03,15

Мегаприборы кремниевой микроэлектроники

© В.К. Еремин, Е.М. Вербицкая, Н.Н. Фадеева

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: elena.verbitskaya@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 10 октября 2024 г.
В окончательной редакции 17 ноября 2024 г.
Принята к публикации 18 ноября 2024 г.

Новые мегаприборы — такие, как детекторы элементарных частиц для экспериментов на Большом адронном коллайдере, космические гамма-телескопы и детекторы частиц темной материи и нейтрино, в которых масштабы кремниевой части устройств выходят за пределы привычного понимания „полупроводниковый прибор“ — описываются в терминах физики полупроводников, что позволит оценить специфические проблемы их реализации и перспективы развития благодаря прямому воздействию фундаментальной науки.

Ключевые слова: кремниевый p^+-n-n^+-сенсор, детектор событий, Большой адронный коллайдер, гамма-астрофизика, нейтрино.

DOI: 10.61011/FTT.2025.01.59761.1-25

1. Введение

Вызовы фундаментальной науки оказывают прямое воздействие на границы области, в которой полупроводниковые приборы и их технология уверенно занимают лидирующее положение. Эта устойчивая тенденция продолжилась и в последние десятилетия, когда планы фундаментальной физики высоких энергий стали последовательно реализовываться вместе с развитием ее инструментальной базы. Прогресс фундаментальных исследований в физике высоких энергий (ФВЭ) и ядерной физике является ярким примером влияния науки на развитие новых технологий. Приборное оснащение экспериментов по изучению атомного ядра, Вселенной и элементарных частиц в крупнейших международных научных центрах потребовало инструментов, в которых изменялся как материал, чувствительный к излучениям, так и принципы их работы. Эволюция материала сенсоров излучений описывается последовательностью: газ — жидкость — твердое тело, в том числе и полупроводники. Принципы построения экспериментов менялись в зависимости от задач, начиная с измерения характеристик отдельной частицы (детекторы частиц) до регистрации сложных событий в Микромире (детекторы событий). Новый масштаб характерных для них энергий потребовал соответствующего объема чувствительного материала и детальности информации о геометрии и кинетике протекания процесса (т.е. 4D-информации). Соответственно существовавшую ранее инструментальную базу, основанную на газовых и сцинтилляционных детекторах, требовалось дополнить детекторами нового поколения, обладающими компактностью, временным разрешением до десятков ps и координатным разрешением в единицы μm. Решением задачи явилось широкомасштабное использование кремния (Si) как материала отдельных сенсоров для детекторов, представляющих собой в настоящее время комплексные регистрирующие устройства. В них именно кремний как твердое тело обеспечивает необходимую вероятность взаимодействия частиц и квантов с чувствительным объемом сенсора и уже используется как полупроводник в широком спектре приборов гражданского и промышленного применения, для производства которых существует мощная технологическая база. Последнее практически открыло новые экспериментальные возможности в ФВЭ, что стимулировало развитие кремниевых мегадетекторов событий, в создании которых участвовал и участвует ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Несомненно, крупнейшими мегадетекторами являются вершинные кремниевые детекторы экспериментов „A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)“ и „Compact Muon Solenoid (CMS)“ на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРНе [1]. Планы на будущее включают широкомасштабное использование кремния для создания сенсоров в гамма-телескопах и детекторах слабо взаимодействующих частиц, к которым относятся частицы, ответственные за существование темной материи — т.н. weakly interactive massive particles (WIMPs) и нейтрино. Эти примеры иллюстрируют новые возможности, открывающиеся для ФВЭ, астрофизики и ядерной физики, основанные на использовании технологий кремниевой микроэлектроники. Отметим, что ниже термин „детектор“ определяет полнофункциональные устройства, к которым относятся детекторы частиц и детекторы событий, тогда как сенсоры или чувствительные элементы являются составной частью последних.

2. Историческая справка

Полупроводниковые детекторы ядерных излучений были созданы в 1960-х гг., и до настоящего времени

являются востребованным типом приборов, успешно решающим задачи ядерной науки и техники. Физика их функционирования описывает все процессы, сопутствующие регистрации частицы, начиная от ее взаимодействия с кремнием, последующий дрейф неравновесных носителей заряда (ННЗ), образованного частицей в чувствительном объеме, и формирование электрического сигнала на контактах детектора как отклика на зарегистрированную частицу посредством электростатической индукции. Перечисленные процессы должны обеспечить пропорциональность между энергией зарегистрированной частицы и зарядом, индуцированным на контакты детектора, обеспечить низкий уровень шума и долговременную стабильность этих характеристик. До 1980-х гг. разработки кремниевых детекторов основывались на структурах типа металл–полупроводник–металл, показавших перспективность полупроводниковых детекторов и одновременно выявивших их серьезные недостатки — величины темнового тока и соответствующего отношения сигнал/шум, превышающие оценку, основанную на характеристиках кремния. Низкая воспроизводимость технологического процесса ограничивала массовое производство идентичных детекторов и, несмотря на их несомненные достоинства по сравнению газовыми и сцинтилляционными детекторами, сужала область решаемых задач до спектрометрии отдельных частиц.

В то же время важность регистрации треков частиц и событий, т. е. процессов с участием нескольких частиц, возникла уже в начале XX века, история чего описана в [2]. Созданная в 1912 г. т. н. „туманная камера“ (C.T.R. Wilson, Нобелевская премия по физике 1927 г.), в которой частицы оставляли следы из капель перегретого пара, сквозь который они перемещались, позволила визуализировать треки частиц и само событие. Существенным шагом в развитии этого принципа, состоящего в изменении агрегатного состояния чувствительного вещества на пути движения частицы, явилась замена газовой рабочей среды на жидкость („пузырьковая камера“ — D. Glaser, 1957 г., Нобелевская премия по физике 1960 г.), которая, начиная с 1953 г., оставалась основным инструментом ФВЭ на протяжении более 20 лет. В последних разработках объем пузырьковых камер достиг 3.7 m^3 (Большая европейская пузырьковая камера в ЦЕРНе, рабочая среда — жидкие водород либо другие газы с более тяжелыми молекулами, что увеличило тормозную способность детектирующей среды).

Наряду с несомненными достоинствами, пузырьковые камеры имели серьезный недостаток: они были медленными регистраторами событий и не позволяли получать информацию о кинетике процессов. Поэтому появление позиционно-чувствительных Si-сенсоров, обладающих высоким координатным и временным разрешением, стало базой следующего поколения детекторов событий и существенно развило возможности экспериментальной ФВЭ. Их разработка напрямую связана с использованием процессов планарной технологии для создания детекторных p^+-i-n^+-Si-структур большой площади и техники ионной имплантации для легирования тонких контактных слоев [3]. В результате были стабилизированы характеристики сенсоров, уменьшены более чем на порядок темновые токи и обеспечена возможность прецизионной сегментации контактных областей. Важным явилось и то, что высокая контролируемость технологических процессов позволила снизить разброс характеристик сенсоров, что актуально для создания сложных детектирующих структур.

3. Микроструктуры кремниевых планарных сенсоров

Формирование сигнала в кремниевых сенсорах на основе p^+-n- либо n^+-p-перехода (где p^+ и n^+ — сильно легированные контактные слои) связано с переносом неравновесных носителей заряда (ННЗ), генерируемых падающими на него частицами, и определяется согласно теореме Шокли–Рамо величиной тока i при движении заряда q в точке с координатой x в момент времени t [4]:

$$i(x) = qF_w(x)\mu(F, T)F(x),$$

где μ — подвижность носителей, зависящая от напряженности электрического поля F и температуры T, x — координата, нормальная к поверхности образца, и F_w — напряженность весового электрического поля, имеющая размерность cm^{-1}. F_w рассчитывается как напряженность в точке нахождения заряда при приложении к регистрирующему контакту напряжения $V = 1$ V и заземлении остальных контактов. Одномерное приближение дает адекватное описание тока для несегментированного сенсора с двумя плоскопараллельными контактами при их линейных размерах, превосходящих толщину структуры d, и движении заряда в направлении, перпендикулярном контактам; в этом случае $F_w = 1/d$. Для сегментированных сенсоров F_w является двумерной или трехмерной функцией, зависящей от геометрии контактов и траектории движения заряда [5], а вычисление тока осуществляется моделированием с использованием современных программных пакетов. Токовый сигнал интегрируется зарядочувствительным усилителем и поступает на вход считывающей электроники.

