

Содержание

Предисловие редактора перевода	9
Введение	11
Глава 1. Введение	13
1.1. Предмет данной книги.....	13
1.1.1. Перспективы развития.....	16
Литература.....	17
Глава 2. Усилители высокой мощности	18
2.1. Области применения и технические характеристики.....	18
2.2. Активные приборы.....	26
Литература.....	32
Глава 3. Физика активных приборов	34
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
Глава 4. Описание и моделирование усилителей мощности	88
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/Φ	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

Глава 5. Фазовый шум	115
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
Глава 6. Технологии изготовления СВЧ-усилителей мощности	144
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
Глава 7. Сумматоры и делители мощности	166
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
Глава 8. Общие принципы проектирования усилителей мощности	206
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
Глава 9. Коэффициент полезного действия усилителей мощности	247
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
Глава 10. Линейные усилители мощности	293
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
Глава 11. Специальные типы усилителей мощности	346
11.1. Усилитель Догерти	346
11.2. Усилитель Ширэя	351
11.3. Усилитель Кана с удалением и восстановлением огибающей	357
Литература	360
Глава 12. Схемы смещения	363
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
Глава 13. Тепловое проектирование	379
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
Информация об авторах	401
Предметный указатель	402

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

надеемся, 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

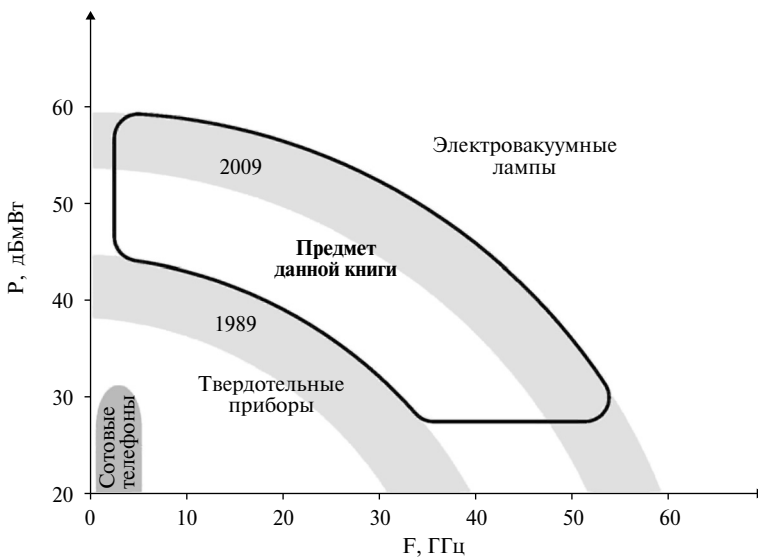


Рис. 1.1. В данной книге рассматривается область, которая обозначена сплошной линией на графике, представляющем развитие твердотельных усилителей за последние 20 лет в сравнении с электровакуумными лампами. Также показан диапазон мощностей и частот, который используется мобильными телефонами

(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.

При этом сегодня время разработки часто становится решающим фактором, например когда усилитель планируется использовать в составе определенной системы с жесткими сроками выхода на рынок.

В данной главе будет кратко рассмотрена сложная взаимосвязь между усилителем мощности и всей системы в целом. Иногда подобная взаимосвязь становится настолько тесной, что единственной возможностью становится одновременная разработка усилителя и самой системы. Однако чаще всего развивается двухсторонняя связь. Иногда производитель усилителей сам реагирует на требования определенных систем, внося изменения в технические характеристики или же добавляя новые качества, в других случаях появляются новые усилители, которые позволяют создавать другие или улучшать существующие системы. Рассматривая влияние отдельных характеристик усилителя мощности на свойства всей системы, подчеркнем важность оптимальной согласованности между техническими требованиями к усилителю и реальными потребностями системы. Также постараемся объяснить, чем вызван выбор тем для глав данной книги.

Давайте обратим внимание на некоторые специальные вопросы. Одним из наиболее важных вопросов при проектировании систем на основе усилителей мощности является проблема теплоотвода. В особенности она важна при использовании полупроводниковых приборов. Во-первых, транзисторы обладают гораздо меньшим КПД по сравнению с электровакуумными приборами. Далее в твердотельных усилителях мощности для получения высокой выходной мощности необходимо параллельно подключать несколько полупроводниковых приборов. При этом такое объединение вносит дополнительные потери. С другой стороны, как надежность, так и выходная мощность значительно снижаются при повышении рабочей температуры. Рассмотрим в качестве примера обычный усилитель мощности на 100 Вт в передатчике в популярном диапазоне 14—14,5 ГГц [1]. Вся потребляемая мощность (за вычетом 100 Вт), которая может достигать 2 кВт, в активных приборах (транзисторах) превращается в тепло, которое необходимо от них отвести. При этом температура активных приборов должна поддерживаться на возможно низком уровне. Известно, что при повышении температуры на каждые 10 градусов выходная мощность уменьшается на 5 %, при этом долговечность сокращается в два раза. Для отвода тепла обычно используются радиаторы с принудительным охлаждением, которые могут обладать достаточно большими размерами: такое решение может быть приемлемо для наземных коммерческих станций, однако неприемлемо для бортовых систем. По этой причине на самых ранних стадиях проектирования необходима тщательная оценка тепловых характеристик как усилителя, так и всей системы (см. главу 13). Однако даже при использовании наиболее сложных радиаторов их вклад может достигать половины от общего веса и объема усилителя. Проблема

отвода тепла осложняется необходимостью поддерживать разность температур между источником тепла и радиатором на минимально возможном уровне, поэтому использование новых приборов, способных работать при более высоких температурах, значительно облегчило решение задачи. Это является одной из причин разработки полупроводников с более широкой запрещенной зоной, таких как GaN и SiC, которые уже показывают превосходные характеристики (см. главу 3). Далее данный пример также иллюстрирует важную роль потерь — не только активных приборов, но и других элементов, которые в устройствах с низкими уровнями мощности могут рассматриваться как «идеальные», перестают быть таковыми при увеличении мощности. Потери не только вносят свой вклад в общее количество выделяемого тепла, при увеличении потерь также необходимо увеличивать и количество активных приборов, необходимых для обеспечения заданной мощности. Если вновь рассмотреть приведенный выше усилитель, то при увеличении потерь на 0,8 дБ в выходном сумматоре мощности потребуется увеличить количество активных устройств с 10 до 12. Придется соответственно увеличить количество активных приборов в других каскадах, при этом увеличение на 20 % количества используемых транзисторов приводит к соответствующему повышению потребляемой мощности. Как видно из разделов 6.2 и 7.5, малые потери волноводов (в особенности в сравнении с микрополосковыми линиями) дают им преимущество для использования в сумматорах мощности. Их недостатком является ограниченная полоса пропускания, и этот недостаток действительно является очень важным для многих применений, таких как средства радиоэлектронной борьбы и измерительные устройства, так как в данных применениях необходимо обеспечить как можно большую полосу частот.

Широкая полоса нужна не всегда, но там, где нужна, встает вопрос о компромиссе между увеличением полосы частот и мощностью. На рис. 2.1 это иллюстрируется на примере коммерческих усилителей [2]. Рисунок при помощи заштрихованных полос разделен на три области, каждая из которых относится к различному структурному построению. Как показано на рис. 2.2, типичная структура полупроводникового усилителя мощности включает в себя каскад усиления, который, по сути, является маломощным усилителем, обеспечивающим основную часть усиления, за которым следуют драйвер и выходные каскады. Оба они состоят из простых модулей усиления, в качестве которых могут быть либо монолитные интегральные схемы (СВЧ МИС), либо эквивалентные им гибридно-монолитные схемы. Более подробно обсуждаться данная тема будет в разделе 8.6, где будет показано, что производство мощности на рабочую полосу частот может служить характеристикой используемой технологии.

