

Контроль качества и обеспечение надежности СВЧ компонентов на основе GaN производства компании Sumitomo для применения в бортовой аппаратуре КА

В.В. Кубарев

ООО «СД Соллошнс»

Аннотация: в данном докладе описано, каким образом обеспечивается качество производства космических компонентов компании Sumitomo, как реализуется контроль качества и какие применяются критерии отбора компонентов. Приведена оценка надежности и времени безотказной работы GaN компонентов для космических применений. Приведены состав и результаты квалификационных испытаний – ресурсных, стресс-испытаний, испытаний на радиационную стойкость.

1. Введение

Настоящий доклад содержит информацию о космических изделиях компании Sumitomo на основе нитрида галлия, о наборе испытаний в составе космической квалификации изделий, и о показателях надежности и времени наработки на отказ.

Компания Sumitomo – крупная японская корпорация, имеет подразделение Sumitomo Electric Devices Innovation, занимающуюся электронными компонентами на основе арсенида и нитрида галлия. За историю своего существования Sumitomo поглотила двух крупных японских производителей СВЧ компонентов – Fujitsu и Eudyna вместе со всеми их разработками. Часть из проверенных временем компонентов до сих пор производится, и по первой букве в партномере – E, F или S – возможно определить компанию-разработчика изделия.

Компания обладает более чем 35-летним опытом разработки и производства космических компонентов. История изделий космического уровня качества началась в 1976 году выпуском первого в мире мощного FET-транзистора на основе GaAs, в 1982 году первых GaAs техпроцесс был квалифицирован для использования в космосе. В 2000 и 2002 годах были запущены модули приемника и передатчика на собственных микросхемах. У компании богатый лётный опыт применения их компонентов, как в японских программах, так и в иностранных – в США, Европе, Индии, при этом по назначению большинство спутников – связные, и часть - навигационные, включая системы GPS, Galileo и Глонасс.

В 2005 году началась эра GaN, Sumitomo изготовили первый коммерческий транзистор на нитриде галлия, а к 2015 году была завершена космическая квалификация двух текущих нитридных техпроцессов. Ниже описаны результаты испытаний, которые входили в состав космической квалификации техпроцессов.

2. Достигнутые параметры транзистора L-диапазона

Какие требования предъявляются транзисторам для космических применений? Разумеется, это успешный лётный опыт, завершённые квалификационные испытания, также требуется максимальная производительность компонентов при условии высокой надежности, и помимо этого – радиационная стойкость компонентов. Всем перечисленным требованиям соответствует технология нитрида галлия в целом и техпроцессы компании Sumitomo в частности.

В качестве иллюстрации высокой производительности космических компонентов представлена информация по двум текущим технологическим процессам компании Sumitomo на основе нитрида галлия. GL3S используется для изготовления транзисторов от P- до C-диапазона включительно, позволяет получить до 200 Вт

постоянной мощности с одного транзистора при КПД не менее 70% на частоте 1,5 ГГц. Для GK1S, который используется в основном для X-диапазона, показатели по мощности – порядка 50Вт с одного внутрисогласованного транзистора в импульсном режиме.

Также, высокой производительности компонентов на основе нитрида галлия способствует сложная оптимизированная структура изделий, приведенная на рисунке 1.

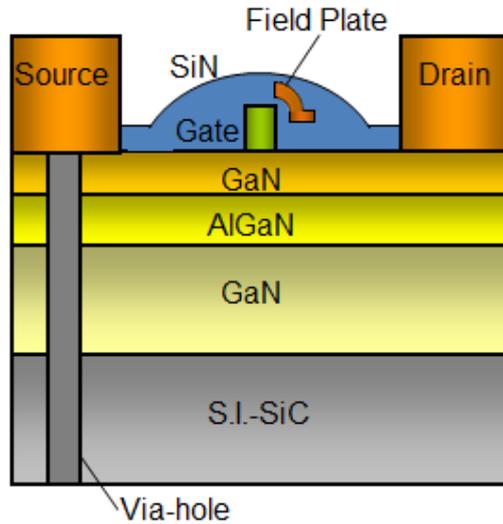


Рисунок 1. Топология пластины GaN. Области структуры, начиная снизу: подложка из карбида кремния; широкий слой нитрида галлия; нитрид алюминия галлия; рабочий слой нитрида галлия, на котором сформирована топология.