Типы структур планарных Si-сенсоров, их характеристики и использование для регистрации различных излучений подробно описаны в монографиях [5–9]. Классификация планарных структур включает несегментированные (пэдовые, от pad) сенсоры различной площади и сегментированные — полосковые (strip) и пиксельные (pixel), с различной топологией сегментации p^+-n- либо n^+-p-перехода для обеспечения их позиционной чувствительности. Полосковые структуры выполняются с сегментацией одной стороны — single-sided strip detectors (SSSDs) либо обеих сторон — double-sided strip detectors (DSSDs); последние обеспечивают 2D-чувствительность. Дальнейшее улучшение позиционной

Характеристики и требования, предъявляемые к Si-сенсорам

Характеристика	Требование	Значение
Чувствительная площадь	Создание детектирующих поверхностей большой площади	До 100 cm^2
Толщина чувствительной области	Полное или достаточное поглощение энергии регистрируемой частицы для измерения ее величины	$10^{-3}-10^{-1}$ cm
Темновой ток, генерируемый в чувствительной области	Регистрация слабопоглощаемых излучений либо частиц, имеющих малую энергию	$10^{-10}-10^{-9}$ A/cm^2
Эффективность собирания ННЗ	Точность определения энергии, выделенной частицей в чувствительном объеме	99.9%
Временно́е разрешение	Временна́я характеризация исследуемого процесса	$< 10^{-10}-10^{-8}$ s
Рабочее напряжение	Полное обеднение чувствительного объема, эффективное собирание ННЗ, максимально короткий сигнал, высокое временно́е разрешение	100–1000 V
Рабочая температура	Повышение чувствительности и временно́го разрешения, снижение шума и энерговыделения	$-(10-20)^\circ$C (ЦЕРН-ATLAS)
Долговременная стабильность характеристик без учета радиационных воздействий	Длительные эксперименты без возможности замены детекторов в рабочий период	Несколько лет

чувствительности достигается в пиксельных сенсорах при сегментации стрипов.

Основные требования, предъявляемые к современным кремниевым сенсорам, приведены в таблице.

Совокупность требований приводит к необходимости введения в конструкцию кремниевого сенсора нескольких специальных элементов, кратко описанных ниже. Одним из важнейших требований является предельно малая величина темнового тока при высоком рабочем напряжении V, необходимом для достижения большой толщины чувствительной области и эффективного и быстрого собирания ННЗ, рождаемых зарегистрированной частицей. Наиболее критичными для выполнения этих условий являются сенсоры, подвергаемые облучению в экспериментах на БАК, поскольку при рабочих напряжениях в сотни вольт в их структуре могут возникать локальные области с высокой напряженностью электрического поля.

Эффективным приемом снижения влияния границ чипа кремниевого прибора на его характеристики является создание периферийного делителя потенциала. Такие структуры, рассмотренные в [10,11], широко применяются в конструкциях приборов силовой импульсной полупроводниковой электроники для предотвращения лавинного пробоя мелких электронно-дырочных переходов и кремниевых сенсоров ядерных излучений, предназначенных для использования при высоких напряжениях. Для сенсоров, изготовленных из высокоомного n-Si (p^+-n-n^+-структура), делитель формируется серией замкнутых „плавающих“ p^+-колец, разделенных изолирующими межкольцевыми промежутками, поверхность которых пассивирована пленкой SiO_2 (рис. 1). Это стабилизирует вольт-амперную характеристику сенсоров,

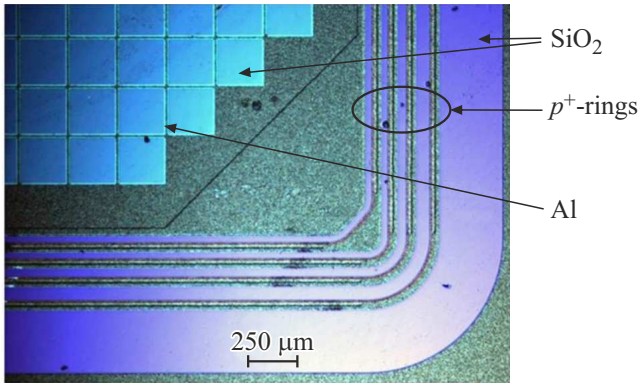


Рис. 1. Фотография фрагмента поверхности кремниевого сенсора с системой колец периферийного делителя потенциала.

что делает возможным их работу в режиме полной автономии без возможности замены при длительности экспериментов, измеряемой годами, характерной для аппаратуры космического применения и экспериментов в ФВЭ. В перечисленных выше областях создание таких структур стало возможным благодаря успехам микроэлектронных технологий.

Кольца работают как система изолированных p^+-n-переходов, потенциал которых определяется условием протекания в межкольцевых промежутках тока, генерируемого в области обеднения кольцевых переходов [12]. Результаты измерений и численного расчета потенциала p^+-колец в зависимости от напряжения V_{pad}, приложенного к центральному p^+-контакту (т. н. pad-контакт), приведены на рис. 2. Распределения потенциалов по кольцам делителя и токов, протекающих между ними,

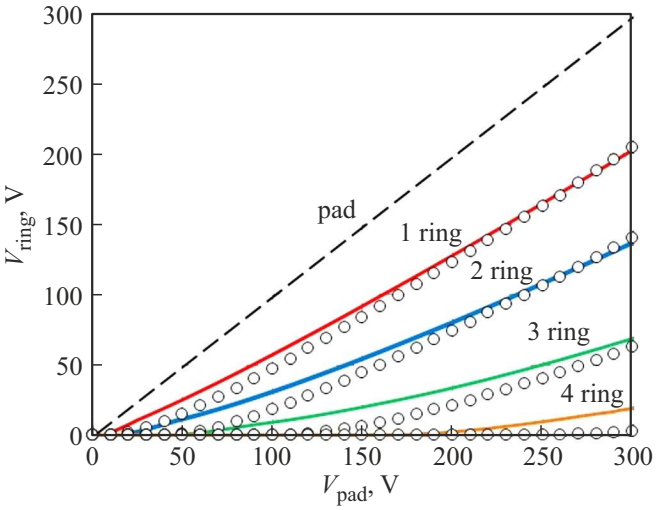


Рис. 2. Распределение потенциала на кольцевых p^+-n-переходах в детекторе на основе n-кремния с удельным сопротивлением 5 kΩ·cm: символы — эксперимент, сплошные линии — расчет, пунктир — потенциал на центральном (pad) p^+-контакте.

самосогласованы и устанавливаются автоматически, что обеспечивает стабильность работы сенсора. Видно, что кольцевой делитель работает во всем диапазоне напряжений, приложенных к центральному p^+-контакту, и потенциал в кольцевой структуре плавно меняется между чувствительной областью и периферией сенсора, не создавая областей с высокой напряженностью электрического поля. Рис. 2, а также 3 и 4 (ниже) представляют результаты авторов.

