

Акимов Ю. К.

Л39 Фотонные методы регистрации излучений. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — Дубна: ОИЯИ, 2014. — 323 с., ил.

ISBN 978-5-9530-0380-3

Рассмотрены процессы образования сигналов в сцинтилляционных и черенковских счетчиках, свойства вакуумных, твердотельных и газовых фотоприемников, характеристики органических и неорганических сцинтилляторов, вопросы построения различного рода детекторов для измерения энергии и идентификации излучений, временного и пространственного анализа событий. Приведены примеры реализации таких детекторов для экспериментов на ускорителях и с космическими излучениями.

Книга рассчитана на студентов и аспирантов, изучающих современные методы регистрации частиц, а также на научных работников и инженеров, разрабатывающих или эксплуатирующих аппаратуру для регистрации ядерных излучений.

УДК 539.1.074

ББК 22.381.5

© Объединенный институт ядерных

ISBN 978-5-9530-0380-3

исследований, 2014

Оглавление

Предисловие	7
Обозначения основных характеристик детекторов	8
Принятые сокращения	9
Введение	10
Глава 1. Формирование сигнала в счетчике с вакуумным ФЭУ ..	12
1.1. Структура ФЭУ	12
1.2. Источники световых сигналов	13
1.2.1. Механизм люминесценции в NaI(Tl) (13). 1.2.2. Механизм люминесценции в органических сцинтилляторах (15). 1.2.3. Черенковское излучение (17).	
1.3. Трансформация энергии, поглощенной в сцинтилляционном счетчике, в электрический сигнал	19
1.4. Статистика при формировании сигнала в ФЭУ	21
1.5. Амплитудные свойства ФЭУ	22
1.5.1. Влияние магнитного поля (23). 1.5.2. Влияние температуры (24).	
1.6. Временные свойства ФЭУ	25
1.7. Шумы	26
1.8. Послеимпульсы	27
Приложения к главе 1	30
Глава 2. Разновидности ФЭУ и их характеристики	33
2.1. Определения чувствительности фотокатодов	33
2.2. Спектральные характеристики различных типов фотокатодов	34
2.3. Коэффициент сбора фотоэлектронов	40
2.4. Неоднородность фотокатодов	41
2.5. Амплитудные спектры ФЭУ	41
2.6. Фотоприемники с пониженной чувствительностью к магнитному полю	44
2.7. Радиационная стойкость ФЭУ	46
2.8. Миниатюризация ФЭУ	46
2.9. ФЭУ с микроканальными пластинами	47
Приложение к главе 2	51
Глава 3. Передача света на фотокатод	52
3.1. Полное внутреннее отражение	52
3.2. Потери света на границах сред с разными показателями преломления	54
3.3. Способы увеличения чувствительности ФЭУ	56
3.4. Смещение светового спектра	56
3.5. Отражающие поверхности	58
3.5.1. Зеркальное отражение (58). 3.5.2. Диффузное отражение (59). 3.5.3. Новые типы отражателей (59).	

Глава 4. Органические сцинтилляторы	61
4.1. Структура и характерные свойства	61
4.2. Тушение сцинтилляций	66
4.3. Влияние внешних факторов на световой выход пластмассовых сцинтилляторов	68
4.3.1. Температура (68). 4.3.2. Магнитное поле (68). 4.3.3. Старение (69). 4.3.4. Радиация (70).	
Приложения к главе 4	72
Глава 5. Световоды	74
5.1. Параллелепипед	74
5.2. Переход от узкой грани сцинтиллятора к круглому окну ФЭУ	75
5.3. Полые световоды	76
5.3.1. Сбор света из тонких сцинтилляторов (76). 5.3.2. Конус Винстона (77).	
5.4. Спектрсмещающие световоды	77
5.5. Волоконная оптика	79
Приложения к главе 5	82
Глава 6. Счетчики с органическими сцинтилляторами	84
6.1. Телескоп	84
6.2. Идентификация заряженных частиц	86
6.3. Флуктуации ионизационных потерь	89
6.4. Детектирование нейтронов	90
6.5. Дейтерированные сцинтилляторы	93
Приложения к главе 6	94
Глава 7. Твердотельные фотодиоды	96
7.1. Кремниевые PIN-структуры	96
7.2. Дрейфовые фотодиоды	100
7.3. Фотодиоды на основе компаундных полупроводников	102
7.4. Энергетическое разрешение спектрометра с фотодиодом	102
7.5. Кремниевые лавинные фотодиоды	105
7.5.1. Влияние различных факторов на свойства ЛФД (110).	
7.5.2. Энергетическое разрешение (112). 7.5.3. Регистрация слабых световых вспышек (113).	
7.6. Сравнение характеристик твердотельных и вакуумных фотоприемников	114
Приложения к главе 7	115
Глава 8. Спектротрические счетчики на основе неорганических сцинтилляторов	117
8.1. Взаимодействие γ -излучения с веществом сцинтиллятора	117
8.2. Йодид натрия	119
8.3. Йодид цезия	123
8.4. Висмуты	128
8.4.1. Германат висмута (128). 8.4.2. Силикат висмута (130).	
8.5. Фториды	130
8.5.1. Фторид бария (130). 8.5.2. Фторид церия (132).	
8.6. Силикат гадолиния	132
8.7. Вольфрамат свинца	132
8.8. Сцинтилляторы с редкоземельными элементами	133
8.8.1. Силикат лютеция (135). 8.8.2. Кристаллы $\text{Lu}_2(\text{i}_j)\text{Y}_2\text{xSiO}_5$, активированные церием (136). 8.8.3. Алуминат лютеция (137). 8.8.4. Перовскит (138). 8.8.5. Кристаллы с наиболее высоким световым выходом (139).	
8.9. Предельное энергетическое разрешение	141

