



В. И. ЯКОВЛЕВ

КЛАССИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

II

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
ВОЛНЫ.
ЧЕТЫРЕХМЕРНАЯ
ЭЛЕКТРОДИНАМИКА



«Инфра-Инженерия»

В. И. Яковлев

КЛАССИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ.
ЧЕТЫРЕХМЕРНАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА**

Учебное пособие

Издание второе, исправленное и дополненное

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2023

УДК 537+538
ББК 22.313
Я47

Рецензент:

д. ф.-м. н., заведующий кафедрой общей физики Новосибирского государственного университета *А. Г. Погосов*

Яковлев, В. И.

Я47 Классическая электродинамика. Электромагнитные волны. Четырёхмерная электродинамика : учебное пособие / В. И. Яковлев. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 484 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-1301-5

Рассмотрены вопросы возникновения и распространения электромагнитных волн как в свободном пространстве, так и при наличии простейших ограничивающих поверхностей. Приводятся интерференция и дифракция электромагнитной волны, а также прохождение волны через материальную среду и происхождение рассеянной волны. Содержится релятивистское описание электродинамики и излучение релятивистских зарядов.

Для студентов технических специальностей с углублённым изучением физики и математики, а также инженерно-технических работников.

УДК 537+538
ББК 22.313

ISBN 978-5-9729-1301-5 © Яковлев В. И., 2023
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2023
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2023

Оглавление

Предисловие	9
ГЛАВА 7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ	11
7.1. Свободное электромагнитное поле. Волновое уравнение	11
7.2. Плоские волны. Основные соотношения	13
7.3. Пример плоской волны	16
7.4. Уравнения Максвелла для монохроматических процессов	20
7.5. Монохроматическая плоская волна: поля, волновой вектор, фазовая скорость	23
7.6. Монохроматическая плоская волна: поляризация	25
7.7. Отражение и преломление электромагнитной волны на границе раздела двух сред	31
7.8. Формулы Френеля	34
7.9. Характерные особенности процесса отражения-преломления	37
7.10. Просветление оптики. О диэлектрических зеркалах	42
7.11. Предварительно о монохроматической сферической волне	49
7.12. Задачи к главе 7	51
ГЛАВА 8. ФУРЬЕ-РАЗЛОЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО- ГО ПОЛЯ	53
8.1. Формулы преобразования Фурье	54
8.2. Некоторые характерные случаи фурье-преобразования .	58

8.3.	Соотношение неопределённости	63
8.4.	О физическом содержании соотношения неопределённости	72
8.5.	Спектр случайного процесса	75
8.6.	Преобразования Фурье для функций четырёх переменных. Уравнения Максвелла в фурье-представлении	79
8.7.	Задачи к главе 8	86
ГЛАВА 9. ДИСПЕРСИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН		89
9.1.	Краткий обзор электромагнитных свойств различных сред и их механизмов дисперсии	90
9.2.	Классическая электронная теория дисперсии	92
9.3.	Дисперсия и волновой пакет	97
9.4.	Метод стационарной фазы	107
9.5.	О затухании и усилении электромагнитной волны в среде	110
9.6.	Задачи к главе 9	114
ГЛАВА 10. СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ. РЕЗОНАТОРЫ. ВОЛНОВОДЫ		116
10.1.	Стоячие волны	117
10.2.	Стоячие волны при отражении от стенки конечной проводимости	119
10.3.	Два примера электромагнитных волн в ограниченных областях	123
10.4.	Резонаторы	125
10.5.	Вынужденные колебания полей в щелевом резонаторе с потерями	131
10.6.	Волноводы	136
10.7.	Волновод с прямоугольным поперечным сечением	140
10.8.	ТЕМ-волны	145
10.9.	Задачи к главе 10	148
ГЛАВА 11. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА		152
11.1.	Вводные замечания	152
11.2.	Уравнение эйконала	154
11.3.	Пример прохождения волны в неоднородное полупространство	158
11.4.	Второе приближение геометрической оптики для конкретного примера	161

