

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г.И. БУДКЕРА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК

На правах рукописи

ТИТОВ ВИТАЛИЙ МИХАЙЛОВИЧ

**БЫСТРЫЙ ОДНОКООРДИНАТНЫЙ ДЕТЕКТОР
ГАММА-КВАНТОВ**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Аульченко Владимир Михайлович
доктор технических наук, профессор

Новосибирск – 2014

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Постановка задачи	7
Глава 2. Детектор ОД-3М – общее описание	14
2.1. Состав детектора	14
2.2. Физические принципы работы детектора ОД-3М.....	18
Глава 3. Вычисление координат	22
3.1. Выбор алгоритма.....	24
3.2. Разрядность АЦП.....	30
3.3. Аппаратная реализация алгоритма.....	31
Глава 4. Электроника аналого-цифровой обработки сигналов	34
4.1. Шумовые параметры электронного тракта	34
4.2. Аналоговая часть электронного канала	36
4.3. Аналого-цифровой преобразователь	38
Глава 5. Отбор событий (триггер) и калибровка детектора	40
5.1. Выделение и фильтрация (отбор) событий.....	40
5.2. Калибровка детектора.....	41
5.2.1. Таблица RAM1	41
5.2.2. Таблица RAM2.....	43

Глава 6. Координатное разрешение, интегральная и дифференциальная нелинейности	48
6.1. Физическое (полное) разрешение детектора	48
6.2. Интегральная нелинейность	50
6.3. Дифференциальная нелинейность	52
6.4. Примеры использования детектора ОД-3М	56
Заключение.....	58
Литература.....	62
Приложение 1. Регистрирующая электроника детектора ОД-3М.....	65
Приложение 2. Система питания детектора ОД-3М	69
Приложение 3.. Схема усилителя – формирователя.....	71
Приложение 4. Триггер.....	72
Приложение 5. Интерфейс пользователя	76

Введение

В настоящей диссертации представлен результат работы автора по созданию координатного детектора рентгеновских квантов с уникальным набором параметров.

Открытые К.Рентгеном в 1895 году лучи, получившие название рентгеновских, быстро, даже по современным меркам, приобрели широкую известность, и уже через год было опубликовано свыше 1000 работ по исследованию и применению рентгеновских лучей.

Способность этих лучей проникать через оптически непрозрачное вещество и ряд других уникальных свойств позволили за исторически короткий срок развить целый ряд новых методов исследования материи [1, стр. 9]:

- **проекционная рентгенография** - используется зависимость степени ослабления интенсивности рентгеновских лучей от вида вещества;
- **рентгеновская спектроскопия** - анализируется вторичное излучение, возникающее под воздействием падающих на вещество рентгеновских лучей (мягкая компонента была названа **характеристическим излучением**, Ч.Баркла, 1906 г.);
- **рентгеноструктурный анализ** – основан на зависимости между углом дифракции, длиной волны рентгеновского излучения и расстоянием между соседними параллельными атомными плоскостями в атомной решётке кристаллов (У.Л.Брэгг и независимо от него Г.В.Вульф, 1913г.);
- **рентгеноспектральный анализ** – используется зависимость частоты спектральных линий от порядкового номера излучающего элемента в периодической таблице Менделеева (закон Мозли, 1913г.).

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 [2, 3].

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 несколько микрон и менее;
- ограниченная номенклатура координатных детекторов, обладающих набором метрологических параметров, позволяющим получать информацию из областей микронных размеров за время в диапазоне 1 мкс – 1 сек.

Для таких экспериментов требуются одно- и двухкоординатных детекторы с большим динамическим диапазоном, с высоким координатным разрешением в широком диапазоне углов, быстродействием и эффективностью регистрации.

В принципе, двухкоординатные детекторы, позволяют получать более детальную информацию, чем однокоординатные. Вместе с тем, существует большой круг задач, в которых координатное распределение излучения, прошедшего через образец, обладает аксиальной симметрией. В этом случае без какого-либо ущерба для качества получаемой информации можно обойтись однокоординатными детекторами, которые конструктивно, как

правило, проще двухкоординатных, но позволяют достичь высокого координатного разрешения и быстродействия за счёт использования таких алгоритмов определения координат регистрируемых рентгеновских квантов, которые практически невозможно реализовать в двухкоординатных детекторах.

Настоящая диссертационная работа посвящена решению актуальной задачи - разработке быстрого, свободного от параллакса, обладающего высокой эффективностью регистрации, однокоординатного рентгеновского детектора для дифракционных экспериментов с использованием как рентгеновских трубок, так и синхротронного излучения (СИ).

На защиту выносятся следующие положения:

- 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 процедуры калибровки;
- 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 шумов для предварительного усиления и формирования сигналов с катодных полосок газового координатного сенсора.

Глава 1. Постановка задачи

Разработка и производство однокоординатных детекторов рентгеновского излучения на основе проволочных пропорциональных камер ведётся в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера с 1975 года [4, 5]. В детекторе ОД-2 [6] использовалась камера со съёмом информации с помощью линии задержки. Детекторы этого типа использовались в научных центрах в Новосибирске, Москве, Пущино для экспериментов по рентгеноструктурному анализу.

Выбор проволочных пропорциональных камер в качестве координатных датчиков для рентгеновских детекторов тогда был обусловлен несколькими основными факторами:

- ИЯФ к тому времени располагал богатым опытом разработки и изготовления больших координатных систем на камерах такого типа для экспериментов по основной тематике института – физике высоких энергий. Имелась вся необходимая инфраструктура для их разработки и производства.
- Изготовление таких камер достаточно технологично и относительно недорого. В то же время, при правильном выборе способа съёма сигналов, они обеспечивают требуемое в рентгеноструктурных экспериментах координатное разрешение и быстродействие.
- Пропорциональные камеры, заполненные типичной газовой смесью 90% Ar+10% CO₂, имеют очень высокую радиационную стойкость, что очень важно при работе на пучках СИ.

Время же координатных сенсоров на основе MSGC (Micro-Strip Gas Chamber) [7] и кремниевых микрополосковых структур [8, стр. 1], равно как и специализированных многоканальных интегральных микросхем для работы с ними, тогда ещё не настало.

Этим, в частности, объясняется то, что большинство многоканальных координатных детекторов с достаточно высоким разрешением ($\sim 150 \div 200$ мкм) и большой апертурой строились по принципу «вычисляемого канала», позволяющему минимизировать количество исходных, «физических» каналов. Для вычисления номера канала (координаты кванта) в таких детекторах использовались разные методы, наибольшее распространение из которых получили временной метод и метод центра тяжести:

- в первом случае координата вычисляется по времени распространения сигнала по линии задержки, являющейся одним из катодов камеры, как, например, в ОД-2 или в применявшихся в ОИЯИ (г. Дубна) разработках Ю.В. Заневского [9, 10];
- во втором – электрод одного из катодов камеры выполняется в виде электрически разделённых сегментов (полосок). Координата кванта определяется как положение центра тяжести наведённых на полоски зарядов [11].

Оба метода имеют свои достоинства и недостатки, а также ограничения по возможностям развития.

В детекторах с линией задержки основным конструктивным элементом, определяющим метрологические параметры детектора, является линия задержки (Л.З.) открытого типа, однородность погонной задержки которой напрямую определяет однородность шкалы детектора. Изготовление Л.З. с высокой однородностью является довольно сложной технологической задачей.

К достоинствам такого типа детекторов можно отнести сравнительно небольшой объём электроники, связанный с преобразованием $\Delta t \rightarrow \Delta x$. Правда, эта электроника должна иметь высокое временное разрешение.

Существует простая связь между апертурой (D) детектора, координатным разрешением (Δx), временным разрешением (Δt) электроники и полным временем задержки Л.З. (T):

$$T = \frac{\Delta t \cdot D}{\Delta x} \quad (1.1)$$

Основное условие корректного определения координаты состоит в том, чтобы в течение времени распространения по Л.З. сигналов от одного события не появлялись сигналы от других событий. При нарушении этого условия такие события бракуются.

В соответствии с распределением Пуассона для временных интервалов, вероятность того что при скорости потока событий $Rate$ за время T не произойдет ни одного события равна $R = e^{-Rate \cdot T}$ [12, стр.106]. Тогда при 50% отбраковки (просчетов) скорость регистрации событий составляет:

$$Rate_{0,5} = \frac{-\ln(0.5)}{T} \approx \frac{0.7}{T} \quad (1.2)$$

Например: для $D = 100$ мм, $\Delta x = 0.1$ мм и $\Delta t = 1$ нс, в соответствии с (1.1) требуется линия задержки на $T = 1$ мкс. В соответствии с (1.2) скорость регистрации составит $Rate_{0,5} = 7 \cdot 10^5$ событий/сек. Следует учесть, что сигналы с Л.З. после усиления и формировки имеют длительность, заметную по сравнению с полученным значением полного времени задержки Л.З. (1 мкс). В результате, на практике реальная скорость регистрации получится $Rate_{0,5} = (0.3 \div 0.4) \cdot 10^5$ событий/сек. Примерно такие характеристики имел детектор ОД-2.

И если разрешение ~ 100 мкм для большинства рентгеноструктурных экспериментов вполне приемлемо, то быстродействия в несколько сотен килогерц, особенно для исследования реакций в режиме “in situ”, явно недостаточно. Желательно было также увеличить апертуру детектора и эффективность регистрации, избежав при этом появление параллакса.

На основании анализа потребностей планируемых экспериментов и накопленного на тот момент опыта, в начале 90-х годов были сформулированы основные требования к будущему детектору:

- апертура, мм не менее 200;
- или в градусах (в разных модификациях) от ± 4.5 до ± 15 ;
- разрешение, мкм 150;
- или в угловых секундах от 20 до 80;
- эффективность регистрации квантов с энергией $8 \div 10$ кэВ ≥ 50 %;
- скорость регистрации (при 50% просчётов) $10^7 \frac{\text{событий}}{\text{сек.}}$;
- минимальная длительность кадра КИНО 1 мксек.

К тому времени уже появились упоминавшиеся выше координатные сенсоры на основе MSGC и кремниевых микрополосковых структур, с помощью которых можно было обеспечить требуемые параметры детектора за счет использования малого шага регистрирующей структуры и прямого счета событий.

Так, построенный для канала DUBBLE синхротрона ESRF (Гренобль, Франция) прототип детектора на основе MSGC с шагом структуры 200 мкм, показал скорость регистрации 100 кГц на канал при эффективности ~ 95 % [13]. В окончательном варианте [14] предельная скорость регистрации составила ~ 450 кГц на канал детектора при максимальной эффективности ~ 38 %, что связано с конструктивными особенностями. Были использованы MSGC с веерной структурой с шагом 400 мкм и общим числом исходных каналов 1024, число выходных каналов удваивается за счет применения логики совпадений. В качестве усилителя-формирователя использованы специализированные микросхемы Preshape32 [15], оптимизированные для работы с MSGC.

Следует отметить, что детекторы этого типа были анонсированы в 1988 году и на момент начала нашей разработки еще не были распространены, продолжались исследования на предмет улучшения метрологических характеристик и радиационной стойкости. Совсем иная ситуация была с кремниевыми полосковыми детекторами, идея которых была предложена в 1980 году и к началу 90-х уже получивших широкое распространение. В частности, они использовались в вершинных детекторах, где требовались большая скорость счета, высокое разрешение и радиационная стойкость [16]. Принципиально бóльшая плотность рабочего вещества по сравнению с газом, определяет малый размер кластера первичной ионизации и малый коэффициент диффузии, что, в итоге, дает высокое пространственное разрешение, практически ограниченное только шагом регистрирующей структуры (на 1992 год предельное значение 20 мкм [8, стр. 24]). Этот же фактор позволяет обеспечить 100% эффективность регистрации фотонов в интересующем нас диапазоне энергий. Высокая подвижность носителей обеспечивает быстрое (порядка 10 нсек) собирание образовавшегося заряда, поэтому скорость регистрации определяется только возможностями электроники. Для работы с полосковыми детекторами создавались специализированные микросхемы с шагом считывания 50 – 100 мкм. Преимущественно они предназначались для работы с микрополосковыми детекторами на накопителях, то есть с прогнозируемым временем прихода события. Поэтому, помимо зарядочувствительных усилителей (ЗЧУ), в них имелся узел, обеспечивающий запоминание аналоговой информации «до и после события», а информация считывалась последовательно, что позволяло сократить объем электроники. Особый интерес представляет уже упомянутый Preshape32, в котором к ЗЧУ добавлен RC-CR формирователь с постоянной времени 45 нсек. При этом каждый канал имеет индивидуальный выход, что означает возможность регистрации событий без привязки к внешнему запуску.

В рамках коллабораций с Европейским центром ядерных исследований (ЦЕРН), в ИЯФ СО РАН проводились исследования, связанные с применением обоих типов детекторов, в том числе и со специализированной электроникой для них [17]. Был накоплен определенный опыт работы с этими устройствами, и только неопределенность с радиационной стойкостью специализированных микросхем и самих детекторов, а также финансовые соображения, привели к тому, что для создания нового детектора было принято решение использовать пропорциональную проволочную газовую камеру.

Достижение требуемых параметров в конструкции с линией задержки требует временного разрешения аппаратуры существенно лучше 0.1 нс (см. 1.1 и 1.2) или/и использования нескольких линий задержки и, соответственно, нескольких время-цифровых преобразователей, что сопряжено с очень большими техническими сложностями.

В то же время, собственные характеристики газовых сенсоров позволяют обеспечить требуемые характеристики детектора в целом при использовании адекватных методов съёма и обработки информации. Упомянутый выше метод «центра тяжести» (точнее - его модификация) представляется перспективным по следующим причинам:

- метод подразумевает изготовление одного из катодов камеры в виде сегментов (плосок), что технологически несложно, так как можно использовать технологии, применяемые при изготовлении печатных плат;
- размеры и геометрию полосок легко согласовать с другими межэлектродными размерами в камере;
- электроника обработки сигналов с полосок, используемых для вычисления координат квантов, не требует применения специальных микросхем и вполне может быть исполнена на серийных компонентах;

- стремительный прогресс в увеличении разрядности и быстродействия аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), используемых для оцифровки и цифровой обработки сигналов, открывает возможности для дальнейшего улучшения параметров детекторов.

Глава 2. Детектор ОД-3М – общее описание

Рентгеновские детекторы серии ОД-3, разработанные в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, производятся в различных модификациях с 1995 года [18, 19]. За прошедшие годы были проведены две существенные модернизации электроники детектора. Они касались, в основном, цифровой ее части. Переход на ПЛИС большой степени интеграции в свое время позволил сократить физический объем электроники и реализовать более совершенные алгоритмы обработки информации.

Детектор ОД-3М является результатом очередной модернизации, которая базируется на существенном прогрессе в развитии как цифровой, так и аналоговой элементной базы электроники последних нескольких лет и является наиболее радикальной.

2.1. Состав детектора

Однокоординатный детектор гамма-квантов ОД-3М [20] состоит из регистрирующего блока, блока питания и управляющего компьютера (Рисунок 2.1).

