

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ ИСПЫТАНИЙ НАДЕЖНОСТИ НИТРИДНОЙ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

В условиях обострения санкционной политики государств, конкурирующих в разработке и производстве качественно новых поколений СВЧ-устройств, важность импортозамещения образцов перспективной ЭКБ многократно возросла.

Для обеспечения технологической безопасности России жизненно необходима выработка методологии, сконцентрированная на решении проблем надежности нитридной СВЧ ЭКБ, незаменимой для ряда критических применений.

За рубежом СВЧ-электроника на основе широкозонных полупроводников группы GaN уверенно завоевывает позиции в производстве самой разнообразной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) — от беспроводных зарядных устройств до приемо-передающих модулей радаров с активной фазированной антенной решеткой (АФАР). Успели оценить ее уникальные возможности и отечественные разработчики РЭА [1]. Однако за последнее десятилетие производство отечественной элементной компонентой базы (ЭКБ) на основе «модных» нитридов так и осталось на стадии перспективных разработок [2]. В условиях обострения санкционной политики государств, традиционно занимающих лидирующие позиции в данной области СВЧ-электроники, важность импортозамещения нитридной ЭКБ многократно возросла. Всесторонний анализ проблемы указывает на ряд принципиальных факторов, определяющих успех разработки и внедрения в производство качественно новых поколений СВЧ-устройств [4]. К их числу относится необходимость выработки методологии, сконцентрированной на решении проблем надежности ЭКБ на основе нитридов III группы.

ГЛАВНАЯ ПРОБЛЕМА — ОТСУТСТВИЕ ПРИЗНАНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Уникальные свойства нитридных гетероструктур и приборов на их основе обусловлены целым рядом характерных отличий, выделяющих их в ряду традиционных полупроводников АЗ В5. К их числу относятся как фундаментальные электрофизические параметры материалов группы GaN (зонная структура, выраженные поляризации-

онные эффекты и т. д.), так и технологические особенности их изготовления (отсутствие «гомо»-подложек из объемного материала, метастабильность материала при экстремальных режимах роста гетероструктур и проведения некоторых планарных процессов и т. д.). В результате, мощные нитридные СВЧ-приборы оказались поначалу довольно «капризными» и, по признанию многих разработчиков, теряли работоспособность буквально на глазах. В 2003 году в США было открыто финансирование программы Wide Band Gap Semiconductors (WBGs), проводимой Агентством перспективных разработок министерства обороны (DARPA) [4]. С самого начала одними из важнейших целевых параметров Программы стали **показатели надежности** создаваемой перспективной ЭКБ — наработка до отказа (критерием которого служило падение выходной мощности на 1 дБ) должна была составить не менее 10^6 ч. Это требование возникло не на пустом месте: коммерциализация нитридных СВЧ-транзисторов, показавших блестящие перспективы, тормозилась именно из-за проблем с деградацией их рабочих параметров. Лишь к 2007 году ведущие игроки отрасли — Toshiba Corp., Fujitsu, Nitronex, HRL Labs и другие компании — опубликовали первые достижения в решении проблемы надежности. Следует отметить, что с самого начала было уделено повышенное внимание поиску методик испытаний, учитывающих уникальность режимов работы нитридных приборов и механизмы их деградации [5–7]. В 2008 году компания TriQuint Semiconductors, один из лидеров полупроводниковой электроники, анонсировала первый нитридный

foundry-процесс [8], и на мировые рынки началась экспансия нитридной СВЧ-электроники, впоследствии подержанная европейскими и азиатскими компаниями, такими как United Monolithic Semiconductors, OMMIC, Win Semiconductors и другими [3].

В Российской Федерации, в отличие от описанной выше зарубежной практики, разработка нитридной СВЧ ЭКБ и технологий ее изготовления протекала в общем контексте реализации федеральных целевых программ, ничем особенным не выделяясь. Технические задания на выполнение НИОКР содержали стандартные требования к параметрам надежности, обусловленные областью применения разрабатываемой ЭКБ; соответствие этим требованиям подтверждалось испытаниями, проводимыми по стандартным методикам. Никаких видимых проблем такой подход не выявлял. Кроме одной — серийного производства **отечественной** перспективной ЭКБ на основе материалов группы GaN не налажено до сих пор.

