

ТРАНЗИСТОРНЫЕ ПЕРЕДАЮЩИЕ МОДУЛИ L- И S- ДИАПАЗОНОВ

Сегодня разработка радиотехнической аппаратуры наряду с созданием и производством самых современных транзисторов стала необходимым условием быстрой реализации новых системных идей в области радиолокации и специальных систем связи. В то же время это направление является важным источником мотивации новых разработок кремниевых транзисторов, направленных на достижение более высоких значений их мощности, КПД и полосы пропускания. Существенное достоинство этих приборов — относительно невысокая стоимость одного ватта выходной мощности в сравнении, например, с арсенидгалиевыми приборами, а также их более высокая надежность. Поэтому несомненный интерес представляет опыт разработки передающих СВЧ-блоков и модулей на предприятии ФГУП НПП "Пульсар", которое исторически было основоположником развития отечественной транзисторной электроники.

Основной элемент, определяющий технические характеристики твердотельных передающих устройств, — мощный кремниевый СВЧ-транзистор (рис. 1), который представляет собой сложную гибридную интегральную схему, работающую при предельно допустимых значениях плотности тока и при максимальных напряжениях. Верхняя по частоте эксплуатационная ниша мощных биполярных кремниевых транзисторов — L- и S-диапазоны. Сегодня активно продолжаются работы, направленные на повышение мощности этих приборов.

Для мощных кремниевых биполярных СВЧ-транзисторов естественным является режим работы с отсечкой тока, что существенно упрощает схемотехнические решения при реализации импульсного режима работы, используемого в радиолокации. Уровень мощности созданных на предприятии "Пульсар" кремниевых импульсных СВЧ-транзисторов, предназначенных для передатчиков радиолокаторов в L-диапазоне, может составлять 500 Вт при длительностях импульса до 10 мкс, 250 Вт при длительностях до 100 мкс и дости-

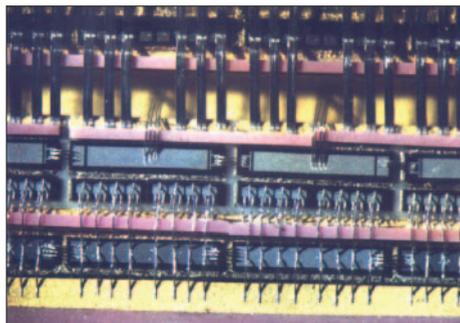


Рис. 1. Мощный СВЧ-транзистор L-диапазона

В.Аронов,
А.А.Евстигнеев,
А.С.Евстигнеев

гать 150 Вт при 500 мкс. В S-диапазоне уровень мощности составляет 75 Вт при длительностях радиоимпульса до 100 мкс и 50 Вт при 300 мкс. Транзисторы этих серий по уровню мощности лишь немного уступают лучшим зарубежным приборам, что создает хорошие предпосылки для развития отечественной твердотельной радиолокации. В случае реального коммерческого интереса рабочие частоты мощных транзисторных модулей могут быть расширены до диапазона 3,9–4,3 ГГц.

Достоинства передатчиков на полупроводниковых приборах неразрывно связаны с переходом от сосредоточенных (в случае применения электровакуумных устройств) к распределенным источникам СВЧ-мощности. Эти источники выполняются в виде блоков или модулей, мощности которых складываются в многоканальных сумматорах или в пространстве в системе активных фазированных антенных решеток. При этом применение большого числа модулей в системе (от десятков до нескольких тысяч) позволяет значительно повысить надежность станции в целом. Отказ даже 50% общего числа модулей не всегда лишает систему работоспособности.

Есть еще одно преимущество твердотельных распределенных передатчиков — более высокая, на несколько порядков, потребность в транзисторах, чем в мощных электровакуумных приборах. А это означает возможность реализации крупносерийного производства с высокими технико-экономическими показателями. При этом следует учесть, что при производстве кремниевых транзисторов доминирующими являются групповые технологические процессы.

ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА СВЧ-УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ

Фундаментальная проблема при разработке и производстве СВЧ-усилителей мощности — сложение мощностей многих каскадов, по-

Представляем авторов статьи

ЕВСТИГНЕЕВ Андрей Семенович, канд. тех. наук, начальник отделения ФГУП НПП "Пульсар", главный конструктор ряда разработок транзисторных СВЧ-блоков и модулей. Тел.: 8 916 314-8186.

