

Содержание

Предисловие.....	3
Список используемых сокращений.....	7
Список используемых обозначений.....	9
Введение.....	14

Часть I. Устройства СВЧ.....34

Глава 1. Линии передачи СВЧ.....34

1.1. Основные параметры линий передачи.....	36
1.1.1. Понятие собственных волн линий передачи.....	36
1.1.2. Основные характеристики собственных волн линии.....	38
1.1.3. Вычисление волновых сопротивлений линий передачи.....	43
1.2. Длинные линии.....	47
1.2.1. Дифференциальные уравнения длинной линии.....	47
1.2.2. Основные параметры длинной линии.....	49
1.3. Прямоугольные и круглые волноводы.....	51
1.3.1. Структуры электромагнитных полей собственных волн прямоугольного волновода.....	51
1.3.2. Структуры электромагнитных полей собственных волн круглого волновода.....	55
1.3.3. Основная волна прямоугольного волновода.....	59
1.3.4. Затухание волн в круглых и прямоугольных волноводах.....	61
1.3.5. Предельная мощность в прямоугольном и круглом волноводах.....	67
1.3.6. Определение размеров поперечных сечений прямоугольного и круглого волноводов.....	70
1.3.7. Волноводы сложной формы поперечного сечения.....	71
1.3.8. Эллиптические волноводы.....	73
1.4. Коаксиальные волноводы.....	76
1.5. Проволочные линии передачи.....	80
1.6. Полосковые линии передачи.....	81
1.6.1. Собственные волны полосковых линий.....	82
1.6.2. Симметричная полосковая линия (СПЛ).....	85

1.6.3. Микрополосковая линия (МПЛ).....	87
1.6.4*. Симметричная щелевая линия (СЩЛ).....	89
1.6.5*. Компланарные линии.....	92
1.6.6*. Четные и нечетные собственные волны связанных полосковых линий.....	96
1.6.7*. Связанные микрополосковые линии (СМПЛ).....	99
1.6.8*. Волноводно-щелевые линии передачи (ВЩЛ).....	101
1.7. Линии передачи на поверхностных волнах.....	104
1.7.1. Однопроводная и диэлектрическая линии передачи.....	104
1.7.2. Замедляющие структуры.....	112

Глава 2. Теория отрезков регулярных линий передачи в приближении эквивалентной длинной линии.....115

2.1. Эквивалентность бесконечно протяженных линий передачи с Т-, Н- и Е-волнами длинной линии.....	115
2.2. Физическая и математическая модели отрезка регулярной линии передачи СВЧ (модель отрезка эквивалентной длинной линии).....	118
2.2.1. Нормированные напряжения для бегущих волн.....	119
2.2.2. Коэффициент отражения.....	121
2.2.3. Полные нормированные напряжения и токи в линии передачи.....	122
2.2.4. Нормированные сопротивление и проводимость эквивалентной длинной линии.....	124
2.2.5. Ненормированные напряжение и ток в линиях передачи с Т-волнами.....	124
2.3. Частично стоячие волны в эквивалентной длинной линии и коэффициент стоячей волны.....	126
2.4. Режимы работы эквивалентной длинной линии передачи без потерь.....	128
2.4.1. Короткозамкнутая линия передачи.....	130
2.4.2. Разомкнутая линия передачи.....	131
2.4.3. Линия без потерь, нагруженная на нормированное реактивное сопротивление.....	132
2.4.4. Входное нормированное сопротивление линии, нагруженной на активное сопротивление.....	133
2.4.5. Входное нормированное сопротивление линии, нагруженной на произвольное комплексное сопротивление.....	136

2.4.6. Зависимость входного нормированного сопротивления регулярной линии передачи от коэффициента отражения	136
2.4.7. Основные результаты теории эквивалентной длинной линии.....	137
2.4.8. Эквивалентная схема отрезка регулярной линии передачи	138
2.5. Коэффициент полезного действия эквивалентной длинной линии передачи с потерями.....	139

