

В. А. Никеров

# Физика

Современный курс

*Учебник*

4-е издание

Допущено Научно-методическим советом по физике  
Министерства образования и науки Российской Федерации  
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по техническим направлениям подготовки  
и специальностям

Москва

Издательско-торговая корпорация «Дашков и К<sup>о</sup>»  
2019

**УДК 53**  
**ББК 22.3**  
**Н62**

**Рецензенты:**

Кафедра общей физики Ярославского государственного педагогического университета им. К. Д. Ушинского (зав. кафедрой доктор технических наук, профессор *П. Г. Штерн*).

Доктор физ.-мат. наук, профессор *В. Р. Никитенко* (Московский инженерно-физический институт).

**Никеров В. А.**

**Н62** Физика. Современный курс: Учебник / В. А. Никеров. — 4-е изд. — М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К<sup>о</sup>», 2019. — 452 с.

ISBN 978-5-394-03392-6

В учебнике последовательно изложены современные представления о механике и молекулярной физике, электродинамике и волновой оптике, квантовой физике. Курс является компактным, но при этом дает цельное представление об основных законах и понятиях современной физики, их взаимосвязи и происхождении. В рамках соответствия государственным образовательным стандартам дано представление о ряде существенных разделов и подходов современной физики.

Учебник подготовлен на основе курса лекций, прочитанных автором в Московском институте электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики».

Для студентов технических и иных вузов, а также для самоподготовки и повторения ранее изученного материала. Может быть использован также преподавателями для самообразования и подготовки к занятиям.

The textbook represents the modern view on the mechanics and molecular physics, electrodynamics and wave optics, and quantum physics. The course is compact, but it gives a complete picture of the basic modern physics laws and concepts including their origin and relationship. The key concepts and approaches of today's physics corresponding to the State educational standards are considered.

The textbook is based on the course of lectures given by the author at the Moscow Institute of Electronics and Mathematics of National Research University Higher School of Economics.

For students of technical and other universities, as well as for self-study and repetition of previously learned material. It may also be used by teachers for self-study and preparation for classes.

ISBN 978-5-394-03392-6

© Никеров В. А., 2013

© ООО «ИТК «Дашков и К<sup>о</sup>», 2013

# Содержание

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	15
<b>Часть 1. МЕХАНИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА</b> .....	17
1. Кинематика материальной точки .....	17
1.1. Механика и ее структура. Материальная точка и твердое тело .....	17
1.2. Перемещение и пройденный путь .....	19
1.3. Скорость, ускорение .....	20
1.4. Тангенциальное, нормальное и полное ускорения .....	22
2. Динамика материальной точки .....	23
2.1. Первый закон Ньютона .....	23
2.2. Второй закон Ньютона. Масса. Сила .....	24
2.3. Третий закон Ньютона .....	26
2.4. Закон сохранения импульса. Центр масс (инерции). Движение центра инерции .....	27
3. Работа и энергия .....	29
3.1. Работа силы. Мощность .....	29
3.2. Энергия. Кинетическая и потенциальная энергия. Консервативные и диссипативные системы .....	31
3.3. Связь силы и потенциальной энергии. Условие равновесия .....	32
3.4. Закон сохранения энергии .....	36
3.5. Упругое и неупругое соударение тел .....	38
4. Кинематика и динамика вращательного движения твердого тела .....	43
4.1. Кинематика твердого тела. Угловое перемещение, угловая скорость, угловое ускорение .....	43
4.2. Работа при вращательном движении. Момент силы .....	46
4.3. Кинетическая энергия при вращательном движении. Момент инерции .....	47

