

ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЙ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАНАРНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Н.И. Маслов

*Институт физики высоких энергий и ядерной физики
ННЦ «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина
E-mail: nikolai.maslov@kipt.kharkov.ua*

Приведены результаты экспериментальных исследований характеристик кремниевых плоскостных (планарных) координатных детекторов (ККД), влияния конструкции ККД на их характеристики. ККД предназначены для использования при комнатных температурах. Это значительно упрощает создание одноканальных и многоканальных детектирующих систем и их применение в коллайдерных экспериментах физики высоких энергий, ядерно-физических экспериментах, прикладных исследованиях, создании диагностических медицинских приборов, устройств неразрушающего контроля и устройств контроля окружающей среды. Применение ККД с каждым годом увеличивается, но в основном в крупных физических экспериментах и работах, где возможно использование серийно производящихся детекторов, например, кремниевых фотодиодов. Анализируются физические и технологические трудности создания и применения ККД.

ВВЕДЕНИЕ

Планарные кремниевые координатные детекторы широко применяются в настоящее время в физике высоких энергий [1–4]. Исследуется возможность их применения в ядерной физике [5, 6], медицине, охране окружающей среды [1, 7] и различных областях техники.

Применение ККД с каждым годом увеличивается, но в основном в крупных физических экспериментах и экспериментах, где возможно использование серийно производящихся специализированных детекторов, например, одноканальных кремниевых pin-фотодиодов.

Для изготовления ККД применяются наработанные десятилетиями технологии производства кремниевой интегральной микроэлектроники. Применение современных микроэлектронных технологий обеспечивает повышенную стабильность и защищенность таких детекторов от влияния атмосферы и механических воздействий, что определяется как пассивированные детекторы. Координатные детекторы подразделяются на три основных класса: точечные (пиксельные) координатные, микрополосковые (микростриповые) и дрейфовые координатные. В этой работе рассматриваются в основном микростриповые однокоординатные и двухкоординатные детекторы. Рассматривается также одноканальный планарный детектор, который создается вместе с микростриповым как тестовая структура микрострипового детектора.

Микростриповые кремниевые детекторы наиболее распространенный вид координатных детекторов. С их применением максимальное пространственное разрешение может быть достигнуто на определенной площади относительно небольшим количеством детектирующих каналов по сравнению, например, с пиксельными детекторами.

Микростриповые кремниевые детекторы также относительно проще в изготовлении и эксплуатации, чем, например, кремниевые дрейфовые детекторы.

Конструкция, принципы работы микростриповых детекторов имеют коренное отличие от традиционной интегральной микроэлектроники. Отличие это заключается в том, что огромное количество детектирующих каналов (до нескольких тысяч) независимы, т.е. не связаны в общую схему. Это значительно усложняет, меняет принципиально и делает контроль качества ключевым элементом на всех стадиях разработки и производства координатных детекторов.

Другим существенным отличием ККД является то, что эти изделия микроэлектроники не являются серийными. Это определяет особенности создания, стоимость ККД и в итоге возможность применения в немасштабных проектах.

1. КОНСТРУКЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАНАРНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

ККД изготавливаются с использованием пластин высокоомного особо чистого кремния, толщиной 300...500 мкм. Удельное сопротивление детекторного кремния, получаемого бестигельным способом, как правило, ≥ 1 кОм·см. Качество высокоомного детекторного кремния и конструкция кремниевых планарных детекторов позволяют получить предельно высокие статические характеристики и хорошее энергетическое разрешение детекторов без их охлаждения.

На рис. 1 показано упрощенное поперечное сечение детектирующего элемента планарного детектора.

Как видно из рисунка, p/n-переход (2) планарного детектора защищен окисным слоем SiO₂ и дополнительным толстым пассивирующим слоем.

Контактная площадка (5) для подсоединения электроники сдвинута относительно контактного окна к р/п-переходу (6), и контактное окно защищено пассивирующим слоем. Такая конструкция обеспечивает повышенную стабильность характеристик планарного детектора по сравнению, например, со стабильностью поверхностно-барьерных детекторов.