Глава 3. Согласующе-трансформирующие цепи СВЧ-устройств.....141

3.1. Общие вопросы согласования.....	141
3.1.1. Физическая и математическая модели согласования.....	141
3.1.2. Уменьшение максимально допустимой величины мощности, передаваемой в нагрузку	144
3.1.3. Методы согласования.....	145
3.2. Узкополосное согласование тракта СВЧ.....	146
3.2.1. Четвертьволновый трансформатор	147
3.2.2. Последовательный шлейф.....	150
3.2.3. Параллельный шлейф.....	151
3.2.4. Два и три последовательных или параллельных шлейфа	152
3.3*. Широкополосное согласование тракта СВЧ.....	155
3.3.1. Постановка задачи широкополосного согласования.....	155
3.3.2. Задача аппроксимации.....	156
3.3.3. Трансформация конечного импеданса	157
3.3.4. Идеальная наклонная амплитудно-частотная характеристика	158
3.3.5. Аппроксимация АЧХ с постоянным логарифмическим наклоном при целом ν	159
3.3.6. Теоретические ограничения полосы согласования.....	159

Глава 4. Элементы и узлы волноводных СВЧ-трактов и интегральных схем СВЧ.....161

4.1. Изоляторы для коаксиального тракта	161
4.2. Соединители волноводных трактов СВЧ.....	162

4.2.1. Соединения прямоугольных и круглых волноводов.....	164
4.2.2. Соединения коаксиальных волноводов.....	168
4.3. Изгибы, повороты и скрутки линий передачи.....	170
4.4. Короткозамыкающие поршни в волноводных трактах.....	173
4.5. Переходы.....	175
4.5.1. Переходы для широкополосного согласования.....	175
4.5.2. Переходы с одного типа линии передачи на другой....	176
4.6. Нагрузки.....	185
4.7. Реактивные элементы волноводных линий передачи.....	189
4.8. Управляющие и ферритовые устройства СВЧ.....	193
4.8.1. Классификация управляющих устройств СВЧ.....	193
4.8.2. Механические коммутаторы, фазовращатели и аттенуаторы.....	195
4.9*. Антенные переключатели на газовых разрядниках.....	199
4.10. Элементы интегральных схем СВЧ.....	201
4.10.1. Переходы и короткозамыкатели для интегральных СВЧ-модулей.....	202
4.10.2. Емкости, индуктивности и резисторы в СВЧ-микросхемах.....	209
4.10.3. Резонаторы на микрополосковых и щелевых линиях, диэлектрических структурах.....	218
4.10.4. Неоднородности в интегральных схемах СВЧ.....	225

Глава 5. Теория линейных устройств СВЧ.....228

5.1. Основные определения.....	228
5.1.1. Многополюсник.....	228
5.1.2. Характеристические матрицы многополюсников.....	229
5.1.3. Матрица рассеяния.....	231
5.1.4. Матрицы нормированных сопротивлений и проводимостей.....	232
5.1.5. Связь между нормированными и ненормированными матрицами сопротивлений и проводимостей.....	232
5.2*. Основные теоремы цепей СВЧ.....	234
5.2.1. Теорема Умова-Пойнтинга.....	234
5.2.2. Лемма Лоренца для многополюсников.....	236
5.2.3. Теорема Фостера для недиссипативных многополюсников.....	237
5.3. Соотношения между характеристическими матрицами многополюсника.....	242

