

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 Микром мире (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 широко-масштабное 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 широко-масштабное 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“ (С.Т.Р. 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 м^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 см^{-1} . F_w рассчитывается как напряженность в точке нахождения заряда при приложении к регистрирующему контакту напряжения $V = 1 \text{ В}$ 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. Точковый 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 (пэдвые, 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	$10^{-3} - 10^{-1} \text{ cm}$
Темновой ток, генерируемый в чувствительной области	Регистрация слабопоглощаемых излучений либо частиц, имеющих малую энергию	$10^{-10} - 10^{-9} \text{ A/cm}^2$
Эффективность собирания ННЗ	Точность определения энергии, выделенной частицей в чувствительном объеме	99.9%
Временное разрешение	Временная характеристика исследуемого процесса	$< 10^{-10} - 10^{-8} \text{ s}$
Рабочее напряжение	Полное обеднение чувствительного объема, эффективное собирание ННЗ, максимально короткий сигнал, высокое временное разрешение	100–1000 V
Рабочая температура	Повышение чувствительности и временного разрешения, снижение шума и энерговыделения	$-(10-20)^\circ\text{C}$ (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,

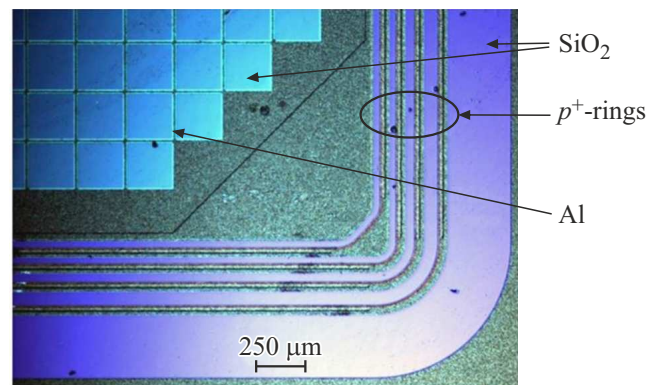


Рис. 1. Фотография фрагмента поверхности кремниевого сенсора с системой колец периферийного делителя потенциала.

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. рад-контакт), приведены на рис. 2. Распределения потенциалов по кольцам делителя и токов, протекающих между ними,

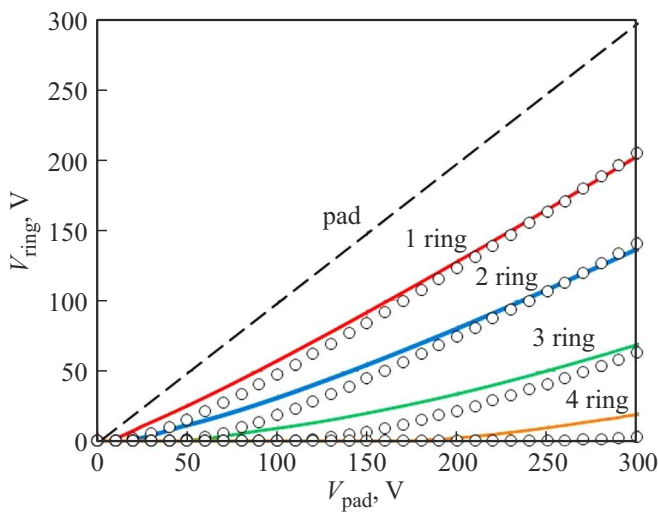


Рис. 2. Распределение потенциала на кольцевых $p^+ - n$ -переходах в детекторе на основе n -кремния с удельным сопротивлением $5 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$: символы — эксперимент, сплошные линии — расчет, пунктир — потенциал на центральном (pad) p^+ -контакте.

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 $\text{Si}|\text{SiO}_2$, возникающего под воздействием встроенного положительного заряда в окисле ($\sim 10^9 - 10^{10} \text{ cm}^{-2}$). 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, а приведено распределение напряженности электрического поля F в межполосковом промежутке в сенсоре на основе p -Si при напряжении $V_{\text{pad}} = 150 \text{ V}$. Ширина p^+ -области и расстояния между n^+ -полосками