8.10. Максимально быстрый сцинтиллятор — оксид цинка	145
8.11. Радиационная стойкость 145	
8.12. Детекторы нейтронов 148	
8.13. Сцинтилляторы для поиска безнейтринного двойного β -распада . . .	150
Приложения к главе 8 152	
Глава 9. Разделение частиц по форме импульса	155
9.1. Форма импульса в органическом сцинтилляторе	155
9.2. Идентификация излучений счетчиками с неорганическими кристаллами 159	
9.2.1 . Йодиды натрия и цезия (159). 9.2.2. Фторид бария (163). 9.2.3. Другие кристаллы (164).	
9.3. Фосвич-детекторы	165
Глава 10. Позиционно-чувствительные детекторы	168
10.1. Вводные замечания	168
10.2. Вакуумные многоканальные ФЭУ	169
10.2.1. ФЭУ с микроканальными пластинами (171). 10.2.2. Трековые системы (172).	
10.3. Лавинные фотодиоды	173
10.4. Фотодиоды без внутреннего усиления	175
10.5. Гибридные фотодиоды	176
10.6. Счетчики видимых световых фотонов	181
10.7. Приборы с зарядовой связью	182
10.8. Кремниевые фотоэлектронные умножители	182
10.9. Сцинтилляционные счетчики с Si-ФЭУ	196
10.9.1. Пластмассовые сцинтилляторы (196). 10.9.2. Неорганические сцинтилляторы (199).	
10.10. Газовые фотодетекторы	201
10.10.1. Фоточувствительные газы (201). 10.10.2. Фотокатоды из CsI (202). 10.10.3. Газовые электронные умножители (202).	
Глава И. Сцинтилляционные детекторы полного поглощения . . .	206
11.1. Вводные замечания	206
11.2. Пространственная картина электромагнитных ливней	207
11.3. Электромагнитные калориметры на монокристаллах	208
11.3.1. Йодид натрия (208). 11.3.2. Йодид цезия (209). 11.3.3. Германат висмута (210). 11.3.4. Фторид бария (210). 11.3.5. Вольфрамат свинца (211).	
11.4. Электромагнитные калориметры на основе пластмассовых сцинтилляторов	214
11.5. Адронные калориметры	216
11.6. Использование кремниевых фотоэлектронных умножителей	222
Глава 12. Детекторы черенковского излучения	227
12.1. Черенковские радиаторы	227
12.2. Пороговые аэрогельные счетчики	231
12.3. RICH-детекторы	234
12.3.1. Детекторы с прямой фокусировкой (234). 12.3.2. Детекторы с обратной фокусировкой (237). 12.3.3. Детекторы полного внутреннего отражения (241).	
12.4. Калориметры	244
12.4.1. Детектирование электромагнитных ливней (244). 12.4.2. Сцинтилляционно-черенковские калориметры (245). 12.4.3. Калориметры с кварцевыми волокнами (247).	

12.5. Установки для «неускорительной» физики	248
12.5.1. Поиск осцилляций нейтрино (248). 12.5.2. Регистрация космических лучей (250). 12.5.3. Нейтринная астрономия (252).	
12.6. Фотоприемники	256
12.6.1. ФЭУ с большим фотокатодом (256). 12.6.2. Античеренковский ФЭУ (258). 12.6.3. Многоканальный лавинный фотодиод (259). 12.6.4. Гибридные фотодиоды (259). 12.6.5. Кремниевые ФЭУ (261).	
Глава 13. Временная спектрометрия	264
13.1. Длительность световых сигналов	264
13.2. Временные флуктуации в ФЭУ	265
13.3. Временное разрешение	266
13.3.1. Вводные замечания (266). 13.3.2. Неорганические кристаллы (267). 13.3.3. Органические сцинтилляторы (268). 13.3.4. Счетчики с МКП-ФЭУ (268). 13.3.5. Счетчики с Si-ФЭУ (270). 13.3.6. Неорганические сцинтилляторы с быстрым откликом (270).	
13.4. Дискриминация со следящим порогом	271
13.5. Протяженные сцинтилляторы	272
13.6. Варианты многоканальных времяпролетных детекторов	274
13.7. Использование фотодиодов	275
Приложение к главе 13	276
Примечания	277
Список литературы	281

Предисловие

В предлагаемой книге рассматриваются свойства и области применения сцинтилляционных и черенковских детекторов в фундаментальных и прикладных исследованиях. Первое издание книги вышло в свет в 2006 г. С того времени в области таких детекторов появилось много новых разработок. В настоящем, втором, издании книги сделана попытка отразить последние достижения в этой области, что потребовало основательной переработки большинства глав с сокращением части прежнего и дополнением нового материала.

В основу книги положен курс лекций, которые автор читал студентам в дубненском филиале НИИЯФ МГУ. При работе над книгой ее автор ставил перед собой двойную задачу. Материал книги предназначается ивк для начинающих изучать методы регистрации излучений, так и для более подготовленных читателей, для которых была бы полезной систематизация и обобщение многочисленных публикаций по сцинтилляционным и черенковским детекторам, появившихся в последние годы. Поэтому в книге рассмотрены как основные принципы построения этих детекторов, так и современное состояние в области их разработок и применений.

Автор выражает искреннюю признательность профессору А. Г. Ольшевскому за поддержку издания настоящей монографии.