Такая структура позволяет снизить напряженность электрического поля, обеспечить минимальную паразитную емкость сток-исток и, таким образом, достичь максимального КПД транзистора. Для увеличения коэффициента усиления используются сквозные отверстия от истока на обратную сторону пластины.

Как демонстрация передовых решений компании – частично-согласованный транзистор L диапазона, построенный на двух 100-ваттных кристаллах, включенных параллельно, собранных со схемами частичного согласования в стандартном металлокерамическом корпусе размером 24 на 17 мм, впервые был представлен в 2016 году на Европейской Микроволновой неделе.

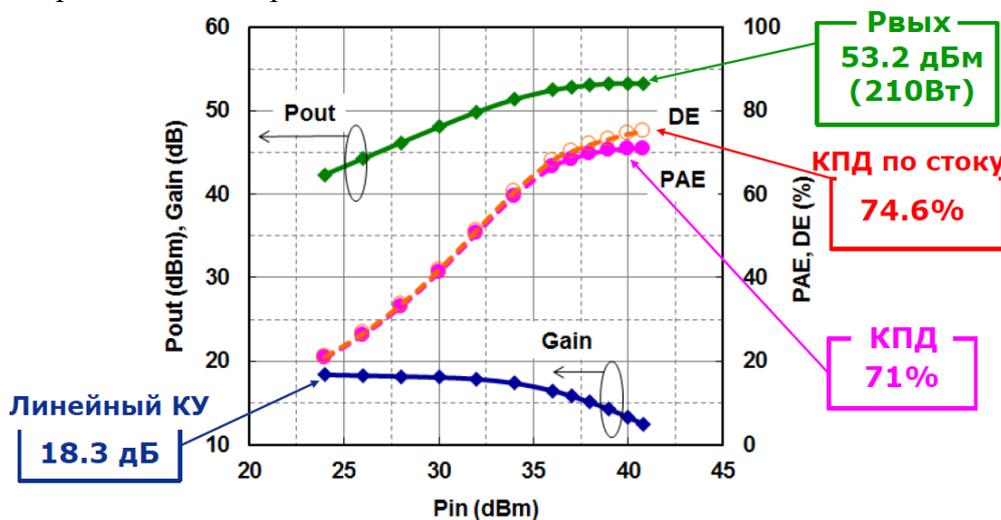


Рисунок 2. СВЧ характеристики 200Вт GaN транзистора. Условия испытаний: VDS=50В, IDS(DC)=700мА, постоянный режим при f=1575 МГц, Tкорп=45°С.

На графике рисунка 2 приведены измеренные характеристики данного транзистора. Изделие обеспечивает 210 Вт постоянной выходной мощности при КПД более 70% на рабочей частоте 1575 МГц и имеет коэффициент усиления до 18 дБ.

При разработке данного транзистора требовалось верифицировать тепловой режим транзистора и оценить ожидаемое время наработки на отказ. Для этого необходимо знать температуру канала при максимальной рабочей температуре. Для вычисления этого параметра применяют упрощенную формулу (1).

$$T_{кан} = (P_{DC} + P_{in} + P_{out}) \cdot R_{th} + T_{корп} = 136 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

Максимально допустимую температуру корпуса транзистора принимают равной 85°C. Тепловое сопротивление транзистора Rth практически линейно зависит от размеров кристаллов, и для 100-ваттного кристалла составляет 1.1°C/Вт, а для 200-ваттного транзистора измеренная величина составила 0,6°C/Вт. На основе этих исходных параметров была вычислена температура перехода, составившая 136°C. Этот показатель более чем достаточен для времени наработки на отказкратно превышающего САС миссии, о чем будет показано несколько ниже.

3. Результаты квалификационных испытаний и оценка времени наработки на отказ

В ходе квалификационных испытаний техпроцессов на основе нитрида галлия, компании Sumitomo потребовалось добиться отказа испытываемых транзисторов, чтобы на основе этих данных оценить среднее время наработки на отказ. Под отказом было принято ухудшение КУ либо выходной мощности на величину более 1 дБ.

В рамках космической квалификации проводились следующие виды испытаний:

DC HTOL – долговременная работа при повышенной температуре без поданного сигнала, с температурой канала от 250 до 315 градусов

RF HTOL – также долговременная работа при повышенной температуре, но уже с поданным сигналом на входе, с температурой канала от 270 до 310 градусов

Стресс-тест - повышение компрессии выходного сигнала с 3 до 13 дБ с шагом 2 дБ

RF LTOL – долговременная работа в нормальных условиях, 20 000 часов.

