



Издательский Дом
ИНТЕЛЛЕКТ

И.М. ОБODOVСКИЙ

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

И.М. ОБODOVCKИЙ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



ДОЛГОПРУДНЫЙ
2014

И.М. Ободовский

Физические основы радиационных технологий: Учебное пособие / И.М. Ободовский – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2014. – 352 с.

ISBN 978-5-91559-172-0

Совокупность разнообразных методов воздействия ионизирующих излучений на вещество объединяется общим наименованием «радиационные технологии».

Разнообразие задач, в которых приходится иметь дело с ионизирующими излучениями, наличие целого набора видов излучений, сложный характер взаимодействия излучения с веществом, сильная зависимость отклика от энергии излучения и его вида приводят к тому, что в зависимости от задачи вопросы, касающиеся радиационных технологий, разбросаны по различным ящикам традиционной рубрики науки.

В учебном пособии подробно анализируются элементарные процессы преобразования энергии ионизирующего излучения в веществе, послужившие основой таких наук как радиационная физика, радиационная химия, радиационная биология, радиационное материаловедение и ряда других направлений.

Целью книги является изложение принципов, лежащих в основе способов воздействия излучений на вещество.

Руководство предназначено для студентов, аспирантов и преподавателей инженерно-физических и технических специальностей, для инженеров и специалистов различных отраслей промышленности, использующих ионизирующие излучения в своей работе или пользующихся результатом таких воздействий.

ISBN 978-5-91559-172-0

© 2014, И.М. Ободовский

© 2014, ООО «Издательский Дом
«Интеллект», оригинал-макет,
оформление

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	11
Глава 1	
ЯДЕРНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ	15
1.1. Строение ядра	15
1.1.1. Нуклоны	15
1.1.2. Удельная энергия связи ядра	16
1.1.3. Уровни энергии ядер. Возбужденные состояния	19
1.2. Радиоактивный распад	20
1.2.1. Виды радиоактивного распада	20
1.2.2. Энергетическая диаграмма распада	22
1.2.3. Изомеры	25
1.2.4. Внутренняя конверсия	26
1.2.5. Закон радиоактивного распада	27
1.2.6. Семейство изобар	29
1.2.7. Радиоактивные семейства	30
1.2.8. Сводка основных радионуклидных источников	31
1.3. Рентгеновское и синхротронное излучения	36
1.3.1. Характеристическое рентгеновское излучение	36
1.3.2. Тормозное излучение	38
1.3.3. Синхротронное излучение	39



Глава 2

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЯ ЧАСТИЦ.

СЕЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	43
2.1. Понятие сечения	43
2.2. Телесный угол	44
2.3. Дифференциальное сечение	46
2.4. Расходимость полного сечения	48
2.5. Сечение по энергии	49
2.6. Сечение отдачи, сечение передачи энергии, парциальное сечение	50
2.7. Среднее сечение	51
2.8. Число частиц, прошедших «толстую» мишень без столкновения	51
2.9. Число частиц, рассеянных в толстой мишени	52
2.10. Средний путь частицы до столкновения (средний свободный пробег)	53
2.11. Сечение передачи импульса	54
2.12. Классическое определение сечения. Прицельное расстояние	55
2.13. Квантовое определение сечения	57
2.14. Некоторые константы размерности длины, использующиеся при вычислении сечений	61
2.14.1. Радиус первой борновской орбиты	61
2.14.2. Классический радиус электрона	62
2.14.3. Комптоновская длина волны частицы	62

Глава 3

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЯ ЧАСТИЦ

3.1. Законы сохранения и системы координат	64
3.2. Анализ столкновений в ЛСК	66
3.3. Анализ столкновений в СЦИ	69
3.4. Соотношения между углами и энергией частиц	74
3.5. Сводка основных формул	76



