

На правах рукописи

Смолянский Петр Игоревич

**ИЗУЧЕНИЕ ПИКсельНЫХ АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫХ
ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ МИКРОСХЕМЫ TIMERIX**

Специальность 01.04.01 —
«Приборы и методы экспериментальной физики»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Дубна — 2018

Работа выполнена в Объединенном институте ядерных исследований.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Жемчугов Алексей Сергеевич

Официальные оппоненты: **Воробьев Александр Павлович**,
доктор физико-математических наук,
Институт физики высоких энергий им. А.А. Логунова НИЦ «Курчатовский институт», г. Протвино,
главный научный сотрудник

Толбанов Олег Петрович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Национальный исследовательский Томский государственный университет,
заведующий лабораторией функциональной электроники

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова

Защита состоится « » _____ 201 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.03 при Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Джелепова в Объединенном институте ядерных исследований по адресу: Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований и на сайте http://wwwinfo.jinr.ru/announce_disser.htm.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6, ученому секретарю диссертационного совета Д 720.001.03.

Автореферат разослан « » _____ 201 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 720.001.03,
доктор физ.-мат. наук

Карамышева Галина Анатольевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Пиксельные полупроводниковые детекторы излучения – одни из самых высокотехнологичных приборов для регистрации частиц и гамма-излучения, на основе которых создаются калориметрические и координатные подсистемы физических установок с высокими энергетическим и пространственным разрешениями, а также с хорошим быстродействием. Детекторы, разрабатываемые для экспериментов в физике частиц, находят свое практическое применение и в других областях науки и технологии. Так, гибридные пиксельные детекторы, впервые примененные для регистрации треков частиц на экспериментах в CERN¹, впоследствии хорошо зарекомендовали себя в задачах регистрации рентгеновских изображений. Благодаря малому размеру пикселя и режиму счета одиночных фотонов, реализованному в таких детекторах, они позволяют получать рентгеновские изображения с высоким пространственным разрешением при низком уровне шумов.

Материал сенсоров для гибридных пиксельных детекторов может быть выбран максимально удовлетворяющим условиям задачи при сохранении одной и той же микросхемы считывания. В большинстве таких детекторов чувствительные элементы (сенсоры) изготовлены из кремния, который, наряду с неоспоримыми преимуществами (однородность, хорошая изученность и доступность), обладает и рядом существенных недостатков, в частности, низкой эффективностью регистрации гамма-квантов с энергией более 30 кэВ (менее 25 % при толщине сенсора 1 мм) и недостаточной радиационной стойкостью при комнатной температуре. Некоторые области применения гибридных пиксельных детекторов, такие как рентгеновская компьютерная микротомография и рентгеновская радиография плотных веществ, требуют перехода к большим энергиям гамма-квантов, что, в свою очередь, инициирует разработки гибридных пиксельных детекторов на основе альтернативных кремнию более тяжелых полупроводниковых материалов (например, арсенида галлия).

За последние десятилетия произошел большой прогресс в производстве арсенида галлия, пригодного для создания детекторов частиц. Наибольший интерес к таким детекторам проявляют в задачах получения рентгеновских изображений, где необходима высокая эффективность регистрации излучения. Первые детекторы с использованием арсенида галлия компенсированного хромом (GaAs:Cr) появились в начале 2000-х годов и были, в основном, выполнены в падовой или микростриповой геометрии [1–3]. В 2008 году по инициативе группы сотрудников Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований (ЛЯП ОИЯИ) был создан первый прототип гибридного пиксельного детектора на основе GaAs:Cr и микросхемы Medipix2, имеющей 65536 независимых каналов обработки сигналов. Несмотря на первую попытку создания такого детектора, были получены многообещающие результаты,

¹Европейский центр ядерных исследований

представленные на международном совещании «XI International Workshop on Radiation Imaging Detectors» (Прага, 2009) и затем опубликованные в работе [4]. Изучение свойств новых детекторов было продолжено в нескольких дальнейших работах [5; 6]. Но к настоящему времени отсутствуют результаты систематического исследования гибридных пиксельных детекторов на основе GaAs:Cr и микросхемы Timerix. Получение таких результатов позволит сделать вывод о возможности использования GaAs:Cr-Timerix детекторов в тех или иных задачах, а также определить оптимальные параметры для работы детекторов в различных условиях.

Целью данной работы является:

1. систематическое исследование свойств полупроводниковых пиксельных детекторов на основе GaAs:Cr и микросхемы считывания Timerix (GaAs:Cr-Timerix);
2. выявление границ областей применения GaAs:Cr-Timerix детекторов;
3. разработка процедуры энергетической калибровки GaAs:Cr-Timerix детекторов, работающих в режиме измерения энергии.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Проанализировать основные требования, предъявляемые к гибридным пиксельным детекторам рентгеновских изображений.
2. Провести экспериментальные исследования характеристик новых GaAs:Cr-Timerix детекторов с различной толщиной сенсоров: вольт-амперные характеристики, эффективность сбора заряда, эффективность регистрации гамма-квантов, энергетическое и пространственное разрешение, соотношение сигнал-шум, долговременная стабильность, зависимость характеристик детекторов от температуры.
3. Разработать методику попиксельной энергетической калибровки GaAs:Cr-Timerix детекторов.
4. Исследовать влияние эффекта разделения заряда в GaAs:Cr-Timerix детекторах толщиной 1 мм.
5. Разработать программное обеспечение для работы с данными, получаемыми детекторами Timerix.

Научная новизна:

1. Впервые систематически изучены характеристики новых GaAs:Cr-Timerix детекторов.
2. Впервые измерены характеристики GaAs:Cr-Timerix детекторов с толщиной сенсора 1 мм.
3. Разработанная процедура энергетической калибровки позволила достигнуть высокого энергетического разрешения (8.7 кэВ (FWHM) на 57 кэВ) для GaAs:Cr-Timerix детекторов с размером пикселя 55 мкм и толщиной сенсора 1 мм, работающих в режиме измерения энергии.
4. Впервые выполнены измерения границ чувствительности пикселя в GaAs:Cr-Timerix детекторах с толщиной сенсора 1 мм.

Практическая значимость Исследованы характеристики новых пиксельных детекторов на основе GaAs:Cr и микросхемы считывания Timerix, важные с точки зрения их практического применения. Определены основные параметры работы GaAs:Cr детекторов в различных режимах. Эти параметры используются в детекторах, установленных в рамках проекта ATLAS-GaAsPix [7].

Разработаны алгоритмы и создан комплекс программ для попиксельной калибровки и выравнивания пороговых уровней GaAs:Cr-Timerix детекторов. Разработан набор программ для обработки и анализа данных, получаемых детекторами Timerix.

Для исследований, проводимых в данной работе, была создана и введена в эксплуатацию установка для измерения характеристик полупроводниковых детекторов элементарных частиц, включающая в себя: экспериментальный стенд «Калан» с микрофокусной рентгеновской трубкой, экспериментальный стенд для измерения вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик полупроводниковых детекторов и сенсорных пластин.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Впервые систематически изучены характеристики новых пиксельных детекторов на основе микросхем считывания Timerix и сенсоров из GaAs:Cr различной толщины (300, 500, 1000 мкм): энергетическое разрешение, пространственное разрешение, соотношение сигнал-шум, долговременная стабильность, зависимость характеристик детекторов от температуры, эффективность регистрации гамма-квантов.
2. Разработан метод итеративной энергетической калибровки пиксельных детекторов на основе GaAs:Cr и микросхем считывания Timerix, работающих в режиме измерения энергии, с использованием линий характеристического рентгеновского излучения от 8 до 60 кэВ, позволяющего откалибровать энергетическую шкалу каждого пикселя и улучшить энергетическое разрешение детектора вдвое на энергии 57 кэВ.
3. Применен метод выравнивания порога дискриминатора каждого пикселя в гибридных пиксельных детекторах на основе GaAs:Cr и микросхем считывания Timerix, работающих в режиме счета одиночных фотонов, с использованием линий характеристического рентгеновского излучения, позволяющего выровнять отклик каждого пикселя на энергиях калибровочных линий.
4. Определены оптимальные параметры гибридных пиксельных детекторов на основе GaAs:Cr и микросхем считывания Timerix для различных режимов работы. Определена допустимая толщина сенсора из GaAs:Cr для пиксельных детекторов с размером пикселя 55 мкм, работающих в режиме счета одиночных фотонов при спектральных измерениях без схемы компенсации разделения заряда.
5. Измерены распределения по площади и глубине транспортных характеристик арсенида галлия GaAs:Cr двумя способами: а) при помощи

моноэнергетических гамма-квантов низких энергий (15-17 кэВ); б) с использованием моноэнергетических электронов.

