

На правах рукописи

ЖУЛАНОВ Владимир Викторович

**РЕГИСТРИРУЮЩАЯ АППАРАТУРА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕТОНАЦИОННЫХ
И УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**01.04.01 – приборы и методы
экспериментальной физики**

АВТОРЕФЕРАТ

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

НОВОСИБИРСК – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

АУЛЬЧЕНКО Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор, Учреждение Российской академии наук Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

КОРНЕЕВ Владимир Николаевич – доктор технических наук, Учреждение Российской академии наук Институт биофизики клетки РАН, г. Пущино.

ХИЛЬЧЕНКО Александр Дмитриевич – кандидат технических наук, Учреждение Российской академии наук Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Учреждение Российской академии наук Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, г. Москва.

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2011 г. в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.01 Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

Автореферат разослан «_____» _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.В. Бурдаков

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Стремительное развитие полупроводниковой техники за последние несколько десятилетий открыло много возможностей для создания измерительного оборудования на принципиально новом уровне, для разработки новых методик проведения физических экспериментов и, как следствие, для получения знаний о природе явлений, недоступных ранее. Это особенно относится к исследованию поведения материалов в экстремальных условиях, при которых большие температура, давление и скорость протекания реакции затрудняют прямое наблюдение за изучаемым объектом. В то же время, изучение таких процессов представляет большой интерес как с точки зрения получения характеристик изучаемого вещества в экстремальных условиях, так и с точки зрения получения новых материалов.

Распространённым способом создания экстремальных условий является нагружение изучаемого образца ударной волной, получаемой при детонации взрывчатого вещества (ВВ). При этом экстремальные условия возникают на короткое время и надёжно воспроизводятся. Свойства ВВ, задающего энергетическое воздействие на образец, определяют успех того или иного эксперимента. Поэтому изучение протекания химической реакции в самом ВВ также является важной задачей.

Для регистрации положения плотных сред, таких как кумулятивная струя или осколки нагружаемого объекта, при проведении исследований ударно-волновых процессов может использоваться рентгеновское излучение. В 1999 году в ВНИИЭФ (г. Саров) были предприняты попытки измерения распределения плотности при детонации зарядов ВВ. Однако, временное ($\sim 0,2$ мкс) и пространственное (~ 2 мм) разрешения, получаемые при использовании рентгеновских трубок, недостаточны для исследования структуры фронта детонационной волны.

Другим источником рентгеновского излучения является движение заряженных частиц, например, электронов, по криволинейной траектории (орбите) в накопительном кольце. Такое излучение называется синхротронным и имеет качественно лучшие характеристики по сравнению с излучением рентгеновской трубки. Синхротронное излучение (СИ) открывает принципиально новые возможности по исследованию детонационных и ударно-волновых процессов.

В Институте ядерной физики СО РАН накоплен большой опыт использования СИ для проведения экспериментов по малоугловому рентгеновскому рассеянию (МУРР) и дифрактоскопии статических или относи-

тельно медленно протекающих процессов горения и фазового перехода по сравнению со скоростью протекания ударно-волновых процессов. Характерные времена для процессов горения составляют $\sim 10^{-3}$ с. Для динамической диагностики детонационных и ударно-волновых процессов требуется временное разрешение $\sim 10^{-9}$ с и пространственное разрешение 0,1 мм, что в итоге представляет сложную задачу с точки зрения разработки регистрирующей аппаратуры и методики проведения экспериментов. В решении этих проблем заключалась основная задача настоящей работы.

Цель работы

Целью настоящей работы является решение двух тесно связанных задач:

- Разработка регистрирующей аппаратуры для проведения экспериментов по изучению детонационных и ударно-волновых процессов с использованием синхротронного излучения;
- Разработка методики проведения экспериментов по изучению детонационных и ударно-волновых процессов с использованием синхротронного излучения.

Личный вклад автора

Автор принимал активное участие в совместной разработке регистрирующей аппаратуры экспериментальной станции «Экстремальные состояния вещества». Непосредственно автором разработаны ключевые элементы аппаратуры: электроника быстрого рентгеновского детектора DIMEX и быстрый затвор, – устройство, ограничивающее интегральный поток фотонов в детектор.