3.6. Потенциалы взаимодействия	78
3.6.1. Модельные потенциалы	79
3.6.2. Экранированные потенциалы	79
3.6.3. Комбинированные потенциалы	80
3.6.4. Изменение действующего потенциала с изменением энергии частицы	81
3.6.5. Центробежный потенциал	82
3.7. Столкновения твердых шаров	90
3.8. Кулоновские столкновения	96
3.9. Релятивистские соотношения	101

Глава 4

СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОННЫХ УРОВНЕЙ АТОМА	104
4.1. Особенности процессов в микромире	104
4.2. О соотношении классического и квантового описаний	106
4.3. Модель атома Бора	108
4.4. Электронные оболочки и подоболочки	109
4.5. Заполнение оболочек (построение таблицы Менделеева)	115
4.6. Разбиение оболочек на подоболочки	117
4.7. Переходы между уровнями	117

Глава 5

СТРОЕНИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ УРОВНИ МОЛЕКУЛ	120
5.1. Силы отталкивания	120
5.2. Виды связи	121
5.3. Ковалентная связь	122
5.4. Донорно-акцепторный механизм образования связи	123
5.5. Виды движений молекулы	124
5.6. Колебания молекул. Классический и квантовый гармонические осцилляторы	124
5.7. Конфигурационные кривые. Принцип Франка—Кондона	126



5.8. Молекулярные орбитали	130
5.8.1. Сигма-, пи- и дельта-связи	130
5.8.2. Примеры образования МО двухатомных молекул	133
5.9. Основные особенности ковалентной связи	136
5.10. Электрический дипольный момент молекулы	137
5.11. Поляризуемость молекул	139
5.12. Энергия связи, длина связи, атомные радиусы	142
5.13. Геометрия ковалентных молекул, угол связи	145
5.14. Гибридизация атомных орбиталей	147
5.15. Классификация электронных состояний молекулы как целого	148
5.16. Классификация отдельных электронных состояний в молекуле	149
 Глава 6	
ЭЛЕМЕНТЫ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ	151
6.1. Распределение Максвелла	151
6.2. Уравнение Ван-дер-Ваальса	154
6.3. Некоторые параметры, характеризующие движение молекул в газе	158
 Глава 7	
СТРУКТУРА КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ	161
7.1. Электроотрицательность	161
7.2. Ионная связь	162
7.3. Металлическая связь	164
7.4. Межмолекулярное взаимодействие	166
7.4.1. Общая характеристика	166
7.4.2. Взаимодействие двух постоянных диполей (ориентационное взаимодействие, В. Кеезом, 1912)	168
7.4.3. Взаимодействие постоянного диполя с индуцированным диполем (индукционное взаимодействие, П. Дебай, 1920)	169
7.4.4. Взаимодействие двух наведенных диполей (дисперсионное взаимодействие, Ф. Лондон, 1930)	170
7.4.5. Взаимодействие иона с постоянным диполем	175
7.4.6. Взаимодействие иона с индуцированным диполем	176
7.4.7. Водородная связь	177



Глава 8

КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ	181
8.1. Кристаллическая решетка, элементарная ячейка	181
8.2. Зонная схема. Проводники, полупроводники, изоляторы	183
8.3. Электроны, дырки	185
8.4. Уровень Ферми	187
8.5. Закон дисперсии	189
8.6. Экситоны. Локальные энергетические уровни	191

Глава 9

ЖИДКОЕ И АМОРФНОЕ СОСТОЯНИЯ	194
9.1. Жидкости	194
9.2. Аморфные вещества. Стекла	197