6. Для детекторов на основе микросхем считывания Timerix и сенсора из GaAs:Cr толщиной 1 мм измерена область чувствительности пикселя, обусловленная эффектом разделения заряда.
7. Облучение гибридных пиксельных детекторов на основе GaAs:Cr и микросхем считывания Timerix гамма-квантами высокой интенсивности (более $2.5 \cdot 10^8$ ф/мм²/с) вызывает деградацию отдельных областей детектора, обусловленную ростом тока утечки в этих областях.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректной, общепринятой статистической обработкой результатов измерений, согласованностью теоретических выводов с результатами их экспериментальной проверки. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на XVIII международной научной конференции молодых ученых и специалистов (Дубна, 2014), на международном совещании «XVIII International Workshop on Radiation Imaging Detector» (Барселона, 2016), на международной конференции «Instrumentation for Colliding Beam Physics» (Новосибирск, 2017), на латино-американском симпозиуме «LASNPA WONP-NURT» (Гавана, 2017), на рабочих совещаниях коллаборации Medipix и семинарах ЛЯП ОИЯИ.

Личный вклад. Диссертационная работа является результатом исследований автора, проводившихся в Научно-экспериментальном отделе встречных пучков ЛЯП ОИЯИ. Личный вклад автора включает выбор методов решения задач, подготовку и проведение экспериментов, проведение расчетов, обработку и анализ полученных данных.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 4 статьях в ведущих российских и зарубежных журналах, входящих в список ВАК и международные базы данных Web of Science и Scopus, и в 4 тезисах докладов.

Диссертационная работа была выполнена при поддержке ФЦП «Исследования и разработки при приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (контракт №14.618.21.0001 в рамках проекта RFMEFI61814X0001).

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена описанию принципа работы полупроводниковых детекторов и, в частности, детекторов на основе гибридной пиксельной

технологии. Приводятся основные требования, предъявляемые к полупроводниковым материалам для их применения в детекторах рентгеновских изображений. Приводится обзор научной литературы, посвященной свойствам арсенида галлия, различным технологиям его производства и связанным с ними ограничениям, которые долгое время препятствовали использованию арсенида галлия в качестве детекторного материала. Дается обзор семейства микросхем считывания Medipix, и описываются пиксельные GaAs:Cr детекторы, используемые для проведения исследований в данной работе.

Полупроводниковые детекторы представляют собой твердотельные ионизационные камеры, в которых чувствительной является область дрейфа неравновесных носителей заряда. Такая область должна обладать высоким удельным сопротивлением, что достигается обратным смещением р-п-перехода, либо созданием полуизолирующего материала путем легирования примесями с глубокими уровнями. Основные потери энергии частиц, регистрируемых детектором, расходятся на возбуждение неравновесных носителей заряда (электрон-дырочных пар). Поданное на электроды детектора напряжение смещения создает в объеме детектора электрическое поле, под действием которого неравновесные носители заряда дрейфуют к соответствующим электродам и наводят импульс тока во внешней цепи, где в дальнейшем сигнал усиливается и обрабатывается электроникой считывания. Этот процесс схематично изображен на рисунке 1.

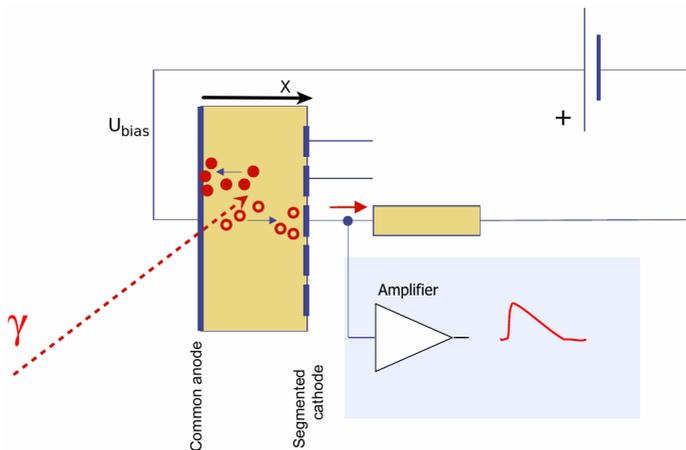


Рис. 1 — Принцип работы полупроводникового детектора.

Существует несколько способов расчета заряда, наведенного на электроде, вызванного движущимися носителями зарядов. Наиболее популярным и менее затратным с точки зрения вычислительных мощностей является метод, основанный на теореме Шокли-Рамо [8; 9]. Согласно этой теореме, заряд Q на электроде,

наведенный движущимся точечным зарядом q , находящимся в позиции x , может быть рассчитан как:

$$Q = -q\phi(x), \quad (1)$$

где $\phi(x)$ – весовой потенциал, т.е. такой электрический потенциал, который существовал бы в позиции x , при соблюдении следующих условий: рассматриваемый электрод находится под единичным потенциалом, а все остальные электроды – под нулевым потенциалом; любые заряды удалены из системы. Из уравнения (1) следует, что индуцированный на электроде заряд зависит только от величины весового потенциала в начальной и конечной точках дрейфа, и не зависит от траектории движения заряда, что существенно упрощает расчет тока на электроде.

Поскольку электроны и дырки в полупроводнике обладают конечным временем жизни (τ_n и τ_p , соответственно), при дрейфе между электродами часть из них до контактов не доходит. Поэтому наведенный на электроде заряд определяется временем жизни носителей электронов, а следовательно, дрейфовыми длинами L_n и L_p , которые преодолевают носители заряда за время жизни. Вводят величину, называемую эффективностью сбора заряда CCE^2 , определяющую долю заряда, наведенного на электроде Q_{ind} , относительно образовавшегося количества носителей заряда Q_0 :

$$CCE = \frac{Q_{ind}}{Q_0} = \frac{1}{d} \left\{ L_p(1 - e^{-\frac{x}{L_p}}) + L_n(1 - e^{-\frac{d-x}{L_n}}) \right\}, \quad (2)$$

где d – толщина сенсора. Выражение (2), называемое соотношением Хехта, показывает, что во-первых, эффективность сбора заряда на практике обычно ниже 100 % вследствие конечного времени жизни носителей заряда, и во-вторых, она зависит от точки взаимодействия частицы с веществом. Основным условием работы детекторов является $L_n > d$ и $L_p > d$ для получения значений CCE , близких к 100 %. Таким образом, возникает противоречие между требованиями к детекторам рентгеновского излучения, поскольку высокая эффективность регистрации гамма-квантов диктует использование сенсоров с большой толщиной, которая в свою очередь ограничена временами жизни носителей заряда.

В полупроводниковых пиксельных детекторах, благодаря пиксельной структуре одного из электродов, весовой потенциал принимает практически нулевые значения по всей толщине детектора, но быстро возрастает у пиксельного электрода. Тогда образовавшиеся носители заряда вносят основной вклад в импульс тока в цепи детектора только вблизи считывающего электрода. Весовой потенциал в пиксельных детекторах определяется соотношением толщины сенсора и размера пикселя. Искривление весового потенциала путем сегментации считывающего электрода называют эффектом маленького пикселя [9], благодаря чему удается создать пиксельные детекторы с хорошим энергетическим разрешением.

²от англ. Charge Collection Efficiency – эффективность сбора заряда

Возможность достижения более высокого энергетического разрешения в пиксельных детекторах путем перехода к меньшим размерам пикселя ограничена тем, что в окрестности ненулевых значений весового потенциала облако носителей заряда способно навести заряд на несколько соседних пикселей. Этот эффект носит название эффекта разделения заряда [9]. Кроме того, облако носителей заряда, созданное в точке взаимодействия частицы с веществом сенсора и имеющее в начальный момент времени конечные размеры (несколько мкм для гамма-квантов), увеличивается в размерах во время дрейфа к считывающим электродам вследствие диффузии зарядов согласно закону Фика и куловского расталкивания. Также в регистрацию несколькими пикселями одиночного события взаимодействия гамма-кванта с полупроводником вносят процессы комптоновского рассеяния и флуоресценции, негативно сказывающиеся на энергетическом и пространственном разрешении пиксельных детекторов.

Одной из разновидностей пиксельных детекторов являются полупроводниковые гибридные пиксельные детекторы (ГПД), в которых сегментированный электрод полупроводникового сенсора соединен с матрицей микросхемы считывания методом перевернутого кристалла (см. рисунок 2). Режим счета одиночных фотонов в этих детекторах, в отличие от интегрального режима работы ПЗС-матриц, дает возможность получать рентгеновские изображения с низким уровнем шумов при высоком пространственном разрешении. Гибридная пиксельная технология позволяет выбирать материал сенсора, наилучшим образом удовлетворяющим требованиям задачи, при сохранении одной и той же микросхемы считывания. В частности, когда идет речь о разработке детекторов для получения рентгеновских изображений, к сенсорам предъявляют следующие требования: высокая эффективность регистрации гамма-квантов больших энергий, высокая эффективность сбора заряда, большая активная площадь, низкие токи утечки, стабильность характеристик во времени, однородность материала по площади. Первые два требования является крайне важными, поскольку позволяет снизить дозовую нагрузку на объект исследования и уменьшить время набора данных.

