

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики

Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов

Под редакцией
доктора технических наук А. Л. Михайлова

Саров
2015

УДК 534.222.2
ББК 22.23
Н40

Авторы: Ю. Б. Базаров, В. А. Губачев, Б. М. Ловягин (гл. 1);
В. А. Комрачков, К. Н. Панов, А. М. Подурец (гл. 2);
А. В. Руднев, М. А. Сырунин (гл. 3);
Д. А. Калашников, Д. В. Назаров, А. В. Федоров,
С. А. Финюшин, Е. А. Чудаков (гл. 4);
В. М. Бельский, Е. Н. Богданов, А. В. Родионов,
А. А. Седов (гл. 5);
К. А. Тен, Б. П. Толочко (гл. 6)

Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов / Под ред. доктора техн. наук А. Л. Михайлова. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. – 322 с.

ISBN 978-5-9515-0308-4

Книга написана на основе опыта использования в Институте физики взрыва (ИФВ) РФЯЦ-ВНИИЭФ экспериментальных методик с применением излучений в исследованиях взрывных явлений и детонации, поведения материалов и конструкций при воздействии интенсивных динамических нагрузок.

Описаны методы исследований быстропротекающих процессов с использованием объектов с происходящими в них процессами проникающими излучениями от внешних источников, вопросы регистрации излучений, сопровождающих изучаемые процессы. Описаны природа и получение различных видов излучений, физические основы взаимодействия с веществом рентгеновского, протонного, синхротронного излучений, а также электромагнитных волн в микроволновом и оптическом диапазонах. Рассмотрены схемы и принципы конструкций приборов и установок, наиболее широко применяемых в исследованиях. Методы теории информации, методы обработки изображений и результатов измерений затронуты лишь частично, поскольку требуют специального и подробного изложения.

Книга адресована научным сотрудникам и инженерам, планирующим и проводящим экспериментальные исследования быстропротекающих процессов с применением излучений, а также будет полезна студентам и аспирантам физических и физико-технических специальностей.

УДК 534.222.2
ББК 22.23

ISBN 978-5-9515-0308-4

©ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015

Быстропротекающих в сплошных средах физики экстремальных структур. Предметом и средства диагностики характерными временами

Любой экспериментальный путем взаимодействия нет информации и инструмента в процессе исследуемое явление. В этом смысле термины графики, применим для инструмента на объекте

Свойством объекта исследуемый процесс в физике быстропротекающих явлений различного тактирующих с ним. принято называть особый интерес. При использовании в качестве В результате применения проникающих излучений или внутренней структуры осуществляют непрерывного характера отрывностей разрыва пара

В обоих случаях термина времени, принято говорить о «Эта запись может быть так и непрерывной (ч

В качестве исследующих, обычно правило, достаточно кусные» трубки, ус

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Оптическая диагностика	7
1.1. Фотографическая и электронная регистрация изображений	7
1.2. Фотографическая регистрация быстропротекающих процессов скоростными фотокамерами и киноаппаратами	11
1.2.1. Регистрация с щелевой разверткой	13
1.2.2. Регистрация процессов высокоскоростными фотографическими и киносъемочными аппаратами	23
1.2.3. Высокоскоростная растровая фотография	27
1.2.4. Высокоскоростная фотографическая съемка камерами с оптико-механической коммутацией изображения	29
1.2.5. Высокоскоростная теневая и интерференционная фотография	31
1.2.5.1. Метод светящейся точки	33
1.2.5.2. Теневой метод (шлирен-метод)	35
1.2.5.3. Интерференционный метод	37
1.2.5.4. Метод визуализирующих диафрагм	39
1.2.5.5. Результаты экспериментов	41
1.2.6. Высокоскоростная фоторегистрирующая аппаратура	46
1.2.6.1. Разработка фоторегистрирующей аппаратуры для регистрации ядерных взрывов	48
1.2.6.2. Модификации СФР-2М для научных исследований	48
1.2.6.3. Скоростные видеофотокамеры с ПЗС- и КМОП-матрицами для научных исследований	53
1.2.7. Импульсные источники света и световые затворы	58
1.2.7.1. Импульсные источники света	58
1.2.7.2. Высокоскоростные световые затворы	59
1.2.7.3. Электрооптический модулятор света	62
Список литературы к главе 1	66
Глава 2. Рентгенография	68
2.1. Метод импульсной рентгенографии	68
2.2. Рентгеновские лучи	69
2.2.1. Открытие и природа рентгеновских лучей	69
2.2.2. Дифракция рентгеновских лучей. Закон Вульфа – Брэгга	70
2.2.3. Возбуждение рентгеновских лучей	72
2.3. Тормозное рентгеновское излучение	73
2.3.1. Импульсная теория тормозного излучения	73
2.3.2. Квантовая теория возбуждения тормозного излучения	74