Регистрирующий блок, в свою очередь, состоит из координатного сенсора, представляющего собой пропорциональную проволочную камеру с катодным съемом информации, дополненную конверсионным объёмом, и регистрирующей электроники. Конструктивно регистрирующий блок (Рисунок 2.2) разделён на три соединенных между собой отсека - собственно координатный сенсор и два отсека с электроникой.

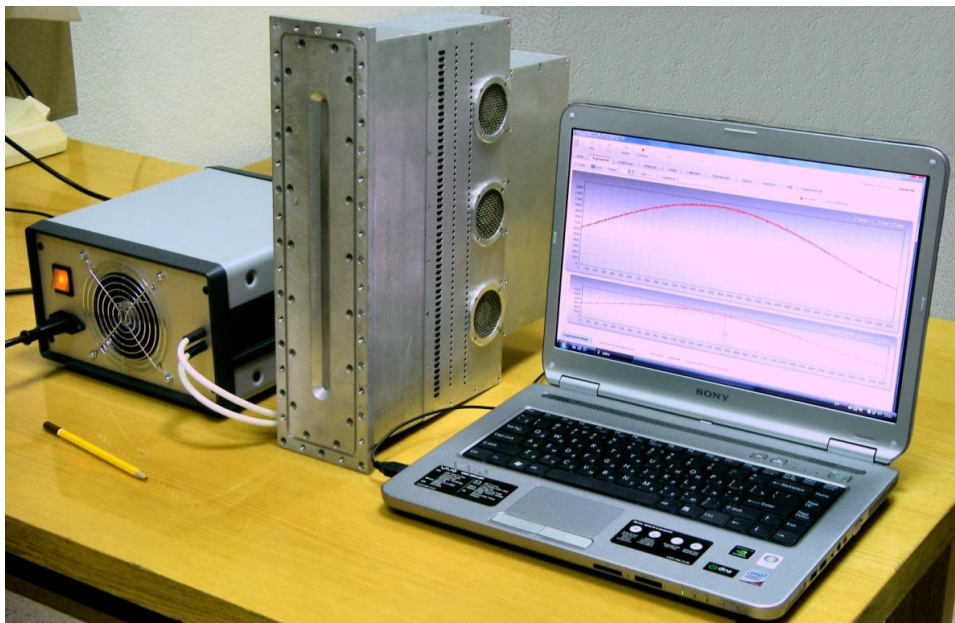


Рисунок 2.1. Однокоординатный детектор ОД-3М.

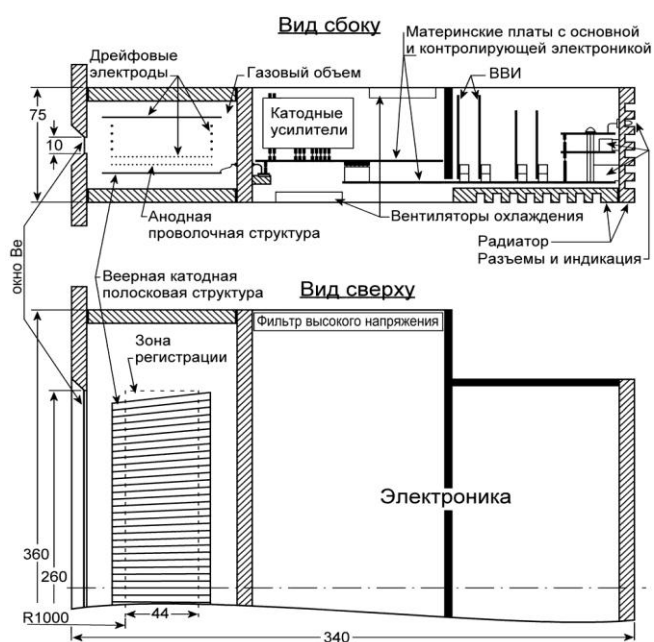


Рисунок 2.2. Схема расположения основных элементов регистрирующего блока ОД-3М.

Координатный сенсор представляет собой герметичный объем, заполненный газовой смесью $90\% \text{Ar} + 10\% \text{CO}_2$ под избыточным давлением $\sim 0,2 - 0,3$ атм., в котором размещена система электродов. Электродная структура собственно пропорциональной камеры расположена ниже входного

окна и содержит проволочные анодную и верхнюю катодные плоскости и нижний катод, выполненный в виде полосок на керамике и направленных на исследуемый объект для устранения параллакса. Анод расположен между катодами на равном от них расстоянии (5мм); анодные проволочки натянуты параллельно входному окну.

Дрейфовый электрод, находящийся под самым низким в системе потенциалом -2500 В , расположен со стороны проволочного катода на расстоянии 25 мм от него, образуя конверсионный дрейфовый объем с вертикальным полем, из которого электроны первичной ионизации попадают на анодную плоскость. Рабочее напряжение анода лежит в диапазоне от $+2700\text{ В}$ до $+2800\text{ В}$.

Координаты квантов вдоль окна камеры вычисляются по распределению заряда, наведенного на полосках нижней катодной плоскости. Катодные полоски соединены с усилителями - формирователями и находятся под потенциалом, близким к нулю.

Регистрирующая электроника (Рисунок 2.3) располагается в двух соединенных с пропорциональной камерой отсеках.

В первом, ближайшем к камере, отсеке размещена основная электроника: усилители-формирователи, быстрые АЦП, узел вычисления координат регистрируемых квантов и накопления спектров. Эта часть электроники детектора выполняет:

- усиление, формирование и оцифровку сигналов с полосок катодной плоскости;
- отбор событий - комбинаций сигналов с катодной плоскости пропорциональной камеры, удовлетворяющих определенным критериям по амплитудам и времени появления;

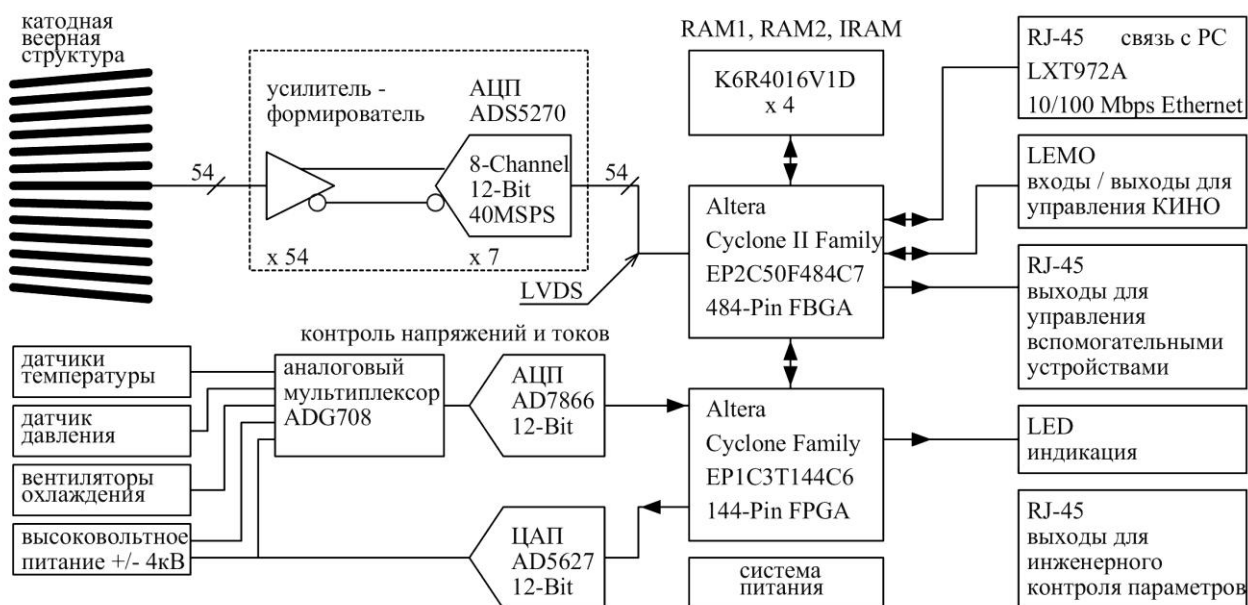


Рисунок 2.3. Блок-схема электроники детектора ОД-3М.

- вычисление для отобранных событий координат породивших их рентгеновских квантов;
- накопление координатных спектров (гистограмм) зарегистрированных квантов в соответствии с установленными режимами.

Алгоритмы работы детектора реализуются под управлением программы (firmware), записанной в ПЛИС ALTERA.

Во втором отсеке размещена электроника контроля и управления, высоковольтные и низковольтные источники напряжения, интерфейс Ethernet, адаптеры входных и выходных сигналов для связи с внешним оборудованием.

Основная электроника и используемые алгоритмы работы детектора будут подробно описаны в последующих главах. Описание вспомогательной электроники, размещенной во втором отсеке, вынесено в приложения 1 и 2.

Детектор по Ethernet связан с **управляющим компьютером**, работающим под операционной системой Windows. Управляющая программа ОД-3М предоставляет оператору удобный интерфейс для задания и контроля

параметров детектора, режимов эксперимента, отображения и хранения гистограмм.

2.2. Физические принципы работы детектора ОД-3М

Пучок фотонов, попадая в камеру, взаимодействует с атомами газа, в нашем случае смесь 90%Ar + 10%CO₂. В диапазоне энергий от 5 до 10 кэВ наиболее вероятный процесс взаимодействия - фотопоглощение (или фотоэффект) [21].

Фотоэффект - процесс поглощения фотона с испусканием электрона. В указанном диапазоне энергий этот процесс происходит преимущественно на К-уровне [22, стр.214]. Поглощение фотона с энергией E_1 на уровне E_K (для Ar $E_K = 3.2$ кэВ [23, стр.1-2]) приводит к испусканию фотоэлектрона с энергией $E_2 = E_1 - E_K$. Возбужденный атом может вернуться к своему основному состоянию двумя способами: путем флюоресценции (переход электрона с внешнего уровня на К-уровень с излучением фотона с энергией близкой к E_K) или путем Оже-эффекта с излучением электрона с энергией, близкой к E_K .

Таким образом, в результате взаимодействия фотона с атомом аргона возможно образование фотоэлектрона и фотона (с вероятностью ~ 13 % [24]) либо фотоэлектрона и Оже-электрона с суммарной энергией, близкой к исходной энергии фотона. Энергия образовавшихся электронов идет на ионизацию окружающих атомов газа. Размер области первичной ионизации дает основной вклад в пространственное разрешение детектора и зависит от длины пробега фотоэлектрона и Оже-электрона. Длина пробега, в свою очередь, зависит от их энергии, а значит, от энергии фотона. В работе [21] было экспериментально измерено влияние пробега электронов на пространственное разрешение для близкой по свойствам газовой смеси

90% Ar + 10% CH₄ при атмосферном давлении. Пространственное разрешение, обусловленное этим эффектом, составляет ~ 100 мкм FWHM (Full Width at Half Maximum) для фотонов с энергией 6 кэВ, что соответствует стандартному отклонению (RMS) $\sigma_e \approx 43$ мкм; для энергии 8 кэВ - ~ 240 мкм FWHM ($\sigma_e \approx 102$ мкм). Разрешение можно улучшить путем увеличения давления в камере. При этом сокращается длина пробега электронов за счет увеличения плотности газа. В диапазоне от 1 до 10 атмосфер для указанной газовой смеси пространственное разрешение обратно пропорционально давлению [21].

Электроны первичной ионизации дрейфуют по линиям электрического поля к анодным проволочкам. Во время дрейфа происходит увеличение размера облака ионизации из-за процесса диффузии в газе. Для используемой в детекторе ОД-3М газовой смеси, дрейфового расстояния и напряженности поля в дрейфовом промежутке, согласно оценке в работе [8, стр. 113], при атмосферном давлении смещение одного электрона из-за диффузии составляет $\sigma_{\text{diffusion}} \sim 300$ мкм.

Однако, поскольку число электронов первичной ионизации определяется отношением энергии фотона к энергии ионизации, то при поглощении одного фотона рождается ~ 400 электрон-ионных пар (см. в Главе 4), и оценочную величину следует поделить на $\sqrt{400}$. Таким образом, пространственное разрешение детектора, определяемое диффузией, составляет $\sigma_{\text{diffusion}} \sim 15$ мкм.

Газовое усиление и индуцирование заряда

Ионы и электроны первичной ионизации, образовавшиеся в результате конверсии, движутся в электрическом поле, соответственно, в сторону дрейфового электрода и анода. В непосредственной близости от анодных проволочек в области высокого градиента электрического поля происходит каскадное размножение числа носителей - газовое усиление ($K \sim 5 \cdot 10^4$).

Камера детектора ОД-3М работает в пропорциональном режиме, когда величина выходного сигнала пропорциональна величине первичной ионизации.

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. Поверхностная плотность заряда (σ), наведенного на катодную плоскость, зависит от расстояния между областью образования лавины и точкой на катодной плоскости, как $1/(r^3)$.

На рисунке 2.4 это распределение показано в координатах X-Y. Там же условно изображены полоски катодной плоскости. За единицу здесь взято расстояние ($h \approx 5\text{мм}$) между анодной плоскостью и полосковой структурой. Ось X направлена параллельно входному окну и, соответственно, параллельно анодным проволочкам пропорциональной камеры.

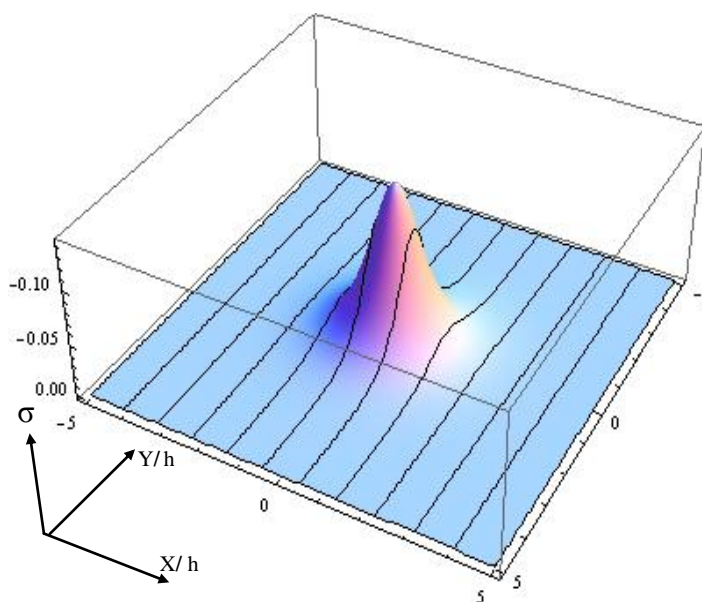


Рисунок 2.4. Распределение индуцированного заряда на катодной плоскости.

Процесс **определения координаты** фотона упрощенно выглядит следующим образом. После усиления с помощью ЗЧУ сигналы с полосок представляют собой импульсы псевдо-гауссовой формы с длительностью по основанию приблизительно 200 нс. Эти импульсы с помощью АЦП оцифровываются с периодом 25 нс. Более подробно процесс усиления, формирования и оцифровки катодных сигналов изложен в главе 4.

