Выбраныя навуковыя працы БДУ

Mihck-2001

О. В. ДВОРНИКОВ, И. Ф. ЕМЕЛЬЯНЧИК, Ф. Е. ЗЯЗІОЛЯ, В. С. РУМЯНЦЕВ, А. В. СОЛИН, Р. В. СТЕФАНОВИЧ, В. А. ЧЕХОВСКИЙ, Н. М. ШУМЕЙКО

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ НОВЫХ ТИПОВ ДЕТЕКТОРОВ И ЭЛЕКТРОНИКИ СЧИТЫВАНИЯ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ И БУДУЩИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ФИЗИКЕ ЧАСТИЦ И ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

введение

Физика частиц и высоких энергий, т. е. физика микромира, играет исключительно важную роль как в познании самых фундаментальных и глубинных закономерностей природы, так и в разработке и применении новейших методов исследования, индустриальных и информационных технологий.

Ответы на многие вопросы современной физики высоких энергий могут дать экспериментальные исследования, планируемые на ускорительных комплексах нового поколения. Эти эксперименты необходимо провести так, чтобы получить максимальный объем информации о процессах взаимодействия, рождения и распада как уже известных, так и теоретически предсказываемых частиц.

При создании современных коллайдеров и экспериментальных установок решается множество проблем, связанных с материаловедением, оптикой, электроникой и другими разделами науки. Результаты этих решений, как правило, находят применение в дальнейшем при разработке технических средств и технологий, используемых в самых разнообразных отраслях науки, техники и производства.

В НЦ ФЧВЭ БГУ проводится ряд работ в области разработки и создания новых методов и средств в экспериментальной физике частиц и высоких энергий. Получены результаты, нашедшие применение при проведении существующих экспериментов и при постановке новых. Тематика работ охватывает как область физики высоких энергий, включая эксперименты на создаваемом в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН, Женева) суперколлайдере LHC, так и область низких и промежуточных энергий, высокоточную микроэлектронику и разработку новых типов датчиков.

В качестве наиболее значительных достижений НЦ ФЧВЭ укажем на разработку и производство в Минске, на VП МЗОР абсорбера торцевого адронного калориметра экспериментальной установки для глобального проекта «Компактный мюонный соленоид» (CMS), а также участие в разработке и изготовлении серийных модулей адронного Tile калориметра для международного проекта АТЛАС на основе научно-технических разработок и исследований, выполненных сотрудниками Национального центра совместно с рядом российских и украинских институтов.

Следует отметить, что основные результаты получены в тесном сотрудничестве с такими крупными научными организациями, как ЦЕРН, Объединенный институт

ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна, Россия), Институт физики высоких энергий (ИФВЭ, Протвино, Россия), Научно-исследовательский конструкторский институт энерготехники (НИКИЭТ, Москва, Россия). В этих учреждениях сосредоточен огромный научный потенциал и имеется уникальная экспериментальная база.

Кроме того, с максимальной полнотой к исследованиям привлекались различные белорусские учреждения и предприятия, что для последних, в частности, способствовало получению выгодных заказов и завоеванию международного признания.

Настоящая статья посвящена наиболее важным результатам проведенных и проводимых работ и исследований.

В разделе 1 представлены результаты, полученные с участием сотрудников НЦ ФЧВЭ в ходе разработки и создания установок СМЅ и АТЛАС, двух крупнейших детекторов, предназначенных для многолетних (начиная с 2006 г.) экспериментов на суперколлайдере LHC в ЦЕРН. Далее описано состояние дел по развитию экспериментов по исследованию редких распадов атомных ядер и атомов с целью проверки Стандартной модели взаимодействий. Завершает раздел информация о ходе разработки новых типов микроканальных пластин на основе оксида алюминия – устройств, обещающих обеспечить новые возможности в применении этих уникальных приборов.

Раздел 2 посвящен разработкам различных больших интегральных схем (БИС), применяемых для регистрирующих установок в физике высоких энергий и других областях. Описано два семейства аналоговых БИС анодной и катодной электроники, разработанных для мюонных камер установки СМЅ. Эти БИС обладают уникальным сочетанием параметров, таких как быстродействие, энергопотребление, шумовые свойства и др., и могут применяться в различных электронных устройствах. Завершает раздел описание разработки, позволяющей в кратчайшие сроки и с минимальными затратами организовать серийное и мелкосерийное производство широкого набора БИС – так называемого базового матричного кристалла – БМК, который представляет собой набор готовых стандартных схемотехнических решений, выполненных на одном кристалле. Создание новой БИС с использованием БМК сводится в этом случае лишь к определению межсоединений внутри БМК и запуску микросхемы в производство.

1. ДЕТЕКТОРЫ

1.1. ДЕТЕКТОР СМЅ (КОМПАКТНЫЙ МЮОННЫЙ СОЛЕНОИД)

Ученые и инженеры НЦ ФЧВЭ участвуют в создании детектора CMS с самого начала (тогда еще в составе НИИ ЯП), когда в 1990 г. инициативной группой ведущих физиков ЦЕРН была сформулирована концепция универсального детектора частиц для большого адронного коллайдера (LHC), строительство которого разворачивалось в ЦЕРН.

Проект CMS сегодня – это более чем 1800 физиков и инженеров из 150 институтов 30 стран, полным ходом создающих не имеющую аналогов в истории науки экспериментальную установку высотой с 5-этажный дом, массой 15000 т, являющую собой средоточие новейших технических средств и технологий [1]. Главная задача проекта – открытие и исследование новых частиц, явлений и закономерностей микромира. В тесном взаимодействии с ОИЯИ, НИКИЭТ и ИФВЭ группа сотрудников НЦ ФЧВЭ включилась в разработку и создание одной из важнейших подсистем детектора CMS – адронного калориметра [2], главной задачей которого является измерение энергии вторичных адронов (частиц, вступающих в сильные взаимодействия). Знание этой энергии имеет решающее значение в поиске новых частиц – суперсимметричных партнеров кварков и глюонов, а также в исследовании других явлений, выходящих за рамки стандартной модели фундаментальных взаимодействий.

Торцевой адронный калориметр [3], представляющий собой один из наиболее сложных в техническом отношении узлов детектора CMS, разработан учеными и инженерами НЦ ФЧВЭ совместно с российскими и украинскими коллегами. Калориметр представляет собой массивную латунную конструкцию сложной конфигурации (латунь в данном случае предпочтительнее стали ввиду меньшей ядерной длины латуни, что позволяет сделать калориметр более компактным) весом около 300 т, изготовленную с микронными точностями. Характерные допуски на предельные отклонения основных размеров системообразующих элементов калориметра составляют 650 мкм. Ввиду жестких требований к прочностным характеристикам системы подвески калориметра, наиболее нагруженные ее элементы изготавливаются из сверхпрочной нержавеющей стали ХНЗ5ИТ.

