**МПК: G01J 4/04**

**H05K1/05**

**Устройство для монтажа и кондуктивного охлаждения пиксельных сенсоров и**

**систем микроэлектроники детекторов**

**Область техники**

Изобретение относится к области детекторов ионизирующих излучений и предназначено для монтажа и кондуктивного охлаждения пиксельных кремниевых сенсоров, регистрирующих заряженные частицы.

**Описание предшествующего уровня техники**

 Развитие современных технологий микроэлектроники неотрывно связано с проблемами миниатюризации систем охлаждения и монтажа, обладающих в то же время термо-механической устойчивостью. Особенно существенные требования возникают при конструировании радиационно-прозрачных детектирующих систем для регистрации треков заряженных частиц. Проблема неискаженного детектирования треков заряженных частиц в современных экспериментах по физике высоких энергий, а также особенно в разрабатываемых в настоящее время ряда приложений для медицинской техники, состоит в необходимости минимизации многократного кулоновского рассеяния на пути пролетающих частиц. Это означает жесткие ограничения как на количество вещества в чувствительной области детекторов, так и на применения в устройствах для монтажа и охлаждения пиксельных сенсоров и систем микроэлектроники детекторов элементов таблицы Менделеева с атомным номером A>12.

 Мировые достижения в предшествующем уровне техники для радиационно-прозрачных систем монтажа и охлаждения кремниевых детекторов связаны с разработками для эксперимента ALICE на Большом адронном коллайдере(БАК), в которых участвовали непосредственно авторы из СПбГУ. В качестве характеристики радиационной прозрачности вещества в физике высоких энергий и в ядерной физике используется единица радиационной длины. Для атомов определенного вещества радиационная длина X0 есть расстояние, после прохождения которого, интенсивность гамма-излучения и потока электронов высокой энергии ослабляется (в *е* раз). Общеупринятым в научной и технической литературе для удобства восприятия является использование относительных значение радиационных длин X/X0 для конкретных оценок радиационной прозрачности любого устройства. Самая высокая радиационная прозрачность среди всех экспериментов БАК, на уровне порядка 1,1% X/X0 на детекторный слой, была достигнута ранее за счет применения углекомпозитных конструкций [1,2].

 Известно устройство [1]для монтажа кремниевых сенсоров эксперимента ALICE, изготовленное в виде жесткой подложки с линейными размером порядка 2х7 см2, состоящее из однонаправленных углекомпозитных волокон с высоким модулем упругости (волокна фирмы Thornel К1100х и Mitsubichi K13D2u) и с коффициентом теплопроводности в пределах 800 - 1000 Вт/(м·К) вдоль волокна. Вклад в радиационную прозрачность кремниевых сенсоров ALICE со стороны разработанных углекомпозитных структур для монтажа и охлаждения составил не более 0.2%. Общим признаком с заявленным устройством является наличие в конструкции жесткой подложки, выполненной  из теплопроводящих углекомпозитных  волокон, пропитанных  эпоксидным связующим, и со смонтированными  на подложке чипами микроэлектроники. Однако известное устройство [1] может быть использовано для монтажа ограниченного числа микро-детекторных чипов или пиксельных кремниевых сенсоров расположенных рядом, поскольку при большом их числе порядка 3 и свыше указанного порядка наблюдается деформация подложки, которая связана с использованием однонаправленных углекомпозитных высокомодульных волокон.

 Сложность изготовления устройств с использованием высокомодульных волокон заключается в самой их природе, а именно, в большой анизотропии механических и физических свойств волокон. Жесткие подложки для монтажа сенсоров, состоящие всего из нескольких слоёв волокна, как правило, имеют деформации, вызванные различными коэффициентами теплового расширения угольного волокна и эпоксидного связующего. Дополнительно, деформации могут возникать при даже незначительной разнице в направлении укладки одного слоя углекомпозита относительно второго.

