

УДК531.1.075;621.315.21

Innovative microelectronic technologies for high energy physics experiments

Borshchov V.M., Listratenko O.M., Protsenko M.A., Tymchuk I.T., Fomin O.O.
"LED Technologies of Ukraine" Ltd, Novgorodskaya str, 3, 61145 Kharkiv, Ukraine

New approaches to creating innovative design and technological solutions and manufacture technologies of advanced thin pixel array detector modules based on high resolution CMOS monolithic active pixel sensors and flexible adhesiveless aluminium-polyimide flexible boards and cables for high energy physics experiments are proposed.

Keywords: thin pixel sensor, detector module, flexible board

Инновационные микроэлектронные технологии для экспериментов в физике высоких энергий

Борщев В.Н., Листратенко А.М., Проценко М.А., Тымчук И.Т., Фомин А.А.
ООО "Светодиодные технологии Украина", ул. Новгородская, 3, 61145, г. Харьков, Украина

Предложены новые подходы к созданию инновационных конструктивно-технологических решений и технологий изготовления усовершенствованных тонких пиксельных матричных детекторных модулей на основе КМОП монолитных активных пиксельных сенсоров высокого разрешения и гибких безадгезивных алюминий-полиимидных коммутационных плат и шлейфов для экспериментов в физике высоких энергий.

Ключевые слова: тонкий пиксельный сенсор, детекторный модуль, гибкая плата

Інноваційні мікроелектронні технології для експериментів у фізиці високих енергій

Борщов В.М., Лістратенко О.М., Проценко М.А., Тимчук І.Т., Фомін О.О.
ТОВ "Світлодіодні технології Україна", вул. Новгородська, 3, 61145, м. Харків, Україна

Запропоновано нові підходи до створення інноваційних конструктивно-технологічних рішень і технологій виготовлення удосконалених тонких піксельних матричних детекторних модулів на основі КМОП монолітних активних піксельних сенсорів високої роздільної здатності та гнучких безадгезивних алюміній-поліімідних комутаційних плат і шлейфів для експериментів у фізиці високих енергій.

Ключові слова: тонкий піксельний сенсор, детекторний модуль, гнучка плата

Инновационные микроэлектронные технологии для экспериментов в физике высоких энергий

Борщев В.Н., Листратенко А.М., Проценко М.А., Тымчук И.Т., Фомин А.А.
ООО "Светодиодные технологии Украина", ул.Новгородская, 3, 61145, г.Харьков, Украина

1 Введение

В последние десятилетия в ядерную электронику интенсивно внедряется микроэлектроника [1,2], что позволяет обеспечить соответствие возрастающим к ядерной электронике требованиям. В экспериментальных исследованиях в области физики высоких и сверхвысоких энергий широко используются многоканальные детекторы заряженных частиц и ассоциированная с ними электроника считывания и обработки информации на основе современных полупроводниковых приборов, которые конструктивно выполнены в виде типовых модулей. В связи с гигантским объемом считываемой информации необходимо решать проблемы, связанные с обменом данными между различными устройствами и блоками электроники в условиях жестких временных ограничений. Кроме того, при совместном функционировании большого количества детекторных модулей приходится решать проблему обеспечения помехоустойчивости входящих в них устройств и снижения создаваемых ими помех. Эти задачи последовательно решаются на системотехническом, схемотехническом и конструктивно-технологическом уровне [3,4].

Полупроводниковые сенсоры в детекторных системах используются в физике высоких энергий уже более пятидесяти лет. Основным материалом для сенсоров является кремний, благодаря таким свойствам, как малая ширина запрещенной зоны, высокая подвижность носителей заряда, достаточно большое время жизни электронно-дырочных пар, а также возможность работы при комнатной температуре. Для разработки кремниевых сенсоров и детекторных модулей на их основе, в физике высоких энергий крайне важными стали два обстоятельства. Во-первых, планарная технология, позволившая создавать на поверхности кремния достаточно сложные структуры; во-вторых, появление микроминиатюрных интегральных микросхем, которые стало возможно размещать в непосредственной близости от сенсоров.

По функциональному принципу кремниевые сенсоры можно разделить на три основных типа: микростриповые, дрейфовые и пиксельные. В микростриповых, как и в дрейфовых сенсорах, чувствительной ячейкой является "стрип" – полоса шириной до сотни микрометров и длиной до десятков сантиметров (при соединении стрипов нескольких сенсоров в линейку). В дрейфовых и пиксельных детекторах чувствительная ячейка имеет сравнимые величины длины и ширины, которые могут быть от нескольких миллиметров до десятков микрометров. Пиксельные системы применяются в условиях высокой загрузки событий, что позволяет снизить частоту событий в одной ячейке. Обратной стороной этого преимущества является необходимость считывать большее число каналов информации. Пиксельный сенсор определяет сразу две координаты. В микростриповых же детекторах для этого применяются двусторонние сенсоры или два сенсора, которые устанавливаются "спина к спине" так, чтобы их стрипы могли пересекаться.

Высокая подвижность носителей в кремнии обеспечивает быстрое собирание образовавшегося заряда. Для типичных микростриповых детекторов это время составляет порядка 10 нс. Малый коэффициент диффузии позволяет транспортировать заряд на значительные расстояния без существенных потерь в точности координатных измерений, что позволило успешно реализовать разработку и создание кремниевых дрейфовых детекторов [2]. Кроме того, применение типовых детекторных модулей позволяет решить задачи минимизации массы материала в объеме детектирования, упрощения и повышения производительности процессов сборки при сохранении высокой плотности и высокой степени надежности монтажа при создании нового поколения гибридных микросборок и

соединительных кабелей. Однако, несмотря на значительные достижения в области разработок гибридных микросборок и детекторных модулей различных типов на их основе, возможности создания новых более совершенных конструкций и технологий их изготовления с применением многослойных гибко-жестких плат и гибких соединительных шлейфов в детекторных модулях еще далеко не все реализованы.

