

На правах рукописи

ТИТОВ Виталий Михайлович

**БЫСТРЫЙ ОДНОКООРДИНАТНЫЙ ДЕТЕКТОР
ГАММА-КВАНТОВ**

**01.04.01 – приборы и методы
экспериментальной физики**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

НОВОСИБИРСК – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

АУЛЬЧЕНКО - доктор технических наук, профессор,
Владимир Михайлович Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ЗОЛОТУХИН - доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, главный научный сотрудник Лаборатории нечётких технологий.

СЕРОВ - доктор технических наук, профессор,
Анатолий Фёдорович Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, главный научный сотрудник Лаборатории проблем энергосбережения.

ВЕДУЩАЯ - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Защита диссертации состоится «___» _____ 2014 г. в «___» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «_____» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.В. Бурдаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Рентгеноструктурный анализ уже давно и широко используется для исследования реакций в твердом теле. Большое число как научных исследований, так и прикладных задач, связанных с использованием рентгеновского излучения, основаны на регистрации координатного распределения интенсивности излучения, прошедшего через образец, параметры которого быстро меняются, например в результате химических реакций или в процессе сокращения живой мышцы. Вместе с тем, получение информации “in situ” о параметрах реакций осложняется несколькими причинами, среди которых:

- особенность химических реакций в твердом теле – высокие градиенты концентрации реагентов, давления и температуры, обуславливающие высокие скорости реакции и локализацию зоны реакции в размеры порядка нескольких микрон и менее;
- ограниченная номенклатура координатных детекторов, обладающих набором метрологических параметров, позволяющих получать информацию из областей микронных размеров за время в диапазоне 1 мкс – 1 сек.

Для таких экспериментов требуются одно- и двухкоординатные детекторы с большим динамическим диапазоном, с высоким координатным разрешением в широком диапазоне углов, высоким быстродействием и эффективностью регистрации. Детектор должен иметь высокую однородность шкалы (малую дифференциальную нелинейность), а также позволять работать как в стробоскопическом, так и в режиме динамической дифракции – режим «кино» с точной временной синхронизацией с исследуемым процессом. Кроме того, детектор должен иметь несколько модификаций – для экспериментов в режиме порошковой рентгеновской дифракции и в режиме малоуглового рентгеновского рассеяния.

Цель диссертационной работы

Целью данной работы является разработка быстрого, свободного от параллакса, обладающего высокой эффективностью регистрации, однокоординатного рентгеновского детектора для дифракционных экспериментов с использованием как рентгеновских трубок, так и синхротронного излучения (СИ). Для достижения поставленной цели необходимо:

- определить технические характеристики детектора, удовлетворяющего сформулированным выше требованиям, выбрать и обосновать способ построения многоканального однокоординатного детектора гамма-квантов с вычисляемым номером канала;
- создать на основе выбранного способа быстродействующий детектор, включая разработку аппаратных и программных средств, алгоритмов их оптимального взаимодействия, позволяющих получить требуемые параметры;
- разработать структуру удобного пользовательского интерфейса для управления параметрами детектора, процедурой калибровок и проведения экспериментов.

Личный вклад автора

Автор принимал самое активное участие в разработке как общей конструкции, так и большинства основных узлов детектора, где его вклад является определяющим. К ним относятся системы низковольтного и высоковольтного питания, аппаратные и программные средства системы калибровки детектора, контроль загрузок, аппаратный интерфейс взаимодействия с внешними устройствами.

При определяющем участии автора изготовлены 5 детекторов различных модификаций. Ими оснащены рабочие станции в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск), в Курчатовском центре синхротронного излучения (КЦСИ, г. Москва), в Институте кристаллографии им. А.В. Шубникова (г. Москва). Автор принимал непосредственное участие в запуске детекторов на станциях.

Научная новизна работы

Впервые в детекторе с вычисляемым номером канала получена малая дифференциальная нелинейность шкалы в сочетании с высокой скоростью регистрации фотонов. Предложен и реализован модифицированный метод центра тяжести, позволяющий вычислять координаты событий по сигналам с трех катодных полосок с точностью, существенно лучшей их физических размеров. Разработана методика коррекции неоднородности координатного спектра (калибровка детектора).

Предложена структура координатного детектора гамма-квантов, позволившая объединить в компактной конструкции:

беспараллаксный газовый координатный сенсор, малошумящую электронику считывания сигналов с катодных полосок сенсора, электронику аналого-цифрового преобразования и цифровой обработки сигналов, источники вторичного низковольтного и высоковольтного питания, электронику контроля и управления.

