

Нитридная СВЧ-электроника в России: если еще подождать, уже не догоним

Д. Красовицкий, к. х. н.¹, А. Филаретов, к. ф.-м. н.², В. Чалый, к. ф.-м. н.³

УДК 621.38 | ВАК 05.27.01

Признанная на государственном уровне необходимость возрождения отечественной микроэлектроники требует принятия комплексных мер, среди которых увеличение финансирования играет важную, но далеко не первостепенную роль. К числу наиболее острых проблем импортозамещения, решаемых отечественными создателями конкурентоспособной СВЧ-электроники, относится вывод на производственный уровень перспективных, но так и не освоенных в России разработок электронной компонентной базы на основе широкозонных полупроводников группы GaN.

«Нашумевшая» в начале 21 века нитридная СВЧ-электроника за рубежом постепенно стала рабочим инструментом, прочно вошедшим в арсенал разработчиков самой разнообразной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) – от беспроводных зарядных устройств до приема-передающих модулей радаров с активной фазированной антенной решеткой (АФАР). К началу массовой экспансии нитридной ЭКБ на мировые рынки, оформившейся к исходу первого десятилетия, отставание отечественных разработчиков от ведущих западных центров оценивалось в несколько лет [1]. Истекает еще одно десятилетие, к западным конкурентам «подтянулись» юго-восточные. Как обстоит дело с нитридной СВЧ ЭКБ в России сейчас?

КРАТКИЙ КУРС СРАВНИТЕЛЬНОЙ ИСТОРИИ НИТРИДНОЙ ЭКБ

С момента получения первых полевых транзисторов на основе широкозонных алмазоподобных полупроводников – нитридов III группы – минуло уже четверть века [2]. Поднимая флаг импортозамещения, мы признаем, что зарубежные коллеги за это время ушли далеко вперед. Этапам развития и современному состоянию нитридной СВЧ-электроники посвящено немало подробных обзоров, в том числе и на страницах журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» [1, 3]. Отметим наиболее существенные вехи: СВЧ-транзисторы на основе GaN по-настоящему «выстрелили» в середине 1990-х, экспериментальные образцы достигли рекордных показателей в начале 2000-х, и на Западе был анонсирован их массовый выпуск. Однако на пути к заявленной коммерциализации наступила довольно продолжительная пауза – практически до конца первой декады наступившего

века. Почему? Качественный ответ можно дать, глядя на заголовки докладов одной из самых представительных ежегодных международных конференций полупроводниковой индустрии – Compound Semiconductors Manufacturing Technologies (CS MANTECH). На первом этапе – практически полное отсутствие упоминаний нитридов в докладах конференции, в то время как научная литература пестрела блестящими сообщениями о достижении «пиковых», зачастую граничащих с фантастикой частотно-мощностных показателей GaN-транзисторов [4]. Можно сказать, что к этому моменту не только перспективы, но и проблемы новой элементной базы были установлены в полной мере, и дело потребовало государственного подхода – и не только в вопросах финансирования.

В 2003 году была анонсирована программа Wide Band Gap Semiconductors (WBGs) американского оборонного агентства перспективных разработок (DARPA) [5] и уже в 2005 году – доложено об успешном завершении ее первой фазы, в ходе которой, по сути, были обобщены и **обобщены** достижения исследовательских и производственных центров в области создания подложек и гетероструктур для нитридных СВЧ-приборов [6]. Немаловажно, что индикаторами достижения целей фазы I программы были не только параметры гетероструктур, но и определяемые ими «приборные» параметры, ставшие основой параметров стандартных элементов, на которых базировались все последующие разработки. Тогда же, в 2005 году, были объявлены и цели последующих фаз программы, одними из важнейших параметров которых стали **показатели надежности** создаваемой ЭКБ – наработка до момента падения выходной мощности на 1 дБ должна была составить не менее 10^5 и 10^6 ч к моменту окончания второй и третьей фаз программы, соответственно.

Аналогичная программа (KORRIGAN) была начата и в Европе, при этом заметное место в ней было уделено изучению механизмов деградации и построению надежных

¹ АО «Светлана-Рост», ведущий инженер проектного офиса.

² АО «Светлана-Рост», заместитель генерального директора по развитию.

³ АО «Светлана-Рост», генеральный директор.

моделей работы GaN-транзисторов. Серьезность подхода не вызывала сомнений: уже в 2007 году в дайджесте CS MANTECH появились сообщения по проблеме надежности и первых достижениях ведущих «игроков» отрасли – Toshiba Corp., Fujitsu, Nitronex, HRL Labs и др. Важно, что уже в этих ранних работах было уделено повышенное внимание отработке новых ускоренных методов тестирования, учитывающих особенности механизмов деградации в нитридных приборах и уникальность режимов их работы [7–9].