5.3.1. Связь между матрицами $[\bar{Z}]$, $[\bar{Y}]$, $[S]$	242
5.3.2. Зависимость матриц многополюсника от нумерации входов.....	243
5.3.3. Сдвиг плоскостей отсчета фаз на входах многополюсника.....	244
5.4. Основные свойства матрицы рассеяния	244
5.4.1. Физический смысл элементов матрицы рассеяния.....	246
5.4.2. Симметричность матрицы рассеяния для взаимных устройств	249
5.4.3. Унитарность матрицы рассеяния недиссипативных многополюсников.....	250
5.4.4. Коммутируемость матрицы рассеяния $[S]$ с матрицей симметрии $[G]$ для симметричных многополюсников.....	251
5.4.5. Преимущества матрицы рассеяния.....	252
5.5*. Собственные значения и собственные векторы характеристической матрицы рассеяния.....	252
5.5.1. Собственные значения матрицы рассеяния.....	252
5.5.2. Собственные векторы матрицы рассеяния.....	254
5.5.3. Диагонализация матрицы рассеяния.....	255
5.5.4. Матрица рассеяния четырехполюсника	256
5.5.5. Собственные значения и собственные векторы характеристических матриц $[\bar{Z}]$ и $[\bar{Y}]$	259
5.6. Анализ четырехполюсников каскадной структуры с помощью матриц передачи.....	260
5.7. Метод симметричных восьмиполюсников (метод синфазного и противофазного возбуждений)	263
5.8. Пример использования матрицы рассеяния.....	263
5.8.1. Двойной волноводный тройник.....	263
5.8.2. Свойства двойного волноводного тройника.....	264
5.9. Определение числа параметров, необходимых для описания многополюсника СВЧ.....	266
5.9.1. Элементы характеристических матриц	266
5.9.2. Примеры.....	267

Глава 6. Двухполюсные (оконечные) устройства271

6.1. Основные свойства.....	271
6.2. Закарачивающие поршни в волноводах	273

6.2.1. Подвижные контактные поршни	274
6.2.2. Подвижные бесконтактные поршни	274
6.3. Согласованные нагрузки	279
6.4*. Индикаторы СВЧ мощности	280
6.4.1. Кристаллические детекторы	281
6.4.2. Боллометры и термисторы	284

Глава 7. Четырехполосные устройства СВЧ286

7.1. Основные свойства	286
7.1.1. Характеристические матрицы	286
7.1.2. Нагруженный четырехполосник	286
7.1.3. Четырехполосник без потерь	287
7.1.4. Взаимный четырехполосник	288
7.1.5. Взаимный четырехполосник без потерь	289
7.1.6. Линия передачи как четырехполосник	289
7.1.7. Четырехполосник как трансформатор нормированных сопротивлений	290
7.1.8. Эквивалентность четырехполосников	293
7.2. Симметричные четырехполосники	294
7.2.1. Симметричный четырехполосник при симметричных нормированных напряжениях в плечах	296
7.2.2. Симметричный четырехполосник при антисимметричных нормированных токах в плечах	297
7.3. Неоднородности в волноводах	298
7.3.1. Индуктивная диафрагма	298
7.3.2. Нормированные параметры некоторых диафрагм	302
7.3.3. Соединения двух волноводов	304
7.4. Волноводные переходы	310
7.4.1. Изменение сечения волновода	310
7.4.2. Преобразователи типов волн	310
7.5. Согласующие устройства	312
7.6. Атенюаторы	314
7.6.1. Атенюаторы предельного типа	315
7.6.2. Атенюаторы поглощающего типа	316
7.7. Взаимные фазовращатели	321
7.7.1. Фазовращатели на основе изменения длины линии и изменения длины волны в линии	321
7.7.2*. Фазовращатели поляризационного типа	322

Глава 8. Объемные резонаторы СВЧ.....323

8.1. Объемные резонаторы с одним элементом связи.....	325
8.1.1. Основные характеристики резонатора.....	326
8.1.2. Эквивалентные схемы объемного резонатора с одним элементом связи.....	328
8.1.3. Резонаторные контуры на отрезке линии передачи с распределенными постоянными параметрами.....	336
8.1.4. Пोलый резонатор в виде отрезка прямоугольного волновода.....	338
8.1.5*. Экспериментальное определение параметров эквивалентных схем резонатора.....	339
8.1.6*. Экспериментальное определение добротностей резонатора.....	341
8.2*. Пропускной резонатор с двумя элементами связи.....	346
8.2.1. Эквивалентные схемы и добротности.....	346
8.2.2. Коэффициент передачи пропускного резонатора.....	350
8.2.3. Полный резонатор с реактивностями, разделенными отрезком линии передачи.....	354
8.3*. Каскадное включение двух пропускных резонаторов.....	356
8.3.1. Эквивалентные схемы.....	356
8.3.2. Полуволновое включение резонаторов.....	356
8.3.3. Четвертьволновое включение резонаторов.....	359

