

Надёжность твердотельных усилителей мощности на базе GaN-транзисторов – масштабный технологический прорыв

Кристи Дэмиан, вице-президент
по развитию бизнеса Advantech Wireless

Краткое содержание

Твердотельные усилители мощности (SSPA) на базе нитрид-галлиевых (GaN) транзисторов имеют чрезвычайно привлекательные свойства (например - малый форм-фактор, высокий коэффициент полезного действия, высокая линейность, широкая полоса частот, радиационная стойкость), которые делают их идеальными для использования в составе наземного сегмента систем спутниковой связи или в качестве бортовых усилителей мощности сигналов на космических аппаратах.

Компания Advantech Wireless стала первопроходцем в разработке и производстве GaN-усилителей, запустив в начале 2010 года полную линию изделий наземного применения, покрывающую спутниковые диапазоны частот S, C, X, и Ku.

Однако, о надёжности этой новой технологии доступно очень ограниченное количество информации.

Цель данной статьи описать базовые трудности, связанные с определением надёжности, представить методику её расчетов, а также исследовательские данные, полученные в результате проведения экстенсивной научно-исследовательской программы, разработанной и запущенной Advantech Wireless еще задолго до начала выпуска первой продукции на базе GaN. Теоретические результаты согласуются с данными, полученными при реальной эксплуатации, и подчеркивают значительное улучшение показателей надёжности, превосходящих все существующие технологии.

1. Оценки надёжности

За последние 70 лет, основным показателем для принятия различных решений, основанных на надёжности и эксплуатационной готовности, было среднее время безотказной работы (MTBF). Широко используемые в телекоммуникационной индустрии вычисления MTBF были связаны с большим количеством методов и процедур. Используемые методики вычислений основываются на различных критериях оценки неисправности и могут привести к широкому ряду противоречивых результатов и ошибочных представлений. Обычной ошибкой является понимание MTBF как «Срок службы», другими словами расчётное время эксплуатации в часах до возникновения неисправности. Во многих случаях понятия надёжность, эксплуатационная готовность, интенсивность отказов и MTBF используются взаимозаменяемо, что ещё больше увеличивает путаницу.

Дадим определение, надёжность – это способность системы функционировать должным образом при определённых внешних условиях в течение конкретного периода времени без отказов. Для усилителя, установленного на спутнике, надёжность будет являться очевидным показателем качества, поскольку в этом случае ремонт оборудования невозможен.

Соотношение между надёжностью и MTBF представлено ниже:

$$\text{Надёжность} = e^{-(\text{Время}/\text{MTBF})}$$

Чем больше числовое значение MTBF, тем выше надёжность.

В данном случае эксплуатационная готовность – это степень готовности и доступности системы к использованию в случае необходимости. Она определяется как надёжностью, так и временем ремонта или восстановления в случае отказа. Многие телекоммуникационные системы имеют расчетный срок эксплуатации 10 лет, но несомненно, что в течение этого времени может произойти отказ. В этом случае показателем качества является насколько быстро можно восстановить работоспособность системы. Данное определение применимо к большинству наземных спутниковых передающих систем, где время отсутствия в эфире жёстко связано с потерей дохода.

Следовательно, формула эксплуатационной готовности является функцией MTBF и MTTR (среднее время ремонта) и представлена ниже:

$$\text{Коэффициент эксплуатационной готовности} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}$$

Оба приведённых выше равенства основаны на предположении, что все составляющие имеют постоянную интенсивность отказов на протяжении всего эксплуатационного срока службы.

Данный подход поясняется нижеприведенной диаграммой (рис.1).