Глава 10

ПРОХОЖДЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО	201
10.1. Ионизация и возбуждение атомов	201
10.2. Ионизация и возбуждение молекул	204
10.3. Сечение ионизации и возбуждения электронным ударом	208
10.4. Сечение ионизации и возбуждения тяжелыми ионами	212
10.5. Сечения фотоионизации и фотовозбуждения	214
10.6. Многократная ионизация и ионизация внутренних оболочек	216
10.6.1. Ионизация внутренних оболочек. Оже-эффект	216
10.6.2. Эффект Костера—Кронига	220
10.6.3. Каскад переходов	220
10.6.4. «Shake»-процессы	222
10.6.5. Вероятность ионизации внутренних оболочек заряженными частицами	225
10.6.6. Значение «взрыва» атома при ионизации внутренних оболочек	228
10.6.7. Многократная ионизация	229
10.7. Дельта-электроны	230
10.7.1. Максимальная энергия дельта-электронов	231
10.7.2. Спектр дельта-электронов	234



10.8. Удельные ионизационные потери энергии	236
10.8.1. Введение	236
10.8.2. Формула Бете—Блоха	237
10.8.3. Средняя энергия ионизации	239
10.8.4. Зависимость ионизационных потерь от свойств тормозящей среды	240
10.8.5. Зависимость ионизационных потерь от параметров налетающей частицы	242
10.8.6. Зависимость ионизационных потерь от энергии частицы	243
10.8.7. Линейная передача энергии (ЛПЭ)	246
10.8.8. Удельные потери энергии в сложном веществе. Правило Брэгга	247
10.8.9. О связи величин $\Delta E/\Delta x$ и dE/dx	249
10.9. Столкновения при малой энергии	251
10.9.1. Роль скорости частицы	251
10.9.2. Захват электронов бомбардирующей частицей	253
10.10. Удельная ионизация	257
10.11. Флуктуации потерь энергии	260
10.12. Однократное и многократное рассеяния частиц	265
10.12.1. Однократное рассеяние	265
10.12.2. Сечение многократного рассеяния	267
10.12.3. Средний квадратичный угол многократного рассеяния	269
10.13. Пробег частиц. Распределение ионизации по пробегу	272
10.13.1. Полный пробег	272
10.13.2. Флуктуации пробега	276
10.13.3. Практический пробег	276
10.13.4. Распределение ионизации по пробегу частицы	278
10.14. Радиационные потери энергии	282
10.15. Черенковское и переходное излучения	286
10.15.1. Черенковское излучение	286
10.15.2. Переходное излучение	289
10.16. Упругие столкновения заряженных частиц	290
10.16.1. Общие сведения об упругих столкновениях	290
10.16.2. Упругие столкновения электронов	291
10.17. Ядерные взаимодействия	294

**Глава 11****ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАММА-КВАНТОВ**

С ВЕЩЕСТВОМ	297
11.1. Сводка эффектов взаимодействия гамма-квантов	297
11.2. Фотоэффект	299
11.3. Рассеяние на свободных электронах (томсоновское рассеяние)	302
11.4. Комптон-эффект	304
11.4.1. Введение	304
11.4.2. Законы сохранения энергии и импульса	304
11.4.3. Дифференциальные сечения комптон-эффекта	306
11.4.4. Полные сечения комптон эффекта	311
11.4.5. Рассеяние на связанных электронах	312
11.5. Рассеяние на атомах (рэлеевское рассеяние)	313
11.6. Образование электрон-позитронных пар	315
11.7. Полное поглощение гамма-излучения	319
11.8. Фактор накопления	320

Глава 12**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕЙТРОНОВ С ВЕЩЕСТВОМ**

12.1. Свойства нейтронов	322
12.2. Источники нейтронов	323
12.3. Группы энергий нейтронов	324
12.4. Спектр тепловых нейтронов	325
12.5. Ядерные реакции под действием нейтронов	326
12.6. Резонансное взаимодействие. Формула Брейта—Вигнера	327
12.7. Реакция типа (n, γ)	329
12.8. Реакции типа (n, α) и (n, p)	330
12.9. Реакция типа (n, f) — реакция деления ядра. Свойства осколков деления	332
12.10. Реакции активации	335
12.11. Упругое рассеяние нейтронов	335
12.12. Волновые свойства нейтронов	338

Список литературы	339
Приложение	348
1. Основные физические константы	348
2. Единицы измерений	350