В любом случае эта величина отражает уровень технических характеристик усилителя. Другими словами, чем выше выбран уровень мощности, тем сложнее

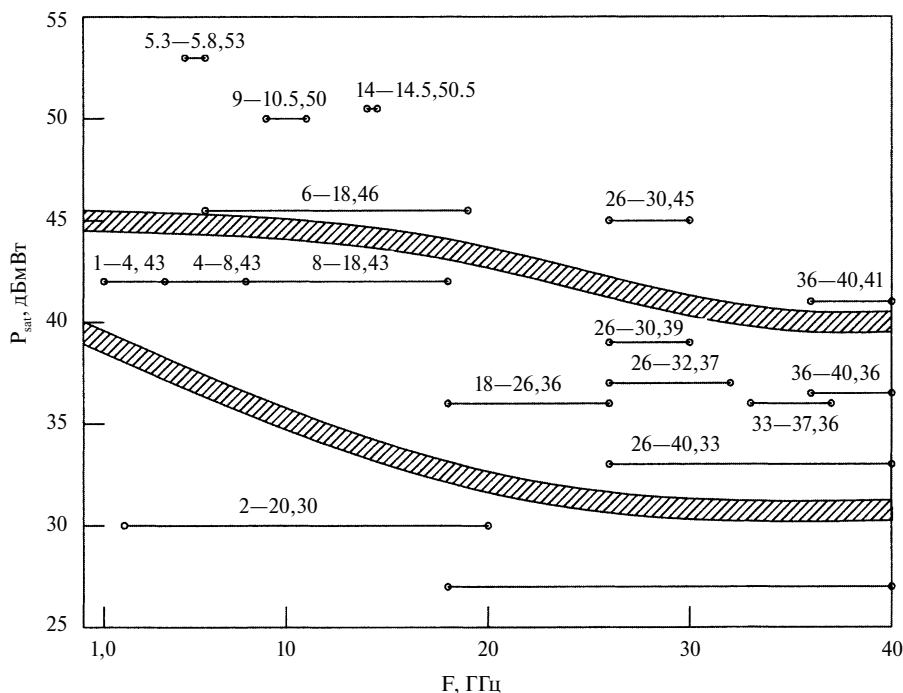


Рис. 2.1. Данные по коммерческим усилителям мощности. Для каждой модели первые два числа обозначают частотный диапазон в гигагерцах, последнее число обозначает уровень выходной мощности при насыщении (в дБмВт)

обеспечить широкую полосу частот. Следовательно, входные каскады работают при малой мощности и не ограничивают рабочую полосу частот усилителя, которая ограничивается характеристиками сумматоров и выходных цепей (тогда как драйверы и другие каскады оказывают меньшее влияние). Суммирование более простых усилительных модулей с малой выходной мощностью позволяет обеспечить широкую полосу. Два образца, характеристики которых показаны в нижней части рис. 2.1, созданы путем объединения при помощи микрополосковых линий двух монолитных микросхем из арсенида галлия. В центральной области находятся несколько приборов с более высокой мощностью, но меньшей полосой (однако еще достаточно большой). Эти приборы являются более сложными комбинациями, где используются коаксиальные, микрополосковые и полосковые сумматоры. В качестве активных модулей используются монолитные интегральные схемы или гибридно-монолитные керамические схемы. Первые используются на более высоких частотах, вторые — на более низких частотах. Оба варианта обеспечивают достаточно хорошее значение произведения мощности и полосы частот, однако каждый вариант обладает своими особенностями, которые более подробно рассматриваются в главе 6. Наиболее высокий уровень мощности, представленный в верхней области рисунка, в большинстве

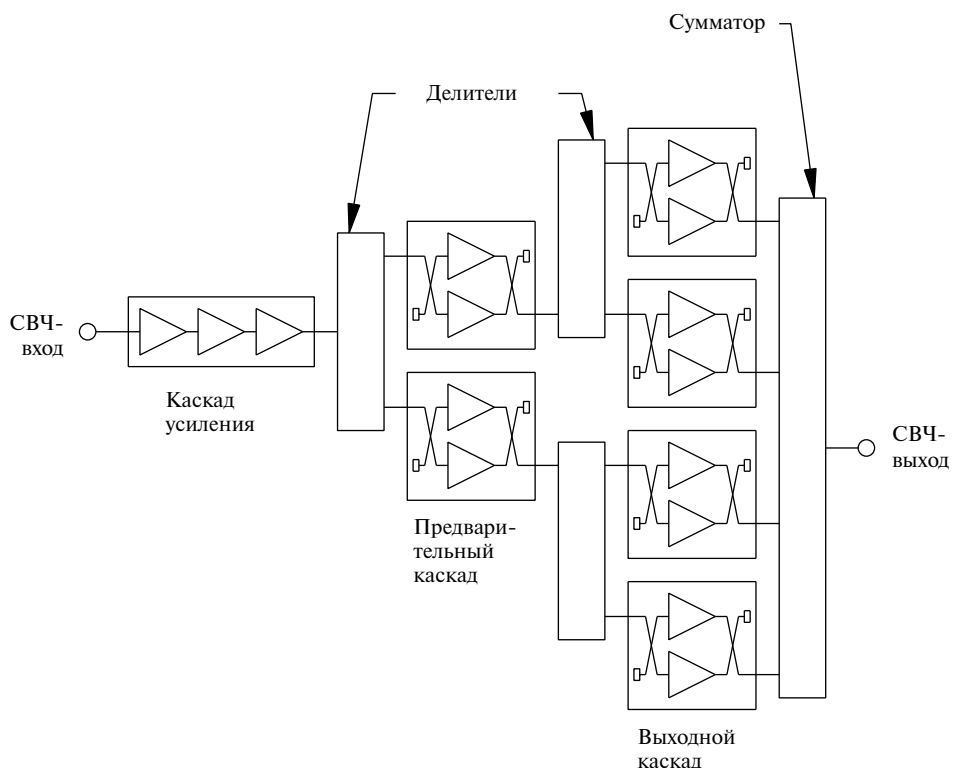


Рис. 2.2. Пример блок-схемы усилителя высокой мощности

случаев достигается путем использования сумматоров с радиальными волноводами. Они обладают малыми потерями и позволяют эффективно объединять большое количество мощных модулей. Для стандартных связанных диапазонов используются в основном транзисторы из арсенида галлия с внутренним согласованием, также могут использоваться монолитные схемы. Здесь ширина полосы в основном определяется сумматором. В главе 7 будет видно, что недавно предложенные коаксиальные сумматоры позволяют обойти эти ограничения. Основное, что можно понять из данного рисунка, — это то, что при высоких мощностях ширина полосы пропускания обеспечивается трудно. В случае когда система должна работать в двух различных частотных диапазонах (которые достаточно разнесены между собой, более чем на 10%), то дешевле использовать два усилителя, каждый для отдельного диапазона, а не один широкополосный.

Теперь давайте рассмотрим проблему линейности: этот параметр имеет особое значение для многих телекоммуникационных систем, так как обеспечение линейной характеристики необходимо для снижения интермодуляции и уменьшения ошибок при передаче данных. Усилитель особым образом искажает входной сигнал, амплитуду и фазу, и эти искажения становятся ключевым

параметром при проектировании усилителя, а также является наиболее важной частью в его технической спецификации.

Линейность усилителя часто описывается в терминах кривой сжатия (*compression curve*) или кривой насыщения (*saturation curve*), которая представляет собой зависимость выходной мощности от мощности входного сигнала. Если амплитуда входного сигнала мала, между входным и выходным сигналом существует линейная зависимость, а коэффициент усиления имеет постоянное значение. По мере увеличения входного сигнала коэффициент усиления обычно уменьшается, хотя могут наблюдаться и области увеличения коэффициента усиления. Затем выходной сигнал переходит в состояние полного насыщения, когда уровень выходного сигнала уже не будет изменяться в зависимости от уровня входного сигнала. Часто величина выходной мощности, при которой коэффициент усиления уменьшается на 1 дБ (P1дБ), принимается в качестве показателя искажений усилителя. Однако параметр P1дБ касается только амплитуды. В главе 10 будет рассмотрен тот вклад, который фазовые и амплитудные искажения вносят в интермодуляционные искажения (IMD — Intermodulation Distortion) и который приводит к возникновению паразитных составляющих в выходном сигнале усилителя. Далее будет показано, что измеренное значение интермодуляционных искажений (или аналогичного параметра) следует использовать в качестве характеристики линейности усилителя.