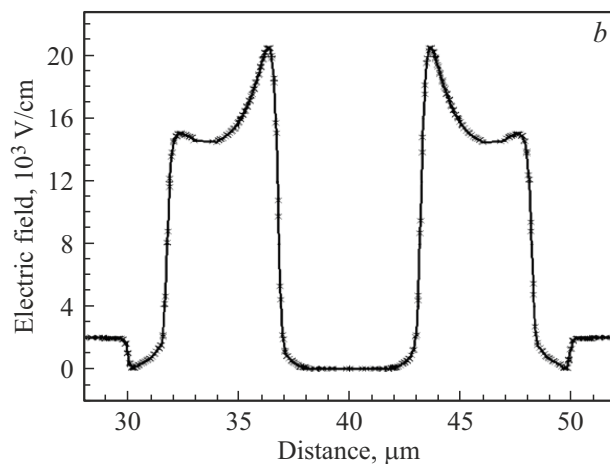
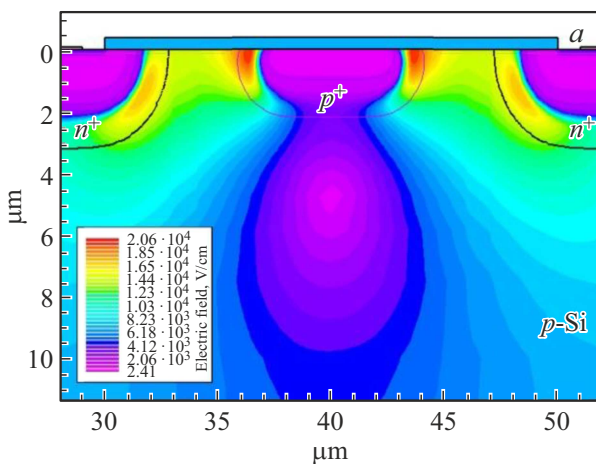


Рис. 3. а — 2D-распределение напряженности электрического поля в межполосковом промежутке $n^+ - p - p^+$ -сенсора и б — распределение напряженности электрического поля на глубине $0.1 \mu\text{m}$ от поверхности. $V_{\text{pad}} = 150 \text{ V}$.

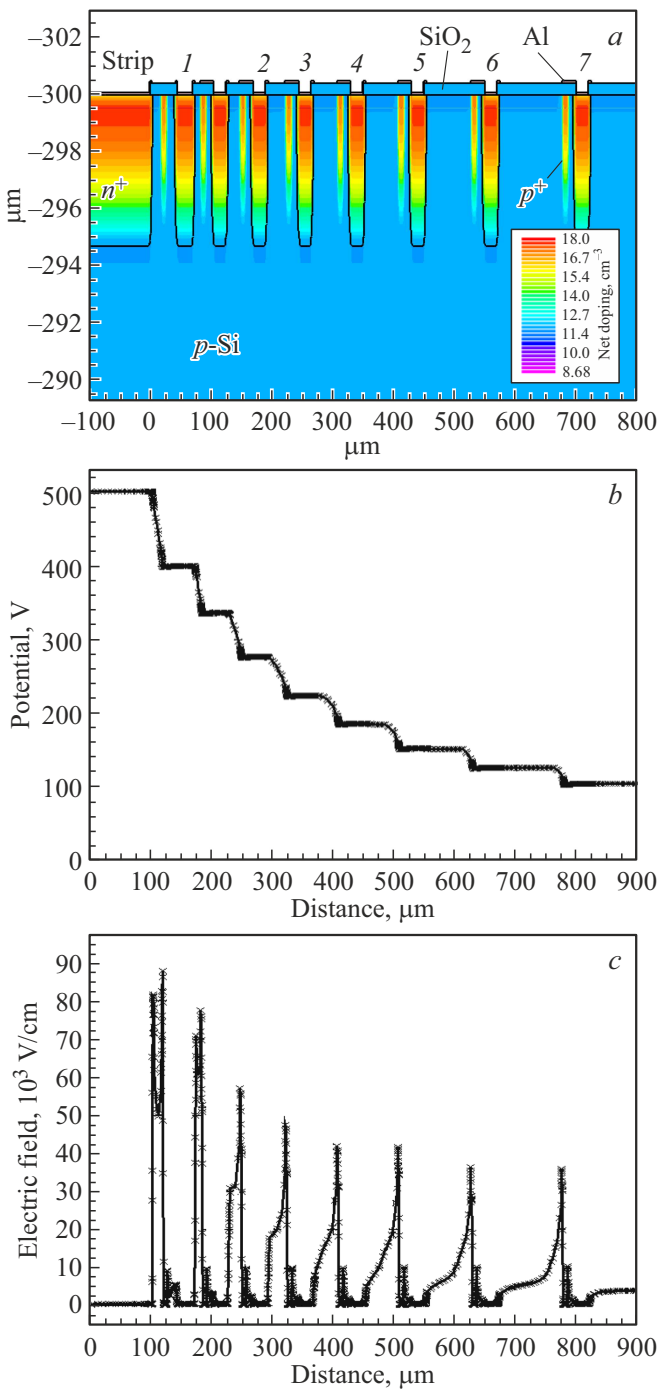


Рис. 4. Распределение *a* — концентрации легирующей примеси, *b* — потенциала и *c* — напряженности электрического поля в $n^+ - p - p^+$ -сенсоре с делителем потенциала. $V_{pad} = 500$ V.