Путем сравнения последовательных цифровых значений величин сигналов находится максимальное значение сигнала (максимум по времени) для сигналов от каждой полоски. Одновременно происходит сравнение с амплитудами сигналов с соседних полосок и таким образом находится максимум по координате с точностью до ширины полоски. В результате выбирается "кандидат на событие", который далее подвергается отбору по определённым критериям, чтобы исключить наложение событий. Для каждого отобранного события фиксируется номер полоски N с максимальной амплитудой и три амплитуды сигналов с полосок A_{N-1} , A_N , A_{N+1} – левой, центральной и правой. Эти величины далее используются для вычисления координаты фотона (номера канала) с точностью до $1/64$ от ширины полоски, что составляет ~ 70 мкм (цена канала).

Подробнее об этом будет рассказано в 3-й главе.

Глава 3. Вычисление координат

Классический метод нахождения центра тяжести (ЦТ) $x_{ц}$ распределения одномерной функции $A(x)$, как известно, заключается в нахождении взвешенной суммы:

$$x_{ц} = \frac{\int_0^{\infty} xA(x)dx}{\int_0^{\infty} A(x)dx} \quad (3.1)$$

Если шкала (параметр) x разделена на N зон (измерительные каналы) шириной Δx , а значение функции в канале n равно $A_n = \int_{n\Delta x}^{(n+1)\Delta x} A(x)dx$, то в этом случае выражение для 3.1 принимает вид:

$$x_{ц} = \frac{\Delta x \sum_{n=1}^N nA_n}{\sum_{n=0}^N A_n} \quad (3.2)$$

При этом, в принципе, точность определения $x_{ц}$ может быть гораздо лучше ширины Δx измерительного канала. Очень важно подчеркнуть, что это утверждение справедливо именно для $x_{ц}$ распределения A_n , но не для распределения $A(x)$. Для определения центра тяжести распределения $A(x)$ таким методом с точностью много лучше ширины измерительного канала требуется, чтобы величина $A(x)$ в пределах одного канала менялась слабо, иными словами, характерный размер распределения должен занимать много измерительных каналов.

Применительно к рассматриваемой конструкции детектора это означает, что классический метод ЦТ не позволяет построить координатный детектор с шириной вычисляемого канала (разрешением) много меньше ширины измерительного канала (ширина полоски).

Как уже упоминалось выше (глава 1), для вычисления координаты точки конверсии фотона в детекторе используется метод, названный нами «модифицированный метод центра тяжести». В отличие от классического

метода здесь используется две особенности распределения поверхностной плотности индуцированного заряда $\sigma(x,y)$ (рисунок 2.4):

- для каждого события распределение A_n имеет явно выраженный максимум, что позволяет легко определить центральную полосу, 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 пропорциональной камере детектора ОД-3М анодная плоскость располагается посередине между катодами. В этом случае поверхностная плотность индуцированного на катод заряда $\sigma(x,y)$ в соответствии с законами электростатики определяется выражением:

$$\sigma(x, y) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{-(-1)^i 2h(1+2h)q_0K}{4\pi[h^2(1+2i)^2 + (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]^{3/2}}, \quad (3.3)$$

где h – зазор между анодом и катодом; q_0 – величина заряда первичной ионизации в точке конверсии, x_0, y_0 – координаты заряда, K – коэффициент газового усиления.

При ширине полосок $s \approx h$ и длине $l \gg h$ заряд q_n на полоске n , будет:

$$q_n = \int_{X_n}^{X_{n+s}} \int_0^{\infty} \sigma(x, y) dx dy, \quad (3.4)$$

где X_n и X_{n+s} – границы полоски по координате X .

В соответствии с (3.3) q_n зависит только от координаты x_0 и заряда на аноде $Q = q_0K$.

Заряды с полосок собираются и преобразуются в короткие импульсы с помощью зарядо-чувствительных и формирующих усилителей, амплитуда которых $A_n \sim q_n$. Далее, для определения координаты кванта, сигналы A_n подвергаются цифровой обработке в соответствии с выбранным алгоритмом.

3.1. Выбор алгоритма

Алгоритм вычисления координаты кванта по амплитудам сигналов с полосок заключается в нахождении функции преобразования $F(A_{n-i}, \dots, A_{n+i}) \rightarrow X$, удовлетворяющей нескольким основным критериям:

1. Для сокращения объёма вычислений желательно обходиться сигналами от минимального числа полосок. Это могут быть, например, центральная полоска (A_c) и соседние боковые полоски (A_l, A_r), или только боковые.

2. На границах полосок, например, правый край полоски A_n – левый край полоски A_{n+1} , при смене номера центральной полоски, алгоритм должен давать одинаковый результат, поскольку координата точки конверсии x_0 при этом не меняется. Иными словами, функция преобразования $F(A_{n\pm i})$ алгоритма должна быть симметрична относительно центров полосок.

3. Функция $F(A_{n\pm i})$ в пределах полоски должна быть максимально линейной, а её производная – постоянной для достижения малой интегральной и дифференциальной нелинейностей шкалы детектора.

4. Поскольку в газовых детекторах заряд первичной ионизации и коэффициент газового усиления имеют значительные флуктуации даже при неизменной энергии фотонов, то для обработки сигналов с полосок необходим алгоритм, максимально подавляющий влияние этих флуктуаций.

На рисунке 3.1 показано поведение сигналов с центральной и двух соседних полосок при перемещении точки конверсии между границами центральной полоски (ширина полосок $s \approx h$).

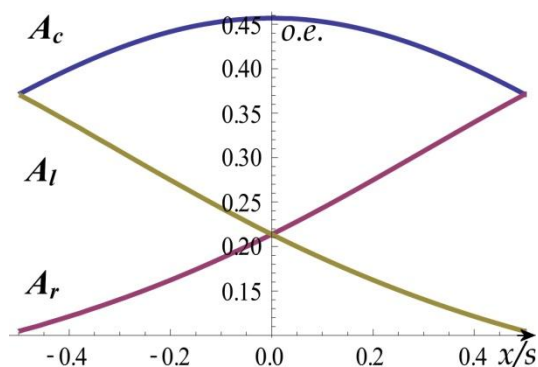


Рисунок 3.1. Амплитуды сигналов с трех полосок (в относительных единицах) в зависимости от координаты точки конверсии.

Для наглядности на этом и последующих рисунках середина центральной полоски находится в начале координат по оси X , шкала по оси Y – в относительных единицах.

Самый простой из возможных алгоритмов, подавляющий разброс величины заряда в камере, по-видимому, состоит в вычислении отношений:

$$C_1 = A_l/A_r \text{ и } C_2 = A_r/A_l, \quad (3.5)$$

графики которых приведены на рисунке 3.2.

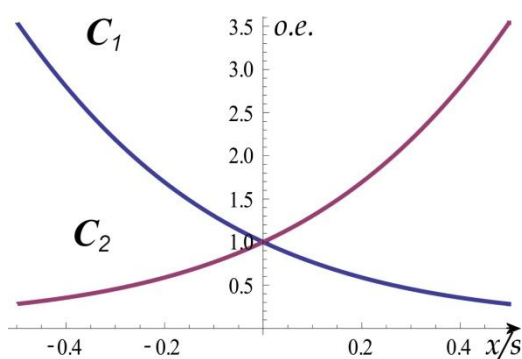


Рисунок 3.2. Функции C_1 и C_2 (в относительных единицах) в зависимости от координаты точки конверсии.

С учётом требования симметрии возможны два варианта:

$$V_1 = \begin{cases} C_1 & \text{для } A_l > A_r \\ C_2 & \text{для } A_r \geq A_l \end{cases} \quad (3.6)$$

$$V_2 = \begin{cases} C_2 & \text{для } A_l > A_r \\ C_1 & \text{для } A_r \geq A_l \end{cases} \quad (3.7)$$

Графики функций V_1 и V_2 , их отклонений от линейности и производных приведены соответственно на рисунках 3.3 и 3.4.

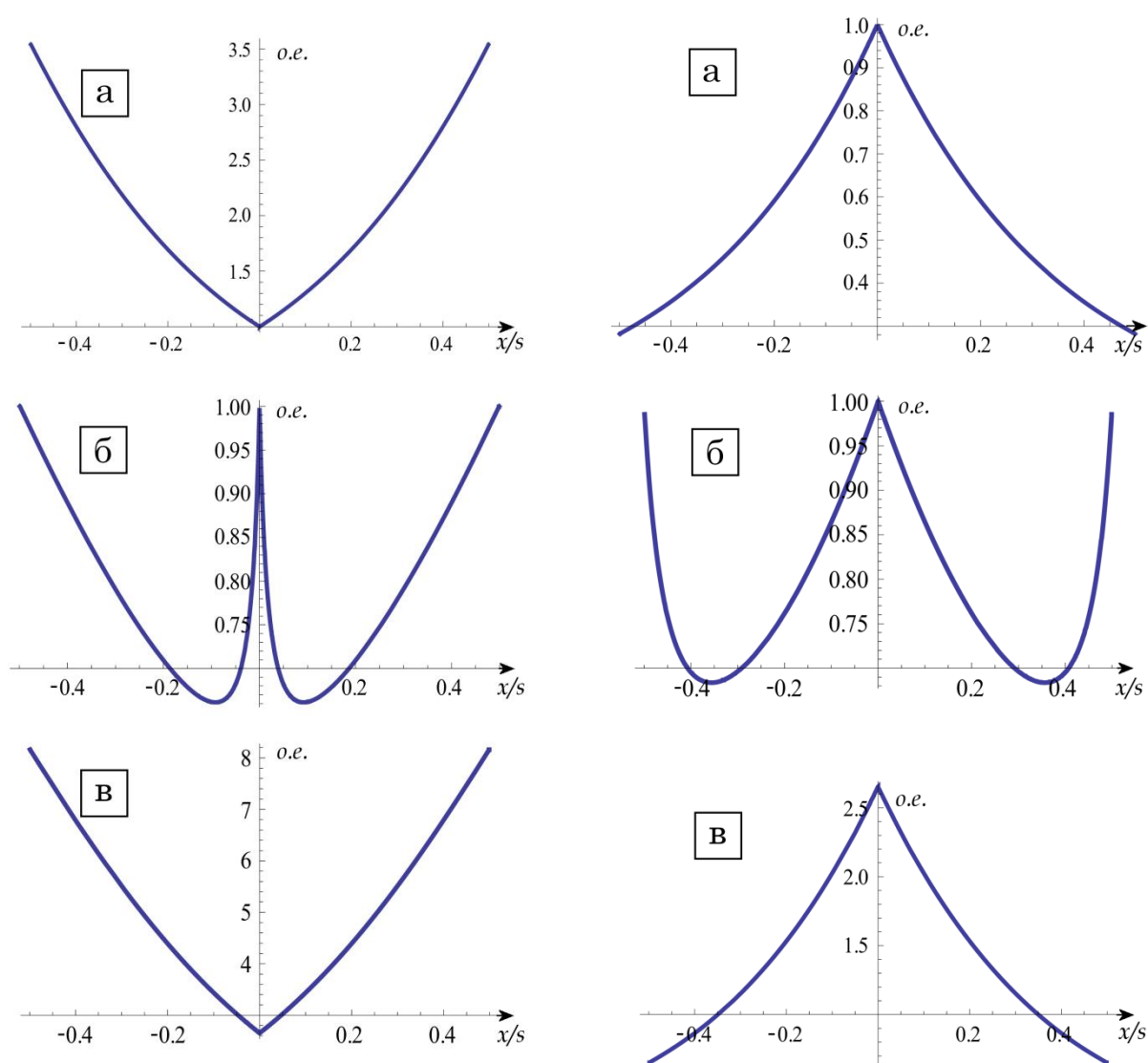


Рисунок 3.3. Функция V_1 (а), отклонение от линейности (б) и производная (в) (в относительных единицах) в зависимости от координаты точки конверсии.

Рисунок 3.4. Функция V_2 (а), отклонение от линейности (б) и производная (в) (в относительных единицах) в зависимости от координаты точки конверсии.

Как следует из графиков, обе функции имеют схожий характер и величину отклонения от линейности, превышающую 30%, и, что более важно, их производные при перемещении от краёв полоски к её центру изменяются в три раза. Необходимая коррекция неизбежно возникающей при этом нелинейности шкалы в столь широких пределах потребует вычислений с точностью гораздо большей, чем величина канала, составляющая 1/64 от ширины плоски.

Так, например, для достижения дифференциальной нелинейности не более 3% необходимо вычислять границы каналов с такой же точностью даже при абсолютной интегральной линейности используемого алгоритма. Коррекция же нелинейности алгоритма требует пропорционального увеличения точности, в нашем случае – ещё в три раза.

Более сложный алгоритм, подавляющий и разброс величины заряда в камере, и смещение базовой линии в усилительных каналах, состоит в вычислении отношения разностей:

$$B_1 = (A_c - A_l) / (A_c - A_r) \text{ и } B_2 = (A_c - A_r) / (A_c - A_l), \quad (3.8)$$

графики которых приведены на рисунке 3.5.

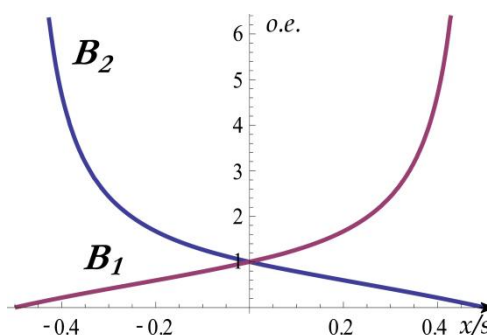


Рисунок 3.5. Функции B_1 и B_2 (в относительных единицах) в зависимости от координаты точки конверсии.

С учётом требования симметрии, как и в случае с первым алгоритмом, возможны два варианта:

$$D_1 = \begin{cases} B_1 & \text{для } A_l > A_r \\ B_2 & \text{для } A_r \geq A_l \end{cases} \quad (3.9)$$

$$D_2 = \begin{cases} B_2 & \text{для } A_l > A_r \\ B_1 & \text{для } A_r \geq A_l \end{cases} \quad (3.10)$$

Однако, ввиду чрезвычайно большой нелинейности функции D_2 , подробно рассмотрим лишь вариант с функцией D_1 . Графики функции D_1 , её отклонения от линейности и производной $(D_1)'$ приведены на рисунке 3.6.

