

ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ СВЧ-ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УСИЛИТЕЛЯХ МОЩНОСТИ

В статье рассматриваются преимущества и недостатки нескольких широко распространенных полупроводниковых технологий, используемых в транзисторах мощных СВЧ-усилителей. В статье разъясняются основные вопросы, определяющие выбор каждой из этих технологий, рассматриваются преимущества и недостатки каждой из них. Представлено несколько примеров оптимальных решений для ряда приложений, работающих в разных частотных диапазонах и использующих разные типы сигналов.

ВСТУПЛЕНИЕ

Грамотное проектирование твердотельных СВЧ-усилителей мощности (high power amplifier, HPA), особенно тех, которые используются в критически важных оборонных, авиакосмических и метеорологических приложениях, начинается с выбора наиболее подходящей технологии используемых дискретных или интегральных мощных полупроводниковых приборов. В настоящее время разработчики мощных СВЧ-усилителей имеют возможность выбирать из нескольких полупроводниковых технологий, применяемых для усиления импульсных и непрерывных (continuous wave, CW) широкополосных или узкополосных сигналов в диапазоне частот от ВЧ, ОВЧ, УВЧ до L-, S-, C- и X-диапазонов и выше. Транзисторы подобных усилителей мощности созданы на основе не только ряда устаревших и хорошо зарекомендовавших себя технологий полупроводниковых приборов (кремниевая биполярная Si-BJT, кремниевая VDMOS), но и более новых: кремниевая LDMOS и GaN-on-SiC NEMT (нитрид-галлиевые ПВПЭ транзисторы на подложках из карбида кремния). В зависимости от диапазона рабочих частот и ряда других требований каждая из транзисторных технологий обладает своими преимуществами с точки зрения выходной мощности, коэффициента усиления и эффективности (КПД). Таким образом, выбор приемлемого решения с позиции затрат и стоимости конечного изделия может оказаться весьма непростой задачей.

ВЫБОР ТРАНЗИСТОРОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРИЛОЖЕНИЯ

Выбор технологии мощных СВЧ-транзисторов, как правило, основан на типе сигналов, с которыми они будут работать: например, с непрерывными сигналами (CW) или импульсными. При усилении импульсного сигнала наиболее важными его характеристиками являются длительность импульса и его коэффициент заполнения. Хотя мощные ВЧ- и СВЧ-транзисторы разных типов обладают достаточно высокой эффективностью, ни у одного транзистора КПД не равен 100%, поскольку некоторая часть мощности постоянного тока и высокочастотного сигнала неизбежно рассеивается в виде тепла, которое необходимо отвести. Тепловыделение при усилении постоянных (CW) или импульсных сигналов с большой длительностью импульса и с высоким коэффициентом заполнения различается в зависимости от используемой технологии. Это различие может оказаться иным при усилении импульсного сигнала с малой длительностью импульса или небольшим коэффициентом заполнения. Не существует некой универсальной технологии, которая отвечала бы всем требованиям, предъявляемым к современным усилителям мощности. Единственным решением в такой ситуации является сопоставление ключевых характеристик транзисторов разных типов с основными требованиями конкретного приложения. Нельзя также ограничиваться только сравнением спецификаций выбираемых транзисторов. Для обеспечения наилучшего сочетания производительности, надежности, минимизации тепловыделе-

ния, снижения общих затрат и сокращения перечня используемых элементов, как правило, приходится искать компромисс и на системном уровне.

УСИЛИТЕЛЬ НА БИПОЛЯРНЫХ КРЕМНИЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Хотя кремниевые биполярные транзисторы и выполнены по самой старой технологии, используемой для усиления импульсного сигнала, они еще не списаны со счетов. Транзисторы этого типа все еще применяются в серийном производстве и будут выпускаться в обозримом будущем в силу постоянного спроса. Даже в настоящее время кремниевые биполярные транзисторы по некоторым своим характеристикам не имеют аналогов. Например, усилители, выполненные на полупроводниковых приборах подобного типа, отличаются наименьшими габаритами, дешевизной и нуждаются только в подаче одного положительного напряжения питания. Однако из-за малого коэффициента усиления, дорогостоящих



▲ **Рис. 1.** Импульсная выходная мощность кремниевого биполярного транзистора IB1011S1500 составляет 1400 Вт при усилении импульсного сигнала с длительностью импульса 10 мкс и коэффициентом заполнения 1%. Рабочая частота: 1030 или 1090 МГц

и экологически небезопасных корпусов из бериллиевой керамики кремниевые биполярные транзисторы уже практически не используются при разработке новых усилителей мощности.