Рис. 1. Условная кривая зависимости интенсивности отказов от времени

Период нормальной эксплуатации, характеризуется постоянным значением интенсивности отказов, и именно в этот период система должна находиться в реальных условиях коммерческой эксплуатации. На этом этапе проблемы качества, связанные с производством, проектными запасами, эксплуатационными условиями, стабилизируются и показатель интенсивности отказов становится постоянной величиной. Начальный период с высокой интенсивностью отказов, также называемый «младенческой смертностью», должен быть нейтрализован достаточным временем заводской тренировки – ускоренными испытаниями на принудительный отказ. Заключительный этап, или период износа, требует проведения профилактического технического обслуживания оборудования и плановой замены запасных частей.

Для всех новых разработок, при отсутствии реальных эксплуатационных данных, единственным способом для прогнозирования MTBF являются математико-статистические расчёты.

Для этого существует много предлагаемых методов, но основными, используемыми в телекоммуникационной индустрии, являются следующие:

Telcordia (ранее известный как Bellcore)

Предлагаемый метод основан на военном стандарте Mil-HDBK 217, но с изменениями и дополнениями для учёта параметров, полученных в режиме реальной коммерческой эксплуатации оборудования, и при этом также содержит обновленную информацию о надежности компонентов. Методика сфокусирована на прогнозировании надёжности системы с учётом характеристик отдельных составляющих путём присвоения различных значений интенсивности отказов каждому электронному компоненту, а также присвоением соответствующих значений интенсивности отказов для характерных стрессовых условий (например – температуры), определённых на основании анализа результатов стрессовых испытаний.

MIL-HDBK 217

Использовался Министерством обороны США с 1965 г., но в настоящее время считается устаревшим. Причиной этого является факт, что методика расчетов основывается только на данных по надёжности компонентов, тогда как с того времени надёжность компонентов значительно повысилась, достигнув такого уровня, на котором она уже не является главной причиной сбоев в работе продуктов. Современные исследования в области надёжности показывают, что большинство отказов вызвано контролем качества производственного процесса, конструктивным решением, неправильным использованием при эксплуатации. В отличие от случая с Telcordia приводимые данные по надёжности компонентов не обновлялись.

Резко ускоренное испытание жизненного цикла (Highly Accelerated Life Testing – HALT)

Этот метод, совмещённый с прогнозированием Telcordia, широко применялся Advantech Wireless при создании нового семейства усилителей на базе GaN-транзисторов. Метод используется для увеличения надёжности конструкции изделия путём определения периода времени до момента поломки изделия, применяя шоковое воздействие строго управляемыми условиями окружающей среды. Процесс испытаний может включать циклическое воздействие крайне низких и высоких температур, высокотемпературное и высоковольтное испытание на принудительный отказ, ударно-вибрационные испытания.

2. Программа научно-исследовательских работ по изучению надёжности GaN-усилителей и их компонентных составляющих

Когда в начале 2000 г. компания Advantech Wireless приступила к развитию амбициозной программы научно-исследовательских работ по созданию твердотельных усилителей мощности на базе GaN, мало что было известно о надёжности и типах отказов GaN-компонентов. Технология была доступна с 1990 года и в основном использовалась для военных разработок и исследований. Цена за компонент была чрезвычайно высокой, но технологический потенциал был очевидным.

Для того чтобы успешно развернуть производство нового поколения GaN-усилителей с прогнозируемым MTBF не менее 10 лет, сосредоточенные усилия были направлены на изучение и определение оптимальных рабочих параметров, поведения при тепловых нагрузках, характеристик линейности, коэффициента полезного действия и механизмов возникновения отказов.

Критерий прогнозирования надёжности был основан на методиках Telcordia (считается наиболее современной) и резко ускоренного испытания жизненного цикла (HALT).

Использование стандарта MIL-HDBK-2017 было отклонено, как устаревшего.

У различных производителей были заказаны несколько партий электронных компонентов и составных частей для сравнения в лаборатории. Была реализована экстенсивная программа ускоренных испытаний, свыше 1 миллиона совокупных часов, для изучения стабильности компонентов и типов отказов в соответствии с методикой резко ускоренных испытаний жизненного цикла.

