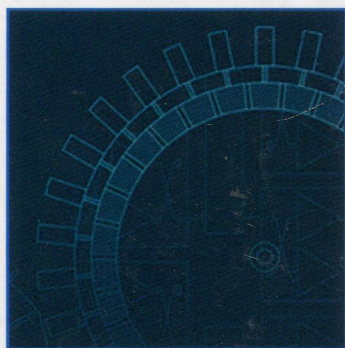


# радиоэлектроники

Ф. Сечи, М. Буджатти

Мощные  
твердотельные  
СВЧ-усилители



ТЕХНОСФЕРА



# МИР

## радиоэлектроники

Ф. Сечи  
М. Буджатти

Мощные твердотельные  
СВЧ-усилители

Перевод с английского  
В.О. Султанова  
под ред. д.т.н. А.А. Борисова

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2016



Издание осуществлено при поддержке  
АО «НИИ «Исток» им. Шокина»

УДК 621.375  
ББК 32.846  
С33

С33 Сечи Ф., Буджатти М.

**Мощные твердотельные СВЧ-усилители**

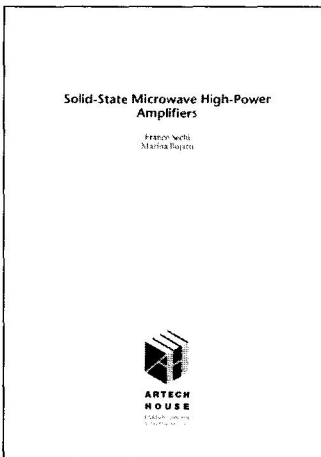
Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2015. – 416 с. ISBN 978-5-94836-415-5

В книге рассмотрены все традиционные вопросы, связанные с разработкой усилителей мощности, начиная от получения моделей приборов на большом сигнале и заканчивая обсуждением сумматоров мощности и методов проектирования.

Большое внимание в издании уделено рассмотрению физических основ приборов, фазовых шумов, схем смещения и тепловому проектированию. Также в книге особое внимание уделяется рассмотрению фундаментальных принципов. Издание затрагивает необычайно большое количество областей, связанных с физикой полупроводников и активных устройств.

Книга представляет интерес для специалистов, которые занимаются разработкой усилителей мощности для базовых станций сотовой связи. В особенности это относится к рассмотрению моделей на больших сигналах, проблем, связанных с фазовыми шумами, методов проектирования усилителей мощности, специальных конструкций усилителей мощности и теплового проектирования. Также данная книга может послужить в качестве справочного пособия при углубленном изучении СВЧ-устройств.

УДК 621.375  
ББК 32.846



© 2009 ARTECH HOUSE INC. All rights reserved.

© 2015, ЗАО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», перевод на русский язык, оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-415-5  
ISBN 978-1-59693-319-4 (англ.)

# Содержание

<b>Предисловие редактора перевода</b> .....	<b>9</b>
<b>Введение</b> .....	<b>11</b>
<b>Глава 1. Введение</b> .....	<b>13</b>
1.1. Предмет данной книги.....	13
1.1.1. Перспективы развития.....	16
Литература.....	17
<b>Глава 2. Усилители высокой мощности</b> .....	<b>18</b>
2.1. Области применения и технические характеристики.....	18
2.2. Активные приборы.....	26
Литература.....	32
<b>Глава 3. Физика активных приборов</b> .....	<b>34</b>
3.1. Введение.....	34
3.2. Основные концепции физики полупроводников.....	34
3.3. Перенос заряда в полупроводниках.....	46
3.4. Барьеры и <i>p-n</i> -переходы.....	48
3.5. Полевые транзисторы и полевые транзисторы с барьером Шоттки.....	61
3.6. Транзисторы на гетеропереходах.....	72
Литература.....	84
<b>Глава 4. Описание и моделирование усилителей мощности</b> .....	<b>88</b>
4.1. Введение.....	88
4.2. Описание активных элементов и малосигнальных моделей.....	89
4.2.1. Модели малых сигналов ПТШ — полевого транзистора с барьером Шоттки — и ТВПЭ-транзистора с высокой подвижностью электронов.....	90
4.2.2. Малосигнальные модели гетеробиполярного транзистора.....	92
4.3. Использование модели больших сигналов.....	93
4.3.1. Метод оптимизации нагрузки (load-pull).....	93
4.3.2. Параметры в режиме больших сигналов: $A/A$ и $A/\Phi$ .....	101
4.3.3. Зависимость $S$ -параметров от смещения.....	104
4.4. Модели больших сигналов.....	105
4.4.1. Модель ПТШ — полевого транзистора с барьером Шоттки и ТВПЭ-транзистора с высокой подвижностью электронов.....	105
4.4.2. Модель больших сигналов гетеробиполярного транзистора.....	108
Литература.....	111