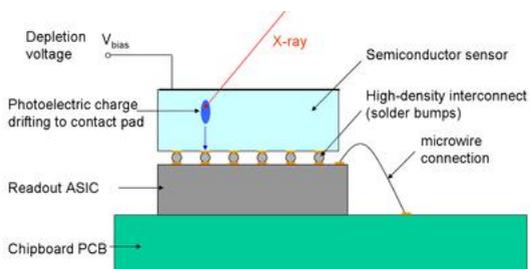


Рис. 2 — Схема гибридного пиксельного детектора.

Детекторы на основе микросхем считывания семейства Medipix [10] – широко распространенные представители ГПД. Современное поколение микросхем Medipix³ представляет собой считывающую матрицу 256x256 квадратных пикселей с шагом 55 мкм и активной площадью 14.1x14.1 мм². Каждый пиксель матрицы имеет независимый канал электроники, состоящий из зарядово-чувствительного усилителя, формирователя, дискриминатора и счетчика. В зависимости от версии микросхемы считывания и режима работы, пиксель может предоставлять информацию о количестве гамма-квантов или временные характеристики сигнала, сформированного в канале пикселя в результате прохождения частицы. Поскольку в работе использовались GaAs:Cr детекторы на основе микросхемы Timepix, стоит упомянуть основные режимы работы этой микросхемы: Medipix, Time-of-arrival и Time-over-Threshold. В первом режиме считается число пришедших частиц. Во втором режиме фиксируется время прохождения частицы относительно сигнала триггера. В третьем режиме измеряется длительность импульса напряжения, сформированного усилителем после прохождения частицы. Эта величина пропорциональна входному заряду и, следовательно, энергии частицы. Во всех режимах сохраняются события, соответствующие частицам с энергией, превышающей энергетический порог детектора, отсекая, таким образом, регистрацию шумов.

В большинстве детекторов семейства Medipix сенсоры изготовлены из кремния, который, наряду с неоспоримыми преимуществами, обладает существенным недостатком – низкой эффективностью регистрации гамма-квантов с энергией более 30 кэВ (менее 25 % при толщине сенсора 1 мм). Наиболее популярными из более тяжелых соединений в настоящее время являются арсенид галлия (GaAs), теллурид кадмия (CdTe), кристаллы кадмий-цинк-теллура (CdZnTe). Арсенид галлия, чей атомный номер занимает промежуточное положение между Si и CdTe (CdZnTe), сейчас является одним из перспективных материалов для создания детекторов рентгеновских изображений в диапазоне энергий от 15 до 60-70 кэВ (эффектность поглощения рентгеновского излучения для энергий 60-70 кэВ составляет ~ 50 % при использовании арсенид галлиевых сенсоров толщиной 1000 мкм).

Арсенид галлия – третий полупроводник по масштабам использования в промышленности после кремния и германия. Метод Чохральского является наиболее широко распространенным методом производства полуизолирующего слиточного арсенида галлия (LEC SI-GaAs) [11]. Материал, произведенный по этой технологии, пригоден для создания сверхвысокочастотных интегральных схем и транзисторов, светодиодов, лазерных диодов, но обладает рядом существенных недостатков, ограничивающих его применение в качестве детекторного материала. С этой точки зрения основной проблемой LEC SI-GaAs является наличие глубоких донорных EL2 центров, которые в ионизованном состоянии EL2⁺ имеют большое сечение захвата электронов ($\sim 10^{-13}$ см²) [12],

³Timepix, Timepix3, Medipix3RX

ограничивающее время жизни электронов до 0.2 нс, что обуславливает низкую эффективность сбора заряда. Неоднородное распределение напряженности электрического поля по толщине детектора и недостаточно высокое удельное сопротивление [3] также существенно ограничивают широкое использование LEC SI-GaAs в детекторной тематике. Поэтому, несмотря на многочисленные попытки [11], до последнего времени не удавалось создать на основе LEC SI-GaAs детекторы хорошего качества. Тем не менее, полученные результаты позволили исследователям прийти к выводу, что необходимо снижать влияние $EL2^+$ центров. Существует несколько способов достижения этой цели [13]:

1. уменьшение концентрации $EL2^+$ центров – получение более «чистого» арсенида галлия (с концентрацией примесей до 10^{13} см^{-3}), что ведет к необходимости снижения температуры роста SI-GaAs и переходу к эпитаксиальной технологии;
2. заполнение $EL2^+$ центров электронами. Тогда они будут находиться в состоянии электронейтральности: $EL2^+ + e \rightarrow EL2^0$. Это может быть достигнуто, если в процессе выращивания GaAs легируется мелкими донорами с концентрацией $N_d > N_{EL2}$ с последующей перекомпенсацией глубокой акцепторной примесью хрома N_{Cr} при высокотемпературных обработках.

Толщина рабочей области GaAs образцов, выращенных по эпитаксиальной технологии не превышает 35 мкм [13] и хотя может быть увеличена до 100 мкм, это является недостаточным значением для эффективных детекторов рентгеновского излучения. Используя второй подход, в Томском государственном университете (ТГУ) была создана технология компенсации слоев GaAs электронного типа проводимости глубокой акцепторной примесью хрома в процессе высокотемпературной диффузии, позволяющая получать высокоомный материал GaAs:Cr с толщиной до 1 мм. Удельное сопротивление для нового материала достигло значений порядка $10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ [3], что близко к максимальным значениям для полуизолирующего арсенида галлия [12], и приводит к приемлемым уровням шумов, обусловленным темновыми токами. Кроме того, как было показано в работе [3], время жизни неравновесных носителей заряда (электронов) в GaAs:Cr составляет ~ 10 нс.

Идея использования GaAs:Cr для создания гибридных пиксельных детекторов появилась в 2008 году в ЛЯП ОИЯИ. Первый прототип детектора Medipix2 с сенсором из GaAs:Cr был создан в 2010 году и оказался достаточно успешным [4]. Тем не менее к моменту начала работы по тематике GaAs:Cr пиксельных детекторов отсутствовали систематические исследований их свойств.

Вторая глава посвящена исследованию свойств арсенида галлия GaAs:Cr как материала для пиксельных детекторов: приводятся результаты измерений вольт-амперных характеристик, транспортных характеристик, эффективности сбора заряда и эффективности регистрации гамма-квантов.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ), как одна из базовых характеристик полупроводникового прибора, были измерены для Timerix детектора

F09-W0087⁴ с толщиной сенсора 300 мкм при температурах от -10 °C до 70 °C. ВАХ, представленные на рисунке 3 (а), демонстрируют почти линейное поведение для всех температур и обоих полярностей напряжения смещения, что подтверждает резистивные свойства арсенида галлия GaAs:Cr. При температуре 20 °C и напряжении -300 В темновой ток сенсора составляет 3.2 мкА, что позволяет использовать сенсор с микросхемами семейства Medipix (допустимый ток на пиксель не более 10 нА). Поскольку в арсениде галлия GaAs:Cr основным типом неравновесных носителей заряда являются электроны, на основе обратных ветвей измеренных ВАХ были получены значения удельного сопротивления материала для различных температур. При температуре 20 °C сенсор имеет удельное сопротивление 10^8 Ом·см, что находится в соответствии с данными производителя по средним значениям удельного сопротивления для данного материала.

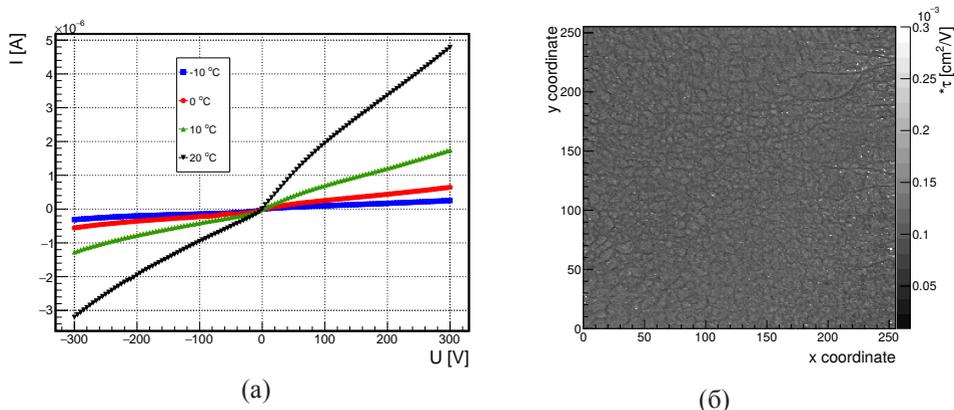


Рис. 3 — ВАХ детектора F09-W0087 в температурном диапазоне $[-10, 20]$ °C (а). Распределение величины $\mu_e \tau_e$ по площади детектора L05-W0225 (б).