Этот вывод в полной мере можно отнести к современным пиксельным детекторным модулям. В связи с тем, что пиксельные кремниевые сенсоры определяют сразу две координаты события при большом разрешении за счет малых размеров пикселей (десятки микрометров), в настоящее время они находят все большее применение в детекторных системах в экспериментах физики высоких энергий. Кроме того, матричное расположение контактов обеспечивает наибольшую плотность монтажа, максимальное количество контактов на площади сенсора. Кроме этого, минимальные переходные емкости контактов у них лучше по сравнению с другими типами сенсоров, что обеспечивает работоспособность при более высоких тактовых частотах внешних информационных магистралей, что является одним из важнейших аспектов при увеличении информативности исследований и, следовательно, значительном увеличении информационных потоков. Матричная система выводов делает возможным размещение большого количества межсоединений на ограниченной площади приемников излучений [5-7].

Таким образом, целью данной работы является разработка и верификация эффективных подходов к созданию современных инновационных конструктивно-технологических решений и технологий изготовления усовершенствованных пиксельных матричных детекторных модулей на гибких безадгезивных алюминий-полиимидных коммутационных платах и шлейфах с применением автоматизированных процессов ультразвуковой сварки и COF-технологии сборки. Инновационные решения пиксельных матричных детекторных модулей, базирующиеся на новом поколении кремниевых пиксельных сенсоров, могут быть использованы для создания новых и модернизации существующих детекторных систем для экспериментов в физике высоких энергий

2 Предмет и методы исследований

2.1 Матричные пиксельные сенсоры

Матричные пиксельные кремниевые сенсоры впервые были применены в детекторной системе эксперимента ATLAS, который в настоящее время осуществляется на Большом Адронном Коллайдере (англ. Large Hadron Collider, сокр. LHC) в Европейском ядерном центре CERN (Женева, Швейцария). Они были применены и в экспериментах ALICE, LHCb и CMS, которые также проводились на ускорителе LHC[8].

В конструкции пиксельных сенсоров было применено матричное расположение шариковых выводов типа BGA (англ. Ball grid array - массив шариков), которое обеспечило ряд очевидных преимуществ:

- минимальная площадь монтажного поля коммутирующей платы;
- лучшие условия обеспечения функциональной производительности электронных модулей за счет меньших паразитных эффектов при быстродействующих операциях;
- упрощение технологии поверхностного монтажа на коммутирующей элемент за счет использования процессов оплавления припоя при групповом нагреве;
- большой процент выхода годных изделий готовой продукции.

Для присоединения объемных шариковых выводов используют распространенный и хорошо известный метод пайки, однако, в данном случае, монтаж сенсоров с такими выводами связан с существенными дополнительными капиталовложениями в оборудование для обеспечения позиционирования выводов на плате и тестирования качества паек, не доступных для визуализации. При этом постоянно существует опасность потери качества соединений из-за трудно управляемых процессов пайки. Ограниченная

длина выводов не обеспечивает демпфирование для компенсации рассогласования температурных расширений материалов в межсоединениях и не обеспечивает необходимую для особых условий устойчивость к механическим воздействиям, которые могут деформировать подложки.

В силу этого перечень материалов для использования в таких конструкциях очень ограничен и все они имеют достаточно высокую стоимость. Тенденция к дальнейшему уменьшению шага выводов (менее 1 мм) еще более обостряет эту проблему [6].

Альтернативной технологией для создания детекторных модулей является COF-технология (англ. Chip-on-Flex – кристалл на гибкой плате). Применение такой технологии с помощью процессов ультразвуковой сварки гибких одно- и многослойных плат позволяет обеспечить демпфирование для компенсации рассогласования температурных расширений материалов в межсоединениях между плоскими контактными площадками жестких сенсоров и гибкими платами в детекторных модулях. В этом случае нет необходимости применения технологии BGA или COB (англ. Chip-on-Board– кристалл на жесткой плате) – технологии сборки. Кроме того, существенно упрощается процесс изготовления кремниевых матричных сенсоров, так как нет необходимости в формировании жестких матричных объемных шариковых выводов на контактных площадках сенсоров и в облуживании контактных площадок на коммутирующем элементе [8].

При непосредственном монтаже кремниевых пиксельных матричных сенсоров на плату представляет большой интерес применение в качестве коммутирующих элементов гибких фольгированных диэлектриков. Гибкие печатные платы на их основе - это всевозможные системы гибких коммутирующих элементов, которые могут содержать одно-, двух- и многослойные структуры межсоединений. Их конструкции могут быть полностью гибкими или представлять собой комбинацию жестких и гибких частей.

Применение в конструкциях детекторных модулей и в гибридных микросборках гибких плат и гибких кабелей (шлейфов) на основе медь-полиимидных фольгированных диэлектриков позволило в некоторой мере решить проблему минимизации объема детекторных систем в экспериментах физики высоких энергий [9]. Реализовать возможность трехмерной компоновки детекторных модулей и обеспечить их сборку без "мертвого пространства" с высоким энергетическим и пространственным разрешением. Однако, применение адгезивсодержащих и безадгезивных фольгированных медью полиимидных пленок не позволило в полной мере реализовать преимущества COF-технологии при сборке детекторных модулей. Остались нерешенными некоторые проблемы, присущие традиционной COF-технологии на основе медь-полиимидных фольгированных диэлектриков. Для обеспечения надежного безкоррозионного соединения с алюминиевыми контактными площадками микросхем и сенсоров на медные проводники гибких плат и кабелей необходимо нанесение дополнительных слоев никеля и золота, что усложняет и делает дороже процесс формирования гибких коммутирующих элементов. Кроме того, формирование ультразвуковой сваркой межсоединений гибких кабелей с сенсорами и микросхемами с помощью алюминиевой проволоки ограничивает возможность уменьшения габаритных размеров и объема детекторных модулей и требует повышенной точности и осторожности при проведении процессов сборки изделий, чтобы не допустить деформации алюминиевых проволочных межсоединений и закороток между ними [10].

С этой точки зрения наиболее оптимальным вариантом дальнейшего совершенствования COF-технологии сборки в устройствах ядерной электроники является применение безадгезивных алюминий-полиимидных лакофольговых диэлектриков, то есть, алюминий-полиимидных лакофольговых диэлектриков. Безадгезивные алюминий-полиимидные лакофольговые диэлектрики обладают всеми теми достоинствами, которыми обладают и безадгезивные медь-полиимидные материалы [11]. Однако, целый ряд их дополнительных преимуществ по сравнению с медь-полиимидными фольгированными

диэлектриками, позволяет существенно расширить возможности СОФ-технологии на современном этапе.