ПРОБЛЕМА ВЫБОРА ОБЪЕКТА ИСПЫТАНИЙ

При проведении разработки и производства СВЧ ЭКБ в общепринятой за рубежом модели foundry выполнение требований надежности к изделиям должно обеспечиваться надлежащей **квалификацией технологий** («категории качества» *Industrial, Military, Space*). Поэтому параметры надежности устанавливаются применительно к стандартным элементам (и их библиотекам) как неотъемлемой части стандартных технологий. Это позволяет строить поведенческие модели, представляющие разработчикам РЭА инструмент предсказания параметров надежности

устройств, спроектированных на основе библиотек, на всех уровнях системной архитектуры. Спроектированные и изготавливаемые при помощи таких технологий изделия будут в части параметров надежности соответствовать этим категориям *автоматически* (*technology defined reliability*).

Становится понятным, почему в отечественной практике разработки адекватно сформулировать требования надежности к достаточно сложному объекту — *модулю СВЧ* (а термина, более точно отражающего функциональные особенности СВЧ — *монолитной интегральной микросхемы (МИС)* — в нашей нормативной базе пока нет), имеющему в своем составе «капризные» нитридные СВЧ-транзисторы, весьма проблематично. Да и с выполнением требований к самому СВЧ-транзистору — ключевому элементу любой библиотеки — дела обстоят не лучше. По частотно-мощностным параметрам российские разработчики добились вполне конкурентоспособных результатов [9, 10], однако что у этих транзисторов с надежностью? Конечно, на стадии их разработки наверняка были испытаны и достигнуты «параметры сохраняемости и безотказности», предписанные техническим заданием, но способны ли они ответить на вопрос,

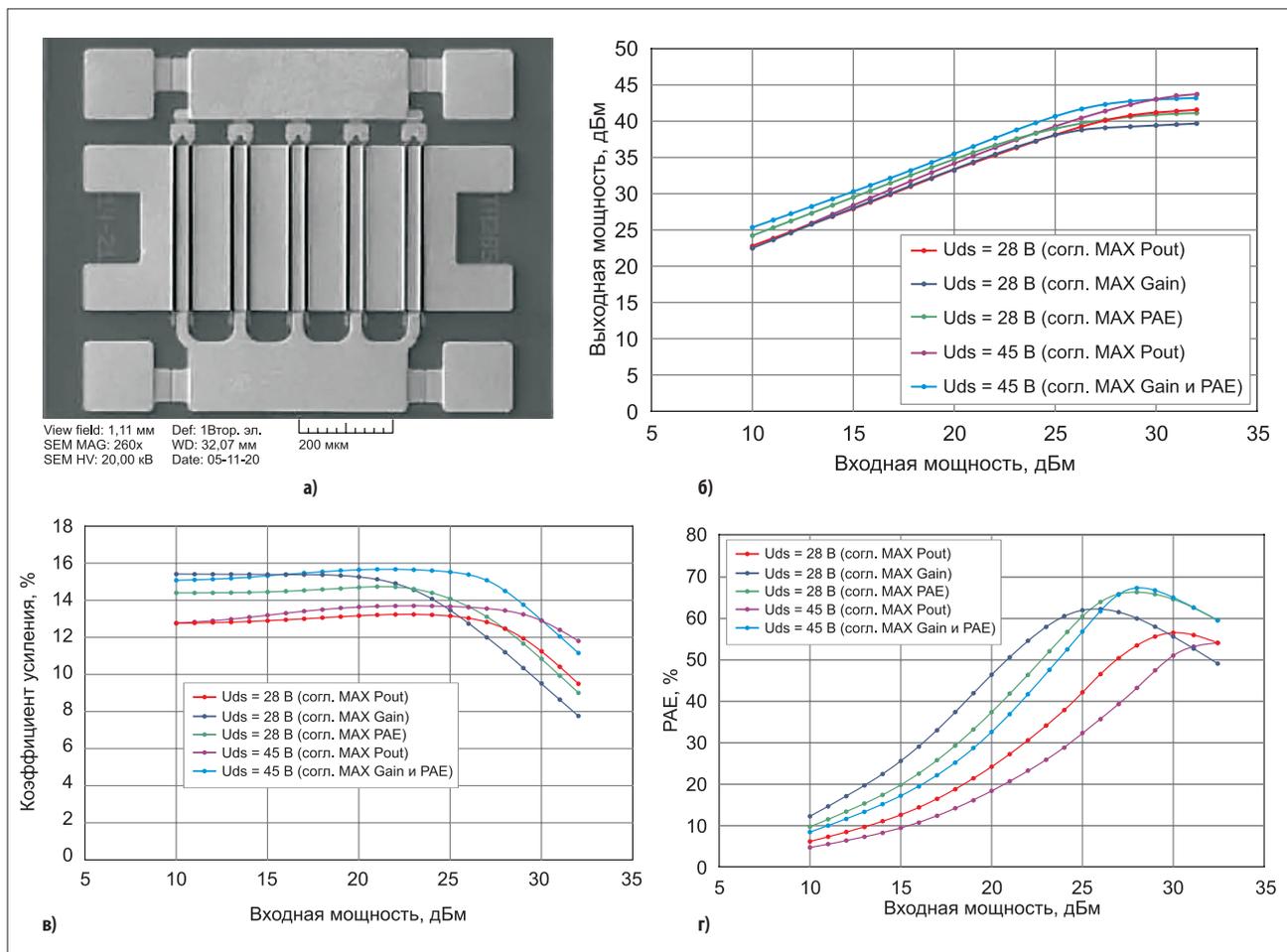
сколько проживет тот или иной транзистор в реальных условиях работы? Ответа нет. И это — следующая проблема.