составляют 10 и 5 μm соответственно. Видно, что под p^+ -слоем образуется область с электрическим полем, разрушающим слой аккумулярованных 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 SiO₂, 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 TOTEM на БАК, приведен на рис. 5.

Следует отметить, что специфичным для позиционно-чувствительных сенсоров является их сверхбольшой размер, достигающий 10×10 cm², 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

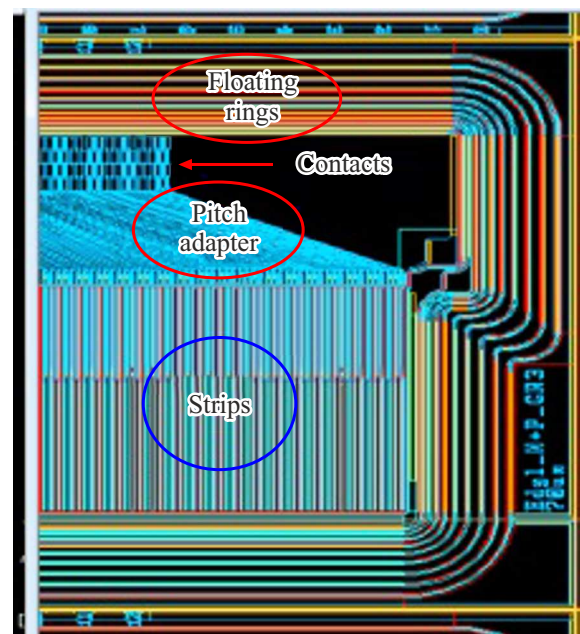


Рис. 5. Топология фрагмента разработанного в ФТИ мини-прототипа $n^+ - p - p^+$ -сенсора с шагом полосков 65 μm, кольцевым делителем потенциала, состоящего из n^+ -колец, адаптером шага (pitch adapter) и контактными площадками.

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 $7.5 \cdot 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ и максимальной дозы облучения от $5 \cdot 10^{14}$ до $2 \cdot 10^{16} \text{ neq/cm}^2$. Спецификой работы кремниевых сенсоров в длительных экспериментах в ЦЕРНе является их деградация под воздействием регистрируемого и фонового излучений; поэтому многие из 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 м соответственно. В непосредственной близости от точки столкновения протонов располагается внутренний полупроводниковый

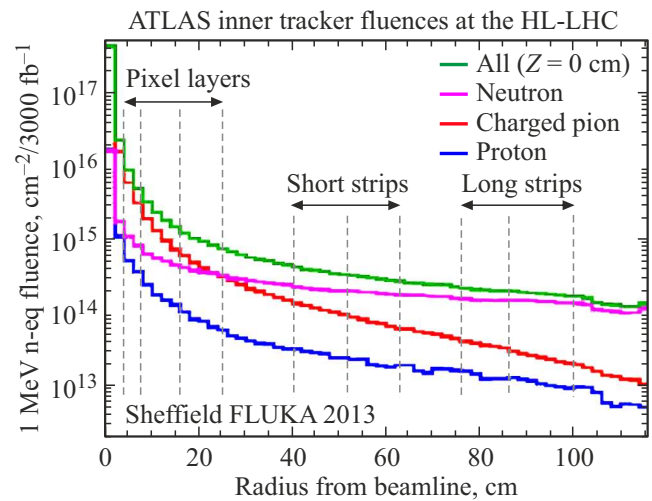


Рис. 6. Ожидаемые дозы облучения кремниевых сенсоров во внутреннем треке эксперимента ATLAS на HL-LHC [16].