В 1996–1997 гг. силами ученых и инженеров НЦ ФЧВЭ разработана документация на прототип абсорбера калориметра и организовано его изготовление на машиностроительном заводе им. Октябрьской революции (УП МЗОР). Прототип был изготовлен и успешно испытан на вторичном пионном пучке ускорителя SPS (ЦЕРН). По результатам испытаний решили изготовить абсорбер и систему подвески торцевого адронного калориметра на УП МЗОР, о чем было заключено соглашение между ГКНТ РБ, ОИЯИ и ЦЕРН.

С 1999 г. на УП МЗОР налажено регулярно контролируемое НЦ ФЧВЭ, ОИЯИ, НИКИЭТ и ЦЕРН производство абсорбера и системы подвески торцевого адронного калориметра. К настоящему времени полностью изготовлен и собран первый абсорбер. Группа экспертов ЦЕРН, тщательно проконтролировав его параметры (определяющие энергетическое, пространственное и временное разрешение калориметра), была полностью удовлетворена качеством изготовления. Эксперты признали, что ряд новых технологических процессов (разработка специалистов МЗОР при участии сотрудников НЦ ФЧВЭ и НИКИЭТ), использованных в производстве калориметра, соответствует мировым стандартам качества.

Параллельно с работами на УП МЗОР ученые НЦ ФЧВЭ ведут компьютерное моделирование физических процессов взаимодействия и рождения частиц, которые будут регистрироваться детектором СМЅ. С помощью пакетов GEANT, РУТНІА и JETSET ведется детальный анализ развития ливней, инициируемых в объеме торцевого адронного калориметра вторичными частицами высоких энергий. Моделируется энергетический отклик калориметра на адроны и струи, разрабатываются алгоритмы восстановления событий и алгоритмы быстрого отбора полезных событий с целью уменьшения объема регистрируемой информации. Успешное завершение работ по торцевому адронному калориметру даст белорусским физикам возможность полноправного участия в программе исследований на самом мощном в мире коллайдере – LHC.

1.2. ΔΕΤΕΚΤΟΡ ΑΤΛΑС

Детектор АТЛАС разрабатывается, создается и будет эксплуатироваться коллаборацией, объединяющей около 1700 физиков и инженеров 150 научных организаций из 33 стран. Главная цель экспериментов на детекторе АТЛАС – поиск, обнаружение и изучение бозона Хиптса – частицы, объясняющей происхождение масс кварков и лептонов. Параллельно будет исследован широкий круг актуальных проблем современной физики элементарных частиц. Среди них: процессы образования и распада топ-кварка, физика В-мезонов, проверка предсказаний суперсимметричной теории, поиск явлений за рамками стандартной модели. Экспериментальные данные (процессы рождения вторичных частиц в протон-протонных взаимодействиях при энергии 14 ТэВ) будут воспроизводиться в лобовых столкновениях протонных пучков, ускоренных в кольце LHC [4].

НЦ ФЧВЭ был принят в коллаборацию АТЛАС в 1998 г. В тесном контакте с коллегами из ОИЯИ АТЛАС-группа НЦ ФЧВЭ включилась в разработку и создание трех подсистем детектора: адронного калориметра (Tile-калориметр), злектромагнитного жидкоаргонного калориметра (LAr-калориметр) и мюонного спектрометра.

Первый вклад в проект АТААС состоял в изготовлении комплекта так называемых промежуточных пластин, являющихся составным элементом конструкции автономного модуля Tile-калориметра. Комплект насчитывает 244800 пластин 12 типоразмеров. Заготовками служили листы холоднокатанной стали Fe-360 толщиной 4,05 мм и размерами в плане 400×1620 мм². Характерные требования на точность изготовления составляла ±0,1 мм. Массовое производство (методом штамповки) было осуществлено на Минском тракторном заводе. Общий объем переработанного металла составил около 320 т [5]. Силами АТААС-группы была организована и осуществлена поставка готовых изделий в Дубну и Протвино (Россия), Прагу (Чехия) и Пизу (Италия).

В течение 1999–2000 гг. названная группа обеспечивала транспортировку собираемых в ОИЯИ 21-тонных автономных модулей Tile-калориметра по маршруту Дубна– Женева.

Совместно с коллегами из НИЧ БГУ был изготовлен и поставлен в ОИЯИ комплект оснастки для стенда сборки проволочных камер мюонного спектрометра. Комплект состоял из 1440 шт. цилиндров трех типоразмеров со сложной конфигурацией профиля. Отличительная особенность работ заключалась в высоких требованиях на точность размеров, которая составляла ±5 мкм.

Совместно с коллегами из ОИЯИ, НИЧ БГУ и конструкторами МЗОР был разработан эскизный проект комплекса (подвижный манипулятор и стенд) для сертификации проволочных камер мюонного спектрометра. Манипулятор предназначен для транспортировки камер (габариты 3200×2160×500 мм³, вес около 300 кг) от сборочного стола к стенду и от стенда на «склад». В состав стенда входит набор систем (включая систему считывания и обработки сигналов с камер), обеспечивающих штатное функционирование трех камер – сертифицируемой и двух опорных. Сертификация заключается в прецизиционной (с точностью до 20 мкм) оценке положения сигнальной проволочки каждой дрейфовой трубки в плоскости камеры. «Просвечивание» комплекта камер прямолинейными треками должно обеспечиваться высокоэнергетическими космическими мюонами.

В 2000 г. был выполнен большой объем организационных работ (поиск финансово выгодного предприятия-изготовителя, поставщика стали, транспортного предприятия) по подготовке поизводства партии магнитопроводов (фингеров) Tileкалориметра. Объем партии – 260 фингеров, вес одного изделия – 210 кг. В итоге заказ размещен на МЗОР.

В настоящее время на МЗОР организовано и осуществляется изготовление поглотителей (пластины из меди марки М1) Lar-калориметра. Для выполнения этих работ совместно с коллегами из ОИЯИ и специалистами МЗОР была разработана и внедрена на заводе новая технология высокоточной обработки крупногабаритных изделий из меди. Так, например, при размере пластины 1650×350×25 мм³ ее толщина на всей площади должна укладываться в размер 25±0,05 мм. Первый комплект поглотителей (25 шт., общий вес – 2020 кг) изготовлен и поставлен в ОИЯИ.

