

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Современные кремниевые детекторы для гамма-астрофизики

Е.М. Вербицкая, В.К. Ерёмин

Устойчивой тенденцией совершенствования гамма-телескопов является создание их 3D чувствительной среды — трекеров на основе кремниевых позиционно-чувствительных детекторов. Среди них планарные двухсторонние кремниевые стриповые детекторы (DSSDs) планируется использовать в телескопах международных обсерваторий и российского проекта ГЕРМЕС. Приведены характеристики прототипов DSSDs для телескопов e-ASTROGAM и ГЕРМЕС и рассмотрены критические элементы детекторов. Показана реальность создания кремниевых трекеров на основе существующих в России физической и технологической баз разработок кремниевых детекторов.

Ключевые слова: космический гамма-телескоп, трекер, кремниевый планарный детектор, двухсторонний стриповый детектор, система защитных колец

PACS number: 95.55.Vj

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.04.039531>

Содержание

1. Введение (416).
 2. Кремниевые планарные детекторы ядерных излучений (417).
 3. Кремниевые детекторы как элемент инструментальной базы космических гамма-обсерваторий (420).
 4. Перспективы создания космических гамма-обсерваторий в России (425).
 5. Заключение (429).
- Список литературы (430).

1. Введение

Современное развитие экспериментальной астрофизики в общих тенденциях повторяет недавнюю историю работ в физике высоких энергий (ФВЭ), в которой ключевым стало создание гигантских детектирующих систем. Они интегрировали в себя как разные типы детекторов, так и их большое количество, что привело к качественному изменению технологий, в чём кремниевые детекторы являются наиболее ярким примером. Произошло принципиальное изменение топологии таких приборов, улучшилась воспроизводимость характеристик в больших партиях, надёжность и предел радиационной стойкости. Отмеченная тенденция важна и для астрофизики, где, например, в планируемых космических гамма-телескопах площадь кремниевых детекторов окажется соизме-

римой с её значением во внутренних трекерах экспериментов на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРНе, Швейцария. В связи с этим рассмотрение вопроса о месте кремниевых детекторов в гамма-астрофизике целесообразно начать с экскурса в физику и технику полупроводниковых детекторов для ФВЭ.

Действительно, полупроводниковые детекторы как класс приборов широкомасштабного применения возникли в связи с задачами ФВЭ и ядерной физики [1–4] по созданию ускорительных комплексов нового поколения, таких как БАК, ускоритель релятивистских тяжёлых ионов (Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC) в Брукхейвенской национальной лаборатории, США, и ускоритель для исследования антипротонов и ионов ("Facility for Antiprotons and Ions Research", FAIR) в Центре исследований тяжёлых ионов GSI, Германия. Создание экспериментальных установок на этих ускорителях потребовало разработки измерительной базы с новым уровнем характеристик, чтобы проследить процессы взаимодействия частиц, например, протонов с энергией до единиц ТэВ.

Задача была решена за счёт перехода к устройствам, объединяющим множество позиционно-чувствительных детекторов, создающих 3D-пространство, способное регистрировать все возникающие в нём события с их привязкой к временной шкале. Наиболее сложной проблемой стало осуществление этой задачи на БАК в области, максимально приближённой к точке столкновения встречных пучков протонов, где необходимая точность фиксации траекторий составляет единицы микрон. Решением явилось создание так называемых внутренних трекеров с использованием детекторов релятивистских частиц, выполненных на основе кремния [2], что стимулировало развитие физики и техники кремниевых детекторов, сделав их приборами широкого применения.

Необходимо отметить и то, что изменились требования к детекторам в отношении идентичности их характеристик в крупных партиях, долговременной стабильно-

Е.М. Вербицкая^(*), В.К. Ерёмин^(**)Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
ул. Политехническая 26, 194021 Санкт-Петербург,
Российская ФедерацияE-mail: ^(*)elena.verbitskaya@mail.ioffe.ru,^(**)Vladimir.Eremin@mail.ioffe.ru

Статья поступила 21 апреля 2023 г.

сти и, наконец, радиационной стойкости, а это привело к ревизии понимания работы детекторов. Возник вопрос количественного предсказания сценария деградации характеристик вплоть до доз, при которых продолжение эксперимента невозможно без замены детекторов. Для его решения в ЦЕРНе были созданы международные коллаборации RD (Research & Development) по исследованиям, включавшим вопросы физики радиационных воздействий на кремний, их проявление в характеристиках детекторов, важных для экспериментов на БАК, созданию сценариев деградации детекторов, а также по разработке новых типов детекторов. В связи с модернизацией БАК, состоящей в поэтапном десятикратном увеличении светимости пучка релятивистских протонов до $10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и их энергии до 14 ТэВ (БАК с высокой светимостью (High Luminosity Large Hadron Collider, HL-LHC)) [5], для регистрации частиц были разработаны новые конструкции сегментированных 2D и 3D кремниевых детекторов, позволяющие существенно улучшить их пространственное разрешение, быстродействие и радиационную стойкость [2, 6–9]. Большое внимание было уделено воспроизводимости характеристик детекторов путём проведения их тестов на стадии массового выпуска, объёмы которого измерялись десятками и сотнями квадратных метров.

Близкие задачи стоят и в космической астрофизике. Традиционным инструментом в исследованиях космического гамма-излучения являются гамма-телескопы, использующие сцинтилляционные детекторы, наиболее известным из которых является Imaging Compton Telescope COMPTEL, один из четырёх телескопов в составе Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) [10]. Вместе с тем в космической обсерватории Gamma-ray Large Area Space Telescope (GLAST, ныне Fermi Gamma-ray Space Telescope — FGST, а также FGRST), функционирующей в космосе с 2008 г., одной из двух систем является Large Area Telescope (LAT), содержащий кремниевый трекер [11].

В данной области актуальной является задача повышения углового и энергетического разрешения телескопов. Так, в последние 20 лет появились предложения по созданию космических обсерваторий MEGA и e-ASTRO-GAM [12, 13], в телескопах которых наряду со сцинтилляторами планируется установить позиционно-чувствительные кремниевые детекторы. Аналогичный проект предлагается и Россией и носит название ГЕРМЕС (HERMES — High Performance MeV Spectrometer) [14]. В связи с этим анализ критических вопросов, определяющих успешность реализации планов, становится важной задачей, взгляд на которую и представляется в настоящей работе. Она мотивирована презентацией состояния развития кремниевых планарных детекторов, сделанной на научной сессии Отделения физических наук РАН "Гамма-кванты и нейтрино из космоса: что видим сейчас и что нужно, чтобы увидеть больше", прошедшей в ФТИ им. А.Ф. Иоффе 22 апреля 2023 г.

Ниже в работе приведено описание принципа функционирования кремниевых детекторов ядерных излучений и последних разработок кремниевых детекторов, ориентированных на планарную технологию их массового производства, апробированных в ФВЭ и перспективных для космических гамма-телескопов. Дано описание космических обсерваторий, в которых уже функционируют либо планируются к использованию кремниевые

детекторы. Представлены планы ФТИ им. А.Ф. Иоффе по созданию гамма-телескопа и опыт по исследованиям и разработкам кремниевых детекторов как базы для его реализации.

2. Кремниевые планарные детекторы ядерных излучений

Базовой структурой кремниевых детекторов излучений [1–4] является структура на основе электронно-дырочного перехода — $p^+ - n - n^+$ либо $n^+ - p - p^+$ типа, в которой n - или p -кремний (Si) имеет высокое удельное сопротивление (до нескольких десятков кОмсм), формирующее чувствительный объём детектора, а p^+ - и n^+ -слои являются сильно легированными контактами. При приложении обратного, т.е. обедняющего, напряжения V к детектору образуется чувствительная область — область электрического поля (т.е. область пространственного заряда ОПЗ), в которой происходит собирание заряда, генерируемого воздействующим на детектор излучением. Толщины контактов составляют несколько мкм, что существенно меньше толщины чувствительного объёма, которая обычно не превышает 1 мм.

Важнейшей характеристикой детектора на основе электронно-дырочного перехода является распределение напряжённости электрического поля $E(x)$, где x — координата, нормальная к поверхности. Оно может быть найдено из уравнения Пуассона [15]:

$$-\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} = \frac{dE(x)}{dx} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon_0\varepsilon_{\text{Si}}}, \quad (1)$$

где φ — потенциал, возникающий при приложении напряжения V , ε_0 — диэлектрическая постоянная, ε_{Si} — диэлектрическая проницаемость кремния. Решение уравнения (1) с плотностью заряда ρ , где $\rho(x) = eN_0$ (N_0 — концентрация легирующей примеси в высокоомном кремнии) даёт линейное распределение $E(x)$ в ОПЗ с толщиной w по координате x :

$$E(x) = -\frac{eN_{\text{eff}}}{\varepsilon_0\varepsilon_{\text{Si}}}(x - w), \quad (2)$$

где N_{eff} — эффективная концентрация пространственного заряда (в необлучённом детекторе $N_{\text{eff}} = N_0$), и w определяется величиной V :

$$w = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{\text{Si}}V}{eN_{\text{eff}}}}. \quad (3)$$

Воздействие излучения адронов (протонов, нейтронов), электронов и др. приводит к передаче энергии частиц атомам кристаллической решётки кремния. Эта энергия в основном затрачивается на генерацию неравновесных носителей заряда (ННЗ) и образование в решётке первичных дефектов (пар вакансия–междоузлие). В случае облучения нейтронами возникновение дефектов является доминирующим процессом [1, 2, 6]. Первичные дефекты образуют комплексы вакансий и междоузлий с легирующими и остаточными примесями в кремнии, при этом вакансии связываются друг с другом, образуя дивакансии либо кластеры дефектов. Формирование радиационных дефектов приводит к ухудшению статических вольтамперных характеристик (ВАХ) детекторов. С уве-

личением дозы облучения темновой ток монотонно возрастает, что приводит к увеличению токовой компоненты шума прибора.

Генерируемые излучением ННЗ дрейфуют в ОПЗ детектора, создавая сигнал — электрический отклик на зарегистрированную частицу, т.е. индуцированный на электроды структуры ток i или заряд Q (в зависимости от входного сопротивления регистрирующей электроники). Токковый сигнал i , вызываемый точечным зарядом q_0 , в соответствии с теоремой Шокли–Рамо определяется как [16]

$$i(t) = q_0 E_w v_{dr}(x(t), T), \quad (4)$$

где v_{dr} — дрейфовая скорость заряда q_0 (т.е. электронов либо дырок), зависящая от E , времени t и температуры T [17]. Параметр E_w представляет собой так называемое "весовое поле", имеющее размерность $[см^{-1}]$, для несегментированного детектора равно $1/d$, где d — толщина детектора. Таким образом, для структур, в которых линейные размеры $p^+ - n$ -перехода много больше d , индуцированный ток связан с дрейфовой скоростью компактного облака ННЗ как

$$i(t) = \frac{q_0}{d} v_{dr}(x(t)). \quad (5)$$

Время дрейфа носителей определяется величиной v_{dr} , т.е. напряжённостью электрического поля, и при насыщенной скорости и стандартной толщине детектора в сотни мкм составляет единицы наносекунд [17]. В случае трека частицы, соизмеримого с толщиной чувствительной области, и тем более при регистрации частиц высокой энергии, пробег которых превосходит d , кинетика тока $i(t, T)$ вычисляется суммированием послонных вкладов дрейфа образованных зарядов, что обычно требует применения численных методов. Однако для исследования детекторов простое выражение (5) широко используется в методе переходного тока (Transient Current Technique, TCT). При однородном распределении поля кинетика токового сигнала определяется постоянной времени захвата дрейфующих носителей τ и описывается экспоненциальным выражением

$$i(t, T) = \frac{q_0}{d} \mu(T) E \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (6)$$

В необлучённых детекторах τ составляет единицы мс (как и в исходном кремнии).

Разработки детекторов для экспериментов на БАК затронули оптимизацию свойств высокоомного кремния и усложнение конструкций и технологии изготовления приборов [1, 2, 6, 9]. Простейшей структурой кремниевое детектора является детектор с одним несегментированным $p - n$ -переходом (так называемый *pad* (пэдовый) детектор), изготавливаемый методами планарной технологии микроэлектроники как базы для создания более совершенного типа детекторов.

