослойная плата; безадгезивный лакофольгованный алюминий-полиимидный диэлектрик.

THE ADVANCED DESIGN AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS OF ULTRALIGHT DETECTOR MODULES FOR PHYSICAL EXPERIMENTS

One of the main tasks of improving the informative value of the experiments of high energy physics is to reduce the mass of matter in the detection volume to ensure reducing a probable impact on the parameters of particles under study. At the same time, the informative value of a research is planned to be increased, namely, the solvability of such studies, which, in turn, leads to a significant increase in information flows and the speed of data transmission and processing. The above-mentioned main tasks of improving available experiments and creating new ones in the sphere of physics can be solved due to the development of new design and technological solutions for detector modules, which are the basic cell of modern detection systems of international physics experiments. The constructive and technological approaches to creating detector modules mainly determine the fact whether the mass of the material and the speed of the entire detector system meet the set requirements. The above requirements while creating detector modules can be met if advanced semiconductor sensitive elements (sensors) and multi-layer switching elements with aluminium conductive layers are used. The **subject** matter of this study is the technology of creating detector modules with the low level of material mass in the detection volume using the advanced thin semiconductor element base. The **goal** of this work is to create and study ultra-light detector modules and their prototypes at high data transmission rates (over 1 Gbit/s). In order to achieve the goal, the following **tasks** are to be solved: the advanced HV-MAPS semiconductor sensors should be studied; the material of switching elements should be selected and this selection should be justified; the structure and technology for the detector modules assembly should be chosen. According to the results of the selection of the optimal method for the electrical interconnection of the module components, namely the assembly technology, the constructive and technological requirements for detector modules for the Mu3e experiment should be analyzed; the analysis will determine the structure and composition of the module. Taking into account the above design features, selected materials and technologies for selecting good materials and verifying this selection as well as the

assembly technology, the mechanical experimental model of the detector module for Mu3e experiment and the prototype of an ultra-light multi-layer flexible board should be developed and made for studying the impact of signal transmission at speeds over 1 Gbit/s.

Conclusions: when performing the work, the experimental models of detector modules and test multi-layer boards were developed, manufactured and studied; these models proved the expected results. The obtained results of studying the manufactured models make further work possible for using these approaches while creating innovative detector modules not only for Mu3e experiment but also for experiments with similar strict requirements for minimizing material mass in the detection volume and high speed of signal transmission, for example, upgrading/improving ATLAS experiment at Large Hadron Collider at CERN.

Keywords: physical experiment; detector module; silicon sensor; HV-MAPS; flexible multi-layer board; inadhesive lacquer-foiled aluminum-polyimide dielectrics.