Автор принимал участие в совместной разработке методики проведения экспериментов. Непосредственно автором была разработана схема синхронизации процессов во время эксперимента.

Научная новизна

- Показана возможность построения газового координатного детектора, эффективно работающего при высокой интенсивности облучения и обеспечивающего требуемое временное и пространственное разрешения;
- показана возможность использования синхротронного излучения для изучения детонационных и ударно-волновых процессов;
- впервые получено распределение плотности детонационной волны в режиме «кино» с интервалом между кадрами ~ 500 нс и длительностью экспозиции ~ 1 нс;
- впервые получено координатное распределение малоуглового рентгеновского рассеяния, возникающего при детонации различных ВВ.

Научная и практическая значимость работы

Разработанные регистрирующая аппаратура экспериментальной станции «Экстремальные состояния вещества» и методика проведения экспериментов по изучению детонационных и ударно-волновых процессов с использованием СИ стали новым эффективным инструментом исследования сверхбыстрых процессов. В период с 2001 по 2010 год на экспериментальной станции было проведено более 500 экспериментов по изучению детонационных и ударно-волновых процессов.

Положения, выносимые на защиту

- Разработка регистрирующей аппаратуры для проведения экспериментов по изучению детонационных и ударно-волновых процессов с использованием синхротронного излучения, включающей в себя быстрый рентгеновский детектор DIMEX и техническое средство, ограничивающее интегральный входной поток в детектор.
- Разработка методики проведения экспериментов по изучению детонационных и ударно-волновых процессов с использованием синхротронного излучения, включающей в себя постановку экспериментов и синхронизацию процессов во время эксперимента.

Публикации и апробация работы

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на семинарах ИЯФ СО РАН и следующих российских и международных конференциях: III Национальная конференция по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов (РСНЭ-2001, г. Москва), XIV Российская конференция по использованию синхротронного излучения (СИ-2002, г. Новосибирск), V Харитоновские тематические научные чтения (2003 г., РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров), XV Международная конференция по использованию синхротронного излучения (СИ-2004, г. Новосибирск), VII Харитоновские тематические научные чтения (2005 г., РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров), SNIC Symposium (2006 г., г. Стэнфорд, США), XVI Международная конференция по использованию синхротронного излучения (СИ-2006, г. Новосибирск), XVII Международная конференция по генерации и использованию синхротронного излучения (СИ-2008, г. Новосибирск), VII Национальная конференция «Рентгеновское, Синхротронное излучения, Нейтроны и Электроны для исследования наносистем и материалов. Нано-Био-Инфо-Когнитивные технологии» (РСНЭ-НБИК 2009, г. Москва), XVIII Международная конференция по генерации и использованию синхротронного излучения (СИ-2010, г. Новосибирск) и опубликованы в 10 научных работах.

Объем и структура работы

Диссертационная работа объемом 128 страниц состоит из введения, четырёх глав, заключения, четырёх приложений и списка литературы из 46 библиографических единиц. В работе содержится 38 рисунков и 70 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, обозначена основная задача диссертации, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены краткий обзор существующих экспериментальных методов изучения детонационных и ударно-волновых процессов, источник СИ на накопительном кольце ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН, экспериментальная станция «Экстремальные состояния вещества» и возможные эксперименты на ней, а также перечислены технические требования к регистрирующей аппаратуре станции для осуществления экспериментов по изучению детонационных и ударно-волновых процессов с использованием синхротронного излучения (СИ).

Для изучения детонационных и ударно-волновых процессов с использованием СИ возможно использование двух эффектов взаимодействия рентгеновского излучения с веществом: поглощения и рассеяния рентгеновских фотонов в изучаемом объекте. На станции «Экстремальные состояния вещества» возможно проведение экспериментов по изучению этих эффектов в детонационной и ударной волнах: динамическая рентгенография и эксперименты по малоугловому рентгеновскому рассеянию (МУРР).