Следует пояснить используемый в названии этих детекторов термин "планарные", что предполагает расположение всех элементов детектора на одной или двух плоских сторонах пластины. Слои, создаваемые на плоской поверхности кремниевой пластины, структурируются методом фотолитографии, что обеспечивает необходимые характеристики детектора. Обычно поверхность

структура детектора включает три слоя: контактные слои n^+ - и p^+ -проводимости, легированные атомами донорной или акцепторной примеси соответственно, слой изолирующей двуокиси кремния SiO_2 и слой металла (алюминия) для соединения легированных слоёв с аппаратурой, регистрирующей электрические сигналы. Топология и характеристики слоёв обеспечивают необходимую чувствительность детектора к регистрируемому излучению и стабильные ВАХ детектора без использования механического объёмного структурирования пластины (например, создания фасок, канавок или нанесения защитных паст). Отсутствие последних позволяет обеспечить точный контроль и воспроизводимость технологических операций, т.е. автоматизацию технологического процесса, что является основным достоинством планарной технологии.

Следует отметить, что планарная технология является основой большинства приборов микроэлектроники, в связи с чем используемое оборудование и процессы обработки кремниевых пластин являются результатом глубоких исследований и оптимизированы под задачи огромного рынка выпускаемых приборов. Кремниевые детекторы по своему назначению качественно отличны от микроэлектронных приборов. Их различие показано в табл. 1, где приведены типичные размерные и электрические характеристики обоих типов приборов.

Сравнение показывает полное несоответствие характеристик и требований, при том что совокупность технологических операций является одинаковой. Различие в технологиях состоит в конкретных режимах проведения операций. Именно это позволяет с приемлемым выходом получать детекторы с площадью до 100 см^2 на исходной пластине диаметром 150 мм , избегая при этом возникновения даже одного дефекта, способного нарушить требуемые свойства прибора. В то же время такой дефект при производстве цифровых чипов может повредить лишь один прибор, что несущественно при их количестве на пластине, измеряемом сотнями.

На рисунке 1 показан фрагмент поверхности несегментированного $p^+ - n - p^+$ -детектора на основе n -Si, на верхней стороне которого сформирован $p^+ - n$ -переход, а высоколегированная n^+ -область является тыловым омическим контактом. Исходная пластина толщиной от де-

Таблица 1. Характеристики детекторов и цифровых чипов на основе кремния

Характеристики	Детектор	Цифровой чип
Площадь, мм^2	до 10^4	1 – 10
Объём активной области, мм^3	до 10^5	$< 10^{-2}$
Рабочее напряжение, В	10 – 1000	1 – 5
Длина переноса заряда, мм	до 10	10^{-3}
Основные технологические операции	Окисление, ионная имплантация, фотолитография	
Критические требования	Высокая чистота объёма, высокое рабочее напряжение	Малый размер элементов, низкая потребляемая мощность

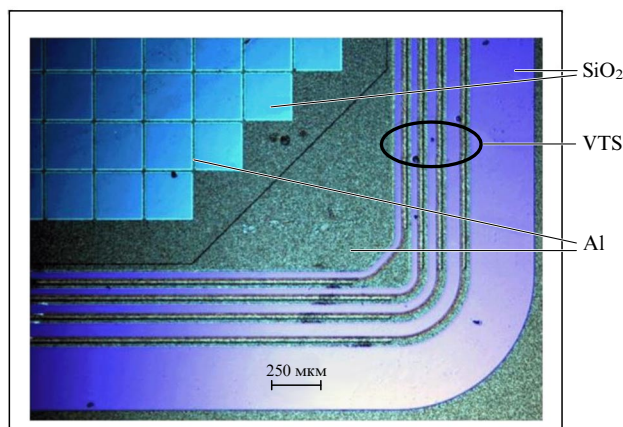


Рис. 1. Фотография фрагмента поверхности кремниевого детектора с системой защитных колец VTS.

сятков до сотен микрон образует чувствительный объём n -типа. Как правило, на периферии детекторов создаётся система защитных изолированных ("плавающих") p^+ -колец (Voltage Terminating Structure, VTS), где межсегментная изоляция осуществляется двуокисью кремния SiO_2 . Такая структура позволяет плавно понижать потенциал на периферии детектора, предотвращая пробой (подробно см. раздел 4). Несегментированные детекторы обеспечивают спектрометрию квантов и частиц с высоким энергетическим разрешением, но не обладают позиционной чувствительностью и в основном предназначены для экспериментов в ядерной физике и мониторинга работы энергетических установок.

В настоящее время основным исходным материалом для детекторов, используемых на БАК, является высокоомный кремний p -типа с удельным сопротивлением не менее 5 кОм см, и основным, соответственно, является n^+ – p -переход. Это связано с оптимизацией конструкции детектора под задачу работы в условиях высоких радиационных нагрузок, поскольку в облучённой n^+ – p – p^+ -структуре максимум напряжённости электрического поля стабильно находится вблизи n^+ -контакта вне зависимости от дозы. Последнее минимизирует время собирания ННЗ, что увеличивает сигнал в сильно облучённом детекторе по сравнению с p^+ – n – p^+ -структурой.

Для реализации пространственного разрешения были разработаны планарные детекторы, в которых p^+ – n либо n^+ – p -переход сегментирован; основными из них являются стриповые и пиксельные структуры, кратко описанные ниже.

Односторонние стриповые детекторы (single-sided strip detectors, SSSDs, или SSDs) с сегментированными контактами на стороне с переходом (p^+ – n либо n^+ – p) являются наиболее востребованными как в ФВЭ, так и ядерной физике. Стрипы представляют собой p^+ – n либо n^+ – p -переходы в виде полосок с межстриповым расстоянием (шагом стрипов) от десятков до сотен мкм [1, 2, 18–20], каждая из которых подключена к цепи регистрирующей электроники, что позволяет получать информацию с индивидуального стрипа. Для предотвращения электрического соединения n^+ -стрипов в n^+ – p – p^+ -структуре между ними создаются разделительные области p -кремния (так называемые p -spacy либо p -stop), где концентрация бора на 2–3 порядка ниже, чем в p^+ -контакте [2, 21]. SSSDs обеспечивают однокоординатную чувстви-

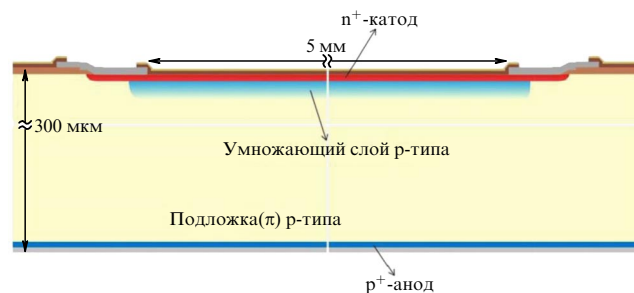


Рис. 2. Схематичное сечение LGAD-детектора [27].

тельность с разрешением в единицы мкм и характеризуются высоким энергетическим и временным разрешением. Так, в экспериментах на тяжёлых ионах в GSI было достигнуто временное разрешение в 14 пс [22, 23].

Пиксельные (pixel) детекторы были разработаны для достижения прецизионной 2D-позиционной чувствительности в интенсивных полях регистрируемых частиц. В такой конструкции в n^+ – p – p^+ -структуре n^+ – p -переход сегментирован в массив изолированных переходов [19, 24]. Размер пикселей может варьироваться от сотен квадратных микрон до нескольких квадратных сантиметров. В подобных детекторах также необходимо создание разделительных p^+ -слоёв на n^+ -стороне. Такая топология позволяет не только получить необходимое 2D позиционное разрешение, но и обеспечить высокую скорость регистрации частиц в режиме независимого снятия сигналов с каждого отдельного пикселя. При этом количество каналов электроники регистрации сигналов определяется произведением $A_x \times A_y$, где A_x и A_y — количество каналов вдоль осей x и y соответственно, а связь с электроникой обычно обеспечивается соединением выступов пикселей детекторного чипа с чипом электроники (так называемым "bump bonding").

Двухсторонние p^+ – n – n^+ - и n^+ – p – p^+ -детекторы с ортогональными стрипами на обеих сторонах детектора (Double-Sided-Strip Detectors, DSSDs) [2] нашли меньшее применение по сравнению с SSSDs в силу более сложной технологии [25, 26]. Основное достоинство таких детекторов — обеспечение 2D-позиционной чувствительности при числе каналов электроники $A_x + A_y$, а съём сигналов осуществляется многоканальными усилителями-формирователями.

Лавинные детекторы с малым усилением (Low-Gain Avalanche Detectors, LGAD), имеющие структуру n^+ – p^+ – p – p^+ на основе высокоомного p -Si (рис. 2) были разработаны для сохранения достаточной величины сигнала при рабочих напряжениях в 500 В и дозах облучения F более 1×10^{15} экв. нейтрон/см² (нейтроны с энергией 1 МэВ) [2, 8, 27, 28]. Усиление сигнала в LGAD происходит за счёт лавинного умножения носителей заряда в тонком (~ 2 мкм) встроенном p^+ -слое, легированном бором, где электрическое поле достигает величины, достаточной для ударной ионизации, и коэффициент усиления сигнала составляет несколько десятков. Измерения характеристик облучённых детекторов показали уменьшение усиления [29], что удалось частично подавить при легировании встроенного p^+ -слоя галлием [30]. Для улучшения временных характеристик были разработаны тонкие (~ 50 мкм) LGAD с оптимизированной структурой и активной площадью в несколько мм², в которой было реализовано быстрое действие в 30 пс [28, 31].

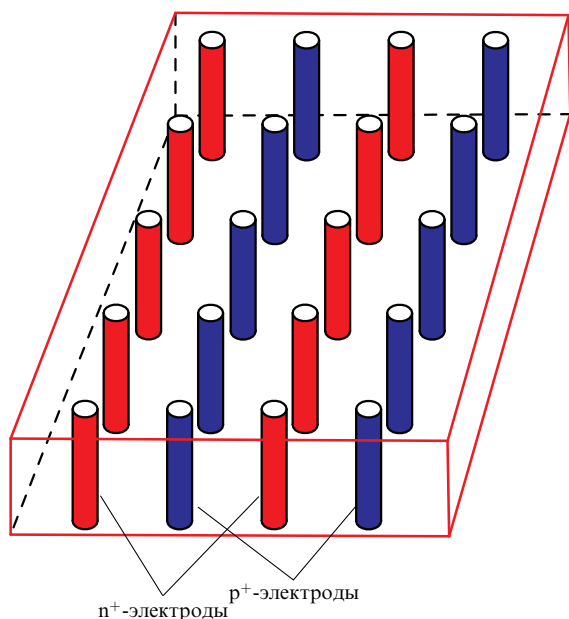


Рис. 3. Схематическое изображение конструкции 3D-детектора [2].

3D-детекторы являются детекторами с 3D-профилеированием чувствительного объёма, в котором переходы сформированы путём создания одиночных либо чередующихся p^+ - и n^+ -"колодцев", перпендикулярных поверхностям кремниевой пластины и расположенных в виде матрицы на расстоянии в десятки микрон друг от друга (рис. 3). Следует указать на то, что детекторы этого типа не обладают 3D-чувствительностью, а термин 3D в их названии указывает лишь на глубокое профилеирование их чувствительного объёма. Данный тип детекторов был также разработан для снижения рабочего напряжения, улучшения быстродействия и расширения диапазона радиационной стойкости [32–36]. Толщина области между n^+ - и p^+ -"колодцами", т.е. длина переноса ННЗ, на которой формируется сигнал, существенно меньше, чем в обычных SSSDs, что снижает зависимость сигнала от дозы. Существенным недостатком 3D-детекторов является сложность процесса изготовления, дополненного операциями глубокого плазменного травления "колодцев" и их заполнения легированным поликристаллическим кремнием. Поэтому чувствительная площадь отдельных детекторов не превышает нескольких квадратных сантиметров.

Следует отметить, что упомянутые выше детекторы, включая и несегментированные, являются сложными приборами, требующими значительно более совершенных технологий их изготовления, которые тем не менее уже разработаны, и детекторы используются в масштабе, удовлетворяющем потребностям ФВЭ.

При модернизации БАК до достижения параметров пучка, соответствующих HL-LHC, наибольшая доза радиационного воздействия на кремниевые детекторы, максимально приближенные к точке пересечения пучков протонов, достигнет 2×10^{16} экв. нейтрон/см², т.е. возрастёт примерно в 10 раз [2, 5] по сравнению с БАК, что с неизбежностью приведёт к деградации их характеристик. Основным критерием работоспособности детекторов в таких задачах является соотношение сигнал/шум, оно должно быть не менее 10 при регистрации релятивистских адронов, энерговыделение которых в кремнии

составляет примерно 100 кэВ. Для кремниевых планарных детекторов с толщиной чувствительной области 300 мкм это может быть реализовано до дозы $F \sim \sim 10^{15}$ экв. нейтрон/см² при оптимизации характеристик кремния и конструкции детектора.