Важной характеристикой, определяющей согласно (2) эффективность сбора заряда в полупроводниковом детекторе, является произведение подвижности носителей заряда μ на их время жизни τ . Из-за малого времени жизни дырок (согласно [2] $\tau_p = 0.2$ нс) основными носителями заряда в GaAs:Cr являются электроны. Позиционная чувствительность детектора Timerix позволила разработать метод измерения распределения величины $\mu_e \tau_e$ для электронов по площади сенсора. Метод основан на облучении детектора характеристическим излучением металлической фольги⁵ и последующем измерении зависимости положения фотопика от напряжения смещения для каждого пикселя. Затем

⁴Уникальный номер детектора.

⁵Была выбрана циркониевая фольга, т.к. гамма-кванты, соответствующие линии циркония $K_{\alpha} = 15.7$ кэВ, имеют длину свободного пробега в арсениде галлия менее 25 мкм, поэтому носители заряда будут дрейфовать практически вдоль всей толщины сенсора, внося вклад в наведенный заряд

получившаяся зависимость для каждого пикселя фитуруется соотношением Хехта (2), адаптированным с учетом эффекта маленького пикселя:

$$Q(U) = Q_0 \cdot \frac{d}{\mu\tau \cdot (U - U_0)} \cdot \int_0^d \phi(x) \cdot e^{-\frac{-x \cdot d}{\mu\tau \cdot (U - U_0)}} dx + e^{-\frac{d^2}{\mu\tau \cdot (U - U_0)}},$$

где Q_0 – заряд свободных носителей в треке частицы, U_0 – пороговое значение напряжения смещения, при котором собранный заряд оказывается ниже порога детектора. Двумерное распределение величины $\mu_e\tau_e$ электронной компоненты заряда для детектора L05-W0225 представлено на рисунке 3 (б). Среднее значение $\mu_e\tau_e$ составляет $1.1 \cdot 10^{-4}$ см²/В при дисперсии $1.5 \cdot 10^{-5}$ см²/В, и находится в соответствии с оценками производителя. Столь равномерное распределение $\mu_e\tau_e$ по площади позволяет получить столь же равномерное распределение CCE.

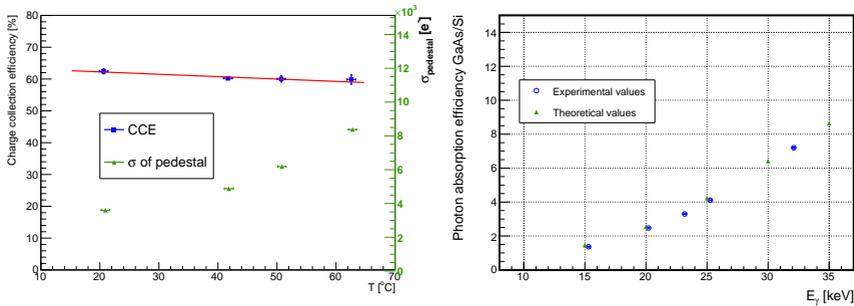
Используя источник моноэнергетических электронов (бета-сепаратор), была получена зависимость $\mu_e\tau_e$ электронной компоненты заряда от глубины проникновения частиц в арсенид галлиевый сенсор. Результаты представлены в таблице 1 для детектора J03-W0247. Таким образом, полученные значения $\mu_e\tau_e$ электронной компоненты заряда для GaAs:Cr позволяют выполнить основное условие эффективной работы полупроводникового детектора $L > d$.

Таблица 1 — Изменение $\mu_e\tau_e$ по толщине сенсора

E_e (кэВ)	Пробег электронов (мкм)	$\mu_e\tau_e$, x 10^{-4} (см ² /В)
100	24	1.2 ± 0.05
300	143	1.4 ± 0.05
780	450	1.9 ± 0.02
1700	881	2.7 ± 0.06

Эффективность сбора заряда измерялась на падовых GaAs:Cr детекторах размером $4.5 \times 4.5 \times 0.63$ мм³ следующим образом: сколламированный пучок электронов от источника ⁹⁰Sr проходил сквозь сенсор, вызывая образование электрон-дырочных пар. Собранный на считывающем электроде заряд усиливался зарядово-чувствительным усилителем и оцифровывался осциллографом. Под детектором были установлены два сцинтиляционных детектора, работающих в режиме совпадений и запускающих сбор данных. Таким образом, отбирались только электроны, прошедшие через сенсор насквозь, и, соответственно, имеющие ионизационные потери близкие к минимальным (0.7 кэВ/мкм для GaAs или $143 e^-h^+$ пары/мкм).

Зависимость эффективности сбора электронов от температуры представлена на рисунке 4 (а). Как видно, эффективность сбора заряда составляет ~60 %, что объясняется сбором в основном только электронов из-за малого времени жизни дырок [1]. Эффективность сбора заряда практически не изменяется при



(a)

(б)

Рис. 4 — Эффективность сбора заряда в GaAs:Cr детекторе и ширина пьедестала для разных температур (а). Отношение эффективностей (теоретической и экспериментальной, показанных зелеными и синими маркерами, соответственно) регистрации гамма-квантов GaAs:Cr и Si детекторами толщиной 500 мкм в зависимости от энергии гамма-квантов (б). изменение температуры ($0.075 \text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$), а ширина пьедестала увеличивается с нагреванием, что объясняется ростом темнового тока и, соответственно, увеличением шумов в детекторе. При температуре около $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ пьедестал и сигнал плохо разделяются, что делает детектор неработоспособным.

Эффективность регистрации гамма-квантов Timerix детекторов с GaAs:Cr и Si сенсорами толщиной 500 мкм была экспериментально измерена в диапазоне энергий гамма-квантов от 15 до 32 кэВ, используя РХИ металлических фольг и радиоактивный гамма-источник ^{137}Cs . Результаты, представленные на рисунке 4 (б), подтверждают расчетные значения эффективности регистрации гамма-квантов, полученные по базе данных NIST. На энергии 25 кэВ арсенид галлиевый сенсор толщиной 500 мкм в ~ 4 раза более эффективен по сравнению с кремниевым сенсором.

Количество активных пикселей и однородность отклика пикселей по площади детектора являются ключевыми характеристиками, описывающими качество производственного процесса детектора. На рисунке 5 (а) показано изображение открытого поля — отклик детектора K09-W0203 на однородную заставку излучением рентгеновской трубки при анодном напряжении 80 кВ. Четко видны структуры, соответствующие дислокациям в кристалле, выращенном из расплава. По рисунку 5 (б) видно, что такие дефекты изображения возможно убрать путем нормировки на кадр открытого поля, полученный усреднением счета в пикселях по сумме 100 кадров. Поскольку структуры, присущие GaAs:Cr, стабильны во времени, их наличие не вносит существенных трудностей при работе с рентгеновскими изображениями, получаемыми пиксельными детекторами с GaAs:Cr сенсорами. После нормировки на открытое поле распределение счета в пикселях матрицы становится в три раза уже, чем в изображении без коррекции ($\sigma_{\text{без корр.}} = 98.3 \pm 0.3$ против $\sigma_{\text{корр.}} = 29.6 \pm 0.1$). Качество

сборки микросхема-сенсор рассматриваемого детектора K09-W0203 составляет $\sim 99\%$ активных пикселей.

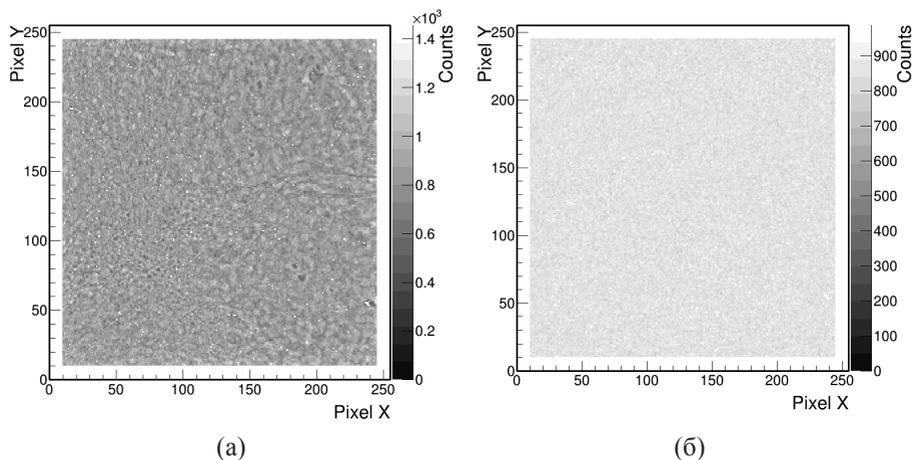


Рис. 5 — Распределение по площади детектора счета в пикселях для изображения, скорректированного на открытое поле (б) и для изображения без коррекции (а).

Результаты второй главы опубликованы в работах [A2, A4].

В **третьей главе** приводятся результаты экспериментального исследования стабильности и температурной зависимости спектральных и счетных характеристик GaAs:Cr-Timerix детекторов при облучении гамма-квантами.