Типичная схема для проведения рентгенографических экспериментов по изучению детонационных и ударно-волновых процессов показана на рис. 1. Луч СИ шириной 20 мм и толщиной 0,1–0,3 мм просвечивает образец, по которому распространяется детонационная или ударная волна. Если детектор позволяет регистрировать через равные короткие интервалы времени распределение интенсивности излучения, прошедшего через образец, то получается динамическое «кино». Так как распространение детонационной волны является стационарным процессом, то временную шкалу можно преобразовать в пространственную координату, направленную вдоль направле-

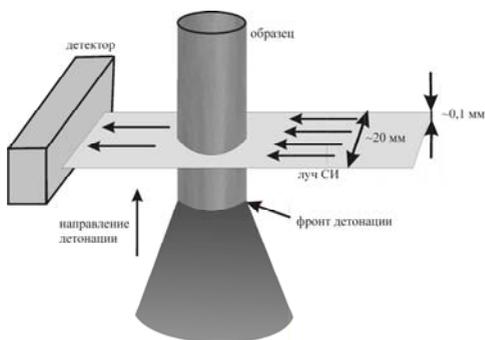


Рис. 1. Схема проведения рентгенографического эксперимента.

ния распространения детонационной волны, и получить двумерное распределение интенсивности и, в конечном итоге, трёхмерное распределение плотности в образце $\rho(r, z)$.

Синтез нанодисперсных алмазов в детонационных волнах изучается давно. Экспериментальные данные по этому процессу заключаются, в основном, в распределении синтезированных алмазов по размеру в конечном продукте взрыва при разных условиях эксперимента. Рассеяние рентгеновского излучения на наночастицах алмаза позволяет получить экспериментальную информацию о динамике синтеза.

На рис. 2 показана типичная схема эксперимента по регистрации МУРР. Из пучка СИ с помощью нижнего (К1) и верхнего (К2) рентгеновских ножей (коллиматор Кратки) на центральной части заряда взрывчатого вещества (ВВ) формируется пятно размером 0,4–1 мм высотой и 3–20 мм шириной. Проходящий через образец прямой пучок отсекается ловушкой (К3). Лучи, отклонённые на малые углы, регистрируются детектором. По зарегистрированному излучению может быть восстановлена динамика роста наночастиц в образце.

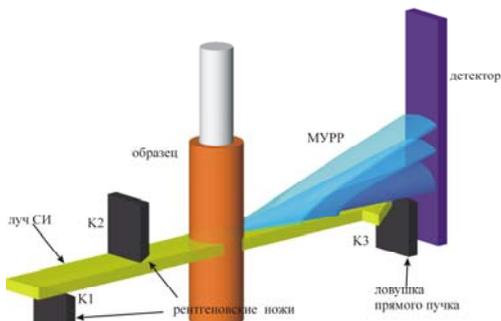


Рис. 2. Схема проведения эксперимента по регистрации МУРР.

Описание станции «Экстремальные состояния вещества»

Для проведения описанных выше типов экспериментов была создана экспериментальная установка «Экстремальные состояния вещества». В создании станции принимали участие три института СО РАН: ИЯФ, ИГиЛ и ИХТТИМ. Общая схема станции приведена на рис 3. Станция состоит из трёх узлов:

- блок формирования (коллимации) пучка СИ;
- взрывная камера;
- блок регистрирующей аппаратуры.

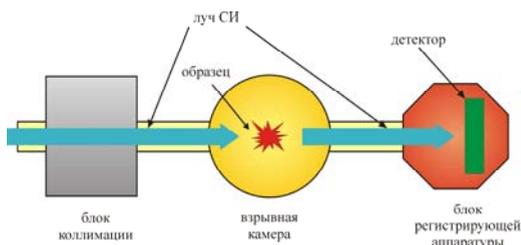


Рис. 3. Общая схема экспериментальной станции «Экстремальные состояния вещества».

Коллиматор Кратки, установленный в блоке формирования пучка СИ, обеспечивает настройку ширины пучка с точностью ~ 5 мкм.

Взрывная камера общим объёмом ~ 70 л рассчитана на локализацию взрыва образцов, содержащих до 50 г ВВ в тротиловом эквиваленте.

Координатный детектор располагается в блоке регистрирующей аппаратуры на системе из двух подвижек, которая позволяет перемещать детектор в плоскости, перпендикулярной пучку СИ с точностью позиционирования ~ 5 мкм. Детектор может закрепляться на подвижках как в горизонтальном, так и в вертикальном положениях. Перемещение однокоординатного детектора по этим направлениям позволяет получить общую картину прошедшего через образец и рассеянного излучения для юстировки положений детектора и образца перед экспериментом.