ПРОБЛЕМА ВЫБОРА СХЕМЫ И МЕТОДИК ИСПЫТАНИЙ

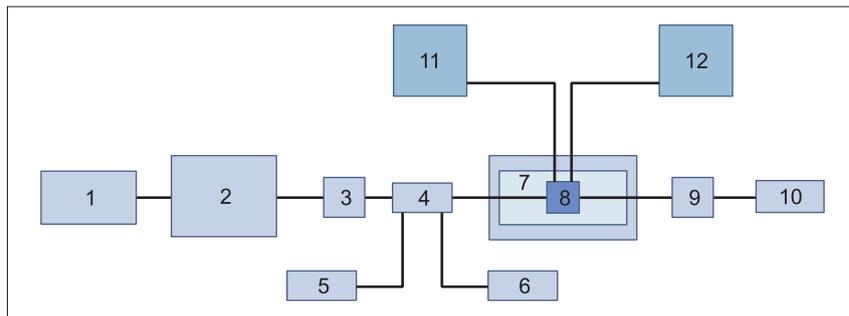
В общем случае на интенсивность отказов полупроводниковой ЭКБ в течение ее жизненного цикла оказывают влияние три типа факторов, в том числе:

- факторы, определяемые технологией изготовления (дефекты, ведущие к катастрофическим отказам на ранних стадиях работы, физический износ материала в ходе эксплуатации, деградация функциональных параметров вследствие особенностей электрофизических свойств материала и т. д.);
- факторы, определяемые конструкцией изделия (схемотехнические решения, взаимное расположение функциональных блоков в топологической схеме, меры защиты в различных вариантах применения ЭКБ и т. д.);
- факторы, определяемые эксплуатацией (жесткие режимы включения, повышенные температуры эксплуатации изделий, недостаточный теплоотвод и т. д.).

До настоящего времени учет всех указанных типов факторов применительно к определению параметров надежности новых типов устройств отечественные разработчики пытаются вести, руководствуясь методиками экспериментального определения энергий активации для некоторых видов отказов, дополняя их справочными данными по «аналогичным типам ЭКБ», в том числе импортной. На прошедшей совсем недавно (увы, в дистанционном формате) IX Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» (МЭС-2020) было показано [11], что значения интенсивности отказов, рассчитанные по данным отечественных справочников «Надежность ЭРИ» и «Надежность ЭРИ ИП», а также отраслевого РД 11 0755–90 «Микросхемы интегральные. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность», могут отличаться от рассчитанных по данным зарубежных стандартов более чем на порядок. И это несмотря на то, что в указанных отечественных документах уже описано несколько десятков типов стандартных отказов. А что можно сказать насчет надежности новой СВЧ ЭКБ, разработанной и во-



▲ Рис. 1. а) Тестовый СВЧ-транзистор; б–г) результаты load-pull измерений его параметров в различных вариантах согласования