В результате интенсивно проводившихся разработок, цели второй фазы WBGs DARPA, в том числе в части параметров надежности, были достигнуты в поставленные сроки [10]. Развитие успеха зарубежных компаний (так, целями фазы III программы WBGs DARPA стали уже монолитные интегральные схемы (МИС) на основе GaN) было «делом техники» – уже в 2008 году одним из лидеров мирового рынка – TriQuint Semiconductors – был анонсирован первый нитридный foundry-процесс [11]. Примеру TriQuint с тем или иным успехом последовали остальные игроки рынка foundry – United Monolithic Semiconductors, OMMIC, Win Semiconductors и др. [3].

В России, несмотря на «отложенный старт» (начало включения в тематику финансируемых государством НИОКР по нитридной тематике относится к 2004 г.) и отсутствие структурированной и логичной программы разработки, аналогичной зарубежной, первые ощутимые результаты были получены уже к 2006 году, а к 2011 году отставание в части достигнутых «знаковых» частотно-мощностных параметров СВЧ-транзисторов составляло, по некоторым оценкам, не более нескольких лет [1]. Правда, по сравнению с целями фазы II программы WBGs DARPA и ей аналогичных в достигнутых в России параметрах СВЧ-транзисторов не хватало «последней строчки» – надежности. Казалось, тут бы закатать рукава и, объединив усилия, «догнать и перегнать», как бывало не раз в нашей истории. Появились ли за последнее десятилетие, прошедшее с момента начала стремительного роста кривой потребления нитридной ЭКБ на мировых рынках, отечественные производители, готовые обеспечить растущие потребности отечественных же разработчиков РЭА?

К сожалению, дальнейшее развитие ситуации оказывается не в нашу пользу:

- число отечественных научных или отраслевых публикаций, сколько-нибудь детально обсуждающих проблемы надежности нитридной ЭКБ, исчезающе мало;
- финансирование направления государством, и без того несравнимое по объему с зарубежным, пошло по ниспадающей («все ведь уже разработано!») и к 2015 году практически сошло на нет;
- последняя, 11-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы» – единственная специализированная площадка, на которой обсуждались практические проблемы

внедрения перспективных нитридных разработок, состоялась в феврале 2017 года – задолго до нарушившей многие планы пандемии COVID-19.

Это лишь внешние признаки, свидетельствующие об угасании направления СВЧ-электроники, поначалу казавшегося по-настоящему прорывным. Основная же причина сложившегося положения дел представляется нам методологической (если не сказать стратегической).

СИСТЕМА ИСПЫТАНИЙ НАДЕЖНОСТИ БИБЛИОТЕК СТАНДАРТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ – КРАЕУГОЛЬНЫЙ КАМЕНЬ НАДЕЖНОСТИ ЭКБ, ПРОЕКТИРУЕМОЙ НА ИХ ОСНОВЕ

Что же помогло зарубежным разработчикам эффективно решить проблему надежности нитридной ЭКБ и вывести ее на рынок? Размеры финансирования тематики? Отчасти да, но не только. Ключ к решению оказался практически универсальным: построение разработки и производства по принципу foundry. Точнее, выбор объекта испытаний, соответствующего такой логике разработки. В ней всё внимание и ресурсы сосредоточены не на испытаниях конечных изделий, разработанных на основе библиотек под конкретные применения, а на проведении процедур квалификации технологических процессов, обеспечивающих необходимый уровень надежности стандартных элементов, на которых строились библиотеки. При этом, хотя сами подходы к статистическому описанию надежности были традиционными для ЭКБ АЗВ5, достижимые параметры надежности нитридных транзисторов и, **главное – методология и режимы** их испытаний – были кардинальным образом пересмотрены, а зачастую разработаны заново. Определение механизма отказов на основе изучения физики деградации приборов на широкозонных полупроводниках, поведенческие модели стандартных элементов и построенные на их основе средства проектирования – **именно это** является настоящим **ноу хау** нитридных разработок зарубежных компаний, охраняемым за семью печатями. Параметры надежности элементов библиотек (building blocks в терминах международных стандартов [12], например JEPI18A) должны сохраняться на всех уровнях системной архитектуры, что дает основания распространить их на изделия, проектируемые при помощи библиотек. На этой основе выстраиваются двусторонние связи между требованиями к технологическому процессу, изготовленной посредством этого технологического процесса библиотеке стандартных элементов и проектируемой из этих стандартных элементов ЭКБ.