Требования к регистрирующей аппаратуре

Для успешного проведения экспериментов по изучению детонационных и ударно-волновых процессов на станции «Экстремальные состояния вещества» её регистрирующая аппаратура должна обеспечивать временное, пространственное разрешения и точность регистрации интенсивности СИ, необходимые для достоверной физической интерпретации результатов с учётом параметров СИ на станции. Требования к регистрирующей аппаратуре станции «Экстремальные состояния вещества» выглядят следующим образом:

- пространственное разрешение $\sim 0,1$ мм;
- временное разрешение ~ 150 нс;
- максимальная плотность потока регистрируемого излучения – $> 5 \cdot 10^5$ фотон/сгусток/мм²;
- эффективность регистрации не менее 10% для фотонов с энергией ~ 20 кэВ;
- длительность последовательности кадров > 5 мкс.

Во второй главе описывается конструкция рентгеновского детектора DIMEX.

Детектор DIMEX состоит из двух функциональных частей: регистрирующей и интерфейсной. Регистрирующая структура и считывающая электроника, помещённые в газовый объём, составляют собой регистрирующую часть детектора. Оцифрованные данные из регистрирующей части передаются в интерфейсную, где располагается ОЗУ для их хранения. Интерфейсная часть расположена вне газового объёма и обеспечивает взаимодействие детектора с остальной инфраструктурой экспериментальной станции.

Регистрирующая часть детектора представляет собой ионизационную камеру высокого давления со считывающей структурой в виде анодных полосок, расположенных с шагом 0,1 мм (рис. 4). Сколлимированный по вертикали пучок СИ попадает в чувствительный объем детектора через входное окно из бериллия толщиной 1 мм. В зависимости от типа эксперимента пучок имеет размер по вертикали от 0,1 мм до 1 мм и по горизонтали до 14 мм. Пучок СИ попадает в газовый объем между двумя параллельными электродами: высоковольтным дрейфовым электродом, на который подается отрицательный потенциал, и полосковой считывающей плоскостью, полосы которой направлены параллельно направлению пучка и имеют примерно нулевой потенциал. Глубина чувствительной области детектора в направлении пучка составляет 30 мм, а между входным окном и регистрирующей структурой, находящейся под высоким напряжением, имеется «мёртвая зона» – технологический промежуток шириной 3 мм.

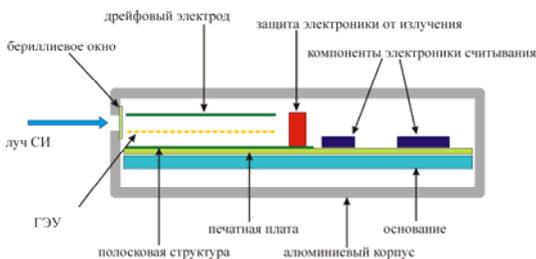


Рис. 4. Регистрирующая часть детектора DIMEX.

Камера детектора наполнена газовой смесью Хе-СО₂ с молярным соотношением (75%–25%) при абсолютном давлении 7 атм. Фотоны СИ поглощаются в рабочем газе, образуя первичную ионизацию. Электроны первичной ионизации дрейфуют в сторону считывающей полосковой структуры, а положительные ионы – в сторону дрейфового электрода. На пути дрейфа электронов на расстоянии 1,5 мм от полосковой структуры расположен газовый электронный умножитель (ГЭУ), который экранирует считывающую структуру от поля положительных ионов. После проникновения сквозь ГЭУ часть электронов продолжает дрейф в сторону полосковой структуры. При этом на полосы наводится заряд, который поступает на входы малошумящих интеграторов, подключенных к каждой полоске. Поле положительных ионов полностью экранируется обкладками ГЭУ.