<b>Глава 5. Фазовый шум</b> .....	<b>115</b>
5.1. Введение.....	115
5.2. Шум в полупроводниковых устройствах.....	116
5.3. Шум в активных приборах.....	121
5.4. Фазовый шум.....	130
5.5. Фазовый шум в усилителях мощности.....	131
Литература.....	140
<b>Глава 6. Технологии изготовления СВЧ-усилителей мощности</b> .....	<b>144</b>
6.1. Введение.....	144
6.2. Волноводы.....	145
6.3. СВЧ-интегральные схемы.....	146
6.3.1. СВЧ-печатные схемы.....	147
6.3.2. Гибридные схемы.....	148
6.3.3. Миниатюрные гибридные и гибридно-монокристаллические схемы.....	154
6.3.4. Монокристаллические схемы.....	158
Литература.....	164
<b>Глава 7. Сумматоры и делители мощности</b> .....	<b>166</b>
7.1. Введение.....	166
7.2. Балансные каскады и квадратурные ответвители.....	168
7.2.1. Встречно-штыревые ответвители СВЧ.....	169
7.2.2. Шлейфовые ответвители.....	175
7.2.3. Ответвители Уилкинсона, синфазные и квадратурные.....	179
7.2.4. Сравнение трех различных типов микрополосковых квадратурных ответвителей.....	183
7.3. Направленные ответвители с противофазным выходом.....	184
7.4. Четвертьволновые трансформаторы на сосредоточенных элементах.....	186
7.5. Радиальные сумматоры.....	187
7.5.1. Микрополосковые линии.....	188
7.5.2. Радиальные волноводы.....	190
7.5.3. Конические волноводы.....	198
7.6. Решетки сумматоров.....	200
Литература.....	202
<b>Глава 8. Общие принципы проектирования усилителей мощности</b> .....	<b>206</b>
8.1. Введение.....	206
8.2. Метод оптимизации нагрузки (load-pull).....	207
8.3. Широкополосные схемы согласования.....	208
8.4. Боде и Фано — теоретические ограничения для согласования.....	214

8.5. Полоса или мощность?	218
8.6. Метод нагрузочной линии	224
8.7. Моделирование схемы больших сигналов: гармонический баланс	234
8.8. Потенциальные источники нестабильности	237
8.8.1. Колебания низкого уровня: $k$ -фактор Роллета	237
8.8.2. Внутренние колебания	239
8.8.3. Параметрические колебания	241
8.8.4. Колебания в схеме смещения	245
Литература	245
<b>Глава 9. Коэффициент полезного действия усилителей мощности</b>	<b>247</b>
9.1. Введение	247
9.2. Усилители класса А: зависимость выходной мощности и КПД от линии нагрузки	248
9.3. Класс АВ: зависимость максимального напряжения от угла проводимости и линии нагрузки	251
9.4. Усилители, работающие в режиме перегрузки	263
9.4.1. Класс В: оптимальный КПД и класс F	264
9.4.2. Класс В: режим оптимальной мощности	271
9.4.3. Класс А: оптимальная нагрузка	275
9.4.4. Класс А: оптимальная мощность и КПД	279
9.5. Усилители класса Е	282
9.6. Анализ реальных активных элементов и схем	289
Литература	291
<b>Глава 10. Линейные усилители мощности</b>	<b>293</b>
10.1. Введение	293
10.2. Линейность	294
10.2.1. Амплитудные искажения: интермодуляционные искажения для двухтоновых сигналов	294
10.2.2. Реальные зависимости для интермодуляционных искажений	300
10.2.3. Фазовые искажения: интермодуляционные искажения для двухтонового сигнала	305
10.2.4. Совместное влияние амплитудных и фазовых искажений	309
10.2.5. Асимметрия спектра и эффекты, связанные с памятью	309
10.3. Методы проектирования: интермодуляция и контуры постоянной выходной мощности	313
10.4. Экспериментальная установка	318
10.5. Простая квадратурная модель	320
10.6. Поведенческие модели	323

10.6.1. Разложение по степеням и ряд Тейлора	324
10.6.2. Ряды Вольтерра	325
10.6.3. Прочие модели	327
10.7. Методы линеаризации	327
10.7.1. Метод предварительных искажений	328
10.7.2. Метод упреждающей связи	337
10.7.3. Обратная связь по огибающей	339
10.8. Перекрестные помехи между соседними каналами	340
Литература	343
<b>Глава 11. Специальные типы усилителей мощности</b>	<b>346</b>
11.1. Усилитель Догерти	346
11.2. Усилитель Ширэя	351
11.3. Усилитель Кана с удалением и восстановлением огибающей	357
Литература	360
<b>Глава 12. Схемы смещения</b>	<b>363</b>
12.1. Введение	363
12.2. Пассивные схемы	363
12.3. Широкополосные повторители напряжения	367
12.4. Питание схемы смещения	370
12.4.1. Стабилизация коэффициента усиления при изменении температуры	371
12.5. Распределенные импульсные модуляторы	374
Литература	378
<b>Глава 13. Тепловое проектирование</b>	<b>379</b>
13.1. Введение	379
13.2. Зависимость срока службы от температуры	379
13.3. Измерение температуры перехода	381
13.3.1. Инфракрасная микроскопия	381
13.3.2. Методы с использованием жидких кристаллов	385
13.3.3. Методы на основе измерения электрических параметров	388
13.4. Рабочий режим	390
13.4.1. Непрерывный режим	390
13.4.2. Импульсный режим	394
13.5. Радиаторы	397
Литература	399
<b>Информация об авторах</b>	<b>401</b>
<b>Предметный указатель</b>	<b>402</b>