Другим важным критерием работы полупроводникового детектора в рентгеновских приложениях является стабильность его спектральных и счетных характеристик во времени. В течение 10 месяцев проводились испытания долговременной стабильности спектрального отклика детектора J03-W0247. Детектор непрерывно измерял энергетический спектр гамма-источника ^{241}Am . При обработке данных анализировалось изменение положения фотопика 59.5 кэВ, определяемое для каждого пикселя в единицах ТОТ⁶. На рисунке 6 показано, что положение фотопика изменилось менее, чем на 1 промилле за год. Среднеквадратичное отклонение за весь период измерений составило 0.35 %.

Поскольку обычно GaAs:Cr детекторы работают при комнатной температуре, было важно изучить температурную зависимость их спектральных и счетных характеристик. Для проведения данных исследований была разработана система термостабилизации детектора на основе ПИД-контроллера и элементов Пельтье, обеспечивающая постоянство заданной температуры детектора в пределах $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. В результате экспериментов было показано, что в диапазоне температур $[20,25]\text{ }^{\circ}\text{C}$, спектрометрические свойства GaAs:Cr-Timerix детектора

⁶Отсчеты АЦП детектора

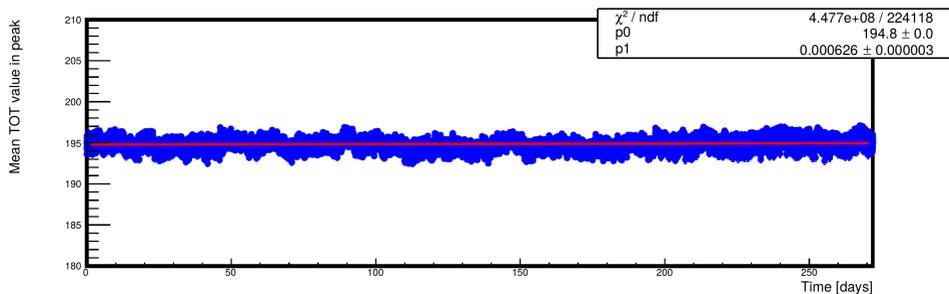


Рис. 6 — Изменение положения фотопика гамма-источника ^{241}Am в зависимости от времени.

отличаются высокой стабильностью. Например, для 25°C среднее значение положения фотопика составило 90.3 TOT с среднеквадратичным отклонением 0.3 TOT. Положение спектрального пика не меняется при изменении температуры, что совпадает с результатами измерений эффективности сбора заряда. Аналогичные результаты были получены в счетном режиме работы детектора Timerix. Основываясь на полученных результатах и на опыте работы с пиксельными GaAs:Cr детекторами, был сделан следующий вывод: в большинстве применений они не требуют температурной стабилизации. Однако, чтобы избежать перегрева микросхемы считывания, лучше обеспечить воздушное охлаждение печатной платы детектора.

В рентгеновских детекторах с счетом одиночных фотонов число зарегистрированных гамма-квантов должно определяться в идеальном случае статистикой Пуассона, т.е. для среднего числа поглощенных фотонов N стандартное отклонение определяется как \sqrt{N} . Для численной оценки шумов в изображениях, получаемых пиксельными детекторами, используется соотношение сигнал-шум $SNR^7 = \mu / \sigma$, где μ – средний счет в пикселях за кадр, σ – стандартное отклонение. Стабильность во времени качества изображений, получаемых пиксельными GaAs:Cr детекторами, была исследована на примере 1-миллиметрового детектора K09-W0203. Соотношение сигнал-шум было посчитано для скорректированного на открытое поле кадра в зависимости от числа кадров, взятых для коррекции. Корректирующие кадры выбирались из разных временных отрезков проводимого измерения (в начале, в середине и в конце).

На рисунке 7 представлены результаты измерений и вычислений соотношения сигнал-шум. Экспериментальные кривые близки к Пуассоновскому пределу, но остаются ниже него из-за остаточной неоднородности материала и разброса уровней порога пикселей. Такое объяснение подтверждается результатами измерений соотношения сигнал-шум для Timerix детектора с кремниевым сенсором (оранжевые маркеры на рисунке 7), который является более однородным материалом. Соотношения сигнал-шум для GaAs:Cr детектора, посчитанные с использованием корректирующих кадров, взятых из других

⁷от англ. Signal-to-Noise Ratio

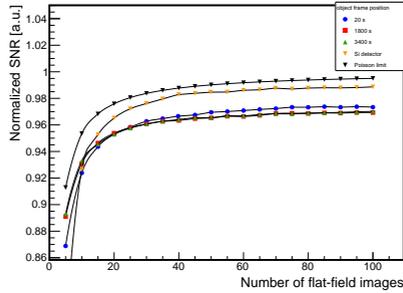


Рис. 7 — Соотношение сигнал-шум для скорректированного на открытое поле изображения в зависимости от числа кадров, взятых для коррекции.

временных интервалах, демонстрируют схожее поведение. Таким образом, полученные здесь результаты подтверждают вывод, сделанный в главе 2 о том, что коррекция на открытое поле является эффективной процедурой для удаления дефектов изображений и получения изображений высокого качества с помощью пиксельных GaAs:Cr детекторов.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [A2, A4].

В **четвертой главе** приводятся результаты измерений энергетического и пространственного разрешения GaAs:Cr-Timerix детекторов с различной толщиной сенсоров. Описывается разработанная методика, позволяющая существенно улучшить энергетическое разрешение детекторов.

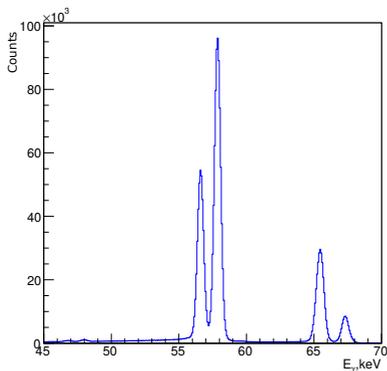
В детекторе Timerix, работающем в режиме Time-over-Threshold, длительность ТОТ импульса напряжения, сформированного усилителем после прохождения частицы, пропорциональна входному заряду и, следовательно, энергии частицы E . Зависимость $TOT(E)$ согласно [14] может быть аппроксимирована эмпирической формулой:

$$TOT(E) = a \cdot E + b - \frac{c}{E - t}. \quad (3)$$

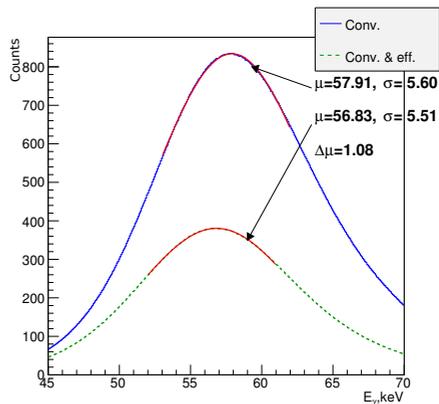
Вследствие неоднородности GaAs:Cr и разброса параметров электроники пикселей микросхемы Timerix, для получения максимально возможного энергетического разрешения требуется проведение энергетической калибровки каждого пикселя детектора. Для этого была разработана соответствующая итеративная процедура, основанная на использовании рентгеновского характеристического излучения (РХИ) металлических фольг⁸. В отличие от использования радиоактивных гамма-источников из набора ОСГИ-3-2 при разработанном подходе существенно сокращается время набора статистики, необходимой для калибровки детектора.

Энергетического разрешения GaAs:Cr-Timerix детектора недостаточно для разделения близко расположенных $K_{\alpha-}$, $K_{\beta-}$, $L_{\alpha-}$ спектральных линий

⁸В данной работе использовались фольги из Cu, Zn, Ni, Zr, Mo, Rh, Cd, In, Sn, Ta, что позволяет откалибровать детектор в диапазоне [6;100] кэВ.



(a)



(б)

Рис. 8 — Спектр РХИ тантала: а) измеренный германиевым детектором Canberra; б) свертка спектра измеренного детектором Canberra с разрешением детектора Timerix (синий цвет), и с учетом эффективности поглощения гамма-квантов в GaAs:Cr (зеленый цвет).

РХИ, поэтому в спектре, регистрируемом GaAs:Cr-Timerix детектором, эти линии сливаются в один пик с неизвестной энергией. Поэтому сначала спектры РХИ выбранных фольг были прецизионно измерены германиевым детектором Canberra⁹. Затем учитывая энергетическое разрешение GaAs:Cr-Timerix детектора, проведено Монте-Карло моделирование спектров GaAs:Cr-Timerix детектора, используя спектры с германиевого детектора. Далее была учтена эффективность регистрации гамма-квантов GaAs:Cr детектором в соответствии с экспоненциальным законом Бугера-Ламберта-Бера [9]. На рисунке 8 показан фрагмент спектра РХИ тантала, измеренного с помощью детектора Canberra, и смоделированного согласно описанию выше. После того, как в моделировании стала учитываться эффективность сенсора из GaAs:Cr, изменилась не только форма спектра, но и, что более важно, значение в его максимуме ($\Delta\mu = 1.08$ кэВ). Таким образом, путем Монте-Карло моделирования было достигнуто более точное определение энергии в реперных спектральных пиках, что позволило увеличить точность калибровки GaAs:Cr-Timerix детектора.

