

Ресурсные испытания мощных GaN-транзисторов на подложке SiC (при высокой температуре и большой мощности СВЧ)

Брайан Барр, Дэн Буркхард, M/A-COM Technology Solutions RF Power Products Group (США)

Перевод Андрея Данилова

Поскольку технология мощных GaN-приборов развивается и получает признание на мировом рынке, поставщики изделий просто обязаны подтвердить её надёжность. Эта статья посвящена подходам к испытаниям, используемым для установления частоты отказов в условиях высоких температур (HTOL) на постоянном токе (DC HTOL) и в режиме усиления СВЧ-сигнала (RF HTOL). Основное внимание уделено методу испытаний RF HTOL, который использует компания M/A-COM Technology Solutions для аттестации своей новой линейки MAGX дискретных мощных GaN-транзисторов на карбиде кремния. Обсуждаются результаты сравнения надёжности GaN и кремниевых полупроводниковых технологий.

Очевидно, что полупроводниковые приборы из нитрида галлия на карбиде кремния, предназначенные для усиления мощности на высоких частотах, быстро завоёвывают признание в радиочастотной и микроволновой промышленности. Обещание технологии обеспечить высокую плотность энергии и высокие значения КПД, а также работу в большой относительной полосе пропускания при поддержании более высокой температуры проводящего канала по сравнению с предыдущими полупроводниковыми технологиями, наконец становится явью.

Все технологии проходят через единый процесс становления: внедрение, принятие большинством и, наконец, утверждение в качестве основной технологии, взамен устаревшей. Однако прежде чем любая новая технология будет полностью принята, должна быть подтверждена её надёжность. Кроме того, современная рыночная среда тре-

бует значительного сокращения цикла проектирования и производства изделия при сохранении стабильности параметров и высокой надёжности. Производители полупроводниковых приборов мирового класса это понимают, поэтому регулярно подвергают свои новые разработки обширным испытаниям на надёжность и разбраковку по качественным показателям.

Группа RF Power Products компании M/A-COM Tech.Solutions имеет колоссальный опыт создания и внедрения мощных, высокочастотных и микроволновых устройств высокого качества для гражданских и военных применений. История компании начинается с 1970 года. За этот период M/A-COM Tech.Solutions разработала большое количество систем: начиная от диапазона УВЧ до S-диапазона для военной и коммерческой связи, первичных и вторичных радиолокаторов для систем управления воздушным движением, авиационных и спутниковых каналов связи, промышленных и медицинских систем, многие из которых используются и по сей день. Все изделия, устанавливаемые в эти системы, требуют строгой проверки на надёжность и/или разбраковку по этому параметру, так как это является важным компонентом прогнозирования общего ресурса для всех критически важных систем высокой надёжности. В результате компания M/A-COM Tech.Solutions обладает бога-

тым опытом в проектировании и тестировании компонентов со временем эксплуатации более 30 лет.

Недавно специалисты компании представили новую линейку мощных высокочастотных GaN-транзисторов с шириной затвора 0,5 мкм. Все разработанные приборы подверглись исчерпывающим испытаниям на качество и надёжность. Для аттестации линейки MAGX был выбран 30 Вт транзистор без внутреннего согласования импеданса (см. рис. 1). Этот прибор значительно больше тех, что производители обычно выбирают для сертификации и испытаний на надёжность. Однако меньшие конфигурации ячеек кристалла, порядка нескольких десятых долей миллиметра, являются стандартными. Использование большего по размеру и мощности прибора обусловлено желанием компании не просто показать «кристалл» устройства, а представить дизайн именно того изделия, которое предлагается на рынке.

Полупроводник представляет собой НЕМТ-транзистор с 6 мм затвором. Прибор смонтирован в керамическом корпусе с использованием золото-оловянного эвтектического припоя. Соединения между корпусом и устройством выполнены стандартной 2-мил (50 мкм) золотой проволокой.

Квалификационные испытания были разбиты на два основных раздела:

1. Тестирование корпусированных изделий, которые состояли из разбраковки на группы А, В и С по стандарту MIL-PRF-19500;
2. Испытания при большой мощности и высокой температуре, предназначенные для проверки надёжности самих полупроводниковых нитрид-галлиевых кристаллов.

Каждый этап отбраковочных испытаний проводился на отдельных группах изделий. В таблице 1 перечислены все проведённые испытания.