В качестве предложений в физическую программу исследований на детекторе АТЛАС членами АТЛАС-группы проводятся следующие работы. На компьютерах НЦ ФЧВЭ инсталлирован программный комплекс ATLFAST, который фактически представляет собой математическую модель детектора ATЛАС. С помощью ATL-FAST планируется исследовать процесс рождения и регистрации одиночных Wбозонов в детекторе ATЛАС. Цель исследований – проверка теоретических предсказаний об особой роли электрослабых радиационных поправок в данном процессе.

Выполнены расчеты трехмерного дифференциального сечения для инклюзивного процесса двухфотонного рождения лептонных пар в протон-протонных взаимодействиях. Интерес к этому процессу обусловлен двумя причинами: во-первых, его дифференциальное сечение растет с ростом энергии; во-вторых, предполагается, что он может быть использован для мониторинга интенсивности столкновений (светимости) встречных пучков LHC [6].

1.3. ДЕТЕКТИРУЮЩАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕДКИХ РАСПАДОВ АТОМНЫХ ЯДЕР И АТОМОВ

Существующая сегодня так называемая «Стандартная модель» (СМ) удовлетворительно описывает многие явления микромира. Однако она имеет ряд нерешенных проблем. Одной из них является проблема существования массы у нейтрино. Ответ на этот вопрос может быть получен только из эксперимента. При этом также проверяется закон сохранения лептонного заряда, существование правых токов, возможен ответ на вопрос о происхождении скрытой массы Вселенной и др.

Существуют три типа экспериментов, в которых может быть определена масса нейтрино (или установлено ограничение на ее возможную величину). Это: изучение спектра обычного бета-распада, поиск осцилляций нейтрино и исследование двойного бета-распада [I]. В настоящее время интенсивные исследования проводятся по всем этим направлениям.

Поиски двойного бета-распада – редчайшего радиоактивного процесса, когдалибо наблюдавшегося в лабораторных условиях, осуществляются интенсивно на протяжении многих последних десятилетий, начиная с 30-х гг., когда он был впервые предсказан М. Геперт-Майер¹ [7]. Интерес к этому процессу объясняется тем, что от

¹ На возможность осуществления двойного бета-распада было указано в работе М. Гепперт-Майер [7], как на процесс, в котором «...один метастабильный изобар превращается в более стабильный, излучая одновременно два электрона». Эта работа была опубликована в 1935 г., т. е. всего лишь год спустя после появления сформулированной Ферми теории бета-распада. Таким образом, проблема двойного бета-распада является столь же «древней», как и проблема слабых взаимодействий.

результатов его исследования зависит будущее фундаментальных теорий строения вещества – от составных частей атома до «архитектуры» космоса.

Физика процесса двойного бета-распада состоит в превращении атомного ядра с зарядом Z в ядро с зарядом Z+2 или Z–2. При этом, согласно CM, два нейтрино должны испускаться обязательно. Однако определенные трудности CM дают возможность предполагать, что существует безнейтринный двойной β-распад. Если он существует, то это прямое указание на наличие массы у нейтрино. Этот процесс до сих пор, несмотря на большие усилия, не обнаружен вследствие экспериментальных трудностей.

Двойной β-распад – это такой распад ядра, при котором испускаются одновременно две β-частицы (позитроны или электроны) и два нейтрино (антинейтрино). К этому же классу процессов, кроме двойного бета-распада, электронного или позитронного, относятся еще два: двойной К-захват и К-захват совместно с одиночным β⁺-распадом ядра.

Современному состоянию вопроса посвящено большое количество публикаций, как научно-популярных (например, [8]), так и специальных (например, обзоры [9]).

Превращение двух нейтронов ядра в протоны или двух протонов в нейтроны может идти как по схеме двойного двухнейтринного бета-распада (2β_{2v}):

$$2\beta_{2\nu}^{\pm} - (A, Z) \rightarrow (A, Z \mp 2) + 2\beta^{+} + \left\{\frac{2\overline{\nu}}{2\nu}\right\}, \qquad (1.3.1)$$

$$2\beta^{+} \in_{2\nu} - (A, Z) + e^{-} \to (A, Z - 2) + \beta^{+} + 2\nu, \qquad (1.3.2)$$

$$2 \in_{2\nu} - (A, Z) + 2e^{-} \to (A, Z - 2) + 2\nu, \qquad (1.3.3)$$

так и по схеме двойного безнейтринного распада ($2\beta_{0\nu}$):

$$2\beta_{0\nu}^{\pm} - (A, Z) \rightarrow (A, Z \mp 2) + 2\beta^{\pm}, \qquad (1.3.4)$$

$$2\beta^{+} \in_{0\nu} - (A, Z) + e^{-} \to (A, Z - 2) + 2\beta^{+}, \qquad (1.3.5)$$

$$2 \in_{0\nu} - (A, Z) + 2e^{-} \rightarrow (A, Z - 2).$$

$$(1.3.6)$$

В данной работе исследуются 2β⁺-распад и конверсия атомного электрона в позитрон.

С точки зрения экспериментатора, 2β⁺-распад представляет собой рождение в одной точке образца двух позитронов, которые после короткого пробега в веществе образца теряют свою энергию и аннигилируют, что сопровождается вылетом двух пар противоположно направленных гамма-квантов. Энергия каждого из четырех гамма-квантов равна 511 кэВ. Если распад «обычный» – спектр суммарного энерговыделения позитронов размыт: нейтрино уносят часть энергии. Если распад «безнейтринный» – энерговыделение является фиксированной величиной.

Задача эксперимента состоит в том, чтобы достоверно зарегистрировать признаки искомого процесса в образце (т. е. в некоторой массе подходящего для 2β⁺- распада изотопа) и доказать, что они не вызваны посторонними, фоновыми воздействиями.

Если событий, характерных для искомого процесса, за время экспозиций не наблюдалось, то ограничение на период полураспада получается из следующей формулы:

$$T_{L2} \ge \ln 2 \frac{N_a \alpha \delta \rho V}{M K_a \sqrt{N+1}} t, \qquad (1.3.7)$$

где N_a – число Авогадро; δ – относительное содержание 2 β -активных ядер; ρ – плотность образца; V – объем образца; t – время экспозиции; M – атомная масса; K_a – коэффициент, связанный с доверительной вероятностью; α – эффективность регистрации; N – количество фоновых отсчетов.

Если же процесс предположительно обнаружен, ситуация становится сложнее: требуется дополнительный, «фоновый эксперимент», т. е. проведения экспозиции с образцом, близким по свойствам к исследуемому, но заведомо не пригодным к исследуемому процессу.