▲ **Рис. 2.** Схема стенда для испытаний наработки на отказ под СВЧ-нагрузкой:
 1 — генератор СВЧ-сигнала; 2 — усилитель мощности СВЧ-сигнала; 3 — ферритовый вентиль; 4 — направленный ответвитель; 5 — измеритель падающей мощности СВЧ-сигнала; 6 — измеритель отраженной мощности СВЧ-сигнала; 7 — плата согласования; 8 — тестируемый транзистор; 9 — аттенюатор; 10 — измеритель выходной мощности СВЧ-сигнала; 11 — источник DC-питания затвора; 12 — источник DC-питания стока

шедшей в мировую практику в течение последних десятилетий? Ничего нового. Аналогичный руководящий документ, РД 11 0770–90 «Электровакуумные приборы и модули СВЧ. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность», как нетрудно видеть из названия, является ровесником указанного выше. Можно ли с его помощью учесть влияние отказов, основанных, например, на «заезженном» в научной литературе «сверхвысокочастотном коллапсе тока» [12] в транзисторах на основе гетероструктур GaN/AlGaIn, и оценить их интенсивность? И проблема не только в этом.

Сама система «назначения» требований к параметрам надежности разрабатываемых образцов СВЧ ЭКБ путем обратного пересчета из сроков службы РЭА, для которой они предназначены, определяет структуру и последовательность проведения испытаний на соответствие этим требованиям. В соответствии с принятой практикой, разработчик ЭКБ *должен доказать*, что его изделия будут работать в соответствии с установленными в ТЗ критериями. И должен доказывать это *каждый раз* при разработке нового образца. Исходя из того, что комплектование образцов ЭКБ в общем случае может выполняться из разных источников (в том числе импортными комплектующими), разработчику необходимо *заранее* оценить возможные вклады механизмов отказов (зачастую чувствительных к конкретной технологии изготовления) комплектующих в суммарную наработку изделия, а затем — провести испытания для подтверждения определенных таким образом параметров надежности. Довольно громоздкая схема, особенно учитывая сложившуюся практику проведения в рамках одной ОКР последовательно-параллельной разработки и комплектующих, и состоящих из них изделий ЭКБ (МИС или «модулей СВЧ»), и «головных» блоков РЭА. Подобные ОКР растягиваются на несколько лет, столько же может занять внедрение результатов

(если до него доходит дело). Стоит ли удивляться тому, что за прошедшие 15 лет в России так и не появилась перспективная СВЧ-техника, построенная на нитридной ЭКБ *собственного* производства?

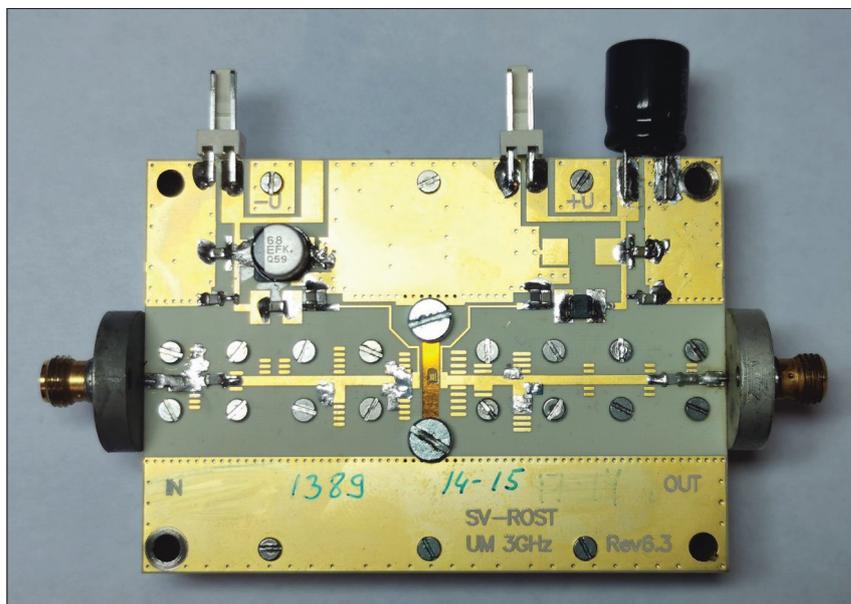
НЕ ТАК ВАЖНО, КТО ВИНОВАТ. ВАЖНО — ЧТО ДЕЛАТЬ?