4.4. Теорема Штейнера.....	50
4.5. Уравнение динамики вращательного движения.....	52
4.6. Закон сохранения момента импульса.....	52
4.7. Аналогия между поступательным и вращательным движением.....	54
5. Гармонические и затухающие колебания.....	55
5.1. Гармонические колебания. Свободные колебания системы.....	55
5.2. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний и его решение.....	56
5.3. Затухающие колебания. Коэффициент затухания, декремент, логарифмический декремент, время релаксации.....	59
6. Сложение колебаний. Вынужденные колебания.....	62
6.1. Представления колебаний.....	62
6.2. Сложение колебаний одинаковой частоты и одинакового направления.....	63
6.3. Сложение колебаний близких частот. Битения.....	64
6.4. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний. Фигуры Лиссажу.....	65
6.5. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и его решение. Период и амплитуда вынужденных колебаний.....	66
6.6. Резонанс. Семейство резонансных кривых.....	70
7. Волны.....	72
7.1. Упругие волны. Продольные и поперечные волны.....	72
7.2. Уравнение плоской волны. Фазовая скорость.....	73
7.3. Волновое уравнение упругой волны и его решение.....	75
7.4. Плотность энергии упругой волны.....	78
7.5. Перенос энергии бегущей волной. Вектор Умова.....	80
7.6. Принцип суперпозиции при сложении волн. Стоячая волна. Колебания струны.....	81

8. Специальная теория относительности .....	83
8.1. Преобразования Галилея и постулаты специальной теории относительности .....	83
8.2. Преобразования Лоренца .....	85
8.3. Следствия СТО: замедление времени и сокращение длины .....	88
8.4. Импульс тела и основное уравнение релятивистской динамики .....	90
8.5. Кинетическая и полная энергии в СТО. Энергия покоя. Релятивистский инвариант .....	92
9. Молекулярно-кинетическая теория. Принципы классической статистической физики .....	94
9.1. Физические основы молекулярно-кинетической теории. Уравнение состояния идеального газа .....	94
9.2. Вывод основного уравнения молекулярно- кинетической теории .....	96
9.3. Элементы классической статистической физики. Функции распределения и их роль .....	98
10. Распределение Максвелла и характерные скорости молекул. Барометрическая формула. Распределение Больцмана .....	102
10.1. Распределение Максвелла по составляющим скорости .....	102
10.2. Распределение Максвелла по модулю скорости. Нахождение наиболее вероятной, средней, среднеквадратичной скоростей .....	105
10.3. Барометрическая формула .....	108
10.4. Распределение Больцмана .....	109
11. Элементы физической кинетики. Явления переноса в газах .....	111
11.1. Средняя длина пробега и частота столкновений молекул .....	111
11.2. Общий вид уравнения переноса .....	114

11.3. Диффузия и коэффициент диффузии .....	117
11.4. Теплопроводность и коэффициент теплопроводности .....	118
11.5. Вязкость и коэффициент вязкости .....	120
11.6. Броуновское движение и диффузия .....	121
11.7. Поглощение и рессеяние частиц. Закон Бугера- Ламберта. Транспортировка частиц через среды.....	124
12. Первое начало термодинамики .....	128
12.1. Первое начало термодинамики и закон сохранения энергии.....	128
12.2. Работа и теплота. Работа, совершаемая газом в различных изопроцессах .....	129
12.3. Внутренняя энергия идеального газа. Степени свободы молекул. Закон о равномерном распределении энергии по степеням свободы .....	131
12.4. Теплоемкость идеального газа при постоянном объеме и давлении. Уравнение Майера.....	133
12.5. Адиабатный процесс. Вывод уравнения адиабаты ....	136
13. Второе начало термодинамики. Энтропия .....	139
13.1. Формулировки второго начала термодинамики .....	139
13.2. КПД кругового процесса.....	140
13.3. Цикл Карно. КПД идеальной тепловой машины. Теоремы Карно .....	142
13.4. Энтропия. Изменение энтропии в процессах идеального газа. Энтропия и термодинамическая вероятность. Формула Больцмана .....	145
14. Реальные газы. Агрегатные состояния и фазовые переходы.....	148
14.1. Уравнение Ван-дер-Ваальса.....	148
14.2. Агрегатные состояния и фазовые переходы. Изотермы Ван-дер-Ваальса.....	150
14.3. Внутренняя энергия реального газа .....	152