В качестве ключевого компонента регистрирующей электроники используется специализированная интегральная схема APC128. APC128 содержит 128 каналов, каждый из которых состоит из малошумящего зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ) на входе и 32 ячеек аналоговой памяти – электрических емкостей. Кроме того, чип содержит выходной аналоговый мультимплексор и усилитель, через которые все каналы могут быть последовательно прочитаны. Максимальная частота записи аналоговой памяти составляет 10 МГц. Считывание и оцифровка всех 4096 (32 канала * 128 ячеек/канал) ячеек занимает ~4 мс при частоте считывания 1 МГц. При этом

для оцифровки 128 каналов достаточно одного аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Для синхронизации моментов записи в емкости аналоговой памяти со вспышками СИ в DIMEX-е используется сигнал фазы ВЭПП, точно привязанный к положению сгустков электронов в накопителе.

Интерфейсная часть детектора представляет собой электронную плату, расположенную вне герметичной камеры детектора и реализующую:

- взаимодействие с удалённой ЭВМ;
- взаимодействие с регистрирующей частью детектора;
- взаимодействие с инфраструктурой экспериментальной станции;
- источник высокого напряжения для питания регистрирующей структуры детектора;
- хранение данных оцифровки аналоговой памяти APC128;
- источники вторичного питания различных узлов детектора.

В качестве интерфейса между детектором DIMEX и ЭВМ выбран стандарт IEEE 802.3 100BASE-TX. Выбор в пользу этого стандарта определяется его широкой распространённостью, достаточной пропускной способностью (100 Мбит/с) и приемлемым требованием на длину сегмента – <100 м. Физический уровень соединения по модели ISO OSI реализован на дискретном приёмопередатчике, а канальный и вышележащие уровни реализованы средствами ПЛИС в интерфейсной части детектора.

Программный интерфейс детектора построен по архитектуре «клиент-сервер»: детектор представляет собой сервер, отвечающий на запросы по протоколу UDP клиентского программного обеспечения (ПО) на ЭВМ на чтение/запись регистра и чтение/запись области памяти.

В третьей главе описана инфраструктура экспериментальной станции «Экстремальные состояния вещества» и взаимодействие процессов во время эксперимента.

Образование объёмного заряда малоподвижных ионов обоих знаков в рабочей области газового детектора является важным фактором, ограничивающим его загрузочную способность. Это особенно актуально в нашем случае, когда для получения экспериментальных данных, пригодных для анализа, требуется регистрация максимально возможного входного потока. Специфика эксперимента по изучению детонационных и ударно-волновых процессов такова, что продолжительность интересующего события составляет всего несколько микросекунд. Это позволяет ограничить интегральный поток излучения в детектор, открывая пучок СИ за несколько микросекунд перед экспериментом. Объёмный заряд, образованный за это время, не должен приводить к ухудшению характеристик детектора. После эксперимента пучок СИ перекрывается, образовавшийся объёмный заряд ионов рассасывается приложенным электрическим полем, и детектор возвращается в исходное состояние.

Устройством, открывающим пучок СИ только на время эксперимента, является сконструированный быстрый затвор, конструкция которого показана на рис. 5. Быстрый затвор представляет собой непрерывно вращающийся диск диаметром 600 мм с прорезью прямоугольной формы шириной 1 мм и длиной 40 мм. Диск изготовлен из бронзы толщиной 2 мм, что достаточно для полного поглощения рентгеновского излучения ВЭПП-3. В целях безопасности диск защищён кожухом, в котором также имеется прорезь для прохождения пучка СИ. Закреплённый к кожуху электродвигатель постоянного тока вращает диск с частотой вращения до 7500 об./мин. Пучок СИ проходит через затвор в тот момент, когда прорезь в диске совмещается с трассой пучка. При указанной выше ширине прорези фаза полного открытия затвора составляет 40–90 мкс при длительности фазы полного закрытия 8–18 мс в зависимости от скорости вращения диска. В течение фазы полного закрытия затвора все ионы объёмного заряда вытягиваются электрическим полем, и детектор возвращается в своё исходное состояние.



Рис. 5. Конструкция быстрого затвора.

Для определения момента начала открывания затвора выбрана бесконтактная схема определения положения диска затвора. В диске имеется 3 отверстия диаметром 2 мм (синхроотверстия), расположенные диаметрально напротив прорези в диске. На кожухе быстрого затвора зафиксирована оптопара: светодиод и фотодиод. При прохождении синхроотверстий через оптопару с фотодиода снимаются периодические серии из 3-х импульсов. В момент прихода последнего импульса серии вычисляется момент начала фазы открывания.