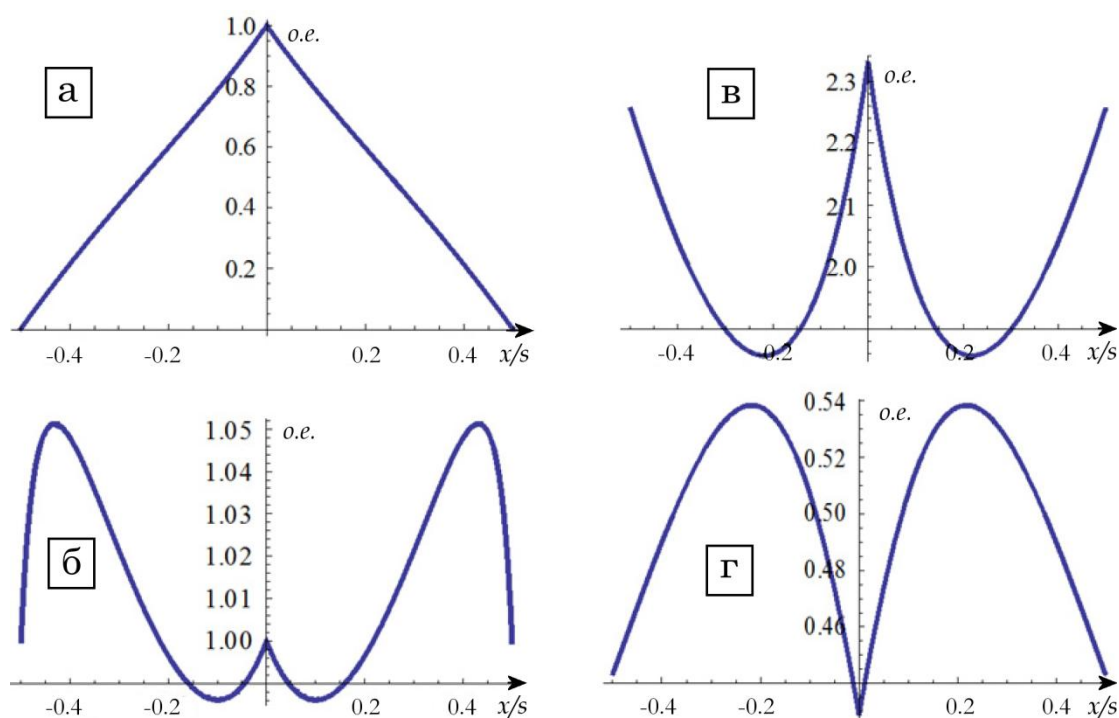


Рисунок 3.6. Функция D_1 (а), отклонение от линейности (б), производная (в) и $1/(D_1)'$ (г) (в относительных единицах) в зависимости от координаты точки конверсии.

Как видно из графиков, интегральная нелинейность функции D_1 не превышает 6.5%, а изменение производной не более 25%, что много меньше, чем с функциями V_1 и V_2 .

Таким образом, использование алгоритма D_1 позволяет обойтись меньшей точностью вычислений, нежели в случае с V_1 или V_2 , что напрямую определяет необходимую разрядность аналого-цифрового преобразования.

Заметим, что функция $1/(D_1)'$ характеризует ширину вычисляемых каналов (см. рисунок 3.6.г). Из рисунка видно, что максимальное изменение ширины каналов в пределах ламели и, следовательно, нелинейность составляет $\sim 20\%$, что многократно превышает желаемое значение менее 1%.

Процедура, аппаратные средства и результаты коррекции нелинейностей в пределах не только одной ламели, но и всего детектора подробно изложены в разделе 3.3 этой главы, а также в главе 5.

3.2.Разрядность АЦП

Абсолютная величина стандартного отклонения (σ) при вычислении отношения двух величин a и b со стандартными отклонениями σ_a и σ_b определяется выражением:

$$\sigma = \frac{1}{b} \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2 \left(\frac{a}{b}\right)^2}. \quad (3.11)$$

В нашем случае a и b – это, соответственно, числитель и знаменатель в функциях B_1 и B_2 (рисунок 3.7).

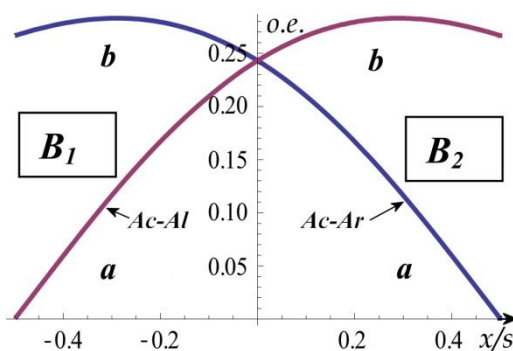


Рисунок 3.7. Функции A_c-A_I и A_I-A_c в зависимости от координаты точки конверсии.

Ввиду симметрии рассмотрим одну из них, например B_1 . Из графиков видно, что числитель меняется слабо, в пределах $0.24 \div 0.28$ относительных единиц, а изменение знаменателя достаточно линейно. Вклад второго слагаемого под корнем в (3.11) наибольший в точке $X=0$. Здесь

$$\sigma = \frac{1}{b} \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2}. \quad (3.12)$$

Как уже упоминалось выше, для того, чтобы дифференциальная нелинейность не превышала 3%, ширину вычисляемого канала требуется определять с такой же точностью. Учитывая, что на половину ламели

приходится 32 канала, σ не должна превышать $\Delta D_I / (32 \times 33)$, где $\Delta D_I = 1$ – диапазон изменения D_I . Таким образом, требуется:

$$\sigma = \frac{1}{b} \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2} \sim 10^{-3}. \quad (3.13)$$

Откуда следует: $b \sim 10^3 \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2}$. (3.14)

Полагая $\sigma_a = \sigma_b = \Delta A / \sqrt{12}$, где ΔA – цена канала АЦП, получаем:

$$b \sim 10^3 \Delta A / \sqrt{6} \approx 400 \Delta A. \quad (3.15)$$

Как явствует из рисунка 3.1, $b \approx 0.5 A_c (X = 0)$, то есть половине максимального сигнала на центральной полоске. Следовательно, $A_{\text{max}} \approx 800 \Delta A$, или 800 каналов АЦП. Таким образом, при неизменной величине заряда первичной ионизации вполне можно было бы обойтись 10-ти разрядными АЦП, но из-за значительных флуктуаций заряда ионизации и газового усиления разрядность АЦП должна быть не менее 12.

3.3. Аппаратная реализация алгоритма

Задача вычисления координаты фотона решается в три этапа (рисунок 3.8) 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} . В результате на выходе ALU генерируется 17-ти разрядный адрес RAM1, далее именуемый *наноканалом*.

Вычисление адреса RAM1 выполняется в соответствии с алгоритмом:

$$\text{ram1_addr} = [(A_N - A_{N-1}) / (A_N - A_{N+1})] * 2^{16}, \quad \text{если } A_{N-1} > A_{N+1}; \quad (3.16)$$

$$\text{ram1_addr} = [1 + (A_{N+1} - A_{N-1}) / (A_N - A_{N-1})] * 2^{16}, \quad \text{если } A_{N+1} \geq A_{N-1}. \quad (3.17)$$

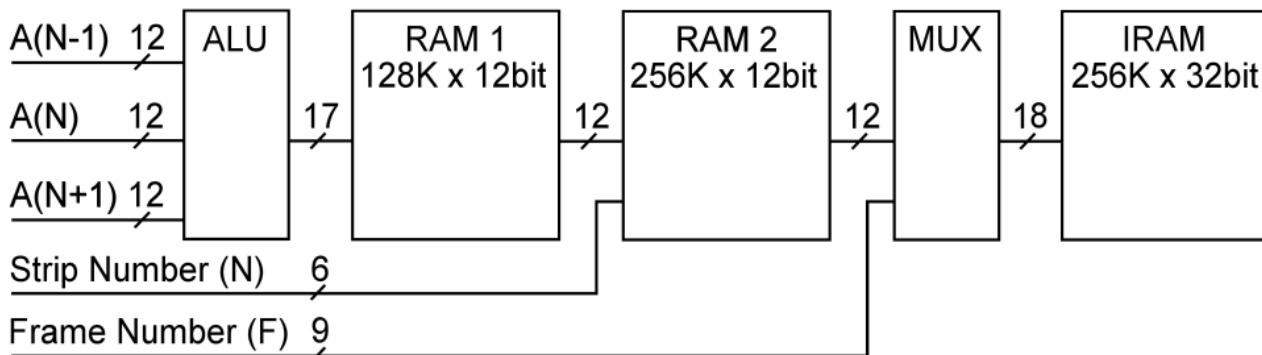


Рисунок 3.8. Блок-схема обработки данных в ОД-3М.

С помощью таблицы, записанной в RAM1, 17-ти разрядный номер **наноканала** преобразуются в 12-ти разрядное выходных значение, которое вместе с 6-ти – разрядным номером полосы N образуют 18-ти разрядный адрес RAM2, именуемый далее **микрочаналом**. Затем, с помощью таблицы, записанной в RAM2, 18-ти разрядный номер **микрочанала** преобразуется в 2^{12} разрядный номер выходного **канала** детектора. Конечная цель преобразования наноканалов в микрочаналы (таблица RAM1), а затем микрочаналов в каналы (таблица RAM2) состоит в том, чтобы обеспечить однородность шкалы детектора, при этом зарегистрированный координатный спектр будет соответствовать координатному распределению интенсивности входного потока квантов.

Вычисленная координата фотона заносится в инкрементную память (IRAM) емкостью 256K 32-разрядных слов, что позволяет накапливать координатный спектр со статистикой до 2^{32} событий на канал детектора.

Избыточная разрядность адреса IRAM (18 разрядов, в то время как для записи координаты события требуется только 12) используется для организации КИНО. Делается это путем добавления к каждому регистрируемому событию метки времени, а точнее – значение счетчика номера кадров (**Frame_Number**, до 9 разрядов).

При запуске КИНО, счетчик кадров сбрасывается и каждому событию приписывается нулевой номер кадра. По истечении интервала времени первого кадра, значение счетчика кадров увеличивается на 1 и следующим событиям приписывается номер кадра «1», и так далее.

Можно зарегистрировать до 64 ($2^{18-12} = 2^6$) кадров КИНО с максимальным разрешением детектора. В то же время, с помощью мультиплексора MUX (см. рисунок 3.8) есть возможность увеличить число кадров вплоть до $2^9 = 512$ за счет уменьшения разрешения детектора путем «кратного двум» объединения выходных каналов.

Управляющая программа позволяет задать требуемые параметры КИНО, вплоть до индивидуальной для каждого кадра длительности в диапазоне от 1 мксек до 2^{32} мксек (≈ 4295 сек, то есть больше одного часа).

Глава 4. Электроника аналого-цифровой обработки сигналов

Координатное разрешение детектора определяется процессами в газе, используемым методом съема информации и параметрами электроники, конкретные значения которых являются компромиссом в решении противоречивой задачи - обеспечить наилучшее соотношение сигнал/шум, определяющее чисто аппаратное (электронное) разрешение детектора, и максимальное быстродействие.

Далее в этой главе будут сформулированы требования к параметрам электроники и приведены схемные решения, удовлетворяющие этим требованиям.

4.1. Шумовые параметры электронного тракта

Исходя из п.3.2 главы 3 для достижения аппаратного разрешения не хуже одного канала необходимо обеспечить RMS вычисления координаты

$$\sigma = \frac{1}{b} \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2} \approx \frac{1}{32\sqrt{12}} \quad (4.1)$$

Учитывая, что $\sigma_a^2 = \sigma_c^2 + \sigma_l^2$, $\sigma_b^2 = \sigma_c^2 + \sigma_r^2$ и полагая электронные шумы по полоскам примерно одинаковыми получаем:

$$\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2} = 2\sigma_{\text{электроники}} \cdot$$

С учётом того, что $b \approx 0.5A_c$ имеем $A_c = 128\sqrt{12}\sigma_e$, или, окончательно – требуемое отношение сигнал/шум:

$$A_c / \sigma_{\text{электроники}} \approx 440. \quad (4.2)$$

Быстрая компонента тока пропорциональной камеры переносит $\sim 0,1$ от

полного заряда и может быть описана достаточно точно тремя экспонентами

$$A \cdot \exp(-t/\alpha\tau) + B \cdot \exp(-t/\beta\tau) + C \cdot \exp(-t/\gamma\tau) \quad [25], \quad (4.3)$$

где: $\tau \approx 1\text{ns}$; $A = 0,79$; $\alpha = 1,6$; $B = 0,185$; $\beta = 13,5$; $C = 0,024$; $\gamma = 113$, что соответствует по слагаемым, соответственно, 20%, 38% и 42% процентов от переносимого быстрой компонентой заряда. Величина сигнала с полосы, в свою очередь, зависит от произведения нескольких параметров, приведенных с пояснениями в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Q	* K_{yc}	* 0,1	* 0,227
Заряд первичной ионизации, определяется отношением энергии γ -кванта к энергии ионизации (~ 20 эВ для используемой смеси 90% Ar + 10% CO ₂).	Коэффициент газового усиления камеры.	За время ~ 100 нс собирается $\sim 0,1$ от полного наводимого заряда.	Доля сигнала на полоске, если лавина располагается над её серединой.

Так, для квантов с энергией 8 кэВ заряд первичной ионизации составляет ~ 400 электрон-ионных пар. При умеренном коэффициенте газового усиления $K_{yc} \approx 5 \cdot 10^4$ сигнал на полоске составит $\sim 4,6 \cdot 10^5 e^-$. Такое значения K_{yc} позволяет работать при умеренных значениях напряжения на аноде (+ 2700 ÷ 2800 В), избегая опасности возникновения «короны» или пробоев.

Таким образом, с учетом (4.2) шум (RMS) электронного тракта должен 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.

4.2. Аналоговая часть электронного канала

Вследствие сложной зависимости входного сигнала от времени (4.3) в электронном канале усиления и формирования сигналов с катодных полосок в описываемом детекторе используется многоступенчатая схема, дающая на выходе сигнал гауссовой формы с длительностью по основанию ~ 200 нс. Блок-схема канала приведена на рисунке 4.1, принципиальная схема - в приложении 3.

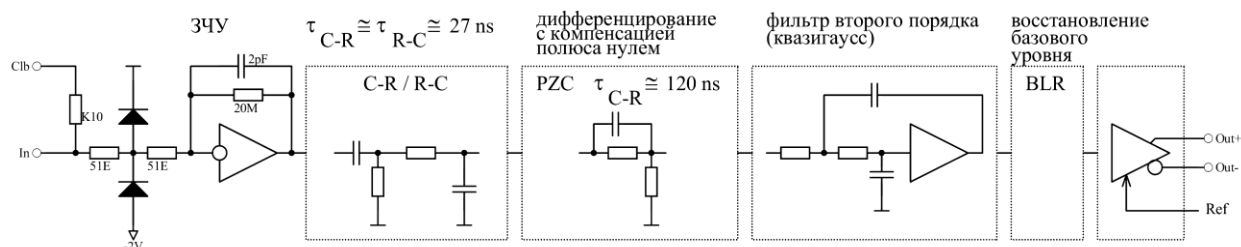


Рисунок 4.1 Структура аналоговой части электронного канала.

Входной предусилитель канала выполнен по традиционной схеме ЗЧУ с полевым транзистором на входе. Следующая за ним первая ступень формирования состоит из дифференцирующей и интегрирующей цепей с $\tau_{o1} \approx \tau_u \approx 27$ нс. Затем следует ещё одна дифференцирующая цепь с компенсацией полюса нулём и $\tau_{o2} \approx 120$ нс. Последней ступенью формирования является активный фильтр второго порядка, сигнал с выхода которого через выходной преобразователь однофазного сигнала в симметричный парафазный подаётся на АЦП. Чувствительность электронного тракта составляет ~ 200 электронов на один канал АЦП, шум (RMS) - ~ 4 канала АЦП (800 электронов).

Для измерения координатного разрешения детектора, определяемого электроникой, 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.

На рисунке 4.2 приведены несколько гистограмм распределения содержимого RAM1 при подаче тестового сигнала на триады в разных частях детектора.