На перспективность исследования 2β⁺-распада, вследствие больших возможностей подавления фона, особое внимание обращалось еще в работе [10].

Процесс «К-захват плюс β⁺-распад» или конверсия атомного электрона в позитрон (далее – конверсия) может происходить подобно тому, как обычный бетаплюс-распад сопровождается захватом атомного электрона. Интерес к исследованию этого процесса вызван теми же причинами, что и к поиску двойного бетараспада, поскольку с физической точки зрения эти процессы во многом аналогичны.

В работе [11] показано, что процесс конверсии выгодно отличается от процесса $2\beta^+$ -распада некоторыми факторами. Во-первых, вероятность конверсии в десятки (а для некоторых изотопов в сотни) раз выше, чем для $2\beta^+$ -распада. Во-вторых, процесс разрешен энергетически при существенно меньшей разности масс между исходным и дочерним ядром. Последнее очень важно с практической точки зрения: список изотопов – кандидатов для исследования существенно расширяется (до ~20), и некоторые из них имеют весьма высокую распространенность в естественной смеси изотопов. Например, это почти 100 % для Са-40 или около 70 % для Ni-58. Образец может быть дешевым и доступным. Следовательно, перспективы открытия конверсии могут быть не менее реальными, чем открытие $2\beta^+$ -распада.

Поэтому исследования процессов двойного бета-распада и конверсии атомного электрона в позитрон являются актуальными и привлекают внимание многих ученых во всем мире, несмотря на исключительную сложность экспериментов: речь идет о наблюдении процессов, вероятность которых для отдельного ядра находится на уровне одного события за 10²⁰ лет и более.

Несмотря на серьезные трудности, за 60 лет исследований достигнуты определенные успехи в экспериментальном исследовании процессов типа двойного бетараспада. Впервые, относительно недавно, был, наконец, обнаружен обычный, двухнейтринный распад ядра изотопа селена-82 (С. Эллиот; А. Хан; М. Мое, Калифорнийский университет, США [12]) с периодом полураспада на уровне 1,1×10²⁰ лет. Обнаружен 2β-распад и для некоторых других атомных ядер. 2β⁺-распад и безней-

тринную моду двойного бета-распада пока не удалось наблюдать ни в одном эксперименте.

Для процесса конверсии в настоящее время достигнуты ограничения на период полураспада на уровне от 10¹⁵ лет до 10²⁰ лет для различных изотопов [9]. Однако безнейтринную моду конверсии наблюдать также не удалось.

В НЦ ФЧВЭ совместно с Институтом физики НАН Беларуси в 1997–1999 гг. проводился эксперимент по исследованию 2β⁺-распада [13], поддержанный ФФИ РБ. Установлено ограничение на период двойного бета-плюс-распада ядра Cd-106 на уровне 0,9×10¹⁹ лет, что существенно превышает ранее достигнутые результаты (2,6×10¹⁷ лет). Однако достигнутые результаты далеки от требований теории и предельных возможностей данного эксперимента.

Дальнейшим развитием этой работы является продолжение эксперимента по поиску двойного бета плюс-распада и исследование конверсии. Полученные предварительные оценки показали возможность поднять чувствительность эксперимента для обоих процессов на 1–3 порядка (до 10²⁰–10²³ лет) по сравнению с ныне достигнутыми [13].

Целью⁻ исследований является экспериментальное открытие двойного бетаплюс-распада, а также конверсии атомного электрона в позитрон или установление новой, рекордной границы на вероятность этих процессов.

Для этого продолжается эксперимент по поиску двойного бета-плюс-распада для изотопа кадмия-106 — одного из возможных «кандидатов» на такой распад и подготовка к эксперименту по поиску конверсии.

Научная новизна состоит в ранее не применявшейся постановке эксперимента, позволяющей резко поднять его чувствительность [14]. Измерения проводятся в так называемой «4π-геометрии» (образец и детектирующая система имеют сферическую конфигурацию). Особенности детектирующей системы позволяют применять мощный многомерный анализ.

Для этого при постановке эксперимента используется следующее.

- 1. «4π-геометрия» регистрации.
- 2. Образец особой формы (в виде сферического слоя), что в десятки раз уменьшает самопоглощение.
- 3. Высокоэффективные датчики гамма-излучения.
- 4. Метод временных совпадений.
- 5. Пространственный отбор событий.
- 6. Многомерный амплитудный анализ.
- 7. Пассивная защита.
- 8. Современные методы математической обработки.

Все это позволяет: a) повысить эффективную массу образца; б) достичь относительно высокой эффективности регистрации; в) регистрировать большую часть характерных признаков процесса; г) резко подавлять фон.

Рассматривается также возможность исследования в условиях «8π-геометрии», когда образец одновременно представляет собой детектор, дающий дополнительную временную, энергетическую и пространственную информацию. Это приводит к еще более жесткому подавлению фона.

В конечном счете, все это позволяет достичь рекордно высокой чувствительности эксперимента к исследуемым процессам.



310

Рис. 1.3.1. Блок детекторов установки АРГУС

Спектрометр АРГУС [15–17], на котором совместно с ИФ НАН Беларуси проводятся исследования, – высокоэффективная установка гамма-совпадений с большим рабочим объемом (рис. 1.3.1 и 1.3.2) позволяет реализовать многие условия эксперимента.

Используются вычислительные мощности и программное обеспечение, имеющиеся в НЦ ФЧВЭ, а также возможности ЦЕРН (Женева) и ОИЯИ (Дубна), включая пакеты программ и базы данных.

Значительный научный потенциал для проведения работы накоплен в ходе проведения ранее поиска двойного бета-



Рис. 1.3.2. Блок-схема спектрометра АРГУС (1999 г.). Д1...Д32 – детекторы (NaI(TI) Ø150х100мм); Ф1...Ф32 – пороговые формирователи; ОВ1...ОВ32 – одновибраторы задержки; МСС – мажоритарная схема совпадений; ЛЦП – 32 8-разрядных преобразователя заряд-код; Г – 32-разрядный годоскоп; РО – разветвитель-одновибратор; С1 – счетчик числа событий (запусков от МСС); ГИ – генератор тактовых импульсов; С2 – счетчик живого времени; КК – контроллер крейта КАМАК; S1 – строб-сигналы для АЦП (600 нс); S2 – строб-сигналы для годоскопа (50 нс); S3 – сигнал повторяющий входной строб-сигнал от МСС; S4 – сигнал мертвого времени; S5 – тактовые импульсы распада и других низкофоновых исследований, имеются теоретические наработки, создана база для моделирования процессов регистрации, для обработки результатов, имеется большой опыт практической работы с установкой и в области низкофоновой спектрометрии [18–21].