Деградация основных характеристик кремниевых детекторов связана с введением радиационных дефектов, которые являются центрами генерации тока и захвата ННЗ [37]. Зависимости характеристик от дозы облучения определяются следующими соотношениями:

- рост темнового генерационного тока I [2, 38]:

$$\frac{I}{V_w} = \alpha F_{\text{eq}}, \quad (7)$$

где $\alpha = 4 \times 10^{-17}$ А см⁻¹ — скорость деградации тока при облучении, V_w — объём области, где происходит генерация тока;

- рост эффективной концентрации N_{eff} [2, 38]:

$$N_{\text{eff}} \approx g F_{\text{eq}}, \quad (8)$$

где g — скорость введения N_{eff} , равная 0,004–0,04 см⁻¹ в зависимости от марки кремния;

- постоянная времени захвата носителей на энергетические уровни дефектов [39]:

$$\tau^{-1} = \beta F_{\text{eq}}, \quad (9)$$

где коэффициент пропорциональности β зависит от вида излучения, а также от марки кремния, из которого изготовлен детектор. Для адронов β составляет $(4–7) \times 10^{-16}$ см² нс⁻¹, тогда как для ионов эта величина существенно больше и определяется их массой и зарядом.

Результаты многочисленных исследований, направленных на установление влияния облучения на характеристики кремниевых детекторов, используемых в экспериментах на HL-LHC, и разработку сценария их радиационной деградации приведены в [2], гл. 21 и ссылки к этой главе, где дано детальное описание аспектов, рассмотренных в разделе 2.

3. Кремниевые детекторы как элемент инструментальной базы космических гамма-обсерваторий

Гамма-кванты являются одной из компонент электромагнитного космического излучения, энергетический спектр которого охватывает огромный диапазон (более 30 порядков) от радиоволн до квантов сверхвысоких энергий порядка 10^{20} эВ (рис. 4) [40]. В настоящее время гамма-астрофизика — актуальная и активно развивающаяся область астрономии, поскольку она даёт возможность изучения фундаментальных физических процессов, сопровождающих быстрое преобразование и выделение энергии в ряде космических объектов. Гамма-кванты, в отличие от заряженных частиц, не отклоняются электрическими и магнитными полями и характеризуются большей проникающей способностью; поэтому их регистрация может быть использована для определения местоположения источника излучения. Согласно современным представлениям, космическое гамма-излучение разделяется на два класса: диффузное, более или менее равномерно заполняющее нашу Галактику, и дискрет-

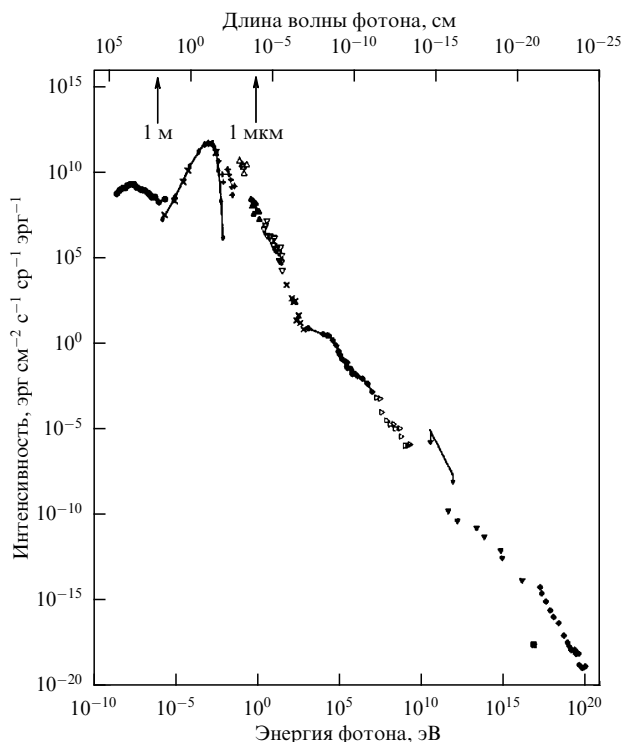


Рис. 4. Объединённый фотонный спектр диффузного внегалактического фонового излучения. График представляет собой компиляцию большого количества экспериментальных данных [40].

ное — так называемые гамма-всплески, рождающиеся в локальных космических объектах не вполне ясной природы.

Ниже перечислены основные процессы, происходящие при прохождении гамма-кванта через вещество [3]:

- фотоэффект — передача всей энергии гамма-кванта одному из электронов атома, который затем расходует её по механизмам взаимодействия электронов с твёрдым телом, обеспечивая возможность спектрометрии гамма-квантов;

- эффект Комптона — рассеяние гамма-кванта на электроне. При этом электрону передаётся только часть энергии гамма-кванта, и процесс поглощения всей энергии кванта является многостадийным. В результате каждого акта взаимодействия кванта с электроном происходит изменение энергии кванта и направления его движения, что позволяет восстановить направление движения кванта до его первого рассеяния в регистрирующей среде;

- эффект образования пар — гамма-квант в электрическом поле ядра рождает пару электрон-позитрон (e^-e^+). Процесс имеет порог по энергии гамма-кванта $E_\gamma = 1024$ кэВ и доминирует при E_γ более ~ 10 МэВ, при этом сечение образования пар растёт с увеличением E_γ и зависит от заряда ядра Z как Z^2 ;

- ядерный фотоэффект — при энергиях выше нескольких десятков МэВ гамма-квант способен выбивать нуклоны из ядра, создавая изотопы или ядра других элементов.

Значительный вклад в изучение Вселенной вносят наземные гамма-обсерватории. С ростом энергии интенсивность потока гамма-квантов быстро падает (рис. 4), и поэтому для его эффективной регистрации необходимо

использовать детекторы с суммарной площадью, превышающей сотни m^2 , что является практически недостижимым для орбитальных приборов. Традиционным инструментом для исследований в наземных условиях являются черенковские телескопы, камеры которых регистрируют вспышки черенковского излучения от релятивистских частиц, составляющих широкие атмосферные ливни, инициированные первичными гамма-квантами и достигающие Земли от далёких космических объектов. Камеры большинства современных черенковских телескопов, например, Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System (VERITAS) [41], содержат вакуумные фотомножители, обладающие рядом недостатков, таких как сравнительно невысокая эффективность детектирования (не более 30%), высокое рабочее напряжение, значительные габариты и вероятность полного выхода из строя при избыточной засветке. Альтернативным вариантом являются доведённые в последнее время до массового выпуска кремниевые фотомножители (Silicon Photomultiplier, SiPM), предусмотренные в конструкциях камер разрабатываемых в настоящее время черенковских гамма-телескопов нового поколения [42, 43].

Космическая гамма-астрономия является независимым направлением, дополняющим наземные исследования в области диапазона квантов низких энергий. Размещение телескопов в космосе даёт возможность регистрировать электромагнитные излучения, для которых земная атмосфера непрозрачна. Комптоновский телескоп COMPTEL [10], запущенный на космическом челноке "Атлантис" 5 апреля 1991 г. и проработавший до 4 июня 2000 г., являлся одним из четырёх телескопов в составе Compton Gamma Ray Observatory (CGRO), имевшей в то время самую большую полезную нагрузку (17 т). Телескоп предназначался для определения положения источников гамма-квантов в диапазоне 0,75–30 МэВ и имел большое поле обзора, порядка 1 ср. В его состав входили две детекторные матрицы: верхняя — жидкий сцинтиллятор NE 213 А и нижняя — сцинтиллятор на основе NaI(Tl). Гамма-кванты регистрировались в результате комптоновского рассеяния в верхнем детекторе и последующей их регистрации в нижнем детекторе. Достиженные характеристики телескопа — угловое разрешение при определении положения источника гамма-излучения порядка 1° и энергетическое разрешение в 5–10% FWHM (Full Width at Half Maximum) — до сих пор являются эталоном при сравнении ожидаемых характеристик в проектах гамма-обсерваторий, предложенных в последнее десятилетие (см. ниже). Отмечается, что сопутствующие спектральные линии в диапазоне 1–3 МэВ, обнаруженные в созвездии Орион, являлись порогом чувствительности телескопа COMPTEL [44]. На основании исследований, выполненных на телескопе, был составлен каталог источников гамма-излучения, включающий 32 постоянных источника и 31 источник гамма-всплесков [45].

В последние 15 лет кремниевые сегментированные планарные детекторы активно внедряются в инструментальную базу гамма-астрофизики. Кремний является наилучшим материалом для создания устройств регистрации траекторий гамма-квантов, учитывая его относительно низкий атомный номер, что определяет доминирование комптон-эффекта по крайней мере в диапазоне энергий в единицы МэВ, а также последние технологические достижения в создании стриповых детекторов и электроники регистрации и обработки сигналов. Разра-

ботки этих детекторов, в том числе и для планируемых в будущем гамма-телескопов, во многом основываются на экспериментальных исследованиях, выполненных в рамках программ и экспериментов в ФВЭ и ядерной физике. Основные требования, предъявляемые к детекторам гамма-излучения, во многом аналогичны требованиям к детекторам для ФВЭ и ядерной физики: высокое координатное и энергетическое разрешение при регистрации вторичных частиц — электронов и e^-e^+ -пар, образующихся при взаимодействии гамма-квантов с детектирующей средой, и быстроедействие, позволяющее выполнять анализ регистрируемых событий. Ниже приводится краткое описание некоторых гамма-обсерваторий, в которых осуществляется либо планируется использование кремниевых сегментированных детекторов.

В космической обсерватории Gamma-ray Large Area Space Telescope (GLAST, ныне Fermi Gamma-ray Space Telescope, FGST или FGRST), предназначенной для исследования излучения в диапазоне энергии 20 МэВ–300 ГэВ, одной из двух систем является Large Area Telescope (LAT) [11], содержащий трекер для преобразования падающего гамма-излучения в e^-e^+ -пары в соответствующем диапазоне энергий и отслеживания траектории пар для определения местоположения источника гамма-излучения. В трекаре LAT применяются SSSDs (авторы используют аббревиатуру SSDs — Single-Sided Detector) и стандартная электроника регистрации сигнала [11, 46].

Для начала XXI в. трекер LAT являлся самой большой детектирующей системой на основе SSSDs, обеспечивающей низкие энергопотребление и уровень шума. На стадии разработки детекторы в количестве 11500 шт. были изготовлены компанией Hamamatsu Photonics на основе пластин n -Si с диаметром 150 мм толщиной 400 мкм и имели p^+ -стрипы, каждый из которых интегрировал разделительный конденсатор. Отдельный SSSD имел площадь $8,95 \times 8,95 \text{ см}^2$ и включал 384 стрипа с шагом 228 мкм. Полная и чувствительная площадь трекара составляли $\sim 74 \text{ м}^2$ и 2 м^2 соответственно. Каждый модуль трекара имел 18 плоскостей, состоящих из двух слоёв (x и y) SSSD, что обеспечивало 2D-чувствительность, причём 16 плоскостей в верхней части трекара чередовались с материалом преобразователя с высоким Z (вольфрам). Матрица, состоящая из 16 SSSD в одном слое модуля LAT, представлена на рис. 5.

При запуске телескопа LAT в 2008 г. трекер включал 16 модулей, сегментированную систему антисовпадений, которая экранировала трекер от фоновых событий, а также программируемый триггер и систему сбора данных [46]. Каждый модуль представлял собой вертикальный набор из 18 плоскостей, включающих x и y SSSDs и слой вольфрама. SSSDs регистрировали прохождение заряженных частиц, измеряя треки образующихся e^-e^+ -пар, что использовалось для восстановления местонахождения источника падающих гамма-квантов. Трекер включал 880 тыс. каналов считывания сигнала. Конструкция LAT была оптимизирована с помощью моделирования методом Монте-Карло. Предварительная проверка конструкции и результатов моделирования характеристик была проведена в серии испытаний на пучках в Центре Стэнфордского линейного ускорителя SLAC, ЦЕРНе и GSI.

Полученные результаты подтвердили, что трекер LAT удовлетворяет требованиям к конструкции и техническим характеристикам, а часто и превосходит их.