 Наиболее близким к предлагаемому изобретению является устройство [2] для монтажа и кондуктивного охлаждения пиксельных кремниевых сенсоров ALICE. Известное устройство включает в себя базовый слой в виде подложки, так называемой "холодной пластины", которая выполнена из однонаправленных углеродных волокон с высокой теплопроводностью и двух слоёв флиса с каждой стороны пластины.. Эта базовая подложка служит для монтажа пиксельных сенсоров и для кондуктивного отвода тепла от этих сенсоров на интегрированные в подложку полиимидные трубки жидкостной системы охлаждения. Подложка имеет жёсткость только в одном направлении вдоль волокна и гибкая поперёк волокон, поэтому для обеспечения жёсткости конструкции в целом дополнительно используется композитная ферма скреплённая с подложкой. Известное устройство [2] сочетает в себе высокую эффективность охлаждения при плотности энерговыделения до 0.3 Вт/см2 и термомеханическую стабильность при использовании минимального количества материала. Это обеспечивает рекордную на сегодняшний день для трековых детекторов частиц радиационную прозрачность на уровне 0,3% X/Х0 для слоя пиксельных сенсоров и подложки. Известное устройство [2] принято в качестве прототипа заявляемого изобретения.

 Общими признаками с заявленным устройством является наличие подложки, которая выполнена из теплопроводящих углеродных  волокон, пропитанных  эпоксидным связующим с двумя слоями угольного флиса с каждой стороны подложки, со смонтированными  на подложке пиксельными сенсорами. Детектор - пиксельный чип ALPIDE, имеет размеры 30 х 15 мм2 и толщину менее 50 микрон. Плотность тепловой мощности чипа ALPIDE составляет менее 35 мВт/см2.В известной конструкции[2] девять таких пиксельных чипов расположены в ряд на подложке длиной 270 мм. Кроме углеродных  волокон и полиимидных трубок жидкостной системы охлаждения, конструкция холодной пластины включает в себя дополнительные слои из графитовой бумаги и угольного флиса. Оба этих дополнительных слоя использованы для интегрирования в подложку полиимидных трубок жидкостного охлаждения.

 Недостатками прототипа являются неоднородность радиационной прозрачности в чувствительной области пиксельных сенсоров за счет использования в устройстве полиимидных трубок с жидким теплоносителем, а также ограничения по использованию в подложке однонаправленных высокомодульных угольных волокон, что приводит к деформации подложки. Для нивелирования последних в устройстве [2] используется углекомпозитная ферма, жестко соединенная с подложкой.

 Техническим результатом заявленного изобретения является повышение эффективного отвода тепла на периферию устройства от пиксельных сенсоров и систем микроэлектроники с обеспечением повышения их радиационной прозрачности и однородности по всей площади устройства, что позволяет существенно расширить функциональные возможности и области применения пиксельных сенсоров, в том числе, для практического применения в области медицинской диагностики, а также получения с высокой степенью разрешения медицинских изображений

 Указанный технический результат достигается тем, что заявленное устройств**о** включает в себя жесткую подложку для монтажа и кондуктивного охлаждения пиксельных кремниевых сенсоров, состоящую из чередующихся слоёв материалов с однородными свойствами: угольного флиса и графитовой бумаги. В соответствии с заявленным изобретением, каждый теплопроводящий слой выполнен из однородной графитовой бумаги, обладающей высокой продольной теплопроводностью, что обеспечивает кондуктивную передачу тепла от сенсоров к теплообменнику расположенному на расстоянии на периферии. В зависимости от производителя, слои графитовой бумаги могут иметь на сегодняшний момент следующие параметры: плотность: 2.1 г/см3, теплопроводность 900-1750 Вт/(м·К).

 Согласно тестам, выполненным ранее [2], указанная теплопроводность на нижнем уровне порядка 900 Вт/(м·К) вдоль волокна для однонаправленных углекомпозитных волокон Thornel К1100х и Mitsubichi K13D2u , вполне достаточна для отвода тепловой мощности от микроэлектроники на уровне менее 0.1 Вт/см2. Очевидно, что указанная верхняя граница, 1750 Вт/(м·К), коммерчески доступная для применения сегодня, может быть сдвинута в будущем на более высокие конкретные значения, что позволит повысить эффективность теплоотвода для случая других конкретных задач.