Ожидаемые результаты исследований: открытие двойного бета-плюс-распада или установление рекордной границы на его вероятность на уровне 10²⁰–10²² лет.

Область применения полученных результатов – фундаментальная наука (физика элементарных частиц и атомного ядра, космология), техника регистрации элементарных частиц, низкофоновая спектрометрия, в том числе контроль загрязненности продуктов питания и окружающей среды. Развитую методику планируется использовать также в экспериментах по поиску нарушения СР-, СРТ-симметрии при распаде ортопозитрония. Методы, разрабатываемые при проведении экспериримента, применимы (и применяются) также при решении проблем, связанных с чернобыльской катастрофой и контролем за делящимися материалами.

1.4. МИКРОКАНАЛЬНЫЕ ПЛАСТИНЫ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Поиск и разработка новых методов регистрации ядерных излучений является одним из приоритетных направлений в области экспериментальной физики фундаментальных взаимодействий.

В настоящее время все более широкое применение получают детекторы, основанные на принципе микроканального электронного умножения, базовым элементом которых служат микроканальные пластины (МКП). На основе МКП созданы детекторы частиц высоких энергий, детекторы рентгеновского излучения, усилители яркости, электронно-оптические преобразователи и другие изделия. В перспективе возможно их применение и в медицине, например, для разработки беспленочной низкодозовой флюорографии.

Детекторы этого типа обладают исключительно высокими рабочими характеристиками (коэффициент усиления входного сигнала до 106, быстродействие до 1 нс, чувствительность вплоть до одноэлектронного режима, высокая радиационная стойкость).

Существующая технология изготовления МКП, в которой исходным материалом служат волокна из свинцового стекла с металлической сердцевиной, очень сложна и трудоемка. Здесь уже достигнут предел на минимальный диаметр каналов (не менее 10 мкм), что принципиально ограничивает разрешающую способность конечного изделия. Максимальный диаметр отдельной пластины не превышает 5 см. Поиски альтернативных технологий изготовления МКП активно ведутся в течение последних 20 лет [22–24]. Однако технология производства МКП, способная заменить традиционную, до сих пор не создана.

В 1997 г. сотрудники НЦ ФЧВЭ БГУ и Института электроники НАН Беларуси впервые предложили и продемонстрировали возможность использования пористого анодного оксида алюминия для разработки новой технологии производства МКП.

Выгодное преимущество оксида алюминия заключается в наличии субмикроканалов, которые образуются в процессе выращивания пластины. Их диаметр и среднее расстояние между ними зависит от условий выращивания – приложенного напряжения, типа электролита, температуры и т. д. Субмикроканалы существенно упрощают



Рис. 1.4.1. Фотография скола МКП из анодного оксида алюминия с каналами, полученными селективным травлением

процесс формирования микроканальной структуры, позволяют создавать микроканалы с диаметрами в несколько раз меньшими, чем у промышленных МКП.

К настоящему времени нами создана технология выращивания МКП с толщинами от 40 до 150 мкм. Используемый процесс – электрохимическое окисление алюминия. Разработана процедура направленного травления, позволяющая получать микроканалы с диаметром 2,5÷10 мкм и отношением длины к диаметру 30:1 и более (рис. 1.4.1). Опробован ряд методов модификации поверхности каналов, направленных на достижение необходимых значений проводимости и коэффициента вторичной электронной эмиссии. Отмечен эффект электронного умножения с коэффициентом ~ 5. Создана вакуумная установка для исследования МКП. Полученные результаты опубликованы в работах [25, 26].

По сравнению с традиционной наша технология изготовления МКП обладает рядом высокоперспективных преимуществ. Среди них: возможность создавать МКП с плотностью каналов до 10¹⁰ на см²; с диаметром каналов от 0,04 мкм и выше; с соотношением (длина / диаметр канала) от 1 до 300; с площадью МКП до нескольких десятков дм², что традиционными методами не достижимо; снижение стоимости изготовления МКП в несколько десятков раз.

В настоящее время основные усилия сосредоточены на разработке методов модификации поверхности каналов с целью достижения необходимых значений проводимости и вторичной электронной эмиссии, на исследовании различных электрофизических характеристик МКП, на изготовлении опытных образцов электрон-

ных умножителей. В частности, изучается процедура нанесения тонких плотных упорядоченных пленок оксидов металлов из металлоорганических растворов, которая позволяет модифицировать поверхность стенок глубоких узких каналов МКП, регулируя их проводимость и вторично-эмиссионные свойства в широких пределах.

2. МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗДЕЛИЯ ДЛЯ ДЕТЕКТОРОВ ЧАСТИЦ

Подавляющее большинство современных установок для регистрации элементарных частиц немыслимы без применения электронных компонентов, и зачастую содержат десятки и даже сотни тысяч регистрирующих каналов. Одним из примеров такой многоканальной установки является детектор CMS. Так, только мюонная система содержит сотни тысяч регистрирующих каналов. При этом требования к регистрирующей электронике настолько велики, что находятся на пределе современных технологических возможностей. Электроника должна быть малошумящей, быстродействующей, малопотребляющей и т. д. и т. п. и плюс ко всему должна работать в мощных потоках радиации при экстремальных температурах.

Первая и вторая части данного раздела посвящены описанию разработок БИС для катодных стриновых камер торцевой части мюонного детектора проекта CMS. Разработанные для данных камер БИС обладают широкими функциональными возможностями, что позволяет применять их для многих других детекторов не только в исследованиях по физике высоких энергий, и не только для детекторов элементарных частиц, но и во многих других областях, например в телеметрии.

Третья часть раздела посвящена базовому матричному кристаллу (БМК) – универсальной основе для быстрой разработки и запуска в производство ИС различного назначения.

2.1. БОЛЬШИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОНИКИ СЧИТЫВАНИЯ КАТОДНЫХ СТРИПОВЫХ КАМЕР

Катодные стриповые камеры (КСК) передней мюонной станции ME1/1 входят в состав торцевой части мюонного детектора проекта CMS и предназначены для наиболее точных в мюонном детекторе измерений пространственных и временных параметров трека частиц [27, 28].

Система электродов камеры, состоящая из катодных стрипов и анодных проволочек, и подключенная к ним электроника считывания должны обеспечивать пространственное ~75 мкм и временное разрешение ~20 нс для обеспечения требуемой точности измерения энергии и идентификации частиц мюонной системой в целом.

Катодная электроника обеспечивает определение азимутальных координат мюонного трека через точное измерение наведенного заряда на стрипы. Анодная электроника фиксирует момент пролета частицы и определяет пространственную координату в радиальной плоскости.