С точки зрения проектирования усилителя его линейность (в особенности это относится к мощным усилителям) в основном определяется характеристиками активного прибора и импедансом схемы. Чтобы получить оптимальные характеристики, разработчик должен иметь полную информацию о характеристиках выбранного активного прибора и хорошо понимать его физические свойства.

Авторы книги предполагают, что одним из факторов, который влияет на линейность усилителя, является тип используемого активного прибора. То же самое можно сказать и о шумовых характеристиках.

Если отобразить фазовый шум усилителя в виде зависимости от смещения частоты относительно несущей, то можно выделить две основные области: на низких частотах уровень шумов достаточно высок и уменьшается как $1/f$, тогда как на более высоких частотах уже наблюдается *белый шум*, уровень которого не зависит от частоты. Точка пересечения этих двух областей (которая носит название *corner frequency* — *частота излома*) обычно находится в диапазоне от нескольких герц до нескольких мегагерц, в зависимости от используемых приборов и конструкции усилителя.

На рис. 2.3 показан пример, представляющий результаты реальных измерений для усилителя мощностью 16 Вт, в диапазоне 1—4 ГГц, который изготовлен на основе полевых транзисторов из арсенида галлия. Область спектра вблизи

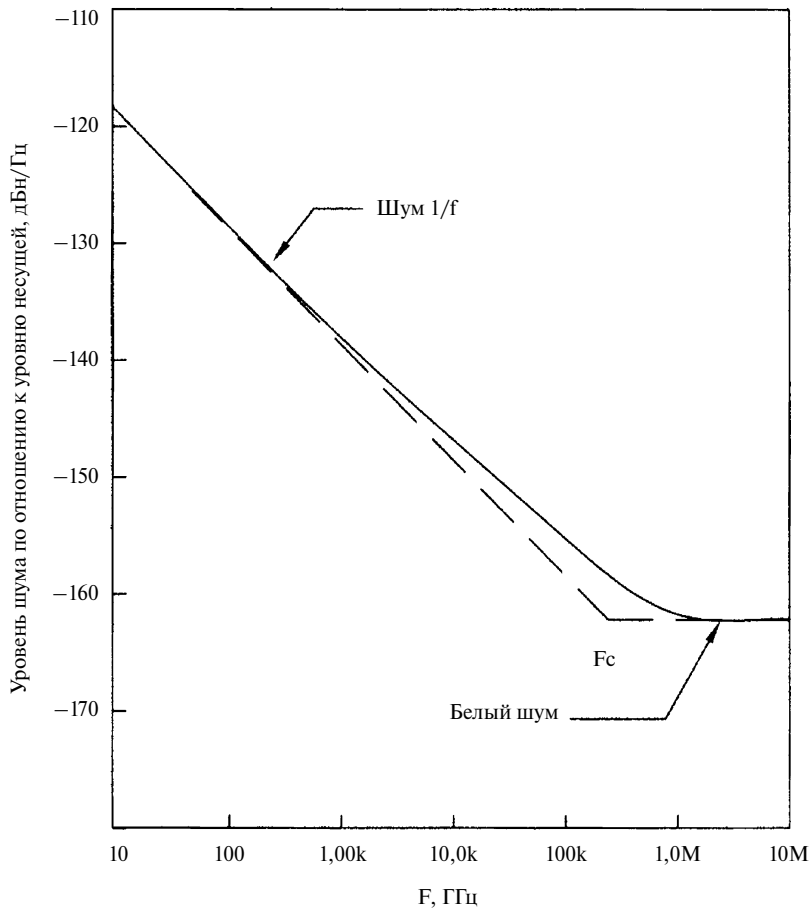


Рис. 2.3. Зависимость уровня фазового шума от частоты смещения относительно несущей (для усилителя мощности из арсенида галлия)

несущей практически всегда соответствует преобразованию вверх $1/f$ -шума, который присутствует в активных приборах, тогда как плоская область вдали от несущей в зависимости от характеристик усилителя может иметь другое происхождение. Этой области может соответствовать преобразованный вверх белый шум, или же основное влияние будет вносить тепловой шум резисторов. Для усилителей мощности белый шум не имеет особенного значения. Коэффициент усиления обычно обеспечивает входной сигнал с достаточно высоким уровнем относительно уровня шумов, таким образом, влияние усилителя на соотношение сигнал/шум всей системы ничтожно. Если же это не так, то простым и недорогим решением является добавление широкополосного малозумящего каскада, обычно на основе транзисторов с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ, НЕМТ — High Electron Mobility Transistor). Здесь мы не будем рассматривать данный тип шума и советуем обратиться к специальной литературе

[3—5]. С другой стороны, высокий фазовый шум вблизи несущей не так легко устранить. Фазовый шум важен не для всех случаев, однако его уровень имеет значение в тех случаях, когда информация передается при помощи фазы; например, он может ограничивать расстояние между соседними каналами в телекоммуникационных системах, ухудшать чувствительность современных радаров, которые измеряют фазу и амплитуду сигнала, а также вносить ошибки при передаче сигналов с цифровой модуляцией. Так как интерес к фазовому шуму возрастает, то ему посвящена отдельная глава (глава 5).

Далее будет приведен пример гибкого разграничения между проектированием системы и предназначенным для нее усилителем. Для импульсных радаров необходимо обеспечить формирование высокочастотного импульса, импульсный режим необходим для повышения точности измерений. В действительности, когда измерения выполняются путем передачи сигнала и последующего его приема, возможность отключения передатчика во время приема позволяет значительно улучшить соотношение сигнал/шум. Обычно схема формирования импульсного сигнала разрабатывалась для всей системы, часто для этого просто выполнялось включение и выключение высокочастотного сигнала. Однако если усилитель основан на ПТШ или ТВПЭ (НЕМТ), то он способен нормально работать только в классе А или АВ и не будет полностью выключаться при отключении высокочастотного сигнала. Для нормальной работы усилителя необходимо отключать его смещение по постоянному напряжению, что является достаточно сложной задачей при величинах тока десятки или сотни ампер. Кроме этого, современные системы требуют все более быстрого переключения, и модуляторы импульсов должны располагаться как можно ближе к усилителям. Из главы 12 будет видно, что лучших результатов можно добиться, включив схему формирования импульсов в усилитель мощности. В этом случае характеристики импульсов становятся частью технических характеристик усилителя. Важна не только форма ВЧ-импульсов, но также и стабильность усилителя в импульсном режиме, что может значительно влиять на характеристики системы, и поэтому должна определяться в технических требованиях на усилитель.

До сих пор при рассмотрении основных характеристик усилителя мощности не рассматривался коэффициент усиления, который является одним из наиболее важных рабочих параметров усилителя, однако редко возникают сложности в достижении требуемой величины. Подобно белому шуму, коэффициент усиления можно достаточно легко и с небольшими затратами увеличить или уменьшить за счет добавления, удаления или замены каскада усиления в предварительном усилителе. Увеличение коэффициента усиления на 3 дБ приводит к увеличению стоимости усилителя всего лишь на несколько процентов, а увеличение на 3 дБ мощности в насыщении увеличивает стоимость в два раза. Применение монолитных интегральных схем, которые являются блоками

с достаточно высоким коэффициентом усиления, может вызвать затруднения для получения заданного значения коэффициента усиления, однако подобные вопросы возникают чаще всего при работе с обычными усилителями малой мощности. Задачей данного обзора, который ни в коей мере не претендует на полноту, является рассмотрение вопросов, связанных с усилителями высокой мощности, при этом особое внимание уделяется зависимости между техническими характеристиками усилителей мощности и параметрами системы, в которой они используются.

2.2. Активные приборы

В данном разделе рассмотрим наиболее важные активные СВЧ-приборы, при этом мы сосредоточимся на транзисторах, в особенности на тех, которые имеют высокие параметры на высоких частотах. Диоды, особенно диоды Ганна, все еще используются в маломощных недорогих усилителях, которые работают на очень высокой частоте. Однако транзисторы обладают лучшими характеристиками, и выбор настолько широк, что можно удовлетворить широкий диапазон требований. То, что нам интересны высокие частоты и сложные полупроводники, исключает из рассмотрения МОП-транзисторы с боковой диффузией (LDMOS), которые используются в качестве усилителей мощности для базовых станций [6]. Они относятся к обширному семейству полевых транзисторов, однако большинство проблем, которые в главе 3 обсуждаются по полевым транзисторам, также можно отнести и к МОП-транзисторам с боковой диффузией (LDMOS).