Было изготовлено значительное количество транзисторов из нескольких

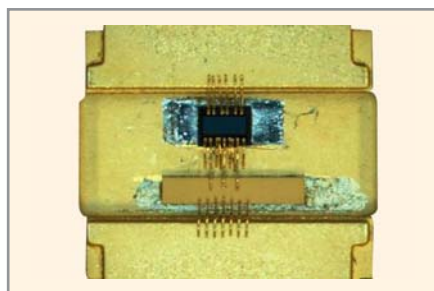


Рис. 1. НЕМТ-транзистор с продолжительной выходной мощностью 30 Вт

пластин и партий пластин. Группа 2 (см. табл. 1) была подвергнута разбраковке, включающей внутренний визуальный, ультразвуковой осмотр крепления кристалла (для исключения полостей в креплении, имеющих существенное значение), и проверку работоспособности на постоянном токе и СВЧ-сигнале. Выборка 5 изделий из этой группы была подвергнута ИК-сканированию с помощью системы Quantum Focus Infrascopie II с целью определения параметров теплового импеданса. Полученная информация была использована для расчёта температуры канала T_{CH} испытываемого транзистора в системе термотренировки:

$$T_{CH} = P_{DISS} \times (2,932 + 0,01973 \times T_{SURFACE}) + T_{SURFACE}$$

где $P_{DISS} = (P_{dc} - P_{out} + P_{in})$ – рассеиваемая мощность, P_{dc} – мощность на постоянном токе, P_{in} – входная мощность, P_{out} – выходная мощность; $T_{SURFACE}$ – температура на стадии нагрева; $\Theta_{jc} = 2,932^\circ\text{C}/\text{Вт}$ – тепловое сопротивление переход-корпус.

В общей сложности 18 приборов, включая 5, прошедших ИК-сканирова-

Таблица 1. Список всех проведённых испытаний

Группа 1 Разбраковка корпусированных изделий согласно MIL-PRF-19500	Группа 2 Эксплуатационный ресурс при высокой температуре и СВЧ-сигнале
Внутренний визуальный контроль Испытания на постоянном токе и СВЧ-сигнале Способность к пайке Стойкость к растворителям Термоциклирование Герметичный спай (сильное натекание) Прочность соединения Прочность вывода Влагодостойкость Одиночные удары Вибрация Постоянное ускорение Солевая атмосфера Термотренировка (прерывистый ресурс)	Внутренний визуальный контроль Ультразвуковой контроль крепления Испытания на постоянном токе и СВЧ-сигнале ИК-сканирование Герметизация Герметичный спай (сильное натекание) RF HTOL

Таблица 2. Результаты испытаний для определения среднего ресурса, основанные на критерии 1 дБ падения выходной мощности

Параметр	Ресурс, ч	Температура проводящего канала T_{CH} , °C
ML (T50)	529	320
ML (T50)	$1,5 \times 10^3$	305
ML (T50)	$3,7 \times 10^3$	290*
MTTF (среднее время безотказной работы)	$5,3 \times 10^6$	200

* Примечание: данные для температуры 290°С получены методом экстраполяции

ние, были затем отобраны для испытаний RF HTOL. Напряжение стока было установлено 50 В, напряжение на затворе было отрегулировано таким образом, чтобы установить ток покоя 250 мА. На вход прибора была подана

продолжительная мощность 2,5 Вт на частоте 3 ГГц. Во время испытаний напряжения стока и затвора поддерживались постоянными. Три группы приборов работали при постоянных температурах 290, 305 и 320°С соответ-

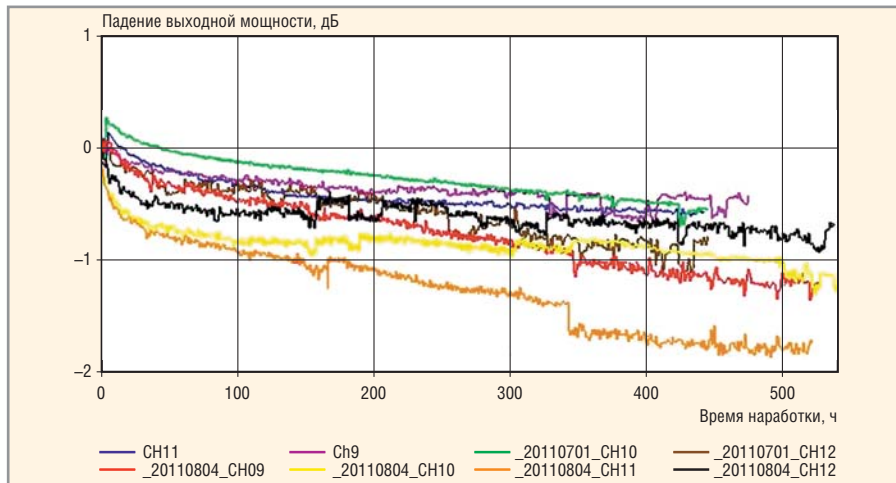


Рис. 2. График зависимости выходной мощности от времени наработки при температуре канала 320°C