Научная и практическая значимость работы

В результате проделанной работы создана эффективная и технологичная конструкция детектора, позволившая тиражировать его силами экспериментального производства Института. К настоящему времени изготовлено 5 экземпляров детектора различных модификаций.

Созданный детектор имеет ряд высоких параметров, сочетание которых в одном приборе делает его уникальным: пространственное разрешение около 104 мкм при полной апертуре >200 мм, скорость регистрации квантов до 10^7 событий/сек, однородность шкалы (дифференциальная нелинейность) ~0,2%, эффективность регистрации $\geq 50\%$, быстрое «кино» с длительностью кадра от 1 мксек до 1 часа.

Детекторы на протяжении ряда лет используются в качестве основного инструмента на станциях Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения, а также в других научных организациях страны для экспериментов с использованием рентгеноструктурного анализа в различных исследованиях. Например, исследования изменений структуры и фазового состава материалов при изменении температуры, исследования процессов синтеза новых функциональных материалов, получение данных о составе и кинетике образования фаз при изучении химических твердофазных реакций. Хорошие результаты получены в экспериментах по исследованию сокращения живой мышцы с длительностью кадров «кино» 10 мсек.

Основные положения, выносимые на защиту

- конструкция однокоординатного детектора с вычисляемым каналом на основе газового координатного сенсора с полосковой катодной структурой;
- метод, алгоритм и аппаратные средства определения точки конверсии рентгеновских квантов (координаты) по сигналам с ограниченного числа первичных источников (полосок) с точностью существенно лучшей их физических размеров;
- аппаратные и программные средства организации дифракционного «кино» с возможностью управления запуском и

длительностью кадров как программно, так и с помощью внешних сигналов;

- структура и схемные решения быстродействующей электроники с низким уровнем шума для предварительного усиления и формирования сигналов с катодных полосок газового координатного сенсора.

Апробация работы

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на следующих конференциях и рабочих совещаниях:

4th International Conference on Synchrotron Radiation Sources and 2nd Asian Forum on Synchrotron Radiation (ICSRS - AFSR'95, Kyongji, Korea), 11th National Synchrotron Radiation Conference (SR-96, Новосибирск, Россия), 4th International Conference on Position-Sensitive Detectors (PSD4, Manchester, UK, 1996), 6th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI'97, Himeji, Japan), Satellite meeting of SRI '97 on Crystallographic Application of SR (Tsukuba, Japan, 1997), 5th European Powder Diffraction Conference (EPDIC-5, Parma, Italy, 1997), 6th European Powder Diffraction Conference (EPDIC 6, Budapest, Hungary, 1998), 2-я Национальная конференция по применению Рентгеновского, Синхротронного излучений, Нейтронов и Электронов для исследования материалов (РЧЭ-99, Москва), 15th International Synchrotron Radiation Conference (SR 2004, Новосибирск, Россия), 5-я Национальная конференция по применению Рентгеновского, Синхротронного излучений, Нейтронов и Электронов для исследования наноматериалов и наносистем (РЧЭ НАНО-2005, Москва), 16th International Synchrotron Radiation Conference (SR 2006, Новосибирск, Россия), 9th International Symposium on the Detector Development for Particle, Astroparticle and Synchrotron Radiations Experiments (SNIC 2006, Menlo Park, California, USA), 6-я Национальная конференция по применению Рентгеновского, Синхротронного излучений, Нейтронов и Электронов (РЧЭ 2007, Москва), 17th International Synchrotron Radiation Conference (SR 2008, Новосибирск, Россия), 1st International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP 09, Tsukuba, Japan, 2009).

Материалы, вошедшие в диссертацию, также опубликованы в российских и зарубежных журналах, список приведен в перечне опубликованных автором работ.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и пяти приложений. Материал работы изложен на 81 странице, включает 44 рисунка и список литературы из 30 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается краткий обзор основных методик и областей использования рентгеновского излучения. Отмечается, что большое число научных исследований, связанных с использованием рентгеновского излучения, основаны на регистрации координатного распределения интенсивности излучения, прошедшего через образец, параметры которого быстро меняются в ходе измерений. В связи с этим подчёркивается важность и необходимость создания соответствующих координатных детекторов.