Одним из основных технологических новшеств, которое привело в последнее время к многообразию приборов на сложных полупроводниках, является развитие молекулярно-лучевой эпитаксии (МВЕ — Molecular Beam Epitaxy), а также химического осаждения из паров металлоорганических соединений (МОСVD — Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) (газофазная эпитаксия), которые были разработаны в конце 1970 и в начале 1980 годов. Данные технологии позволяют осаждать высококачественные кристаллические пленки различных материалов, создавая несколько слоев определенного химического состава и структуры. При этом обычно необходимо согласовывать кристаллическую структуру материалов, однако допускается определенное рассогласование, которое может создаваться при выращивании так называемых напряженных слоев. Эти технологии позволяют экспериментировать с самыми разнообразными материалами и структурами, что приводит к значительному сокращению времени разработки новых приборов, в особенности с использованием новых материалов.

Активные приборы с тремя выводами можно разделить на две большие группы: биполярные транзисторы (BTs — Bipolar Transistors) и полевые

транзисторы (FET — Field-Effect Transistors). Первые в общем представляют собой усилители тока, и управляющим элементом является *p-n*-переход (или *n-p*-переход). Как дырки, так и электроны участвуют в переносе заряда, ток переносится в *вертикальном* направлении, то есть перпендикулярно переходу, подложке и любой поверхности раздела, созданной эпитаксиальным выращиванием. По этой причине для создания биполярных транзисторов не требуется литографии с высоким разрешением. Их характеристики на высоких частотах в основном определяются способностью управлять толщиной переходов и их положением, а не формой электродов. Биполярные транзисторы способны обеспечивать высокие значения тока. Кроме этого, в них нет источников 1/f-шума (источником которого являются поверхности раздела с подложкой или верхняя поверхность). Благодаря этому они обеспечивают малое значение частоты излома и низкий уровень фазовых шумов. С другой стороны, полевые транзисторы определяются как *горизонтальные*, так как ток протекает параллельно подложке и управляющему элементу, в качестве которого используется переход либо барьер металл-полупроводник (включая МОП-структуру), ток через него может протекать только при пробое. Полевые транзисторы управляются напряжением, а не током, и перенос тока осуществляется только основными носителями заряда (обычно это электроны). Еще совсем недавно можно было услышать, что материалы с низкой подвижностью дырок можно использовать только для создания полевых транзисторов (включая большинство соединений A_3B_5). Развитие технологий MBE и MOCVD с возможностью выбора материалов для изготовления эмиттера, базы и коллектора, а также развитие технологий изготовления гетеробиполярных транзисторов определенно изменили ситуацию. Однако материалы с низкой подвижностью дырок в основном применяются для полевых транзисторов. Так как ток подвержен флуктуациям из-за инжекции зарядов из подложки и с поверхности, то все полевые транзисторы склонны к 1/f-шуму, хотя и в различной степени.

Кремниевые биполярные транзисторы (BJT — Bipolar Junction Transistors) стали первыми полупроводниковыми приборами с тремя выводами, которые оказались способными достичь сверхвысоких частот, это произошло в начале 60-х годов. Так как кремниевая технология была уже достаточно хорошо развита, то биполярные транзисторы быстро достигли максимума своих технических возможностей, которые ограничивались свойствами используемого материала. Основные характеристики ряда полупроводников, которые влияют на параметры электронных приборов, приводятся в табл. 2.1 [7, 8]. Некоторые из приведенных параметров могут изменяться в достаточно широком диапазоне. Выберем те значения, которые соответствуют рабочим условиям, а именно комнатную температуру и типичное значение концентрации доноров, равное $10^{17}/\text{см}^3$. Для карбида кремния представлены параметры, соответствующие кристаллической

структуре 4Н, которая наиболее распространена благодаря более высокой подвижности электронов. Для арсенида и нитрида галлия указаны типичные значения подвижности двумерного электронного газа (ДЭГ, 2-DEG — Two-Dimensional Electron Gas), используемого в транзисторах ТВПЭ-типа, которые будут рассматриваться в главе 3. К числу предпочтительных свойств относятся следующие:

- *широкая запрещенная зона*, что дает возможность выдерживать более высокие внутренние электрические поля и меньшую зависимость параметров материала от температуры, а также повышенную стойкость к ионизирующим излучениям;
- *низкое значение диэлектрической постоянной*, позволяет получить меньшую удельную емкость и работоспособность на более высоких частотах и больших ВЧ-токах;
- *высокая теплопроводность*, что особенно важно для приборов высокой мощности, так как данный параметр характеризует возможность отвода тепла от активной области;
- *более высокая напряженность электрического поля пробоя*, что обычно связано с большей шириной запрещенной зоны.

Что касается скорости электронов, и их подвижности, то их важность зависит от типа прибора. В полевых транзисторах носителями тока являются электроны, поэтому важны их свойства. Какой именно из указанных выше параметров будет определять частотные характеристики транзистора, зависит от величины электрического поля в наиболее критичной переходной области. В общем случае транзисторы, изготовленные на материалах с большей шириной запрещенной зоны, требуют более высоких напряжений и более высоких напряженностей электрического поля, в этом случае наиболее важным параметром будет являться скорость насыщения (saturation velocity). Если сравнивать кремний и другие полупроводники, указанные в таблице, можно заметить, что наибольшим недостатком кремния является низкая напряженность электрического поля при пробое, а также относительно низкая подвижность. Так как напряженность электрического поля ограничивается пробоем, то частотные характеристики будут определяться подвижностью носителей заряда (а не скоростью насыщения) Более подробно данные вопросы будут рассматриваться в главе 3.

В то время когда кремний достиг своих предельных возможностей в качестве материала для СВЧ-приборов некоторые материалы A_3B_5 , такие как GaAs и InP, уже получили распространение для оптических приборов благодаря широкой запрещенной зоне, что позволило использовать их для создания лазеров. Также они использовались для создания СВЧ-приборов благодаря эффекту Ганна, и подвижность электронов в них превышает подвижность в кремнии

Таблица 2.1. Свойства полупроводниковых материалов

Параметр	Единица измерения	Кремний (Si)	Арсенид галлия (GaAs)	Фосфид индия (InP)	Карбид кремния (SiC)	Нитрид галлия (GaN)
Ширина запрещенной энергетической зоны	эВ	1,12	1,43	1,34	3,2	3,4
Относительная диэлектрическая постоянная	—	11,9	12,5	12,4	10	9,5
Теплопроводность	Вт/К·см	1,5	0,54	0,67	4	1,3
Электрическое поле, необходимое для пробоя	МВ/см	0,3	0,4	0,45	3,5	3,3
Максимальная скорость электронов	10^7 см/с	1	1,5	2,5	2	2
Скорость электронов при насыщении	10^7 см/с	1	0,6	2	2	2
Подвижность электронов	$\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	1500	5600 (8000 ДЭГ)	4000	500	400 (1500 ДЭГ)
Подвижность дырок	$\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	450	400	150	низкая	низкая

значительно. Так как подвижность дырок значительно ниже подвижности электронов, то, естественно, для создания активных приборов лучше подходит структура, где используется один тип носителей электронов, а именно структура полевого транзистора. Существуют две основные причины, по которым арсенид галлия получил большее распространение по сравнению с фосфидом индия несмотря на меньшую скорость насыщения. Технология арсенида галлия была лучше разработана, а также имела менее строгие требования к механическим свойствам. Технологические линии, предназначенные для производства кремниевых приборов, с большими сложностями могли быть использованы для изготовления приборов на основе арсенида галлия (при этом увеличивалось количество разбитых пластин). Фосфид индия слишком хрупок и требует осторожного обращения.

