

А. Д. ГРИГОРЬЕВ

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

И ТЕХНИКА

СВЧ



А. Д. ГРИГОРЬЕВ

**БИБЛИОТЕКА
ВОЙЦЕХОВСКОГО Б.В**

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА и техника СВЧ

Допущено
Государственным комитетом СССР
по народному образованию в качестве
учебника для студентов вузов,
обучающихся по специальности
«Электронные приборы и устройства»



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1990

ББК 32.851.1
Г83
УДК 621.38

Рецензенты: кафедра «Электронные приборы» Московского энергетического института (зав. кафедрой — доц. В. С. Буряк), д-р техн. наук Р. А. Силин

Григорьев А. Д.

Г83 Электродинамика и техника СВЧ: Учеб. для вузов по спец. «Электронные приборы и устройства». — М.: Высш. шк., 1990 — 335 с.: ил.
ISBN 5-06-000685-9

В книге изложены основы классической электродинамики, электродинамики элементов СВЧ-тракта и теории цепей СВЧ, рассмотрены основные типы устройств СВЧ. Большое внимание уделено анализу электродинамических систем электронных приборов и ускорителей заряженных частиц — многопроводных, микрополосковых, щелевых и диэлектрических линий передачи, замедляющих систем, объемных резонаторов, управляемых ферритовых фильтров и устройств на магнитостатических волнах. Проанализированы методы расчета электродинамических систем с помощью ЭВМ.

Г 2302020000 (4309000000) — 508 182 — 90
001 (01) — 90

ББК 32.851.1
6Ф0.31

ISBN 5-06-000685-9

© А. Д. Григорьев, 1990

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5

Часть первая

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

Глава 1. Основные уравнения классической электродинамики	8
§ 1.1. Уравнение Максвелла	8
§ 1.2. Электромагнитные свойства сред	10
§ 1.3. Граничные условия	13
§ 1.4. Энергия и мощность электромагнитного поля	15
§ 1.5. Уравнения Максвелла в комплексной форме	17
§ 1.6. Баланс энергии гармонических колебаний электромагнитного поля	19
§ 1.7. Лемма Лоренца и теорема взаимности	21
§ 1.8. Задачи электродинамики и условия единственности их решения	22
Глава 2. Плоские электромагнитные волны	26
§ 2.1. Общие свойства плоских однородных волн	26
§ 2.2. Поляризация волн	30
§ 2.3. Стоячие волны	32
§ 2.4. Волны с произвольным направлением распространения	33
§ 2.5. Отражение и преломление электромагнитных волн	34
§ 2.6. Полное внутреннее отражение	37
§ 2.7. Распространение электромагнитных волн в поглощающих средах	38
Глава 3. Электромагнитные волны в гиротропных средах	42
§ 3.1. Анизотропные среды. Гиротропия	42
§ 3.2. Продольное распространение электромагнитных волн в гиротропной среде	45
§ 3.3. Поперечное распространение электромагнитных волн в гиротропной среде	48
Глава 4. Излучение электромагнитных волн	52
§ 4.1. Электродинамические потенциалы и векторы Герца	52
§ 4.2. Общие свойства поля излучения. Излучение электрического диполя	55

Часть вторая

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА ЭЛЕМЕНТОВ И УСТРОЙСТВ СВЧ

Глава 5. Распространение электромагнитных волн в направляющих системах	60
§ 5.1. Классификация линий передачи	60