В экспериментах на БАК воздействие излучения на p^+-n-n^+-сенсоры приводит к накоплению радиационных дефектов, концентрация которых максимальна для дефектов акцепторного типа. При некоторой критической дозе это приводит к превращению высокоомного n-Si в высокоомный перекомпенсированный глубокими акцепторами p-Si. В рабочем режиме сенсора, т. е. при обратном напряжении и протекании темнового генерационного тока в обедненной области происходит перезарядка глубоких акцепторов и доноров, результат которой определяется их положением в запрещенной зоне кремния и сечением захвата носителей заряда [7]. Соответственно, при дозах облучения выше критической возникает инверсия знака пространственного заряда, который становится отрицательным, и максимум напряженности электрического поля перемещается к n^+-контакту, что повышает эффективность собирания заряда электронов на сегменты n^+-контакта и улучшает быстродействие сенсоров.

Поэтому современные позиционно-чувствительные сенсоры, используемые в экспериментах в ЦЕРНе, изготавливаются как n^+-p-p^+-структуры на основе высокоомного p-Si и сегментации n^+-контакта, находящегося в области высокой напряженности электрического поля при любой дозе облучения [13]. В таких сенсорах независимо от дозы сигнал формируется на n^+-контакте, что делает их функционирование более предсказуемым, исключая в сценарии точку инверсии знака пространственного заряда. Однако в этом случае межполосковая изоляция и изоляция колец делителя потенциала требуют прерывания проводимости слоя электронов, аккумулированных в p-Si под интерфейсом $Si|SiO_2$, возникающего под воздействием встроенного положительного заряда в окисле ($\sim 10^9-10^{10}\,cm^{-2}$). Эффективным способом прерывания связи между n^+-сегментами сенсора является введение в межсегментные промежутки разделительных p^+-областей — т. н. p-spray либо p-stop, в которых концентрация акцепторов значительно превышает концентрацию аккумулированных электронов [14].

На рис. 3, *a* приведено распределение напряженности электрического поля F в межполосковом промежутке в сенсоре на основе p-Si при напряжении $V_{pad} = 150$ V. Ширина p^+-области и расстояния между n^+-полосками

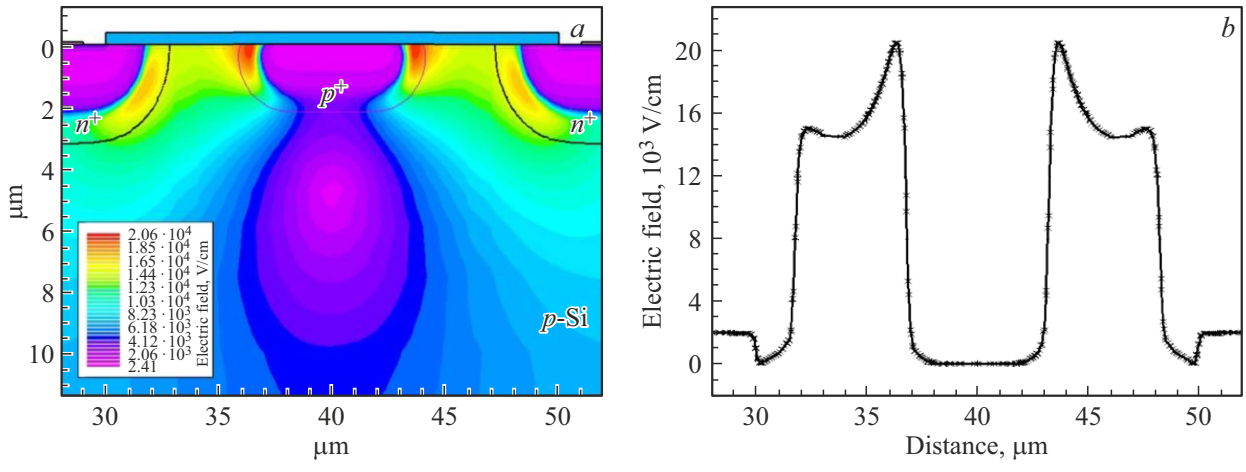


Рис. 3. *a* — 2D-распределение напряженности электрического поля в межполосковом промежутке n^+-p-p^+-сенсора и *b* — распределение напряженности электрического поля на глубине 0.1 μm от поверхности. $V_{pad} = 150$ V.

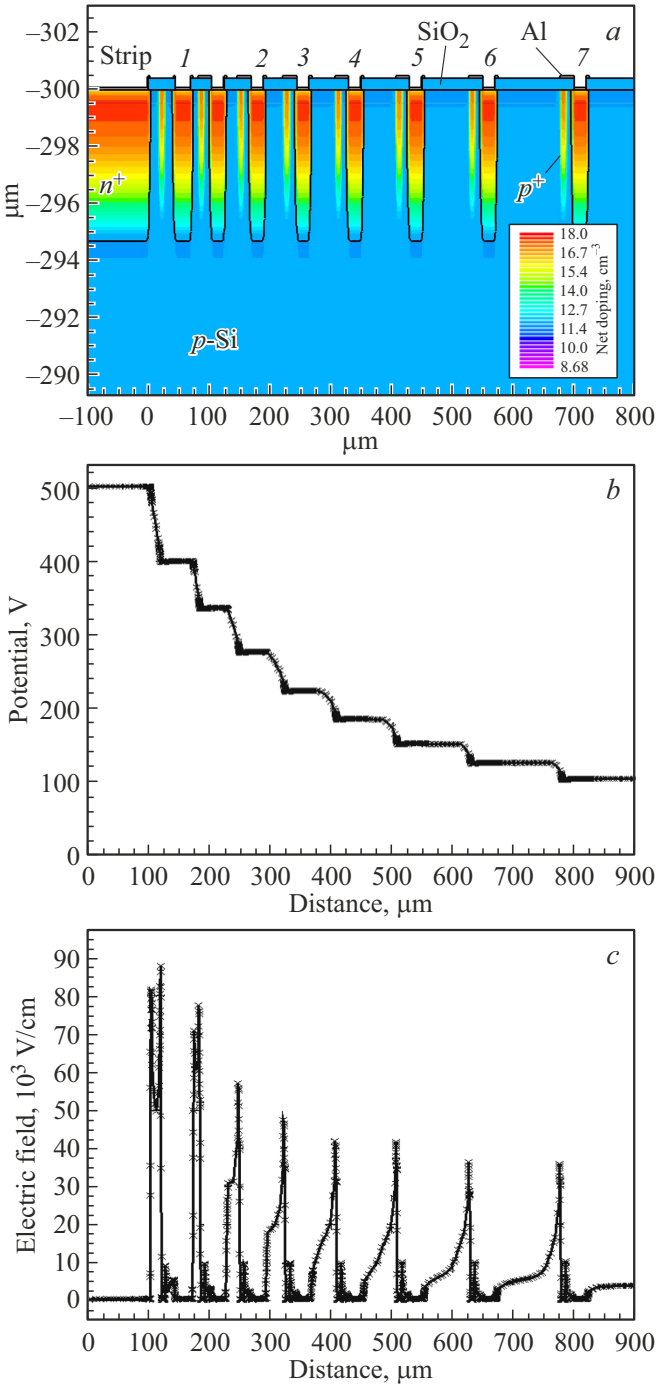


Рис. 4. Распределение a — концентрации легирующей примеси, b — потенциала и c — напряженности электрического поля в n^+-p-p^+-сенсоре с делителем потенциала. $V_{pad} = 500$ V.

составляют 10 и 5μm соответственно. Видно, что под p^+-слоем образуется область с электрическим полем, разрушающим слой аккумулированных электронов, что препятствует протеканию тока между n^+-полосками. При этом в распределении напряженности электрического поля (рис. 3, b) на границе p^+-слоя возникают максимумы напряженности в 20 kV/cm.