Электроника считывания должна функционировать без существенного «мертвого времени» и сохранять работоспособность в условиях высокой загрузки детектора. Особенности мюонного детектора CMS налагают жесткие ограничения на рассеиваемую мощность (не более 20 мВт на канал) и занимаемый объем. Максимальный поток нейтронов в месте размещения накамерной электроники оценивается в 10¹²/см² за 10 лет, что требует применения радиационностойких технологий при разработке и производстве интегральных схем.

40. Зак. 2458.

Дадим описание комплекта 8- и 16-канальных БИС, разработанных для использования в составе электроники катодного и анодного считывания и удовлетворяющих специфическим требованиям КСК ME1/1.

Наведенный на катодные стрипы заряд преобразуется 16-канальной БИС усилителей-формирователей в выходные импульсы напряжения, которые подаются на вход БИС аналогового запоминающего устройства (SCA), где с частотой ~ 20 МГц берутся выборки входного сигнала и сохраняются на время задержки сигнала триггера 1-го уровня. Полученные данные используются для измерения отношения зарядов, наведенных на соседние стрипы КСК. Сигнал с выхода БИС усилителяформирователя подается также и на вход БИС «Сотрагаtor Network», где производится выделение центра локального зарядового кластера с точностью ½ стрипа и фиксируется время его появления. Полученная информация необходима для выработки сигнала триггера 1-го уровня мюонной системы.

Для уменьшения влияния эффекта наложения в условиях высоких загрузок детектора, усилитель-формирователь должен эффективно компенсировать длинный компонент входного токового сигнала, определяемый временем дрейфа ионов к электроду (*Tail Cancellation*). Выходные сигналы усилителей-формирователей имеют форму квазигауссова импульса с временем пика ~120 нс.

С 1994 по 2000 г. ряд прототипов БИС катодного считывания был разработан с учетом специфики МЕ1/1. Для реализации была выбрана СВЧ биполярно-полевая технология [29, 30], опробованная при изготовлении одно- и четырехканальных зарядочувствительных предусилителей для кремниевых детекторов и КСК [31–33]. Данная технология использует проектные нормы 1,5 мкм. Основные реализуемые компоненты:

- СВЧ *n*-*p*-*n*-транзисторы (*Ft*>3 ГГц, β>150);
- *p*-*n*-*p*-транзисторы (*Ft*>30 МГц, β>30);
- *р* канальные полевые транзисторы, управляемые *p*-*n*-переходом (*Ft*>300 МГц);
- МОП конденсаторы;
- *p*+, *n* резисторы.

БИС «Катод-1 и 2» были разработаны с целью оптимизации зарядочувствительного предусилителя (ЗЧУ), в частности – для выбора типа головного транзистора [34, 35]. Другой важной задачей была отработка усилителя-формирователя (УФ) – определение оптимального коэффициента усиления и настройка *Tail Cancellation*. С этой целью были разработаны два варианта БИС, имеющие сходную функциональную схему (рис. 2.1.1), но отличающиеся головными транзисторами (n-p-n для «Катод-1», p-*j*FET для «Катод-2») и временем формирования (80 нс для «Катод-1» и 240 нс для «Катод-2»).

Каждый из 16 каналов БИС «Катод-1» содержит два идентичных предусилителя (основной и опорный) и дифференциальный 5-каскадный усилительформирователь. Для обеспечения максимального быстродействия и уменьшения влияния емкости детектора на шумовые и динамические характеристики предусилитель построен по каскадной схеме с активной нагрузкой на полевом транзисторе минимальной площади. Ток покоя головного транзистора выбран равным 0,6 мА. Постоянная цепи отрицательной обратной связи ЗЧУ – 50 кОм × 1,5 пФ. Сигнал, снятый с умощненного выхода основного предусилителя, используется для формирования временной отметки в катодной электронике.



Рис. 2.1.1. Блок-схема БИС зарядочувствительных предусилителей формирователей «Катод-1 и 2» катодного считывания КСК МЕ1/1

Для упрощения оптимизации системы «детектор–усилитель» введены плавные электронные регулировки усиления и *Tail Cancellation*, для чего во втором каскаде УФ используется параллельное включение пары дифференциальных усилителей с суммированием коллекторных токов через идентичные каскады Джильберта. Следующие два каскада УФ осуществляют дополнительное усиление, интегрирование и формировку сигнала. Выходной буфер предназначен для обеспечения требуемого времени нарастания выходного сигнала при работе на емкостную нагрузку (до 50 пФ). Основные параметры БИС «Катод-1 и 2» приведены в табл. 2.1.1.

При разработке топологии БИС особое внимание было уделено минимизации паразитного взаимодействия каналов и обеспечению устойчивости к самовозбуждению. С этой целью был опробован ряд конструктивно-топологических решений [36–37]. В

Таблица 2.1.1

Параметр	БИС		
	«Катод-1»	«Катод-2»	
Коэффициент преобразования, мВ/фКл	1÷5	1÷7	
Время «пика» выходного сигнала при номинальном сигнале детек- тора 1MIP (~100 фКл) и емкости детектора ~100пФ, нс	100	250	
Эквивалентный входной шумовой заряд, 1.m.s.	2400 c + 12 c/нФ	1500 е + 20 е/пФ	
Диапазон выходных сигналов (при 1 % нелинейности), В	0÷1,5	0÷1,5	

Параметры БИС катодного считывания



Рис. 2.1.2. БИС «Катод-1» (увеличение ~20:1)

частности, для изоляции наиболее критичных блоков (предусилители, выходные усилители) и каналов в целом, широко использовались контакты к подложке, имеющие большую площадь. В результате была обеспечена устойчивость к самовозбуждению в полном диапазоне регулировки коэффициента усиления. Уровень паразитного взаимодействия каналов при работе на прототипах Р0-4 КСК МЕ1/1 не превышает 50 дБ.

Для удешевления и сокращения сроков отработки схемы электрической БИС ряд резисторов был выполнен в виде набора элементов. Путем корректировки системы металлизации можно изменить диапазон регулировки коэффициента усиления и *Tail Cancellation*, постоянную обратной связи предусилителя и пр. То-

пология БИС «Катод-1» показана на рис. 2.1.2. Размер кристалла 4,6×5,2 мм². БИС содержит более 1600 транзисторов.

БИС «Катод-1» была испытана в 1997–1998 гг. в составе электроники считывания прототипов Р0, Р3, Р4 КСК МЕ1/1 на космических мюонах в ОИЯИ, на ускорителе SPS и совместно с имитатором радиационной загрузки («GIF») в ЦЕРН.