 Каждый слой угольного флиса, пропитанный эпоксидным связующим, дает после полимеризации вклад в жесткость конструкции подложки. Указанный технический результат достигается за счет того, что качество поверхности жесткой подложки обеспечивает монтаж пиксельных кремниевыех сенсоров и чипов систем микроэлектроники детекторов, при этом устройство обладает высокой однородностью материала во всей чувствительной области пиксельных сенсоров.В заявленном устройстве указанный технический результат достигается за счет того, что механическая стабильность устройства для монтажа и кондуктивного охлаждения пиксельных кремниевых сенсоров, при рекордно высоком и однородном уровне радиационной прозрачности по всей площади, занятой детектирующими пиксельными сенсорами (X/Xo ~ 0.14%), обеспечивается за счет применения угольного флиса чередующимися со слоями графитовой бумаги. Применение графитовой бумаги вместо однонаправленных угольных волокон в итоге исключает деформации жесткой подложки.

**Сущность изобретения**

Сущность заявленного устройства поясняется Фиг. 1- 4.

 На Фиг. 1 представлена схема заявленного устройства для монтажа и кондуктивного охлаждения пиксельных сенсоров и систем микроэлектроники детекторов (показан вид сбоку). Устройство содержит следующие слои: 1 - листы графитовой бумаги толшиной 25-100 микрон; материала с высокой теплопроводностью (900-1750 Вт/(м·К)); 2 - внешние слои угольного флиса толщиной 10- 35 микрон; 3 - внутренние слои угольного флиса толщиной 10-20 микрон. При этом, в соответствии с заявленным изобретением, число чередующихся слоев  подложки пропорционально  величине теплового потока (Вт/см2)  от смонтированных  на поверхности подложки  пиксельных сенсоров, помимо этого, на Фиг. 1 представлены схематично пиксельные сенсоры - 4, смонтированные на поверхности данной жесткой подложки, составленной их чередующихся слоев флиса и графитовой бумаги.

 При изготовлении заявленного устройства, слои флиса, пропитанные эпоксидным связующим, выступающие наружу по отношению к слоям графитовой бумаги согласно схеме Фиг.1, в результате холодного процесса полимеризации связующего оказываются соединенными между собой в сплошной  контур, что предотвращает возможное расслоение устройства.  При этом графитовая бумага, не отличающаяся высокими механическими характеристиками , оказывается заключенной в жесткую оболочку.

Изобретение реализуется следующим образом (Фиг.1). Тепловой поток от пиксельных сенсоров - 4, смонтированных на поверхности жесткой подложки, распространяется через тонкие слои флиса к графитовой бумаге, обладающей высокой продольной теплопроводностью и далее отводится на периферию устройства на теплообменник (на Фиг.1 теплообменник не указан, так как для него может использоваться любая общеизвестная схема).

Заявленное устройство было изготовлено и апробировано в лабораторных условиях заявителя, Санкт-Петербургском государственном университете (СПбГУ).

Конкретные примеры реализации приведены ниже:

**Пример 1.**

 В качестве примера конкретной реализации представленного устройства был изготовлен образец с размерами 290 x 200 x 0.26mm3  (что близко к формату бумаги A4). Образец устройства выполнен в соответствии со схемой Фиг.1 и состоит из чередующихся слоев угольного флиса и 3-х слоев графитовой бумаги. При этом использованная для образца графитовая бумага имеет толщину 50 микрон и обладает с теплопроводностью 1350 Вт/(м·К), что обеспечивает однородную по направлениям кондуктивную теплопередачу на периферию устройства. Два наружных слоя содержат угольный флис плотностью 8 г/м2  и толщиной 20 мкм, а два внутренних слоя имеют меньшую плотность (1,5 г/м2 ) и толщину 10 мкм и располагаются между слоями графитовой бумаги в сочетании с полимерным связующим низкой вязкости, включающим смолу и отвердитель. Таким образом, в отличии от известного устройства [2], где теплоотвод идет через однонаправленные высокомодульные угольные волокна, функция кондуктивного отвода тепла в образце устройства выполняется графитовой бумагой с изотропными свойствами.

 Образец позволяет разместить на поверхности, например, не менее 100 пиксельных сенсоров с размерами 15х30 мм2.