Аналогичный принцип изоляции используется и в кольцевом делителе потенциала сенсоров на основе p-Si. На рис. 4, a показано распределение концентрации легирующей примеси в оптимальной по топологии n^+-p-p^+-структуре с делителем потенциала, состоящим из восьми n^+-колец с включением между ними изолирующих p^+-областей (последние расположены под слоями SiO_2, обозначенными синим) при приложении напряжения $V_{pad} = 500$ V.

Из распределений потенциала между кольцами и напряженности электрического поля (рис. 4, b и c) видно, что потенциал ступенчато уменьшается от значения 500 V на элементе чувствительной площади до 100 V на последнем n^+-кольце. Распределение F на границах между изолирующими p^+-областями под окислом и n^+-кольцами является более сложным, чем в межполосковом промежутке (рис. 3), и его структура и положение максимума поля чувствительны к расположению границ p^+-элементов и металлизации.

Пример реализации рассмотренных выше элементов в мини-прототипе n^+-p-p^+-сенсора с шагом полосков (strip pitch) 65 μm, разработанного в ФТИ для эксперимента ТОТЕМ на БАК, приведен на рис. 5.

Следует отметить, что специфичным для позиционно-чувствительных сенсоров является их сверхбольшой размер, достигающий 10×10 cm^2, по сравнению с чипами цифровой электроники, площадь которых в сотни раз меньше. В этом случае контуры таких элементов, как полоски и кольца делителей потенциала, могут иметь длину до 0.4 m и отстоять друг от друга на расстояние

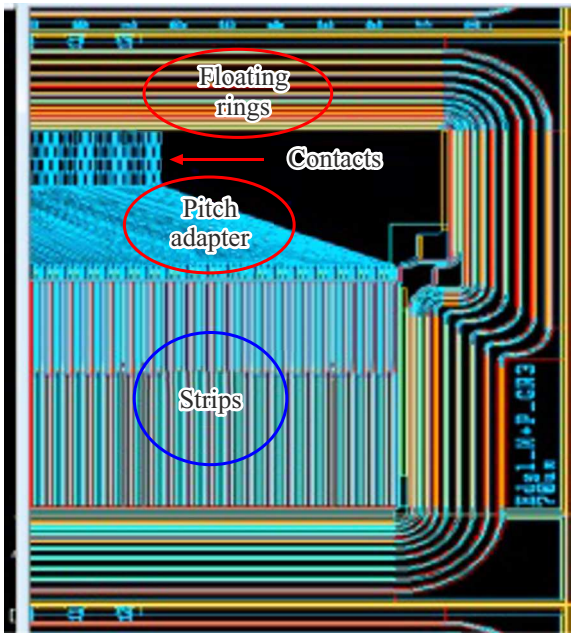


Рис. 5. Топология фрагмента разработанного в ФТИ мини-прототипа n^+-p-p^+-сенсора с шагом полосков 65 μm, кольцевым делителем потенциала, состоящего из n^+-колец, адаптером шага (pitch adapter) и контактными площадками.

в единицы μm, что является нестандартным требованием к планарной технологии, выделяющим в ней детекторы ядерных излучений как уникальный класс приборов.

4. Современные и планируемые мегадетекторы на основе кремниевых сенсоров

Примеры критических элементов современных кремниевых сенсоров показали значимость микроструктур и их конструкции, и необходимость использования планарной технологии кремниевой микроэлектроники в развитии этого типа приборов для экспериментальной ФВЭ. Достигнутые и планируемые результаты, связанные с созданием Si-детекторов событий в крупнейших экспериментах, представлены ниже на примерах детектора эксперимента ATLAS в ЦЕРНе, а также планов по созданию космических гамма-телескопов. Примером проекта, требующего кремниевого мегаприбора большой массы, является проект по исследованию нейтрино (разд. 4.3). Его создание не связано с применением микроэлектронной технологии, однако сам детектор можно отнести к уникальным кремниевым мегаприборам для регистрации ядерных излучений, что мотивировало его краткое описание в настоящей работе.

4.1. Кремниевые мегадетекторы в ФВЭ: внутренний трековый детектор эксперимента ATLAS

Инструментальная база экспериментов на БАК является наиболее ярким примером создания мегадетекторов на основе кремния. Программа модернизации БАК предусматривает его поэтапное превращение в коллайдер со сверхвысокой светимостью — high-luminosity large hadron collider (HL-LHC) со следующими характеристиками пучка протонов: энергия протонов 13 TeV, возрастание светимости от $\sim 10^{34}$ до $7.5 \cdot 10^{35}\,\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ и максимальной дозы облучения от $5 \cdot 10^{14}$ до $2 \cdot 10^{16}\,\mathrm{n_{eq}/cm^2}$. Спецификой работы кремниевых сенсоров в длительных экспериментах в ЦЕРНе является их деградация под воздействием регистрируемого и фонового излучений; поэтому многие их них постоянно модернизируются в 2-х аспектах: использование p-Si как оптимального материала для сенсоров и создание их новых конструкций.

ATLAS относится к крупнейшим международным многоцелевым экспериментам, проводимым в ЦЕРНе и предназначенным для исследования протон-протонных столкновений и поиска сверхтяжелых элементарных частиц, таких как бозон Хиггса и суперсимметричных партнеров частиц Стандартной модели [15]. В целом, многослойный детектор ATLAS представляет собой цилиндр с длиной и диаметром 46 и 25 m соответственно. В непосредственной близости от точки столкновения протонов располагается внутренний полупроводниковый

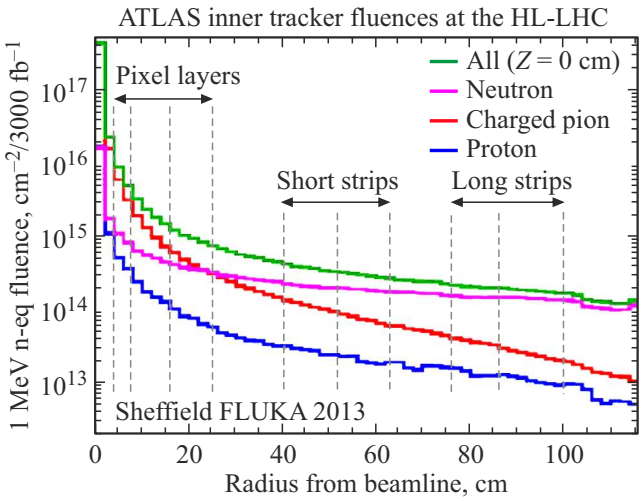


Рис. 6. Ожидаемые дозы облучения кремниевых сенсоров во внутреннем трекере эксперимента ATLAS на HL-LHC [16].

трекер (inner semiconductor tracker), имеющий длину 5.6 m и построенный на основе Si-сенсоров с активной площадью 61 m^2 на начальном этапе эксперимента. Задачами трекера являются измерения направления движения, импульса и заряда электрически активных частиц, образующихся в каждом столкновении протонов встречных пучков. Характеристики и конструкция кремниевого внутреннего трекера уже на момент его запуска в 2007 г. были уникальными как по техническим характеристикам, включая и электронику, так и по возможностям регистрации частиц и явились новым шагом, сделанным благодаря достижениям кремниевой микроэлектроники.

В настоящее время внутренний трекер ATLAS включает слои пиксельных сенсоров, ближайшие к точке взаимодействия протонов (рис. 6, [16]). Сенсоры обладают 2D-чувствительностью и обеспечивают пространственное разрешение в 10 μm. Следующими по расположению являются слои сенсоров с короткими и длинными полосками, что обеспечивает точность определения траектории пролета частицы сквозь сенсор в 20 μm и в совокупности с массивом данных пиксельных сенсоров дает информацию о точке столкновения протонов с точностью в единицы μm. В HL-LHC максимальная доза облучения сенсоров должна возрасти до $2 \cdot 10^{16}\,\mathrm{n_{eq}/cm^2}$, что учитывается в планах модернизации трекера. При этом, исходя из результатов по радиационной деградации Si-детекторов, полученных коллаборацией RD50 и специалистами экспериментов на БАК, ожидать прогресса в повышении радиационной стойкости самого объемного кремния не приходится. Поэтому развитие сенсоров трекера связано с созданием их новых конструкций, реализующих топологии сенсоров, оптимальные для формирования сигналов.