В первой главе диссертации формулируются требования к основным параметрам однокоординатного рентгеновского детектора: разрешение не хуже 150 мкм при полной апертуре не менее 200 мм, скорость регистрации до 10^7 событий/сек при эффективности $> 50\%$ для квантов с энергией 8—10 кэВ, режим «кино» с минимальной длительностью кадра 1 мксек.

Далее делается краткий обзор существующих детекторов и приводятся аргументы в пользу использования в детекторе в качестве координатного сенсора модификации газовых пропорциональных камер, широко применяемых в физике высоких энергий. Затем обосновывается применение принципа «вычисляемого канала», позволяющего минимизировать количество исходных, «физических» каналов. Для определения координаты кванта (номера канала) по этому принципу используются разные методы; в нашем случае обосновывается выбор в пользу метода центра тяжести. В этом случае один из катодов камеры выполняется в виде отдельных полосок, и координата кванта вычисляется по соотношению величин сигналов на полосках.

Во второй главе даётся описание общей конструкции однокоординатного детектора гамма-квантов ОД-3М, а также отдельных его узлов, основным из которых является регистрирующий блок. Регистрирующий блок, в свою очередь, состоит из координатного сенсора, представляющего собой пропорциональную проволочную камеру с катодным съёмом информации, дополненную конверсионным объёмом, и регистрирующей электроники. Конструктивно регистрирующий блок (рисунок 1) разделён на три

соединенных между собой отсека - собственно координатный сенсор и два отсека с электроникой.

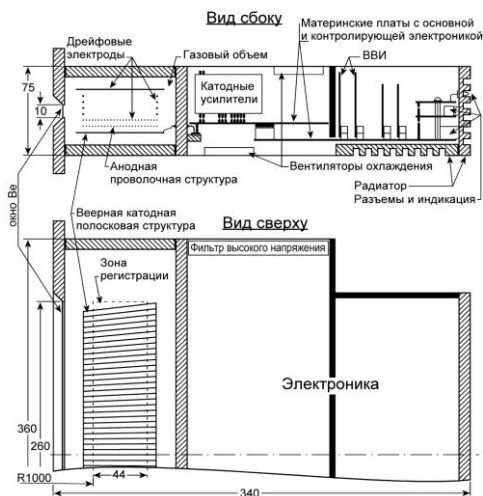


Рисунок 1. Схема расположения основных элементов регистрирующего блока ОД-3М.

Далее в главе даётся краткое описание физических принципов работы детектора, образования, съёма, формирования сигналов, а также способа определения координаты.

Пучок фотонов, попадая в камеру, взаимодействует с атомами газа, в нашем случае смесь 90%Ar + 10%CO₂. В результате взаимодействия фотона с атомом аргона возможно образование фотоэлектрона и фотона (с вероятностью ~ 13 %), либо фотоэлектрона и Оже-электрона с суммарной энергией, близкой к исходной энергии фотона. Энергия образовавшихся электронов идет на ионизацию окружающих атомов газа. Электроны первичной ионизации дрейфуют по линиям электрического поля к анодным проволочкам.

В непосредственной близости от анодных проволочек в области высокого градиента электрического поля происходит каскадное размножение числа носителей - газовое усиление ($K \sim 5 \cdot 10^4$).

Ионы вторичной ионизации, отходя от анодных проволочек, наводят заряд на окружающих электродах, в том числе и на нижнем катоде, выполненном в виде полосок на керамической подложке. На рисунке 2 это распределение заряда показано в координатах X-Y. Там же условно изображены полоски катодной плоскости. Координата X

точки конверсии (поперёк полосок) определяется путём вычисления центра тяжести интегралов зарядов на полосках.

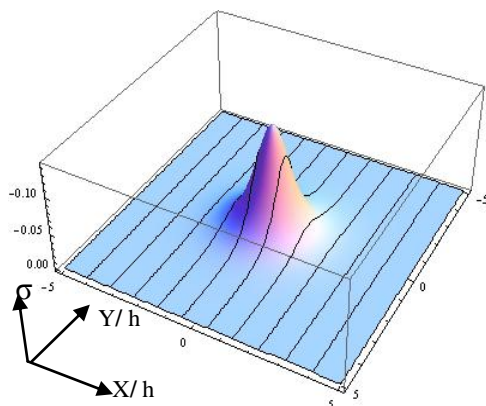


Рисунок 2. Распределение индуцированного заряда на катодной плоскости.