Форма получаемых GaAs:Cr-Timerix детектором попиксельных спектров асимметрична и отлична от формы нормального распределения из-за эффекта разделения заряда. Поэтому для фитирования попиксельных спектров была смоделирована функция, представляющая собой сумму квадратичного полинома (для учета формы левой части спектров) и функции распределения Гаусса:

⁹Энергетическое разрешение (σ) детектора LEGe Canberra GL0515R 0.23 кэВ на энергии 122 кэВ.

$$F(TOT) = \begin{cases} A \cdot \exp\left(-\frac{(TOT-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), & \text{если } TOT > \mu; \\ A \cdot \exp\left(-\frac{(TOT-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) + a \cdot TOT^2 + b \cdot TOT + c, & \text{если } TOT < \mu; \end{cases} \quad (4)$$

с дополнительным условием на квадратичный полином: $a\mu^2 + b\mu + c = 0$.

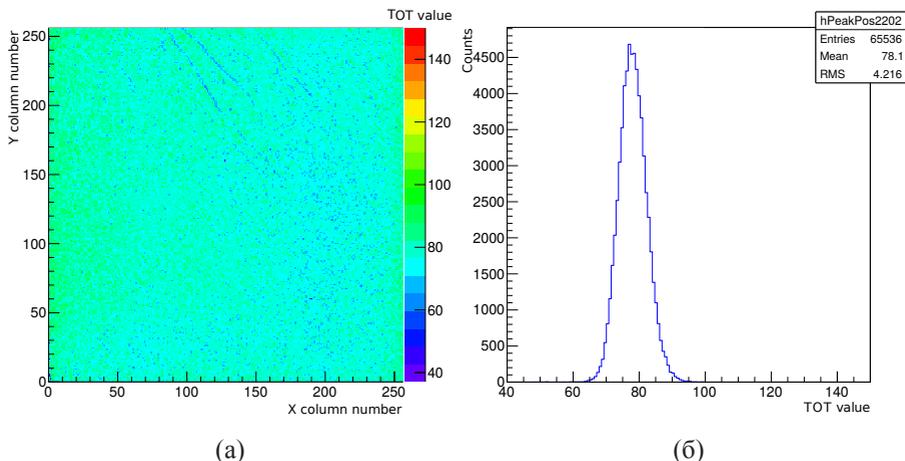


Рис. 9 — Двумерное (а) и одномерное (б) распределения положения фотопика в спектре родия, построенные для всех пикселей детектора J03-W0247.

На рисунке 9 (а) показана карта положений фотопика в спектре родия, построенная для всех пикселей детектора J03-W0247, используя результаты фитирования функцией (4). Хорошо заметны структуры, присущие арсениду галлия GaAs:Cr, в которых положение фотопика смещено в сторону меньших значений TOT, что соответствует меньшей эффективности сбора заряда в этих областях. Дисперсия положения спектрального пика для всех пикселей, представленная на рисунке 9 (б), составляет 5.4 % для рассматриваемого спектра. Учет такого разброса с помощью калибровки каждого пикселя (см. рисунок 10 (а)) позволил улучшить энергетическое разрешение 1-миллиметрового GaAs:Cr-Timerix детектора J03-W0247 вдвое на энергии 57 кэВ¹⁰, и достигнуть значения 8.7 кэВ (FWHM) на этой энергии.

Энергетический порог детектора Timerix устанавливается одинаковым для всех пикселей. Но вследствие технологических особенностей производства микросхем существует незначительный разброс параметров электроники пикселей. Для устранения этого разброса в микросхеме Timerix предусмотрены 4-х битные регулировки, позволяющие индивидуально настроить порог каждого

¹⁰По сравнению с разрешением после обобщенной калибровки, когда калибровка проводится по спектрам усредненным по всем пикселям.

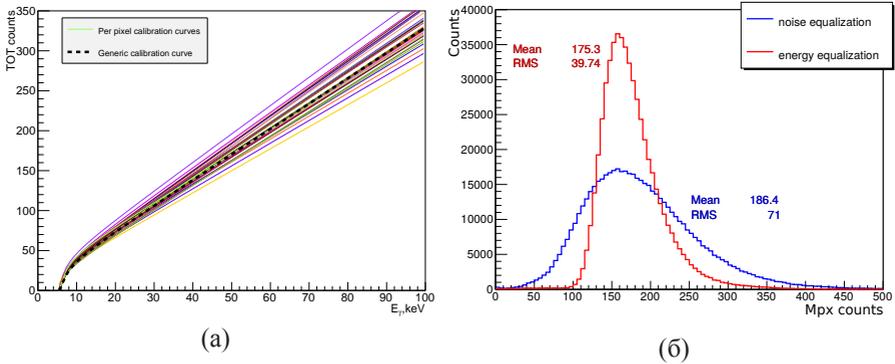


Рис. 10 — Калибровочные кривые для 32 произвольно выбранных пикселей детектора J03-W0247 и обобщенная калибровочная кривая (черная пунктирная линия) (а). Распределение счета в пикселях после стандартного выравнивания порогов (синий цвет) и после энергетического выравнивания порогов (красный цвет) (б).

пикселя. Общепринятым методом нахождения подстроечных битов в микросхемах семейства Medipix является поиск края шумового спектра каждого пикселя. Поскольку 4-х битные регулировки влияют только на уровень порога пикселя, а не на коэффициент усиления, то методика выравнивания порогов по краю шума является неэффективной для высоких значений энергетического порога. Был разработан метод нахождения подстроечных пороговых битов каждого пикселя в GaAs:Cr-Timerix детекторах, работающих в режиме счета одиночных фотонов, с использованием линий РХИ, позволяющий выровнять отклик каждого пикселя на энергиях, соответствующих линиям характеристического излучения. В результате энергетического выравнивания порогов пикселей GaAs:Cr-Timerix детектора с использованием линии РХИ циркония¹¹ дисперсия значений порогов пикселей сократилась в ~ 11 раз по сравнению с детектором, в котором не выровнены индивидуальные значения порога пикселей. Благодаря проведению разработанной процедуры выравнивания порогов удалось достичь вдвое меньшего разброса скорости счета в пикселях на энергии, соответствующей линии РХИ циркония, по сравнению с применением стандартной процедуры выравнивания порогов по краю шумового распределения (см. рисунок 10 (б)). Данный результат является важным в задачах мультиэнергетической рентгеновской компьютерной томографии, поскольку помогает улучшить однородность изображений, получаемых пиксельными GaAs:Cr-Timerix детекторами.

Важным параметром, влияющим на энергетическое разрешение детектора, как следует из (2), является напряжение смещения. Перед работой с детекторами

¹¹ $K_{\alpha} = 15.7$ кэВ

необходимо найти рабочую точку по напряжению, в которой достигается близкая к максимальной эффективность сбора заряда при токе, соответствующем линейной части ВАХ. Такие точки были найдены для каждого из используемых в работе GaAs:Cr-Timerix детекторов. Ниже приведены средние значения напряжения смещения для GaAs:Cr-Timerix детекторов, работающих в Time-over-Threshold режиме: -200 В для 300 мкм сенсора, -300 В для 500 мкм сенсора, -900 В для 1000 мкм сенсора.

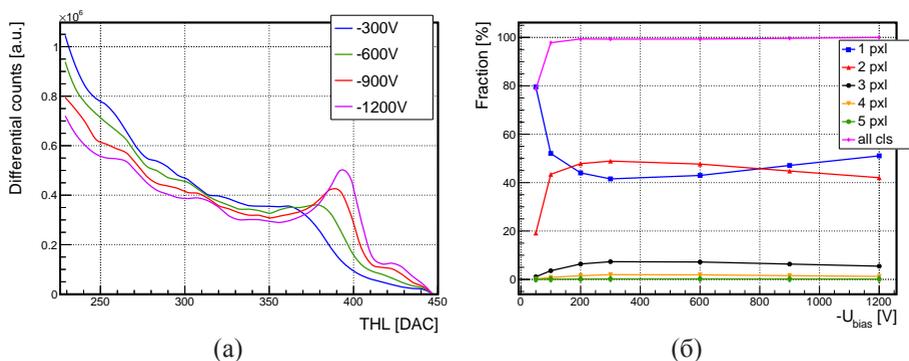


Рис. 11 — Спектры РХИ индия, измеренные в режиме счета фотонов детектором D08-W0153 при различных значениях напряжения смещения (а). Процентное соотношение кластеров разного размера в зависимости от напряжения смещения (б).

