

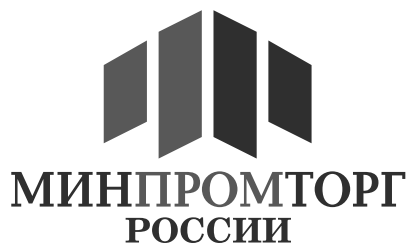
# радиоэлектроники

Ф. Сечи, М. Буджатти

Мощные  
твердотельные  
СВЧ-усилители



ТЕХНОСФЕРА



*Достижение высокого технологического уровня радио-электроники невозможно без поддержания современного уровня знаний. Серия книг «Мир радиозлектроники» с 2010 года успела зарекомендовать себя как собрание актуальной научной и технической литературы.*

*Директор Департамента  
радиозлектронной промышленности  
Минпромторга России С.В. Хохлов*





# МИР

## радиоэлектроники

Ф. Сечи  
М. Бужатти

**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 «НПП «Исток» им. Шокина»*

УДК 621.375  
ББК 32.846  
С33

**С33 Сечи Ф., Буджатти М.**

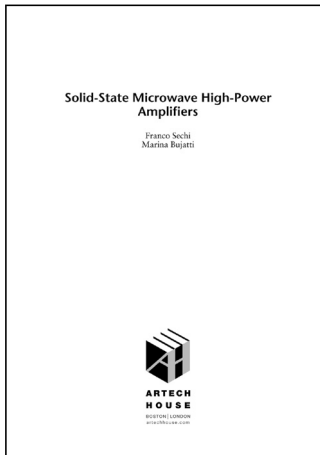
**Мощные твердотельные СВЧ-усилители**

**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>



## Предисловие редактора перевода

Эта книга, написанная известными специалистами в области СВЧ-электроники, посвящена разработке твердотельных СВЧ мощных усилителей. В процессе проектирования, разработки и производства авторам пришлось изучить широкий круг областей СВЧ-электроники, что помогло им выработать системный подход к решению конкретных задач разработки усилителей мощности в СВЧ-диапазоне. Кроме традиционных вопросов проектирования усилителей, начиная с построения моделей активных приборов на большом уровне сигнала и заканчивая способами суммирования мощности и всех основных этапов проектирования, в книге широко освещены такие темы, как физика активных приборов, фазовые шумы, схемы питания и тепловое проектирование.

Ранние этапы развития СВЧ-техники связаны с вакуумными приборами, такими как клистроны, магнетроны и лампы бегущей волны. Однако по мере развития полупроводниковых приборов и твердотельных усилителей на их основе они постепенно стали конкурировать с вакуумными приборами. СВЧ-усилители являются одной из ключевых составляющих СВЧ-систем. Преимуществом твердотельных усилителей являются их более высокая надежность, существенно меньшие габаритные размеры и весовые показатели при улучшении рабочих параметров и снижении стоимости. Все это делает их весьма привлекательными для разработчиков СВЧ-систем, таких как радары, системы радиоэлектронной борьбы, телекоммуникационное оборудование. Эти системы не могут быть созданы без усилителей мощности СВЧ-диапазона.

При изложении материала авторы придерживаются фундаментального подхода, что обеспечивает его актуальность на долгое время. Книга будет полезной не только специалистам, но и широкому кругу читателей, особенно студентам старших курсов соответствующих специальностей, желающим глубоко изучить вопросы разработки твердотельных мощных СВЧ-усилителей.

При рассмотрении активных приборов авторы больше внимания уделяют полупроводникам  $A_3B_5$  и транзисторам на их основе; их способность работать на высоких частотах, благодаря высокой подвижности и пиковой скорости электронов, является главным фактором, определяющим их выбор.

Среди полупроводников  $A_3B_5$  наиболее успешным до сих пор остается арсенид галлия, технология изготовления полевых транзисторов и монолитных интегральных схем на его основе в настоящее время находится на высоком уровне. Однако появляются и новые полупроводниковые материалы, которые в ближайшие годы поднимут параметры СВЧ-усилителей на новый уровень.

Полевые транзисторы как основной активный элемент усилителей мощности используются на пределе физических характеристик полупроводников и технологии их изготовления. Знание этих пределов и физических процессов,

их определяющих, очень важно для проектирования и создания усилителей с высокими параметрами и надежностью.

