

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^о»
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^о», 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^о», 2013

Содержание

| | |
|---|----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ | 15 |
| Часть 1. МЕХАНИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА | 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. Биения..... | 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 и газоразряды | 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 |
| Часть III. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА..... | 302 |
| 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 Рэля-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. α -распад, β -распад. Нейтрино | 420 |
| 41.5. γ -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 |
| Физические константы и величины | 440 |
| Предметный указатель | 441 |