трекер (inner semiconductor tracker), имеющий длину 5.6 м 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, ближайšie к точке взаимодействия протонов (рис. 6, [16]). Сенсоры обладают 2D-чувствительностью и обеспечивают пространственное разрешение в $10 \mu\text{m}$. Следующими по расположению являются слои сенсоров с короткими и длинными полосками, что обеспечивает точность определения траектории пролета частицы сквозь сенсор в $20 \mu\text{m}$ 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 $2 \cdot 10^{16} \text{ neq/cm}^2$, 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-

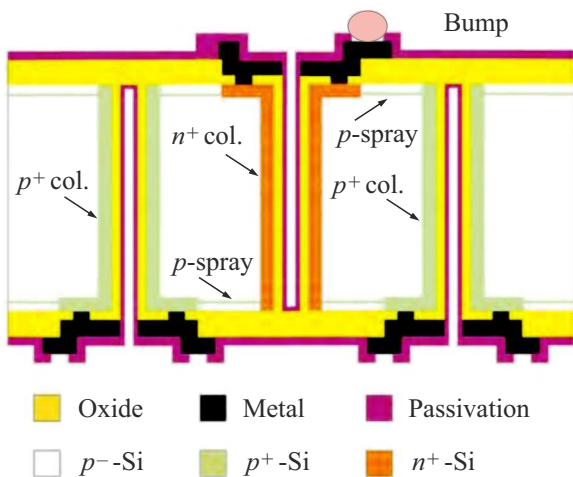


Рис. 7. Схематическое изображение пиксельного 3D-сенсора на основе p -Si [18].

ший 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 трекаре 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 восстановлении трека и временное 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 временное 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 трекары и калориметры.

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 $E_\gamma > 10 \text{ MeV}$.

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 трекара под углом θ с энергией E_γ , испытывает комптоновское рассеяние на электроне в одном из сенсоров трекара, 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 трекара, 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 $m_e c^2 = 511 \text{ keV}$ — энергетический эквивалент массы покоя электрона. В двухстадийном процессе E_γ измеряется как интеграл зарядов, генерируемых в слоях сенсоров трекара; 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 $1.8 \times 1.8 \times 0.72 \text{ m}^3$ 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 трекаре телескопа происходит регистрация электронов либо e^-e^+ -пар, для чего используются односторонние полосковые сенсоры площадью $8.95 \times 8.95 \text{ cm}^2$ с толщиной $400 \mu\text{m}$ и шагом полос-

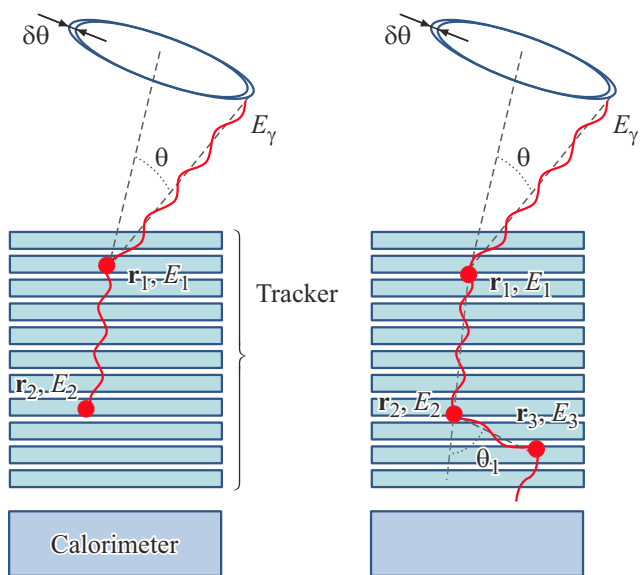


Рис. 8. Схематическое изображение комптоновского процесса регистрации гамма-кванта в гамма-телескопе: слева — двухстадийный процесс с полным поглощением энергии кванта E_γ в актах 1 и 2, справа — трехстадийный процесс с частичным поглощением энергии кванта в трекаре. r_j ($j = 1, 2, 3$) — вектор, определяющий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

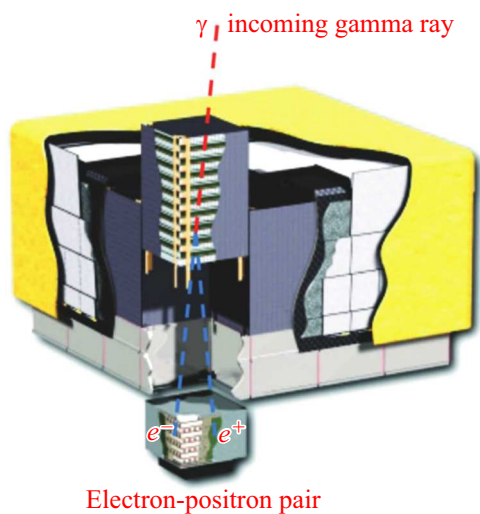


Рис. 9. Схематическое изображение гамма-телескопа LAT [21].