Ответ на этот вопрос уже дан в начале статьи. Решение проблем, служащих главным препятствием выходу отечественной нитридной СВЧ-электроники из стадии бесконечной разработки, лежит в построении системы испытаний надежности, основанной на стандартных технологиях. Каждая из них включает в себя снабженный средствами мониторинга и саморегулирования технологический процесс, изготавливаемую с его помощью библиотеку стандартных элементов с подтвержденными испытаниями параметрами надежности и основанный на библиотеке комплекс средств проектирования, позволяющий строить статистически обоснованные поведенческие модели. Да, сама разработка стандартных технологий (и особенно разработка ме-

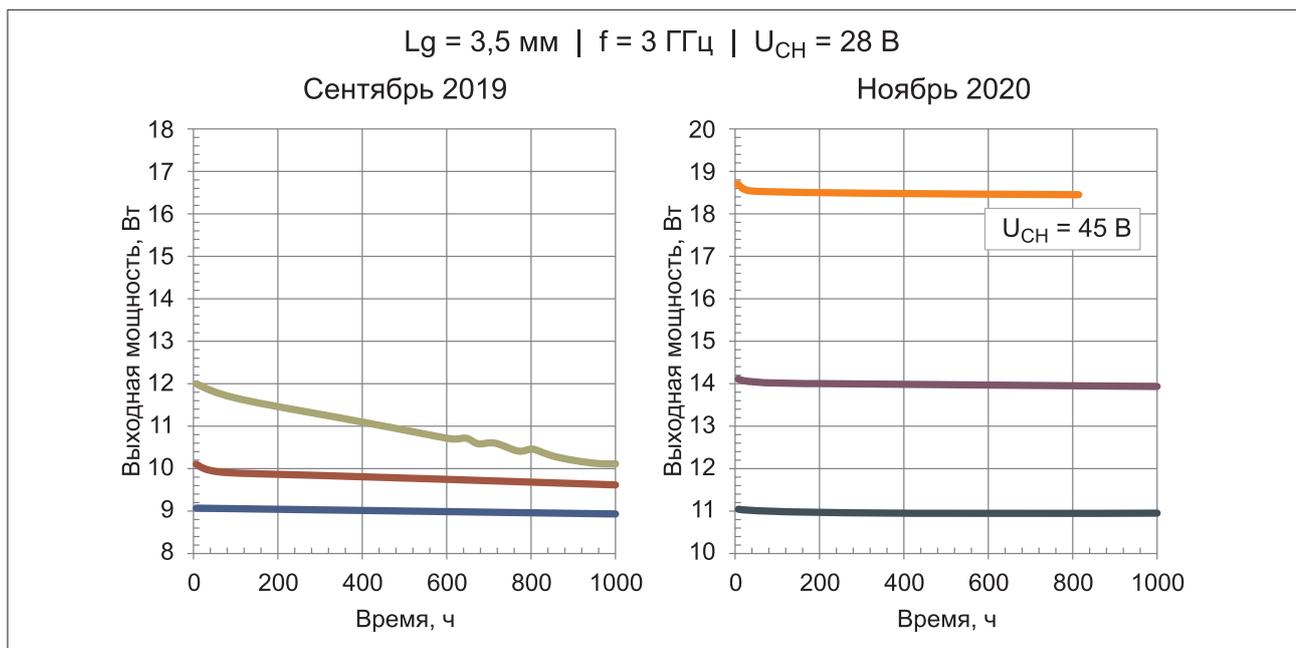
тодики и проведение испытаний надежности стандартных элементов) требует немалых вложений, но колоссально экономит временные и финансовые ресурсы на разработку и производство самой ЭКБ, независимо от количества требуемых конструктивно-технологически подобных образцов и объемов их производства.