Ярким примером хорошо зарекомендовавшего себя мощного кремниевого биполярного транзистора может служить IB1011S1500 [1] компании Integra, показанный на рис. 1. Этот транзистор предназначен для систем опознавания, а также для вторичной радиолокации (secondary surveillance radar, SSR). Транзистор работает на частотах 1030 или 1090 МГц, обеспечивает усиление не менее 9,8 дБ и импульсную выходную мощность не менее 1400 Вт при КПД 48%, работе с импульсами длительностью 10 мкс и коэффициентом заполнения 1%.

КРЕМНИЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ, ВЫПОЛНЕННЫЕ ПО ТЕХНОЛОГИИ LDMOS

Кремниевая LDMOS-технология (горизонтальный МОП-транзистор, изготовленный методом двойной диффузии) — более современная транзисторная технология, чем кремниевая биполярная. Транзисторы, выполненные по этой технологии, широко используются в усилителях связанных радиопередатчиков, требующих высокой линейности усиления, а также в широкополосных СВ-усилителях. Эти транзисторы являются хорошим выбором для импульсных применений вплоть до L-диапазона. Выпускаются LDMOS транзисторы L- и даже S-диапазона, однако их производительность на этих частотах ниже, чем у нитрид-галлиевых (GaN) HEMT-транзисторов. Кремниевые LDMOS-транзисторы хорошо подходят для приложений с импульсами большой длительности и большим коэффициентом заполнения благодаря их очень низкому тепловому сопротивлению из расчета на 1 Вт, что также способствует их превосходной устойчивости к большим значениям КСВН (VSWR). Однако ограничивающим фактором при использовании кремниевых LDMOS-транзисторов является то, что у них ниже КПД не только по сравнению с биполярными, но и с GaN HEMT-транзисторами.

Хорошим примером современного кремниевого LDMOS-транзистора для авиационных приложений L-диапазона может служить ILD1011L950HV [2] компании Integra, показанный на рис. 2. У этого транзистора при усилении импульсного сигнала в режиме Mode-S ELM (Enhanced Message Length — передача длинных сообщений: пачка из 48 импульсов — 32 мкс вкл./18 мкс выкл., период повтора по-



▲ Рис. 2. ILD1011L950HV — кремниевый LDMOS-транзистор с импульсной выходной мощностью 1100 Вт на частоте 1030 МГц при усилении импульсного сигнала в режиме Mode-S ELM в системах вторичной радиолокации

сылку — 24 мс, усредненный коэффициент заполнения — 6,4%) на частоте 1030 МГц коэффициент усиления составляет около 16 дБ, а КПД — 55% при импульсной выходной мощности 1100 Вт. В отличие от аналогичных устройств, предлагаемых другими производителями, ILD1011L950HV представляет собой одиночный транзистор, а не двухтактную пару. Следовательно, ему требуется меньшая по габаритам и менее дорогостоящая упрощенная схема, поскольку отпадает необходимость в симметрирующем трансформаторе (балуне). Эту особенность следует обязательно учитывать при сравнении спецификаций в процессе выбора транзистора.

ПЕРЕХОД НА НИТРИД-ГАЛЛИЕВУЮ ТЕХНОЛОГИЮ

Технология нитрид-галлиевых ПВПЭ (GaN HEMT) транзисторов — новейшая технология изготовления мощных усилительных полупроводниковых ВЧ/СВЧ-приборов, быстро набирающая популярность во многих приложениях благодаря высокому коэффициенту усиления и большой выходной мощности в S-диапазоне и выше. Как правило, приборы этого типа выполнены на подложке из карбида кремния (SiC), которая, обеспечивая высокую теплопроводность, способствует повышению долговременной надежности работы устройств.