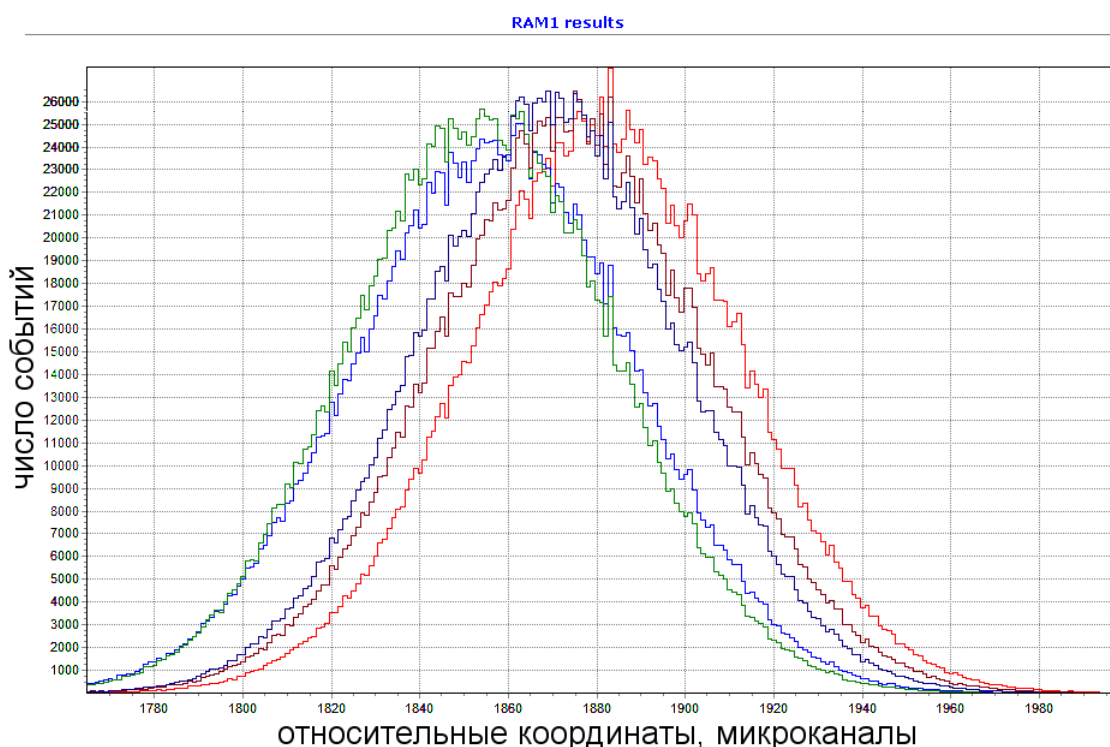


Рисунок 4.2. Содержимое RAM1 при подаче тестового сигнала от пробника на триады в разных частях детектора.

Напомним, что содержимым RAM1 являются относительные координаты квантов в пределах одной полоски при равномерной её засветке. Цена канала на гистограммах соответствует $1/64$ от ширины канала детектора (см. рисунок 3.8 и выражения (3.16), (3.17)). Из гистограмм видно, что их FWHM (ширина на полувысоте) примерно одинакова и составляет ~ 75 единиц, что соответствует $75 / 4096$ от ширины полоски, или ~ 1.17 ширины канала детектора. Соответственно, вклад электроники в координатное разрешение $\sigma_{\text{электроники}} \approx 0.5$ канала.

На рисунке 4.3 приведен спектр суммы амплитуд реальных сигналов с произвольной полоски в качестве центральной и двух соседних с ней полосок при облучении детектора квантами от изотопа железа Fe^{55} (энергия 5.6 кэВ). Исходя из чувствительности электронного тракта и с учётом данных из таблицы 4.1, величину газового усиления можно оценить как $K_{yc} \approx 4.5 \cdot 10^4$.

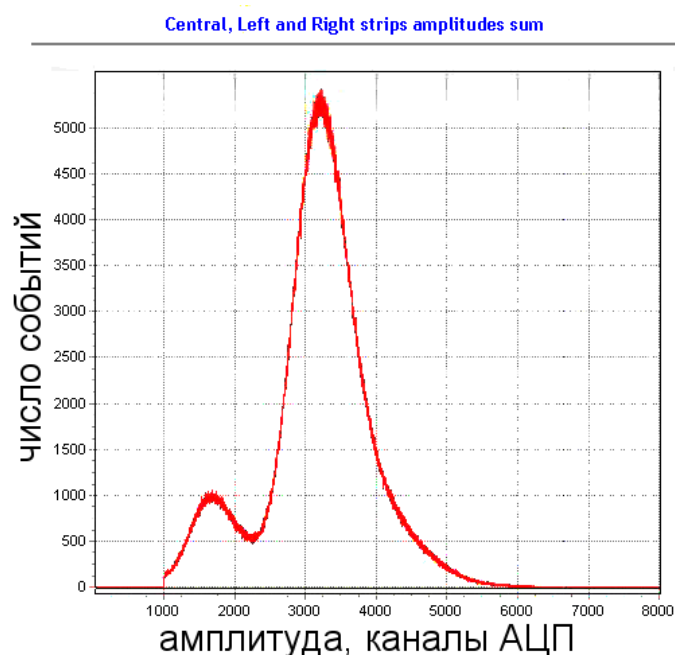


Рисунок 4.3. Спектр суммы амплитуд сигналов на трех соседних полосках ($A_l + A_c + A_r$) при облучении от изотопа Fe^{55} .

Процедура калибровки детектора и измерение физического (полного) координатного разрешения описана в 5-й главе.

4.3. Аналого-цифровой преобразователь

В качестве аналого-цифрового преобразователя используются 8-канальные 12-разрядные АЦП ADS5270 (Texas Instruments) с частотой выборки до 40 МГц.

Микросхема имеет встроенный источник опорного напряжения, который

используется как для собственных нужд, так и для задания смещения на преобразователе однофазного сигнала в симметричный парафазный на выходе усилителя - формирователя (рисунок 4.1).

Выход оцифрованных данных последовательный (LVDS), что позволяет уменьшить число линий связи на плате для передачи данных из АЦП в АЛУ, а главное – уменьшить суммарное число выводов АЛУ и осуществить всю последующую цифровую обработку в одном 484-выводном корпусе ПЛИС ALTERA семейства CycloneII (EP2C50F484C7).

С другой стороны, это требует использования для передачи данных более высокой частоты (240 МГц), которая формируется синтезатором с фазовой подстройкой частоты (PLL) в ПЛИС. Кроме того, для обеспечения синхронной работы, управляющие сигналы всех АЦП имеют индивидуальную подстройку фазы, учитывающую разности длин сигнальных линий от АЦП до ПЛИС.

Результат аналого-цифровой обработки сигналов с левой, центральной и правой полосок одного события от изотопа Fe^{55} показан на рисунке 4.4.

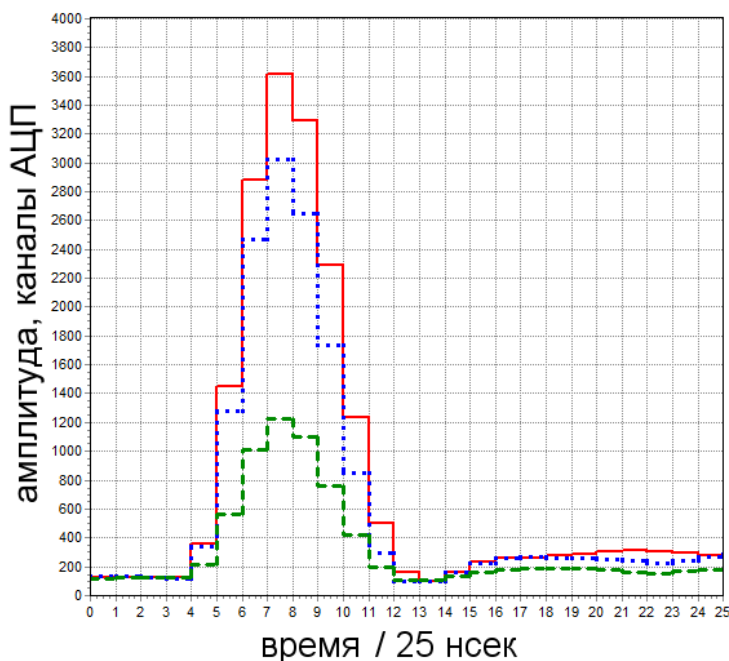


Рисунок 4.4. Осциллограммы сигналов с левой, центральной и правой полосок от одного события, полученного на изотопе Fe^{55} .

Глава 5. Отбор событий (триггер) и калибровка детектора

5.1. Выделение и фильтрация (отбор) событий

Под событием понимается возникновение в сигнале с какой-либо полосы N максимума по времени и координате. Несколько упрощенно это можно записать как :

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

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

Время определяется с точностью до такта АЦП, а координата – номером полосы. Для того чтобы обнаруженное событие было обработано и занесено в инкрементную память, необходимо решение триггера. Для принятия триггером решения о полезности события проверяется соответствие амплитуд сигналов и отсутствие наложений от других событий.

Соответствие амплитуд означает, что амплитуды сигналов не должны выходить за границы шкалы АЦП, быть больше некоторого порогового значения, а также сумма амплитуд $A_{N-1} + A_N + A_{N+1}$ не должна выходить за некие границы, определяемые суммарным зарядом одного фотона с конкретной энергией.

Отсутствие наложений от других событий проверяется путем сравнения амплитуды $A(t, N)$ с амплитудами $A(t \pm 3, N \pm 3)$.

Эта процедура реализована одновременно для всех полосок. Для отфильтрованных таким образом событий вычисляется координата события и заносится в соответствующую гистограмму в инкрементной памяти.

Реально параметры триггера и сама процедура отбора событий являются гораздо более сложными. Более подробные сведения по этому вопросу приведены в приложении 4.

Интерфейс пользователя позволяет легко изменять параметры триггера с учётом условий эксперимента.

5.2. Калибровка детектора

Цель процедуры калибровки заключается в построении таблиц RAM1 и RAM2, назначение которых, как было сказано выше, преобразовывать наноканалы сначала в микроканалы (RAM1), а затем - в каналы (RAM2).

5.2.1. Таблица RAM1

На рисунке 5.1.а приведена гистограмма распределения адресов RAM1, вычисленных в АЛУ по формулам (3.16), (3.17) для одной из полосок при *равномерной* её засветке от изотопа Fe^{55} .

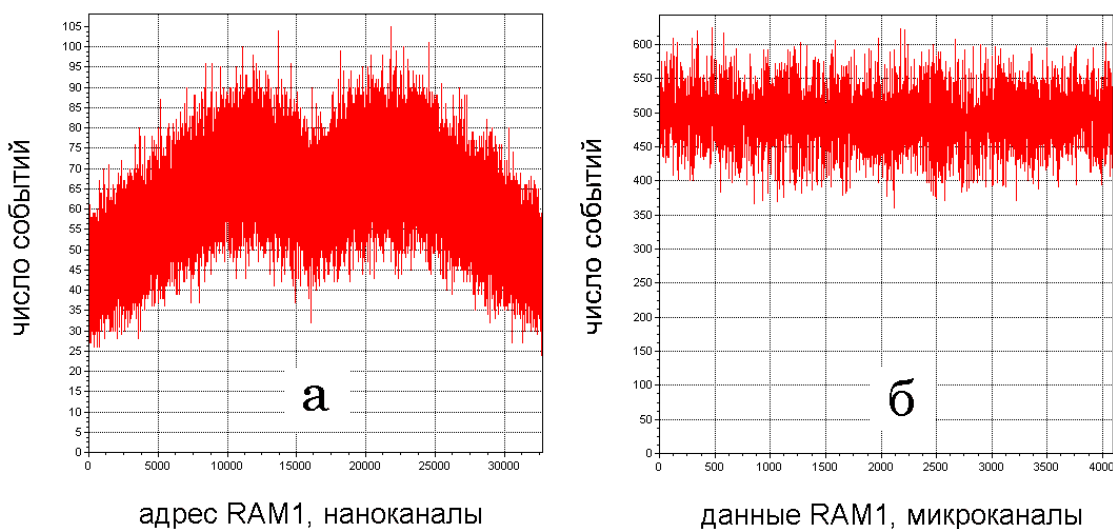


Рисунок 5.1. Спектры адресов RAM1 (а) и выхода RAM1 (б) при равномерной засветке.

Центр гистограммы соответствует центру полоски. RAM1 имеет 17-ти разрядный адрес; на приведенном рисунке каждый канал гистограммы содержит 4 наноканала. Количество событий в каждом канале гистограммы при равномерной засветке определяется характером зависимости амплитуд сигналов от координаты и алгоритмом вычисления.

Из рисунка 5.1.а видно, что распределение адресов (наноканалов) RAM1 отличается от вида засветки, в данном случае равномерного, следовательно, координатная ширина (цена) наноканалов неодинакова в пределах полоски (см. рисунок 3.6.г).

Чтобы скорректировать это отличие, в таблице RAM1 границы микроканалов задаются таким образом, чтобы число событий в каждом микроканале было одинаковым. Иными словами, количество наноканалов в одном микроканале разное и зависит от номера микроканала. В данном случае оно меняется от 40 до 29 при среднем значении 32.

Результат коррекции виден на рисунке 5.1.б, на котором представлено распределение выходных сигналов RAM1, являющихся, в свою очередь, частью адресного пространства RAM2. Видно, что распределение близко к равномерному, что соответствует характеру засветки.

Таблица RAM1 является общей для всех полосок, поэтому для ее получения в идеале требуется обеспечить одинаковый для всех полосок профиль засветки, например, с помощью изотопа, помещенного в точку фокуса камеры. Однако, характер распределения адресов RAM1 для каждой отдельной полоски мало отличается от усредненного, что позволяет использовать для вычисления таблицы RAM1 только одну полоску при условии ее равномерной засветки. В частности, именно таким образом вычислена таблица «по умолчанию» (default_ram1), загружаемая в RAM1 детектора при включении питания и установлении соединения с управляющим

компьютером. Для этого от изотопа была набрана гистограмма адресов RAM1 для одной полоски, аналогичная рисунку 5.1.а, но с большой статистикой, и вычислена таблица RAM1 в соответствии с изложенным выше алгоритмом.

Исходя из обстоятельств, связанных с конкретными условиями эксперимента, пользователь может сам проделать аналогичную процедуру, запомнить файл (xxx.ram1) со своей таблицей и загружать её по мере надобности. Управляющая программа и интерфейс пользователя предоставляют для этого все возможности. Но, как показал опыт, в большинстве случаев можно обойтись таблицей default_ram1.

5.2.2 Таблица RAM2

Поскольку таблица RAM1 общая для всех полосок, то с её помощью можно осуществить только усредненную коррекцию, которая не учитывает технологический разброс индивидуальных параметров полосок (ширина полоски, коэффициент усиления, неоднородность поглощения и т.д.).

Для коррекции по всей шкале детектора (52-м полоскам) служит таблица RAM2. Как и в RAM1, границы выходных каналов должны быть заданы таким образом, чтобы распределение числа событий по каналам соответствовало распределению интенсивности засветки по детектору, в частности, было равномерным при равномерной засветке. В общем случае, количество микроканалов в одном канале может быть разным и зависеть от номера канала.