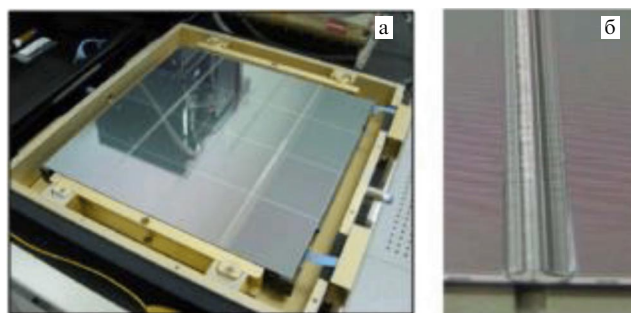


Рис. 5. (а) Сборка 16 микростриповых детекторов в одном слое телескопа Fermi-LAT; (б) часть слоя трекара LAT с межстриповыми соединениями двух SSSDs методом ультразвуковой сварки ("wire bonding") [11].

В 2019 г. Национальное управление США по авиации и исследованию космического пространства (NASA) утвердило продолжение работы космической лаборатории FGRST.

Вместе с тем диапазон энергий гамма-излучения от нескольких десятков кэВ до нескольких сотен МэВ остаётся в значительной степени неисследованным с момента первых, но ограниченных наблюдений на телескопе COMPTEL, закончившихся в 2000 г. Поэтому данный диапазон является специальной целью исследований в концепциях новых космических гамма-обсерваторий, предложенных в последние 20 лет, либо наблюдения в нём входят в полный диапазон энергий. Целью этих проектов является получение данных об источниках гамма-квантов на новом уровне экспериментальных возможностей. Дальнейший прогресс в развитии трекаров, входящих в состав гамма-телескопов, связан с планируемым использованием кремниевых DSSDs. Ниже приведены примеры концепций космических гамма-обсерваторий с акцентом на описание трекаров на основе таких детекторов, тогда как научные задачи обсерваторий подробно описаны в цитируемых статьях.

Концепция космического телескопа средних энергий Medium Energy Gamma-ray Astronomy (MEGA), заявленная в 2002 г. [12], направлена на обзор всего неба в диапазоне гамма-излучений средней энергии (0,4–50 МэВ), продолжающий исследования в этом интервале после прекращения работы телескопа COMPTEL, причём с чувствительностью минимум на порядок выше, чем в COMPTEL (рис. 6). Телескоп будет являться первым шагом для создания обсерватории Advanced Compton Telescope (ACT) в рамках программы NASA, где чувствительность планируется увеличить ещё на порядок. Диапазон средних энергий гамма-квантов имеет особое значение для астрофизических задач, особенно связанных с ядерными, нетепловыми и релятивистскими процессами. Научные цели MEGA направлены на составление расширенного каталога источников гамма-излучения в данном диапазоне энергий и подробно описаны в [12, 47–50]. Получение результатов в телескопе MEGA основано на изучении комптоновского рассеяния (более низкие энергии) и возникновения e^-e^+ -пар при энергии гамма-квантов $E_\gamma > 10 \text{ МэВ}$. В обоих случаях первичное взаимодействие создаёт вторичные частицы с большим пробегом, характеристики которых используются для реконструкции движения первичного гамма-кванта и местонахождения источника.

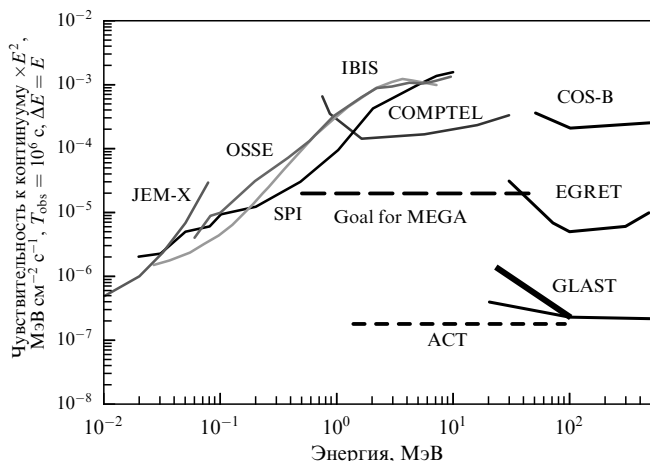


Рис. 6. Кривые чувствительности гамма- и рентгеновских телескопов, включающие и ожидаемую чувствительность телескопа MEGA [48].

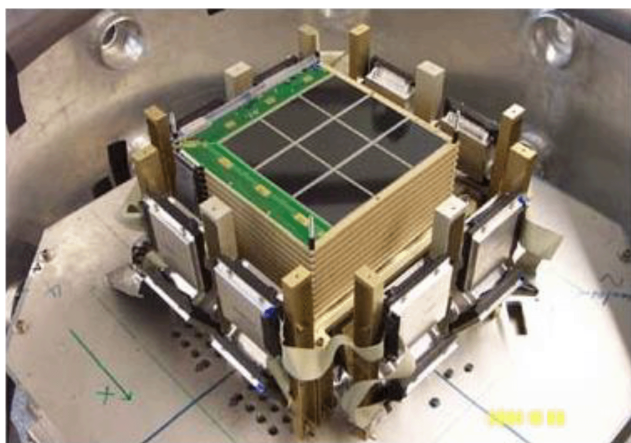


Рис. 7. Прототип телескопа MEGA, где сверху виден слой 3×3 DSSDs [48].

В телескопе предполагается использовать два независимых модуля: трекер, включающий DSSDs, в которых происходит комптоновское рассеяние падающего гамма-кванта либо преобразование его энергии в e^-e^+ -пары, и калориметр на основе пиксельных CsI детекторов для поглощения и измерения энергии вторичных частиц. Для прототипа телескопа (рис. 7) в Институте внеземной физики им. Макса Планка (Гархинг, Германия) были разработаны DSSDs на основе пластин n-Si с удельным сопротивлением ~ 10 кОм см и толщиной 500 мкм и шагом между стрипами 470 мкм. В трекаре планировалось использовать 10 слоёв с 3×3 DSSDs в каждом, а калориметр построить из 20 модулей CsI-детекторов, каждый из которых является сборкой кристаллов размером 10×12 см² и длиной 2, 4 и 8 см. Последние имели p-i-n-диоды на обоих концах, что позволяло определять глубину взаимодействия фотонов по соотношению светового выхода на торцах. Способность отслеживать электроны является основным преимуществом концепции MEGA, поскольку она позволяет уменьшить интенсивность фоновых событий.

Калибровка прототипа MEGA с использованием лабораторных источников ²²Na, ¹³⁷Cs и ⁸⁸Y, проведённая в 2003 г., показала что прототип работает в широком диапазоне энергий и разрешение DSSDs по энергии,

координате и времени соответствует поставленным задачам [48]. Были продемонстрированы хорошие возможности визуализации источников гамма-квантов и запланированы дальнейшие испытания прототипа для изучения методов подавления фона.

Проект космической обсерватории All-Sky-ASTROGAM: a MeV Companion for Multimessenger Astrophysics [51] нацелен на задачи быстрого обнаружения, локализации и гамма-спектроскопии вспышек и слияний компактных объектов во Вселенной с беспрецедентными чувствительностью и поляризметрическими возможностями в диапазоне E_γ порядка единиц МэВ. Он основан на концепции космической гамма-обсерватории e-ASTROGAM (enhanced ASTROGAM) [13, 52, 53] для исследования нетепловых процессов во Вселенной в диапазоне $E_\gamma = 0,3$ МэВ–3 ГэВ, в рамках которой нижний предел диапазона можно довести до 150 кэВ для трекера и 30 кэВ для калориметра. В выделенной в отдельную часть гамма-телескопе ASTROMEV [53] планируются исследования в диапазоне 100 МэВ–1 ГэВ. Реализация обсерватории e-ASTROGAM может дать новые данные о нетепловых процессах в астрофизических объектах, проводя наблюдения за самыми мощными галактическими и внегалактическими источниками. Научные задачи, аспекты исследований процессов, связанных с гамма-излучением, и ожидаемые результаты, основанные на моделировании, подробно описаны в [13, 53].

Полезная нагрузка e-ASTROGAM будет состоять из одного гамма-телескопа весом 1,2 т, работающего в диапазоне 150 кэВ–3 ГэВ. Регистрирующая аппаратура телескопа во многом аналогична аппаратуре телескопа MEGA. В неё входят трекер, состоящий из 56 панелей DSSDs (площадь каждой панели ~ 1 м²), и калориметр для измерения энергии вторичных частиц, представляющий собой матрицу стержней CsI(Tl) с размером каждого из них $5 \times 5 \times 80$ мм³ и относительным разрешением по энергии 4,5% для гамма-квантов с энергией 662 кэВ [53]. Кроме того, имеются система антисовпадений на основе стандартных сцинтилляторов, времяпролётный (Time-of-Flight, ToF) модуль с временным разрешением 300 пс, предназначенный для фильтрации фонового излучения механических частей платформы, модули электроники регистрации сигналов, блок обработки данных и блок питания на основе солнечных панелей.

Планируется, что кремниевый трекер будет регистрировать заряженные частицы — электроны отдачи при $E_\gamma < 10$ МэВ и e^-e^+ -пары при E_γ в диапазоне единиц ГэВ. Он будет включать 5600 DSSDs, расположенных в 56 панелях, разделённых на 4 части по 5×5 DSSDs в каждой, стрипы в которых соединены методом ультразвуковой сварки для формирования 2D-матрицы. Каждый DSSD будет иметь геометрическую площадь $9,5 \times 9,5$ см², толщину 500 мкм и шаг стрипов 240 мкм. Общая площадь детекторов будет составлять 90 м². Такая компоновка детекторов с достаточно малой толщиной позволяет эффективно отслеживать траектории электронов отдачи и e^-e^+ -пар. Сигналы DSSDs будут регистрироваться маломощнейшей электроникой с количеством каналов 860160 шт. с возможностью внутренней синхронизации. Калориметр, эффективно поглощающий гамма-кванты, представляет собой массив, содержащий 33856 параллелепипедов CsI(Tl) длиной 8 см и поперечным сечением 5×5 мм². Сцинтилляции будут регистрироваться кремниевыми дрейфовыми детекторами, рас-

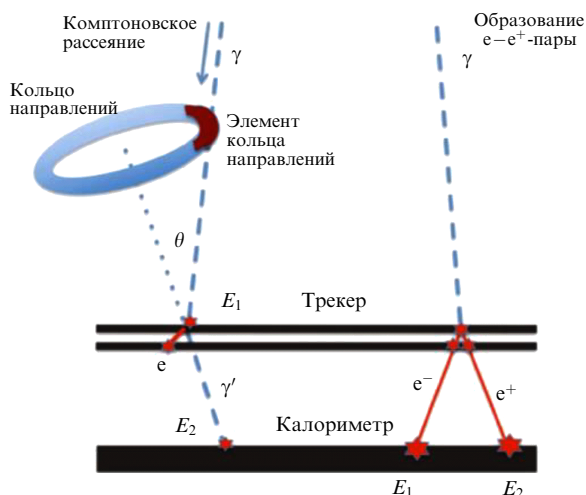


Рис. 8. Иллюстрация событий комптоновского рассеяния, образования e^-e^+ -пар и реконструкции положения источника гамма-квантов в телескопе e -ASTROGAM; показаны два слоя DSSDs из 56 слоёв, формирующих трекер, и калориметр; голубые штриховые линии — треки гамма-квантов; сплошные красные линии — треки электронов и позитронов [53].

положенными на обоих торцах массива в виде матрицы из 529 (23×23) элементарных модулей по 64 кристалла в каждом.

Рисунок 8 иллюстрирует процессы комптоновского рассеяния и образования e^-e^+ -пар в регистрирующей аппаратуре телескопа [53]. Голубые штриховые линии показывают треки гамма-квантов, поглощаемых в трекере и калориметре; сплошные красные линии отображают треки электронов и позитронов. Поэтапная процедура обработки данных по энерговыделению и трекам электронов позволяет вначале определить кольцо направлений движения регистрируемых гамма-квантов и далее выделить элемент кольца направлений.

Требования к характеристикам обсерваторий e -ASTROGAM и ASTROMEV приведены в [13, 52, 53]. Оценки ожидаемых характеристик обсерватории, полученные путём детального моделирования её работы, приведены ниже [53]:

- диапазон энергий регистрируемых гамма-квантов 0,15 МэВ–3 ГэВ при улучшенной почти на два порядка чувствительности при $E_\gamma = 0,3-100$ МэВ по сравнению с телескопом COMPTEL (рис. 9);

- беспрецедентно высокое угловое разрешение в области единиц МэВ и выше нескольких сотен МэВ, превышающее результаты телескопа COMPTEL и Fermi-LAT примерно в 4 раза при энергии гамма-квантов 5 МэВ и 1 ГэВ соответственно (рис. 10);

- новый уровень поляризметрических возможностей как для стационарных, так и для нестационарных источников.