Основные преимущества алюминий-полиимидных лакофольговых диэлектриков:

- алюминий обладает высокой коррозионной стойкостью;
- алюминий имеет радиационную длину почти в 6 раз превышающую радиационную длину меди ($X_{0Al} \approx 8,9$ см, $X_{0Cu} \approx 1,43$ см);

- несмотря на то, что алюминий по сравнению с медью обладает меньшей механической прочностью ($\sigma_{pAl} = (10-40) \frac{кгс}{мм^2}$; $\sigma_{pCu} = (16-45) \frac{кгс}{мм^2}$), меньшей теплопроводностью ($\lambda_{TAl} = 218$ Вт/(м·К); $\lambda_{TCu} = 385$ Вт/(м·К)), удельным электрическим сопротивлением примерно в 1,6 раза большим удельного электрического сопротивления меди ($\rho_{Al} = 0,028$ мкОм·м; $\rho_{Cu} = 0,017$ мкОм·м), важное значение имеет тот факт, что алюминий почти в 3,5 раза легче меди ($\gamma_{Al} = 2,7$ г/см³, $\gamma_{Cu} = 8,92$ г/см³) и более чем в 2 раза дешевле;

- благодаря малой плотности алюминия обеспечивается большая электрическая проводимость на единицу массы (то есть, при одинаковом номинале сопротивления и одинаковой длине алюминиевые проводники почти в два раза легче медных, несмотря на большее поперечное сечение).

Таким образом, коммутирующие элементы на основе алюминий-полиимидных лакофольговых диэлектриков позволяют еще более минимизировать массу вещества в объеме детектирования и размеры детекторных модулей, что особенно перспективно для детекторных систем с высокой плотностью каналов информации.

Алюминиевая СОФ-технология сборки легко адаптируется к существующему промышленному автоматизированному оборудованию ультразвуковой сварки алюминиевых плоских выводов. При этом обеспечивается высокое качество и надежность сварных соединений из-за того, что свариваются однородные материалы (алюминиевые контактные площадки электронных компонентов и алюминиевые проводники коммутирующих элементов). Кроме того, коммутирующие элементы на основе безадгезивных алюминий-полиимидных диэлектриков позволяют значительно улучшить емкостные характеристики электронных устройств. Благодаря еще одному

положительному свойству алюминия – малой величине предела текучести ($\sigma_{0,2} = 2 \frac{кгс}{мм^2}$) – имеется возможность в процессе ультразвуковой сварки осуществлять непосредственное соединения плоских алюминиевых выводов с контактными площадками сенсоров через глубокие (до 100 мкм) "колодцы" в полиимиде. Это обеспечивает уменьшение выходных емкостей сенсоров в 5÷7 раз, что значительно повышает чувствительность и разрешающую способность детектирующих систем [11].

Инновационная алюминиевая СОФ-технология сборки пиксельных матричных детекторных модулей на основе нового поколения кремниевых пиксельных сенсоров может быть с успехом применена для модернизации уже существующего международного эксперимента ALICE на LHC в CERN [13]. Основной задачей нового эксперимента ALICE является изучение свойств материи, в частности, кварк – глюонной плазмы. При этом главной чувствительной областью детекторной системы в эксперименте ALICE является внутренняя трековая система (VTC), состоящая из детекторных модулей, расположенных вокруг точки взаимодействия частиц. Улучшение показателей модернизируемой VTC по сравнению с существующими в настоящее время предусмотрено за счет реализации следующих основных подходов:

1. Улучшение параметров разрешения системы путем:

- приближения детекторных модулей ближе к точке взаимодействия частиц (внутренний слой) до 23 мм вместо 39 мм;

- уменьшение соотношения радиационной длины X/X_0 для внутренних слоев с 1,14% до 0,3%;
- уменьшение размера пикселя с (50x425) мкм до (30x30) мкм;
- 2. Повышение эффективности отслеживания траектории частиц за счет:
 - увеличения количества слоев в детекторных модулях с 6-ти слоев до 7-ми слоев;
 - замена дрейфовых и микростриповых кремниевых сенсоров на пиксельные сенсоры.

3. Повышение скорости считывания и обработки информации при взаимодействии частиц с 1 кГц до более, чем 100 кГц.

Из вышеперечисленных путей усовершенствования эксперимента наиболее важными и определяющими технический результат являются уменьшение соотношения радиационной длины X/X_0 почти в 4 раза и уменьшение площади пикселя более, чем в 20 раз (и соответственно увеличение количество пикселей на единицу площади чувствительного элемента).

Таким образом, одним из основных условий, которые, прежде всего, позволят осуществить вышеуказанные улучшения детекторной системы в эксперименте ALICE и является применение сверхсовременных интегрированных кремниевых пиксельных сенсоров, а также использования преимуществ алюминиевой COF-технологии сборки.

2.2 Интегрированный пиксельный матричный сенсор

Сенсоры элементарных частиц, связанные с первичной электроникой считывания и обработки информации, используемые для детекторных систем обнаружения и отслеживания событий в экспериментах в области физики элементарных частиц, имеют очень жесткие требования в плане интеграции, толщины материала, скорости считывания, потребления энергии и радиационной стойкости. Разработка сенсоров на основе кремниевой полупроводниковой технологии и электроники считывания на основе КМОП-технологии, а именно специализированных интегральных микросхем (ASIC), в 1980-х годах произвели революцию в создании таких систем обнаружения. Эта технология может использоваться для выполнения большинства вышеперечисленных требований. Учитывая это, кремниевые микростриповые и пиксельные сенсоры являются сердцевинной большинства детектирующих систем слежения, используемых в экспериментах в физике элементарных частиц сегодня. Тем не менее, существуют возможности дальнейшего совершенствования этой технологии [12].