АРОНОВ Вадим Львович, доктор тех. наук, профессор, главный научный сотрудник. Тел.: 365-2373.

ЕВСТИГНЕЕВ Алексей Андреевич, начальник лаборатории, главный конструктор двух комплексных разработок транзисторных СВЧ-блоков и модулей. E-mail: aleksey_e@mtu-net.ru



скольку необходимый уровень излучаемой импульсной мощности для твердотельных РЛС лежит в пределах 10–40 кВт. На сегодняшний день возможно эффективное сложение выходной мощности до 16 транзисторных каскадов, смонтированных в одном корпусе передатчика. При этом суммарная импульсная мощность достигает 3,0 кВт на частоте 1,3 ГГц и 800 Вт в полосе 2,7–2,9 ГГц (рис.2). Такие результаты получены благодаря высокой идентичности суммируемых каскадов и применению сумматоров типа "бегущей волны". В свою очередь идентичность каскадов обусловлена, прежде всего, идентичностью самих мощных СВЧ-транзисторов с внутренними согласующими цепями.



Рис.2. Модуль с выходной импульсной мощностью 800 Вт в полосе 2,7–2,9 ГГц

Ряд других проблем, возникающих при разработке усилителей мощности, связан с математическим моделированием мощного усилительного каскада, с анализом и подавлением поперечной неустойчивости в транзисторной структуре, со спецификой работы транзисторного каскада на рассогласованную нагрузку [1]. Отдельно следует назвать развитие методов синтеза мощных широкополосных транзисторных каскадов, работающих в существенно нелинейном режиме [2].

При проектировании усилительных модулей, предназначенных для комплектования передатчиков РЛС или формирования передающей системы АФАР, необходимо решать многофакторную задачу обеспечения следующих противоречивых требований:

- максимальной мощности;
- минимальных массы и габаритов (особенно для АФАР);
- фазовой стабильности;
- широкополосного режима работы;
- режима теплоотдачи;
- низкого уровня амплитудных и фазовых шумов;
- стабильности параметров радиоимпульса;
- автономного источника питания.

В последние годы в НПП "Пульсар" разработаны и освоены серийный выпуск целого ряда изделий, предназначенных для твердотельных передатчиков РЛС и АФАР [3]. Это, в частности, усилительный модуль для передатчика трассовой радиолокационной станции УВД "Утес". Разработчик и изготовитель передатчика и станции – ЛЭМЗ. В состав одного передатчика входят до 64 усилительных модуля с выходной импульсной мощностью 1,5 кВт на частоте 1,3 ГГц. Особенность модуля – жидкостная система охлаждения. Такое решение было принято в связи с тем, что выделяемая тепловая мощность модуля достигает 600 Вт. Компоновка передатчика представлена на рис.3. Сегодня введены в строй четыре станции подобного типа, и впервые появилась возможность положительной оценки эксплуатационных характеристик мощных СВЧ-транзисторов, усилительных модулей, а следовательно, и полупроводниковой станции в целом. Следующий модуль для твердотельных передатчиков РЛС – усилитель для передатчика корабельной станции (заказчик НПО "Салют"). Полоса его рабочих частот – 870–940 МГц, выходная мощность – 150 Вт, длительность радиоимпульса – 700 мкс, скважность 6.

В НПП "Пульсар" разработан и серийно поставляется двухканальный передатчик вторичного радиолокатора. Одно из требова-