Концепция обсерватории All-sky Medium Energy Gamma-ray Observatory (AMEGO) сочетает в себе высокую чувствительность в диапазоне энергий 200 кэВ–10 ГэВ с широким полем обзора, высокими спектральным разрешением и поляризационной чувствительностью [54–58]. Научная аппаратура обсерватории будет включать трекер на основе DSSDs, 2 калориметра, а также систему антисовпадений [55, 57]. Кремниевый трекер разделён на 4 модульные сборки, каждая из которых состоит из 60 слоёв DSSDs. Калориметр на основе CZT (Cd-Zn-Te) расположен непосредственно под трекером и обеспечивает улучшение характеристик при детектировании комптоновских событий, в то время как CsI калориметр имеет толщину, достаточную для регистрации e^-e^+ -пар для расширения диапазона энергий до 10 ГэВ. Для предварительных испытаний детекторов трекера будут использованы DSSDs, изготовленные Micron Semiconductors, Великобритания. Каждый детектор представляет собой квадрат со стороной 10 см и толщиной 500 мкм, имеющий на каждой стороне 192 стрипа с шагом и шириной ~ 510 мкм и 60 мкм соответственно.

Таким образом, концепция AMEGO основана на богатом наследии телескопа Fermi-LAT и инновационных технологиях, разработанных для детекторов гамма-излучения и космических лучей, что позволит получить более точные данные в расширенном диапазоне энергий от ~ 300 кэВ до более чем 10 ГэВ, в том числе за счёт более чем 20-кратного улучшения чувствительности по сравнению с результатами телескопа COMPTEL в перекрывающемся диапазоне энергий [54].

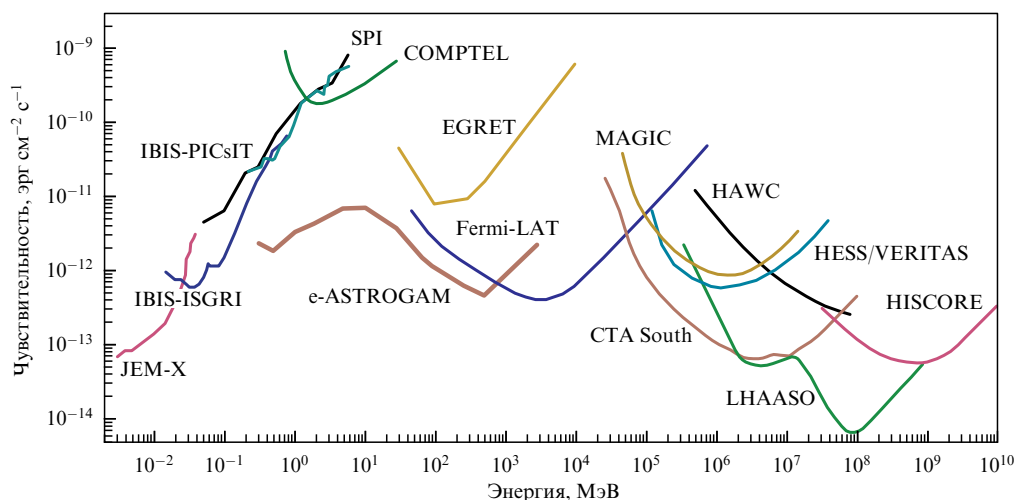


Рис. 9. Дифференциальная чувствительность различных рентгеновских и гамма-телескопов и ожидаемый результат для телескопа e -ASTROGAM [53].

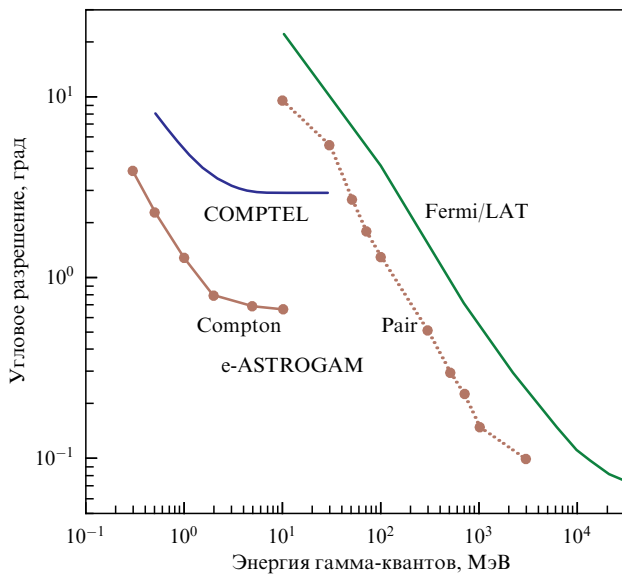


Рис. 10. Угловое разрешение телескопов e-ASTROGAM, COMPTEL и Fermi-LAT [53].

В заключение следует отметить, что успешное функционирование обсерватории FGRST в течение уже почти 20 лет доказывает высокую надёжность научной аппаратуры, в том числе и кремниевых трекеров.

4. Перспективы создания космических гамма-обсерваторий в России

Потенциал России, в том числе ФТИ им. А.Ф. Иоффе, для участия в создании и работе космических обсерваторий для исследований гамма-излучения заключается в двух аспектах. Первым является участие специалистов ФТИ в многоплановых фундаментальных исследованиях космических излучений во Вселенной, выполняемых в рамках международных коллективов. Здесь необходимо упомянуть космическую обсерваторию Payload for Antimatter-Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics (PAMELA) [59–61], задачи которой были связаны с регистрацией лёгких заряженных частиц в космическом излучении в диапазоне энергий от сотен МэВ до ТэВ в целях обнаружения "тёмной" материи и антиматерии в космическом пространстве. В состав регистрирующей аппаратуры обсерватории входил электромагнитный калориметр, состоящий из 44 слоёв SSSDs. Собранные за 10 лет работы данные позволили получить новые результаты в отношении состава космического излучения и влияния на него солнечной активности. Кроме этого, впервые был зарегистрирован пояс антипротонов, окружающий Землю.

Другим примером являются фундаментальные исследования космических гамма-всплесков, история и результаты которых представлены в [62, 63]. С середины 1960-х годов специалистами ФТИ такие исследования проводились на космических аппаратах серии "Космос" и станциях "Венера"; для последних была изготовлена высокочувствительная научная аппаратура КОНУС на основе сцинтилляционных детекторов. Позднее исследования были продолжены в международном эксперименте КОНУС-ВИНД и эксперименте Геликон ФТИ им. А.Ф. Иоффе. В последнем случае аппаратура находи-

лась на расстоянии 200 км от Земли, и в 2004 г. это позволило зарегистрировать отражение от Луны гигантской вспышки гамма-квантов с энергией $2,3 \times 10^{46}$ эрг [64].

Вторым аспектом является то, что специалисты ФТИ им. А.Ф. Иоффе более 20 лет принимают участие в разработке и исследованиях кремниевых детекторов. Это связано с работами на БАК в коллаборациях ЦЕРН: ROSE, RD39 и RD50 [65–71], — направленными на улучшение радиационной стойкости детекторов. Необходимо также отметить вклад в физические исследования кремниевых детекторов в программе создания внутреннего трекера эксперимента ЦЕРН-АТЛАС [72, 73], разработку концепции и изготовление детекторов для эксперимента ЦЕРН-TOTEM [74] и участие в пилотном проекте ЦЕРНа по разработке кремниевых криогенных мониторов пучка протонов для БАК [75]. В течение последних 10 лет ряд работ выполнен совместно с центром GSI (эксперименты CBM и EXL и коллаборация по разработкеToF-диагностики ионов для сепаратора ионов в GSI) [22, 76–79] и Объединённым институтом ядерных исследований (Дубна) [80]. В области разработки и изготовления кремниевых детекторов для задач ФВЭ и ядерной физики в течение многих лет ФТИ осуществляет сотрудничество с организациями технологического профиля в г. Зеленограде. Всё это определяет компетенции и потенциал института при решении задач по созданию кремниевых детекторов и устройств на их основе.

Ещё одним направлением, развиваемым в институте, является разработка электронных устройств регистрации излучений для черенковских телескопов и позиционно-чувствительных кремниевых сегментированных детекторов [81–85]. С целью отработки технологий создания камер черенковских гамма-телескопов четвёртого поколения (в частности, в рамках проекта ALEGRO [81]) и повышения эффективности работы существующих черенковских гамма-обсерваторий в институте осуществляется разработка детекторного кластера на основе фотодетекторов типа SiPM для действующего черенковского телескопа TAIGA-IACT [85].

Компетенции ФТИ в работах по кремниевым детекторам включают следующие направления:

1. Физика полупроводниковых детекторов:
 - моделирование характеристик кремниевых детекторов и оптимизация их структуры и условий работы [68, 69, 86–94];
 - физическое обоснование конструирования кремниевых детекторов [74, 88, 95–98];
 - исследования радиационных воздействий на детекторы и моделирование сценария радиационной деградации в стандартных условиях [37, 94, 95, 99–104];
 - исследования радиационной деградации детекторов в криогенных условиях вплоть до температуры 1,9 К [75, 105–111];
 - исследование формирования сигнала в сегментированных детекторах [22, 23, 80, 92, 111–114].
2. Разработка и поставка кремниевых детекторов:
 - кремниевые мини-детекторы для исследования в рамках научных программ коллабораций CERN-RD39 и CERN-RD50 (1997–2022 гг.);
 - полный комплект детекторов с торцевой чувствительностью (так называемые "edgeless" детекторы) для эксперимента CERN-TOTEM (2005–2007 гг.); детекторы в количестве 400 шт. до сих пор успешно используются в эксперименте [115];

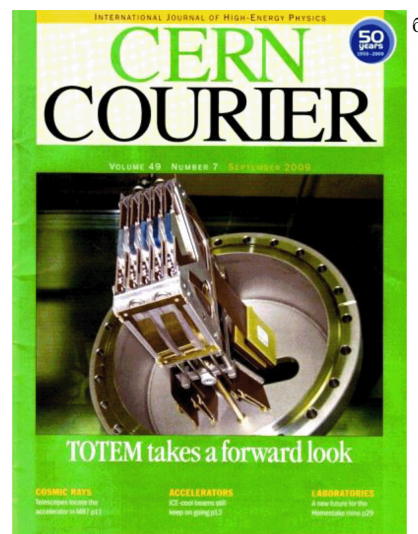
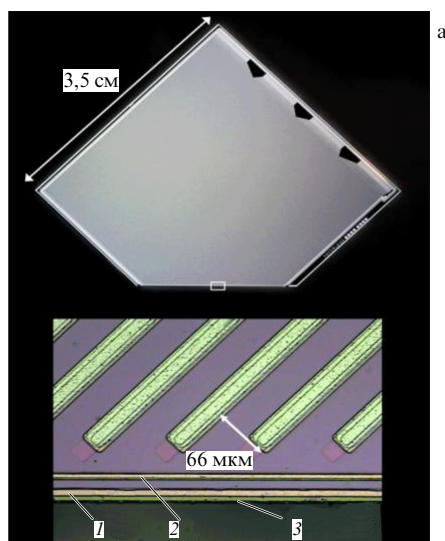


Рис. 11. "Edgeless" детекторы для эксперимента TOTEM: (а) кремниевый чип детектора с микрофотографией его чувствительного торца [96], 1 — кольцо, ограничивающее ток, 2 — охранный кольцо, 3 — чувствительный торец; (б) сборка детекторов, установленных на фланце.

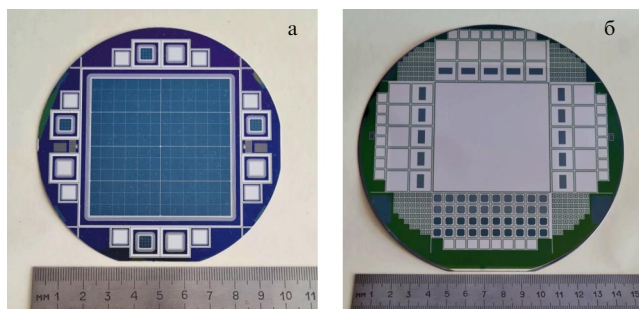


Рис. 12. Планарные сегментированные кремниевые детекторы: (а) пиксельный 2×4 детектор размером 60×60 мм для экспериментов по программе FAIR, пластина диаметром 100 мм, (б) детекторы разных типов, включая SSSD в центре, пластина диаметром 150 мм.