Третья глава состоит из нескольких разделов, в которых рассматриваются такие ключевые моменты, как выбор алгоритма вычисления координат квантов, определение минимально необходимой разрядности АЦП и способ аппаратной реализации алгоритма.

Для вычисления координаты точки конверсии фотона в детекторе используется метод, названный автором «модифицированный метод центра тяжести». В отличие от классического метода здесь используются сигналы только части катодных полосок, чему способствуют две особенности распределения поверхностной плотности индуцированного заряда $\sigma(x,y)$ (рисунок 2):

- для каждого события распределение A_n имеет явно выраженный максимум, что позволяет легко определить центральную полоску, над которой располагается точка конверсии;
- при заданной геометрии электродов и межэлектродных зазорах имеется однозначное соотношение между сигналами на центральной и боковых полосках, зависящее лишь от положения точки конверсии над центральной полоской.

В результате сравнения возможных вариантов вычисления координат квантов делается вывод о том, что оптимальным, подавляющим как разброс величины заряда в камере, так и смещение базовой линии в усилительных каналах, является вычисление отношения разностей амплитуд сигналов на центральной (A_c) и

соседних с ней слева (A_l) и справа (A_r) полосках катодной структуры камеры:

$$B_1 = \frac{(A_c - A_l)}{(A_c - A_r)}, \text{ если } A_l > A_r;$$

и
$$B_2 = \frac{(A_c - A_r)}{(A_c - A_l)}, \text{ если } A_r \geq A_l.$$

Зависимость значений функций B_1 и B_2 от положения точки конверсии кванта в пределах одной полоски показана на рисунке 3.

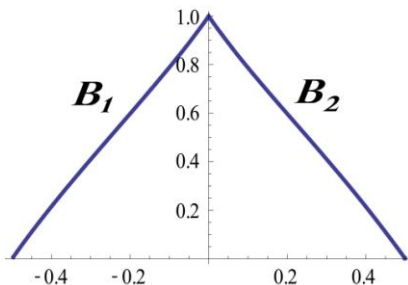


Рисунок 3. Функции B_1 и B_2 для вычисления координаты кванта в пределах одной полоски.

Точность определения координаты прямо зависит от точности вычисления B_1 и B_2 , которая, в свою очередь, зависит от точности цифрового представления амплитуд сигналов, определяемой разрядностью АЦП. В связи с этим определение минимально необходимой разрядности АЦП является принципиально важным.

Оценки показали, что с учётом требуемого разрешения и амплитудного разброса сигналов разрядность АЦП должна быть не менее 12-ти.

Блок-схема аппаратной реализации алгоритма вычисления координаты представлена на рисунке 4. Координата фотона

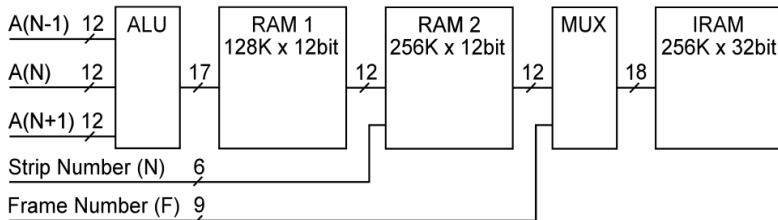


Рисунок 4. Блок-схема обработки данных в OD-3М.

вычисляется в три этапа с помощью арифметического устройства (ALU) и двух таблиц перекодировки, записанных соответственно в RAM1 и RAM2. Входной информацией для ALU являются 12-ти разрядные значения амплитуд сигналов с полосок A_{N-1} , A_N , A_{N+1} .

Содержимое таблиц перекодировки определяется в процессе специальных процедур калибровки и служит для минимизации интегральной и дифференциальной нелинейностей шкалы детектора.

$$\text{ram1_addr} = [(A_N - A_{N-1}) / (A_N - A_{N+1})] * 2^{16}, \quad \text{если } A_{N-1} > A_{N+1};$$

$$\text{ram1_addr} = [1 + (A_{N+1} - A_{N-1}) / (A_N - A_{N-1})] * 2^{16}, \quad \text{если } A_{N+1} \geq A_{N-1}.$$

В четвёртой главе рассматриваются вопросы, связанные с влиянием шумов электронного тракта обработки сигналов на координатное разрешение детектора. В данном случае речь идёт о так называемом аппаратном разрешении, без учёта влияния камеры.