Авторам известно, что разработчики изделий СВЧ-техники имеют дело с постоянно меняющимся потоком новых приборов, технологий, материалов, но базовые принципы, лежащие в основе разработок, меняются мало. Поэтому понимание этих принципов поможет разработчикам делать правильный выбор в этом многообразии.

*Генеральный директор  
АО «НПП «Исток» им. Шокина»  
д.т.н. Борисов А.А.*

## Введение

В значительной степени появление данной книги связано с нашей совместной работой в компании Microwave Power Inc. (MPI), которая занимается проектированием, разработкой и производством твердотельных СВЧ-усилителей мощности. Мы создали эту компанию в 1986 году и совместно управляли ею на протяжении более двадцати лет. Работа в небольшой компании является отличным средством против специализации в какой-то одной узкой области: в процессе работы постепенно мы начали понимать, что многие проблемы, связанные с СВЧ-усилителями мощности, невозможно решить в рамках какой-то одной области, так как они носят интердисциплинарный характер. Именно этой точки зрения мы и придерживались при создании данной книги. Здесь 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. Однако при этом больший, чем в других книгах, объем был посвящен рассмотрению физических основ приборов, фазовых шумов, схем смещения и тепловому проектированию.

На протяжении всей книги особое внимание уделяется рассмотрению фундаментальных принципов. Мы считаем, что это единственный способ борьбы с быстрым устареванием знаний в отрасли, которая находится в состоянии постоянного развития. Рассматривая логику и принципы, которые стоят за различными методами проектирования, стараемся подтолкнуть читателя к их использованию в будущих проектах. Изучая фундаментальные принципы, которые лежат в основе используемых сегодня приборов, помогаем лучше понять устройства следующего поколения.

Также надеемся, что особое внимание к основам и широкий диапазон рассматриваемых тем помогут привлечь внимание более широкой аудитории. Например, хотя в книге не рассматриваются специально технологии беспроводной передачи данных, многие рассматриваемые в ней вопросы представляют особый интерес для специалистов, которые занимаются разработкой усилителей мощности для базовых станций сотовой связи. В особенности это относится к рассмотрению моделей на больших сигналах, проблемам, связанным с фазовыми шумами, методам проектирования усилителей мощности, специальным конструкциям усилителей мощности и тепловому проектированию. Также мы

надемся, что данная книга может послужить в качестве справочного пособия при углубленном изучении СВЧ-устройств.

Так как в самом начале упоминалась компания Microwave Power, то хотелось бы поблагодарить всех сотрудников компании, с которыми мы работали на протяжении многих лет и которые внесли свой вклад в самые различные области. Также хотелось бы поблагодарить Тима Хейбоера, который является в данный момент менеджером компании MRI, а также сотрудников компании AML Communications доктора Тибби Мазилу, Эда МакЭвоя, Якоба Инбара и Гленна Накао за помощь и поддержку в создании данной книги — в особенности при измерении фазовых шумов и при создании некоторых из иллюстраций. В заключение также хотелось бы отметить конструктивную критику и предложения со стороны рецензентов издательства Artech House.

# ГЛАВА I

## ВВЕДЕНИЕ

### I.1. Предмет данной книги

Усилители являются основными компонентами многих СВЧ-систем, а их технические характеристики часто определяют построение всей разрабатываемой электронной системы. В самом начале развития СВЧ-техники для создания усилителей в основном использовались электронные лампы, такие как клистроны, магнетроны или лампы бегущей волны (TWT — Traveling-Wave Tubes), однако стремительное развитие твердотельной электроники значительно ослабило доминирование электровакуумных приборов. Причиной являются такие преимущества твердотельных электронных устройств, как надежность, возможность эксплуатации в неблагоприятных условиях, рабочие характеристики, размер и стоимость; таким образом, при появлении полупроводниковых аналогов они немедленно завоевывают признание у разработчиков СВЧ-устройств. Если построить график зависимости мощности от частоты (см. рис. 1.1, на котором показана такая зависимость для узкополосных усилителей), то можно заметить, что вместе с развитием технологий производства полупроводниковых электронных устройств они захватывают на подобных графиках все большую площадь. Электровакуумные устройства постепенно утрачивают долю рынка, сохраняя лишь свои позиции в области все более высоких частот и более высоких мощностей. Области, выделенные серым цветом и обозначенные как 1989 и 2009, отображают неопределенность в информации для этих двух годов. Также на данном графике показаны те диапазоны мощности и рабочих частот, которые соответствуют мобильным телефонам. Любой подобный график в лучшем случае носит общий и приблизительный характер. Всегда существуют особенности, которые связаны со стоимостью, техническими характеристиками или же необходимостью поддержки существующих систем, которые могут передвигать границу между полупроводниковыми и электровакуумными устройствами.