- прототипы мониторов потерь частиц протонного пучка БАК для работы при температуре 1,9 К (2012–2015 гг.) [116];

- опытная партия спектрометрических DSSDs, программа FAIR, эксперимент NuSTAR-EXL, GSI (2007–2010 гг.);

- тестовые образцы и прототипы SSSDs для TOF с временным разрешением < 50 пс, программа FAIR, Super-FRS (2015–2017, 2021–2022) [22].

Примеры кремниевых детекторов, разработанных и изготовленных для экспериментов на БАК и в GSI, проиллюстрированы на рис. 11 и 12. Отметим, что "edgeless" SSSDs для эксперимента TOTEM, предназначенные для измерения малоуглового рассеяния протонов при столкновении их встречных пучков, имеют уникально малую "мёртвую" зону между полосами и торцом детекторного чипа, составляющую ~ 45 мкм [74, 96]. При этом темновые токи и диапазон рабочих напряжений детекторов до облучения имел такие же значения, как и у обычных SSSDs.

Потенциал ФТИ им. А.Ф. Иоффе в области гамма-астрофизики и разработки детектирующих устройств предполагается объединить в проекте гамма-телескопа ГЕРМЕС [14], ориентированном на задачи ядерной

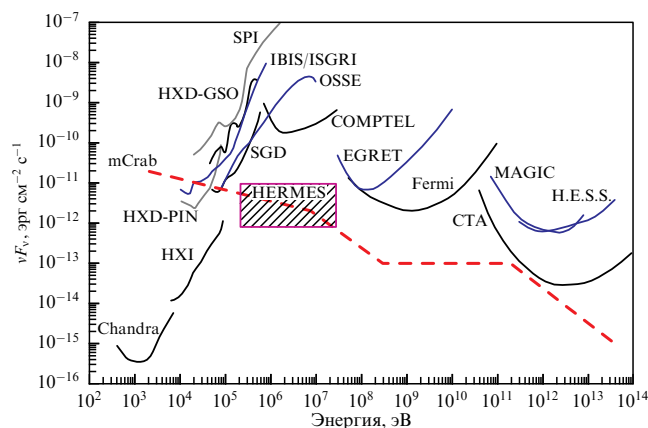


Рис. 13. Чувствительность телескопов гамма-квантов. Красная линия показывает поток энергии, соответствующий уровню 10^{-3} от значения, характерного для Крабовидной туманности [14].

спектроскопии, для которых актуальна регистрация гамма-квантов в диапазоне энергий 0,3–10 МэВ. До настоящего времени максимальная чувствительность измерений в указанном диапазоне была достигнута на телескопе COMPTEL, оборудованном сцинтилляционным детектором. На рисунке 13 обозначен и уровень чувствительности для кремниевого трекера в предлагаемом телескопе ГЕРМЕС. В дополнение к этому ограничение диапазона исследований по энергии гамма-квантов до 10 МэВ позволяет отказаться от калориметра и тем самым улучшить весовую характеристику телескопа.

Как следует из раздела 3, создание трекеров на основе кремниевых детекторов для гамма-телескопов, предложенных в последние годы, является такой же широко-масштабной задачей, как и создание инструментальной базы экспериментов на БАК. Возможность реализации требуемых характеристик трекера в обсерватории ГЕРМЕС иллюстрируется в табл. 2, в которой приведено сравнение параметров структур, использованных в топологии сенсоров, разработанных специалистами ФТИ, и параметров DSSDs, планируемых для космической обсерватории e-ASTROGAM.

Таблица 2. Характеристики DSSDs, планируемых для трекера телескопа e-ASTROGAM, и стриповых детекторов, разработанных в ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Характеристики	e-ASTROGAM [13]	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
Толщина чувствительной области, мкм	500	300–1000
Рабочее напряжение, В	до 400	400
Площадь детектора, см ²	9,5 × 9,5	10 × 10
Шаг стрипов, мкм	240	500–1000
Ток стрипа при 0 °С, нА мм ⁻²	0,007	0,004

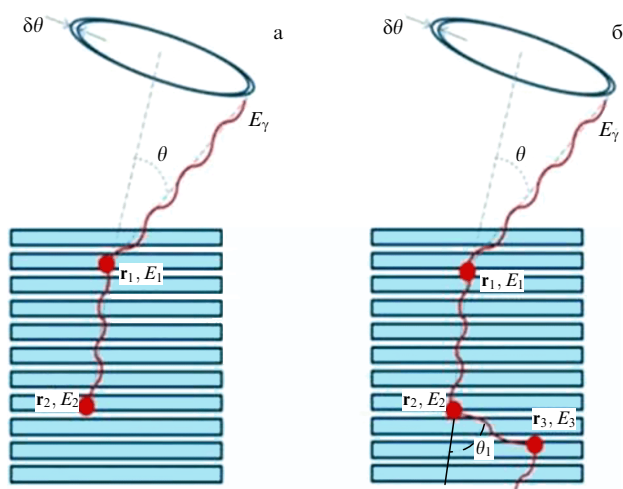


Рис. 14. Комптоновский процесс регистрации гамма-кванта в кремниевом трекере: (а) двухстадийный процесс с полным поглощением энергии кванта, (б) трёхстадийный процесс с частичным поглощением энергии кванта; \mathbf{r} — вектор, определяющий точку, где произошло комптоновское рассеяние.

Решение задачи создания кремниевых детекторов для трекеров требует подхода, учитывающего специфику поглощения гамма-квантов в кремнии. Процесс регистрации гамма-кванта, позволяющий определить энергию кванта и восстановить направление его движения к трекеру, проиллюстрирован на рис. 14. Гамма-квант, падающий на поверхность детектора под углом θ с энергией E_γ , испытывает комптоновское рассеяние на электроне в некоторой точке одного из кремниевых детекторов трекера, образуя при этом электрон отдачи с энергией E_1 и уменьшая свою энергию до $E_\gamma - E_1$. Рассеянный гамма-квант, продолжая движение уже в новом направлении, имеет вероятность повторно рассеяться на электроне в другой точке трекера, передав ему энергию E_2 и, соответственно, ещё раз изменить энергию и направление движения. Выражение, связывающее θ и потери энергии E_1 и E_2 , позволяют определить угол падения гамма-кванта на детектор:

$$\cos \theta = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right), \quad (10)$$

где $m_e c^2 = 511$ кэВ — энергия покоя электрона. Таким образом, в трекере должны реализоваться условия для как минимум двукратного взаимодействия кванта с электронами и определения 3D-координат точек образования электронов отдачи и их энергии.

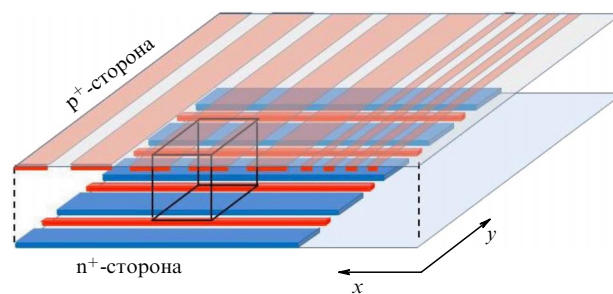


Рис. 15. Схематичное изображение DSSD. Стрипы на p^+ - и n^+ -сторонах показаны светло-коричневым и синим цветом соответственно; красные элементы на n^+ -стороне в межстриповых промежутках — p^+ -изоляция. Объём чувствительной ячейки показан как параллелепипед.

Отметим, что кремний является предпочтительным материалом в отношении влияния доплеровского эффекта на разрешение, которое пропорционально величине Z .

Таким образом, детектор, оптимальный для регистрации электронов отдачи, должен представлять собой матрицу объёмных чувствительных ячеек, рождение электрона в которых всегда будет давать стандартный набор данных, т.е. три координаты точки образования электрона и его энергию. Исходя из конструкций детекторов, описанных в разделе 2, такая возможность может быть реализована в структуре пиксельного детектора либо в DSSD; последний схематично показан на рис. 15. Следует отметить, что пиксельный детектор обладает максимальной скоростью регистрации частиц и даёт однозначную информацию о месте детектирования каждой из них. Основным отмеченным выше недостатком является большое количество параллельных каналов электроники, требуемых для регистрации сигналов, равное $A_x A_y$. Использование DSSDs даёт экономию в количестве каналов электроники, которое определяется как $A_x + A_y$, однако при этом снижается максимальная скорость регистрации частиц, поскольку при попадании в один стрип двух частиц возникает неоднозначность, приводящая к потере произошедшего события. Однако при невысокой интенсивности излучения, ожидаемой в эксперименте ГЕРМЕС, экономия в количестве электронных каналов аргументирует использование DSSDs. Такой детектор схематично показан на рис. 15. Детектор изготовлен из пластины n-Si, на её верхней и нижней сторонах создаются ортогональные матрицы p^+ - и n^+ -стрипов соответственно. Стрипы на верхней стороне формируют p^+ -n-переходы, разделённые промежутком, покрытым изолирующим слоем SiO_2 . Аналогичное разделение выполняется и на n^+ -стороне с добавлением p^+ -изолирующих элементов между стрипами. Чувствительные ячейки, одна из которых показана чёрными линиями, формируются в месте пересечения проекций ортогональных стрипов.

Описание DSSDs будет неполным без представления двух важных элементов: VTS на стороне p^+ -стрипов и p^+ -изоляции в межстриповых промежутках на n^+ -стороне. Именно эти элементы определяют стабильность статических характеристик DSSDs и диапазон возможных рабочих напряжений. Структура VTS используется практически во всех видах планарных детекторов и позволяет оптимизировать распределение электрического поля на периферии рабочей области детектора, избегая

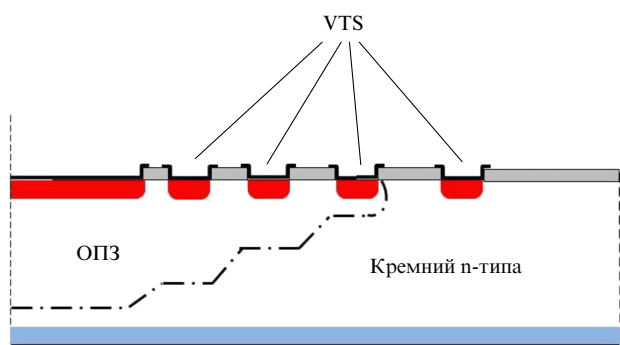


Рис. 16. Структура VTS на p^+ -стороне детектора с четырьмя кольцами одинаковой ширины и различной шириной межкольцевых промежутков. Штрихпунктирная линия показывает границу ОПЗ при приложенном к детектору напряжении, активирующем только три кольца VTS.

электрического пробоя. На рисунке 16 приведён разрез детектора с VTS, представляющей последовательность изолированных p^+ -колец, расположенных вокруг p^+ -области основного перехода, к которой прикладывается рабочее напряжение, тогда как нижняя n^+ -сторона детектора заземлена. При отсутствии структуры VTS всё напряжение между p^+ - и n^+ -контактами будет приложено к границе основного перехода, где неизбежно возникнет локальная область с увеличенной напряжённостью электрического поля. В литературе описано несколько способов контроля электрического поля на границе p^+ - n -перехода, в том числе и путём её механического профилирования (например, изготовления фаски), что не согласуется с операциями планарной технологии. Поэтому создание VTS, включающей изолированные p^+ -кольца, является общепринятым для планарных детекторов и формируется в едином технологическом процессе изготовления всего детектора. Функционирование VTS основано на закономерностях распределения потенциала между изолированными p^+ - n -переходами, расположенными на некотором расстоянии друг от друга [93, 94, 117, 118]. В такой системе переходов потенциал от основного p^+ - n -перехода передаётся на изолированные переходы при смыкании границ отдельных областей пространственного заряда. При этом создаются условия для протекания тока между p^+ -областями и возникновения общей ОПЗ (рис. 16).