Для определения момента начала открывания затвора выбрана бесконтактная схема определения положения диска затвора. В диске имеется 3 отверстия диаметром 2 мм (синхроотверстия), расположенные диаметрально напротив прорези в диске. На кожухе быстрого затвора зафиксирована оптопара: светодиод и фотодиод. При прохождении синхроотверстий через оптопару с фотодиода снимаются периодические серии из 3-х импульсов. В момент прихода последнего импульса серии вычисляется момент начала фазы открывания.

Если запуск детектора привязан к импульсу иницирования детонатора, то существует опасность того, что полезное событие произойдёт вне фазы записи детектора DIMEX, так как время формирования детонационной и ударной волн в образце имеет разброс, сопоставимый с длительностью фазы записи детектора. Для более точной привязки запуска детектора к полезному событию используется проволочный датчик положения детонационной волны, представляющий собой две перекрученные изолированные лаком проволочки, помещённые внутрь ВВ. Одна из проволочек находится под нулевым потенциалом, а на вторую (сигнальную) проволочку через резистор 1 кОм подаётся напряжение 5 В. При прохождении детонационной волны через проволочный датчик изоляция проволочек разрушается и проволочки замыкаются плазмой, возникающей за фронтом детонационной волны. При

этом на сигнальной проволочке формируется электрический импульс, синхронизованный с уже сформированной детонационной волной.

Общая схема синхронизации процессов показана на рис. 6. Последовательность событий выглядит следующим образом:

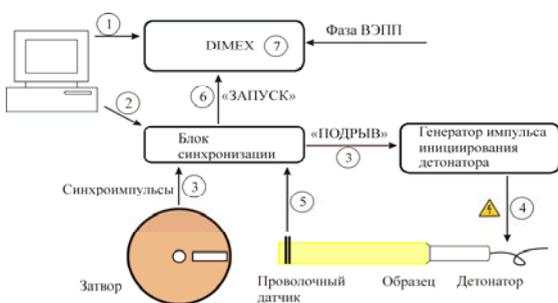


Рис. 6. Общая схема синхронизации.

1) по команде оператора на старт

эксперимента детектор DIMEX переводится в режим ожидания сигнала запуска. В этом режиме производится непрерывная фиксация распределения интенсивности излучения с записью в аналоговую память детектора;

2) разрешается работа блока синхронизации;

3) по последовательности синхроимпульсов блок синхронизации вычисляет момент ближайшего открытия затвора и формирует команду инициирования детонатора в нужный момент;

4) генератор инициирования детонатора формирует высоковольтный импульс на детонатор;

5) при прохождении детонационной волны через проволочный датчик формируется импульс положения детонационной волны;

6) блок синхронизации формирует сигнал запуска детектора;

7) детектор производит запись заранее заданного количества кадров, считывает и оцифровывает содержимое аналоговой памяти.

В четвертой главе рассмотрены собственные метрологические характеристики детектора DIMEX, способы оценки этих характеристик и анализ ограничивающих факторов.

Детектор должен обеспечивать измерение распределения потока рентгеновских фотонов с высокой точностью по координате и по величине. Кроме того, наиболее существенным свойством детектора DIMEX является его способность регистрировать сигнал, поступивший от очередного пролетающего сгустка электронов, до пролета следующего сгустка. Таким образом, наиболее важными параметрами детектора являются:

- пространственное разрешение;
- временное разрешение;
- точность измерения величины сигнала (отношение сигнал/шум и динамический диапазон).

При этом, поскольку поток фотонов от одного сгустка ограничен, важным свойством детектора является квантовая эффективность, которая должна быть достаточно высокой.

Результат измерения **пространственного разрешения** представлен на **Рис. рис. 7**. На рисунке показана аппаратная функция детектора (изображение бесконечно тонкого пучка), измеренная методом непрозрачного края. При этом в равномерный пучок помещается непрозрачный объект с точно обработанным краем. Изображение края затем дифференцируется и полученное распределение является искомой аппаратной функцией. Из рисунка видно, что FWHM (full width at half maximum – ширина на полувысоте) равна ~220 мкм, что хорошо соответствует результату моделирования.