§ 5.2.	Распространение волн между двумя параллельными плоскостями	61
§ 5.3.	Скалярные уравнения Гельмгольца для линии передачи	64
§ 5.4.	Общее решение трехмерного уравнения Гельмгольца	65
§ 5.5.	Дисперсия в линиях передачи. Явление отсечки	68
Глава 6.	Электромагнитное поле свободных волн в линии передачи	72
§ 6.1.	Общие свойства электромагнитного поля в линии передачи	72
§ 6.2.	Передаваемая мощность	75
§ 6.3.	Условия на границе раздела сред	76
§ 6.4.	Затухание электромагнитных волн в линии передачи	79
§ 6.5.	Ортогональность волн в линии передачи	82
Глава 7.	Односвязные закрытые линии передачи	87
§ 7.1.	Прямоугольный волновод	87
§ 7.2.	Круглый волновод	94
§ 7.3.	Волноводы со сложной формой поперечного сечения	98
Глава 8.	Многосвязные линии передачи	102
§ 8.1.	Основные свойства Т-волн	102
§ 8.2.	Нормальные Т-волны	106
§ 8.3.	Передаваемая мощность и затухание	108
§ 8.4.	Двухпроводная симметричная линия передачи	110
§ 8.5.	Коаксиальная линия передачи	111
§ 8.6.	Радиальная линия передачи	115
§ 8.7.	Полосковые линии передачи	116
§ 8.8.	Щелевые полосковые линии передачи	119
Глава 9.	Открытые линии передачи	122
§ 9.1.	Общие свойства диэлектрических волноводов	122
§ 9.2.	Плоский диэлектрический волновод	124
§ 9.3.	Круглый диэлектрический волновод	129
§ 9.4.	Структура и параметры диэлектрических волноводов. Световоды	132
§ 9.5.	Квазиоптические линии передачи	135
Глава 10.	Замедляющие системы	137
§ 10.1.	Основные свойства медленных волн	137
§ 10.2.	Распространение волн в периодических структурах. Пространственные гармоники	140
§ 10.3.	Характеристики и параметры замедляющих систем	144
§ 10.4.	Основные типы замедляющих систем	147
Глава 11.	Объемные резонаторы	162
§ 11.1.	Основные типы объемных резонаторов	162
§ 11.2.	Общие свойства свободных колебаний в резонаторе	166
§ 11.3.	Параметры объемных резонаторов	169
§ 11.4.	Закрытые волноводные резонаторы	172
§ 11.5.	Закрытые аксиально-симметричные резонаторы	182
§ 11.6.	Открытые диэлектрические резонаторы	188
§ 11.7.	Открытые волноводные резонаторы	190
§ 11.8.	Открытые зеркальные резонаторы	195
Глава 12.	Вынужденные колебания и волны в резонаторах и линиях передачи	198
§ 12.1.	Возбуждение волн в волноводах	198
§ 12.2.	Элементы возбуждения	200
§ 12.3.	Возбуждение колебаний в объемных резонаторах	203

§ 12.4.	Расчет вынужденных волн (колебаний) в линиях передачи и резонаторах	207
Глава 13.	Нерегулярные электродинамические системы	212
§ 13.1.	Теория возмущений	212
§ 13.2.	Неоднородности в линиях передачи	217
Глава 14.	Численные методы решения внутренних краевых задач электродинамики	223
§ 14.1.	Постановка задач и основные этапы их решения	223
§ 14.2.	Основные классы внутренних задач электродинамики и их математическая формулировка	225
§ 14.3.	Методы дискретизации и решения матричных задач	228
§ 14.4.	Расчет электромагнитного поля и параметров регулярных волноводов и аксиально-симметричных резонаторов	234
§ 14.5.	Программы численного решения внутренних задач электродинамики	236

Часть третья

ОСНОВНЫЕ ТЕОРИИ СВЧ-ЦЕПЕЙ

Глава 15.	Эквивалентные линии передачи	240
§ 15.1.	Эквивалентные параметры линии передачи	240
§ 15.2.	Коэффициенты отражения и стоячей волны. Входное сопротивление линии передачи	243
§ 15.3.	Круговая номограмма полных сопротивлений	246
§ 15.4.	Основные режимы работы линии передачи	250
§ 15.5.	Согласование в линиях передачи	252
Глава 16.	Методы анализа многополюсников СВЧ	256
§ 16.1.	Волновые матрицы	256
§ 16.2.	Основные свойства матриц рассеяния	262
§ 16.3.	Симметричные многополюсники	265
§ 16.4.	Метод спектрального разложения	266
§ 16.5.	Анализ устройств СВЧ с помощью ЭВМ. Метод декомпозиции	267
Глава 17.	Взаимные устройства СВЧ	274
§ 17.1.	Двухполюсники	274
§ 17.2.	Простейшие четырехполюсники	279
§ 17.3.	Фильтры СВЧ	283
§ 17.4.	Устройства широкополосного согласования	285
§ 17.5.	Шестиполюсники	287
§ 17.6.	Направленные ответвители	292
§ 17.7.	Мостовые устройства СВЧ	298
Глава 18.	Ферритовые устройства СВЧ	303
§ 18.1.	Магнитные свойства ферритовых материалов	303
§ 18.2.	Фазовращатели	307
§ 18.3.	Вентили	310
§ 18.4.	Циркуляторы	312
§ 18.5.	Управляемые фильтры	314
§ 18.6.	Устройства на магнитоэлектрических волнах	316
Заключение	319	
Приложения	321	
Приложение 1. Некоторые сведения из векторного анализа	321	

Приложение 2. Некоторые сведения из функционального анализа	322
Приложение 3. Уравнения силовых линий электромагнитного поля в ре- гулярном волноводе	323
Приложение 4. Стандартные прямоугольные волноводы	324
Приложение 5. Некоторые сведения о функциях Бесселя	325
Приложение 6. Расчет индуктивности петли связи	327
Приложение 7. Теорема Фостера	327
Приложение 8. Некоторые сведения из матричной алгебры	328
Приложение 9. Диапазон радиочастот по международному регламенту ...	330
Список литературы	331