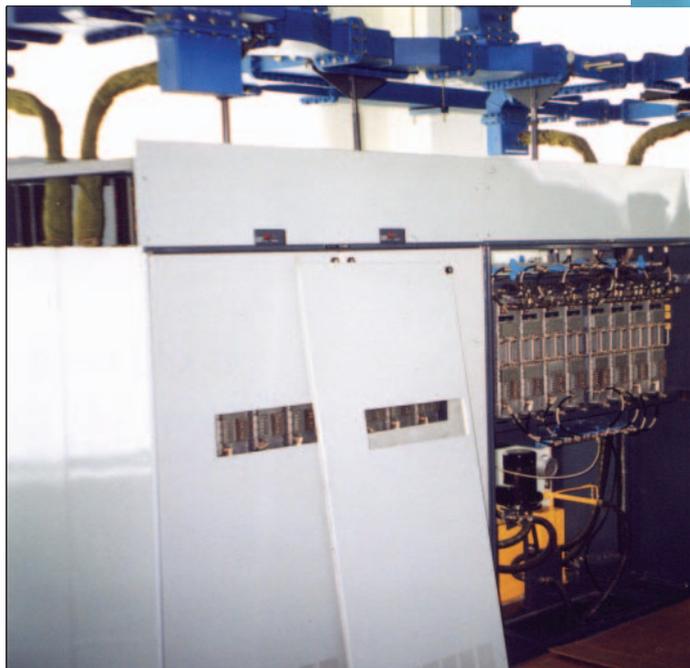


Рис.3. Компоновка модулей в передатчике трассовой радиолокационной станции

ний заказчика – малые габариты модуля, позволяющие разместить его в конструктиве имеющейся аппаратуры. Выходная мощность модуля по обоим каналам составляет 2,5 кВт на частоте 1,03 ГГц, удельная импульсная мощность – порядка 500 Вт/л.

К созданным в последнее время изделиям относится и четырехканальный приемопередающий модуль, представляющий собой законченный фрагмент АФАР (заказчик ННИИРТ). В модуль входят делитель-сумматор на четыре, фазовращатели, система управления, специальный канал для измерения фазовых и амплитудных параметров в режимах приема и передачи (рис.4). Выходная импульсная мощность по каждому каналу не менее 70 Вт.

Одна из интересных разработок – передатчик команд управления и сигналов запроса зенитно-ракетного комплекса (заказчик МРТЗ) (рис.5). Этот модуль имеет сложный спектр выходного сигнала. В сигнале управления присутствуют восемь низкочастотных модулирующих сигналов, каждая частота со своей глубиной модуляции. Передатчик включает канал запроса мощностью 1,5 кВт с длительностью радиоимпульса 0,5 мкс. Сигнал формируется командами компьютера. Спектральный анализ излучаемого сигнала и обмен информацией с компьютером проводятся в реальном масштабе времени. Модуль работает в полосе несущих частот

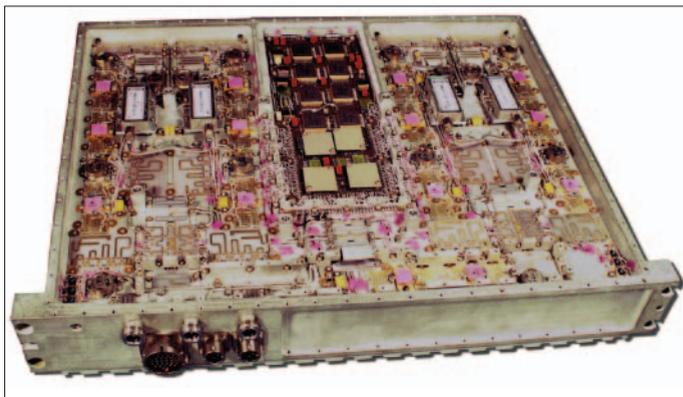


Рис.4. Четырехканальный приемопередающий модуль, представляющий собой законченный фрагмент АФАР

1–1,1 ГГц. Испытания комплекса прошли успешно, начата серийная поставка изделий.

Следует отметить и передающий модуль для АФАР на полосу частот 2,7–2,9 ГГц. Выходная импульсная мощность 140–180 Вт, коэффициент усиления – 23 дБ. Основные трудности, возникшие при проектировании и производстве этого модуля, – выполнение ограничений по габаритам и массе, связанных с неблагоприятными условиями эксплуатации АФАР (механическими, климатическими). Удельная импульсная мощность его порядка 100 Вт/л.

Основные проблемы, препятствующие достижению заданных электрических характеристик создаваемых модулей, – обеспечение стабильности параметров радиоимпульса (мощности, фазы, шума) и фазовой идентичности по ансамблю модулей в полосе рабочих частот, диапазоне входных мощностей и в диапазоне температур. Общая компоновка СВЧ-модулей в АФАР, иллюстрирующая плотность упаковки приемопередающими и выходными модулями, представлена на рис.6. Все модули, включая задающие гетеродинные, разработаны и производятся НПП "Пульсар" по заказу ВНИИРТ. Уже начата поставка четвертого комплекта этих изделий.