## Часть II. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И ВОЛНОВАЯ ОПТИКА..... 154

15. Закон Кулона и электрическое поле .....	154
15.1. Закон Кулона .....	154
15.2. Электрическое поле и электрическое смещение .....	156
15.3. Принцип суперпозиции электрических полей.....	160
15.4. Электрический диполь. Поле диполя .....	161
16. Теорема Гаусса для электрического поля .....	164
16.1. Поток вектора напряженности электрического поля и электрического смещения .....	164
16.2. Теорема Гаусса в интегральной форме.....	165
16.3. Поле равномерно заряженной бесконечной плоскости и двух плоскостей .....	167
16.4. Поле равномерно заряженной бесконечной нити .....	169
16.5. Поле равномерно заряженной сферы .....	170
16.6. Поле равномерно заряженного шара .....	170
16.7. Теорема Гаусса в дифференциальной форме .....	172
17. Потенциал электростатического поля.....	173
17.1. Работа сил электростатического поля. Консервативность электростатических сил.....	173
17.2. Теорема о циркуляции вектора напряженности поля .	174
17.3. Определение потенциала электростатического поля..	175
17.4. Связь между потенциалом и напряженностью .....	177
17.5. Вычисление разности потенциалов для некоторых видов полей.....	179
18. Проводники в электростатическом поле.	
Конденсаторы и энергия электростатического поля .....	181
18.1. Проводники в электростатическом поле. Поле внутри и вне заряженного проводника .....	181
18.2. Электрическая емкость проводника .....	183
18.3. Конденсаторы .....	184
18.4. Энергия заряженного проводника и конденсатора. Плотность энергии электростатического поля .....	187

19. Диэлектрики в электрическом поле .....	190
19.1. Поляризация диэлектриков. Полярные и неполярные диэлектрики. Свободные и связанные заряды .....	190
19.2. Вектор поляризации, диэлектрическая восприимчивость и диэлектрическая проницаемость .....	192
19.3. Теорема Гаусса для поля в диэлектрике. Явления на границе раздела двух диэлектриков. Преломление линий смещения и напряженности.....	193
19.4. Сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, электреты. Явления на разломах .....	196
20. Постоянный ток. Законы Ома и Джоуля-Ленца .....	198
20.1. Постоянный ток. Виды тока. Сила тока. Плотность тока .....	198
20.2. Закон Ома в дифференциальной форме .....	200
20.3. Закон Ома в интегральной форме. Сопротивление ....	201
20.4. Сторонние силы. Электродвижущая сила. Обобщенный закон Ома.....	202
20.5. Работа и мощность тока. Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной и интегральной формах .....	203
21. Газовый разряд и плазма .....	204
21.1. Проводимость газов. Носители тока. Ионизация и рекомбинация. Несамостоятельный и самостоятельный газы .....	204
21.2. Вольт-амперная характеристика газового разряда. Ударная ионизация .....	207
21.3. Типы самостоятельных газовых разрядов .....	208
21.4. Понятие о плазме .....	212
22. Магнитное поле тока .....	214
22.1. Магнитное поле тока и его проявления. Вектор магнитной индукции и напряженности поля .....	214
22.2. Закон Био-Савара-Лапласа и его применение к расчету магнитных полей .....	218