Смыкание границ между соседними p^+ - n -переходами является формальным объяснением эффекта распространения электрического поля в VTS. Здесь необходимо пояснить, что граница ОПЗ-перехода всегда размыта в связи с диффузионно-дрейфовыми процессами, контролирующими распределение концентраций свободных электронов и дырок. Последнее зависит не только от профиля легирования p^+ -областей, но и от заряда в окисле между ними. Поскольку заряд в слое SiO_2 положителен, движение дырок под интерфейсом $\text{Si}-\text{SiO}_2$ прерывается, причём чем больше этот заряд, тем большая разность потенциалов между кольцами является необходимой для протекания тока и объединения ОПЗ соседних колец. Такое состояние VTS показано на рис. 16, где ОПЗ объединяет 3 кольца, и её граница (штрихпунктир) имеет ступенчатый характер в силу различных потенциалов, установившихся на отдельных кольцах. Объединение ОПЗ четвёртого кольца с первыми тремя требует приложения к основному переходу ещё большего напряжения.

Величины токов между p^+ -областями, связывающих кольца в единую систему, определяются темновыми токами, генерируемыми в чувствительной области детектора, и лежат в диапазоне от пА до десятков нА, что предъявляет высокие требования к VTS.

Важно отметить, что условие возникновения и поддержания токовой связи между кольцами зависит не только от состояния окисла, но и от компоненты напряжённости электрического поля в области межкольцевого промежутка, нормальной к поверхности p -стороны детектора и зависящей от напряжения. Несмотря на значительное количество параметров, система указанных процессов стабилизируется условием открытия упомянутого токового канала между кольцами для дрейфа дырок, что определяет распределение потенциала по кольцам и электрических полей во всех точках ОПЗ при любом напряжении. Практически важным является то, что установление потенциала на кольцах происходит автоматически и при правильно сконструированной VTS характеризуется последовательным уменьшением его величины от максимума на центральном p^+ -электроде до нуля на последнем кольце.

Задача моделирования и оптимизации VTS требует решения системы уравнений, описывающих статические распределения электрического поля и токов в объёме детектора. Для этого используются профессиональные пакеты программ, моделирующих полную совокупность основных процессов в $p-i-n$ -структурах, т.е. генерацию, рекомбинацию, дрейф и диффузию электронов и дырок, распределение легирующих примесей, процессы на интерфейсах и т.п. в количественных 2D- или 3D-моделях детектора. В качестве примера ниже приведены результаты 2D-моделирования работы критических элементов DSSDs, включающих VTS и p^+ -изоляция n^+ -стрипов.

На рисунке 17а показан результат моделирования 2D-распределения электрического поля в VTS кремниевого детектора при $V = 500$ В. Распределение характеризуется максимумами электрического поля в областях внешних границ металлизации колец, находящихся на слое SiO_2 . Их значения уменьшаются по мере удаления кольца от основного p^+ - n -перехода (рис. 17б), а максимальная величина у границы чувствительной области не превосходит 10^5 В см $^{-1}$ (красная область на рис. 17а), что как минимум в 2 раза ниже значений, при которых возможен электрический пробой за счёт ударной ионизации. Следует заметить, что моделирование электрического поля выполнено в 2D-пространстве, когда границы колец и профили легирования гладкие, т.е. неоднородности в направлении оси, перпендикулярной поверхности сечения структуры, отсутствуют.

Вторым критическим элементом DSSD является межстриповая изоляция n^+ -сегментированного контакта детектора. Для этого контакта описанная выше простая сегментация по аналогии с p^+ -стрипами не приводит к электрической изоляции стрипов в силу встроенного положительного заряда в SiO_2 , расположенном в промежутке между n^+ -стрипами, что ведёт к возникновению слоя аккумулярованных электронов под SiO_2 . Такой слой электрически соединяет соседние n^+ -контакты, образуя единый несегментированный n^+ -контакт. Эффективным решением проблемы является окружение каждого n^+ -стрипа p^+ -кольцом (аналогично n^+-p-p^+ -детектору) или создание общей p^+ -сетки на n -стороне, в ячейках которой располагаются n^+ -стрипы.

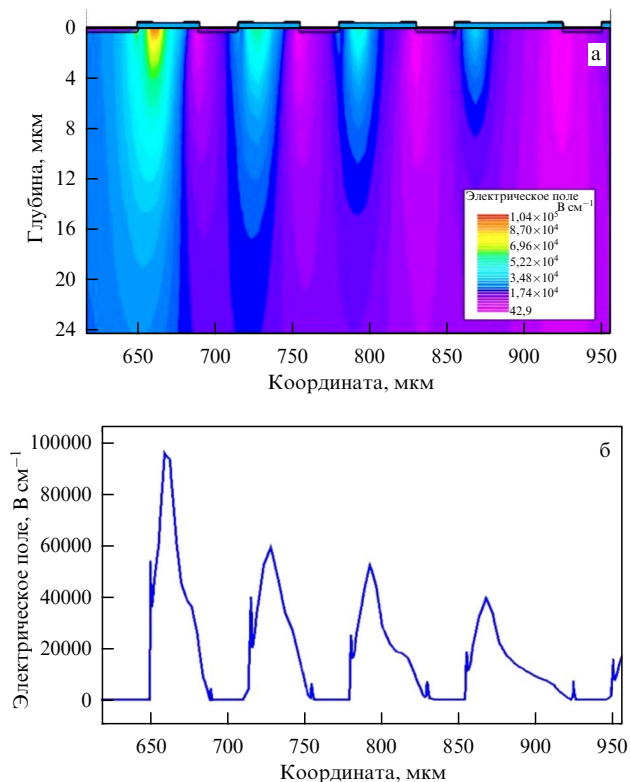


Рис. 17. Фрагмент рассчитанного распределения электрического поля в области четырёх колец VTS при $V = 500$ В, слева расположен основной p^+ – n -переход: (а) 2D-распределение электрического поля, (б) профиль электрического поля на глубине 0,6 мкм.

Приложение напряжения к детектору вызывает отток дырок из этого p^+ -элемента межстриповой изоляции, в силу чего на нём возникает потенциал, отличный от потенциала n^+ -стрипов на десятки, а при неоптимальной конструкции и на сотни вольт. На рисунке 18а и б приведены результаты моделирования электрического поля между n^+ -стрипами, изолированным p^+ -элементом. Видно, что отток дырок из p^+ -изолирующей структуры вызывает существенные особенности в распределении поля в межстриповом промежутке. Под p^+ -элементом возникает область с минимумом электрического поля, которая разрывает электрическую связь между соседними стрипами. При этом разность потенциалов между p^+ -элементом и соседними n^+ -стрипами оказывается существенной, что следует из величины максимума поля $\sim 6 \times 10^4$ В см $^{-1}$. Аналогично распределениям на p^+ -стороне детектора, такие максимумы локализованы у границы металлизации стрипов (красная область на рис. 18а).

Приведённые результаты численного моделирования критических элементов DSSDs показывают, что в VTS и межстриповой изоляции n^+ -стрипов максимальное поле возникает на границе металлизации, расположенной на слое SiO $_2$. При $V = 500$ В наибольшая величина поля в пиках составляет 1×10^5 и 6×10^4 В см $^{-1}$ для p - и n -стороны соответственно, что ниже напряжённости поля, инициирующей лавинный пробой. Заметим, что реальное электрическое поле в критических элементах изготовленного детектора зависит от характеристик кремния, образующего чувствительный объём, наличия в нём дефектов, свойств окисла и точности фотолитографии, структурирующей границы областей легирования, слоя

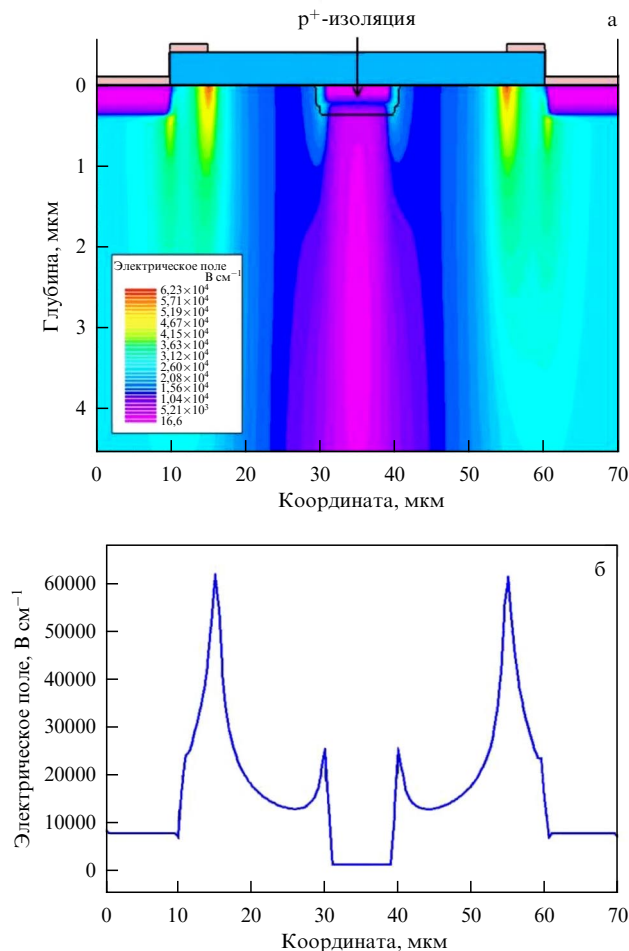


Рис. 18. Фрагмент рассчитанного распределения электрического поля в сечении межстрипового промежутка с межстриповой p^+ -изоляцией на n^+ -стороне детектора: (а) 2D-распределение электрического поля, (б) профиль электрического поля на глубине 0,6 мкм. $V = 500$ В.

SiO $_2$ и металла. С практической точки зрения полученный результат следует рассматривать как оценку идеальных характеристик детектора, поскольку любые резкие выступы на границе металлизации (протяжённые дефекты в объёме кремния, дефекты фотолитографии и пр.) могуткратно усилить эффект фокусировки поля на тонких p^+ - и n^+ -слоях [73, 113] и привести к нестабильностям и пробойным эффектам. Данное замечание существенно для разработок сложных конструкций детекторов, какими являются DSSDs, с суммарной длиной границ элементов, достигающей 60 метров (DSSDs размером 10×10 см 2 с количеством стрипов в 100 шт. на каждой стороне).

5. Заключение

Этапы развития инструментальной базы гамма-астрономии подобны этапам, пройденным в развитии экспериментальной базы ФВЭ. Новые идеи для ФВЭ, потребовавшие получения экспериментальных данных качественно нового уровня при повышении энергии и интенсивности пучков частиц, стимулировали создание новых регистрирующих устройств, в том числе универсальных кремниевых детекторов и устройств на их основе. Наиболее ярким результатом явились работы на БАК в

ЦЕРНе, в которых экспериментальная база была детально аттестована международным научным сообществом и получением уникальных фундаментальных результатов, например, обнаружением бозона Хиггса. Аналогичный процесс происходит и в экспериментальной астрофизике, где гамма-телескопы, построенные на сцинтилляционных детекторах, уже не соответствуют по чувствительности и угловому разрешению новым фундаментальным задачам. Планируемым для создания новых гамма-телескопов является переход к кремниевым детекторам, позволяющим создать регистрирующую 3D-среду с объёмом до 1 м^3 , чувствительную к гамма-квантам и дающую $3D + t$ информацию, необходимую для определения положения их источника во Вселенной. Эти задачи могут быть решены на основе накопленного опыта в использовании уже существующих типов кремниевых детекторов и технологий производства их крупных партий.

Представленный обзор позволяет заключить, что в настоящее время не существует принципиальных ограничений на характеристики создаваемых космических гамма-телескопов. Во многом ограничения определяются уровнем финансирования работ и возможностями носителей для вывода телескопов на орбиту. В связи с этим упомянутый в работе проект ГЕРМЕС относится к специализированной задаче исследований, ориентированных на диапазон энергий от сотен кэВ до 10 МэВ, в котором гамма-кванты взаимодействуют с кремнием преимущественно посредством комптоновского рассеяния, и поэтому конструкция телескопа не требует включения массивного калориметра и времяпролётного детектора, что существенно уменьшает вес телескопа, его стоимость и расходы на запуск.

Детектирующую среду такого телескопа оптимально построить на основе кремниевых DSSDs. Для гарантированной стабильной работы DSSDs в космосе на стадии разработки требуется детальное моделирование конструкции их критических элементов. Приведённые характеристики прототипов DSSDs для планируемых обсерваторий e-ASTROGAM и ГЕРМЕС показывают реальность создания в России современных гамма-телескопов на основании опыта исследования космических излучений, физики полупроводниковых детекторов и существующей технологической базы разработок кремниевых детекторов.