Пожалуй, наиболее существенным в детектирующих системах является организация интерфейса между сенсором и электроникой считывания, т.е. они, как правило, представляют собой отдельные компоненты, которые связаны между собой. Например, пиксельные кремниевые детекторные модули, используемые во внутренних слоях детекторных систем экспериментов ATLAS, CMS, LHCb и ALICE на LHC, все состоят из кремниевых пиксельных сенсоров, смонтированных с помощью шариков на кристаллах КМОП электроники считывания [8]. Эта технология может быть усовершенствована путем утонения, как сенсора, так и микросхемы считывания (ASIC), а также за счет уменьшения шага коммутирующих шариков, насколько это возможно. Тем не менее, при таком подходе существуют технические и технологические ограничения, в частности, шаг коммутирующих шариков не может быть таким малым как это необходимо для современных детекторов. Чтобы выйти за пределы этих ограничений и создать систему обнаружения, например, высшей степени интеграции и минимальной толщины материала, потребовалось развитие новых подходов и технологий. Оптимальным способом достижения этой цели является интеграция сенсора и электроники считывания и обработки для создания единого монолитного кремниевого обнаруживающего устройства. Такой подход был принят и успешно реализован при создании КМОП монолитных активных пиксельных сенсоров (англ. CMOS Monolithic Active Pixels Sensors, MAPS). За

последние 15 лет в мире были проведены широкомасштабные разработки и исследования для создания MAPS-приборов. Это позволило существенно поднять уровень технологии создания таких монолитных приборов и сделать возможным их применение в детекторных системах экспериментов физики элементарных частиц. Примерами практической реализации и достижений в создании вышеуказанных полупроводниковых приборов являются MAPS типа MIMOSA, MISTRAL, ALPIDE и MuPix.

Так MAPS типа ALPIDE, выполненные по радиационно стойкой 0,18 мкм КМОП технологии компанией TowerJazz, были выбраны в качестве основных чувствительных элементов для всех пиксельных слоев внутренней трековой системы в новом эксперименте ALICE[12]. Данный полупроводниковый прибор представляет собой кремниевый чип площадью (15x30) мм². В нем сформирован кремниевый высокоомный эпитаксиальный слой (активный сенсорный объем), матрица диодов (пикселей) для сбора заряда с шагом около 30 мкм, и электроника, которая выполняет усиление, оцифровку и выделение полезных сигналов на фоне шумов. При этом считывается информация о прохождении частиц через пиксели (рисунок 1).

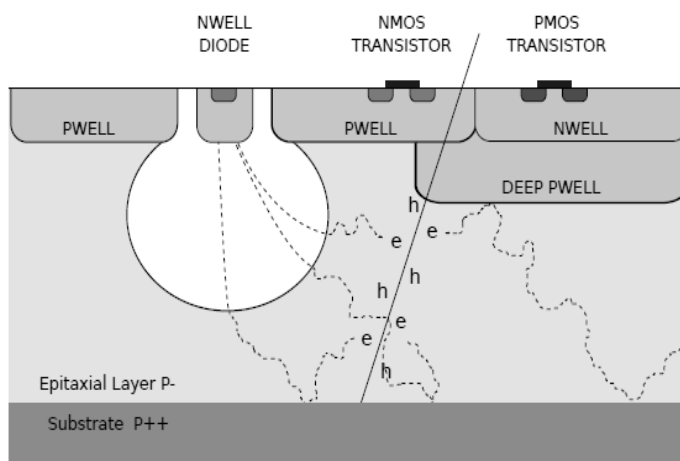


Рисунок 1 – Схема поперечного сечения MAPS сенсора

2.3 Основные особенности CMOSMAPS технологии

Благодаря тому, что норма проектирования современных КМОП микросхем составляет 0,18 мкм, а толщина подзатворного окисла в МОП приборах менее 4 нм, ожидается, что новые КМОП структуры позволят повысить радиационную стойкость микросхем. Соответственно повысится их надежность и стойкость к общей поглощенной дозе по сравнению с другими КМОП технологиями. Например, для нормы проектирования 0,35 мкм, являющейся до сих пор базовой технологией для производства КМОП сенсоров для исследований в области физики элементарных частиц.

Малые размеры транзисторов и большое количество слоев металлизации (до шести) позволяет реализовать высокую степень интеграции и низкую мощность цифровых схем. Это важно, поскольку большая часть цифровых схем (например, памяти) должны быть расположены на периферии пиксельной матрицы и их площадь должна быть сведена к минимуму, чтобы уменьшить размеры нечувствительной части сенсора насколько это возможно.

Микросхемы изготавливаются на пластинах с эпитаксиальным слоем до 40 мкм толщиной и с удельным сопротивлением от 1 кОм·см до 6 кОм·см. При таких сопротивлениях тонкие эпитаксиальные слои могут быть полностью обеднены при подаче невысокого обратного напряжения смещения. Это обеспечивает увеличение отношения сигнал/шум и высокие сопротивления областей, не подвергающихся воздействию ионизирующего облучения.

Доступ к самым современным технологиям формирования топологии микросхем, обеспечивающим заданные нормы проектирования позволяет изготавливать качественные пиксельные сенсоры на кремниевых пластинах диаметром до 200-250 мм. В результате разница в чувствительности между соседними чипами на пластине минимальна, что облегчает подбор сенсоров в детекторной системе с одинаковыми характеристиками. Наличие глубокого кармана с улучшенными свойствами позволяет изготавливать пиксельные структуры со значительно расширенной функциональностью. Это является уникальной особенностью данной технологии и является ключевым решением для создания маломощной архитектуры считывания информации. Глубокий карман в области структур полевых транзисторов позволяет уменьшить емкость чувствительных электродов и, соответственно, снизить потребление электроэнергии в электронике считывания и обработки сигналов. N-область, расположенная в р-канальном МОП-транзисторе, формируется над глубоким р-карманом. Электроны, образованные частицей при прохождении через сенсор, отражаются от р-п-перехода между эпитаксиальной областью и областью глубокого р-кармана и собираются чувствительной областью диода. Величина собранного заряда затем преобразуется (считывается) для оценки эффективности детектирования и оценки соотношения сигнал/шум с помощью КМОП ячейки, введенной в пиксель.

Чтобы минимизировать материалоемкость внутренней трековой системы интегрированный пиксельный матричный сенсор должен быть изготовлен как можно тоньше. Его минимальная толщина определяется толщиной эпитаксиального слоя (номинальная толщина – 18 мкм) плюс толщина слоев КМОП структуры (около 10 мкм). Изготовление такого сенсора осуществляется путем утонения базовой толщины кремниевой пластины с тыльной стороны до необходимой безопасной толщины, что составляет около 50 мкм [12].