Уже практически решена поставленная в перспективном плане задача синтеза широкополосных цепей согласования для мощных нелинейных транзисторных каскадов. Ведется разработка модуля АФАР L-диапазона с перекрытием по частоте, превышающим половину октавы. На рис.7 представлены расчетные амплитудно-частотные характеристики отдельного каскада этого модуля в сопоставлении с экспериментально реализованной характеристикой. Там же



Рис.6. Компоновка СВЧ-модулей в полотно АФАР S-диапазона



Рис.5. Блок передатчика команд управления и сигналов запроса зенитно-ракетного комплекса

приведена частотная зависимость КПД экспериментального каскада. Широкополосное сложение трех таких каскадов позволяет рассчитывать на достижение выходной импульсной мощности не менее 200 Вт во всей полосе частот для довольно сложного в функциональном отношении

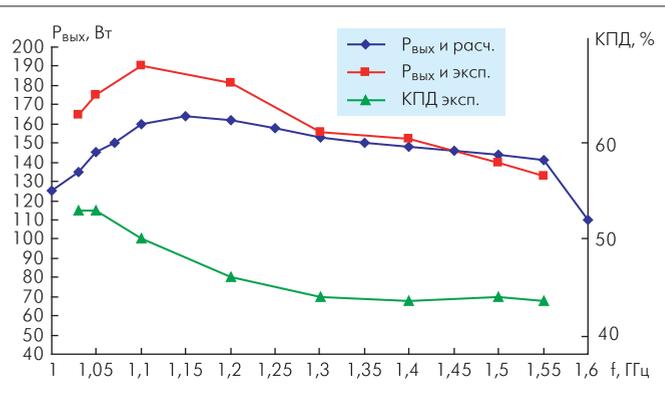


Рис.7. Расчетные и экспериментальные АЧХ сверхширокополосного мощного транзисторного каскада L-диапазона

приемопередающего модуля. Наряду с новым методом синтеза широкополосных цепей была разработана и новая транзисторная структура со специфическими внутренними согласующими цепями. Достигнутое расширение полосы частот мощных усилителей может привести к расширению ниши применения биполярных СВЧ-транзисторов. Правда, для этого необходимо, чтобы данное направление было системно востребовано в радиолокации или системах связи.

Упомянутый модуль АФАР L-диапазона помимо беспрецедентно широкой полосы пропускания отличается исключительно малыми габаритами, что достигнуто благодаря объемному совмещению в одном корпусе четырех приемопередающих каналов и использованию жидкостного охлаждения. Если говорить об основном объеме без выступающих элементов крепления и разъемов, то удельная выходная импульсная мощность модуля составит более 400 Вт/л.

В статье, насколько позволили ее рамки, рассмотрена лишь часть разработок кремниевых твердотельных передающих блоков и модулей дециметрового диапазона. Типичные сроки разработки такого транзисторного модуля до появления первого макетного образца составляют полгода-год, поставки опытных образцов, позволяющих укомплектовать первый образец системы, – два года. При этом необходимо отметить, что успехи предприятия "Пульсар" в области разработки мощных СВЧ-транзисторов достигнуты на существенно устаревшей и изношенной технологической базе. Сейчас идет строительство нового и модернизация действующего технологического цехов, что реально будет способствовать улучшению параметров разрабатываемых и производимых СВЧ-транзисторов.

Накопленный ФГУП НПП "Пульсар" опыт проектирования и производства, а также, что особенно важно, реальный опыт эксплуатации (наработка первых станций более 40 тыс. часов) позволяют сделать вывод о возможности успешного продвижения на рынок твердотельных РЛС и родственных им связанных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Диковский В.И., Евстигнеев А.С. Повышение выходной мощности генераторных СВЧ-транзисторов для работы в широком диапазоне частот. – Радиотехника и электроника, 1982, т.27, №12.
2. Аронов В.Л., Евстигнеев А.А. Синтез широкополосных СВЧ-транзисторных каскадов, работающих в режиме квазинасыщения. – Электронная техника. Сер. II, 2005, №1–2.
3. Аронов В.Л., Евстигнеев А.С. Передающие блоки модули L- и S- диапазонов для радиолокации. – Электронная промышленность. Сер. II, 2003, с.42–48.