ков $228 \mu\text{m}$. 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 $0.3 \text{ MeV} - 3 \text{ GeV}$ для AMEGO и e-ASTROGAM соответственно, т.е. нижний предел энергии сдвигается в актуальную для астрофизики область энергий $200 - 300 \text{ keV}$ по сравнению с телескопом LAT. Оба телескопа будут содержать 3 основных узла — калориметр на основе сцинтилляционных кристаллов, кремниевый трекаер в виде модульных сборок (башен) сенсоров и систему антисовпадений. Трекаеры будут построены как модули, объединяющие слои DSSDs, создающие 3D-пространство, что позволяет регистрировать возникающие в нем события с привязкой к временной шкале. Так, в телескопе AMEGO трекаер состоит из 4-х модульных сборок, каждая из которых содержит 60 слоев, включающих 4×4 DSSDs (рис. 10). Отдельный сенсор имеет форму квадрата $\sim 10 \times 10 \text{ cm}^2$ толщиной $500 \mu\text{m}$ со 192 полосками на каждой стороне при общем количестве

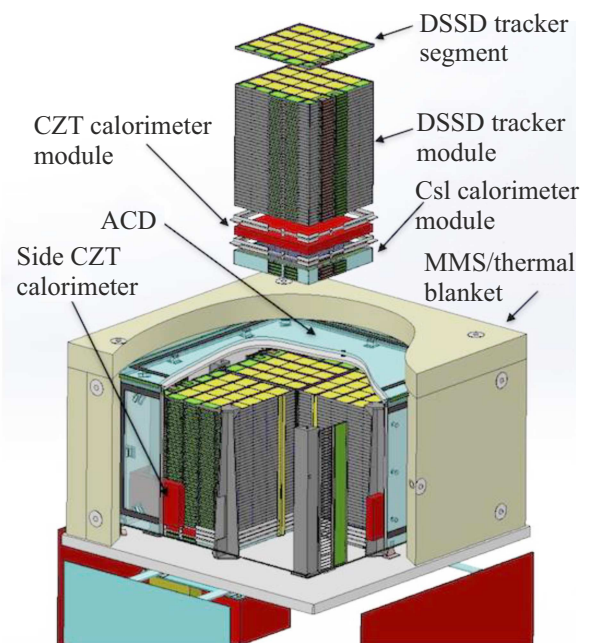


Рис. 10. Схематическое изображение регистрирующих устройств телескопа AMEGO [23].

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 $\sim 1 \text{ m}^2$, т.е. общая площадь кремниевых сенсоров составит $\sim 90 \text{ m}^2$ при количестве независимых каналов 860000, что даже превышает площадь Si-сенсоров во внутреннем трекаре детектора ATLAS. Площадь каждого DSSD толщиной $500 \mu\text{m}$ и шагом полосок $240 \mu\text{m}$ составит $9.5 \times 9.5 \text{ cm}^2$. 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 регистрации гамма-квантов с энергиями 0.3–10 MeV. Ограничение диапазона исследований энергий 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 $\sim 10 \times 10 \text{ cm}^2$, 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 $\sim 5 \cdot 10^{-13} \mu\text{B}$ (где μB — магнетон Бора).

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

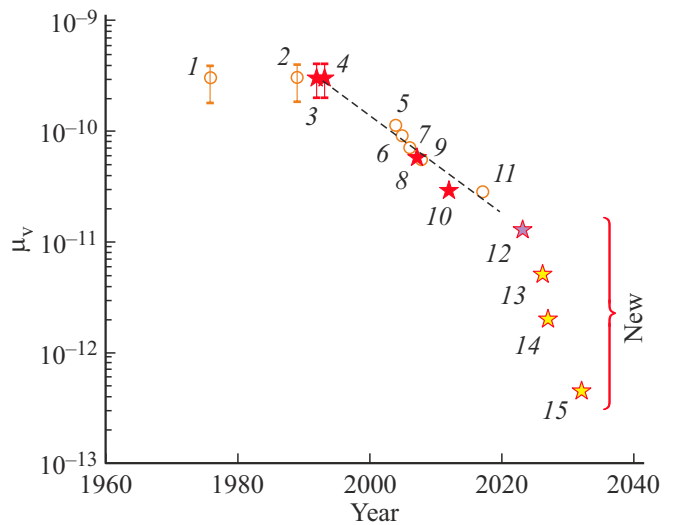
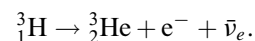