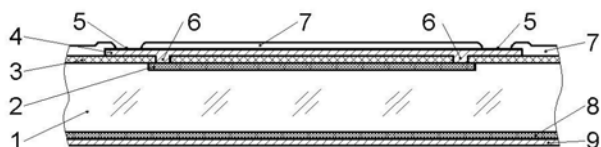


Рис. 1. Поперечное сечение детектирующего элемента планарного одноканального детектора: 1 – кремниевая пластина; 2 – легированный слой р/п-перехода детектирующего элемента; 3 – слой окисла SiO_2 ; 4 – контактный слой Al; 5 – контактная площадка на слое окисла; 6 – контактное окно к р/п-переходу детектирующего элемента; 7 – защитный окисный слой; 8 – легированный n^+ -слой омического контакта; 9 – контактный слой Al на обратной стороне детектора

Для улучшения статических электрофизических характеристик и энергетического разрешения планарного детектора р/п-переход активной области детектора окружают защитным p^+ -кольцом (рис. 2).

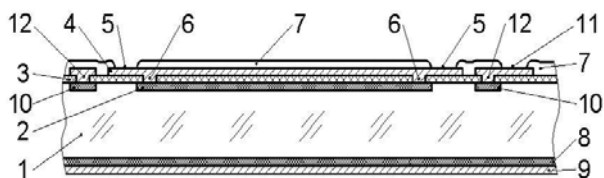


Рис. 2. Поперечное сечение детектирующего элемента планарного одноканального детектора с p^+ защитным кольцом: 1 – 9 – то же, что и на рис. 1; 10 – р/п-переход защитного кольца; 11 – контактная площадка и слой Al на слое окисла контактной площадки защитного кольца; 12 – контактное окно к р/п-переходу защитного кольца

Защитное p^+ -кольцо является по существу кольцевым детектирующим элементом и выполняет служебные функции. Защитное кольцо забирает краевые токи утечки, уменьшает емкость активной зоны детектора и фиксирует пространственные характеристики одноэлементного детектора. На рис. 3 показаны результаты измерений токов утечки одноканального планарного детектора толщиной 300 мкм и поперечными размерами активной области 2x2 мм.

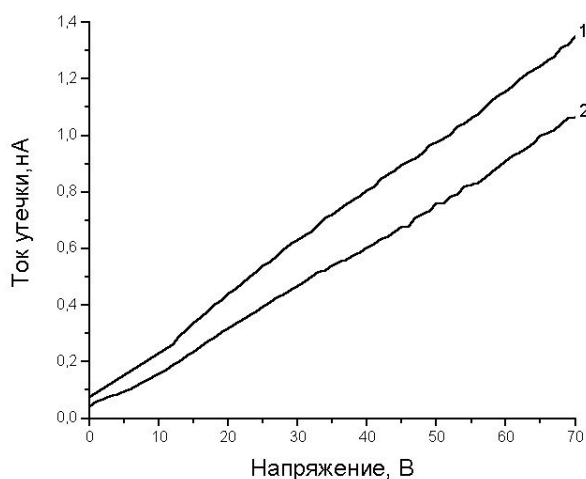


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики активной области кремниевого планарного детектора с отключенным (1) и подключенным (2) защитным p^+ -кольцом

Из результатов измерений видно, что при подключении защитного кольца токи утечки значительно уменьшаются во всем диапазоне напряжений нагрузки детектора.

Влияние защитного p^+ -кольца еще более заметно при меньших токах утечки активной области планарного детектора (рис. 4).

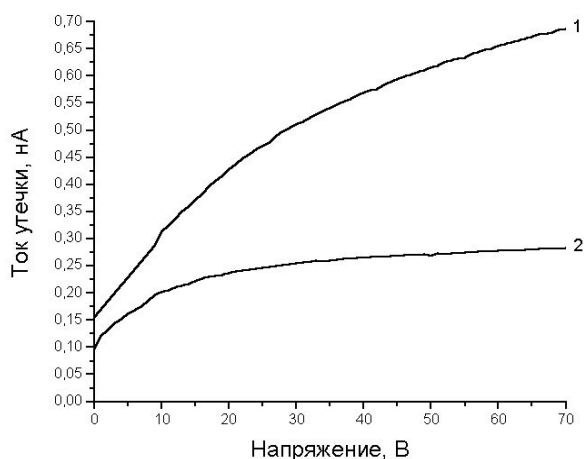


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики активной области кремниевого планарного детектора с током утечки в пикоамперном диапазоне токов: измерение с отключенным (1) и подключенным (2) защитными p^+ -кольцами

Как видно из рис. 4, токи утечки при измерении с отключенным защитным p^+ -кольцом при напряжении 70 В больше почти в 3 раза по сравнению с токами утечки, измеренными с подключенным защитным p^+ -кольцом.