GaN HEMT-транзисторы в силу конструктивного исполнения на SiC-подложке, обеспечивающей оптимальное охлаждение, идеально подходят для импульсных приложений высокой мощности с их строгими требованиями к плотности мощности (по сравнению с СВ-приложениями). Кроме того, поскольку эти транзисторы отличаются высокой плотностью мощности, их выходная емкость из расчета на 1 Вт намного ниже, чем у конкурирующих с ними технологий. Это позволяет проводить настройку гармонических составляющих сигнала на выходе, что обеспечивает КПД выше 85% даже при киловаттных уровнях выходной мощности. Меньшая емкость из расчета на 1 Вт — то, что позволяет этим полупроводниковым

устройствам работать на гораздо более высоких частотах, чем при использовании технологии LDMOS.

Однако одним из недостатков, присущих GaN HEMT-транзисторам, является то, что они являются полупроводниковыми устройствами, работающими в режиме обеднения носителями. Это значит, что для их функционирования требуется и положительное, и отрицательное напряжения. Кроме того, напряжение на затвор такого транзистора подается до появления напряжения на его стоке. Чтобы нивелировать этот недостаток, компания Integra в усилительных субмодулях (паллетах) использует специальные схемы, распределяющие по времени управляющие импульсы затвора (gate pulsing and sequencing, GPS). Такое решение позволяет избежать затруднений, связанных с указанной особенностью GaN HEMT-транзисторов, и не приводит к увеличению числа элементов в конечном решении усилителя.

Примером современного GaN HEMT-устройства является транзистор IGN1011L1200 [3] компании Integra, представленный на рис. 3. Импульсная выходная мощность транзистора (предназначенного для систем опознавания и обзорных радиолокационных станций) превышает 1250 Вт. Он работает на частотах 1030 и 1090 МГц в том же схемотехническом решении, что является следствием исключительно низкого отношения емкости из расчета на 1 Вт. При коэффициенте усиления около 17 дБ у IGN1011L1200 — очень высокий КПД: 85% в режиме



▲ Рис. 3. IGN1011L1200 — мощный GaN-on-SiC транзистор с импульсной выходной мощностью 1250 Вт. Транзистор предназначен для работы на частотах 1030 и 1090 МГц в режиме Mode-S ELM в составе систем вторичной радиолокации

Таблица. Сравнение технологий мощных СВЧ-транзисторов для импульсных радиолокационных применений

Параметр	Технология		
	Кремниевая биполярная	Кремниевая LDMOS	GaN/SiC
Плотность мощности, Вт/см ²	высокая	средняя	очень высокая
Эффективность (КПД)	высокая	низкая	очень высокая
Усиление	низкое	высокое	очень высокое
Емкость/Вт (для максимальной мощности и полосы пропускания необходимо как можно более низкое значение)	средняя	средняя	низкая
Широкополосное согласование	сложное	сложное	простейшее
Сложность построения схемы смещения	низкая	средняя	высокая
Типовое напряжение смещения, В	28–60	28–50	24–50
Максимальная рабочая частота	S-диапазон (2–4 ГГц)	C-диапазон (4–8 ГГц)	более 10 ГГц
Тепловые характеристики транзисторов в импульсном режиме	посредственные	хорошие	хорошие
Устойчивость к высокому КСВН	слабая	высокая	средняя
Уровень зрелости технологии	высокая	высокая	средняя
Цена (долл./Вт)	средняя	низкая	средняя
Экологические характеристики	плохие (используется корпус из BeO)	отличные	отличные