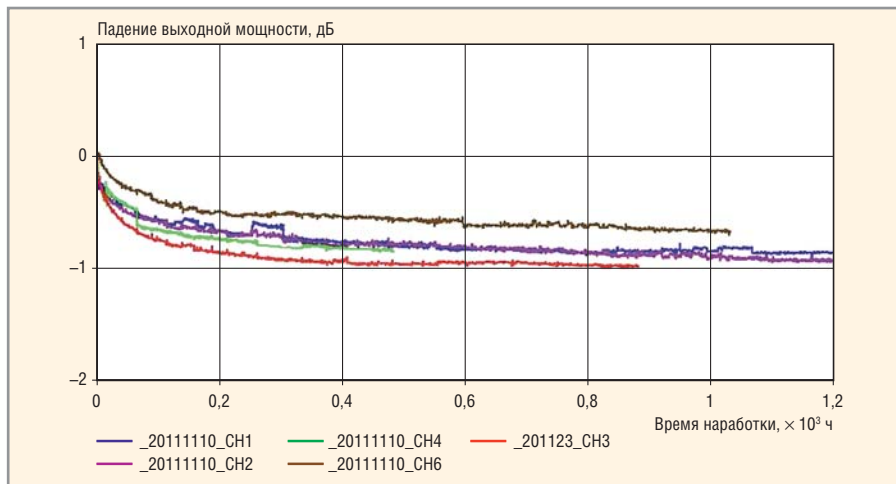


Рис. 3. График зависимости выходной мощности от времени наработки при температуре канала 305°C

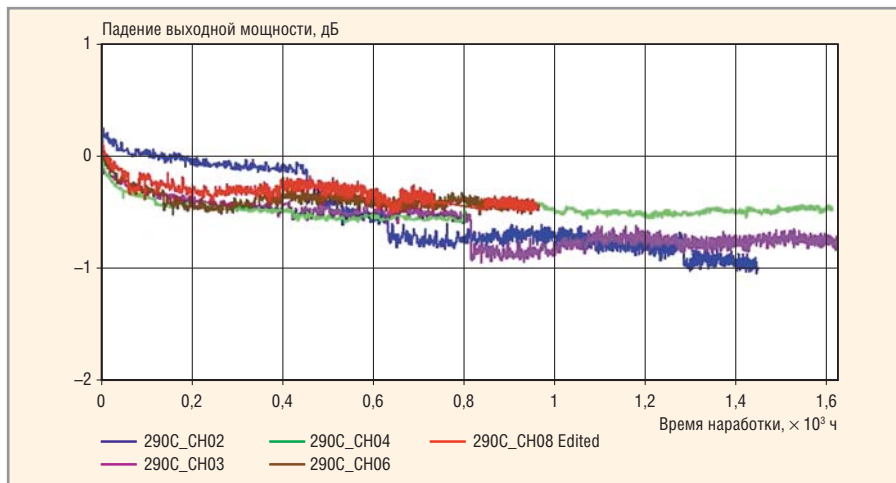


Рис. 4. График зависимости выходной мощности от времени наработки при температуре канала 290°C

ственно. Совокупное время сбора информации в ходе испытаний составило более 16 000 ч. При самой низкой температуре все изделия отдельно проработали более чем 1600 ч.

Через равные промежутки времени воздействие высокой температуры приостанавливали и проводили серию измерений параметров в режимах покоя и усиления СВЧ-сигнала при температуре 60°C для каждого испытуемо-

го изделия. Целью этих испытаний была проверка скорости деградации характеристик на высоких температурах и её влияния на качественные показатели изделий при работе в нормальных условиях.

Критерий отказа был определён как 1 дБ падение выходной мощности тестируемого устройства или как снижение на 20% тока покоя во время испытания. Любое из этих событий за время

испытаний считалось бы отказом. В ходе испытаний стало ясно, что 1 дБ падение выходной мощности происходит раньше, чем снижение тока стока. По этой причине оно было определено главным критерием отказа. Для изделий, которые не достигли данного критерия за время испытания, время наработки на отказ определялось методом экстраполяции из полученной кривой. В каждом конкретном случае был доступен достаточный объём данных, чтобы выявить хорошую зависимость для экстраполяции. В результате было рассчитано срединное значение ресурса для каждой температуры (см. табл. 2).