Однако при работе детектора в режиме счета фотонов таких напряжений оказывается недостаточно для достижения высокого энергетического разрешения (для Timerix детектора с толщиной GaAs:Cr сенсора порядка 1000 мкм спектральные измерения невозможны, см. рисунок 12 (б)). На рисунке 11 (а) изображены спектры РХИ индия, полученные GaAs:Cr-Timerix детектором D08-W0153 с толщиной сенсора 500 мкм, работающим в режиме счета фотонов, при значениях напряжения смещения -300 В, -600 В, -900 В, -1200 В. Хорошо видно, что с ростом напряжения смещения растет число событий в фотопике: если при -300 В спектральный пик практически не выделяется, то при -1200 В пик имеет форму, близкую к нормальному распределению. Кроме того, при -1200 В начинает различаться фотопик, соответствующий K_{β} -линии индия. Такое поведение объясняется влиянием эффекта разделения заряда: при больших напряжениях скорость носителей заряда выше, поэтому диффузия зарядов в поперечном направлении вносит меньший вклад в увеличение размеров облака зарядов. Это подтверждается зависимостями, изображенными на рисунке 11 (б). Сначала число одиночных событий уменьшается с увеличением напряжения смещения, что вызвано увеличением эффективности сбора заряда. Часть заряда, соответствующего одно и тому же гамма-кванту, и наведенного

на соседний пиксель становится выше энергетического порога, и однопиксельные события переходят в разряд двухпиксельных. С другой стороны, с ~ 300 В начинается обратный процесс: число однопиксельных событий увеличивается, а двойных и тройных событий становится меньше с ростом напряжения, что положительно сказывается на разрешении детектора. Таким образом, путем оптимизации напряжения смещения удалось достигнуть разрешения 2.5 кэВ (FWHM) при 25 кэВ для GaAs:Cr-Timerix детектора толщиной 500 мкм. При этом темновые токи для большинства детекторов остались в пределах допустимых значений (< 50 мкА при температуре 20°C). Но для некоторых протестированных детекторов такие значения напряжений недопустимы из-за драматического роста темного тока в окрестности -1000 В, что определяется качеством материала сенсора.

Результаты четвертой главы опубликованы в работах [A1, A2, A4].

В пятой главе впервые приводятся результаты исследования эффекта разделения заряда в GaAs:Cr-Timerix детекторе с толщиной сенсора 1 мм.

Эффект разделения заряда, как было отмечено в главе 1, оказывает решающее влияние на энергетическое и пространственное разрешение пиксельного детектора с малым размером пикселя. Для изучения эффекта разделения заряда в GaAs:Cr-Timerix детекторах с толщиной сенсора 1 мм, была проведена серия экспериментов на источнике синхротронного излучения ВЭПП-3М, расположенном в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (Новосибирск).

На станцию синхротронного излучения подавался монохроматический пучок фотонов размером 2×6 мм² с энергией 18 кэВ ($dE/E=0.072\%$) и потоком $7 \cdot 10^8$ ф/мм²/с. Вблизи детектора пучок был уменьшен до размеров 10×10 мкм² с помощью вольфрамового коллиматора. Используя высокоточный линейно перемещаемый стол, детектор был выставлен таким образом, чтобы пучок падал перпендикулярно поверхности общего электрода детектора и попадал в центр одного из пикселей. После этого перемещая детектор относительно пучка с шагом 10 мкм, было проведено сканирование вдоль трех пикселей матрицы одной колонки. Таким образом, был изучен отклик нескольких пикселей детектора в зависимости от положения микропучка. Детектор J03-W0247 работал в режиме счета фотонов при общем для всех пикселей пороге по энергии 6.5 кэВ (36 % от энергии пучка).

На рисунке 12 (а) показано среднее число отсчетов в соседних пикселях в зависимости от положения микропучка относительно центра пикселя. Координата $x=0$ мкм совпадает с центром первого пикселя, а $x=55$ мкм – с центром соседнего пикселя. Кривые, проходящие через экспериментальные точки, пересекаются, как и ожидалось, в середине зазора между двумя пикселями. Но значение счета в точке пересечения составляет 75 - 80 % от значения, достигаемого при попадании пучка в центр пикселя. Такое возможно в случае, когда заряд, соответствующий одному событию, наводится на два соседних пикселя, причем наведенный заряд в каждом пикселе оказывается выше заданного

порога. Иными словами, один гамма-квант считается дважды соседними пикселями, что ведет к деградации энергетического и пространственного разрешения. Этот экспериментальный факт подтверждает сильное влияние эффекта разделения заряда в 1 мм детекторе, который может быть уменьшен точным подбором энергетического порога ($\sim 50\%$ от энергии пучка). Если пучок направлен в окрестность (± 10 мкм) центра одного пикселя, эффект разделения заряда незначителен, поэтому заряд не делится с соседним пикселем, что выражается в практически не меняющемся отклике пикселя.

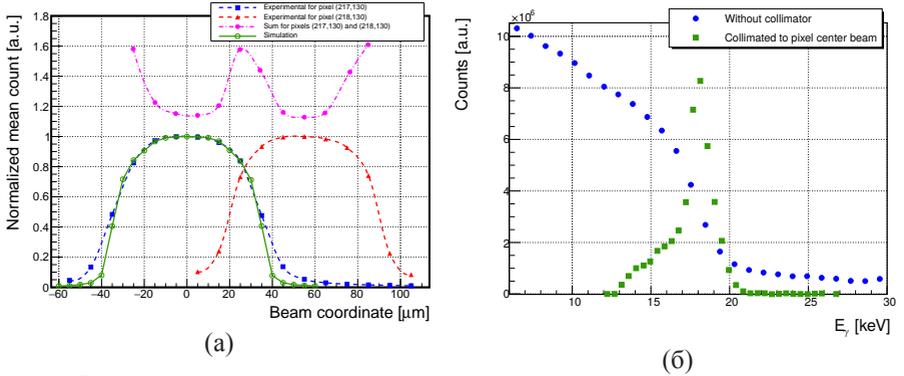


Рис. 12 — Зависимость счета в соседних пикселях от положения сколлимированного пучка гамма-квантов (синие и красные маркеры). Зелеными маркерами показаны результаты моделирования (а). Энергетический отклик одного пикселя при использовании микроколлиматора (зеленые маркеры) и усредненный по всем пикселям отклик (синие маркеры) для гамма-квантов с энергией 18 кэВ (б).

Дисперсия распределения облака зарядов, представляющего в начальный момент времени точечное энерговыделение, у считывающего электрода может быть представлена согласно [9] следующим образом:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2nk_B T l d}{e U_{bias}}}, \quad (5)$$

где n – число пространственных измерений, k_B – постоянная Больцмана, T – температура, l – расстояние от точки взаимодействия до считывающего электрода, d – толщина сенсора детектора, e – заряд электрона, U_{bias} – напряжение смещения. Расчет согласно (5) при $T = 300$ К, $U_{bias} = -500$ В и $d = 1000$ мкм дает $\sigma \approx 17$ мкм. Это является оценкой увеличения размеров облака зарядов в процессе дрейфа от точки взаимодействия к пиксельным электродам. Такое же значение σ было получено в [A3] путем Монте-Карло моделирования условий

эксперимента, результаты которого показаны на рисунке 12 зелеными маркерами.

Энергетический отклик детектора на спектр монохроматического излучения с энергией гамма-квантов 18 кэВ показан на рисунке 12 (б). Синие маркеры соответствуют отклику детектора, усредненному по всем пикселям, зеленые – отклику одного пикселя, когда сколлимированный пучок попадал в его центр. Энергетический спектр в этом случае имеет практически идеальную форму нормального распределения. Энергетическое разрешение пикселя для GaAs:Cr-Timerix детектора толщиной 1 мм составило 4.5 % на энергии 18 кэВ. Если пучок не сколлимирован, спектральный пик не может быть идентифицирован, что объясняется множественной регистрацией соседними пикселями одного гамма-кванта из-за эффекта разделения заряда.

Во время проведения экспериментов на источнике синхротронного излучения ВЭПП-3М было обнаружено, что при высоких значениях потоков гамма-квантов (более $2.5 \cdot 10^8$ ф/мм²/с) с энергией 28 кэВ, в некоторых пикселях детектора скорость счета снижается и доходит до 1 срабатывания за кадр. Такое поведение было обнаружено для детектора J03-W0247 с толщиной GaAs:Cr сенсора 1 мм, работающего в режиме счета фотонов.

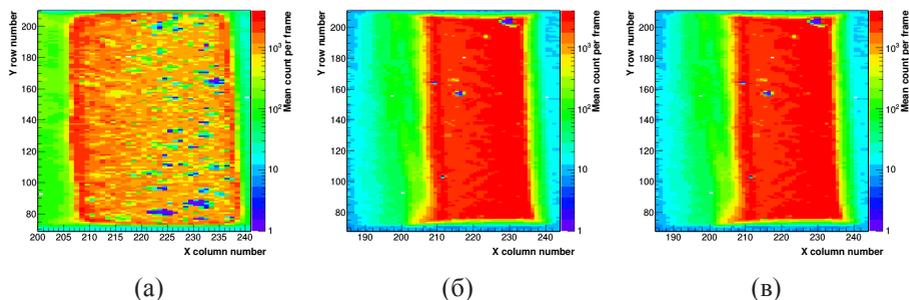


Рис. 13 — Карта среднего счета в пикселях детектора для различных значений потока гамма квантов: (а) $9 \cdot 10^8$ ф/мм²/с, (б) $2.5 \cdot 10^8$ ф/мм²/с, (в) $0.18 \cdot 10^8$ ф/мм²/с.