2.3.3. Измерение энергии рентгеновских лучей	75
2.3.4. Сплошной спектр тормозного излучения	77
2.3.5. Интенсивность тормозного рентгеновского излучения	78
2.3.5.1. Зависимость интенсивности излучения от напряжения	78
2.3.5.2. Влияние формы кривой напряжения	79
2.3.5.3. Зависимость интенсивности от тока трубки	80
2.3.5.4. Зависимость интенсивности тормозного излучения от вещества анода трубки	80
2.3.5.5. Коэффициент полезного действия рентгеновской трубки	81
2.3.5.6. Пространственное распределение интенсивности тормозного рентгеновского излучения	81
2.4. Характеристическое рентгеновское излучение	82
2.5. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом	85
2.5.1. Фотоэлектрический эффект	86
2.5.2. Рассеяние рентгеновских лучей – эффект Комптона	87
2.5.3. Образование пар	88
2.5.4. Вторичные процессы при взаимодействии рентгеновских лучей с веществом	89
2.5.5. Ослабление интенсивности пучка однородных рентгеновских лучей вследствие поглощения и рассеяния ...	90
2.5.6. Ослабление пучка неоднородных лучей	94
2.6. Рентгеновские установки – источники излучения	96
2.6.1. Рентгеновские трубки	96
2.6.2. Ускорители заряженных частиц	102
2.6.2.1. Линейный ускоритель	102
2.6.2.2. Циклические ускорители	105
2.7. Регистрация рентгеновского изображения	114
2.7.1. Фотографическая регистрация	114
2.7.2. Электронно-оптические преобразователи или регистраторы	118
2.7.3. Приборы с зарядовой связью (ПЗС-камеры)	120
2.7.4. ADC-регистрация	122
2.8. Рентгенографический метод во взрывных экспериментах	124
2.8.1. Постановка и этапы проведения рентгенографических экспериментов	124
2.8.2. Некоторые направления исследований быстропротекающих процессов методом импульсной рентгенографии	126
2.9. Импульсный рентгеноструктурный анализ	132
Список литературы к главе 2	136
Глава 3. Протонография	138
3.1. Протонография и рентгенография	138

Глава 4. Лазерная

3.2. Взаимн	3.2.1. 3
	3.2.2. 6
3.3. Характ	3.3.1. 1
высоки	3.3.2. 1
	3.3.3. 6
3.4. Физич	3.4.1. 1
	3.4.2. 1
3.5. Прото	3.5.1. 1
быстр	3.5.2. 1
	3.5.3. 1
	3.6. 1
	3.6.1. 1
	3.6.2. 1
	3.6.3. 1
	3.6.4. 1
	3.6.5. 1
Список	
4.1. Физич	4.1.1. 1
	4.1.2. 1
	4.1.3. 5
	4.1.4. 5
4.2. Метод	
4.3. Лазерн	4.3.1. 1

.....	75
.....	77
учения	78
.....	78
.....	79
бки	80
о излучения	80
.....	80
.....	81
сивности	81
.....	82
юм	85
.....	86
птона	87
.....	88
.....	89
рассеяния ...	90
.....	94
.....	96
.....	96
.....	102
.....	102
.....	105
.....	114
.....	114
.....	118
.....	120
.....	122
ентах	124
.....	124
протекающих	124
ии	126
.....	132
.....	136
.....	138
.....	138

3.2. Взаимодействие заряженных частиц с веществом	140
3.2.1. Характеристики излучений и их прохождение через вещество	140
3.2.2. Особенности взаимодействия протонов с веществом	141
3.3. Характерные типы взаимодействия протонов высокой энергии с веществом	142
3.3.1. Ионизационные потери	142
3.3.2. Многократное кулоновское рассеяние	145
3.3.3. Ослабление потока протонов из-за ядерного взаимодействия	149
3.4. Физические основы ускорения протонов	152
3.4.1. Источники заряженных частиц	152
3.4.2. Принцип действия ускорителя протонов	153
3.5. Протонографическая регистрация быстропротекающих процессов	158
3.5.1. Ускоритель протонов У-70	158
3.5.2. Протонографический комплекс ПРГК	162
3.5.3. Аппаратура ПРГК для проведения взрывных опытов и регистрации изображений	164
3.5.3.1. Размещение измерительной аппаратуры	164
3.5.3.2. Система регистрации протонографических изображений	165
3.5.3.3. Защитные устройства	166
3.6. Эксперименты ИФВ на ускорителе У-70	167
3.6.1. Исследования процесса обжатия металлических шаров сходящимися сферическими ударными волнами	167
3.6.2. Исследования механизма формирования кумулятивной струи и динамики ее взаимодействия с различными преградами	169
3.6.3. Исследование развития неустойчивости Рэлея – Тейлора	171
3.6.4. Развитие возмущений при схождении цилиндрической оболочки	173
3.6.5. Исследование ударно-волнового инициирования и распространения детонации в конденсированных ВВ	174
Список литературы к главе 3	176
Глава 4. Лазерная диагностика	178
4.1. Физические процессы в лазерных измерительных системах	178
4.1.1. Волновые процессы	178
4.1.2. Интерференция	179
4.1.3. Эффект Доплера	182
4.1.4. Лазерное излучение	182
4.2. Метод лазерного измерения волновых скоростей	185
4.3. Лазерные доплеровские измерительные системы	187
4.3.1. Интерферометр смещения	188