Глава 9. Фильтры СВЧ.....363

9.1. Основные определения.....	363
9.2. Нормированные фильтры-прототипы нижних частот.....	366
9.2.1. Фильтр Баттерворта и Чебышевский фильтр.....	367
9.2.2. Определение числа элементов в схеме фильтра-прототипа.....	370
9.2.3. Фильтр-прототип с характеристикой Баттерворта.....	371
9.2.4. Фильтр-прототип с характеристикой Чебышева.....	372
9.3. Фильтры нижних частот.....	374
9.3.1. Переход от схемы фильтра-прототипа к эквивалентной схеме проектируемого фильтра.....	374
9.3.2. Конструктивная реализация ФНЧ.....	375
9.4. Фильтры верхних частот.....	379
9.4.1. Переход от схемы фильтра-прототипа к эквивалентной схеме проектируемого фильтра.....	379

9.4.2. Конструктивная реализация ФВЧ.....	380
9.5. Полосно-пропускающие фильтры	381
9.5.1. Переход от схемы фильтра-прототипа к эквивалентной схеме проектируемого фильтра	381
9.5.2. Конструктивные реализации ППФ	385
9.6. Полосно-заграждающие фильтры.....	393
9.6.1. Переход от схемы фильтра-прототипа к эквивалентной схеме проектируемого фильтра	393
9.6.2. Конструктивные реализации ПЗФ	395

Глава 10. Устройства с тремя плечами (тройники).....400

10.1*. Общие свойства взаимных шестиполюсников без потерь	400
10.1.1. Эквивалентные цепи	400
10.1.2. Матрица рассеяния тройника.....	403
10.1.3. Главная плоскость взаимного шестиполюсника.....	407
10.1.4. Сопряженная плоскость взаимного шестиполюсника	408
10.1.5. Основные свойства взаимных тройников.....	410
10.2. Т- и Y-образные соединения.....	411
10.2.1. Т-образные соединения.....	411
10.2.2. Y-образные соединения.....	417
10.3*. Невзаимные шестиполюсники без потерь. Циркуляторы.....	420
10.3.1. Некоторые свойства невзаимных шестиполюсников без потерь.....	420
10.3.2. Циркулятор со смещением поля.....	422
10.3.3. Циркулятор с использованием эффекта Фарадея.....	424
10.4*. Применения тройниковых соединений.....	425
10.4.1. Волномер с поглощающим объемным резонатором....	425
10.4.2. Избирательный разветвитель (уплотнитель каналов).....	426
10.4.3. Применение циркуляторов.....	427

Глава 11. Устройства с четырьмя плечами.

Направленные ответвители..... 430

11.1. Основные определения. Идеальный направленный ответвитель	430
11.1.1. Матрица рассеяния идеального направленного ответвителя типа I.....	431
11.1.2. Матрица рассеяния гибридного ответвителя.....	433
11.1.3*. Идеальный направленный ответвитель как согласованный по всем входам восьмиполюсник без потерь.....	434
11.1.4. Основные характеристики реальных направленных ответвителей.....	435
11.1.5. Типичный пример применения направленного ответвителя	436
11.2. Типы направленных ответвителей.....	437
11.2.1. Направленные ответвители с одним элементом связи	437
11.2.2. Направленные ответвители с двумя элементами связи.....	439
11.2.3*. Распределенная дискретная связь	441
11.2.4*. Направленные ответвители с распределенной дискретной связью.....	449
11.3. Направленные ответвители с непрерывной связью.....	451
11.3.1. Направленные ответвители на связанных полосковых линиях передачи	452
11.3.2*. Полосковые направленные ответвители с сильной связью.....	457
11.4. Кольцевые направленные ответвители.....	461
11.4.1. Шлейфный ответвитель и гибридное кольцо	461
11.4.2. Метод декомпозиции кольцевых ответвителей.....	463
11.5*. Некоторые применения направленных ответвителей.....	465
11.5.1. Рефлектометры.....	465
11.5.2. Применение гибридных ответвителей.....	466
11.5.3. Ответвитель с переменной связью.....	469
11.5.4. Резонатор бегущей волны.....	470
11.6*. Делители и сумматоры мощности на основе направленных ответвителей	472
11.6.1. Определения. Типы делителей и сумматоров мощности	472
11.6.2. Кольцевые делители мощности.....	475