Полевые транзисторы на основе арсенида галлия доминировали на протяжении многих лет. Изобретение транзисторов с высокой подвижностью электронов и всех последующих аналогов, в особенности псевдоморфных РНЕМТ (Pseudomorphic НЕМТ, псевдоморфный транзистор с высокой подвижностью электронов), еще более укрепило положение арсенида галлия — как в отношении рабочих частот, так и мощности (по крайней мере как материала для подложек). Все эти приборы основаны на гетероструктурах, содержащих также и другие соединения элементов A_3B_5 , [9, 10]. Однако с точки зрения потребителя все они являются приборами полевого типа, которые работают по одному

принципу, но отличаются хорошими характеристиками в части шумов, мощности и частотного диапазона. Использование гетероструктур позволяет преодолеть недостатки, свойственные арсениду галлия. Например, в качестве материала для канала в транзисторах псевдоморфный ТВПЭ используется GaInAs, где за счет использования индия можно увеличить максимальную скорость электронов до уровня, близкого к фосфиду индия. Однако так как все эти структуры выращены на подложке арсенида галлия, то их основным недостатком является низкая теплопроводность. При работе СВЧ-транзисторов высокой мощности, в особенности полевых транзисторов, выделяется большое количество тепла, которое необходимо рассеять и отвести через подложку. Несмотря на изобретение интегральных теплоотводов и переходных отверстий [11], в определенный момент в 1990 годах стало очевидным, что удельная мощность транзисторов на основе арсенида галлия ограничивается именно тепловыми свойствами. Даже если приборы специально разрабатывались для работы при высоких температурах, их основные параметры, такие как коэффициент усиления, мощность насыщения, а также максимальная частота колебаний, существенно зависят от температуры [12, 13]. Следовательно, максимальная рабочая температура канала в значительной степени ограничивается для обеспечения надежности и высоких параметров. Таким образом, плохая теплопроводность ограничивает работоспособность приборов.

Необходимость улучшать теплоотвод и повышать работоспособность при высоких температурах привлекла внимание к полупроводникам с более широкой запрещенной зоной [14, 15], которые в табл. 2.1 представлены карбидом кремния и нитридом галлия. В дополнение к высокой скорости насыщения эти материалы обладают высокой напряженностью пробоя и относительно низким значением диэлектрической постоянной, как и должно быть для материалов с широкой запрещенной зоной. Подвижность носителей зарядов относительно мала, однако в мощных приборах, работающих с высокими внутренними напряжениями электрического поля, частотные характеристики в основном определяются максимальной скоростью и скоростью насыщения. Кроме этого, гетеропереходы на основе GaN/AlGaN обладают выгодным сочетанием достаточно хорошей подвижности электронов (в табл. 2.1 данный параметр представлен для ДЭГ) и очень высокой плотности носителей зарядов [16, 17]. Это один из основных факторов, который обеспечил превосходные частотные характеристики ТВПЭ-транзисторов на основе нитрида галлия и вызвал стремительное развитие технологий на его основе [18]. К сожалению, стабильность характеристик двумерного электронного газа нарушается с повышением температуры в отличие от характеристик самого нитрида галлия, однако в любом случае характеристики будут лучше по сравнению с транзисторами на арсениде галлия [19]. Кроме этого, карбид кремния обладает очень высокой теплопроводностью,

что определяет тепловые характеристики приборов на основе нитрида галлия, который выращивается на подложке из карбида кремния [20, 21]. В настоящее время не существует технологии для выращивания кристаллов нитрида галлия, однако пленки хорошего качества можно выращивать на сапфире, карбиде кремния (SiC) или даже на кремнии (однако при этом необходимо создавать переходный слой в целях уменьшения напряжения). Наилучшие результаты были получены на SiC, однако использование кремния обеспечивает весомые экономические преимущества, то есть имеется возможность для развития двух этих технологий.

В табл. 2.2 приводятся основные характеристики некоторых СВЧ мощных транзисторов ведущих производителей. Хотя здесь не приведены транзисторы для частот ниже 4—5 ГГц, также сделаем исключение для ГБТ (НВТ — Heterojunction Bipolar Transistor, гетеробиполярный транзистор) на основе

Таблица 2.2. Краткие характеристики транзисторов

Обозначение	Тип транзистора	Максимальная частота усилителей мощности, ГГц	Максимальная частота генерации, ГГц	Коэффициент шума (на ГГц), дБ	Граничная частота излома низкочастотных шумов, Гц	Плотность мощности (на ГГц), Вт/мм
Биполярные транзисторы, кремний	Биполярный	10	50	2 (2)	5—50 кГц	1,5 (5)
Биполярные транзисторы с гетерогенным переходом, арсенид галлия	Биполярный	20	200	3 (10)	1—50 кГц	4 (10)
Полевые транзисторы, арсенид галлия	Полевой	15	100	1 (10)	1—100 МГц	1 (10)
Псевдоморфные транзисторы с высокой подвижностью электронов, арсенид галлия	Полевой	50	200	1 (30)	1—100 МГц	1,5 (30)
Транзисторы с высокой подвижностью электронов, нитрид галлия	Полевой	более 50	200	1 (30)	1—100 МГц	более 7 (30)
Полевые транзисторы, карбид кремния	Полевой	10	60	3 (2)	100 кГц — 100 МГц	5 (10)

арсенида галлия, так как они также могут использоваться на высоких частотах [22], в особенности когда необходимо обеспечить низкий уровень $1/f$ -шумов. Здесь представлены реальные типы транзисторов, которые можно получить от нескольких основных производителей. Были сообщения о транзисторах с более высокими параметрами (например о более высоких рабочих частотах), однако здесь представлены те, которые обладают достаточным уровнем мощности. По тем же соображениям сюда не включены транзисторы на фосфиде индия (InP — Indium Phosphide). Они имеют самые лучшие частотные характеристики, однако их уровень мощности относительно низок [23, 24]. Для приборов с гетеропереходом в качестве ориентира использовались транзисторы на GaAs и GaN, хотя для каждого транзистора также используются некоторые материалы A_3B_5 . Шумовые параметры приборов с широкой запрещенной зоной все еще являются предметом исследований. В этом отношении характеристики GaN достаточно схожи с характеристиками GaAs. Также появляются сообщения о том, что в этом отношении может представлять интерес карбид кремния, который обладает достаточно хорошими характеристиками $1/f$ -шума [25–27]. Однако наиболее выдающимися параметрами, приведенными в таблице, являются уровень мощности и частотные характеристики транзисторов на основе нитрида галлия (GaN). Нет никаких сомнений, что эра кремния и арсенида галлия завершается и начинается эпоха нитрида галлия.

Литература

- [1]. Specific numbers are taken from the commercial amplifier C140145-50 manufactured by Microwave Power Inc.
- [2]. Sechi, F. N., and M. Bujatti, «Broadband High Power Amplifiers for Instrumentation», *67th ARFTG Conf. Proc.*, June 16, 2006, pp. 61–67.
- [3]. Fukui, H., *Low Noise Microwave Transistors and Amplifiers*, New York: Wiley, 1999.
- [4]. Virdee, B. S., B. Y. Benyamin, and A. S. Virdee, *Design of Broadband Amplifiers*, Norwood, MA: Artech House, 2004.
- [5]. Howard, R. M., *Principles of Random Signal Analysis and Low Noise Design*, Wiley, 2002.
- [6]. van Rijs, F., «Status and Trends of Silicon LDMOS Base Station PA Technologies to Go Beyond 2.5-GHz Applications», *Radio and Wireless Symposium Digest*, pp. 69–72.
- [7]. Levinstein, M., S. Rumyantsev, and M. Shur, (eds.), *Handbook Series on Semiconductor Parameters*, Vol. 1/2, London: World Scientific, 1996, 1999. Also see: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond>, last accessed on April 22, 2009.
- [8]. Trew, R. J., «SiC and GaN Transistors—Is There One Winner for Microwave Power Applications?», *IEEE Proc.*, Vol. 90, No. 6, 2002, pp. 1032–1047.
- [9]. S. Tiwari (ed.), «Compound Semiconductor Transistors: Physics and Technology», New York: IEEE Press, 1993.
- [10]. Schwierz, F. «Microwave Transistors—The Last 20 Years», *3rd IEEE Intl. Caracas Conference on Devices, Circuits, and Systems*, Cancun, Mexico, March 15–17, 2000, pp. D28/1–D28/7.