В течение последних пятнадцати лет авторский коллектив, в настоящее время представляющий отделение микроэлектроники компании ООО "Светодиодные технологии Украина", принимал участие в подготовке действующего международного эксперимента ALICE на LHC. В частности, для эксперимента совместно с участниками коллаборации ALICE были разработаны, спроектированы и изготовлены на уровне лучших мировых достижений, а в некоторых случаях и выше, микростриповые и дрейфовые детекторные модули с использованием усовершенствованной мультичиповой технологии сборки на основе гибких безадгезивных алюминий-полиимидных плат и автоматизированных процессов ультразвуковой сварки плоских алюминиевых выводов.

Такой подход позволил поддерживать современный уровень разработок и их конкурентоспособность. В настоящее время компания ООО "Светодиодные технологии Украина" продолжает работать в новых проектах в области экспериментальных исследований в физике высоких энергий. В том числе, в проектах по усовершенствованию детекторных модулей и их компонентов для детекторных систем экспериментов ALICE, ATLAS и LHCb (CERN, Швейцария), а также в новых экспериментах CBM (GSI, Германия), и Mu3e (Paul Scherrer Institute, Швейцария).

2.4 Особенности конструктивно-технологических решений жестко-гибких пиксельных детекторных модулей для модернизации внутренней трековой системы эксперимента ALICE

Снижение материалоемкости и массы детекторных слоев ВТС является особенно важным для улучшения разрешающей способности при визуализации событий соударения элементарных частиц с поверхностью чувствительных элементов. В целом, снижение общего количества материала позволяет существенно улучшить отслеживание треков исследуемых частиц и их разрешение.

При разработке высокотехнологичных изделий, которыми являются детекторные модули, очень важным является выбор наиболее оптимального метода создания

электрических межсоединений между компонентами детекторных модулей изделия для обеспечения соответствия достаточно жестким требованиям при гарантировании высокой долговременной надежности [13-14].

Учитывая требования и особенности конструктивно-технологических решений жестко-гибких пиксельных детекторных модулей, для модернизации внутренней трековой системы эксперимента ALICE было выбрано два метода создания электрических межсоединений: лазерная пайка и точечная ультразвуковая сварка. Такой выбор объясняется тем, что все соединительные контактные площадки MAPS-сенсора расположены с одной стороны на верхней его поверхности.

2.5 Лазерная пайка

Как было указано выше, одним из возможных методов создания электрических межсоединений в детекторных модулях выбран метод лазерной пайки. Контактные площадки на пиксельном сенсоре для соединений лазерной пайкой изготавливаются из алюминия, затем на них осаждаются слои Ni/Au. Лазерная пайка имеет промышленное применение и может быть использована для соединения контактных соединений монолитных пиксельных сенсоров с металлическими слоями гибких коммутирующих плат через сквозные отверстия в слоях полиимида с помощью паяльных шариков. Шарик расплавляется локально лазерным излучением. Это позволяет уменьшить тепловыделение структур детекторных модулей, так как тепло выделяется в малой области, ограниченной размерами контактных площадок. Однако, при этом, как показали практические исследования данной технологии, при пайке тонких (50 мкм) полупроводниковых приборов возможно возникновение локального перегрева приборов в местах пайки, что приводит к трещинам и другим повреждениям кремниевых приборов.

Очевидно, что одной из ключевых особенностей лазерной пайки является необходимость очень тщательного контроля процесса нагрева области пайки. Размеры пятна луча лазера должны быть оптимизированы и согласованы с размерами паяльных шариков (сотни микрон), а область нагрева должна быть соизмерима с размерами отверстий в гибких платах.

Лазерная пайка требует очень высокой точности изготовления необходимой технологической оснастки при позиционировании и размещении припойных микрошариков.

Таким образом, несмотря на очевидные достоинства лазерной пайки, она обладает и существенными недостатками для контактных соединений монолитных пиксельных сенсоров с металлическими слоями гибких коммутирующих плат. Основными недостатками лазерной пайки являются:

- необходимость использования высокоточного оборудования для пайки (точность позиционирования лазера единицы микрон);
- необходимость обеспечения очень высокой плоскостности положения гибкой платы относительно полупроводникового прибора (сенсора) и повторяемости зазора между ними (что является трудновыполнимым при сборке многосенсорных модулей);
- наличие теплового воздействия непосредственно на полупроводниковый прибор, что с учетом толщины MAPS около 50 мкм может приводить к механическим повреждениям последнего;
- требуемая очень высокая точность изготовления, как платы, так и отверстий для расположения шариков припоя, для исключения частичного оплавления припоя или прожига сенсора;
- отсутствие возможности визуального контроля качества паяных соединений;
- очень высокая сложность качественного проведения ремонтных работ сборочных узлов.

2.6 Автоматизированная точечная ультразвуковая сварка

Альтернативной технологией, которая не имеет таких недостатков, как при лазерной пайке, является автоматизированная технология соединений алюминиевых плоских ленточных выводов гибких коммутационных плат к контактными площадкам кремниевых пиксельных сенсоров с помощью точечной ультразвуковой сварки. Эта технология получила название SpTAB (SinglepointTapeAutomatedBonding) и по своей сути является алюминиевой COF-технологией сборки. Эта технология была успешно применена авторским коллективом при создании микростриповых и дрейфовых детекторных модулей для действующей в настоящее время внутренней трековой системы в эксперименте ALICE [8]. Основными особенностями данного подхода является применение безадгезивных лакофольговых алюминий-полиимидных диэлектриков и SpTAB технологии присоединения алюминиевых выводов к контактными площадкам полупроводниковых приборов (сенсоры, микросхемы обработки информации). Схематически основные варианты реализации соединения многослойной платы (верхнего слоя и нижнего слоя) к полупроводниковому прибору и межслойные соединения внутри платы приведены на рисунке 2.