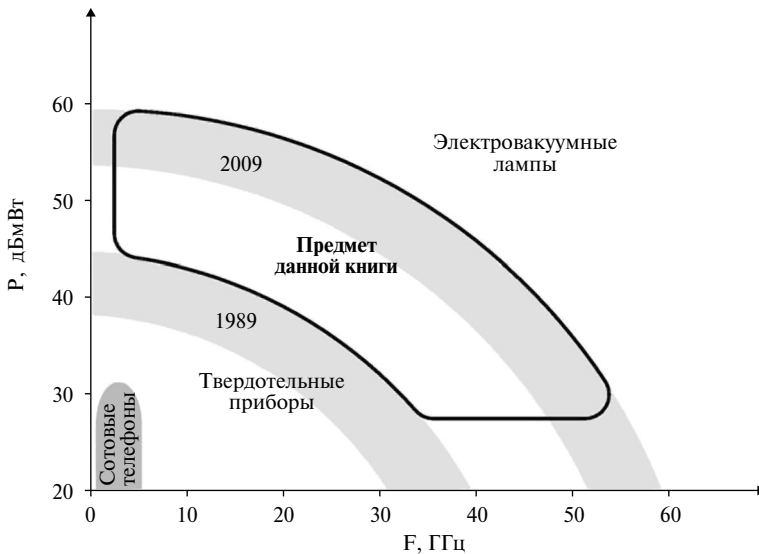
Данная книга рассматривает только твердотельные (полупроводниковые) усилители мощности (SSPA — Solid-State Power Amplifiers), уделяя основное внимание тому максимальному уровню мощности, который можно обеспечить при помощи полупроводниковых приборов. Если рассматривать широкополосные устройства (с полосой в несколько октав), то речь пойдет о мощности в несколько ватт, в случае узкополосных усилителей мощность может достигать

сотен ватт. Если вновь обратиться к рис. 1.1, то можно сказать, что нас интересуют те уровни мощности, которые невозможно было обеспечить 20 лет назад. Естественно, это не означает, что методы и принципы проектирования, обсуждаемые в данной книге, не могут применяться к усилителям с более низкими мощностями, единственное, что больше внимания уделяется вопросам суммирования мощности и отвода тепла. Выбор примеров также будет соответствовать области интересов этой книги.

Основное внимание будет уделяться таким областям применения, как радары, средства радиоэлектронной борьбы, телекоммуникационное оборудование и специальное испытательное оборудование. Достаточно много публикаций уже посвящено усилителям для мобильных телефонов и прочих беспроводных устройств [1–6], поэтому рассматриваться подробно они не будут, однако подробно будут рассмотрены мощные усилители, которые используются в базовых станциях. Также будут подробно рассмотрены полупроводниковые приборы на сложных полупроводниках. Достаточно большое количество превосходных книг, обзоров и технической документации [7–9] уже посвящено низкочастотным мощным, кремниевым МОП-транзисторам, которые за последние годы значительно улучшили свои характеристики (чего нельзя сказать о кремниевых биполярных транзисторах) [10–12]. Однако именно биполярные транзисторы еще в 60-х годах прошлого века первыми достигли диапазона СВЧ. Они и сегодня достаточно широко используются благодаря низкой стоимости и хорошим фазовым шумам, однако их использование в усилителях ограничивается частотой 4–5 ГГц, в особенности при высоких уровнях мощности. Способность полупроводниковых приборов работать на более высоких частотах в основном связана со скоростью электронов, и известно несколько полупроводниковых материалов, которые обладают более высокой подвижностью электронов и более высокой максимальной скоростью по сравнению с кремнием. До сих пор широко используется арсенид галлия благодаря сочетанию различных факторов. Сегодня это хорошо развитая технология, для которой основным стимулом в начале ее развития являлся такой крупный рынок, как оптические электронные устройства (такие как светодиоды LED (Light-Emitting Diode) и полупроводниковые лазеры). Другим важным свойством подобных материалов является относительно широкая запрещенная зона, что обеспечивает их достаточно высокое удельное сопротивление. Благодаря этому они пригодны (хотя и не являются оптимальными) в качестве подложки для передачи СВЧ-сигналов, и это объясняет их успешное применение в качестве материалов для СВЧ монолитных интегральных схем (ММИС — Monolithic Microwave Integrated Circuits). Однако сейчас появляются новые материалы, и далее будут рассмотрены наиболее важные из них.