- [11]. Ishikawa, T., et al., «A High Power GaAs FET Having Buried Plated Heat Sink for High Performance MMICs», *IEEE Trans. on Electronic Devices*, Vol. 41, 1994, pp. 3–9.
- [12]. Wurfl, J., «Recent Advances in GaAs Devices for Use at High Temperatures», *IEEE High Temperature Electronic Materials, Devices and Sensors Conf.*, San Diego, CA, Feb. 22–27, 1998, pp. 106–116.
- [13]. Chiu, H., et al., «AlGaAs/InGaAs Heterostructure Doped Channel FETs Exhibiting Good Electrical Performance at High Temperatures», *IEEE Trans. on Electronic Devices*, Vol. 48, 2001, pp. 2210–2215.
- [14]. Yoder, M. N., «Wide Bandgap Semiconductor Materials and Devices», *IEEE Trans. on Electronic Devices*, Vol. 43, 1996, pp. 1633–1636.
- [15]. Zolper, J. C., and K. Shanabrook, (eds.), «Special Issue on Wide Bandgap Semiconductor Devices», *IEEE Proc.*, Vol. 90, No. 6, June 2002, pp. 939–1085.
- [16]. Zhang, Y., et al., «Charge Control and Mobility in AlGaN/GaN Transistors: Experimental and Theoretical Studies», *J. Appl. Phys.*, Vol. 87, 2000, pp. 7981–7987.
- [17]. Ambacher, O., et al., «Two-Dimensional Electron Gases Induced by Spontaneous and Piezoelectrical Polarization in Undoped and Doped AlGaN/GaN Heterostructures», *J. Appl. Phys.*, Vol. 87, 2000, pp. 334–344.
- [18]. Kao, M.Y., et al., «High-Efficiency and Low-Noise AlGaN/GaN HEMTs for k- and Ka-Band Applications», *CSMANTECH Conference Digest*, May 14–17, 2007, paper # 04a.
- [19]. Nuttinck, S., et al., «Thermal Analysis of AlGaN-GaN Power HFETs», *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 51, 2003, pp. 2445–2452.
- [20]. Milligan, J. W., et al., «SiC and GaN Wide Bandgap Device Technology Overview», *2007 IEEE Radar Conference*, Boston, April 17–20, 2007, pp. 960–964.
- [21]. Cappelluti, F., et al., «On the Substrate Thermal Optimization in SiC-Based Backside-Mounted High-Power GaN FETs», *IEEE Trans. Electronic Devices*, Vol. 54, 2007, pp. 1744–1752.
- [22]. Couturier, A. M., et al., «A Robust 11W High Efficiency X-Band GaInP HBT Amplifier», *2007 IEEE MTT-S Intl. Symp.*, Honolulu, HI, June 3–8, 2007, pp. 813–816.
- [23]. Sano, E., and K. Inafune, «Recent Progress in Devices and Circuit Technologies for mm-Wave Applications», *19th IEEE Intl. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM)*, Matsue, Japan, May 14–18, 2007, pp. 523–526.
- [24]. Deal, W. R., et al., «270-GHz MMIC Amplifier Using 35-nm InP HEMT Technology», *IEEE Microwave and Wireless Comp. Lett.*, Vol. 17, 2007, pp. 391–393.
- [25]. Rumyantsev, S. L., et al., «Generation and Recombination Noise in GaN/AlGaN Heterostructure Field Effect Transistors», *IEEE Trans on Electronic Devices*, Vol. 43, 2001, pp. 530–534.
- [26]. Levinshtein, M. E., et al., «Low Frequency and 1/f Noise in Wide-Gap Semiconductors: Silicon Carbide and Gallium Nitride», *IEE Proc. on Circuits, Devices and Systems*, Vol. 149, Feb. 2002, pp. 32–39.
- [27]. Levinshtein, M. E., et al., «Low Frequency Noise in 4H SiC», *J. Appl. Phys.*, Vol. 81, Feb. 1997, pp. 1758–1762.

ГЛАВА 3

ФИЗИКА АКТИВНЫХ ПРИБОРОВ

3.1. Введение

Как уже говорилось ранее, многие из характеристик усилителей мощности определяются рабочими характеристиками используемых активных приборов. Сегодня, в особенности на высоких частотах и мощностях, в качестве активных приборов в большинстве случаев используются транзисторы, чаще всего из семейства полевых транзисторов. В данной главе будет подробно рассмотрена их работа и уделено особое внимание наиболее широко используемым типам из этого семейства. Однако существуют и такие применения, где особенно важны те преимущества, которыми обладают биполярные транзисторы, например низкий уровень фазового шума. По этой причине будут также рассмотрены характеристики самого современного представителя биполярных транзисторов — гетеробиполярного транзистора (НВТ — Heterojunction Bipolar Transistor).

Даже для такого краткого и общего обзора, который представлен в данной главе, необходимо понимание ряда основных концепций физики полупроводниковых устройств. Здесь не будут рассмотрены эти концепции подробно, но краткий обзор, который будет представлен далее, поможет читателю лучше ориентироваться в данной области. Существует большое количество книг, которые рассматривают данную область науки на самых различных уровнях [1—5]. Если читатель обладает определенными знаниями в данной области, то он может пропустить раздел 3.2.

3.2. Основные концепции физики полупроводников

Одним из фундаментальных принципов, введенных квантовой механикой, является дуализм волна/частица для электронов и фотонов. Каким образом будет проявлять себя электрон или фотон, зависит от того, что определяется с большей точностью — положение или импульс (который связан с длиной волны).

Эти две переменные связаны между собой принципом неопределенности, который утверждает, что неопределенность для положения частицы будет обратно пропорциональна неопределенности значения импульса. В общем случае *частицу* можно представить в виде волнового пакета: при точно заданном положении в пространстве (короткий импульс, который в предельном случае может быть представлен точкой или частицей) пакет содержит большое количество длин волн. В обратном случае, когда имеется дело с одной определенной длиной волны, объект представляет собой *волну*, для которой нельзя определить положение. Аналогичным образом короткий радиочастотный импульс будет иметь очень широкий диапазон частот. Математическое описание будет аналогичным, хотя физическое понятие волны имеет несколько иной смысл: частица представляется при помощи *функции состояния*, которая позволяет определить вероятность любого свойства, относящегося к данной частице. В частности, возведенное в квадрат значение модуля волновой функции определяет вероятность того, что частица будет находиться в данной точке пространства. Законы Ньютона (или, вернее, формулировка Гамильтона для законов классической механики) заменяются уравнением Шредингера:

$$\nabla^2\Psi + (2m/\hbar^2)(E - V)\Psi = 0, \quad (3.1)$$

где Ψ — функция состояния, m — масса частицы, \hbar — постоянная (приведенная постоянная Планка), E — энергия частицы, а V — ее потенциальная энергия. Решения данного уравнения обычно возможны только для определенных дискретных значений — так называемых квантовых чисел, которые определяют возможные состояния частицы.

Основной принцип квантовой механики, известный как принцип запрета Паули, говорит о том, что никакие два электрона не могут одновременно занимать одно квантовое состояние. Другими словами, для каждого разрешенного сочетания квантовых чисел может существовать только один электрон. Выбор квантовых чисел определяется физической ситуацией. Особый интерес представляет кулоновское электрическое поле со сферической симметрией (атом водорода), в этом случае рассмотрим квантовые числа, которые традиционно обозначаются как n , l , m и s и соответственно обозначают энергию, угловой момент, магнитный момент и спин электрона. Спин может иметь два направления (вверх и вниз), таким образом, для каждого набора квантовых чисел n , l , m могут существовать два электрона. Три квантовых числа n , l , m связаны между собой двумя простыми правилами: (1) если задано значение n , то l может принимать только значения из ряда $0, 1 \dots n - 1$, (2) для каждого возможного значения l квантовое число m может принимать только какое-то из $2l + 1$ значений: $0, \pm 1, \pm 2 \dots \pm l$. Принцип Паули лежит в основе периодической таблицы элементов. Электроны вращаются вокруг ядер по дискретным орбитам,

которые определяются значением квантового числа n , и каждая орбита может содержать ограниченное количество электронов, которое определяется приведенными выше правилами. Необходимо заметить, что, хотя энергия атома водорода полностью определяется значением квантового числа n , в тех случаях, когда имеется более одного электрона, взаимодействие между ними приводит к расщеплению энергетического уровня на несколько подуровней, в результате квантовое число n уже не будет полностью характеризовать энергию такой системы. По мере увеличения количества электронов оболочка начинает постепенно заполняться. Заполненная оболочка является особенно однородной и стабильной конфигурацией [6].