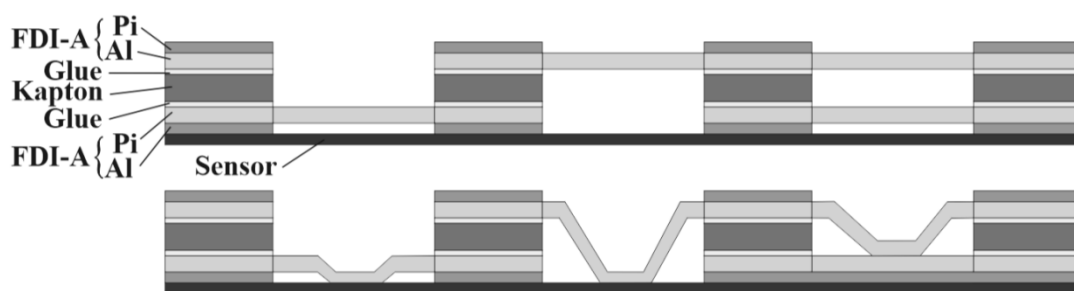


Рисунок 2 – Виды соединения многослойной платы с полупроводниковым прибором и межслойные соединения внутри платы: присоединение нижнего слоя к прибору (слева), присоединение верхнего слоя к прибору (посередине), межслойное соединение (справа)

Вышеуказанная технология обладает существенными достоинствами, основными из которых являются:

- ультразвуковая сварка алюминиевых выводов гибких коммутационных плат к алюминиевым контактными площадкам пиксельных чипов обеспечивает однородность, высокую надежность и механически стабильное соединение;
- отсутствие тяжелых металлов (Au, Sn), присутствующих при пайке;
- отсутствие необходимости облуживания контактных площадок полупроводниковых приборов, что позволяет уменьшить затраты на изготовление этих приборов;
- использования этой технологии для непосредственного соединения слоев многослойных гибких коммутационных плат между собой и с контактными площадками пиксельных чипов;
- возможность использования стандартного промышленного автоматизированного оборудования для основных процессов сборки (сварка, приклейка и инкапсуляция).

В таблице 1 представлены в сравнении основные особенности существующих технологий лазерной пайки и ультразвуковой сварки для контактных соединений монолитных пиксельных сенсоров с металлическими слоями гибких коммутирующих плат.

Таблица 1 – Основные особенности технологий лазерной пайки и ультразвуковой сварки

Лазерная пайка	Ультразвуковая сварка
На пиксельный чип с Al контактами, покрытыми Ni-Au, устанавливается гибкая плата из двухстороннего фольгированного медью полиимида с помощью шариков припоя SnAg диаметром 200 мкм. Отверстие под пайку в гибкой плате имеет Ni-Au покрытие.	К Al-контактам пиксельного чипа привариваются плоские выводы многослойной гибкой платы из фольгированного алюминием полиимида с шириной проводников до 100 мкм.
Толщина Cu- 18 мкм, Ni- 8 мкм; Au – единицы нм	Толщина Al- 30мкм
Удельное электрическое сопротивление припоя Sn-Ag ,Ом · см $\approx 13,1 \cdot 10^{-6}$	Удельное электрическое сопротивление алюминия, Ом · см $\approx 4,3 \cdot 10^{-6}$
Радиационная длина меди, см $X_{0Cu} \approx 1,43$	Радиационная длина алюминия, см $X_{0Al} \approx 8,9$
Время создания 1-го паяного контакта, с ≈ 12	Время создания 1-го сварного контакта, с ≈ 1
Высокотемпературное воздействие лазера на точки пайки (локальный нагрев места пайки)	Отсутствие теплового воздействия на пиксельный чип
Отсутствие механического воздействия на пиксельный чип	Наличие механического воздействия на пиксельный чип при проведении сварки выводов платы к контактам чипа
Отсутствие возможности визуального контроля совмещения платы и микросхемы в процессе пайки	Возможность визуального контроля совмещения платы и микросхемы в процессе проведения сварки
Сложная система совмещения, установки шариков припоя и их фиксации. Требуется специализированное оборудование для тестирования качества паек, недоступных для визуализации.	Процессы сварки адаптированы для применения промышленных автоматизированных сварочных установок типа FK Delvotec-6400, Kulicke&Soffa 8090 и др.
Высокая стоимость и трудоемкость сборки пиксельных модулей	Относительно низкая стоимость и трудоемкость сборки пиксельных модулей
Постоянно существует опасность потери качества паяных соединений. Отсутствует 100% гарантия качества сплавления контактных площадок сенсора и платы	Возможность быстрого ремонта сварных соединений без ухудшения контактных характеристик в процессе изготовления пиксельного модуля
В паяных соединениях не обеспечивается устойчивость к механическим и термоциклическим воздействиям из-за рассогласования КТЛР применяемых материалов	В сварных соединениях обеспечивается высокая устойчивость к механическим и термоциклическим воздействиям. В однородном сварном соединении Al-Al отсутствует рассогласование КТЛР применяемых материалов

Из анализа особенностей технологий лазерной пайки и ультразвуковой сварки (таблица 1) можно сделать вывод, что конструктивно-технологические, физико-технические и надежность параметры пиксельных детекторных модулей, изготовленных с применением процессорно-ультразвуковой сварки, имеют ряд преимуществ перед пиксельными детекторными модулями, изготовленными с применением процессов лазерной пайки. Особенно это относится к радиационной длине детекторных модулей на гибких многослойных платах из алюминиевой фольги, которая почти в 6 раз превышает

радиационную длину меди, их высокой устойчивости к механическим и термоциклическим воздействиям, производительности процесса сборки, а также более высокой электропроводности сварных соединений по сравнению с паяными соединениями с применением Sn-Ag.

Для верификации особенностей и преимуществ детекторных модулей на основе MAPS сенсоров и гибких многослойных плат из лакофольговых диэлектриков проведена разработка ряда конструкторско-технологических макетов и их исследований.

3 Результаты и их обсуждение

3.1 Результаты исследований макетов и прототипов пиксельного детекторного модуля на многослойной алюминий-полиимидной гибкой плате

Для проверки возможности реализации инновационных детекторных модулей на основе MAPS сенсоров и гибких алюминий-полиимидных многослойных плат были выполнены следующие работы:

- разработка и изготовление прототипа односенсорного детекторного модуля с функциональным MAPS сенсором;
- разработка и изготовление макета полномасштабного детекторного модуля из 14 макетов MAPS сенсоров для исследований механического влияния процесса ультразвуковой сварки на тонкие полупроводниковые приборы типа MAPS сенсоров толщиной 50 мкм.

Для выполнения основного требования к многослойной плате - значение импеданса сигнальных трасс должно быть 100 Ом-и с учетом конструктивных особенностей серийно выпускаемых безадгезивных лакофольговых алюминий-полиимидных диэлектриков была определена оптимальная структура многослойной гибкой платы, схематическое сечение которой приведено на рисунке 3.