Судя по названию книги, она затрагивает необычайно большое количество областей, связанных с физикой полупроводников и активных приборов, и такой объем может показаться чрезмерным для некоторых читателей. Чтобы облегчить им процесс чтения, основные вопросы по физике полупроводников были собраны в главе 3, и если какие-то из рассматриваемых там вопросов неинтересны или уже знакомы читателю, то он может пропустить эту главу. Такой подход основывается на нашем опыте, который свидетельствует о том, что для эффективной разработки мощных полупроводниковых приборов основным условием является понимание физики полупроводников. Полупроводниковый прибор, используемый в усилителе мощности, часто работает на пределе возможностей данного материала и технологии. Знание этих предельных возможностей и физических основ, которыми определяются эти возможности, важно для создания надежного устройства с высокими параметрами. В СВЧ-электронике постоянно появляются новые типы приборов, новые технологии и материалы, однако базовые принципы, на которых развивается СВЧ-электроника, остаются неизменными. Понимание этих основных принципов позволяет понять логику и непрерывность развития.

Рассматривается весь диапазон от 1 до 50 ГГц, но основное внимание будет уделяться широкополосным усилителям и более высоким частотам



**Рис. 1.1.** В данной книге рассматривается область, которая обозначена сплошной линией на графике, представляющем развитие твердотельных усилителей за последние 20 лет в сравнении с электрoвакуумными лампами. Также показан диапазон мощностей и частот, который используется мобильными телефонами

(тем, на которых можно получить достаточно высокую мощность). Именно эти области, по нашему мнению, представляют особый интерес для будущего развития. Хотя можно было бы привести множество доводов для подобного выбора, одной из основных причин также является то, что именно этот диапазон связан с областью наших профессиональных интересов и обладанием достаточно высокой компетентности.

### 1.1.1. Перспективы развития

Потребность в более мощных твердотельных усилителях достаточно высока для всех областей их применения, и основной тенденцией является повышение мощности и рабочей частоты. Для достижения данной цели существует два основных пути: разработка методов эффективного суммирования мощности и повышение мощности активных приборов.

В большинстве твердотельных усилителей мощности, и в особенности с высоким уровнем мощности, используются методы суммирования мощности отдельных активных приборов. Считается, что новые методы суммирования с малыми потерями перспективны. Основным преимуществом такого метода повышения выходной мощности является более эффективное распределение рассеиваемой мощности. В качестве примера в главе 7 рассмотрим усилители мощности на основе планарных радиальных сумматоров, в которых усилители мощности равномерно распределены по периферии сумматора, чем достигается равномерное распределение тепла. Сегодня многие сумматоры высокой мощности с низким уровнем потерь накладывают ограничения на рабочую полосу. Однако считается, что развитие технологий позволит создать широкополосные сумматоры, которые сохранят свои преимущества в отношении рассеиваемой мощности.

Если говорить об уровне мощности активного прибора, то сегодня наибольшие ожидания связаны с новыми полупроводниковыми материалами с широкой запрещенной зоной, в особенности это относится к нитриду галлия GaN (Gallium Nitrid). Если активные слои GaN наращиваются на карбиде кремния SiC (Silicon Carbide), то высокая теплопроводность подложки обеспечит хороший теплоотвод и в этом случае выходная мощность может в пять раз превышать уровень выходной мощности для современных приборов на арсениде галлия (GaAs, Gallium Arsenide). Развитие в этой области идет настолько высокими темпами, что любые публикации быстро устаревают. В данной книге эта проблема решалась тем, чтобы основное внимание уделялось основным, фундаментальным принципам в надежде на то, что читатель сможет применить их для разработки усилителей с применением приборов и материалов, которые появятся в будущем.