На рис. 5 наряду с вольт-амперными характеристиками активной области кремниевого планарного детектора с отключенным (1) и подключенным (2) защитными p^+ -кольцами показана вольт-амперная характеристика защитного кольца.

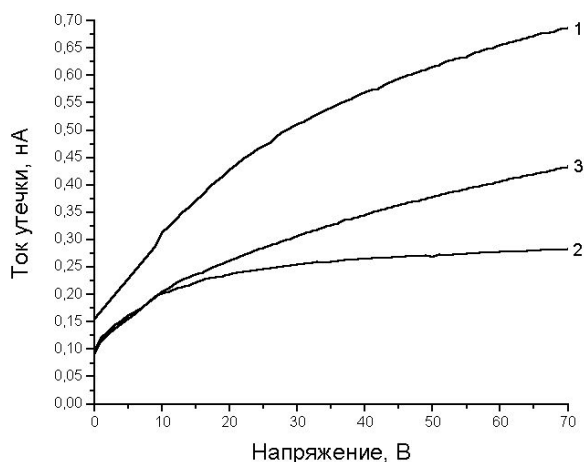


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика (3) защитного кольцевого детектора (p^+ -защитного кольца); 1 и 2 – то же, что и на рис. 4

Видно, что ток утечки защитного кольцевого детектора (p^+ -кольца (3)) практически равен разнице токов утечки активной области с отключенным (1) и подключенным (2) защитными p^+ -кольцами.

На рис. 6 представлены результаты измерений спектра рентгеновского излучения изотопного источника ^{241}Am , полученные с использованием неохлаждаемого кремниевого детектора толщиной 300 мкм, активной областью 4 мм^2 и с подключенным защитным p^+ -кольцом.

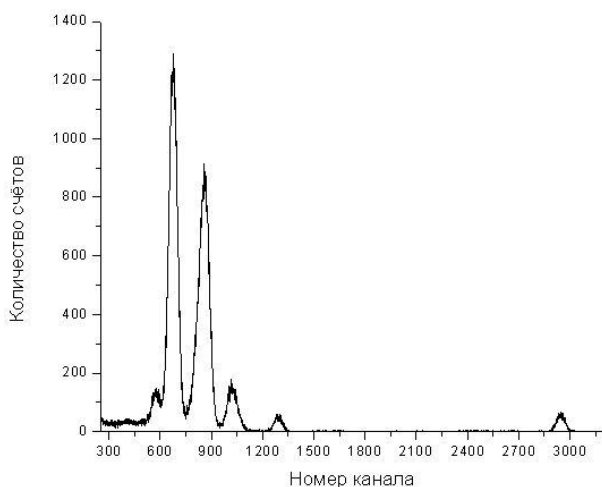


Рис. 6. Спектральное распределение рентгеновского излучения изотопного источника ^{241}Am

Энергетическое разрешение детектора в случае измерения с подключенным защитным p^+ -кольцом – 1,16 кэВ. Для этого же детектора, но в случае измерения с отключенным защитным p^+ -кольцом энергетическое разрешение – 1,42 кэВ.

На рис. 7 показано упрощенное поперечное сечение детектирующего элемента многоканального (многоэлементного) микрострипового детектора с интегрированными резисторами и конденсаторами.

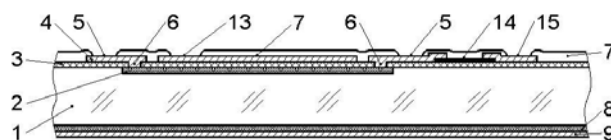


Рис. 7. Поперечное сечение детектирующего элемента планарного детектора с интегрированным соединительным конденсатором и поликремниевым резистором: 1–9 – то же, что и на рис. 1; 13 – контактная площадка интегрированного конденсатора; 14 – интегрированный поликремниевый резистор; 15 – контактная площадка для подачи напряжения нагрузки на детектирующий элемент через интегрированный резистор

Активная зона многоэлементного детектора, так же как и зона одноэлементного детектора (см. рис. 1), окружается защитным p^+ -кольцом. На рис. 7 защитное p^+ -кольцо многоэлементного микрострипового детектора не показано.