22.3. Теорема о циркуляции вектора напряженности магнитного поля. Расчет поля соленоида и тороида...	221
22.4. Поток вектора магнитной индукции. Теорема Гаусса для магнитного поля в интегральной и дифференциальной формах.....	224
22.5. Действие магнитного поля на токи. Закон Ампера....	226
22.6. Действие магнитного поля на движущиеся заряды. Сила Лоренца. Движение заряженной частицы в однородном и неоднородном магнитном полях.....	227
23. Магнитное поле в веществе .....	229
23.1. Магнитный момент электронов и атомов. Намагниченность .....	229
23.2. Диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики.....	233
23.3. Условия на границе раздела двух магнетиков .....	237
24. Электромагнитная индукция .....	239
24.1. Основной закон электромагнитной индукции. Правило Ленца. Вихревое электрическое поле. Генераторы переменного тока.....	239
24.2. Самоиндукция. Индуктивность соленоида.....	241
24.3. Взаимоиндукция .....	243
24.4. Нестационарные процессы в цепи, содержащей индуктивность .....	245
24.5. Энергия магнитного поля. Плотность энергии магнитного поля .....	247
25. Уравнения Максвелла.....	249
25.1. Электромагнитное поле. Ток смещения. Уравнения Максвелла в интегральной форме .....	249
25.2. Уравнения Максвелла в дифференциальной форме ..	252
25.3. Закон сохранения заряда. Теорема Пойнтинга. Энергия электромагнитного поля. Вектор Умова-Пойнтинга .....	256
25.4. Волновое уравнение. Решения волнового уравнения. Интенсивность электромагнитной волны .....	259

25.5. Принцип работы радиоприемника. Шкала электромагнитных волн.....	262
26. Волновая оптика. Геометрическая оптика. Интерференция света .....	264
26.1. Волновая и геометрическая оптика. Четыре закона геометрической оптики.....	264
26.2. Интерференция света. Когерентность .....	267
26.3. Принцип Гюйгенса — Френеля. Расчет интерференционной картины двух источников.....	271
26.4. Интерференция в тонких пленках .....	274
27. Дифракция света.....	277
27.1. Метод зон Френеля. Дифракция на круглом отверстии и круглом диске.....	277
27.2. Дифракция в параллельных лучах от одной щели.....	281
27.3. Дифракционная решетка. Условия главных максимумов. Дисперсия и разрешающая способность решетки .....	283
27.4. Дифракция от объемных решеток .....	288
28. Поляризация света .....	289
28.1. Естественный и поляризованный свет. Поляризация света при отражении и преломлении. Закон Брюстера .....	289
28.2. Поляризационные приборы. Закон Малюса .....	291
28.3. Двойное лучепреломление. Поляризация света в одноосных кристаллах. Построения волновых поверхностей. Призма Николя .....	293
29. Дисперсия света .....	296
29.1. Нормальная и аномальная дисперсия.....	296
29.2. Электронная теория дисперсии .....	297
29.3. Анализ результатов электронной теории дисперсии.....	300
<b>Часть III. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА.....</b>	<b>302</b>
30. Квантовая природа света. Давление света. Фотоэффект и эффект Комптона.....	302

30.1. Квантовая природа света. Фотоны .....	302
30.2. Давление света .....	304
30.3. Фотоэффект. Уравнение Эйнштейна .....	306
30.4. Эффект Комптона .....	309
31. Тепловое излучение .....	311
31.1. Равновесное излучение. Лучеиспускательная и лучепоглощательная способность. Черное и серое тело .....	311
31.2. Закон Кирхгофа .....	314
31.3. Закон Стефана-Больцмана .....	316
31.4. Закон смещения Вина .....	316
31.5. Формула Рэлея-Джинса .....	318
31.6. Квантовая гипотеза и закон Планка. Связь закона Планка и законов излучения абсолютно черного тела .....	320
32. Планетарная модель атома и спектры .....	322
32.1. Опыты Резерфорда. Классическая модель атома .....	322
32.2. Постулаты Бора и их следствия .....	324
32.3. Дискретность энергетических уровней в атоме и происхождение линейчатых спектров. Опыты Франка и Герца .....	326
32.4. Спектры атома водорода и водородоподобных ионов. Недостатки теории Бора .....	328
33. Волны де Бройля и волновая функция .....	330
33.1. Гипотеза де Бройля и ее экспериментальное подтверждение .....	330
33.2. Свойства волн де Бройля: фазовая и групповая скорости, дисперсия .....	332
33.3. Волны де Бройля и квантовые условия Бора. Частицы, проявляющие волновые свойства .....	334
33.4. Вероятность местонахождения микрочастицы. Волновая функция. Нормировка и ограничения на волновые функции. Принцип суперпозиции. Средние значения координат .....	336