Как и в случае с таблицей RAM1, после включения детектора и установления связи с управляющим компьютером, в детектор загружается таблица «по умолчанию» (default.ram2). Эта таблица построена таким образом, что каждый выходной канал соответствует 64-м микроканалам. Она обеспечивает минимальную интегральную нелинейность, но не корректирует технологический разброс индивидуальных параметров полосок.

Калибровка равномерной засветкой

Для получения таблицы RAM2, учитывающей этот разброс, следует использовать засветку детектора квантами с известным координатным распределением. Алгоритм калибровки рассмотрим на примере равномерной засветки. При этом набирается калибровочная гистограмма распределения координат квантов по всему детектору или какой-то его части. Фактически это гистограмма адресов RAM2 (микروканалов).

Эти данные, состоящие более чем из 200 тысяч микروканалов, должны быть преобразованы в 3328 каналов (52 полосы * 64 канала в полоске). В случае равномерного распределения квантов процедура следующая:

- полная сумма всех событий делится на 3328, что дает среднее число событий, приходящихся на один выходной канал;
- определяются границы этих каналов таким образом, чтобы число событий в каждом из 3328 каналов было как можно ближе к среднему числу событий.
- значения этих границ записываются в RAM2;
- вычисляется массив множителей K_n (калибровочные коэффициенты), которые используются "off line" для того, чтобы компенсировать возможные отклонения числа событий в канале с номером n от среднего числа событий. Массив калибровочных коэффициентов индивидуален для каждой калибровки.

Если для набора калибровочной гистограммы используется засветка, отличная от равномерной, то перед вычислением таблицы RAM2 следует аппроксимировать набранную гистограмму гладкой кривой и определить границы выходных каналов таким образом, чтобы сумма событий в каждом из них в пределах границ калибровки была бы наиболее близка к значению аппроксимирующей функции. В управляющей программе ОД-3М для этого

имеются специальные возможности. Полученная таблица может быть сохранена в файле и вызвана в нужный момент. Более подробно на эту тему см. приложение 5.

Калибровка на изотопе

Далее описана процедура калибровки детектора на изотопе Fe^{55} с использованием средств пользовательского интерфейса рабочей программы.

Для вычисления таблицы RAM2 в окне «Calibration» пользовательского интерфейса набирается калибровочная гистограмма (рисунок 5.2.а). Затем эта гистограмма передается в окно «Normalization», где сначала задаются границы аппроксимации для того, чтобы отбросить «хвосты» гистограммы с малой статистикой (штриховые линии). Далее эта гистограмма используется в процедуре вычисления аппроксимирующей кривой (рисунок 5.2.б).

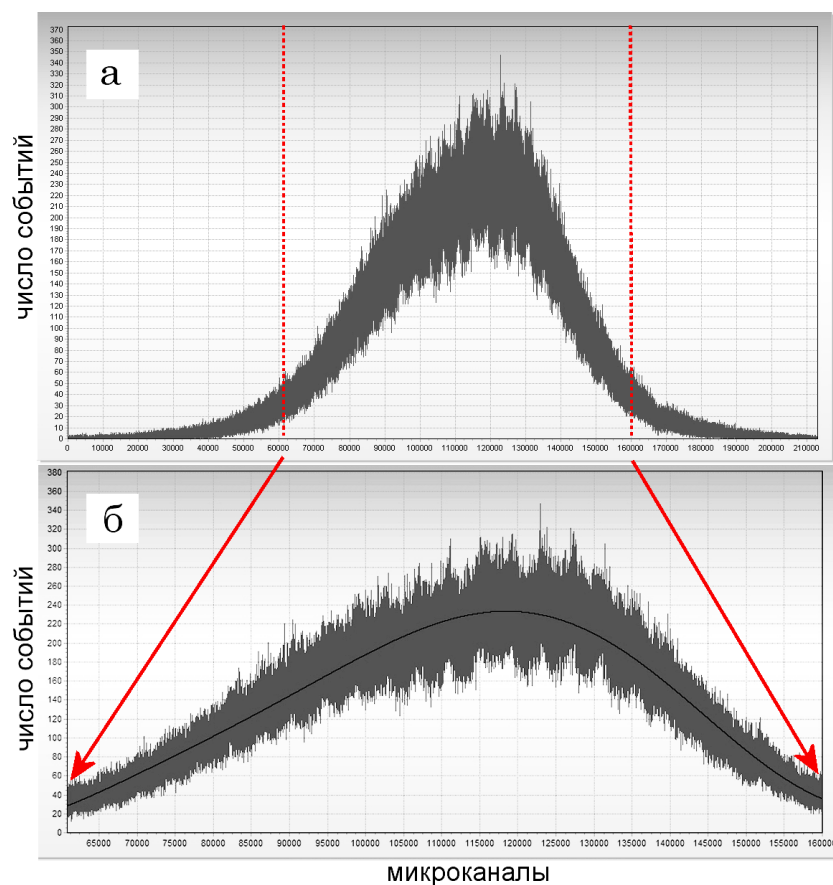


Рисунок 5.2. Калибровочный спектр (а) и его аппроксимация полиномом (б).

В качестве аппроксимирующей функции использовался полином 7-й степени. Затем, в соответствии с описанной выше процедурой вычисляется таблица RAM2.

На рисунке 5.3 показаны координатные спектры на выходе RAM2 в единицах выходных каналов, полученные «пропусканием» калибровочного спектра через RAM2. На рисунке 5.3.а видны незначительные отклонения от гладкой кривой, связанные с дискретностью установки границ выходных каналов в RAM2. Использование калибровочных коэффициентов делает совпадение полным (рисунок 5.3.б). Эти коэффициенты хранятся в том же файле, что и таблица.

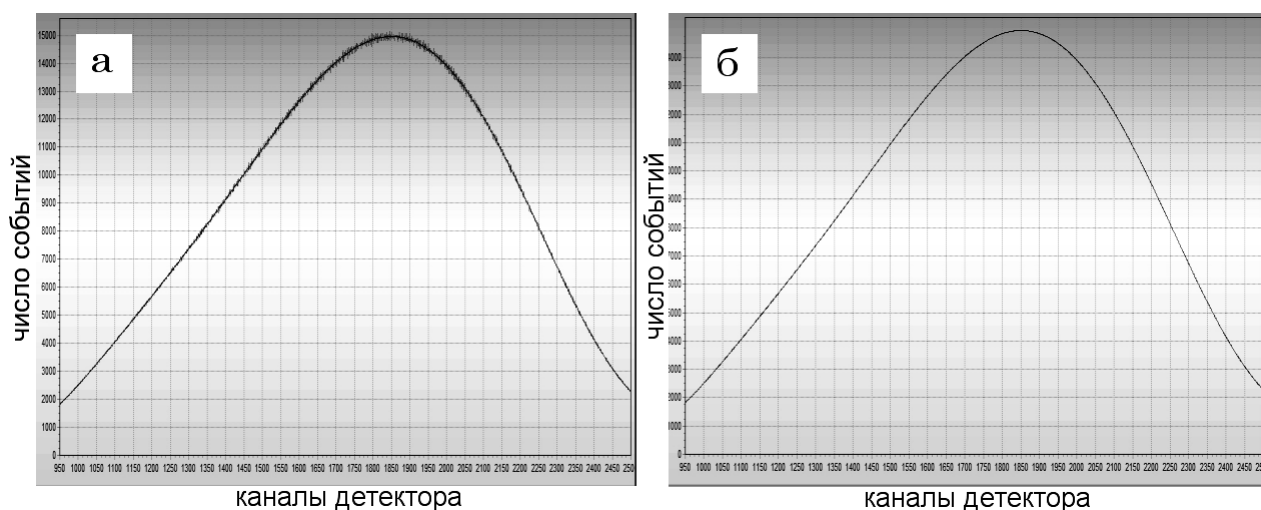


Рисунок 5.3. Калибровочный спектр, прошедший процедуру нормализации, до (а) и после (б) применения калибровочных коэффициентов.

Следует, однако, иметь в виду, что значения поправочных коэффициентов зависят от статистической точности калибровочной гистограммы, которая, в свою очередь напрямую связана с количеством событий в гистограмме. Поэтому использование поправочных коэффициентов имеет смысл, если статистическая точность калибровочной гистограммы на участке, используемом для калибровки, по крайней мере, в два раза лучше, чем предполагаемая статистическая точность в гистограммах проводимых

экспериментов. В противном случае можно вместо уменьшения дифференциальной нелинейности получить её увеличение.

Содержание следующей главы показывает эффективность алгоритма, аппаратных и программных средств калибровки.

Глава 6. Координатное разрешение, интегральная и дифференциальная нелинейности

Координатное разрешение детектора определяется процессами в газе (см. в главе 2), используемым методом съема информации и параметрами электроники, главным образом, шумовыми.

6.1. Физическое (полное) разрешение детектора

Для измерения полного координатного разрешения детектора использовался пучок СИ с энергией 8 кэВ и размерами вдоль шкалы детектора <50 мкм.

На рисунке 6.1 приведена гистограмма, полученная при засветке этим пучком в центре детектора. Распределение близко к гауссову с $FWHM = 3,5$ канала, или $\sigma = 1,5$ канала. При ширине полосы 4,4 мм: 1 канал $\Leftrightarrow (4,4 \text{ мм} / 64) \Leftrightarrow 69 \text{ мкм}$. Таким образом, полное координатное разрешение детектора: $\sigma = 104 \text{ мкм}$. В терминах углов разрешение, естественно, зависит

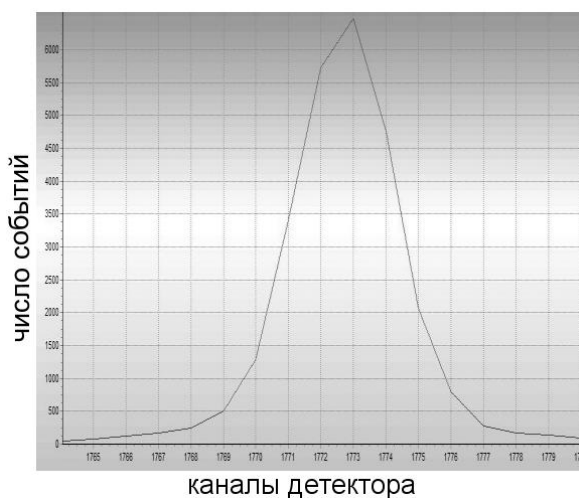


Рисунок 6.1. Гистограмма от пучка СИ размером <50 мкм.

от фокусного расстояния и для камеры с $F = 1000$ мм составляет **21,3 угловых секунды**.

Ранее были сделаны оценки вкладов в пространственное разрешение, определяемые физическими процессами в газовой камере (глава 2) и электроникой детектора (глава 4). Напомним:

- пространственное разрешение, обусловленное пробегом фотоэлектрона и Оже-электрона, для фотонов с энергией 8 кэВ при атмосферном давлении составляет $\sigma_e \approx 102$ мкм и обратно пропорционально давлению;
- пространственное разрешение, определяемое диффузией, составляет $\sigma_{\text{diffusion}} \approx 15$ мкм;
- вклад электроники в координатное разрешение ~ 0.5 канала, или, с учетом ширины канала, $\sigma_{\text{электроники}} \approx 35$ мкм.

При избыточном давлении в камере 0.1 атм, оценка разрешения составляет $\sigma = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_{\text{diffusion}}^2 + \sigma_{\text{электроники}}^2} \approx 101$ мкм (при атмосферном давлении – 109 мкм), что находится в полном соответствии с измеренной величиной полного координатного разрешения.

На рисунке 6.2 показано наложение исходной гистограммы и гистограммы, полученной при сдвиге пучка так, чтобы ордината впадины была равна 70% от максимума. В нашем случае пучок потребовалось сдвинуть на 375 мкм. В соответствии с релеевским критерием разрешения для двух перекрывающихся одинаковых «гауссов» этот сдвиг равен 3σ , что дает значение $\sigma = 125$ мкм, или **25,6 угловых секунды**. Некоторое увеличение σ в данном случае связано с конечным размером тестового пучка.

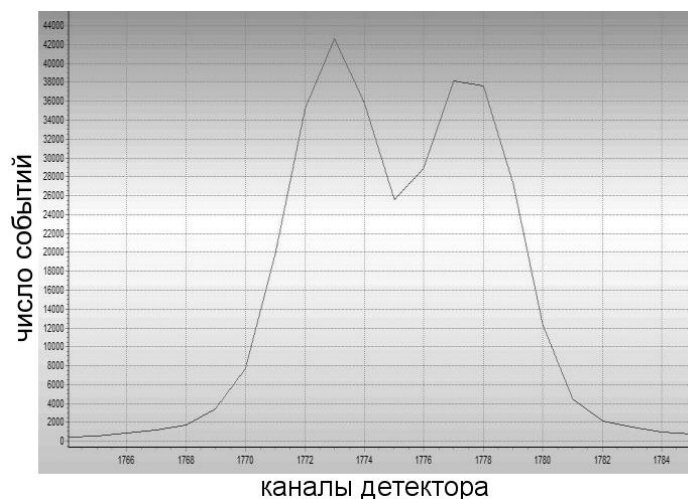


Рисунок 6.2. Наложение гистограмм при сдвиге пучка на 375мкм.

6.2. Интегральная нелинейность

Для оценки величины интегральной нелинейности использовалась гистограмма от пальмитата серебра ($C_{16}H_{29}O_2Ag$) (рисунок 6.3), дающего пики (г, д) симметричные относительно положения пучка (пик 2).

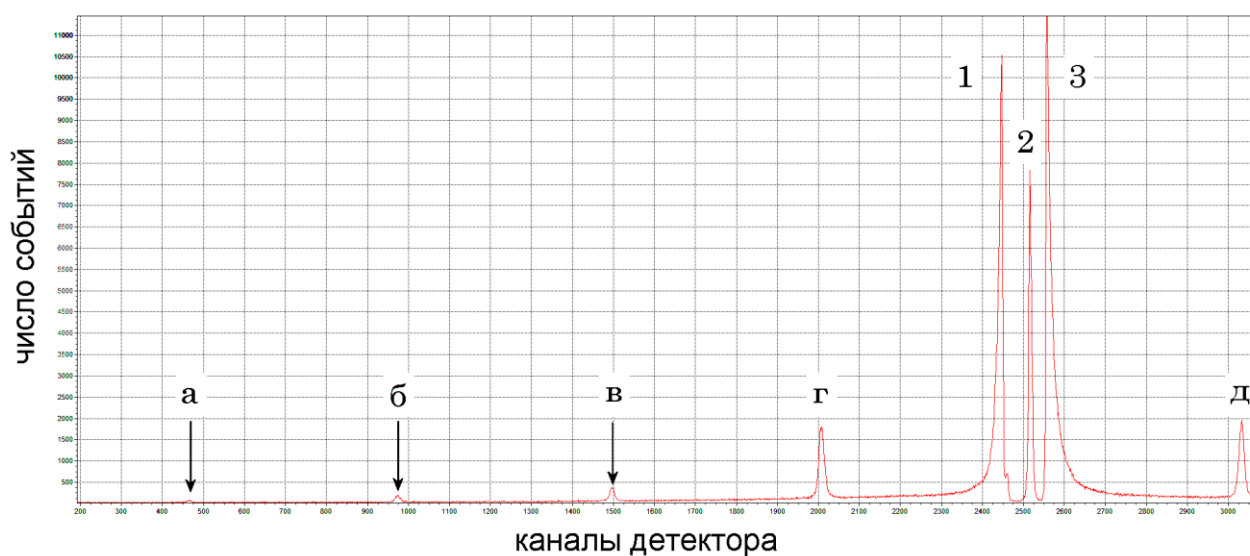


Рисунок 6.3. Образец - пальмитат серебра. Пики 1,2,3 – следы от прямого пучка. Пики г и д от образца симметричны относительно пика 2.