АО «Светлана-Рост» ведет разработки в области нитридных технологий СВЧ ЭКБ достаточно давно [13], в том числе нарабатывая опыт в вопросах ее надежности и изучения различных механизмов отказов. В [14] приведены результаты совместной работы АО «Светлана-Рост» и ряда ведущих организаций — экспертов в области проведения испытаний (ФГУП «МНИИРИП», АО «РНИИ Электронстандарт», АО «ЭНПО СПЭЛС»), в ходе которой было показано, что «гетероструктурные» факторы должны обеспечивать наработку на отказ не менее 10^6 ч, что стало достаточной базой для начала построения стандартных технологий в соответствии с моделью foundry [15].

Несмотря на то что общая методология квалификации технологических процессов достаточно широко освещена в зарубежных стандартах [16], схемы построения испытаний нитридных процессов и используемые в них методики [17, 18] заметно разнятся друг от друга, главным образом в зависимости от категории разрабатываемой стандартной технологии. Тем не менее *во всех* зарубежных публикациях неотъемлемой частью системы испытаний является определение *среднего времени наработки на отказ под СВЧ-нагрузкой (RF operating life test)*, в том числе при повышенных температурах канала. Поскольку именно эти испы-



▲ **Рис. 3.** Плата согласования транзистора для испытаний наработки на отказ под СВЧ-нагрузкой



▲ **Рис. 4.** Результаты совершенствования технологии изготовления стандартного транзистора S-диапазона по наработке на отказ под СВЧ-нагрузкой на постоянной волне

тания *не являются обязательными* в действующей в РФ системе подтверждения надежности СВЧ-устройств, в первую очередь нами были приложены усилия к их постановке.

Объектом испытаний был выбран стандартный 10-пальцевый СВЧ-транзистор с суммарной шириной периферии 3,5 мм (рис. 1а), изготавливаемый по типовому технологическому процессу с проектной нормой 0,5 мкм, тремя уровнями металлизации и сквозными заземляющими отверстиями на подложках SiC. Объект с такой топологией выбран неслучайно, поскольку позволяет создать в затворной области уровни напряженности поля, характерные для рабочих режимов реальных устройств и исключить ошибки проектирования, связанные с суммированием мощности тестовых транзисторов малой периферии. Для проведения испытаний были разработаны специализированный стенд, позволяющий точно фиксировать проходящую через транзистор СВЧ-мощность (рис. 2), и испытательная плата (рис. 3), согласующая транзистор на стандартную нагрузку 50 Ом.

Следует отметить, что к моменту начала систематических испытаний СВЧ-транзисторов уровень технологии был уже таков, что грубые дефекты изготовления, определяющие так называемые катастрофические (ранние) отказы, были устранены и тестовые транзисторы, как правило, выдерживали наработку длительностью 1000 ч при уровнях плотности мощности около 2,5 Вт/мм (весьма «мягкий» режим для нитридной ЭКБ). В то же время отмечалась суще-

ственная деградация выходной мощности, зависящая от общего уровня нагрузки (рис. 4а) транзистора и коррелирующая с проявлением ряда характерных эффектов при формировании его топологической структуры. Путем анализа этих эффектов и совершенствования технологического процесса нам удалось увеличить наработку на отказ нагруженного СВЧ-транзистора до психологически важной отметки — не менее 1000 ч при уровнях плотности мощности более 4,5 Вт/мм (рис. 4б), причем достигнутый результат хорошо воспроизводится, в том числе при повышенном рабочем напряжении. Необходимо отметить, что испытания на постоянном токе (в частности, при повышенной температуре кристалла) оказались не чувствительны к данному виду деградации и до оптимизации давали те же результаты, что и после нее. Дополнительным бонусом, полученным в результате оптимизации технологического процесса по параметрам надежности, стало заметное улучшение номинальных характеристик стандартного СВЧ-транзистора до уровня (рис. 1 б–г), позволяющего начать его испытания в составе РЭА.

Разумеется, и сама опробованная методика, и первые, полученные с ее помощью обнадеживающие результаты являются лишь первыми необходимыми шагами, показывающими направление «главного удара». Шагами необходимыми, но не достаточными для реализации полноценной системы испытаний надежности нитридных СВЧ-транзисторов. И только эта система сможет привести к появлению полностью отечественной