Глава 12*. Восьмиполюсные мостовые соединения.....479

12.1. Гибридный и магический двойные Т-образные мосты.....	479
12.1.1. Гибридный двойной Т-образный мост	479
12.1.2. Магический Т-образный мост.....	482
12.1.3. Свойства магического двойного Т-образного моста с согласованными нагрузками.....	484
12.1.4. Свойства магического двойного Т-образного моста с произвольными нагрузками.....	486
12.1.5. Матрицы нормированных сопротивлений и проводимостей.....	488
12.2. Гибридные мосты кольцевой и прямоугольной конфигураций.....	490
12.2.1. Кольцевой гибридный мост	490
12.2.2. Гибридный мост прямоугольной конфигурации.....	494
12.3. Волноводно-щелевые мосты в Н- и Е-плоскостях.....	495
12.3.1. Волноводно-щелевой мост в Н-плоскости.....	495
12.3.2. Волноводно-щелевой мост в Е-плоскости	499
12.4. Применение мостовых соединений	499
12.4.1. Измерение коэффициента отражения с помощью моста сопротивлений	499
12.4.2. Фазовращатель и согласующее устройство	502
12.4.3. Антенный переключатель	505
12.4.4. Четырехплечий циркулятор	506
12.4.5. Фазовый детектор	507
12.4.6. Балансный смеситель	509
12.4.7. Частотный дискриминатор	510
12.4.8. Балансный модулятор	513
12.4.9. Переменный аттенюатор	514

Глава 13. Устройства СВЧ на полупроводниковых диодах.....516

13.1. Устройства с диодами переменной емкости.....	517
13.1.1. Полупроводниковые диоды.....	519
13.1.2. Плавный фазовращатель на варакторе.....	521
13.2. Регулирующие устройства с полупроводниковыми диодами.....	521

13.2.1. Коммутационные диоды СВЧ.....	521
13.2.2. Параметры р-і-n-диодов.....	522
13.2.3. Трансформация сопротивлений коммутационных диодов	527
13.2.4. Управление амплитудой сигнала.....	529
13.2.5. Выключатели СВЧ на коммутационных диодах.....	529
13.2.6. Переключатели (коммутаторы) СВЧ.....	531
13.2.7. Дискретные фазовращатели.....	537
13.2.8. Атенюаторы на р-і-n-диодах.....	546
13.2.9. Ограничители мощности СВЧ	549

Глава 14. Ферритовые устройства СВЧ.....551

14.1. Основные свойства ферритов.....	551
14.1.1*. Основные электромагнитные параметры нормализованных марок ферритов для диапазонов СВЧ и КВЧ.....	553
14.1.2. Статические магнитные параметры ферритов.....	554
14.1.3. Диэлектрические свойства ферритов	556
14.1.4. Динамические магнитные параметры и характеристики ферритов	556
14.2. Классификация ферритовых устройств.....	561
14.3. Невзаимные ферритовые устройства	564
14.3.1. Устройства на основе эффекта Фарадея.....	564
14.3.2. Устройства с поперечно-подмагниченными ферритами.....	566
14.3.3*. Фазовые циркуляторы.....	570
14.4. Управляемые фазовращатели и перестраиваемые фильтры	573
14.4.1. Ферритовые фазовращатели	573
14.4.2*. Перестраиваемые ферритовые фильтры	575
14.4.3*. Циркулятор с сосредоточенными параметрами.....	578

Список литературы.....580