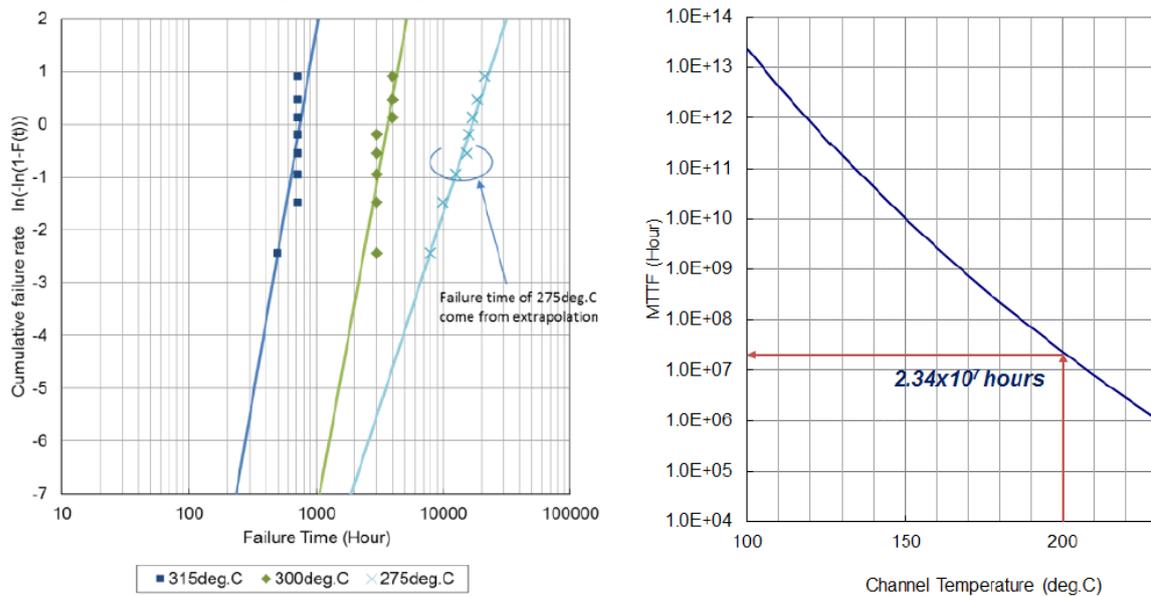


Рисунок 3. График Вейбулла и наработка на отказ для испытаний DC-HTOL. Критерий отказа: снижение КУ на величину более 1 дБ. Вычисленная энергия активации: $E_a = 2.1 \text{ эВ}$

Кроме того, транзисторы испытывались на воздействие температуры, удары и вибрацию.

Для испытания DC HTOL были получены графики кумулятивной вероятности распределения отказов (см. Рисунок 3). Первая кривая соответствует температуре канала 315 градусов (отказ через 749 часов), вторая - 300 градусов (отказ через 3670 часов). Поскольку испытание было по времени ограничено, для третьей кривой - температуры 275 градусов - отказов не было, и эти данные были экстраполированы по первым двум – и составили около 17000 часов.

По этим экспериментальным данным был получен график времени наработки на отказ МТТФ в зависимости от температуры канала. Точка для 200 градусов составила 23 млн часов, или более 2500 лет.