Сделанные оценки показывают, что для достижения аппаратного разрешения лучше одного канала шкалы детектора (~75 мкм) необходимо иметь отношение сигнал/шум не менее 440. Величина сигнала с полосы, в свою очередь, зависит от произведения нескольких параметров (таблица 1).

Так, для квантов с энергией 8 кэВ заряд первичной ионизации составляет ~400 электрон-ионных пар. При коэффициенте газового усиления $K_{yc} \sim 5 * 10^4$ сигнал на полоске составит $\sim 4.6 * 10^5 e^-$. Такая величина K_{yc} позволяет работать при умеренных значениях напряжения на аноде (+2700÷2800В), избегая опасности возникновения «короны» или пробоев.

Таблица 1

q_0	*	K_{yc}	*	0,1	*	0,227
Заряд первичной ионизации, определяется как энергия кванта, поделенная на энергию ионизации. Для смеси 90% Ag+10% CO ₂ она составляет ~ 20 эВ.		Коэффициент газового усиления камеры.		За время ~100 нс собирается ~0,1 от полного наводимого заряда.		Доля заряда на полоске, если лавина располагается над её серединой.

Таким образом, величина шума (RMS) электронного тракта должна быть на уровне 10^3 электронов. Само по себе получение такого уровня шумов не представляет технических трудностей. Задача несколько осложняется тем, что для обеспечения высокого быстродействия

детектора требуются достаточно короткие времена формирования сигналов.

В последней части четвёртой главы приводится блок-схема аналоговой части канала обработки сигналов, удовлетворяющая требованиям по отношению сигнал/шум и быстродействию (рисунок 5).

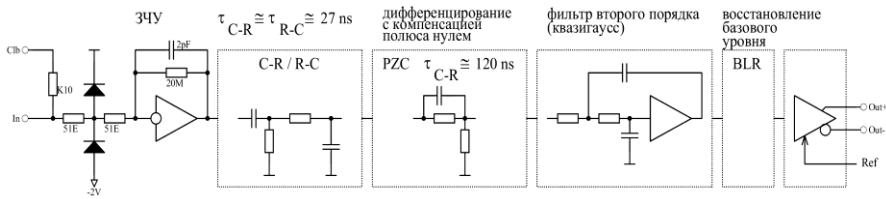


Рисунок 5. Структура аналоговой части.

Используется многоступенчатая схема, дающая на выходе сигнал гауссовой формы с длительностью по основанию ~ 200 нс при уровне шума RMS ~ 800 электронов.

Для измерения аппаратного координатного разрешения детектора на входы трёх соседних каналов через специальный пробник подавался сигнал, имитирующий реальный сигнал с триады полосок (центральной и двух боковых). Амплитуда тестового сигнала соответствовала сигналам от изотопа Fe^{55} и равнялась $\sim 3 \cdot 10^5$ электронов на центральной полоске. Вклад электроники в координатное разрешение $\sigma_{\text{электроники}} \approx 0.5$ канала.

В пятой главе описываются процедуры выделения и отбора событий и калибровки детектора. Под событием понимается возникновение в сигнале на какой-либо полоске N максимума по времени и координате. Несколько упрощенно это можно записать как:

$$A_{t-1} < A_t \geq A_{t+1} \text{ (максимум по времени),}$$

$$A_{N-1} < A_N \geq A_{N+1} \text{ (максимум по координате).}$$

Для того чтобы обнаруженное событие было обработано и занесено в инкрементную память, необходимо решение триггера. Задачей триггера является отбраковка событий, перекрывающихся друг с другом по времени или/и координате, по определённым критериям, включающим временные, координатные и амплитудные параметры. Только для отфильтрованных таким образом событий вычисляются их координаты и заносятся в соответствующую гистограмму в инкрементной памяти.

Калибровка детектора является процедурой, необходимой для достижения минимальных величин интегральной и дифференциальной нелинейностей шкалы детектора, и заключается в построении таблиц RAM1 и RAM2, с помощью которых сначала линеаризуется шкала в пределах одной (любой) полоски (RAM 1), а затем - в пределах всей шкалы детектора (RAM 2).

Для получения данных, необходимых для вычисления таблиц, используется засветка детектора от источника с гладким, желательным равномерным, координатным распределением квантов.