33.5. Соотношение неопределенностей для координаты и импульса .....	339
33.6. Соотношение неопределенностей для времени и энергии. Принцип соответствия .....	342
34. Уравнение Шредингера .....	345
34.1. Уравнение Шредингера для свободной частицы.....	345
34.2. Общее уравнение Шредингера.....	346
34.3. Стационарное уравнение Шредингера .....	347
34.4. Уравнения Шредингера в операторной форме. Оператор Гамильтона .....	349
34.5. Связь классической и квантовой механики. Теорема Эренфеста .....	350
34.6. Решение уравнения Шредингера для свободной частицы .....	352
35. Потенциальный ящик и потенциальный барьер.....	353
35.1. Потенциальный ящик: уравнение Шредингера, граничные условия, волновые функции, энергия и вероятность местонахождения частицы .....	353
35.2. Потенциальный барьер бесконечной ширины. Уравнение Шредингера и его решение для случаев $E < U$ , $E > U$ .....	357
35.3. Потенциальный барьер конечной ширины. Случаи $E > U$ , $E < U$ .....	363
35.4. Туннельный эффект. Коэффициенты прозрачности и отражения .....	365
36. Гармонический осциллятор .....	368
36.1. Потенциальная яма .....	368
36.2. Исходная классическая теория гармонического осциллятора .....	370
36.3. Квантовая теория гармонического осциллятора.....	372
36.4. Волновые функции и энергетические уровни квантового осциллятора .....	375
37. Квантовая теория водородоподобного атома.....	377

37.1. Уравнение Шредингера для электрона в водородоподобном атоме .....	377
37.2. Квантовые числа. Возбужденные состояния электрона в водородоподобном атоме и спектры .....	379
37.3. Спин электрона. Кратность вырождения уровней водородоподобных атомов .....	381
37.4. 1s-состояние атома водорода .....	382
37.5. Спин-орбитальное взаимодействие. Эффекты Зеемана и Штарка .....	384
38. Квантовая теория многоэлектронных атомов .....	386
38.1. Принцип неразличимости тождественных частиц. Фермионы и бозоны .....	386
38.2. Принцип Паули .....	388
38.3. Строение многоэлектронных атомов .....	389
38.4. Рентгеновские спектры .....	391
39. Квантовая теория молекул .....	394
39.1. Гетерополярная и гомеополярная связи. Обменное взаимодействие .....	394
39.2. Образование молекул .....	395
39.3. Колебательная и вращательная энергия молекул .....	397
40. Элементы физики твердого тела .....	400
40.1. Качественное обоснование зонной теории. Адиабатное приближение. Одноэлектронное приближение. Самосогласованное поле .....	400
40.2. Уравнение Шредингера для кристаллов. Теорема Блоха и туннелирование .....	402
40.3. Решение уравнения Шредингера в приближении слабой связи .....	403
40.4. Зоны Бриллюэна и эффективная масса электрона .....	406
40.5. Приближение сильной связи .....	409
40.6. Металлы, диэлектрики, полупроводники по зонной теории .....	410
41. Строение атомного ядра. Радиоактивность .....	412

41.1. Заряд, масса, радиус, спин, квантовый характер ядра.....	412
41.2. Удельная энергия связи ядер разных элементов. Модели ядра.....	415
41.3. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада .....	418
41.4. $\alpha$ -распад, $\beta$ -распад. Нейтрино .....	420
41.5. $\gamma$ -излучение и его свойства.....	423
41.6. Искусственная радиоактивность .....	426
41.7. Регистрация и дозы радиоактивных излучений.....	429
42. Современная физическая картина мира .....	431
42.1. Космические лучи .....	431
42.2. Четыре вида фундаментальных взаимодействий.....	433
42.3. Элементарные и фундаментальные частицы. Кварки.	435
42.4. Эволюция Вселенной .....	437
<b>Физические константы и величины .....</b>	<b>440</b>
<b>Предметный указатель .....</b>	<b>441</b>