Активная зона одноэлементного детектора, как правило, подсоединяется к входу электроники считывающей спектрометрической системы непосредственно с использованием контактной площадки (direct coupling – DC-соединение).

Детектирующие элементы многоканального (микрострипового) детектора с интегрированными резисторами и конденсаторами присоединяются к считывающей электронике через интегрированные конденсаторы. Такое подсоединение называется АС. Контактные площадки 5, соединенные непосредственно с детектирующими элементами (DC контактные площадки) используются в случае многоэлементного детектора для исследования характеристик и тестирования выхода годных детектирующих элементов.

Кроме p^+ защитного кольца одноэлементные и многоэлементные ККД имеют на краю детектора еще кольцо или систему колец для плавного уменьшения напряжения нагрузки к краю детектора и стабилизации характеристик планарного детектора.

2. ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЛАНАРНЫХ КООРДИНАТНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

ККД изготавливаются на пластинах кремния толщиной от сотен микрометров до единиц миллиметра. Для изготовления ККД применяются наработанные десятилетиями технологии производства кремниевой интегральной микроэлектроники. Прежде всего – использование высокоточных фотошаблонов для создания на пластине кремния двумерных конструкций с обеспечением размеров конструкций и зазоров с точностью долей микрометра.

На рис. 8 показано расположение на пластине кремния диаметром 4 дюйма различных детекторов.

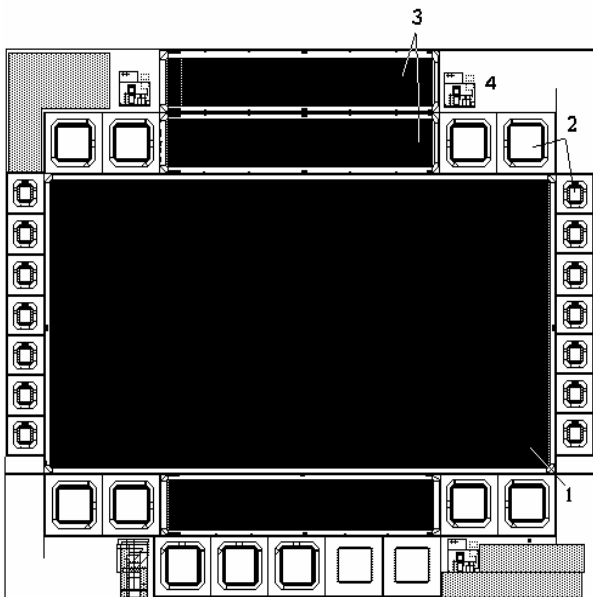


Рис. 8. Расположение детекторов на пластине кремния диаметром 4 дюйма:

- 1 – основной микростриповый детектор с 750 детектирующими элементами;
- 2 – одноканальные детекторы различных размеров;
- 3 – микростриповые детекторы с уменьшенным количеством стрипов, предназначенные для тестовых измерений;
- 4 – технологические тестовые структуры

Микростриповые детекторы с уменьшенным количеством детектирующих элементов (стрипов) и одноканальные детекторы изготавливаются, прежде всего, для тестовых измерений. Эти детекторы используются для исследования статических электрофизических характеристик, изготовления исследовательских детектирующих модулей с целью определения энергетического разрешения, пространственного разрешения и радиационной стойкости.

Наряду с этим, сопутствующие детекторы имеют и самостоятельное значение, так как они имеют характеристики не хуже, чем основной детектор, а в отдельных случаях и лучше. Например, энергетическое разрешение одноканального детектора лучше, чем энергетическое разрешение отдельного стрипа с равной активной областью. Это объясняется тем, что у стрипа из-за протяженной структуры больше емкость, которая ухудшает энергетическое разрешение.

Изготовление детектора можно объединить в такие этапы:

- разработка конструкции детектора;
- перенос конструкции детектора в специальное программное обеспечение для изготовления фотошаблонов;
- изготовление фотошаблонов;
- изготовление детекторов на стабильно работающем микроэлектронном производстве, обладающем необходимой чистотой и набором технологических процессов;

- исследование детекторов;
- тестирование детекторов;
- изготовление детекторных модулей, включающих элементы спектрометрической электроники;
- применение детекторов с использованием изготовленной или приобретенной специализированной электроники.