11.5. Световые лучи	162
11.6. Примеры применения уравнения луча	168
11.7. Принцип Ферма	172
11.8. Гомоцентричность и астигматизм оптического пучка. Фокальные линии	175
11.9. Мнимое изображение, создаваемое тонкой призмой	180
11.10. Преломление луча на сферической поверхности. Параксиальное приближение	183
11.11. О критерии параксиальности	190
11.12. Центрированные оптические системы	195
11.13. Тонкая линза	199
11.14. Кардинальные элементы оптической системы	202
11.15. Оптическая система глаза	208
11.16. Оптические инструменты, вооружающие глаз	211
ГЛАВА 12. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН	216
12.1. О природе интерференции	217
12.2. Интерференция монохроматического света	218
12.3. Первый шаг в сторону от монохроматической идеализации	227
12.4. Квазимонохроматичность и когерентность	229
12.5. Опыт Юнга. Качественное рассмотрение. Продольный размер когерентности	234
12.6. Опыт Юнга. Количественный анализ	237
12.7. Влияние размеров источника на интерференционные явления. Поперечный размер когерентности	240
12.8. Корреляционная функция стационарного случайного волнового поля и её роль в явлении интерференции	246
12.9. Апертура интерференции и условие применимости протяжённого источника	253
12.10. Интерференция на тонкой плёнке. Локализация интерференционных полос	255
12.11. Задачи к главе 12	267
ГЛАВА 13. ДИФРАКЦИЯ	273
13.1. Введение	273
13.2. Математическая постановка задачи дифракции и приближённые граничные условия Кирхгофа	275

13.3. Решение задачи дифракции методом разложения на плоские волны	278
13.4. Принцип Гюйгенса-Френеля. Интеграл Кирхгофа	282
13.5. Зоны Френеля. Зонная пластинка	290
13.6. Вывод интеграла Кирхгофа	295
13.7. Интеграл Кирхгофа для цилиндрических волн	301
13.8. Приближения Френеля и Фраунгофера	303
13.9. Примеры дифракционных картин Фраунгофера	307
13.10. Пример дифракционной картины Френеля	311
13.11. Дифракционные решётки	319
13.12. Дифракционная решётка как спектральный прибор . . .	327
13.13. Интерферометр Фабри-Перо	329
13.14. Задачи к главе 13	335

ГЛАВА 14. ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

339

14.1. Волновое уравнение для скалярного и векторного потенциалов	339
14.2. Запаздывающие потенциалы	340
14.3. Мультипольное разложение для запаздывающих потенциалов	343
14.4. Примеры электромагнитных полей от гармонических источников	348
14.5. Дипольное излучение	352
14.6. Магнитно-дипольное и квадрупольное излучения	358
14.7. Излучение антенны	362
14.8. Интерференционный способ управления диаграммой направленности антенн	366
14.9. О физическом механизме возникновения показателя преломления электромагнитных волн	375
14.10. Рассеяние электромагнитных волн	379
14.11. Рассеяние свободными зарядами	381
14.12. Задачи к главе 14	386

ГЛАВА 15. СФЕРИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ	391
15.1. Введение	392
15.2. Электромагнитные мультипольные поля (осесимметричный случай)	393
15.3. Сферическая стоячая волна. Сферический резонатор	398
15.4. Замкнутая задача излучения антенны	400
ГЛАВА 16. СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И ЭЛЕКТРОДИНАМИКА	408
16.1. Постулаты Эйнштейна. Инвариантность интервала. Преобразование Лоренца	409
16.2. Четырёхмерное пространство Минковского. Четырёхмерные тензоры	411
16.3. Метрический тензор	417
16.4. Ковариантность уравнений электродинамики	419
16.5. Поле равномерно движущегося заряда	421
16.6. Тензор электромагнитного поля. Ковариантный вид уравнений Максвелла	422
16.7. Ковариантная форма уравнения движения материальной точки	424
16.8. Преобразование Лоренца для поля	427
16.9. Инварианты поля	429
16.10. Ковариантность выражения для силы Лоренца и законов сохранения	431
16.11. Четырёхмерный волновой вектор. Эффект Доплера	436
ГЛАВА 17. ИЗЛУЧЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЗАРЯДОВ 439	
17.1. Потенциалы Лиенара-Вихерта	439
17.2. Поля движущегося заряда	442
17.3. Четырёхвектор энергии-импульса излучения релятивистской частицы	448
17.4. Угловое распределение излучения	453
17.5. Физический смысл мощности излучения	456
17.6. Торможение излучением	458
17.7. Сила торможения и баланс энергии-импульса при излучении	464

17.8. Сила торможения излучением для заряда, движущегося в заданном электромагнитном поле	468
17.9. Излучение заряда, движущегося в однородном электри- ческом поле при $\mathbf{v} \parallel \mathbf{E}$	470
17.10. Синхротронное излучение	474
Библиографический список	481