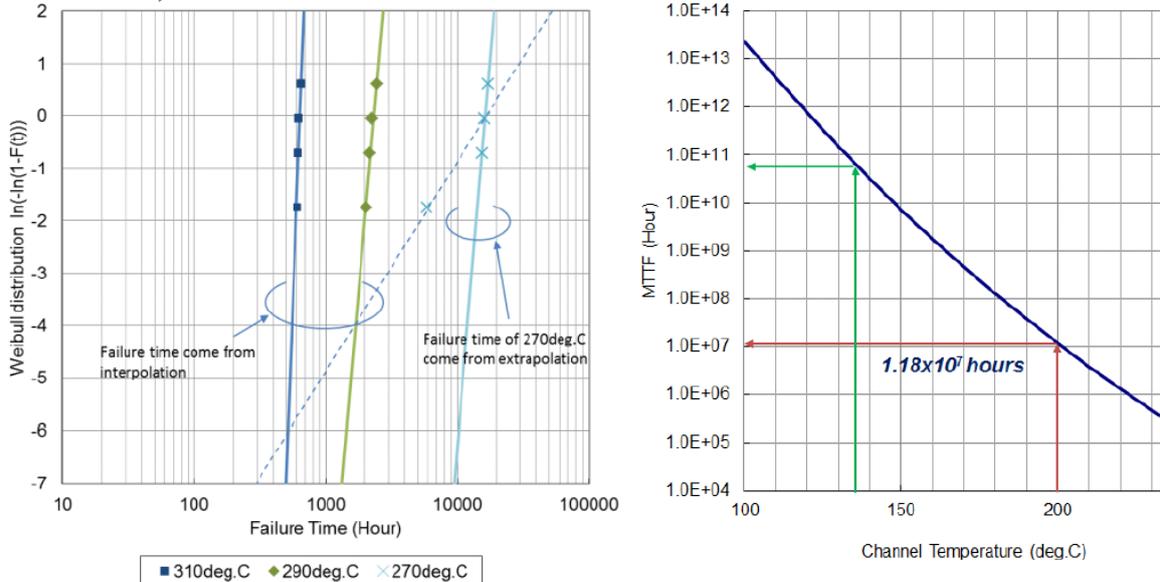


Рисунок 4. График Вейбулла и наработка на отказ для испытаний RF-HTOL. Критерий отказа: снижение КУ на величину более 1 дБ. Вычисленная энергия активации: $E_a = 2.21$ эВ

Для похожего испытания, но с поданным сигналом на входе RF-HTOL полученные данные приведены на Рисунке 4. Отказы были зафиксированы при температуре канала 310 градусов (после 640 часов) и 290 градусов (после 2300 часов), для температуры 270 градусов отказов не было, и данные для третьей кривой также были экстраполированы и составили 16000 часов. Были получены соизмеримые данные по времени наработки на отказ – 12 млн часов при 200 градусах температуры канала.

Возвращаясь к исходным оценочным данным о температуре канала 136°C, получаем оценку среднего времени наработки на отказ на три порядка больше, т.е. десятки миллиардов часов.

Чтобы исключить вероятность отказа при малой энергии активации – было проведено долговременное испытание в нормальных условиях – при температуре корпуса транзистора 45°C. Испытание длилось более двух лет и завершилось в 2017 году, спустя 20 000 часов непрерывной работы. Показатели по коэффициенту усиления и по выходной мощности снизились для одного образца на величину не более 0,3 дБ, таким образом, можно сделать вывод, что механизм отказа при нормальных условиях – отсутствует.

4. Испытания на воздействие радиации

Когда речь идет о космических компонентах, разумеется, нельзя оставить без внимания стойкость на воздействие радиации и связанные с этим процессом испытания.

Таблица 1. Результаты испытаний на воздействие радиации

Техпроцесс	Вид испытаний		
	SEE	TID	протоны
GL1A L-/S-band	>69,0 МэВ/(мг*см ²)	>13,7Мрад(Si)	стойкий
GL3S L-/S-band	>66,3 МэВ / (мг*см ²)	---	---
GK1S X-band	>69,0 МэВ/(мг*см ²)	>2,6 Мрад(Si)	стойкий

У компании Sumitomo три космических технологических процесса на основе нитрида галлия испытывались на воздействие радиации; два из них используются в настоящее время, а GL1S завершил свое существование в 2015 году. Результаты испытаний на воздействие радиации приведены в таблице 1.

GL3S – действующий техпроцесс для L-S диапазона – испытывался на ТЗЧ, и имеет стойкость к единичным отказам 69 МэВ. Испытаний на накопленную дозу и бомбардировку протонами не проводилось, но запланированы. Данный техпроцесс – результат эволюции GL1S, и показатели по стойкости у них сопоставимые.

У техпроцесса GK1S – получены данные 66 МэВ по ТЗЧ, более 2 Мрад по накопленной дозе, и подтвержденная стойкость к бомбардировке протонами. Более подробно результаты испытаний на воздействие радиации представлены в отдельном отчете, который доступен по запросу.

5. Заключение

В заключение хотелось бы отметить, что GaN НЕМТ-транзисторы производства компании Sumitomo могут быть рекомендованы для использования в космосе, поскольку имеют высокую производительность, подтвержденный летный опыт с 2011 года, обладают высокой надежностью и подтвержденной квалификационными испытаниями радиационной стойкостью.