Измеренные расстояния в каналах детектора между пиками $2 \rightarrow \gamma$ и $2 \rightarrow \delta$ составили $513,6 \pm 1,4$ канала, что соответствует интегральной нелинейности менее 0,3 % на участке $\sim 1/3$ шкалы детектора.

Интегральная нелинейность на всей шкале была измерена следующим образом. На детекторе с апертурой 30° набирается гистограмма от корунда (Al_2O_3) с табулированными значениями углов рассеяния. На рисунке 6.4 показан полученный координатный спектр, отметки истинного положения дифракционных пиков и соответствующие им истинные значения углов.

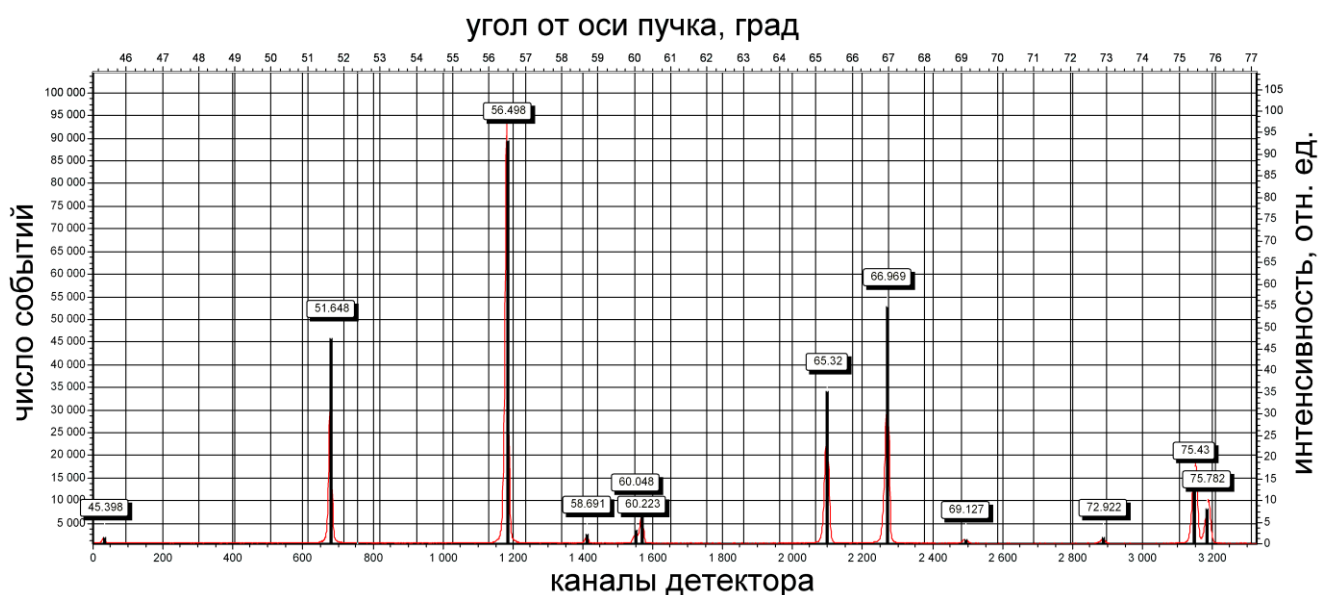


Рисунок 6.4. Координатный спектр корунда и табличные значения истинного положения дифракционных пиков.

По двум крайним пикам строится прямая преобразования каналов детектора в углы. На рисунке 6.5 показаны значения отклонения измеренного положения пика от вычисленного по табличным данным в единицах каналов детектора.



Рисунок 6.5. Отклонение реальной характеристики преобразования от линеаризованной.

Максимальное отклонение реальной характеристики преобразования от прямой линии составляет ~ 2 канала, что соответствует интегральной нелинейности менее 0,1% на всей шкале детектора.

6.3. Дифференциальная нелинейность

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 должны быть сделана с ещё большей статистикой. Координатное распределение засветки должно быть достаточно монотонным.

На рисунке 6.6 приведен спектр от изотопа со статистикой в максимуме $\sim 5,8 \cdot 10^4$ событий/канал, что теоретически соответствует статистической точности 0,4%.

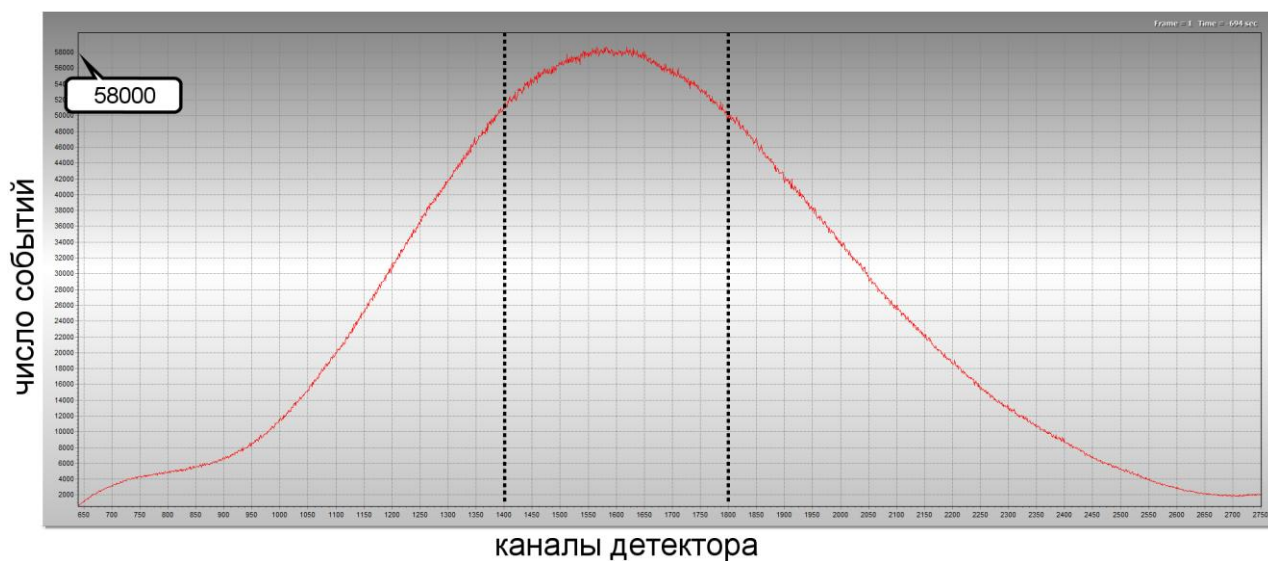


Рисунок 6.6. Координатный спектр от изотопа Fe^{55} .

На рисунке 6.7 показан фрагмент этого спектра в районе максимума (между пунктирными линиями на рисунке 6.6), использовавшийся для вычислений. Дифференциальная нелинейность определялась как нормированное среднеквадратичное отклонение содержимого каналов гистограммы от фитирующей кривой (рисунок 6.7), найденной методом скользящего усреднения.

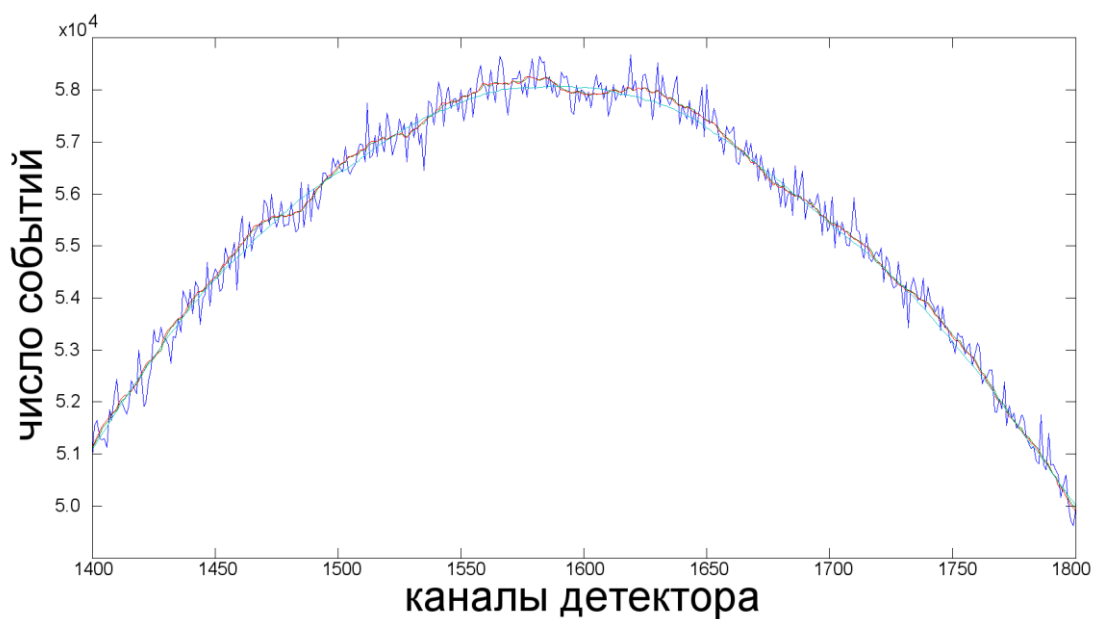


Рисунок 6.7. Фрагмент координатного спектра от изотопа и фитирующая кривая.

Соответствующая гистограмма отклонений в относительных единицах показана на рисунке 6.8.

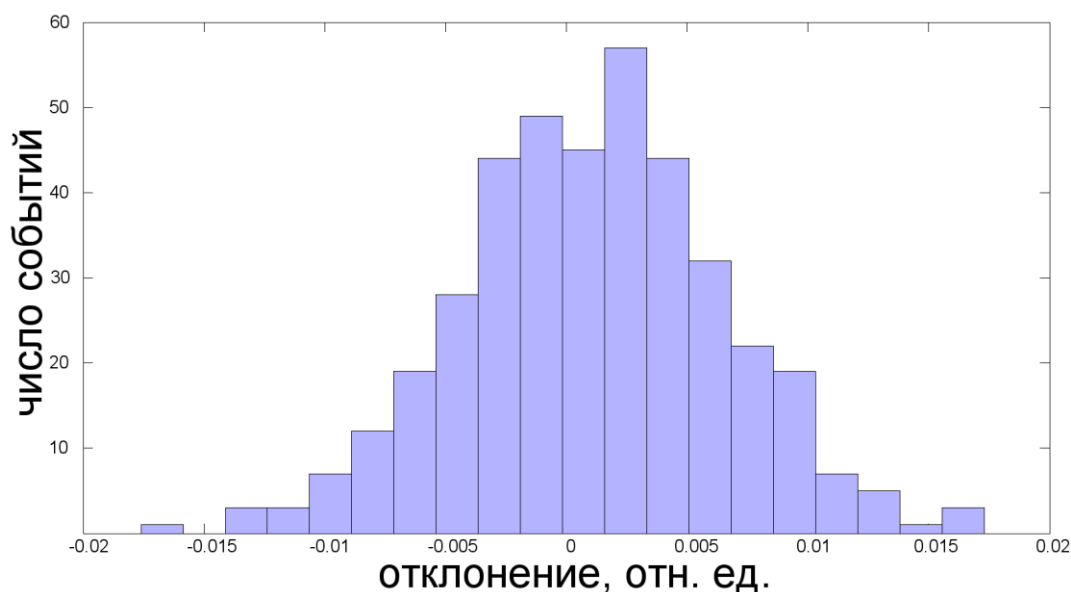


Рисунок 6.8. Нормированное среднеквадратичное отклонение гистограммы координатного спектра изотопа от фитирующей кривой (см. рисунок 6.7).

Полная ширина на полувысоте (FWHM) распределения составляет $\sim 0,0115$ (1,14%), что соответствует $\sigma \approx 0,45\%$. С учётом статистической точности измерения 0,4%, дифференциальная нелинейность детектора $\sigma_{DNL} \approx 0,2\%$.

Для иллюстрации однородности шкалы при больших градиентах на рисунке 6.9 приведена гистограмма от образца смеси пальмитата ($C_{16}H_{29}O_2Ag$) и миристата ($C_{14}H_{29}O_2Ag$) серебра, на рисунке 6.10 пики 1 и 2 показаны подробно. Из рисунков видно, что изменение загрузки в 20 - 30 раз в пределах 20-ти каналов не приводит к каким-либо нарушениям однородности шкалы.

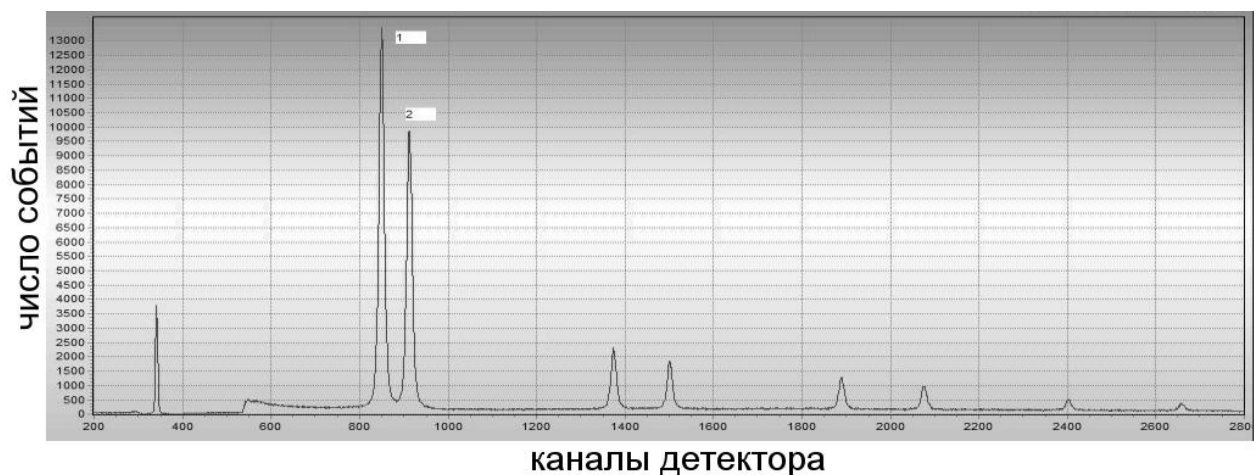


Рисунок 6.9. Образец – смесь пальмитата и миристата серебра.