Программа ускоренных испытаний на отказ включала следующие тесты:

- Циклическое изменение температуры окружающей среды с высокой скоростью от -50°C до +60°C.
Цель испытания – понять поведение транзисторов при экстремальных циклических изменениях температуры, ускорить отказы из-за несовершенных сборочных технологий, определить оптимальный механизм отвода тепла.
- Ускоренные испытания при температурах кристалла от +150°C до +200°C.
Цель испытания – привести к быстрому старению и возникновению механизмов ранних отказов из-за работы в условиях высоких эксплуатационных температур, как определено методиками Telcordia и HALT, а также обеспечить обратную связь с изготовителем путём передачи результатов испытаний инженерам-конструкторам, разрабатывающим корпуса изделий транзисторов и системы охлаждения.
- Ускоренные испытания при высокой температуре кристалла и изменяющемся напряжением сток/затвор без подачи на вход РЧ (радиочастотного) сигнала.

- Транзисторы были подвергнуты ускоренным испытаниям с напряжениями стока от +20В до +60В и напряжениями затвора от -0.5В до -5В. Температура кристалла устанавливалась на 250°C, радиочастотный сигнал на вход не подавался.
- Ускоренные испытания при высокой температуре кристалла и изменяющемся напряжением сток/затвор с подачей РЧ сигнала на вход.
Транзисторы были подвергнуты ускоренным испытаниям с напряжениями стока от +20В до +60В и напряжениями затвора от -0.5В до -5В. Температура кристалла устанавливалась на 250°C. Подачей радиочастотного сигнала на вход транзисторы приводились в режим насыщения.
 - Удары и вибрации.
Готовые усилительные блоки были подвержены различным циклам вибрации с перегрузкой до 20G. Цель испытания - определить долгосрочные условия механической целостности транзисторов, имея в виду их внутреннюю кристаллическую структуру.

Ускоренная программа испытаний до наступления отказа HALT, конкретизировала механизмы отказов, которые также были описаны в отчётах схожих исследовательских работ, включая Европейское Космическое Агентство, NASA (Лаборатория Военно-воздушных сил) и публикациях IEEE.

В начале проведения данной научно-исследовательской программы типы отказов могли быть сгруппированы следующим образом:

- Коллапс тока. Проявляется как резкое падение тока стока при определённой температуре, напряжении стока, входном уровне РЧ сигнала. Данное явление может быть обратимо, путём снижения напряжения стока или стать необратимым, если произошло невосстановимое повреждение кристаллической структуры. Этот процесс был исследован научным сообществом и связан с «ловушечными центрами захвата электронов», возникающими из-за дефектов материала полупроводника на стыке с диэлектриком. Из-за воздействия значительных энергий (сильные РЧ поля и высокое напряжение на стоке) высокоэнергетичные электроны могут захватываться диэлектриком подложки, что приводит к падению тока стока.
- Деградация тока утечки затвора. При высоких напряжениях смещения на стоке и высоких уровнях входной РЧ мощности, пиковое значение напряжения на стоке может достигнуть больших значений. Это приведёт к эффекту квантово-механического туннелирования электронов. Электронное поле на краю затвора возрастёт настолько, что приводит к утечке тока затвора или захвату электронов. Это приводит к деградации постоянного тока стока, снижению выходной РЧ

мощности. Данное явление не отмечалось на приборах подвергнутых ускоренным испытаниям без подачи на вход РЧ сигнала.

- Обратный пьезоэлектрический эффект (деформация диэлектрика под воздействием электрического поля). Высокое напряжение смещения на краю затвора при приложенном напряжении смещения на стоке могут создать обратный пьезоэлектрический эффект. Эти электрические поля с высокой напряжённостью могут вызывать деформации в кристаллической структуре GaN-транзистора. При достижении критического напряжения сток-затвор, в кристалле могут возникнуть дефекты, что приведёт к захвату электронов и току утечки затвора.