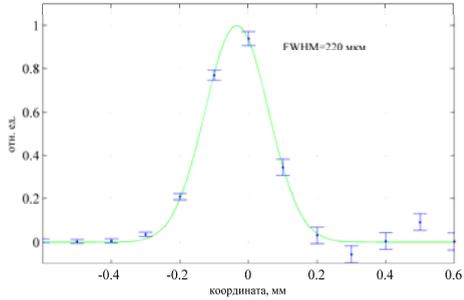


Рис. 7. Аппаратная функция детектора.

Необходимым и достаточным требованием на **временное разрешение** детектора является способность регистрировать сигнал от отдельной вспышки СИ, не перемешивая его с сигналом от соседних вспышек, идущих с интервалом ~250 нс. В этом случае временное разрешение всей методики будет определяться исключительно временной структурой вспышек СИ, то есть ~1 нс.

Минимальный период записи в аналоговую память APC128 составляет 100 нс. Измерение времени сбора заряда с разрешением 25 нс производилось в режиме работы детектора без сброса с длительностью кадров 175 нс. При этом при постоянной интенсивности излучения, падающего на детектор, наблюдались биения регистрируемого сигнала, так как в этом случае на 10 регистрируемых кадров приходилось только 7 вспышек СИ. Если разбить интервал между вспышками (250 нс) на 10 равных частей (по 25 нс), то по экспериментальным данным можно восстановить долю полного заряда от одной вспышки СИ,

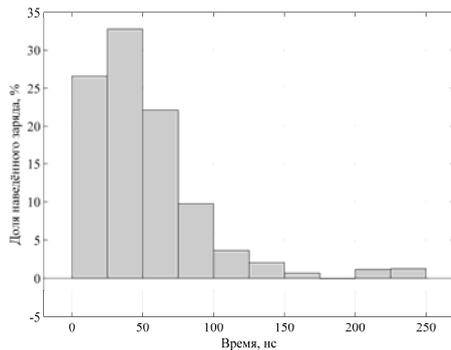


Рис. 8. Сбор заряда APC128.

приходящуюся на каждую такую часть (рис. 8). Видно, что интегрирование сигнала практически полностью (~95%) заканчивается в течение 150 нс после вспышки СИ, что позволяет полностью разделять сигнал от двух последовательных вспышек СИ.

Точность измерения сигнала определяется флуктуациями потока фотонов, регистрируемых детектором, и шумами электроники. На рис. 9 приведена зависимость сигнала в детекторе и отношения сигнала к шуму от потока фотонов на входе в детектор. Поток фотонов изменялся с помощью фильтров из плексигласа. На графике приведен поток, рассчитанный с помощью программы ХОР2.0. Видно, что сигнал увеличивается прямо пропорционально входному потоку во всем диапазоне измерения. Отношение сигнала к шуму меняется как корень квадратный из сигнала (наклон зависимости в два раза меньше в двойной логарифмической шкале). Таким образом, фактором, определяющим точность измерения сигнала, является величина флуктуации числа фотонов, регистрируемых детектором, и наилучшая точность достигается при максимальном сигнале. Предельный сигнал, измеряемый детектором, ограничивается динамическим диапазоном интеграторов APC128.

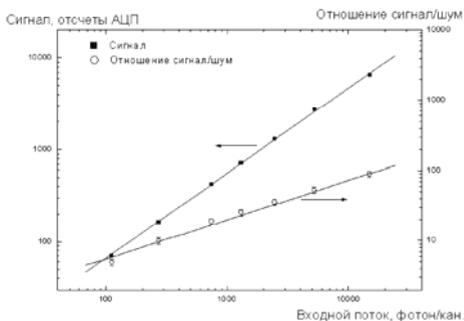


Рис. 9. Зависимость сигнала в детекторе и отношения сигнала к шуму от потока фотонов на входе.