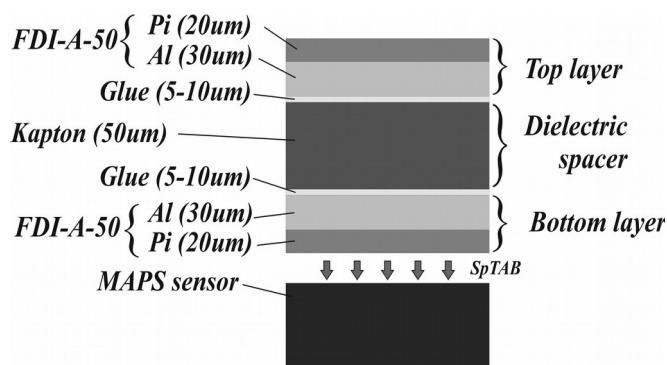


Рисунок 3 – Структура многослойной гибкой печатной коммутирующей платы

алюминия 30 мкм, толщина полиимида – 20 мкм), а материалом диэлектрической прокладки-полиимидная пленка типа ПМ-А, толщиной 50 мкм (рисунок 3).

На следующем этапе производилась сборка многослойной платы с MAPS сенсором, а именно с сенсором типа ALPIDE толщиной 50 мкм. Собранный прототип представлен на рисунке 4, в. Сборка многослойной платы осуществлялась методами склеивания и ультразвуковой сварки. При этом было осуществлено более 60 сварных соединений плата-сенсор.

Указанная на рисунке 3 структура гибкой многослойной платы была использована при разработке и изготовлении прототипов детекторных модулей.

На первом этапе были проведены работы по исследованию прототипа детекторного модуля с одним MAPS сенсором. Для решения данной задачи была разработана и изготовлена гибкая многослойная плата. Материалом верхнего и нижнего слоев является безадгезивный лакофольговый диэлектрик типа ФДИ-А-50 (толщина

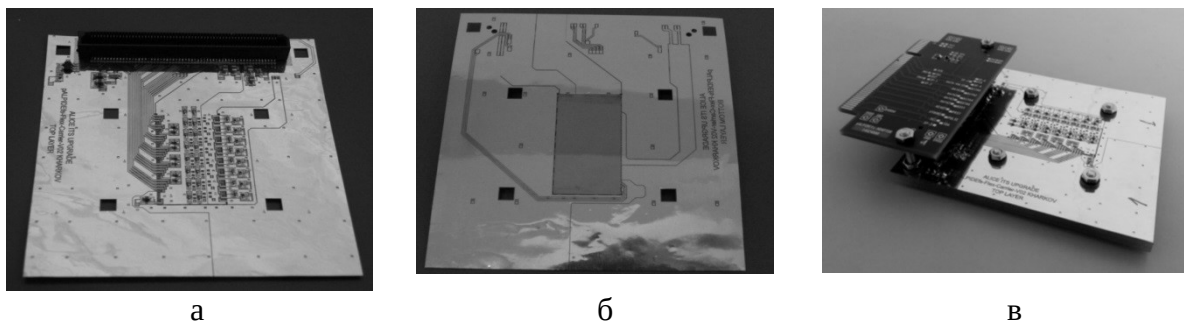


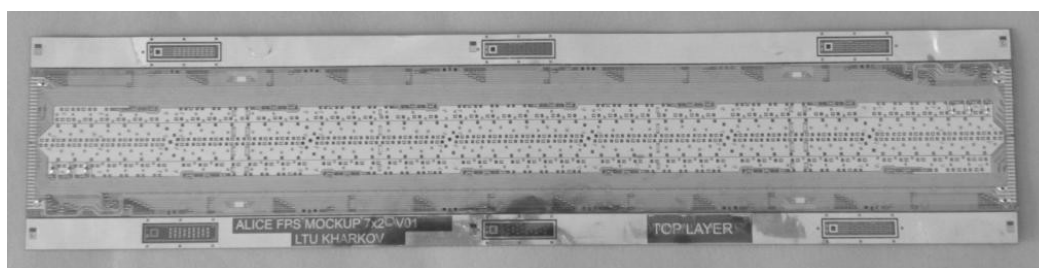
Рисунок 4 – Собранный прототип детекторного модуля с одним MAPS сенсором: а– вид со стороны платы; б– вид со стороны сенсора; в– действующий прототип модуля, подготовленный для исследований параметров

Прототип детекторного модуля был исследован согласно методикам испытаний пиксельных модулей для модернизированной внутренней трековой системы эксперимента ALICE. Исследования проводились коллаборацией ALICE в CERN. Полученные результаты тестирования прототипа детекторного модуля были удовлетворительными, что подтвердило правильность использованных подходов, выбора материалов и технологии изготовления модуля.

Полученные положительные результаты испытаний прототипа детекторного модуля позволили сделать заключение о возможности применения вышеописанного конструктивно-технологического решения многослойной алюминиевой платы с применением ультразвуковой сварки для создания многосенсорных детекторных модулей на основе тонких пиксельных MAPS сенсоров.

На следующем этапе исследований был разработан, изготовлен и исследован полномасштабный макет детекторного модуля на основе трехслойной гибкой платы и 14 макетов тонких MAPS сенсоров (толщина 50 мкм). Задачей данного этапа являлось проверка отсутствия механических разрушений в тонких кремниевых сенсорах при выбранных режимах присоединения к ним многослойной платы методом ультразвуковой сварки.

В ходе проведения исследований была разработана и изготовлена гибкая многослойная плата, с использованием которой макетов MAPS сенсоров был собран полномасштабный макет модуля (рисунок 5). При этом было осуществлено более 800 сварных соединений плата – сенсор.



а



б

Рисунок 5 – Полномасштабный макет модуля с 14MAPS сенсорами в сборе: а– вид со стороны гибкой многослойной платы; б– вид со стороны MAPS сенсоров

После сборки полномасштабного прототипа детекторного пиксельного модуля проводился визуальный контроль на наличие механических повреждений сенсоров (трещины, сколы и т.п.). В процессе контроля не было обнаружено каких-либо видимых механических повреждений сенсоров, что позволяет сделать заключение о возможности создания качественных электрических соединений плата-сенсор методом ультразвуковой сварки как более надежной альтернативы создания электрических соединений тонких кремниевых сенсоров с гибкими платами методом лазерной пайки с использованием припойных шариков.