В шестой главе описываются процедуры и приводятся результаты измерения физического (полного) координатного разрешения, интегральной и дифференциальной нелинейностей детектора при облучении пучком СИ и изотопом Fe^{55} . На гистограмме (рисунок 6) одно деление по оси X соответствует одному каналу. При облучении детектора пучком СИ с $\sigma < 50$ мкм получено координатное разрешение $\sigma \approx 104$ мкм.

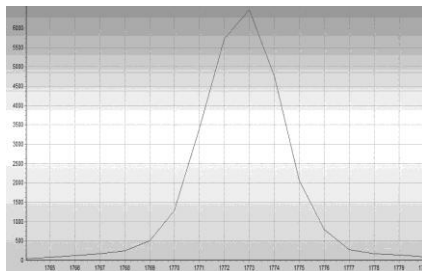


Рисунок 6. Гистограмма пучка СИ размером $\sigma < 50$ мкм.

Для оценки величины интегральной нелинейности использовалась гистограмма от корунда (Al_2O_3) с табулированными значениями углов рассеяния. По двум крайним пикам строится прямая преобразования каналов детектора в углы. Максимальное отклонение реальной характеристики преобразования от прямой линии составляет ~ 2 канала, что соответствует интегральной нелинейности σ_{INL} менее **0,1%** на всей шкале детектора.

Измерение дифференциальной нелинейности с точностью лучше 1% требует набора статистики более 10^4 событий в каждом канале или, по крайней мере, в каналах на участке шкалы, для которого проводится измерение нелинейности. Калибровка должна быть сделана с ещё большей статистикой. Для этого измерения использовался фрагмент спектра от изотопа со статистикой в максимуме $\sim 5,8 \cdot 10^4$ событий/канал, что теоретически соответствует статистической точности 0,4%. Дифференциальная нелинейность определялась как нормированное среднеквадратичное отклонение содержимого каналов гистограммы от фитирующей кривой, найденной методом скользящего усреднения. Полная ширина на

полувысоте (FWHM) распределения составляет $\sim 0,0115$ (1,15%), что соответствует $\sigma \approx 0,45\%$. С учётом вклада статистической точности измерения 0,4%, дифференциальная нелинейность детектора σ_{DNL} не превышает 0,2%.

В заключении перечислены основные результаты работы.

Приложения содержат описания узлов вспомогательной электроники, системы питания, принципиальную схему аналогового тракта, описание работы триггера и интерфейса пользовательской программы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана конструкция детектора с использованием в качестве сенсора пропорциональной газовой камеры, которая позволила построить прибор с требуемыми параметрами, используя имеющиеся технологические возможности собственного производства ИЯФ.
2. Разработан алгоритм определения координат гамма-квантов с помощью модифицированного метода центра тяжести. Обоснована необходимая разрядность АЦП и шумовые параметры аналогового тракта исходя из требуемого координатного разрешения.
3. Разработана аппаратная реализация алгоритма вычисления координаты фотона в три этапа с помощью арифметического устройства (ALU) и двух таблиц перекодировки, записанных соответственно в RAM1 и RAM2. Разработан способ получения таблиц перекодировки RAM1 и RAM2 (калибровка детектора).
4. Предложен способ реализации режима дифракционного «кино», позволяющий регистрировать до 64 кадров с максимальным разрешением и возможностью увеличения числа кадров до 512 за счет уменьшения разрешения детектора. Длительность каждого кадра «кино» можно задавать индивидуально в диапазоне от 1 мксек до 1 часа.
5. Разработана электроника детектора, включающая в себя многоступенчатый усилитель-формирователь, систему обработки данных, двухканальный источник высоковольтного питания, систему контроля рабочих параметров детектора и систему питания.

6. Написаны управляющие программы (firmware) для ПЛИС ALTERA, реализующие алгоритмы работы детектора, обеспечивающие взаимодействие всех узлов электроники детектора и связь с внешним компьютером.
7. Написана управляющая программа, дающая пользователю возможность настройки детектора, контроля его параметров, подготовки и проведения эксперимента. Составлена пользовательская документация.
8. Измерены все основные характеристики детектора. При полном числе каналов 3328, разрешение, определяемое шумами электроники, составило $\sigma_{\text{электроники}} \approx 0,5$ канала детектора. Физическое (полное) координатное разрешение, измеренное на узком (50 мкм) пучке СИ с энергией 8 кэВ, составило $\sigma \approx 1,5$ канала детектора, что с учетом геометрии катодной структуры соответствует примерно 104 мкм. Для различных задач были изготовлены детекторы с фокусным расстоянием 350 мм, 700 мм, 1000 мм и 1500 мм. Интегральная нелинейность составляет < 0.1% на всей шкале детектора, дифференциальная – около 0.2%. Скорость счета - 10^7 событий/сек, эффективность регистрации квантов с энергией $5 \div 10$ кэВ - ≥ 50 %.