Расчетная зависимость квантовой эффективности детектора DIMEX (доли потока фотонов, поглощенных в чувствительной зоне) от энергии рентгеновских фотонов показана на рис. 10. Расчет сделан в предположении толщины мертвой зоны за входным окном 3 мм, толщины чувствительной зоны 30 мм и толщины бериллиевого окна 1 мм. Рабочая газовая смесь – Хе-СО₂ с молярным соотношением (75%–25%) при абсолютном давлении 7 атм. Видно, что в диапазоне энергий 15–30 кэВ квантовая эффективность составляет более 50%.

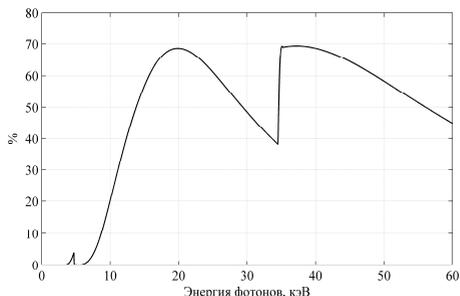


Рис. 10. Эффективность регистрации.

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы.

В приложениях приведены результаты некоторых значимых экспериментов на экспериментальной станции «Экстремальные состояния вещества», протокол прикладного уровня детектора DIMEX, файл регистров и карта памяти детектора.

Основные результаты

1. Создан и введён в эксплуатацию аппаратно-программный комплекс для исследования детонационных и ударно-волновых процессов с использованием синхротронного излучения. Основные компоненты комплекса:

- а. однокоординатный детектор СИ DIMEX;
- б. быстрый затвор;
- в. датчик положения детонационной волны;
- г. генератор импульса инициирования детонатора;
- д. ЭВМ с необходимым программным обеспечением.

2. Разработана методика проведения экспериментов по изучению детонационных и ударно-волновых процессов с использованием синхротронного излучения. Методика включает в себя:

- а. постановку рентгенографических экспериментов с использованием СИ и малоуглового рентгеновского рассеяния;
- б. синхронизацию процессов во время эксперимента.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. В.М. Аульченко, В.В. Жуланов, Л.И. Шехтман. Однокоординатный рентгеновский детектор с быстрой записью изображения. // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* - 2002, N11, стр. 10-12.
2. V. Aulchenko, V. Zhulanov, et al. Development of a one-dimensional detector for the study of explosions with a synchrotron radiation beam. // *Journal of Synchrotron Radiation.* - 10 (2003) 361-365.
3. К.А. Тен, В.В. Жуланов и др. Экспериментальная станция для исследования детонационных и ударно-волновых процессов с помощью синхротронного излучения. // *Физика экстремальных состояний вещества-2003.* /Под редакцией В.Е. Фортова и др. Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, 2003 г., стр. 38-40.
4. V. Aulchenko, V. Zhulanov. et al. Development of fast one-dimensional X-ray detector for imaging of explosions. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.* - V.513, N1-2 (2003), 388-393.

5. A. Aulchenko, V. Zhulanov et al. One-dimensional detector for study of detonation processes with synchrotron radiation beam. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - V. 543, N1 (2005), 350-356.
6. V.M.Aulchenko, V.V.Zhulanov et al. Detector for imaging of explosions: present status and future prospects with higher energy X-rays. // Journal of Instrumentation. - 3. P05005, 2008.
7. V.M.Aulchenko, V.V.Zhulanov et al. Current status and further improvements of the detector for imaging of explosions. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - V.603 (2009) 73-75.
8. V.M. Aulchenko, V.V. Zhulanov et al. Application of introduced nano-diamonds for the study of carbon condensation during detonation of condensed explosives. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - V.603 (2009) 102-104.
9. V.M. Aulchenko, V.V. Zhulanov et al. Fast high resolution gaseous detectors for diffraction experiments and imaging at synchrotron radiation beam. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - V.623 (2010) 600-602.
10. В.М. Аульченко, В.В. Жуланов и др. Детектор для изучения взрывных процессов на пучке синхротронного излучения. // Приборы и техника эксперимента. - 2010, №3, С.20-35.

ЖУЛАНОВ Владимир Викторович

**Регистрирующая аппаратура
для исследования детонационных
и ударно-волновых процессов
с использованием
синхротронного излучения**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Сдано в набор 14.04. 2011 г.
Подписано в печать 18.04. 2011 г.
Формат 60x90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 9

Обработано на РС и отпечатано
на ротапинтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11