Рис. 2.1.3. Типичный отклик БИС «Катод-1» на сигнал, наведенный 225 ГэВ мюоном. Прототип РЗ КСК МЕ1/1 (ЦЕРН, 1997, Н2)

На рис. 2.1.3 показан типичный отклик БИС «Катод-1» на сигнал, наведенный мюоном с энергией 225 ГэВ. Испытания показали, что в близких к реальным условиях загрузок LHC (>200 кГц/канал) разработанная электроника обеспечивает требуемое пространственное и временное разрешение детектора [38]. Были зафиксированы базовые схемные и топологические решения, основные электрические параметры БИС (количество каналов в ИС, коэффициент усиления, рассеиваемая мощность, время формирования, уровень шумов), а также конструкторско-технологические требования (тип и максимальные размеры корпуса БИС, технические параметры печатных плат).

Для выработки временной метки по сигналам, считанным с катодных стрипов, и определения центра зарядового кластера с точностью ¹/₂ стрипа разработана и испытана в 1997–1998 гг. 16-канальная БИС «КАТОД-3». БИС содержит *CR*³-*RC*³ усилитель-формирователь со временем формирования ~30 нс, восстановитель базовой линии и дискриминатор. При превышении порога на ~10 мВ БИС вырабатывает прямоугольный импульс с регулируемой длительностью. Предполагалось, что сигналы на вход «КАТОД-3» будут подаваться с выходов предусилителей БИС «КАТОД-1 и 2» (т. е. собственного предусилителя БИС «КАТОД-3» не имеет). БИС «КАТОД-3» имеет парафазные выходы типа «открытый коллектор» с возможностью регулировки выходного тока. Основные параметры приведены в табл. 2.1.2.

Таблица 2.1.2

Время «пика» выходного сигнала УФ при номинальном сигнале детектора 1MIP (~100 фКл) и емкости детектора ~100 пФ	30
Коэффициент усиления по напряжению УФ	5
Дианазон регулировки порога компаратора, мВ	0÷100
Дианазон регулировки длительности выходного импульса, нс	30÷80
Дианазон регулировки выходного тока, мкЛ	20÷500
Время нарастания выходного сигнала, 0,1÷0,9, нс (Порог 25 мВ, сигнал 50 мВ, сопротивление нагрузки 100 Ом)	~3
Задержка распространения выходного сигнала, нс (Порог 25 мВ, сигнал 50 мВ, сопротивление нагрузки 100 Ом)	<8

Основные параметры БИС «КАТОД-3»

Электроника анодного считывания функционально во многом схожа с электроникой катодного считывания, однако здесь делается акцент не на амплитудные, а на временные измерения. Входы 8-канальной БИС анодного считывания подключены к группам анодных проволочек (от 10 до 30 в каждой). Каждый канал БИС содержит ЗЧУ, усилитель-формирователь со временем пика выходного сигнала ~30 нс и дискриминатор. Логические сигналы с выхода БИС используются для временной привязки сегмента трека частицы.

2. 2. АНОДНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

На протяжении ряда лет специалистами НЦ ФЧВЭ был разработан и испытан на прототипах P0, P4 ряд 8-канальных БИС, имеющих сходный состав и параметры. Для серийного производства и поставок готовится БИС «Анод», блок-схема которой представлена на рис. 2.2.1. БИС имеет зарядочувствительный предусилитель, *CR*³-*RC*³ усилитель-формирователь со временем формирования ~25 нс, восстановитель базовой линии и дискриминатор. При превышении порога на ~10 мВ БИС вырабатывает прямоугольный импульс с длительностью ~25 нс. БИС имеет парафазные выходы типа *LVDS*. Основные параметры приведены в табл. 2.2.1.

По результатам испытаний было установлено, что БИС «Анод» сохраняет работоспособность при средней загрузке по входу до $12 \cdot 10^6$ с⁻¹, что соответствует техническим требованиям. Осциллограммы сигналов, полученных при загрузках детектора, близких к предельным, показаны на рис. 2.2.2. Нижний луч соответствует выходу УФ, верхний — выходному сигналу дискриминатора. Как видно из рисунков, при загрузках ~10МГц, на выходе CR^N - RC^M УФ наблюдается значительное смещение базовой линии (наложение импульсов), что существенно снижает время разрешения двух импульсов. Применение активного восстановителя базовой линии

41. Зак. 2458.



Рис. 2.2.1. Блок-схема 8-канальной БИС усилителей формирователей «АНОД-2» анодного считывания КСК МЕ1

позволяет сохранять чувствительность дискриминатора на заданном уровне при изменении входных загрузок в широких пределах.

В ходе испытаний различных прототипов ME1/1, оснащенных электроникой считывания на базе разработанных БИС, были получены параметры, близкие к требуемым [39].



Рис. 2.2.2. Сигнал на выходе БИС «АНОД». Прототии Р0 КСК МЕ1/1 (Дубна, 1999). Загрузка по входу ~10 МГц/канал. Порог ~8 фКл. К_Q~10 мВ/фКл

На рис. 2.2.3 приведена зависимость эффективности восстановления трека по амплитудному и «быстрому» катодным каналам от загрузки детектора. Данные получены на мюонном пучке (H2, ЦЕРН, 1998 г.). В составе накамерной электроники использовались БИС «КАТОД-1» и «КАТОД-3». Как видно из рисунков, эффективность регистрации по обоим каналам близка к 100 % при загрузках, превышающих ожидаемые. Пространственное разрешение по амплитудному каналу остается меньшим 100 мкм при загрузках по входу до 500 кГц / канал.



Основные параметры БИС «Анод»

Эквивалентный входной шумовой заряд, г.m.s., е при емкости детектора ~100 пФ	
Коэффициент преобразования, мВ/фКл	
Время «пика» выходного сигнала при номинальном сигнале детектора 1МПР (~100 фКл) и смкости детектора ~100 пФ	
Максимальная загрузка по входу, МГц	
Время восстановления, мкс, при 250 пКл перегрузке	
Задержка распространения, нс	
Диапазон регулировки порога дискриминатора, фКл	



Рис. 2.2.3. Зависимость эффективности восстановления трека по амплитудному и «быстрому» катодному каналам от загрузки детектора (верх). Зависимость пространственного разрешения амплитудного канала от загрузки детектора (низ). (ЦЕРН, 1998 г. БИС «КАТОД-1 и 3»)

2. 3. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ АНАЛОГОВЫЙ БАЗОВЫЙ МАТРИЧНЫЙ КРИСТАЛЛ (БМК), РАЗРАБОТАННЫЙ ПО БИПОЛЯРНО-ПОЛЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИС ЯДЕРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Основная причина, сдерживающая широкое применение специализированных аналоговых БИС, – значительные временные и материальные затраты на их разработку. Опыт разработки аналоговых БИС НЦ ФЧВЭ совместно с НПО «Интеграл» показывает, что цикл проектирования от согласования технического задания до получения годных образцов составляет 9–11 месяцев, а суммарные затраты превышают 20 тыс. долл. США.