Были проанализированы основные типы отказов. Полученные результаты сравнивались с заданными конструктивными параметрами производителей и результатами заводских тестов. Результаты испытаний были переданы производителям компонентов, благодаря чему далее с выбранной группой производителей были подготовлены новые конструкторские задания и условия для улучшения качества материалов.

Было произведено новое поколение компонентов на основе GaN с улучшенными характеристиками. Путём совершенствования процессов производства, используя специальные материалы слоёв затвора и стока, пассивацию поверхности и иные методы, значение среднего время наработки до отказа достигло к 2010 году небывалых показателей – свыше 1 миллиона часов при температуре кристалла 200°C. Эти величины показывают значительный прирост показателя надёжности по сравнению с любыми другими существующими полупроводниковыми технологиями.

Например, транзисторы на основе GaAs необратимо разрушаются при температуре кристалла 175°C.

Эти значительные улучшения в технологии производства компонентов на основе GaN также совпали по времени с выходом нового поколения технологий оптимизации и линеаризации, разработанных компанией Advantech Wireless, и впоследствии используемых ею во всех GaN-усилителях с момента запуска линии продукции в начале 2010.

Безопасные рабочие точки напряжения смещения были определены в соответствии с расчётами температурных профилей. Это позволило тщательно контролировать ранее упомянутые коллапс тока, утечки затвора и обратный пьезоэлектрический эффект.

При помощи вычислений прогнозируемой надёжности по методике Telcordia были получены исходные расчётные значения MTBF.

Для данного анализа сравнивались два усилителя от Advantech Wireless – 100Вт SSPA Ku-диапазона на основе GaAs-транзисторов (продуктовая линия 2011 года), и 100Вт SSPA Ku-диапазона новой серии, построенный с использованием современной GaN-технологии.

Основное внимание уделялось следующим наиболее уязвимым местам:

- Усилительный РЧ модуль

- Модуль питания
- Контроль качества технологического процесса.

В любом SSPA (или усилителе на ЛБВ) упомянутые два модуля в 90% случаев являются причиной эксплуатационных отказов.

Следовательно, любая программа значительного улучшения надёжности должна быть направлена на усовершенствование этих двух конструктивных модулей.



Рисунок 2. Сравнительная фотография усилителей Ku-диапазона 50Вт – слева SSPA на GaAs (выпуск 2006 года), справа SSPA на GaN (выпуск 2010 года).

3. Надёжность усилительного РЧ модуля.

Известен факт, что GaN-транзисторы способны выдерживать почти в 10 раз большую плотность мощности на единицу поверхности, по сравнению с GaAs-транзисторами или иными полупроводниковыми приборами. Это означает возможность создания более мощных транзисторов и использования их в меньшем количестве для получения мощности 100Вт в диапазоне Ku.

Методика прогнозирования надёжности Telcordia учитывает одинаковые компоненты (транзисторы высокой мощности Ku-диапазона, конденсаторы и тому подобное) и распределяет их в различные группы. Каждая группа имеет свой собственный показатель качества и интенсивность характерных отказов. Суммарная интенсивность отказов вычисляется сложением всех групповых интенсивностей отказов. Все формулы основываются на практическом опыте эксплуатации телекоммуникационного оборудования.

Из этого очевидно, что при использовании меньшего количества компонентов надёжность и MTBF возрастают.

Было зафиксировано, что 100 Вт SSPA Ku-диапазона на GaAs содержал примерно на 30% больше активных электронных компонентов, чем эквивалентный 100 Вт SSPA Ku-

диапазона на GaN. Основываясь на расчётах Telcordia, можно было бы изначально ожидать улучшения MTBF на те же 30%.

В то же время Telcordia учитывает интенсивность отказов каждого компонента как функцию специфических уровней стресса, в данном случае температуры. Если компоненты изделия сконструированы с возможностью выдерживать более высокие температуры, надёжность изделия будет выше.

Согласно эмпирическому правилу, увеличение рабочей температуры на каждые 10°C снижает MTBF на 30%.