Когда атомы располагаются на небольшом расстоянии друг от друга и формируют твердое тело, внешние оболочки атомов начинают взаимодействовать друг с другом и электроны, относящиеся к одним атомам, стремятся занять состояния, которые являются свободными в других атомах. В большинстве случаев такое взаимодействие ограничивается внешними оболочками, так что можно рассматривать положительно заряженный ион, который включает в себя все электронные оболочки за исключением внешней и отрицательно заряженные электроны, которые окружают ион. Здесь действуют две противоположные силы: сила притяжения между положительно заряженными ионами и отрицательно заряженными электронами и сила отталкивания между частицами, имеющими одинаковый заряд. Окончательный вид системы в состоянии равновесия будет зависеть от значений зарядов и от распределения электронов. Атомы располагаются таким образом, чтобы электроны имели возможность приблизиться к положительно заряженным ионам на наименьшее расстояние.

Если на внешней оболочке находится только один электрон, то обычно получим систему, в которой упорядоченный массив расположенных поблизости друг от друга ионов с положительным зарядом будет окружен электронами, имеющими практически однородное распределение (каждый атом отдает в это распределение один электрон) и которые находятся практически в состоянии свободного движения. Это относится к таким металлам, как медь, серебро или золото. Подобный результат получается, когда во внешней оболочке имеется два электрона. Металлы, как правило, имеют одну из этих двух внешних оболочек. Свободные электроны могут перемещаться под воздействием электрического поля, и именно эта способность объясняет высокую электрическую проводимость металлов.

Полупроводники имеют кристаллическую структуру, и в них имеется относительно небольшое количество электронов, способных проводить электрический ток. Кремний и германий являются одноэлементными полупроводниками. Эти элементы относятся к 4-й группе периодической системы и, следовательно, имеют во внешней оболочке 4 электрона, и для заполнения внешней оболочки

им необходимо еще 4 электрона. В этом случае система становится очень стабильной, так как каждый электрон внешней оболочки образует пару с электроном соседнего атома и имеющим противоположное значение спина, образуя так называемую ковалентную связь. В получаемой в результате структуре (которую часто называют структурой *алмаза*) каждый атом окружен четырьмя соседними атомами, находящимися на одинаковом расстоянии и расположенными в вершинах тетраэдра. Такая структура показана на рис. 3.1, для общности здесь рассмотрена структура, состоящая из двух различных атомов. Если рассматривать алмаз, кремний или германий, то А и В будут одинаковыми атомами. На рисунке ковалентная связь показана не прямой линией, а в веретенообразной форме — чтобы показать область с наибольшей вероятностью нахождения электронов, которые образуют ковалентную связь. В дальнейшем будет обозначаться длина ковалентной связи (или расстояние между атомами А и В) как t . Большинство соединений A_3B_5 (включая арсенид галлия (GaAs)) образуют кристаллическую решетку типа цинковой обманки, которая схожа со структурой алмаза, за исключением того, что места в узлах кристаллической решетки попеременно занимают атомы, относящиеся к двум различным элементам. Небольшая часть полупроводниковых материалов (включая нитрид галлия (GaN)) образуют структуру типа вюрцита не с кубической, а гексагональной симметрией. Однако в этих двух структурах ближний порядок аналогичен ячейке, показанной на рис. 3.1. Если для примера рассмотреть арсенид галлия, то каждый ион галлия будет окружен четырьмя ионами мышьяка, и, в свою очередь, каждый ион мышьяка будет окружен четырьмя ионами галлия. Из восьми электронов,

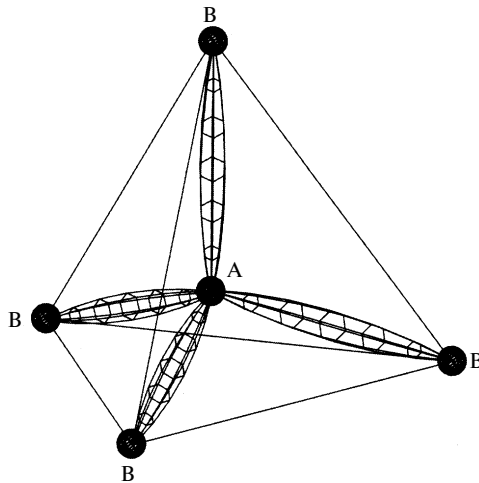


Рис. 3.1. Структура в виде тетраэдра, которая характерна для алмаза (структура типа цинковой обманки). В алмазе атомы А и В относятся к одному элементу, но в общем случае в структуре цинковой обманки атомы А и В относятся к различным элементам

которые формируют ковалентные связи, три предоставлены атомами галлия и пять — атомами мышьяка. Таким образом, возникает несбалансированность заряда между двумя ионами и поэтому возникает ионная составляющая в связи между атомами. Все же ковалентная связь преобладает [7], и свойства веществ на основе элементов A_3B_5 -группы периодической системы подобны свойствам элементов 4 группы.

Когда расстояние между атомами уменьшается и они начинают взаимодействовать между собой, то их энергетические уровни начинают расширяться аналогично тому, как ведут себя частоты резонансных контуров при их взаимодействии. Упрощенное представление показано на рис. 3.2, оно основывается на классических вычислениях из статьи [8] и качественно показывает, что происходит, когда в системе из большого количества (N) атомов углерода начинает уменьшаться расстояние между атомами при сохранении структуры кристаллической решетки типа алмаза. Хотя в данном случае рассматриваются атомы углерода, полученные качественные результаты применимы к любому атому из 4-й группы периодической таблицы с четырьмя электронами, так как во взаимодействии участвуют только электроны, находящиеся на самом высоком уровне.

Если рассматривать углерод, то для него квантовое число $n = 2$. Как уже говорилось ранее, существует небольшая разница в энергии для электронов

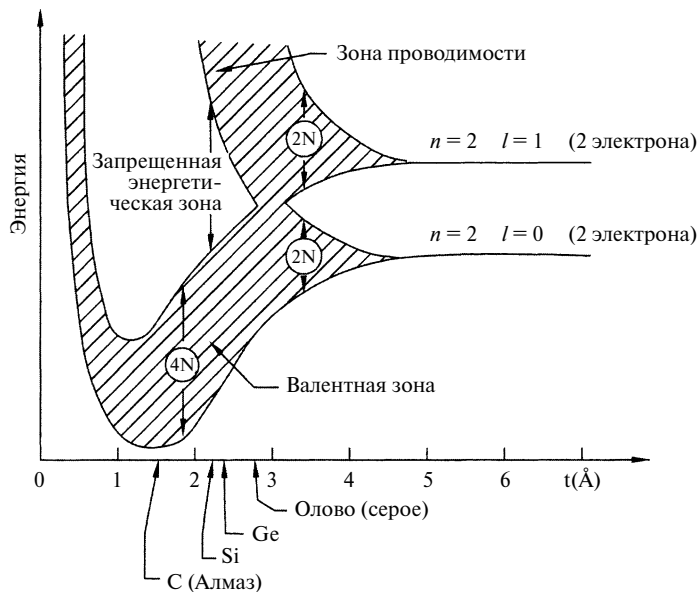


Рис. 3.2. Энергетические зоны для гипотетического материала, образованного атомами 4-й группы. По оси x показано расстояние между атомами, вещество имеет структуру алмаза. Обозначения $4N$ и $2N$ относятся к количеству состояний для каждой энергетической зоны