## Литература

- [1]. Cripps, S. C., *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, Norwood, MA: Artech House, 1999.
- [2]. Cripps, S.C., *Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design*, Norwood, MA: Artech House, 2002.
- [3]. Sowlati, T., et al., «1.8-GHz Class E Power Amplifier for Wireless Communications», *Electronics Letters*, Vol. 32, September 1996, pp. 1846—1848.
- [4]. *9th European Conf. on Wireless Technology*, Manchester, England, September 10—12, 2006.
- [5]. Weitzel, C.E., «RF Power Amplifiers for Wireless Communications», *Gallium Arsenide Integrated Circuit (GaAs IC) Symposium, 24th Annual Technical Digest*, October 20—23, 2002, pp. 127—130.
- [6]. *2008 IEEE Radio and Wireless Symposium, January 22—24, 2008*.
- [7]. Baliga, B.J., *Silicon RF Power Mosfets*, Singapore: World Scientific Publishing Company, 2005.
- [8]. Dye, N., H. Granberg, and L. Leighton, *Radio Frequency Transistors: Principles and Practical Applications*, Woburn, MA: Butterworth-Heinemann, 2001.
- [9]. Freescale, RF LDMOS Power Transistors, <http://www.freescale.com>, last accessed April 20, 2009.
- [10]. M/A-COM, <http://www.macom.com>, last accessed April 20, 2009.
- [11]. Allison, R., «Silicon Bipolar Microwave Power Transistors», *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-27, 1979.
- [12]. Rudiakova, A., and V. Krizhanovski, *Advanced Design Techniques for RF Power Amplifiers*, The Netherlands: Springer, 2006.

## ГЛАВА 2

# УСИЛИТЕЛИ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ

### 2.1. Области применения и технические характеристики

При проектировании СВЧ-устройств характеристики усилителя мощности являются одним из наиболее важных критериев: усилитель мощности часто является наиболее дорогостоящим компонентом в составе системы, а его технические характеристики влияют на характеристики всей системы. В особенности это важно при выборе, что использовать: лампы бегущей волны (ЛБВ) или же твердотельные усилители мощности, так как характеристики этих двух типов усилителей сильно различаются. Даже если рассматривать только твердотельный усилитель, то важны не только уровень выходной мощности и рабочая частота усилителя, но и другие параметры. В зависимости от назначения и типа разрабатываемой системы важными и необходимыми могут оказаться и другие характеристики. Некоторые из них могут значительно влиять на стоимость системы, и тогда возникает препятствие их использованию из-за высокой стоимости. Другие могут слабо влиять на общую стоимость при правильном выборе сочетания параметров и технических решений.

Выходная мощность, коэффициент усиления, рабочая полоса частот и стоимость — вот те параметры, которые всегда включаются даже в самое короткое описание технических характеристик устройства. Другие характеристики становятся важными в каких-то особых областях применения: для усилителей высокой мощности (начиная от нескольких ватт) очень важным является вопрос, связанный с теплоотводом, для применения в авиации важны высокий КПД, малый вес и размеры, а для использования в космосе чрезвычайно важное значение имеет надежность устройства (хотя надежность важна всегда). Далее будет показано, что в большинстве телекоммуникационных систем необходимо обеспечить высокую линейность и низкий уровень фазового шума. Далее при проектировании усилителей со специальными характеристиками важной составляющей в стоимости устройства является продолжительность разработки.

Производство книг на заказ  
Издательство «ТЕХНОСФЕРА»  
125319, Москва, а/я 91  
тел.: (495) 234-01-10  
e-mail: [knigi@technosphaera.ru](mailto:knigi@technosphaera.ru)

Реклама в книгах:

- модульная
- статьи

Подробная информация о книгах на сайте  
<http://www.technosphaera.ru>

Ф. Сечи, М. Буджатти

## **Мощные твердотельные СВЧ-усилители**

Подписано в печать 14.09.2015  
Редактор – В.Г. Лапин  
Компьютерная верстка – С.С. Бегунов  
Корректор – Н.А. Шипиль  
Дизайн книжных серий – С.Ю. Биричев  
Дизайн – М.А. Костарева  
Выпускающий редактор – С.Ю. Артемова  
Ответственный за выпуск – С.А. Орлов

---

Формат 70x100/16. Печать офсетная  
Гарнитура Ньютон  
Печ. л.26. Тираж 500 экз. Зак. №  
Бумага офсет № 1, плотность 65 г/м<sup>2</sup>

---

Издательство «ТЕХНОСФЕРА»  
Москва, ул. Краснопролетарская, д.16, стр. 2

---

Отпечатано в АО «ИПК «Чувашия»  
428019, Чувашская Республика  
г. Чебоксары, проспект Ивана Яковлева, д. 13