 Применение в образце флиса и графитовой бумаги вместо однонаправленных угольных волокон в итоге исключает деформации жесткой подложки толщиной всего в 260 мкм, что подтверждается результатом данного конкретного примера. На Фиг.2 приводится в фотография изготовленного образца устройства. Черный цвет поверхности устройства определяется графитовой бумагой. Желтый контур на периферии образован слоями флиса,  которые соединены между собой в сплошной  контур согласно формуле изобретения.

**Пример 2.**

Для целей тестирования теплопроводности, в качестве примера конкретной реализации представленного устройства был изготовлен макет, включающий образец жесткой подложки с размерами 100 х 18 х 0,31 мм3 , состоящий в соответствии со схемой Фиг. 1 из чередующихся слоев угольного флиса и графитовой бумаги, со смонтированным на поверхности тепловым имитатором пиксельного сенсора, температурными датчиками и теплообменником. Схема макета показана на Фиг.3. Здесь 1- теплообменник в термическом контакте с подложкой, 2- откалиброванные термопары, 3 - жесткая подложка (100 х 18 х 0,31 мм3) из чередующихся слоев угольного флиса и графитовой бумаги, 4 - тепловой имитатор пиксельного сенсора (5х30 мм2).

**Пример 3.**

В качестве примера тестирования характеристик конкретной реализации представленного устройства были проведены сравнительные испытания образцов жесткой подложки двух типов:

(А) макета на основе изготовленного образца с размерами 100 х 18 х 0,31 мм3 , состоящего из чередующихся слоев угольного флиса и графитовой бумаги и

(Б) контрольного образца в виде алюминиевой пластины с размерами 100 х 18 х 0,43 мм3 .

В обоих случаях использовалисьодинаковые тепловые имитаторы пиксельных сенсоров, обеспечивающие при испытаниях плотность теплового потока до 330 мВт/см2 при максимальной мощности ~ 1,5 Вт на имитатор. Тепловые имитаторы сенсоров вместе с датчиками температуры располагались на образцах на расстоянии 70 мм от места контакта с теплообменником с температурой охлаждающей жидкости 15 0С. Прокалиброванные температурные датчики были расположены на поверхности имитаторов и также на обоих образцах в месте контакта с теплообменником.

**Пример 4.**

На Фиг. 4 проиллюстрирована характеристика работы заявленного устройства толщиной 0,31 ммв сопоставлении с аналогичной по размерам пластиной из алюминия (но толщиной 0,43 мм).В нижней части Фиг. 4 показаны зависимости температур от тепловой мощности имитатора, соответственно, на образцах вблизи теплообменника: для алюминиевой пластины - 1 и углекомпозитного устройства их чередующихся слоев флиса и графитовой бумаги - 2. А в верхней части Фиг.4 , соответственно , показывают зависимости для имитатора пиксельного сенсора на алюминиевой пластине - 3 , и для имитатора на поверхности углекомпозитного устройства.

 Результаты этих температурных измерений демонстрируют эквивалентность двух образцов в кондуктивном механизме съема тепла. Как уже говорилось выше, в зависимости от производителя, слои графитовой бумаги могут иметь на сегодняшний момент следующие параметры: плотность: 2.1 г/см3, теплопроводность 900-1750 Вт/(м·К). Для сравнения можно сопоставить с данными по алюминию, который обладает теплопроводностью порядка 221 Вт/(м·К), при этом плотность алюминия: 2.7 г/см3.

 Полученная эквивалентность результатов тестов двух образцов дает реальную оценку эффективной теплопроводности изготовленного в соответствии со схемой Фиг.1 устройства. При этом жесткая подложка из углекомпозитного устройства из чередующихся слоев флиса и графитовой бумаги обладает существенным преимуществом перед алюминиевым образцом в таком показателе как радиационная прозрачность -- радиационная длина примерно в два раза выше, а средний квадрат угла многократного рассеяния заряженных частиц будет более чем в 36 раза меньше, чем для алюминия, что подтверждает необходимость использования углерод-содержащих компонентов и соответствует, в том числе, требованиям новых медицинских приложений, использующих информацию о треках частиц.