Однако поскольку в настоящее время GaN-транзисторы могут использоваться при повышенной на 25°C температуре кристалла без ухудшения эксплуатационных характеристик, ожидается, что окончательное значение MTBF для усилительного РЧ модуля должно улучшиться не менее, чем на 60%.

4. Модуль источника питания

Одним из основных преимуществ использования GaN-транзисторов в конструкции усилителей является тот факт, что они работают на более высоких напряжениях.

Это непосредственно влияет на конструкцию источника питания. Если, например, на GaAs-усилитель 100Вт Ku-диапазона требуется подавать питание +12В, то необходимо будет сконструировать источник питания способный вырабатывать ток 120 А. Это вовсе не тривиальная задача, учитывая малое пространство доступное для его размещения, стоимость компонентов и ограниченные возможности охлаждения.

Для сравнения, такой же источник питания, разработанный для GaN-усилителей, должен работать при +48В и, следовательно, вырабатывать ток всего лишь 30А. Это даёт значительные преимущества конструкции блока питания и вносит значительное улучшение в показатели надёжности.

Второе основное преимущество использования GaN-транзисторов исходит из их большего КПД. Так, например, 100Вт усилитель Ku-диапазона на GaAs-транзисторах будет потреблять как минимум на 30% больше энергии, чем эквивалентное устройство на GaN-транзисторах.

Более высокий КПД в сочетании с малым рабочим током вносят значительное улучшение в общую надёжность модуля источника питания усилителей на основе GaN-транзисторов.

5. Контроль качества технологического процесса.

К сожалению, ни один из стандартов вычисления надёжности не принимает во внимание процесс производства. Все они основаны на учете только компонентной надёжности.

Именно поэтому стандарт MIL-HDBK 217 быстро стал устаревшим. Количественные показатели надёжности, используемые данным стандартом, ни разу не обновлялись с 1965 года. В течение последних 50 лет эти показатели надёжности для электронных компонентов значительно улучшились. Более глубокое изучение современных механизмов отказов выявляет, что с наибольшей вероятностью отказы обуславливаются конструкцией продукции, контролем качества технологического процесса или человеческим фактором.

Именно поэтому мы считаем, что контроль качества технологического процесса является очень важной частью конструкторских разработок и любой программы по улучшению надёжности.

Если принимать во внимание только компонентную составляющую, то две компании, выпускающие один и тот же продукт из материалов с одинаковой спецификацией, должны иметь одинаковый MTBF. Однако на практике это далеко не так.

Все мы много раз были свидетелями, когда отличные продукты с великолепными надёжностью и качеством, разваливались при перемещении производства. То, что меняется в большинстве таких случаев, это процессы производства, в то время как спецификация исходных материалов остаётся прежней.

В компании Advantech Wireless контроль качества технологического процесса является частью проектных требований. Выявление конструктивных ограничений и рисков требует проведения экстенсивного старения продукции путем применения комбинаций стресс факторов. Это необходимо всегда, для того чтобы вывести жизненный цикл продукции из зоны «младенческой смертности».

Для продуктовой линейки GaN-усилителей, определены и представлены ниже несколько ключевых контрольных процессов:

- 96 часов испытаний на ускоренный отказ для всех активных транзисторов при высоких температурах и подаваемых напряжениях;
- 96 часов испытаний на ускоренный отказ для источника питания при высоких температурах и токовых нагрузках;
- 24 часа испытаний всех печатных плат при циклическом изменении температуры окружающей среды;
- 24 часа испытаний конечной продукции на воздействие окружающей среды, проводимых в термической камере при температурах от крайне низких до высоких;
- 96 часов дополнительных испытаний конечного продукта на ускоренный отказ в условиях высокой температуры.

Все эти жёсткие (и дорогостоящие) процессы старения и отбора вместе с уникальной запатентованной технологией установки GaN-компонентов (позволяющей значительно улучшить отвод тепла), позволяют значительно увеличить реальный жизненный цикл MTBF, измеренного в условиях эксплуатации.