Основные результаты диссертации **опубликованы** в следующих работах:

1. *V.M Aulchenko, S.E Baru, M.S Dubrovin, ..., V.M. Titov, et.al.* The OD-3 fast one-coordinate X-ray detector // Nucl. Instrum. and Methods. -1995. -V. A 367. -P. 79-82.
2. *S.E. Baru, V.M. Aulchenko, E.A. Babichev, ..., V.M. Titov, et.al.* X-ray detectors based on multiwire proportional chambers // Nucl. Instrum. and Methods. -1997. -V. A392. -P. 12-17.
3. *V. M. Aulchenko, S. E. Baru, M. S. Dubrovin, ..., V.M. Titov, et.al.* One- and Two-Coordinate Detectors in BINP // Journal of Synchrotron Radiation. -1998. -V. 5. -P 263-267.
4. *V.M. Aulchenko, M.A. Bukin, Yu.S. Velikzhanin, ..., V.M. Titov, et.al.* Fast, parallax-free, one-coordinate X-ray detector OD3 // Nucl. Instrum. and Methods. -1998. -V. A405. -P. 269-273.
5. *V.M. Aulchenko, M.A. Bukin, I.V. Gaponenko, V.M. Titov, B.P. Tolochko.* The data acquisition and on-line visualisation system for the

- OD-3 fast one-coordinate X-ray detector // Nucl. Instrum. and Methods. -1998. -V. A405. -P. 282-285.
6. *V.M. Aulchenko, A.V. Bessergenev, O.V. Evdokov, ..., V.M. Titov, et.al.* The station for time-resolved investigation in wide and small angles of diffraction // Nucl. Instrum. and Methods. -1998. -V. A405. -P. 487-493.
 7. *V.M. Aulchenko, A.E. Bondar, V.P. Nagaslaev, A.A. Tatarinov, V.M. Titov.* Study of CAMEX chips for microstrip gas chamber readout in short cycles // Nucl. Instrum. and Methods. -1996. -V. A376. -P. 225-228.
 8. *V.M. Aulchenko, S.E. Baru, L.I. Shekhtman, V.M. Titov, B.P. Tolochko.* New One and Two-Coordinate Detectors // Materials Science Forum. -2000. -V. 321-324. -P. 320-325.
 9. *V.M. Aulchenko, M.A. Bukin, A.A. Vazina, ..., V.M. Titov, et.al.* Current status of the studies of biological objects by the time-resolved X-ray diffraction technique // Nucl. Instrum. and Methods. -2005. -V. A543. -P. 143-147.
 10. *Корнеев В.Н., Сергиенко П.М., Шлектарев В.А., ..., Титов В.М., и др.* Станция "DICSIF" на КЦСИИИТ. Определение оптимальных условий формирования пучка СИ на базе цилиндрических рентгенооптических трансфокаторов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. -2007. -№ 2. -С. 57-63.
 11. *V. M. Aulchenko, P. A. Papishev, M. R. Sharafutdinov, ..., V. M. Titov, et.al.* Progress with one-coordinate detector for WAXS // Nucl. Instrum. and Methods. -2009. -V. A603. -P. 69-72.
 12. *V.M. Aulchenko, O.V. Evdokov, V.D. Kutovenko, ..., V.M. Titov, et.al.* One-coordinate X-ray detector OD-3M // Nucl. Instrum. and Methods. -2009. -V. A603. -P. 76-79.
 13. *O.V. Evdokov, V.M. Titov, B.P. Tolochko, et.al.* In situ time-resolved diffractometry at SSTRC // Nucl. Instrum. and Methods. -2009. -V. A603. -P. 194-195.
 14. *V.M. Aulchenko, S.E. Baru, O.V. Evdokov, ..., V.M. Titov, et.al.* Fast high resolution gaseous detectors for diffraction experiments and imaging at synchrotron radiation beam // Nucl. Instrum. and Methods. -2010. -V. A623. -P. 600-602.