Исследование и тестирование детекторов разделены в два отдельных этапа. На этапе исследования детекторов рассматриваются электрофизические характеристики детектирующих элементов и всего детектора в целом. На этапе тестирования детекторов по установленным электрофизическим величинам (току утечки и емкости детектирующего элемента, межстриповому сопротивлению и межстриповой емкости) определяется количество (выход) годных детектирующих элементов и годность детектора для применения. Выход годных детектирующих элементов должен быть не менее 99 %.

3. ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ И ТЕСТИРОВАНИЯ КООРДИНАТНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Особенности исследований и тестирования координатных детекторов выделены в специальный раздел. Конструкция, принципы работы ККД имеют коренное отличие от традиционной интегральной микроэлектроники. Отличие это заключается в том, что огромное количество детектирующих каналов (до нескольких тысяч) независимы, т. е. не связаны в общую схему. Это значительно усложняет, меняет принципиально и делает контроль качества ключевым элементом на всех стадиях разработки и производства координатных детекторов.

На рис. 9 показана микрофотография уголка кремниевое микрострипового детектора.

Из микрофотографии видно, что детектирующие элементы, расположенные параллельно друг другу имеют и параллельное соединение. А это значит, чтобы определить годность микрострипового детектора для создания детектирующего модуля, включающего первичные компоненты считывающей электроники, необходимо измерить характеристики каждого детектирующего элемента и плюс к этому необходимо определить наличие или отсутствие нескольких типов возможных коротких замыканий между детектирующими элементами. Необходимое количество измерений при исследовании и тестировании одного одностороннего микрострипового детектора (или одной стороны двухстороннего микрострипового детектора) может достигнуть десяти тысяч и более.

«Независимость» детектирующих каналов и особенности подсоединения измерительных устройств к детектирующим каналам координатных детекторов усложняют исследования, тестирование и применение координатных детекторов.

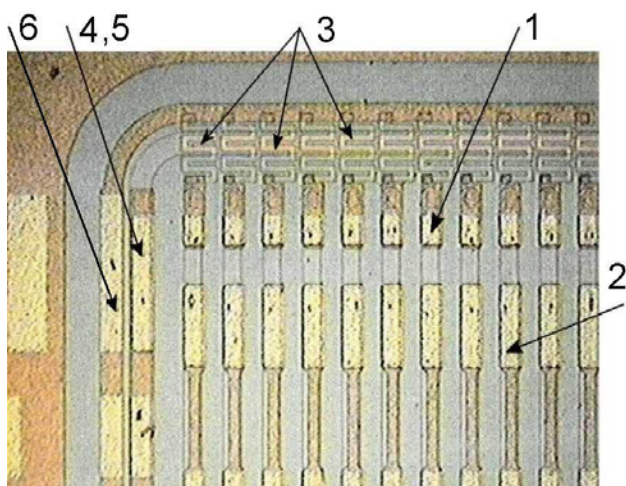


Рис. 9. Микрофотография уголка кремниевого микрострипового детектора: 1 – контактная площадка к p/n-переходу детектирующего элемента; 2 – контактная площадка к конденсатору детектирующего элемента; 3 – интегрированные резисторы; 4 – p⁺-защитное кольцо, выполненное в виде самостоятельного детектора кольцевой формы; 5 – контактная площадка для подачи напряжения к p⁺-защитному кольцу; 6 – контактная площадка линии базирования для подачи напряжения к детектирующим элементам

При разработке, исследованиях и тестировании ККД необходимо реализовать большое количество методов измерений. Полный комплекс методов измерений можно сгруппировать, вероятно, в семь уровней измерений:

1. Элементные технологические измерения на специальных технологических тестовых структурах.
2. Исследование статических электрофизических характеристик ККД.
3. Измерения выхода годных элементов ККД.
4. Тестовые измерения динамических характеристик ККД.
5. Исследование реального модуля ККД в реальных условиях определенного эксперимента.
6. Контроль качества (тестирование) вырезанных из пластины ККД после их производства, включая тестирование долговременной стабильности каждого ККД по электрофизическим характеристикам.
7. Тестирование всех детектирующих модулей ККД, включая тестирование долговременной стабильности каждого модуля ККД по спектрометрическим характеристикам.