4.3.2. Лазерный дифференциальный интерферометр	189	
4.3.3. Оптически-симметричные интерферометры <i>VISAR</i> и <i>ORVIS</i>	192	6.2.2.1
4.3.4. Лазерный интерферометр Фабри – Перо	196	6.2.3.1
4.3.5. Лазерный гетеродин-интерферометр	200	6.2.4.1
4.3.6. Генератор зондирующего излучения	206	6.2.5.1
4.4. Особенности регистрации скорости контактной границы	208	6.2.6.1
4.5. Многоканальные интерферометрические системы	211	6.3. Скорос
4.6. Применение лазерных интерферометрических систем в ударно-волновых исследованиях	215	
Список литературы к главе 4	217	
Глава 5. Микроволновая диагностика	218	
5.1. Физические основы микроволновой интерферометрии	219	
5.2. Принцип работы радиоинтерферометра. Экспериментальное оборудование	228	Список 6.4. Измер
5.3. Основные результаты экспериментальных исследований с применением микроволнового метода	234	6.4.1.1
5.3.1. Исследование процессов метания металлических ударников продуктами взрыва	234	6.4.2.1 6.4.3.1
5.3.2. Исследование распространения детонации в зарядах взрывчатых веществ	236	Список
5.3.3. Исследование процессов ударно-волнового инициирования взрывчатых веществ	237	6.5. Метод с испо
5.3.4. Исследование адиабатического (изэнтропического) расширения продуктов взрыва	240	6.5.1.1 6.5.2.1
5.3.5. Исследование ударно-волновой сжимаемости диэлектриков	244	6.6. Дифра Список
5.3.6. Исследование процессов горения	246	
5.3.7. Исследование процессов разгона ударников в ствольных системах	248	
5.3.8. Исследование динамики конструкций	249	
Список литературы к главе 5	251	
Глава 6. Исследования с использованием синхротронного излучения	255	
6.1. Сведения о синхротронном излучении	255	
6.1.1. Синхротронные источники рентгеновского излучения и детекторы для его регистрации	255	
6.1.2. Экспериментальная станция для исследования взрывных процессов на накопителе ВЭПП-3	259	
Список литературы к разделу 6.1	268	
6.2. Измерение распределения плотности за фронтом детонации зарядов ВВ	270	
6.2.1. Постановка экспериментов	270	

.....	189
ISAR	.....192
.....	196
.....	200
.....	206
ницы	.....208
.....	211
эм	.....215
.....	217
.....	218
ии	.....219
.....	228
заний	.....234
их ударников	.....234
арядах	.....236
ицирования	.....237
ского)	.....240
1	.....244
.....	246
.....	248
.....	249
.....	251
излучения	.....255
.....	255
излучения	.....255
ия	.....259
.....	268
.....	270
.....	270

6.2.2. Результаты измерений распределения проходящего излучения	.....272
6.2.3. Восстановление массы вещества вдоль луча СИ	.....273
6.2.4. Измерение кривизны фронта детонации	.....275
6.2.5. Восстановление распределения плотности на фронте детонации	.....278
6.2.6. Оценка точности методики	.....280
6.3. Скоростная томография плотности, скорости и давления	.....281
6.3.1. Схема эксперимента	.....281
6.3.2. Томография плотности	.....284
6.3.3. Пространственное распределение плотности ПВ, скорости и давления за фронтом детонационной волны	.....287
6.3.4. Заключение	.....290
Список литературы к разделам 6.2, 6.3	.....290
6.4. Измерение малоуглового рентгеновского рассеяния	.....291
6.4.1. Малоугловое рентгеновское рассеяние на наночастицах	.....292
6.4.2. Постановка экспериментов	.....297
6.4.3. Результаты измерений малоуглового рентгеновского рассеяния	.....298
Список литературы к разделу 6.4	.....304
6.5. Методы рентгеновской микроскопии и микротомографии с использованием синхротронного излучения	.....305
6.5.1. Рентгеновская микроскопия	.....306
6.5.2. Рентгеновская микротомография	.....308
6.6. Дифракционные методики	.....312
Список литературы к разделу 6.6	.....316