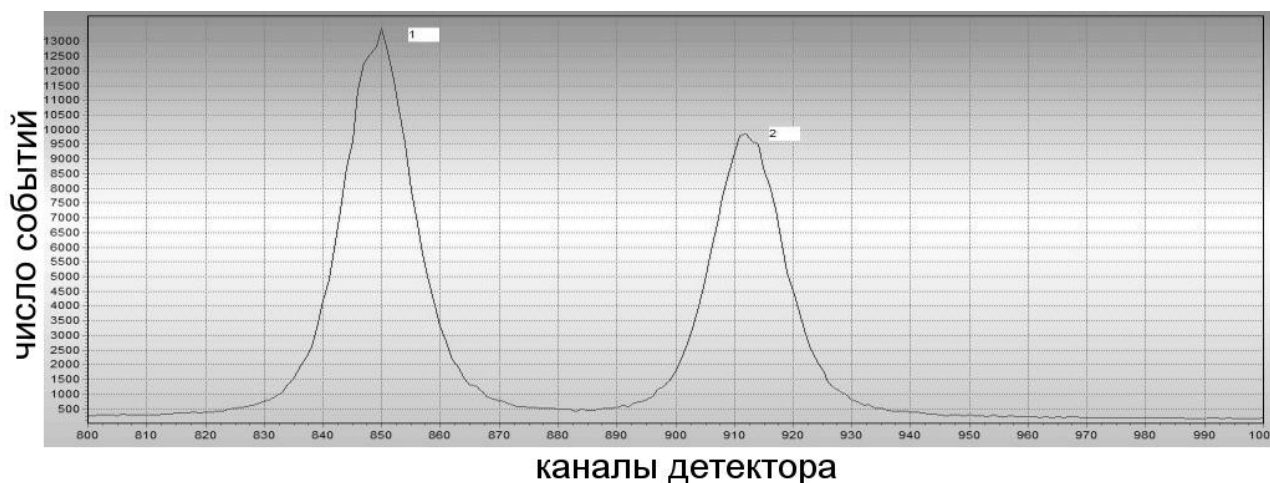


Рисунок 6.10. Смесь пальмитата и миристата серебра. Пики 1 и 2 подробно.

Совокупный набор параметров детектора ОД-3М по разрешению, однородности шкалы, скорости регистрации, гибкости геометрии и возможностей организации измерений обусловил их успешное использование для проведения широкого спектра экспериментов.

6.4. Примеры использования детектора ОД-3М

В Институте кристаллографии им. А.В.Шубникова РАН (Москва) детектор ОД-3М-700А запущен в эксплуатацию в мае 2012 г. Детектор является частью автоматического малоуглового дифрактометра АМУР-К, входящего в состав оборудования Центра коллективного пользования "Структурная диагностика материалов" на базе ИК РАН. В качестве источника гамма-квантов используется рентгеновская трубка; с учетом конструктивных параметров станции, в камере детектора использована ассиметричная катодная структура с фокусным расстоянием 700мм. С помощью детектора ОД-3М были выполнены различные эксперименты, результаты которых опубликованы в рецензируемых журналах [26, 27] и в материалах национальных и международных конференций. В процессе выполнения программ РАН (№27/3.5.2, РАН №24) и РФФИ (№13-02-12143) исследовано около 500 образцов (~1800 измерений за 2013 год) полимеров, жидкостей, мицелл, биологических макромолекул и их комплексов в растворе, полидисперсных и фрактальных систем различной природы, неорганических аэрогелей и других наноматериалов. Список организаций, для которых проведены исследования, содержит четырнадцать наименований.

Два детектора ОД-3М-350 (фокусное расстояние 350мм) работают в Центре коллективного пользования "Сибирский Центр Синхротронного и Терагерцового Излучения" (ЦКП СЦСТИ) на базе ИЯФ СО РАН.

Один из них установлен на станции синхротронного излучения «Прецизионная Дифрактометрия» на канале СИ 6Б накопителя ВЭПП-3. С использованием высокотемпературных рентгеновских камер и детектора ОД-3М были выполнены различные эксперименты, результаты которых опубликованы в ряде рецензируемых журналов [28, 29] и составили основу

дипломных работ, магистерских и кандидатских диссертаций (2 диссертации).

В работах с использованием детектора ОД-3М в рамках проектов СО РАН №82 и РФФИ №12-03-01091 принимали участие сотрудники шести научных организаций. Основные направления исследований:

- Исследования изменений структуры и фазового состава гетерогенных катализаторов на всех этапах их синтеза, активации и работы;
- Исследования изменений структуры материалов в условиях высоких температур;
- Исследования процессов синтеза новых функциональных материалов.

Второй детектор работает на канале СИ 5Б накопителя ВЭПП-3 и является одним из основных элементов станции «Дифракционное кино» ЦКП СЦСТИ. Станция предназначена для получения данных о составе и кинетике образования фаз при изучении химических твердофазных реакций.

С помощью детектора ОД-3М выполнены работы по проектам РФФИ 11-03-00668-а и РФФИ 11-03-00168-а с участием сотрудников двух научных организаций. Результаты проводимых экспериментов публиковались в рецензируемых журналах [30] и в материалах международных конференций.

Заключение

Ниже перечислены основные полученные результаты работы:

1. Выработана концепция детектора.
 - Определены технические параметры координатного детектора рентгеновского излучения исходя из потребностей планируемых экспериментов и накопленного опыта.
 - Предложена конструкция детектора с использованием в качестве сенсора пропорциональной газовой камеры, которая позволила построить прибор с требуемыми параметрами, используя имеющиеся технологические возможности собственного производства ИЯФ.
 - Выбран и обоснован способ построения многоканального координатного детектора по принципу вычисляемого канала.
2. Разработан способ вычисления координат гамма-квантов.
 - Предложен и исследован 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. Разработаны алгоритмы работы функциональных узлов детектора.
 - 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.
 - 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.

- Разработан алгоритм выделения и фильтрации (отбора) событий.
 - Разработан способ получения таблиц перекодировки RAM1 и RAM2 (калибровка детектора).
4. Разработана электроника детектора, написана управляющая программа, составлена пользовательская документация.
- Разработана принципиальная схема многоступенчатого усилителя-формирователя, дающая на выходе сигнал гауссовой формы с длительностью по основанию ~ 200 нс.
 - Разработана схема обработки данных с применением быстрой многоканальной элементной базы, что позволило сократить число микросхем, сделать конструкцию компактной и снизить рассеиваемую мощность.
 - Разработаны принципиальные схемы двухканального источника высоковольтного питания ± 4 кВ, системы контроля рабочих параметров детектора и системы питания.
 - Написаны управляющие программы (firmware) для ПЛИС ALTERA, реализующие алгоритмы работы детектора, обеспечивающие взаимодействие всех узлов электроники детектора и связь с внешним компьютером.
 - Написана управляющая программа, дающая пользователю возможность настройки детектора, контроля его параметров, подготовки и проведения эксперимента.
 - Составлены инструкции для пользователя по работе с управляющей программой, обслуживанию газовой камеры, подготовке к работе и процедуре калибровки детектора, организации съемки дифракционного КИНО.
5. На детекторе с фокусным расстоянием 1000мм измерены все основные характеристики.

Электронное разрешение, определяемое шумами электроники и алгоритмом вычисления, проводилось с помощью тестового сигнала и специального пробника и составило $\sigma_{\text{электроники}} \approx 0,5$ канала детектора. Физическое (полное) координатное разрешение измерялось на узком (50мкм) пучке СИ с энергией 8 кэВ и составило $\sigma \approx 1,5$ канала детектора, что с учетом геометрии катодной структуры соответствует примерно 104мкм. Характеристики детектора для камер с разными фокусными расстояниями приведены в таблице.

Фокусное расстояние, мм	350	700А	1000	1500
Входное окно (Ве)	260 мм * 10 мм * 0.2 мм			
Количество каналов	3328			
Регистрируемые углы	+/-15.6°	+15.3°/-0.3°	~ +/-6.4°	~ +/-4.1°
Ширина канала в угловых секундах	~33.8	~16.9	~13.8	~8.9
или в микронах	~63	~60	~69	~66
Координатное разрешение	$\sigma = 104$ мкм (FWHM = 241 мкм)			
Или в угловых секундах (σ)	~56	~29	~21	~14
Нелинейность интегральная	< 0.1% на всей шкале			
Нелинейность дифференциальная	~ 0.2%			
Количество кадров КИНО с максимальным разрешением	64			
Длительность кадра КИНО	1 мксек – 1 час			
Эффективность регистрации квантов с энергией 5÷10 кэВ	≥ 50 %			
Скорость счета (при 50% потерь)	10^7 событий/сек			
Газовая смесь	Ar90% CO ₂ 10%			
Избыточное давление в камере	0.1 – 1 атм			

На текущий момент изготовлено 5 детекторов ОДЗ-М. Изготовленные детекторы работают на современных станциях синхротронного излучения и обеспечивают получение уникальных научных результатов.

В заключение я хочу выразить глубокую признательность своему руководителю В.М.Аульченко, руководителю проекта. Я искренне благодарен М.А.Букину, А.В.Васильеву, В.В.Жуланову, Л.И.Шехтману за многолетнюю совместную работу. Я признателен В.Д.Кутовенко, С.А.Пономареву, А.А.Сироткину, И.К.Сурину, Б.Н.Шайдурову за помощь в изготовлении и обслуживании детекторов.

Хочется выразить отдельную благодарность Б.П.Толочко и его группе за многолетнее сотрудничество и помощь в проведении испытаний на пучке СИ. Я благодарю О.В.Евдокова и Б.Я.Пирогова за создание программы пользователя для работы с детектором.

Считаю приятным долгом поблагодарить пользователей детектора В.В.Волкова, М.Р.Шарафутдинова, А.Н.Шмакова, чьи квалифицированные и конструктивные замечания помогли усовершенствовать управляющую программу.

Отдельно хочу отметить помощь А.Д.Букина на стадии первичных расчетов и моделирования процессов в координатном сенсоре.

Литература

1. М.А.Блохин. Физика рентгеновских лучей. – Москва: Государственное изд-во технико-теоретической литературы, 1957. 518 с.
2. 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.
3. 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, Is. 1. P. 143-147.
4. S.E. Baru, G.I. Proviz, G.A. Savinov, et.al. One-coordinate detector for rapid multisnap recording of X-ray pictures // Nucl. Instrum. and Methods. 1978. V. 152, Is. 1. P. 195-197.
5. V.M. Aulchenko, S.E. Baru, V.A. Sidorov, et.al. One-coordinate X-ray detector // Nucl. Instrum. and Methods. 1983. V. 208, Is. 1-3. P. 443-444.
6. V.M. Aulchenko, I.G. Feldman, A.G. Khabakhpashev, et.al. One-coordinate X-ray detector OD-2. // Nucl. Instrum. and Methods. 1987. V. A 261. P. 78-81.
7. A. Oed. Position-sensitive detector with microstrip anode for electron multiplication with gases // Nucl. Instrum. and Methods. 1988. V. A263. P. 351-359.
8. Instrumentation in High Energy Physics: Advanced Series on Directions in High Energy Physics: Vol.9; ed. F.Sauli. - Singapore: World Scientific, 1992. 600 P.
9. D.A. Abdushukurov, Yu.S. Anisimov, G.A. Cheremukhina, et.al. Automatic coordinate detectors based on MWPC for applied studies // Nucl. Instrum. and Methods. 1983. V. 217. P. 101-106.
10. S.P. Chernenko, G.A. Cheremukhina, O.V. Fateev, et.al. X-ray detectors for structure investigations constructed at JINR // Nucl. Instrum. and Methods. 1994. V. A 348. P. 261-263.
11. Veljko Radeka, Robert A. Boie. Centroid finding method for position-sensitive detectors // Nucl. Instrum. and Methods. 1980. V. 178. P. 543-554.

12. Е.С. Вентцель. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. - 5-е изд. стер. - М.: Высш. шк., 1998. 576 с.
13. V. Zhukov, F. Udo, O. Marchena, et.al. A curved Micro-Strip Gas Counter for synchrotron radiation time resolved SAXS/WAXS experiments // Nucl. Instrum. and Methods. 1997. V. A 392. P. 83-88.
14. I.P. Dolbnya. H. Alberda, F.G. Hartjes, et.al. A fast position sensitive Microstrip-Gas-Chamber detector at high count rate operation // Rev. of Scientific Instruments. 2002. V. 73, No. 11. P. 3754-3758.
15. L.L. Jones. PreShape32 specification, version 1.0 // Rutherford Appleton Laboratory internal document. 1995. Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, UK.
16. Alan Litke, Chris Adolphsen, Andreas S. Schwarz, et.al. A silicon strip vertex detector for the Mark II experiment at the SLAC linear collider // Nucl. Instrum. and Methods. 1988. V. A265, Is. 1-2. P. 93-98.
17. V.M Aulchenko, A.E Bondar, V.P Nagaslaev, ..., V.M. Titov, et.al. Study of CAMEX chips for microstrip gas chamber readout in short cycles // Nucl. Instrum. and Methods. 1996. V. A376, Is. 2. P. 225-228.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. J. Fischer, V. Radeka, G.C. Smith. X-ray position detection in the region of 6 μm RMS with wire proportional chambers // Nucl. Instrum. and Methods. 1986. V. A 252, Is. 2-3. P. 239-245.

22. Фетисов, Г.В. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ / под ред. Л.А.Асланова. - М.: Физматлит, 2007. 672 с.
23. X-ray Data Booklet / edited by A. C. Thompson, D. Vaughan. - Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 2001. 161 P.
24. G.C. Smith, J. Fischer, V. Radeka. Photoelectron Range Limitations to the Spatial Resolution for X-Rays in Gas Proportional Chambers // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1984. V. 31, Is. 1. P. 111-115.
25. R.A. Boie, A.T. Hrisoho, P. Rehak. Signal shaping and tail cancellation for gas proportional detectors at high counting rates // Nucl. Instrum. and Methods. 1982. V. 192, Is. 2-3. P. 365-374.
26. Volkov V.V., Lapuk V.A., Toropova A.I., et.al. A comparative study of immunoglobulin IgM and rheumatoid factor IgMRF in solution by small-angle X-ray scattering // Mendeleev Communications. 2012. V. 22. P. 159-161.
27. Volkov V.V., Lapuk V.A., Chekrygina D.I., et.al. Difference between conformations of immunoglobulin M and human rheumatoid factor based on small-angle X-ray solution scattering data // Mendeleev Communications. 2013. V.23. P.319-320.
28. Podyacheva O.Yu., Shmakov A.N., Ismagilov Z.R. In Situ X-ray diffraction study of the growth of nitrogen-doped carbon nanofibers by the decomposition of ethylene-ammonia mixture on a Ni-Cu catalyst // Carbon. 2013. V.52. P.486-492.
29. Podyacheva O.Yu., Shmakov A.N., Boronin A.I., et.al. A correlation between structural changes in a Ni-Cu catalyst during decomposition of ethylene/ammonia mixture and properties of nitrogen-doped carbon nanofibers // Journal of Energy Chemistry. 2013. T.22, №2. C.270-278.
30. Sharafutdinov M.R., Korchagin M.A., Shkodich N.F., et.al. Phases transformations in the Ni-Al system investigation by synchrotron radiation diffraction // Nucl. Instrum. and Methods. 2007. V. A 575, No 1/2. P. 149-151.