В частности, были усовершенствованы дизайн и характеристики полосковых сенсоров, а также введен дополнительный внутренний слой трекера, включаю-

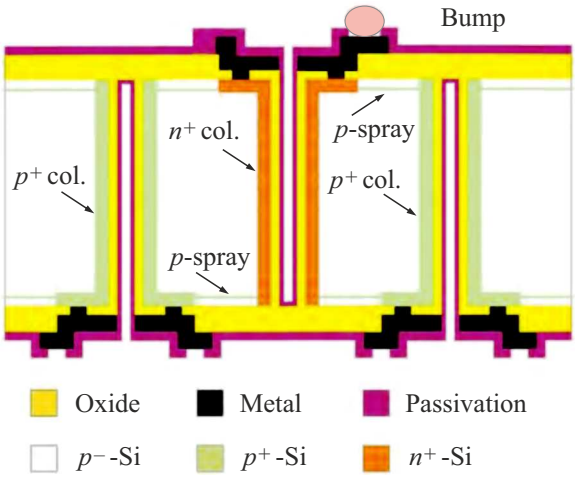


Рис. 7. Схематическое изображение пиксельного 3D-сенсора на основе p-Si [18].

щий в т. ч. сенсоры на основе вертикальной структуры $p-n$-переходов, изготовленных по 3D технологии (рис. 7) [17,18]. В показанном на рисунке n^+-p-p^+-сенсоре сильно легированные слои изготавливаются в виде колонок (n^+-col. и p^+-col.), а слой p-spray обеспечивает их электрическую изоляцию в приповерхностном слое. Планируется также использование в трекере сенсоров с малым усилением сигнала — т. н. low gain avalanche detectors (LGAD), которые позволят улучшить временное разрешение до 30–50 ps [19]. Соответственно, существенно увеличилось количество каналов электроники регистрации сигналов (до $92 \cdot 10^6$ в 2023 г.), и как результат, получено лучшее координатное разрешение при восстановления трека и временны́е разрешение при изучении кинетики движения частиц.

4.2. Мегаприборы кремниевой микроэлектроники для гамма-астрофизики

Глобальной задачей в гамма-астрофизике является определение местоположения источника гамма-излучения, для чего традиционным инструментом являлись телескопы, использующие сцинтилляционные детекторы. Требования к элементам телескопов во многом аналогичны выдвигаемым для устройств в ЦЕРНе — измерение энергии исходных либо образующихся частиц, высокие пространственное и временно́е разрешение, а также обширное поле обзора исследуемой области космического пространства. В свою очередь, радиационная стойкость используемого оборудования не является актуальной в силу малого сечения взаимодействия космических частиц с регистрирующей средой. Поэтому для задач гамма-астрофизики можно использовать кремниевые сенсоры с p^+-n-n^+-структурой, что упрощает создание элементов телескопов, основными из которых являются трекер и калориметр.

Наиболее важными процессами, происходящими при прохождении гамма-квантов через вещество, являются [6]:

• эффект Комптона — рассеяние гамма-кванта на электроне; в результате каждого акта взаимодействия кванта с электроном происходит изменение энергии кванта E_γ и направления его движения, что позволяет определить угол его падения на телескоп,

• образование пар электрон–позитрон ($e-e^+$) в электрическом поле ядра, эффективное при $E_\gamma > 10$ MeV.

Многостадийный процесс регистрации гамма-кванта по механизму комптоновского рассеяния, позволяющий определить энергию и восстановить направление его движения к телескопу, проиллюстрирован на рис. 8. В двухстадийном процессе гамма-квант, падающий на поверхность трекера под углом θ с энергией E_γ, испытывает комптоновское рассеяние на электроне в одном из сенсоров трекера, образуя при этом электрон отдачи с энергией E_1 и уменьшая свою энергию до $E_\gamma - E_1$. Рассеянный гамма-квант, продолжая движение в новом направлении, имеет вероятность повторно рассеяться на электроне в другой точке трекера, передав ему энергию E_2, и еще раз изменить энергию и направление движения.

Выражение, связывающее θ и потери энергии E_1 и E_2 в актах рассеяния, позволяет определить угол падения гамма-кванта на телескоп [6]:

$$\cos\theta = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right),$$

где $m_e c^2 = 511$ keV — энергетический эквивалент массы покоя электрона. В двухстадийном процессе E_γ измеряется как интеграл зарядов, генерируемых в слоях сенсоров трекера; в трехстадийном к этой величине добавляется энергия, измеренная калориметром, в котором гамма-квант выделяет остаток энергии.

Наиболее известным космическим гамма-телескопом являлся Imaging Compton Telescope (COMPTEL), входивший в состав Compton Gamma Ray Observatory [20]. Телескоп осуществлял исследования, основанные на эффекте Комптона, в диапазоне энергий 1–30 MeV и включал 2 слоя сцинтилляционных детекторов. Характеристики, реализованные в измерениях на телескопе в 1991–2000 гг., до сих пор остаются эталоном для сравнения с оценками параметров в телескопах, планируемых на будущее.

В настоящее время действующим телескопом, использующим Si-сенсоры, является Large Area Telescope (LAT) размером $1.8 \times 1.8 \times 0.72\,\mathrm{m}^3$ в космической обсерватории Gamma-ray Large Area Space Telescope (GLAST, ныне FGST либо FGRST), предназначенной для исследования излучения в широком диапазоне энергии 20 MeV–300 GeV [21]. В трекере телескопа происходит регистрация электронов либо $e^- - e^+$-пар, для чего используются односторонние полосковые сенсоры площадью $8.95 \times 8.95\,\mathrm{cm}^2$ с толщиной $400\,\mu$m и шагом полос-

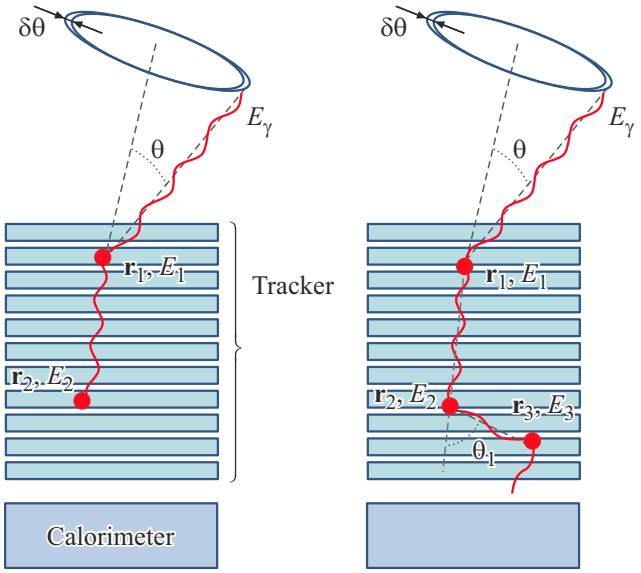


Рис. 8. Схематическое изображение комптоновского процесса регистрации гамма-кванта в гамма-телескопе: слева — двухстадийный процесс с полным поглощением энергии кванта E_γ в актах 1 и 2, справа — трехстадийный процесс с частичным поглощением энергии кванта в трекере. r_j $(j = 1, 2, 3)$ — вектор, определяющий точку, где произошло рассеяние.