Как показано на рисунке 13, с ростом потока частиц число пикселей, имеющих в среднем одно срабатывание за кадр, становится все больше. При этом, если переключить детектор в режим измерения энергии, то значение счетчика в таких пикселях будет максимальным (11810). Это поведение связано с тем, что выходной сигнал усилителя не возвращается к базовому уровню за длительность кадра. Причиной этого может быть большое число приходящих частиц при относительно длинном времени разряда конденсатора обратной связи усилителя. Но в этом случае такое поведение должно быть присуще всем пикселям, а не определенным областям детектора. Согласно [15], аналоговая часть электроники пикселя микросхемы Timerix может компенсировать токи утечки до 20 нА/пиксель в режиме сбора электронной компоненты заряда. Наблюдаемый эффект говорит о

том, что высокие потоки фотонов вызывают такие токи утечки в определенных областях сенсора, которые электроника пикселя не может компенсировать, что ведет к постоянному превышению сигналом усилителя порогового уровня. Локальный рост тока утечки может быть связан с неоднородным распределением удельной проводимости материала сенсора.

Результаты пятой главы опубликованы в работе [А3].

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Впервые систематически изучены характеристики новых пиксельных детекторов на основе микросхемы Timerix и сенсоров из GaAs:Cr различной толщины (300, 500, 1000 мкм): энергетическое разрешение, пространственное разрешение, соотношение сигнал-шум, долговременная стабильность, зависимость характеристик детекторов от температуры, эффективность регистрации гамма-квантов, а также определены оптимальные настройки детекторов для различных режимов работы.
2. Измерены распределения по площади и глубине транспортных характеристик GaAs:Cr, используя в качестве электроники считывания микросхему Timerix. Среднее значение величины $\mu_e \tau_e$ по площади детектора составило $1.1 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{В}$ при дисперсии $1.5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{В}$. Экспериментально показано, что транспортные свойства GaAs:Cr позволяют выполнить условие эффективной работы полупроводникового детектора (дрейфовая длина носителей заряда должна быть больше толщины сенсора).
3. Для детекторов на основе микросхемы Timerix и сенсора из GaAs:Cr толщиной 1 мм измерена область чувствительности пикселя, обусловленная эффектом разделения заряда.
4. Эффект разделения заряда существенно ограничивает применение GaAs:Cr сенсоров с толщиной более 500 мкм и размером пикселя 55 мкм в приложениях, где требуются спектральные измерения в режиме счета одиночных фотонов. В случае использования GaAs:Cr сенсора толщиной 500 мкм энергетическое разрешение Timerix детектора в режиме счета фотонов может достигнуть значения 2.5 кэВ (FWHM) при 25 кэВ. Использование GaAs:Cr сенсоров с толщиной 1 мм и микросхемы Timerix для спектральных измерений в режиме счета одиночных фотонов невозможно ввиду низкого энергетического разрешения из-за сильного влияния эффекта разделения заряда.
5. Полученные результаты дают возможность сделать вывод о том, что свойства пиксельных GaAs:Cr детекторов позволяют использовать их в системах рентгеновской радиографии и томографии наряду с кремниевыми, таким образом расширяя диапазон высокого поглощения гамма-квантов до 60-70 кэВ.
6. Разработан метод и создан комплекс программ для итеративной по-пиксельной энергетической калибровки и выравнивания пороговых

уровней пиксельных детекторов на основе GaAs:Cr и микросхемы Timepix, работающих в режиме измерения энергии, с использованием линий характеристического рентгеновского излучения. В результате достигнуто энергетическое разрешение 8.7 кэВ (FWHM) на 57 кэВ для GaAs:Cr-Timepix детекторов с толщиной сенсора 1 мм, что вдвое лучше разрешения, получаемого после обобщенной калибровки.

7. Создан комплекс программ для обработки и анализа данных, получаемых детекторами Timepix.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Measurement of the energy resolution and calibration of hybrid pixel detectors with GaAs: Cr sensor and Timepix readout chip / P. Smolyanskiy [et al.] // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. — 2015. — Vol. 12, no. 1. — P. 59—73.
- A2. Characterization of GaAs:Cr based Timepix detector using synchrotron radiation and charged particles / P. Smolyanskiy [et al.] // *Journal of Instrumentation*. — 2016. — Vol. 11, no. 12. — P. C12070.
- A3. Study of a GaAs: Cr-based Timepix detector using synchrotron facility / P. Smolyanskiy [et al.] // *Journal of Instrumentation*. — 2017. — Vol. 12, no. 11. — P11009.
- A4. Properties of GaAs:Cr-based Timepix detectors / P. Smolyanskiy [et al.] // *Journal of Instrumentation*. — 2018. — Vol. 13, no. 02. — T02005.
- A5. *Смолянский, П.* Энергетическая калибровка гибридных GaAs:Cr пиксельных детекторов на основе микросхем считывания Timepix / П. Смолянский // XVIII международная научная конференция молодых ученых и специалистов (ОМУС-2014). — 2014.
- A6. On the possibility to use semiconductive hybrid pixel detectors for study of radiation belt of the Earth / A. Guskov [et al.] // *Международная конференция ICPPA-2015*. — 2016.
- A7. *Smolyanskiy, P.* Characterization of GaAs:Cr detectors / P. Smolyanskiy // *The International Conference Instrumentation for Colliding Beam Physics*. — 2017.
- A8. *Smolyanskiy, P.* Properties of GaAs:Cr-based pixel detectors / P. Smolyanskiy // *LASNPA WONP-NURT*. — 2017.

Список литературы

1. GaAs resistor structures for X-ray imaging detectors / G. Ayzenshtat [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. — 2002. — Vol. 487, no. 1. — P. 96—101.

2. Charge collection in X-ray pixel detectors based on semi-insulating GaAs doped with Cr / G. Ayzenshtat [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2002. — Vol. 494, no. 1. — P. 210—213.
3. GaAs radiation imaging detectors with an active layer thickness up to 1mm / A. Tyazhev [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2003. — Vol. 509, no. 1. — P. 34—39.
4. *Thustos, L.* Characterisation of a GaAs (Cr) Medipix2 hybrid pixel detector / L. Thustos, G. Shelkov, O. Tolbanov // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2011. — Vol. 633. — S103—S107.
5. Characterization of photon counting pixel detectors based on semi-insulating GaAs sensor material / E. Hamann [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 425. — 2013. — P. 062015.
6. Performance of a Medipix3RX spectroscopic pixel detector with a high resistivity gallium arsenide sensor / E. Hamann [et al.] // IEEE transactions on medical imaging. — 2015. — Vol. 34, no. 3. — P. 707—715.
7. Proposal to Measure Radiation Field Characteristics, Luminosity and Induced Radioactivity in ATLAS with TIMEPIX detectors having GaAs:Cr sensors: Project GaAsPix / D. Dedovich [и др.]. — 2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2133145> (дата обр. 12.12.2017).
8. *He, Z.* Review of the Shockley–Ramo theorem and its application in semiconductor gamma-ray detectors / Z. He // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2001. — Vol. 463, no. 1. — P. 250—267.
9. *Knoll, G. F.* Radiation detection and measurement / G. F. Knoll. — John Wiley & Sons, 2010.
10. *Ballabriga, R.* Asic developments for radiation imaging applications: The medipix and timepix family / R. Ballabriga, M. Campbell, X. Llopart // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2017.
11. *Buttar, C.* GaAs detectors – A review / C. Buttar // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1997. — Vol. 395, no. 1. — P. 1—8.
12. *Толбанов, О. П.* Детекторы ионизирующих излучений на основе компенсированного арсенида галлия / О. П. Толбанов // Вестник Томского государственного университета. — 2005. — № 285.

13. GaAs structures for X-ray imaging detectors / G. Ayzenshtat [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2001. — Vol. 466, no. 1. — P. 25—32.
14. *Jakubek, J.* Precise energy calibration of pixel detector working in time-over-threshold mode / J. Jakubek // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2011. — Vol. 633. — S262—S266.
15. Timepix, a 65k programmable pixel readout chip for arrival time, energy and/or photon counting measurements / X. Llopart [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2007. — Vol. 581, no. 1. — P. 485—494.

Смолянский Петр Игоревич

ИЗУЧЕНИЕ ПИКсельНЫХ АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ
МИКРОСХЕМЫ ТИМЕРИХ

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____.____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____