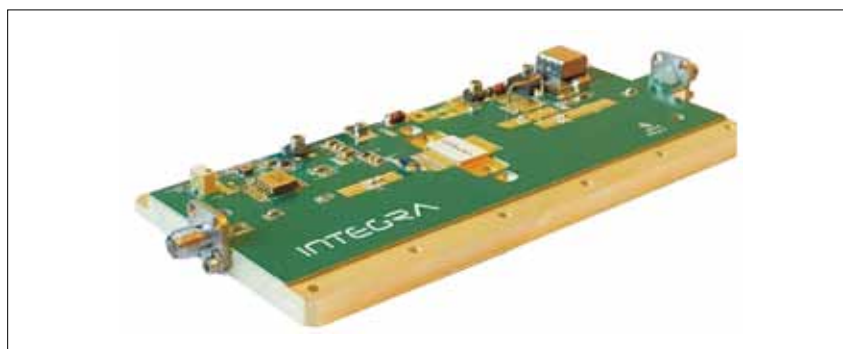
Mode-S ELM при усилении импульсного сигнала соответствующего формата (пачка из 48 импульсов — 32 мкс вкл./18 мкс выкл., период повтора посылок — 24 мс, усредненный коэффициент заполнения — 6,4%.

ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ КОНКРЕТНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ

Требования, предъявляемые конкретным приложением к параметрам проектируемого усилителя (тип сигнала, диапазон рабочих частот, уровень выходной мощности и т. д.), во многом определяют выбор транзисторной технологии. На более низких частотах все рассмотренные нами технологии изготовления транзисторов являются вполне приемлемыми кандидатами, и выбор типа транзистора зависит от того, что для проектируемого приложения является наиболее критичным. В S-диапазоне и выше GaN НЕМТ-транзисторы на подложке из карбида кремния находятся вне конкуренции и являются, пожалуй, единственными подходящими кандидатами. Однако если задача обеспечения баланса между стоимостью и производительностью сложнее, рекомендуется сначала выяснить, какая из транзисторных технологий традиционно является наиболее подходящей для импульсных или CW-приложений. В таблице приведены преимущества и недостатки трех рассмотренных транзисторных технологий применительно к радиолокации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Какие из характеристик выбираемых СВЧ-транзисторов окажутся наиболее важными в процессе выбора, зависит от баланса между произ-



▲ Рис. 4. Готовый усилительный субмодуль (паллета) включает в себя помимо усилительных цепей элементы высокочастотного согласования, схемы питания и управления, упрощающие интеграцию транзистора в усилитель мощности

водительностью и ценой создаваемого усилителя. В некоторых случаях применение дорогих транзисторов оправдано, если снижается стоимость системы в целом. Диапазон рабочих частот и тип усиливаемого сигнала (импульсный или CW) являются отправными точками при выборе транзисторной технологии. Именно эти параметры помогут значительно сократить время на подбор транзисторов и общей конструкции усилителя для конкретной задачи. Не последнюю роль играет и понимание особенностей работы конкретной структурной схемы усилителя мощности, а также дополнительные функции и возможности, предоставляемые производителем. Необходимо знать расстояние, на которое передается сигнал радара, рабочую частоту и разрешающую способность, чтобы определить бюджет на выбираемые мощные СВЧ-транзисторы.

Рассмотренные нами мощные СВЧ-транзисторы являются лишь единичными представителями широкого ассортимента полупроводниковых

приборов от компании Integra, изготовленных с использованием всех трех рассмотренных технологий [4]. Заметим, что транзисторы выпускаются с внутренним согласованием импеданса и без согласования, а также в разных корпусах. Кроме того, предлагаются решения в виде уже готовых усилительных субмодулей (паллет). Подобные интегральные решения помимо собственно усилительных цепей включают в себя элементы высокочастотного согласования, схемы питания и управления (рис. 4), что максимально упрощает их интеграцию в создаваемую систему. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. www.integrates.com/ib1011s1500-bipolar-1-band-avionics-transistor-operating-at-1300w.
2. www.integrates.com/ild10111950hvl-dmos-1-band-avionics-transistor-operating-at-950w.
3. www.integrates.com/ign10111200-l-band-gan-sic-transistor.
4. www.etsc.ru/files/integra/integra_brochure_rus.pdf.