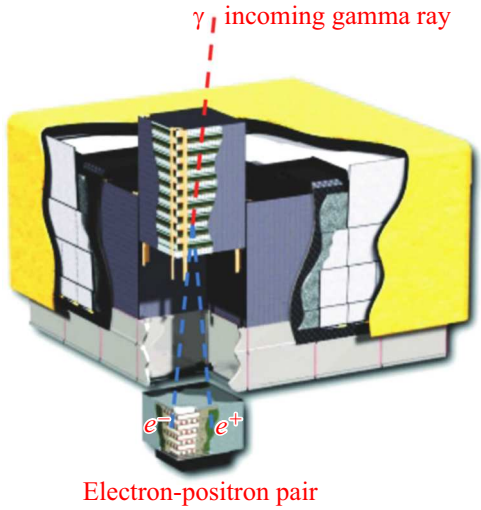


Рис. 9. Схематическое изображение гамма-телескопа LAT [21].

ков 228 μm. Сенсоры составляют 16 двухслойных модулей, каждый из которых включает вертикальный набор из 18 плоскостей SSSDs с взаимно перпендикулярными стрипами (рис. 9), что обеспечивает 2D-разрешение. SSSDs регистрируют прохождение заряженных частиц, измеряя треки образующихся $e-e^+$-пар, на основании чего определяется местонахождение источника падающих гамма-квантов.

Одним из важнейших полученных результатов явилась регистрация выброса гамма-излучения из активной галактики в сочетании с обнаружением нейтрино высокой энергии с того же направления, что и установлено нейтринным детектором IceCube; данный факт впервые показал связь между нейтрино и излучением гамма-квантов из активной галактики [22]. Продолжение миссии обсерватории FGRST было утверждено Национальным управлением США по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) в 2019 г.

В планируемых международных обсерваториях All-sky Medium Energy Gamma-ray Observatory (AMEGO) [23] и enhanced ASTROGAM (e-ASTROGAM) [24] предполагается расширить масштаб использования Si-сенсоров и использовать более совершенные конструкции, позволяющие улучшить энергетическую и позиционную чувствительности. Энергия исследуемых гамма-квантов будет составлять от 0.3 MeV до более чем 10 GeV и 0.3 MeV–3 GeV для AMEGO и e-ASTROGAM соответственно, т. е. нижний предел энергии сдвигается в актуальную для астрофизики область энергий 200–300 keV по сравнению с телескопом LAT. Оба телескопа будут содержать 3 основных узла — калориметр на основе сцинтиляционных кристаллов, кремниевый трекер в виде модульных сборок (башен) сенсоров и систему антисовпадений. Трекеры будут построены как модули, объединяющие слои DSSDs, создающие 3D-пространство, что позволяет регистрировать возникающие в нем события с привязкой к временно́й шкале. Так, в телескопе AMEGO трекер состоит из 4-х модульных сборок, каждая из которых содержит 60 слоев, включающих 4×4 DSSDs (рис. 10). Отдельный сенсор имеет форму квадрата $\sim 10 \times 10\,\mathrm{cm}^2$ толщиной 500 μm со 192 полосками на каждой стороне при общем количестве

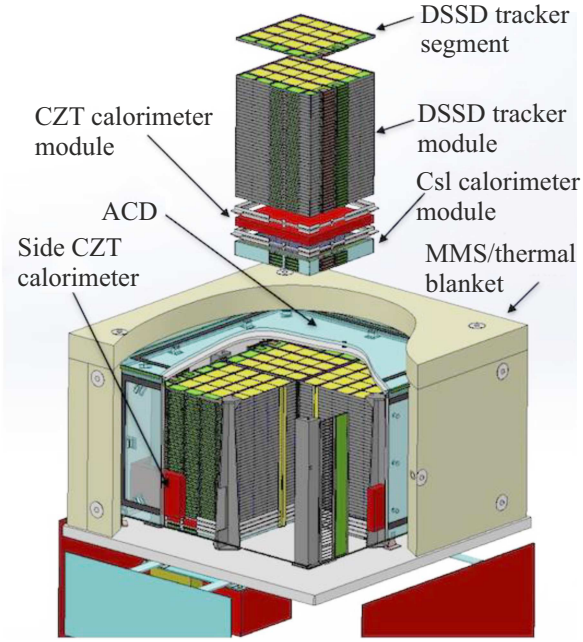


Рис. 10. Схематическое изображение регистрирующих устройств телескопа AMEGO [23].

полосок в 370000. В настоящее время проводится работа по оптимизации DSSDs с целью уменьшения темнового тока и межполосковых емкостей [25]. Ожидается, что энергетическое разрешение в диапазоне единиц MeV улучшится более чем в 20 раз по сравнению с телескопом COMPTEL.

Концепция проекта обсерватории e-ASTROGAM с общим весом 1.2 tons основана на результатах численного моделирования, дающих оценку ожидаемых характеристик, и анализе возможных проблем [24]. Планируется, что кремниевый трекер электронов и e^-–e^+-пар будет содержать 90 слоев DSSDs с площадью слоя $\sim 1\,m^2$, т. е. общая площадь кремниевых сенсоров составит $\sim 90\,m^2$ при количестве независимых каналов 860000, что даже превышает площадь Si-сенсоров во внутреннем трекере детектора ATLAS. Площадь каждого DSSD толщиной $500\,\mu m$ и шагом полосок $240\,\mu m$ составит $9.5 \times 9.5\,cm^2$. Т. о., концепции телескопов AMEGO и e-ASTROGAM основаны на богатом наследии телескопа LAT и инновационных технологиях изготовления кремниевых полосковых сенсоров, разработанных для ФВЭ.

Потенциал России, в т. ч. и ФТИ им. А.Ф. Иоффе, в области фундаментальной гамма-астрофизики и разработки детектирующего устройства на основе кремния предполагается объединить в проекте телескопа для регистрация гамма-квантов с энергиями 0.3–10 MeV. Ограничение диапазона исследований энергией в 10 MeV позволяет отказаться от калориметра и тем самым улучшить весовую характеристику телескопа (не более 350 kg). Планируется, что трекер будет включать 100 слоев кремниевых полосковых p^+–n–n^+-сенсоров площадью $\sim 10 \times 10\,cm^2$, обеспечивающих 2D-чувствительность.

Сравнение параметров структур, использованных в топологии кремниевых сенсоров, разработанных специалистами ФТИ, и параметров DSSDs, планируемых для обсерватории e-ASTROGAM, с очевидностью показывает возможность реализации требуемых характеристик Si-трекера в российском телескопе. Ожидается, что чувствительность по энергии будет в 20–30 раз лучше, чем в телескопе COMPTEL.

4.3. Проекты в области исследования темной материи и нейтрино

Природа темной материи и свойства нейтрино являются одними из актуальных вопросов современной физики. Прогресс в снижении лабораторного ограничения на магнитный момент электронного нейтрино, имеющих космическое происхождение либо испускаемых ядерными реакторами или тритиевыми источниками, показан на рис. 11. Видно, что в планируемых новых экспериментах его величина снижается вплоть до $\sim 5 \cdot 10^{-13}\,\mu_B$ (где μ_B — магнетон Бора).