Каждый уровень измерений имеет свои особенности, включает несколько методов измерений и требует для исследований и тестирования специальное оборудование. Прежде всего, начиная с самых простых измерений электрофизических характеристик технологических тестовых структур и одноканальных тестовых детекторов, необходимы для измерений микропозиционные зонды. На микрофотографии

(см. рис. 9) светлыми участками (1) обозначены контактные площадки для исследования характеристик и тестирования выхода годных детектирующих элементов. Эти площадки, показанные также и на рис. 4, имеют размеры 40 × 60 мкм.

Начиная со второго уровня необходимо исследование радиационной стойкости кремниевых планарных детекторов [8–12]; с третьего уровня измерения проводятся на специальных микропозиционных стендах [13].

На заключительных этапах для полного тестирования необходимо определить минимальное число методов измерений, которые можно реализовать на тестовых станциях с полностью автоматизированным механическим перемещением стрипов, подсоединением микропозиционеров к контактным площадкам, а также с полностью автоматизированным сбором, накоплением и обработкой данных. Это объясняется тем, что при тестировании одного одностороннего микрострипового детектора (или одной стороны двухстороннего микрострипового детектора) количество измерений может достигнуть десяти тысяч и более. Так как кремниевые планарные детекторы чувствительны к свету, все измерения с подачей напряжения на детекторы проводятся в светозащитных боксах.

Двухкоординатные (двухсторонние) микростриповые детекторы на обратной (омической) стороне детектора также имеют полосковые детектирующие элементы, по геометрическим параметрам аналогичные диодной стороне детектора. При исследованиях и тестировании двухсторонних микростриповых детекторов микропозиционные устройства присоединяются к контактным площадкам с двух сторон одновременно. Для таких измерений разработаны [13] механические адаптеры с двумя микропозиционерами, перемещающимися в трех направлениях.

Исследование, тестирование детекторов и монтаж детектирующих модулей с элементами считывающей электроники осуществляются в помещениях с влажностью не более 50%. Необходимость контроля влажности объясняется тем, что планарные детекторы имеют предельно низкие токи утечки (единицы и сотни пикоампер), которые могут медленно изменяться при повышенной влажности [14]. Для эксплуатации детекторов необходим контроль и регулирование влажности или помещение детекторов в герметичный корпус. Эксплуатация планарных детекторов возможна также в вакуумных камерах измерительных устройств.

Присоединение планарных детекторов к считывающей электронике производится алюминиевой или золотой проволокой диаметром от 20 до 100 мкм с использованием специальных микросварочных ручных или автоматических станций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты экспериментальных исследований характеристик неохлаждаемых кремниевых плоскостных (планарных) координатных детекторов. Показано, что их конструкция существенно влияет на их характеристики. Разработанные в ННЦ ХФТИ неохлаждаемые детекторы обеспечивают получение энергетического разрешения ~ 1 кэВ с использованием спектрометрической электроники с резистивной обратной связью, что является результатом на уровне мировых достижений для таких систем. Полученные результаты позволяют создавать детектирующие системы с параметрами, необходимыми для использования в фундаментальных экспериментальных исследованиях и для решения прикладных задач.