Рис. 11. Прогресс в измерении лабораторного ограничения на магнитный момент электронного нейтрино [27]. Цифрами обозначены эксперименты: 1 — Savannah River (1976); 2 — Vogel, Engel (1989); 3 — НИЦ Курчатовский институт (1992); 4 — Ровно, реактор (1993); 5 — Super-Kamiokande (2004); 6 — MUNU, реактор (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-детектор (2026); 14 — Саров, Si-детектор (2027); 15 — Саров, гелиевый детектор (2030–2032).

(CDMS/SuperCDMS). Первые эксперименты были выполнены на пробных образцах с массой $\sim 1 \text{ g}$ 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



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 $\sim 2.5 \cdot 10^{-12} \mu\text{B}$, что на порядок лучше значения,

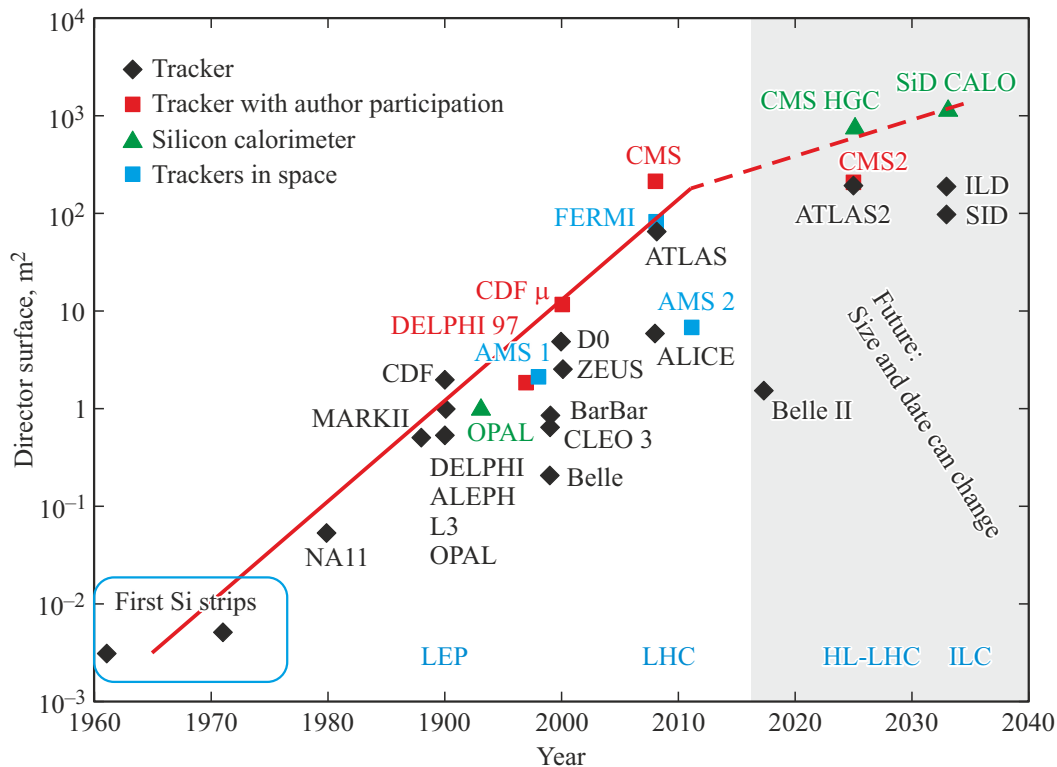


Рис. 12. Эволюция детектирующих систем в ФВЭ и астрофизике [5].

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 своей энергии сенсору и генерации в нем джоулевого 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 мК 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 К [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 джоулевого тепла при дрейфе неравновесных носителей, образованных нейтрино. Первые экспериментальные исследования Si-сенсоров при температуре ≤ 100 мК 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 трекары 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-трекеро 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 $\sim 1000 \text{ m}^2$, а также обсуждается реализация трекера для будущего коллайдера в ЦЕРНе (Future Circular Collider, FCC) с площадью поверхности $\sim 400 \text{ m}^2$ после окончания работы HL-LHC.

В гамма-астрофизике единственным телескопом, поддерживающим 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 трекары 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 направлении 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. ATLAS-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. Hermesen, 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. Malmamaci, 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. Мусьяев, А.А. Селезнев, 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