с квантовыми числами $l = 0$ и $l = 1$. Она связана с тем, что электронные пары по-разному взаимодействуют с другими электронами, в результате энергетический уровень с $n = 2$ разделяется на два подуровня. По мере уменьшения расстояния между атомами углерода энергетические уровни расширяются с учетом взаимодействия всех N атомов, и существует диапазон расстояний примерно между 3,2 и 2,8 ангстрем, при котором две подоболочки сливаются в одну. Становятся доступными все энергетические уровни, и электроны могут приобретать или терять энергию непрерывно. Таким образом, они приобретают те же свойства, что и электроны проводимости в металлах. Серое олово, которое кристаллизуется с образованием структуры алмаза на границе указанного диапазона, ведет себя как металл с ухудшенными характеристиками. (Как уже было сказано ранее, «настоящие» металлы не кристаллизуются в такую структуру, они образуют более плотную структуру, создавая электронную проводимость.) Дальнейшее уменьшение длины тетрагональной связи между атомами приводит к появлению особенного свойства, характерного для полупроводниковых материалов, а именно появлению запретных уровней энергии или *запрещенной энергетической зоны (запрещенной зоны)*. Волновые функции электронов, энергия которых попадает в данную зону, экспоненциально затухают и не дают устойчивых решений. Электроны, энергия которых близка к нижней границе запрещенной зоны, не могут увеличивать свою энергию непрерывно, им необходима энергия, которая превышает ширину запрещенной зоны. Следует заметить, что после слияния двух энергетических зон, которое происходит при $t = 3 \text{ \AA}$, на каждый атом имеется четыре квантовых состояния в нижней зоне, где могут разместиться все четыре электрона с внешней оболочки атома углерода с квантовым числом $n = 2$. Эти квантовые состояния показаны на рисунке как $4N$ в кружочке. При низких температурах нижняя энергетическая зона (которая носит название *валентной зоны*) будет полностью занята, тогда как верхняя энергетическая зона (*зона проводимости*) будет полностью свободной. При повышении температуры существует вероятность того, что некоторые электроны приобретают достаточно энергии для того, чтобы преодолеть запрещенную зону и обеспечить проводимость в полупроводнике. Вещество становится изолятором, когда запрещенная зона становится настолько большой, что возможность перехода в зону проводимости становится очень малой для всего диапазона рабочих температур. К таким веществам относится алмаз.

Так как поведение электронов описывается волновой функцией, то запрещенная зона является результатом периодической структуры кристаллической решетки. На практике, хотя большинство полупроводниковых приборов являются монокристаллами, большинство других твердых веществ имеют поликристаллический характер, однако размер монокристаллов, составляющих поликристалл, достаточно велик, поэтому можно использовать приведенную выше

теорию. Задача волн в периодических структурах рассматривалась с различных сторон. Если обратиться к классической книге Бриллюэна [9], то эта задача может быть описана при помощи электрических фильтров, если рассматривать энергию как частоту, а запрещенную зону — как полосу подавления фильтра.

Как и в случае атома водорода, распределение электронов в твердом теле описывается волновой функцией, которая является решением уравнения Шредингера. Но в данном случае потенциал не имеет сферической симметрии и имеет дело с периодической структурой ионов. Чтобы удовлетворить граничным условиям, волновые функции должны быть периодическими с периодом, равным периоду кристаллической решетки. Волновые функции будут соответствовать определенным диапазонам энергии, в результате возникают *запрещенные зоны*, для которых действительные решения отсутствуют. Если рассматривать ковалентные связи, показанные на рис. 3.1, то запрещенную зону можно рассматривать как то количество энергии, которое необходимо для разрыва связи, в результате чего каждый электрон будет способен свободно перемещаться от одного иона к другому. Если атомы располагаются очень далеко друг от друга, то связь является слабой и для ее разрыва потребуется небольшое количество энергии. По мере того как структура становится более плотной, энергия связи увеличивается. Данный эффект в особенности важен для понимания роли, которую играет легирование в полупроводниках. Давайте рассмотрим кристалл кремния, в котором один из атомов кремния заменяет элемент из 5-й группы периодической системы, у которого, следовательно, во внешней оболочке находится 5 электронов (для примера рассмотрим мышьяк). Этот элемент будет иметь тенденцию терять (*или отдавать*) один из электронов, тогда как оставшиеся четыре электрона будут использоваться для образования тетрагональных связей. Требуется совсем небольшое количество энергии, чтобы оторвать пятый электрон от атома мышьяка, так что он становится доступным для электрической проводимости. Такой материал называют полупроводником *n*-типа, так как носители заряда, обеспечивающие электрическую проводимость, в данном случае имеют отрицательный заряд (электроны), а атом мышьяка называют *донором*. Если же в кристалл кремния вводится примесь, относящаяся к III группе периодической таблицы, например бор, у которого во внешней оболочке имеется только три электрона, то атом бора будет стараться захватить (то есть принять) электрон для завершения связи. Для перехода электрона из одной связи в другую требуется не очень большое количество энергии, в результате такая разорванная связь может перемещаться по всему объему кристалла, играя роль носителя с положительным зарядом, который получил название «*дырка*». Данная ситуация иллюстрируется на рис. 3.3, где в качестве E_d и E_a обозначена соответственно энергия, необходимая для отрыва электрона от донора, и энергия, необходимая для привлечения к акцептору электрона,

относящегося к другой ковалентной связи. Заштрихованные области, относящиеся к зоне проводимости и валентной зоне, представляют собой электроны и дырки, которые доступны для электрической проводимости. Обычно большинство электронов проводимости в материалах n -типа поступает с уровней доноров, и лишь небольшая часть поступает из валентной зоны. Аналогично в материалах p -типа большинство дырок образуется за счет электронов, захваченных акцепторами.

В рис. 3.2 и 3.3 неявно проявляется очень сильное допущение, что в соответствии с принципом Паули электроны распределяются по широкому диапазону энергий, а не концентрируются на самом нижнем энергетическом уровне, как это было бы в соответствии с представлениями классической физики.

В соответствии с принципом Паули, который ранее уже использовался для рассмотрения квантовых состояний в атоме, только два электрона

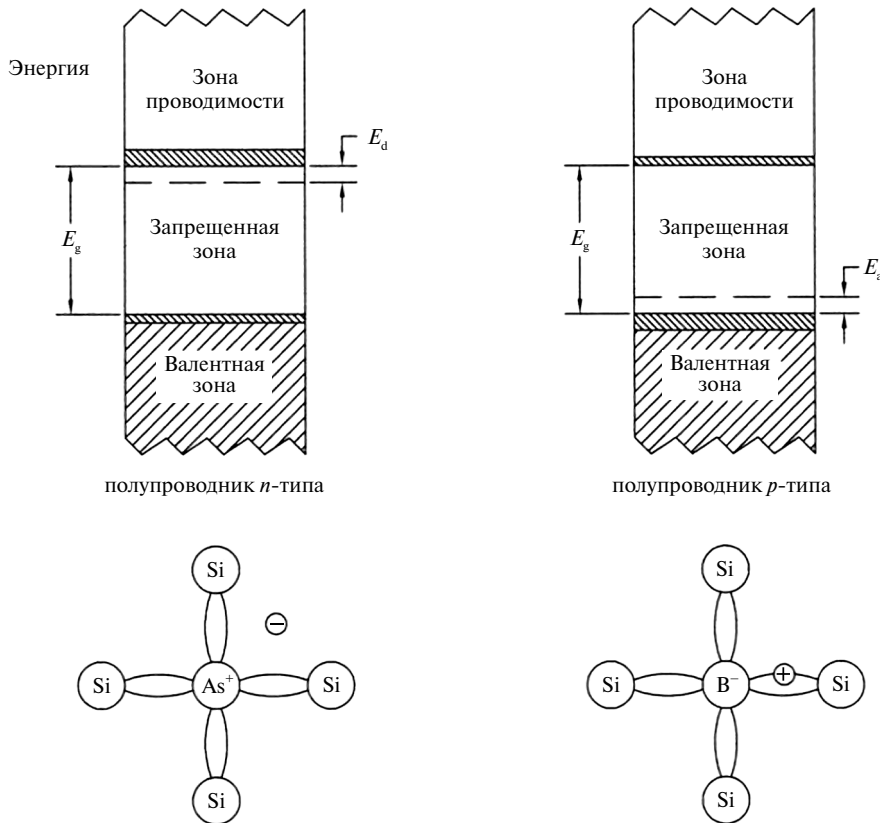


Рис. 3.3. Энергетические зоны для полупроводниковых материалов n -типа и p -типа. E_d — энергия, необходимая для перевода электрона от донора в зону проводимости (появляются свободные электроны), E_a имеет аналогичное значение для дырок относительно валентной зоны и акцептора