перспективной РЭА, не уступающей лучшим мировым образцам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обеспечения технологической безопасности России жизненно необходима аттестация стандартных технологий проектирования и производства СВЧ ЭКБ на основе широкозонных полупроводников группы GaN. Ключевым фактором, обеспечивающим пригодность стандартных технологий для производства СВЧ ЭКБ ответственного применения, является продуманная система испытаний надежности библиотек элементов, входящих в состав стандартных технологий. В АО «Светлана-Рост» начата работа по построению такой системы, учитывающей опыт ведущих мировых производителей нитридной ЭКБ. Показано, что важнейшей частью системы является включение в ее состав испытаний наработки стандартных СВЧ-транзисторов на отказ под нагрузкой в режиме постоянной СВЧ-волны. Разработаны оснастка, испытательный стенд, методики согласования кристаллов в тракте и проведения непрерывного цикла измерений их параметров с фиксацией в режиме реального времени. Полученные в ходе испытаний данные определили параметры оптимизации технологического процесса производства полностью отечественных СВЧ-транзисторов S-диапазона и позволили достичь среднего времени наработки на отказ не менее 1000 ч при удельной плотности СВЧ-нагрузки более 5 Вт/мм в стандартном транзисторе с абсолютным значением СВЧ-мощности 18,5 Вт. Подтвержденная испытаниями жизнеспособность транзисторов S-диапазона

и полученные СВЧ-параметры позволяют начать апробацию образцов в аппаратуре потребителей. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Кищинский А. Твердотельные усилители мощности СВЧ-диапазона со сверхотзывной полосой//СВЧ-электроника. 2019. № 1.
2. Викулов И. Технологическая база GaN СВЧ-микродэлектроники: компани, процессы, возможности//Электроника: НТБ. 2017. № 1.
3. Красовицкий Д. М., Филаретов А. Г., Чалый В. П. Нитридная СВЧ-электроника в России: если еще подождать, уже не догоним//Электроника: НТБ. 2020, № 10.
4. Zolper J. C. A DARPA Perspective on the Future of Electronics. CS MANTECH Conference Digest, 2003.
5. Matsushita K. et.al. Reliability Study of AlGaIn/GaN HEMTs Device. CS MANTECH Conference. Austin, Texas, USA. May 14–17, 2007.
6. Conway A. M. et.al. Failure Mechanisms in GaN HFETs under Accelerated RF Stress. CS MANTECH Conference. Austin, Texas, USA. May 14–17, 2007.
7. S. Singhal et.al. Qualification and Reliability of a GaN Process Platform. Nitronex Corporation/CS MANTECH Conference. Austin, Texas, USA. May 14–17, 2007.
8. www.edn.com/triquint-launches-gan-foundry-service/
9. Великовский Л. Э. и др. Разработки и исследования СВЧ-транзисторов на основе AlGaIn/GaN- и InAlIn/GaN-гетероструктур. В сб.: Мокеровские чтения. 10-я юбилейная Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники, 2019.
10. Бельков В., Цоцорин А., Семейкин И., Черных М. Мощные СВЧ- и переключающие транзисторы на основе нитрида галлия//Электроника: НТБ. 2020. № 5.
11. www.mes-conference.ru/data/year2020/slides/m20-D044-887-8428.pdf
12. Huang H. et al. Investigation of surface traps-induced current collapse phenomenon in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors with schottky gate structures//Journal of Physics D: Applied Physics. 2018. Vol. 51. No. 34.
13. Красовицкий Д. М., Филаретов А. Г., Чалый В. П. Нитридная СВЧ-электроника в России: материалы и технологии//Электроника: НТБ. 2011. № 8.
14. Архипова И. В. и др. Реализация приборного тестирования при разработке гетероструктур. В сб.: Микроэлектроника-2015. Интегральные схемы и микроэлектронные модули: проектирование, производство и применение. Сб. докладов Международной конференции. 2016.
15. Красовицкий Д. М., Филаретов А. Г., Чалый В. П. Физико-технологические аспекты построения foundry производства СВЧ ЭКБ: опыт АО «Светлана-Рост». В сб. Мокеровские чтения. 10-я юбилейная Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. 2019.
16. www.jedec.org/standards-documents
17. Lambert B. et al, Reliability data's of 0.5 μm AlGaIn/GaN on SiC technology qualification//Microelectron. Reliab. 2012. Vol. 52. No. 9–10.
18. Bahl S. R., Ruiz D., Lee D. S. Product-level reliability of GaN devices. In Proc. of 2016 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS). Pasadena, CA, 2016.