Как показывают результаты проведенных многочисленных лабораторных исследований, технико-экономическая эффективность заявленного устройства состоит в возможности существенного расширения области применения пиксельных сенсоров, в том числе для приложений в области медицинской диагностики и медицинских изображений, за счет возможности монтажа и эффективной системы кондуктивного охлаждения большого числа пиксельных сенсоров на тонкой, радиационно-прозрачной, но механически устойчивой углекомпозитной подложке из чередующихся слоев флиса и графитовой бумаги, сочетание которых обеспечивают эффективный теплосъем и высокую однородность материала в чувствительной области всего устройства с пиксельными сенсорами.

Заявленное устройство имеет высокую коммерческую ценность и при доведении до промышленного производства может быть использовано, в том числе, в системах регистрации треков заряженных частиц в современных экспериментах по физике высоких энергий, а также в области медицинской техники для создания протонного томографа.

**Список используемых источников информации**

[1] A.van den Brink, S.Coli, F.Daudo, G.Feofilov, O.Godisov, G.Giraudo ,S.Igolkin, P.Kuijer, G.J.Nooren, A.Swichev, F.Tosello (For the ALICE colaboration), “Conductive Cooling of SDD and SSD Front-End Chips for ALICE”/«Кондуктивное охлаждение внешних чипов SDD и SSD для ALICE», European organization for nuclear research, European Laboratory for Particle Physics Publication, ALICE reference number -- ALICE-PUB-2001-21 V 1.0; Date of last change 2001-10-09.

**[**2] V.I. Zherebchevsky, I.G. Altsybeev, G.A. Feofilov, A. Francescon, C. Gargiulo, S.N. Igolkin, E.B. Krymov, E. Laudi, T.V. Lazareva, N.A. Maltsev, M. Gomez Marzoa, N.A. Prokofiev and D.G. Nesterov, "Experimental investigation of new ultra-lightweight support and cooling structures for the new Inner Tracking System of the ALICE Detector" / "Экспериментальное исследование новых сверхлегких опорных и охлаждающих структур для новой Внутренней трековой системы детектора ALICE", 2018, JINST, 13, T08003, DOI :10.1088/1748-0221/13/08/T08003 **.**

**Устройство для монтажа и кондуктивного охлаждения пиксельных сенсоров и**

**систем микроэлектроники детекторов**

**Формула изобретения**

Устройство для монтажа и кондуктивного охлаждения пиксельных сенсоров и систем микроэлектроники детекторов, содержащее жесткую подложку, выполненную  из теплопроводящих углекомпозитных  волокон, пропитанных  эпоксидным связующим, и со смонтированными  на подложке пиксельными сенсорами, *отличающееся  тем, что* жесткая подложка выполнена из чередующихся слоев угольного флиса толщиной  10-35 микрон и графитовой бумаги толщиной 25-100 микрон и с продольной теплопроводностью  от 900 Вт/м\*К до 1750 Вт/м\*К для отвода тепла на края подложки,    при этом число чередующихся слоев  подложки пропорционально  величине теплового потока (Вт/см2)  от смонтированных  на поверхности подложки  пиксельных сенсоров,  а по краям подложки все слои угольного флиса соединены между собой в сплошной  контур.

**Реферат**

**К патенту РФ № \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ на изобретение**

**«Устройство для монтажа и кондуктивного охлаждения пиксельных сенсоров и**

**систем микроэлектроники детекторов»**

 Изобретение относится к области детекторов ионизирующих излучений и предназначено для монтажа и кондуктивного охлаждения пиксельных кремниевых сенсоров, регистрирующих заряженные частицы.

Предлагаемое устройство выполнено из углерод-содержащих материалов, и состоит из чередующихся слоев угольного флиса и графитовой бумаги, обеспечивающих как эффективный отвод тепла на периферию устройства от большого числа пиксельных сенсоров и систем микроэлектроники детекторов, так и высокую радиационную прозрачность для заряженных частиц, однородную по всей площади устройства. Благодаря этому существенно расширяется область применения пиксельных детекторов, в том числе, в области медицинской техники для создания протонного томографа.

1 н.п.ф-лы, 4 илл.