Исследование рассеяния частиц темной материи с использованием кремниевых сенсоров проводится коллаборацией Cryogenic Dark Matter Search

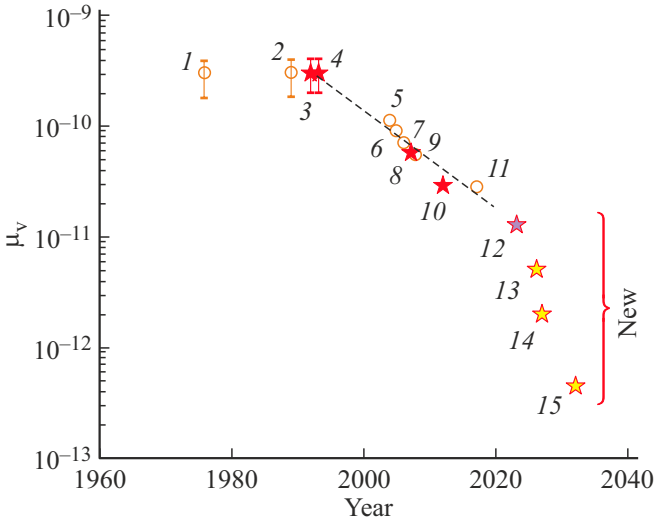


Рис. 11. Прогресс в измерении лабораторного ограничения на магнитный момент электронного нейтрино [27]. Цифрами обозначены эксперименты: *1* — Savannah River (1976); *2* — Vogel, Engel (1989); *3* — НИЦ Курчатовский институт (1992); *4* — Ровно, реактор (1993); *5* — Super-Kamiokande (2004); *6* — MUNU, реактор (2005); *7* — Texono collaboration, реактор (2006); *8* — GEMMA-I, реактор (2007); *9* — BOREXINO (2008); *10* — GEMMA-1, реактор (2012); *11* — BOREXINO, Gran Sasso (2017); *12* — GEMMA-2, реактор (2023–2024). Новые проекты: *13* — Саров, CsI-detector (2026); *14* — Саров, Si-детектор (2027); *15* — Саров, гелиевый детектор (2030–2032).

(CDMS/SuperCDMS). Первые эксперименты были выполнены на пробных образцах с массой ~ 1 g при температуре 65 mK [26], а в долгосрочные планы SuperCDMS входит создание регистрирующего устройства с общей массой 30 kg.

Новый эксперимент с использованием уникального кремниевого детектора массой 160 kg (№ 14 на рис. 11) планируется осуществить в рамках программы № 8 Национального центра физики и математики (НЦФМ) [27] и провести его с участием нескольких институтов на площадке Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (ВНИИЭФ), г. Саров. Задачей ФТИ им. А.Ф. Иоффе является разработка кремниевого детектора нейтрино с рабочей температурой в несколько десятков mK. В эксперименте планируется использовать интенсивный тритиевый источник нейтрино (антинейтрино) на основе реакции

$$^3_1\mathrm{H} \rightarrow {}^3_2\mathrm{He} + \mathrm{e}^- + \bar{\nu}_e.$$

С учетом необходимости селекции событий взаимодействия нейтрино с кремнием и исключения фоновых событий, детектор должен иметь трехмерную сегментацию и состоять из 1600 Si-сенсоров массой около 100 g каждый. Целевой характеристикой является порог чувствительности к магнитному моменту нейтрино с величиной $\sim 2.5 \cdot 10^{-12}\,\mu_B$, что на порядок лучше значения,

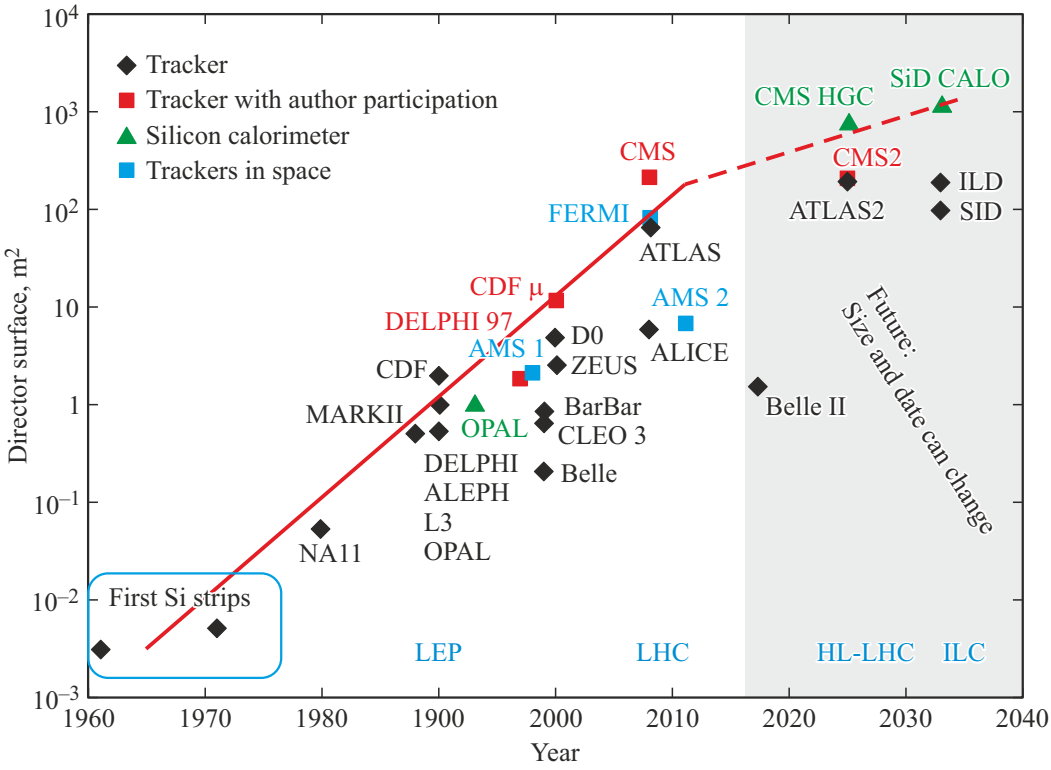


Рис. 12. Эволюция детектирующих систем в ФВЭ и астрофизике [5].

достигнутого в эксперименте GEMMA-2 с использованием сенсоров на основе сверхчистого германия.

В эксперименте планируется использовать болометрический принцип регистрации частиц, когда сигналом сенсоров является импульсное изменение его температуры за счет передачи частицей части своей энергии сенсору и генерации в нем джоулева тепла при протекании дрейфового тока ННЗ (эффект Неганова–Трофимова–Люка [28]). Для достижения максимального соотношения сигнал/шум предполагается измерять температурный сигнал от сенсора термометром типа transition edge sensor (TES) в точке максимальной крутизны температурной зависимости его сопротивления.

Следует отметить, что охлаждение кремниевого сенсора до температуры в десятки mK превращает его чувствительный объем практически в изолятор, исключая возможность образования в нем пространственного заряда за счет эмиссии электронов и дырок с мелких уровней легирующих примесей (фосфора и бора) в *n*-Si, что происходит при температуре ниже 4 K [29]. При этом примесная чистота кремния и низкая концентрация равновесных фононов обеспечат высокую подвижность носителей заряда, а отсутствие пространственного заряда в чувствительной области позволит осуществить дрейфовый перенос электронов и дырок на расстояния, измеряемые сантиметрами. Поэтому в создаваемом детекторе предусматривается возможность подачи на его сенсоры напряжения в несколько сотен вольт для получения внутреннего теплового усиления сигнала за счет выделения джоулева тепла при дрейфе неравновесных носителей, образованных нейтрино. Первые экспериментальные исследования Si-сенсоров при температуре ≤ 100 mK и приложении напряжения показали, что кремний в чувствительном объеме реально имеет свойства полупроводника, близкого к электронейтральному изолятору, но с высокими подвижностями электронов и дырок [30], что является необходимым для создания сенсоров с внутренним тепловым усилением для детектора нейтрино.

5. Заключение

Из изложенного выше очевидно, что действующими кремниевыми мегадетекторами безусловно являются внутренние трекеры в экспериментах на HL-LHC. Их развитие состоит в постоянном совершенствовании конструкций Si-сенсоров для улучшения позиционного разрешения при регистрации частиц и повышения радиационной стойкости. Подтверждением правильности этого пути является выдающееся открытие бозона Хиггса на основе результатов, полученных в детекторе ATLAS. Эволюция детектирующих Si-систем в ФВЭ и астрофизике и экстраполяция их развития на ближайшие 16 лет (как это представлялось в 2010 г.) приведены на рис. 12 [5].