Для целей данной количественной оценки, в течение 4 предыдущих лет была проанализирована совокупность из 500 усилителей, развёрнутых на месте эксплуатации.

В результате была установлена и зафиксирована интенсивность отказов в 3.8% за год. Принимая MTBF как обратную величину интенсивности отказов, эксплуатационная величина MTBF для данной совокупной выборки составила:

$$\text{Эксплуатационный MTBF} = 1/0.038 = 26.3 \text{ года} = 230\,388 \text{ часов}$$

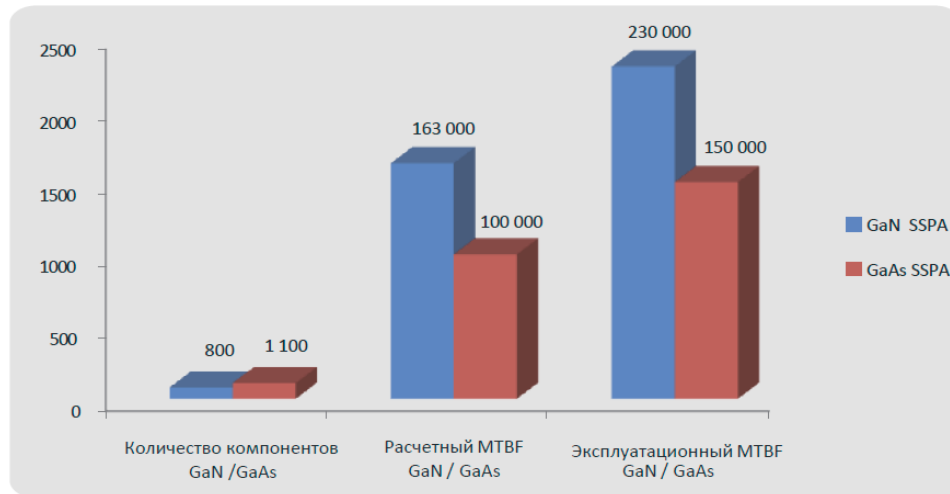


Рисунок 3. Количество компонентов, расчётный и эксплуатационный MTBF для усилителей мощности 100Вт Ku-диапазона на GaAs (красным) и GaN (голубым) транзисторах.

Заключение

Контролируя все механизмы отказов, работая в тесном сотрудничестве с производителями GaN-компонентов и достигнув глубокого уровня понимания внутренней физики GaN-технологии, инженеры Advantech Wireless разработали новое поколение твердотельных усилителей мощности с непревзойденными электрическими характеристиками и очень высокой надёжностью.

Расчёт статистической надёжности, основанный на существующих стандартах, продемонстрировал значительное увеличение MTBF на 63% для SSPA на основе GaN по сравнению с таким же SSPA на основе GaAs. Эти расчеты согласуются с прогнозами, основанными на надёжности компонентов, количестве используемых компонентов и их КПД.

При тщательном контроле производственных процессов, оптимизированных по специфическим механизмам отказов, присущих GaN-транзисторам, эксплуатационный MTBF у GaN-усилителей показывает впечатляющее превосходство над эквивалентной продукцией на основе GaAs.

Новая линия усилителей мощности на основе GaN-транзисторов от Advantech Wireless позволяет обеспечить мощность РЧ сигнала до 6,6 кВт в С-диапазоне и 3,6 кВт в Ku-диапазоне и имеет всё необходимое, чтобы соответствовать самым жестким требованиям по режимам работы и условиям эксплуатации.

Мы полностью уверены в своей продукции и поэтому даем 3 года гарантии на все наши GaN-усилители! При этом они обладают лучшими техническими характеристиками (весогабариты, КПД и линейность) и стоят дешевле усилителей аналогичной мощности на GaAs-транзисторах.