Таким образом, полученные результаты исследований прототипа и макета детекторного модуля на основе тонких MAPS сенсоров толщиной 50 мкм и многослойной гибкой платы со слоями из безадгезивных алюминий-полиимидных лакофольговых диэлектриков подтвердили принципиальную возможность реализации предлагаемого технического решения для создания инновационных детекторных пиксельного модулей. Предложенные подходы к разработке и изготовлению многослойных гибких коммутирующих плат и сборки пиксельных сенсоров на основе процессов ультразвуковой сварки позволяют реализовать в полном объеме требования по модернизации пиксельных детекторных модулей для внутренней трековой системы в новом эксперименте ALICE.

4 Выводы

Стремительное развитие уровня техники и технологий, особенно микроэлектроники, а также повышение требований к детекторным системам в международных экспериментах физики элементарных частиц является очень значительным толчком для разработки новых инновационных конструктивно-технологических решений детекторных систем и их компонентов, среди которых одними из основных являются детекторные модули. Одним из достижений в данном направлении за последние несколько лет является разработка сверхсовременных тонких (50 мкм) монолитных активных пиксельных сенсоров (MAPS), которые включают в себя и чувствительный элемент, и электронику считывания и обработки сигнала. При этом для полного соответствия требованиям по минимизации материала в объеме детектирования, необходимым условием является обеспечение надежной электрической коммутации компонентов модулей при минимальном наличии материала. Такая коммутация может быть реализована с применением многослойных гибких плат на основе безадгезивных алюминий-полиимидных лакофольговых диэлектриков и применения COF-технологии сборки.

В ходе выполненной работы разработаны и исследованы прототип и макет детекторного модуля на основе тонких MAPS сенсоров типа ALPIDE и многослойных плат из безадгезивных лакофольговых диэлектриков с алюминиевым проводящим слоем. Полученные результаты исследований прототипа и макета детекторного модуля на основе современных MAPS сенсоров толщиной 50 мкм и алюминий-полиимидной многослойной гибкой платы с использованием алюминиевой COF-технологии сборки позволяют сделать вывод о возможности применения предложенных решений для создания усовершенствованной внутренней трековой системы международного эксперимента ALICE на LHC в CERN.

Полученный в процессе выполнения работы технический результат позволяет обеспечить достижение поставленных задач усовершенствования эксперимента ALICE, основными из которых являются увеличение радиационной длины почти в 6 раз и уменьшение размера пикселя более, чем в 20 раз (и соответственно увеличение количества пикселей на единицу площади чувствительного элемента). При этом

плотность пикселей увеличена в 50 раз. Высокие технические характеристики современных CMOS MAPS сенсоров позволили обеспечить с их помощью максимально достигнутое в настоящее время пространственное разрешение сенсоров на уровне менее, чем 30 мкм.

Использование CMOS MAPS сенсоров в новых детекторных модулях позволяет снизить также материалоемкость кремния единичного детекторного слоя в ВТС в семь раз по сравнению с уже используемой конструкцией пиксельных леддеров в настоящее время в эксперименте ALICE (толщина чипов 50 мкм вместо 350 мкм).

Кроме того, полученные результаты, в свою очередь, могут иметь возможное дальнейшее развитие в направлении использования данных конструктивно-технологических подходов при создании инновационных детекторных модулей для таких международных физических экспериментов как CBM, ATLAS, Mu3eи др.

Список литературы

- [1] Цитович А.П. Ядерная электроника / А.П. Цитович// Учебное пособие для вузов.– М.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
- [2] Чилингаров А.Г. Координатные полупроводниковые детекторы в физике элементарных частиц: Препр. / СО АН СССР. Институт ядерной физики;– Новосибирск: 1990. –65 с.
- [3] Волин М.Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре / 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Радио и связь,1981. – 296 с.
- [4] Князев А.Д., Кегичев Л.Н., Петров Б.В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. – М.: Радио и связь, 1982. – 224 с.
- [5] Медведев А.М. Сборка и монтаж электронных устройств/А.М. Медведев// Москва: Техносфера, 2007. – 256 с.
- [6] Романова М.П. Сборка и монтаж интегральных микросхем: учебное пособие /М.П. Романова. – Ульяновск :УлГТУ, 2008. – 95 с.
- [7] Ланин В.Л., Достанко А.П., Телеш Е.В. Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники / В.Л. Ланин//Минск: Изд. ЦентрБГУ, 2007. – 574 с.
- [8] Technical Design Report of the Inner Tracking System (ITS) CERN /LHCC 99–12 ALICE TDR 4, 18 June 1999. – 360 p.
- [9] Медведев А., Мылов Г., Семенов П., Сержантов А. Конструирование гибких и гибко-жестких печатных плат/ А. Медведев// Компоненты и технологии.- 2008.- № 6.- С. 147-160.
- [10] Lutz J.R., Arnold L., Baudot I. et al. TAB bonded SSD module for the STAR and ALICE trackers // Proceedings of the fifth Workshop on Electronics for LHC Experiments, Crakow, Poland, 11 – 15 September. - 2000. – P. 152-156.
- [11] Замирец Н.В., Борщев В.Н., Листратенко А.М., Антонова В.А., Семенов Л.П., Проценко М.А., Тымчук И.Т. Алюминиевая"Chip on flex" (COF) технология в радиационном приборостроении/ Н.В. Замирец// Технология приборостроения. – 2007. – № 2. – С. 3-9.
- [12] TechnicalDesignReportfortheUpgradeofthe ALICE InnerTrackingSystem(ITS) CERN-LHCC-2013-024 / ALICE-TDR-017,29 November 2013.– 189 p.
- [13] Многосенсорные сверхминиатюрные блоки и многодетекторные модули для медицинских зондов эндоректального применения /В.Н. Борщов, В.А. Антонова, А.М. Листратенко, Г.М. Зиновьев, М.А. Проценко, И.Т. Тымчук// Технология приборостроения. – 2009. – № 2. – С. 3-7.
- [14] Достанко А.П., Пикуль М.И., Хмыль А.А. Технология производства ЭВМ.- Мн.: Вышэйшая школа, 2004. – 347 с.