Исследования по разработке и исследованиям кремниевых детекторов были поддержаны грантом РФФИ №05-02-08337офи_а, Программами Президиума РАН "Экспериментальные и теоретические исследования фундаментальных взаимодействий, связанные с работами на ускорительном комплексе ЦЕРН" и "Физика высоких энергий и нейтринная астрофизика" и европейскими грантами CERN-INTAS, №№99-850, 03-52-5744, 05-103-7533 и GSI-INTAS, №06-1000012-8844.

Список литературы

- Lutz G *Semiconductor Radiation Detectors: Device Physics* (Berlin: Springer-Verlag, 1999); Lutz G *Semiconductor Radiation Detectors: Device Physics* (Berlin: Springer-Verlag, 2007) <https://doi.org/10.1007/978-3-540-71679-2>
- Fabjan C W, Schopper H (Eds) *Particle Physics Reference Library Vol. 2 Detectors for Particles and Radiation* (Berlin: Springer, 2011)
- Акимов Ю К *Полупроводниковые детекторы ядерных излучений* (Дубна: ОИЯИ, 2009)
- Knoll G F *Radiation Detection and Measurement* 4th ed. (Hoboken, NJ: John Wiley, 2010)
- Béjar A I et al. (Eds) "High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC)", Technical Design Report (CERN Yellow Reports: Monographs, CERN-2020-010) (Geneva: CERN, 2020) <https://doi.org/10.23731/CYRM-2020-0010>
- Moll M *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 1561 (2018)
- Hartmann F (ATLAS, ALICE, CMS, LHCb Collab.) *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **924** 250 (2019)
- Szumlak T (RD50 Collab.) *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **958** 162187 (2020)
- Dalla Betta G-F, Ye J "Silicon radiation detector technologies: from planar to 3D" *Chips* **2** (2) 83 (2023)
- Schönfelder V et al. *Astrophys. J. Suppl.* **86** 657 (1993)
- Atwood W B et al. *Astrophys. J.* **697** 1071 (2009)
- Bloser P F et al. (MEGA Collab.) *New Astron. Rev.* **46** 611 (2002)
- De Angelis A et al. *J. High Energy Astrophys.* **19** 1 (2018)
- Krassilchtchikov A M et al. *J. Phys. Conf. Ser.* **1400** 022031 (2019)
- Sze S M, Ng K K *Physics of Semiconductor Devices* 3rd ed. (Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2007) <https://doi.org/10.1002/0470068329>
- Ramo S *Proc. IRE* **27** 584 (1939)
- Jacoboni C et al. *Solid-State Electron.* **20** 77 (1977)
- Affolder A (ATLAS Collab.) *Phys. Procedia* **37** 915 (2012)
- Unno Y et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **731** 183 (2013)
- Unno Y et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **765** 80 (2014)
- Pellegrini G et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **566** 360 (2006)
- Kiselev O A et al., in *Exotic Nuclei. Proc. of the Intern. Symp. on Exotic Nuclei, EXON-2014, Kaliningrad, Russia, 8–13 September 2014* (Eds Yu E Penionzhkevich, Yu G Sobolev) (Singapore: World Scientific, 2015) p. 607, https://doi.org/10.1142/9789814699464_0061
- Eremin V et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **796** 158 (2015)
- Nakamura K et al. *JINST* **10** C06008 (2015)
- Ostrowski A N et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **480** 448 (2002)
- Takeda S et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **579** 859 (2007)
- Pellegrini G et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **765** 12 (2014)
- Pellegrini G et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **831** 24 (2016)
- Kramberger G et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **891** 68 (2018)
- Kramberger G et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **898** 53 (2018)
- Carulla M et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **924** 373 (2019)
- Parker S I, Kenney C J, Segal J *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **395** 328 (1997)
- Kenney C et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **46** 1224 (1999)
- Fleta C et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **579** 642 (2007)
- Pellegrini G et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **592** 38 (2008)
- Dalla Betta G-F et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **624** 459 (2010)
- Eremin V, Verbitskaya E, Li Z *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **476** 537 (2002)
- Lindström G, Moll M, Fretwurst E *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **426** 1 (1999)
- Kramberger G et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **481** 297 (2002)
- Griender P K F "Ch. 5. Primary Cosmic Radiation", in *Cosmic Rays at Earth. Researcher's Reference Manual and Data Book* (Amsterdam: Elsevier, 2001) p. 669
- Holder J et al. *Astropart. Phys.* **25** 391 (2006)
- Coleman A et al. *Astropart. Phys.* **149** 102819 (2023)
- Холупенко Е Е и др. *ЖТФ* **90** 925 (2020) <http://dx.doi.org/10.21883/JTF.2020.06.49278.354-19>; Kholupenko E E et al. *Tech. Phys.* **65** 886 (2020)
- Bykov A, Bloemen H *Astron. Astrophys.* **283** L1 (1994)
- Schönfelder V et al. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **143** 145 (2000)
- Atwood W B et al. *Astropart. Phys.* **28** 422 (2007)
- Kanbach G et al. *New Astron. Rev.* **48** 275 (2004)
- Bloser P F et al. *Chin. J. Astron. Astrophys.* **6** 388 (2006)
- Bloser P F et al. *New Astron. Rev.* **50** 619 (2006)
- Zoglauer A et al. *New Astron. Rev.* **50** 624 (2006)
- De Angelis A et al. *PoS ICRC2019* 579 (2019)
- The e-ASTROGAM Collab., De Angelis A et al. *Exp. Astron.* **44** 25 (2017)

53. De Angelis A et al. *Exp. Astron.* **51** 1225 (2021)
54. Moiseev A (AMEGO Team) *PoS ICRC2017* 798 (2017)
55. Caputo R, Kislak F, Racusin J *PoS ICRC2017* 783 (2017)
56. Orlando E et al. *PoS ICRC2019* 590 (2019)
57. Griffin S (AMEGO Team), arXiv:1902.09380
58. McEnery J E et al., arXiv:1907.07558
59. Boezio M et al. *Hyperfine Interact.* **213** 147 (2012)
60. Mori N et al. *Nucl. Part. Phys. Proc.* **265–266** 242 (2015)
61. Galper A M et al. *J. Phys. Conf. Ser.* **798** 012033 (2017)
62. Aptekar R L et al. *PoS GRB2012* 118 (2012)
63. Аптекарь Р Л и др. *УФН* **189** 785 (2019); Aptekar R L et al. *Phys. Usp.* **62** 739 (2019)
64. Mazets E P et al. *Astrophys. J.* **680** 545 (2008)
65. Lindström G et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **465** 60 (2001)
66. Casagrande L et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **461** 150 (2001)
67. Collins P et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **447** 151 (2000)
68. Niinikoski T O et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **520** 87 (2004)
69. Li Z et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **718** 266 (2013)
70. Moll M, RD50 Collab. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **511** 97 (2003)
71. Affolder A et al. *PoS Vertex2013* 26 (2013)
72. Eremin V, Li Z, Iljashenko I *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **360** 458 (1995)
73. Eremin V et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **535** 622 (2004)
74. Ruggiero G, Eremin V, Noschis E *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **582** 854 (2007)
75. Bartosik M R et al., CERN-BE-2014-009 BI (Geneva: CERN, 2014)
76. Ablyazimov T et al. *Eur. Phys. J. A* **53** 60 (2017)
77. Zamora J C et al. *Phys. Rev. C* **96** 034617 (2017)
78. Kiselev O et al., GSI Scientific Report GSI-SR2012-PHN-ENNA-EXP-42172 (Darmstadt: GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, 2012)
79. Kostyleva D et al. *Acta Phys. Polon. B* **49** 503 (2018)
80. Eremin V et al. *JINST* **12** C03001 (2017)
81. Быков А М и др. *ЖТФ* **87** 803 (2017); Вуков А М et al. *Tech. Phys.* **62** 819 (2017)
82. Холупенко Е Е и др. *Ядерная физика и инжиниринг* **7** (1) 37 (2016); Пер. на англ. яз.: Kholupenko E E et al. *Phys. Atom. Nucl.* **79** 1542 (2016)
83. Bogdanov A A et al. *J. Phys. Conf. Ser.* **1400** 055050 (2019)
84. Тубольцев Ю В и др. *ИТЭ* (6) 39 (2019); Tuboltsev Y V et al. *Instrum. Exp. Tech.* **62** 764 (2019)
85. Bogdanov A A et al. *St. Petersburg State Polytech. Univ. J. Phys. Math.* **16** 410 (2023) <https://doi.org/10.18721/JPM.161.262>
86. Verbitskaya E et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 258 (2002)
87. Eremin V et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **583** 91 (2007)
88. Noschis E, Eremin V, Ruggiero G *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **574** 420 (2007)
89. Eremin V, Verbitskaya E *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **612** 516 (2010)
90. Li Z et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **617** 552 (2010)
91. Verbitskaya E et al. *JINST* **11** P12012 (2016)
92. Peltola T et al. *JINST* **12** P09032 (2017)
93. Вербицкая Е М и др. *ФТП* **45** 547 (2011); Verbitskaya E M et al. *Semiconductors* **45** 536 (2011)
94. Fadeeva N N "Радиационная деградация функционирования кольцевых структур в кремниевых детекторах ядерных излучений", Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (СПб.: С.-Петербург. гос. электротехн. ун-т (ЛЭТИ) им. В.И. Ульянова (Ленина), 2013)
95. Ерёмин И В "Критические элементы p-i-n структур на основе высокоомного кремния. Анализ работы и модельные представления", Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (СПб.: Росс. гос. педагогический ун-т им. А.И. Герцена, 2013)
96. Ruggiero G et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **604** 242 (2009)
97. Verbitskaya E, Eremin V, Ruggiero G *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **612** 501 (2010)
98. Verbitskaya E, Eremin V, Ruggiero G *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **658** 108 (2011)
99. Fretwurst E et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **514** 1 (2003)
100. Li Z et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 1901 (2004)
101. Ерёмин В К и др. *ФТП* **46** 971 (2012); Eremin V K et al. *Semiconductors* **46** 948 (2012)
102. Eremin V et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **730** 95 (2013)
103. Verbitskaya E et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **754** 63 (2014)
104. Eremin V, Fadeeva N, Verbitskaya E *JINST* **12** P09005 (2017)
105. Ruggiero G et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **476** 583 (2002)
106. Kurfürst C et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **782** 149 (2015)
107. Verbitskaya E et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **796** 118 (2015)
108. Verbitskaya E et al. *JINST* **12** C03036 (2017)
109. Eremin V et al. *J. Appl. Phys.* **123** 204501 (2018)
110. Eremin V, Shepelev A, Verbitskaya E *JINST* **17** P11037 (2022)
111. Шепелев А С "Транспорт неравновесных носителей заряда в облученных кремниевых детекторах при температуре сверхтекучего гелия", Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (СПб.: Физико-технический ин-т им. А.Ф. Иоффе РАН, 2023)
112. Eremin V et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **500** 121 (2003)
113. Verbitskaya E et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 1877 (2005)
114. von Schmid M et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **629** 197 (2011)
115. Sirunyan A M et al. (CMS, TOTEM Collab.) *J. High Energy Phys.* **2018** 153 (2018)
116. Bartosik M R et al., in *Proc. of the IBIC14, September 14–18, 2014, Monterey, CA, USA*, TUPD25
117. Ерёмин В К и др. *ФТП* **43** 825 (2009); Eremin V K et al. *Semiconductors* **43** 796 (2009)
118. Вербицкая Е М и др. *ФТП* **45** 547 (2011); Verbitskaya E M et al. *Semiconductors* **45** 536 (2011)

Modern silicon detectors for gamma-ray astrophysics

E.M. Verbitskaya^(*), V.K. Eremin^(**)

Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Politekhnicheskaya 26, 194021 St. Petersburg, Russian Federation

E-mail: () elena.verbitskaya@mail.ioffe.ru, (**) Vladimir.Eremin@mail.ioffe.ru*

A steady trend in improving gamma-ray telescopes is the creation of their 3D sensitive medium, trackers based on silicon position-sensitive detectors. Among them, planar double-sided silicon strip detectors (DSSDs) are planned to be used in space telescopes of international observatories and the Russian HERMES project. The characteristics of prototype DSSDs for the e-ASTROGAM and HERMES telescopes are presented, and critical elements of the detectors are discussed. The reality of creating silicon trackers based on the existing physical background and technologies for the development of silicon detectors existing in Russia is shown.

Keywords: gamma-ray space telescopes, trackers, silicon planar detectors, double-sided strip detectors, voltage terminating structures

PACS number: 95.55.Vj

Bibliography — 118 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **194** (4) 416–431 (2024)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.04.039531>

Received 21 April 2023

Physics – Uspekhi **67** (4) (2024)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2023.04.039531>