Проанализированы трудности создания и применения ККД. Для изготовления ККД применяются наработанные десятилетиями технологии производства кремниевой интегральной микроэлектроники. Однако конструкция и принципы работы ККД имеют коренное отличие от традиционной интегральной микроэлектроники, заключающееся в независимости – параллельном подключении большого количества детектирующих элементов. Это значительно усложняет, делает исследование и тестирование ключевым элементом на всех стадиях создания детекторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fabio Sauli. High-rate, position-sensitive radiation detectors: recent developments and application in particle physics, medicine and technology // *CERN-PRE/94-150*, 24 August 1994.
2. *Technical Proposal for A Large Ion Collider Experiment at CERN LHC*. CERN/LHCC/95-71, 15 December 1995.
3. The ALICE Collaboration, Aamodt K. et al. The ALICE Experiment at the CERN LHC // *JINST*. 2008, 3_S08002.
4. *The CERN Large Hadron Collider: Accelerator and Experiments*. V. 1: LHC Machine, ALICE, and ATLAS / Edited by A. Breskin and R. Voss. Geneva, CERN, 2009, 407 p.
5. N. Maslov, V. Kulibaba, S. Potin, et al. Radiation tolerance of single-sided microstrip detector with Si₃N₄ insulator // *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*. 1999, N 78, p. 689-694.
6. G.L. Bochek, V.I. Kulibaba, N.I. Maslov, et al. Silicon pad detectors for a simple tracking system and multiplicity detectors creation // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2001, №1, p. 36-39.
7. Г.Л. Бочек, А.В. Косинов, В.И. Кулибаба, А.А. Мазиллов, Н.И. Маслов и др. Регистрация заряженных частиц в условиях фона гамма-излучения // *Поверхность. Рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования*. 2005, №4, с. 68-71.
8. V.I. Kulibaba, A.A. Mazilov, N.I. Maslov. On the opportunity of beta-radiation detection by Si detectors in the Chernobyl failure area // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2006, №3, p. 140-141.
9. G. Bochek, V. Kulibaba, N. Maslov, et al. Beam Test Facility of KhIPT and for in Beam Testing of ALICE Silicon Detectors // *CERN/ALICE/95-19 Internal Note /SIZ*, 15 June 1995, 5 p.
10. Н.И. Маслов. Эффективность радиационного повреждения кремниевых детекторов электронами, нейтронами и тормозным гамма-излучением // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1998, в. 1(68), с. 46-48.
11. A.P. de Haas, P. Kuijjer, V. Kulibaba, N. Maslov, et al. Characteristics and radiation tolerance of a double-sided microstrip detector with polysilicon biasing resistors // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2000, №2, p. 26-33.
12. Н.И. Маслов, И.М. Неклюдов. Особенности радиационного повреждения кремниевых детекторов высокоэнергетическими электронами // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2002, №6, с. 53-58.
13. Н.И. Маслов. Определение факторов радиационного воздействия ускоренных электронов и тормозного излучения на полупроводниковые материалы // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2010, №2, с. 168-172.
14. P. Kuijjer, A. Kaplij, V. Kulibaba, N. Maslov, et al. Control complex for a double-sided microstrip detector production and tests // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2000, № 2, с. 41-45.
15. Г.П. Васильев, В.К. Волошин, С.К. Киприч, Н.И. Маслов и др. Герметизированные модули кремниевых детекторов ионизирующего излучения // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2010, №3, с. 200-204.

Статья поступила в редакцию 30.01.2013 г.

ФІЗИЧНІ І ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ І ЗАСТОСУВАННЯ КРЕМНІЄВИХ ПЛАНАРНИХ ДЕТЕКТОРІВ

Н.І. Маслов

Наведено результати експериментальних досліджень характеристик кремнієвих площинних (планарних) координатних детекторів (ККД), впливу конструкції ККД на їх характеристики. ККД призначені для використання при кімнатних температурах. Це значно спрощує створення одноканальних і багатоканальних детектуючих систем та їх застосування в колайдерних експериментах фізики високих енергій, ядерно-фізичних експериментах, прикладних дослідженнях, створенні діагностичних медичних приладів, пристроїв неруйнівного контролю і пристроїв контролю навколишнього середовища. Застосування ККД з кожним роком збільшується, але в основному у великих фізичних експериментах і роботах, де можливе використання детекторів, що серійно виробляються, наприклад, кремнієвих фотодіодів. Аналізуються фізичні та технологічні труднощі створення і застосування ККД.

PHYSICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF CREATION AND APPLICATIONS OF SILICON PLANAR DETECTORS

N.I. Maslov

The results of experimental research of the characteristics of the Si planar coordinate detectors are presented. The silicon planar coordinate detectors (SCD) are intended for usage at room temperatures. It considerably simplifies creation of one-channel and multichannel detector systems and their application in experiments of high-energy physics, in nuclear-physical experiments, in applied researches, in creation of diagnostic medical devices, devices of a nondestructive testing and devices of environment diagnostic. The SCD application is augmented each year, but, basically, in large physical experiments and in experiments, where usage of serially made specialized detectors is possible. For example, the usage of one-channel silicon PIN photodiodes. The physical and technological problems of creation and dilating of SCD application are analyzed in this report.