В ближайшие 16 лет размер Si-трекеров не увеличится ни в детекторах HL-LHC, ни в планируемом линейном

коллайдере (International Linear Collider, ILC) в ЦЕРНе. Предполагается, что будут созданы кремниевые калориметры с высокой степенью грануляции (high granularity calorimeters, HGC) с площадью $\sim 1000\,m^2$, а также обсуждается реализация трекера для будущего коллайдера в ЦЕРНе (Future Circular Collider, FCC) с площадью поверхности $\sim 400\,m^2$ после окончания работы HL-LHC.

В гамма-астрофизике единственным телескопом, содержащим в настоящее время кремниевые сенсоры, является LAT, трекер которого имеет достаточно малый объем. Однако успешное функционирование телескопа уже в течение 16 лет показывает перспективность использования Si-сенсоров, что отражается в планах создания будущих обсерваторий, включающих более совершенные и объемные кремниевые трекеры для изучения источников гамма-квантов во Вселенной.

Что касается изучения темной материи и нейтрино, то здесь планы по использованию кремния связаны с развитием исследований международной коллаборацией CDMS и в рамках российской программы НЦФМ. В последней предполагается, что вес кремния составит 160 kg, и, безусловно, ее реализация позволит построить кремниевый мегадетектор для ядерной физики. Достигнутые результаты по развитию кремниевых сенсоров и существующая технологическая база дают основания полагать, что обширные планы в этом направлениии будут осуществлены.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] https://home.cern
[2] M.J.G. Veltman. Facts and Mysteries in Elementary Particles Physics. World Scientific Publishing Co Pte., Singapore (copyright 2018). 340 p.
[3] J. Kemmer. Nucl. Instrum. Meth. **169**, *3*, 499 (1980).
[4] S. Ramo. Proceed. IRE **27**, *9*, 584 (1939).
[5] F. Hartmann. Evolution of Silicon Sensor Technology in Particle Physics, 2nd ed. Springer Tracts in Modern Physics 275. Springer Intern. Publishing AG (2017). 372 p.
[6] Ю.К. Акимов. Полупроводниковые детекторы ядерных излучений. Дубна, ОИЯИ (2009). 277 с.
[7] G. Lutz. Semiconductor Radiation Detectors. Springer Berlin, Heidelberg (2007). 353 p.
[8] Particle Physics Reference Library, v. 2: Detectors for Particles and Radiation / Eds C.W. Fabjan, H. Schopper. Springer Open (2020). 1078 p.
[9] G.F. Knoll. Radiation Detection and Measurement, 4th ed. John Wiley, Hoboken, NJ (2010). 801 p.
[10] J. Lutz, H. Schlangenotto, U. Scheuermann, R. De Doncker. Semiconductor Power Devices: Physics, Characteristics, Reliability. Springer Berlin, Heidelberg (2011). 536 p.
[11] B.J. Baliga. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. Springer Science+Business Media LLC, USA (2008). 1069 p.
[12] Е.М. Вербицкая, В.К. Еремин, Н.Н. Сафонова, И.В. Еремин, Ю.В. Тубольцев, С.А. Голубков, К.А. Коньков. ФТП **45**, *4*, 547 (2011). [E.V. Verbitskaya, V.K. Eremin, N.N. Safonova, I.V. Eremin, Yu.V. Tuboltsev, S.A. Golubkov, K.A. Konkov. Semiconductors **45**, *4*, 536 (2011).]
[13] G. Casse, P.P. Allport, T.J.V. Bowcock, A. Greenall, M. Hanlon, J.N. Jackson. Nucl. Instrum. Meth. A **487**, *3*, 465 (2002).
[14] G. Pellegrini, C. Fleta, F. Campabadal, M. Miñano, M. Lozano, J.M. Rafi, M. Ullán. Nucl. Instrum. Meth. A **579**, *2*, 599 (2007).
[15] V.A. Mitsou. arXiv:hep-ph/0004161v1 (2020).
[16] P.S. Miyagawa, I. Dawson. Radiation background studies for the phase II inner tracker upgrade. CERN, Tech. Rep. ATL-UPGRADE-PUB-2014-003 (2014).
[17] T. Szumlak. Nucl. Instrum. Meth. A **958**, 162187 (2020).
[18] The ATLAS Collaboration. arXiv:2407.05716v1 [physics.ins-det] 8 Jul 2024, CERN-EP-2024-156, 9th July (2024).
[19] X. Jia. Nucl. Instrum. Meth. A **1063**, 169236 (2024).
[20] V. Schönfelder, H. Aarts, K. Bennett, H. de Boer, J. Clear, W. Collmar, A. Connors, A. Deerenberg, R. Diehl, A. von Dordrecht, J.W. den Herder, W. Hermsen, M. Kippen, L. Kuiper, G. Lichti, et al. Astrophys. J. Suppl. Series **86**, 657 (1993).
[21] W.B. Atwood, A.A. Abdo, M. Ackermann, W. Althouse, B. Anderson, M. Axelsson, L. Baldini, J. Ballet, D.L. Band, G. Barbiellini, J. Bartelt, D. Bastieri, B.M. Baughman, K. Bechtol, D. Bédérède, et al. Astrophys. J. **697**, *2*, 1071 (2009).
[22] M. Ajello, W.B. Atwood, M. Axelsson, R. Bagagli, M. Bagni, L. Baldini, D. Bastieri, F. Bellardi, R. Bellazzini, E. Bissaldi, E.D. Bloom, R. Bonino, J. Bregeon, A. Brez, P. Bruel, et al. arXiv:2106.12203v3 [astro-ph.IM] 6 Sep 2021.
[23] S. Griffin. arXiv:1902.09380v1 [astro-ph.IM] 25 Feb 2019.
[24] A. De Angelis, V. Tatischeff, I.A. Grenier, J. McEnery, M. Mallamaci, M. Tavani, U. Oberlack, L. Hanlon, R. Walterm, A. Argan, P. VonBallmoos, A. Bulgarelli, A. Bykov, M. Hernanz, G. Kanbach, et al. J. High Energy Astrophys. **19**, 1 (2018).
[25] C.A. Kierans, the AMEGO Team. arXiv:2101.03105v1 [astro-ph.IM] 8 Jan (2021).
[26] D.W. Amaral, T. Aralis, T. Aramaki, I.J. Arnquist, E. Azadbakht, S. Banik, D. Barker, C. Bathurst, D.A. Bauer, L.V.S. Bezerra, R. Bhattacharyya, T. Binder, M.A. Bowles, P.L. Brink, R. Bunker, et al. Phys. Rev. D **102**, 091101(R) (2020).
[27] А.А. Юхимчук, А.Н. Голубков, И.П. Максимкин, И.Л. Малков, О.А. Москалев, Р.К. Мусяев, А.А. Селезенев, Л.В. Григоренко, В.Н. Трофимов, А.С. Фомичев, А.В. Голубева, В.Н. Вербецкий, К.А. Кузаков, С.В. Митрохин, А.И. Студеникин, А.П. Ивашкин, И.И. Ткачев. ФИЗМАТ **1**, *1*, 5 (2023).
[28] Б.С. Неганов, В.Н. Трофимов. Способ калориметрического измерения ионизирующих излучений, патент СССР № 1037771.
[29] V. Eremin, A. Shepelev, E. Verbitskaya, C. Zamantzas, A. Galkin. J. Appl. Phys. **123**, *20*, 204501 (2018).
[30] Е.М. Вербицкая, И.В. Еремин, А.А. Подоскин, В.О. Сброжек, С.О. Слипченко, Н.Н. Фадеева, А.А. Яблоков, В.К. Еремин. ФТП **58**, *8*, 415 (2024).

Редактор Е.В. Толстякова