Такие условия определяются рядом объективных факторов: продолжительностью технологических операций, необходимостью обслуживания технологического оборудования, требованиями к экономии электроэнергии, стоимостью покупных материалов, – и делают разработку аналоговых БИС экономически целесообразной только при большом объеме выпуска изделий.

К сожалению, специфическая особенность электронного рынка СНГ – мелкосерийное производство радиоэлектронной аппаратуры – приводит к потере большого количества потребителей, не имеющих достаточно средств на проектирование и серийное изготовление специализированных аналоговых БИС.

Одним из способов решения этой проблемы является создание базовых матричных кристаллов, при котором на пластине формируется полный набор активных и пассивных элементов, а разработка специализированных БИС заключается в схемотехническом синтезе и оптимизации, а также проектировании только системы межсоединений. Применение БМК не позволяет получить предельно сложные ИС с высоким уровнем параметров, но допустимо для большинства ИС невысокой степени интеграции. Стоимость и продолжительность разработки в случае применения БМК уменьшается в 2–3 раза.

Базовые матричные кристаллы широко используются для разработки специализпрованных аналоговых ИС, так как обеспечивают значительно меньшие время и затраты на разработку и производство при малой партии выпускаемых ИС. Предприятия-изготовители полупроводниковых приборов имеют различные БМК, рассчитанные на получение наиболее распространенных аналоговых ИС. Однако ориентация на создание универсального БМК, пригодного для получения всевозможных аналоговых ИС, приводит к тому, что традиционные БМК имеют большую «избыточность» элементов. Указанный недостаток может быть устранен при разработке специализированных БМК, предназначенных для производства узкого класса интегральных схем, и применении универсальных полупроводниковых структур, позволяющих путем разных межсоединений получать различные полупроводниковые приборы. Такой специализированный БМК был разработан в НЦ ФЧВЭ (для проектирования многоканальных ИС ядерной электроники на основе анализа наиболее распространенных схемотехнических решений импульсных ИС и конструкций широкополосных аналоговых БМК).

БМК включает 4 идентичных канала, каждый из которых состоит из двух макрофрагментов. По периферии БМК размещены сложно-функциональные контактные площадки (54 шт.), которые либо выполняют функции контактных площадок ИС, либо используются как головные малошумящие транзисторы для предусилителей. Каждый макрофрагмент имеет один изолированный карман, в котором размещены резисторы номиналом от 550 Ом до 12,7 кОм, выполненные на слое *p*-базы, и номиналом 35 кОм, 44 кОм, выполненные на слое *p*-канала полевого транзистора. Особенностью последних является высокий разброс параметров (до ±25 %) и сильный температурный уход, поэтому их применение в схемах ограничено. Низкоомные резисторы имеют только один номинал 95 Ом и выполнены на слое *n*+ глубокого коллектора. Помимо резисторов макрофрагмент содержит малосигнальные *n*-*p*-*n*-транзисторы генераторов стабильного тока, МОПконденсаторы емкостью 0,9 пФ и полупроводниковые структуры следующих типов:

- Функционально-интегрированный элемент, представляющий собой каскадное включение *p*-*n*-*p* и *p*-JFET транзисторов, который можно использовать как *p*-*n*-*p*-транзистор, *p*-JFET транзистор или каскадное включение *p*-*n*-*p*-транзистора и *p*-JFET.
- Два *n-p-n*-транзистора с объединенными коллекторами (ячейка Джильберта). Ячейку Джильберта удобно использовать в дифференциальных каскадах с перекрестными коллекторными связями, а также как двухэмиттерный или умощненный транзистор. Каждый из транзисторов ячейки Джильберта можно применить в качестве стабилитрона.

• Четырехслойная полупроводниковая структура, позволяющая за счет различного выполнения межсоединений областей получить двухэмиттерный *n-p-n-* или *p-n-p*-транзистор. Данный элемент расположен с одной стороны макрофрагмента и предназначен в основном для реализации токозадающих блоков смещения.

Макрофрагмент окружен экранирующим контактом, позволяющим устранить паразитное взаимодействие через подложку разных блоков и соседних каналов. Размер кристалла БМК составляет 2,7×3,6 мм, на одной полупроводниковой пластине диаметром 100 мм находится около 650 кристаллов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конечная цель исследований объектов микромира – выяснение структуры вещества и формулировка законов, управляющих их поведением. Обнаружение новых частиц и сверхтонких эффектов при их взаимодействии требует использования современных мощных ускорителей с высокоточными радиационностойкими системами детектирования. Для создания подобных ускорителей и исследования процессов взаимодействия частиц с их использованием, в свою очередь, необходимы новые технологические разработки в области микроэлектроники и детектирования, а также теоретическое объяснение и предсказание явлений взаимодействия частиц.

Исследования и разработки, представленные в данной статье, востребованы при проведении ряда престижных международных экспериментов, что свидетельствует о высоком уровне предложенных теоретических, программных, конструкторских и технологических решений поставленных задач.

Вместе с тем стремительное развитие этой авангардной области физики и техники, строительство и ввод в строй новых ускорителей и экспериментальных установок требует дальнейших усилий по поддержанию и развитию достигнутого научного, технологического и образовательного уровня.

АИТЕРАТУРА

1. CMS. Technical Design Report. CERN/LHCC 94-38.

2. CMS. The Hadron Calorimeter Project. Technical Design Report. CERN/LHCC, 97-3.

3. HE Engineering and Safety Note. CMS Document 1999-034.

4. ATLAS Collaboration, Technical Proposal, CERN/LHCC/94-43, December 1994.

5. Артыков А.М., Будагов Ю.А., Шумейко Н.М. и др. // Сообщения ОИЯИ. Е1-99-79. Дубна, 1999.

6. Shumeiko N., Soroko A., Starovoitov P. // Actual Problems of Particle Physics: proc. Intern. School-Seminar, Prepr. JINR, E1,2-2000-208. Dubna, 2000. V. II. p. 201. Submitt. to J. of Phys.

7. Goepert-Mayer M. // Phys.Rev.1935. V. 48. P. 512.

42. Зак. 2458.