Как уже упоминалось, проведение ресурсных испытаний крупных изделий подобного рода не является типичным, и существует очень мало общедоступных данных по 3-температурным испытаниям надёжности таких GaN HEMT-транзисторов. До настоящего времени большинство ресурсных испытаний проводились с измерением нескольких температурных характеристик на постоянном токе без приложения СВЧ-сигнала. Таким образом, трудно сравнивать полученные результаты с результатами других производителей. Однако можно сравнить прогнозируемый ресурс с тем, что был заявлен для ограниченных энергий активации (E_a). Кроме того, эти испытания являются одними из немногих известных исследований, где используется значение теплового импеданса, полученное с помощью ИК-сканирования в режиме усиления СВЧ-сигнала. Важно отметить, что полученные результаты точно отображают значение температуры канала при точных настройках повышенной температуры. Данная программа испытаний, как полагают, более точно и строго предсказывает срединный ресурс, чем любая известная ранее, для изделий такого размера и уровня мощности.

Графики снижения выходной мощности СВЧ (см. рис. 2–4) демонстрируют общую тенденцию, где присутствует первоначальное падение качественных показателей в течение первых 100–200 ч. Впоследствии уровни параметров показывают значительно меньшую деградацию с течением времени. Это может указывать на наличие двух различных механизмов внутри изделия, которые приводят к снижению параметров. Промежуточные результаты измерений параметров при 60°C, сделанные через регулярные промежутки

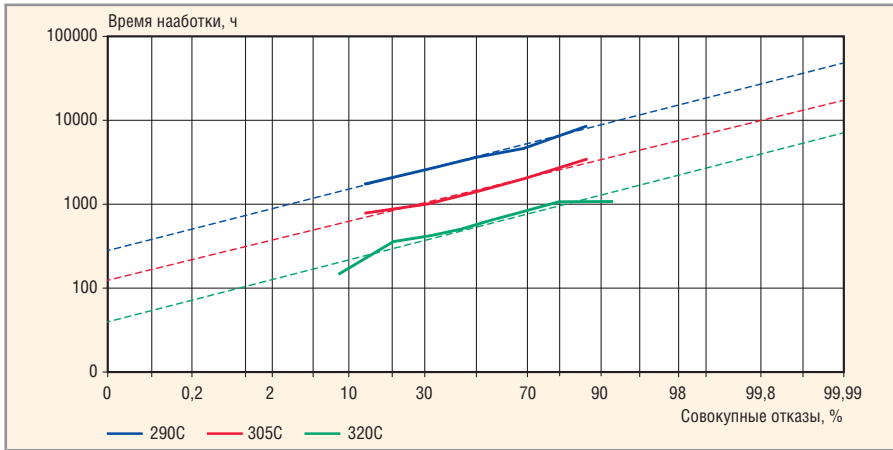


Рис. 5. Логарифмически нормальное совокупное распределение отказов

времени в течение всего срока ресурсных испытаний, согласуются с рисунками 2–4. На рисунке 5 представлен график логарифмически нормального совокупного распределения отказов. Соответствующий график Аррениуса по трём значениям температуры, использованный для экстраполяции снижения рабочей температуры, приведён на рисунке 6. По этим данным была рассчитана энергия активации, равная $E_a = 1,77$.

Полученные результаты считаются применимыми ко всему семейству из-

делий GaN HEMT компании M/A-COM Tech.Solutions. Следующий и очень важный шаг – подвергнуть изделия, прошедшие испытания RF HTOI, детальному изучению и анализу, чтобы попытаться определить в полупроводнике конкретные причины отказов приборов. В кремниевых полупроводниковых приборах большой мощности основной и общепринятой причиной отказа, хотя и не обязательно единственной, является миграция металла. Энергия активации $E_a \approx 1$, в сочетании с уравнениями Блэка (Black) для

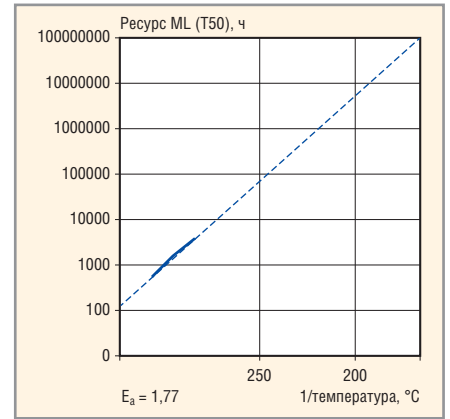


Рис. 6. График Аррениуса по трём значениям температуры для экстраполяции ресурса

миграции металлов, была использована для прогнозирования среднего времени безотказной работы кремниевых биполярных транзисторов производства M/A-COM Tech.Solutions.

Испытания, описанные в этой статье, предоставляют данные, подтверждающие долговременную надёжность изделий M/A-COM Tech.Solutions, произведённых по технологии GaN на подложке из карбида кремния и работающих при номинальном смещении при компрессии СВЧ-сигнала.