Таким образом, выполнение требований надежности к изделиям должны обеспечиваться надлежащей квалификацией технологий. Именно поэтому зарубежные компании устанавливают категории качества (*Industrial, Military, Space*) применительно к снабженным правилами проектирования технологиям производства. Спроектированные и производимые при помощи таких технологий изделия

в части параметров надежности соответствуют этим категориям **автоматически** (*technology defined reliability*). Именно такой подход и определил развитие и широкое применение нитридной ЭКБ за рубежом.

СКОЛЬКО ВЕРЕВОЧКЕ НИ ВИТЬСЯ...

Отечественные разработчики РЭА некоторое время охотно покупали и ставили в аппаратуру замечательные по частотно-мощностным параметрам и надежные (разумеется, в рамках доступной категории *Industrial*) американские и японские (позже – китайские) СВЧ-транзисторы и МИС; а наши технологические компании прилежно проводили их back engineering и отработывали «критические» блоки технологического процесса. При этом неизбежно образовался разрыв интересов конструкторской и технологической ветвей разработки: параметры надежности импортной ЭКБ подтверждались испытаниями в составе РЭА и, по большому счету, оставались за кадром. А технологам, разрабатывающим аналоги импортной ЭКБ, никто не брался сформулировать адекватные целевые параметры оптимизации технологических процессов. В итоге – в ОКР по разработке изделий использовались (и продолжают использоваться до сих пор!) требования надежности и стандарты по ее испытаниям, разработанные зачастую в прошлом веке (например, ГОСТ РВ 20.57.414-98) для традиционной ЭКБ. Логично ли, что испытания безотказности СВЧ-устройств (даже кратковременные!) в соответствии с существующей нормативной базой проводятся на **постоянном** токе? Ведь сколько копий было сломано в научной литературе по проблеме так называемого высококачественного коллапса в нитридных транзисторах, само определение которого звучит как «необратимое падение рабочего тока стока в СВЧ-режиме по сравнению со значением тока насыщения I_{dss} »? Если же разработанная и успешно (!) прошедшая приемочные испытания в рамках ОКР отечественная ЭКБ не работала должным образом в аппаратуре, «прибористы» с сожалением говорили: «Пока технологи подтягивают **свою** технологию, мы поработаем с импортными комплектующими».

Таким образом, с одной стороны, конструкторы РЭА вкусили прелесть импортных электронных компонентов на основе GaN и начали строить свои системы, в том числе ответственного применения, на их основе [13]. Более того, современная логика развития перспективной СВЧ-техники уже **требует именно таких**, обеспечиваемых экстремальными параметрами широкозонной ЭКБ, решений – иные просто неконкурентоспособны. С другой стороны, ответственные применения требуют обеспечения **по-настоящему серьезных** параметров надежности ЭКБ (как минимум, соответствующих зарубежным категориям качества *Military* и *Space*). Продажа такой ЭКБ в Российскую Федерацию подпадает под эмбарго/санкции; проектирование и изготовление на зарубежных фабриках-foundry ЭКБ

по техпроцессам, квалифицированным на указанные категории, также закрыто для «чужих», причем довольно давно. Да и «запасы» импортных комплектующих категории *Industrial*, сформированные разработчиками РЭА в былые годы, иссякают. Отечественные конструкторы начинают (кто-то растерянно, кто-то раздраженно) озираться вокруг в поисках отечественных же производителей нитридной ЭКБ. Что же они видят?

К сожалению, пока – только десятки успешно (!) проведенных ОКР по разработке тех или иных наименований изделий, иногда – «параметрических рядов». В лучшем случае – их результатом стало использование конкретных разработанных опытных образцов в опытных же образцах РЭА. Возможно, в отдельных случаях (авторам неизвестных), дело дошло даже до мелкосерийного выпуска. Полезны ли такие результаты коллегам по отрасли? Практически – нет. В худшем же случае – результаты ОКР остались не востребованными в ожидании реализации так называемых «предложений по внедрению» (такие предложения оформляются в конце каждой ОКР и, как правило, обосновывают необходимость привлечения дополнительных ресурсов на подготовку и освоение производства в соответствии с существующей нормативной базой). В чем корень подобной неэффективности государственных вложений в НИОКР? Конечно же в том, что финансировались «не те» разработки. «Настоящих» стандартных нитридных технологий, включающих в себя современные инструменты проектирования и библиотеки элементов с подтвержденными испытаниями параметрами надежности, в России разработано не было. Более того, ни специфические критерии отказов, ни основанные на них параметры надежности нитридной ЭКБ, равно как и методы их испытаний, у нас не исследовались, не разрабатывались и не стандартизовались. Есть ли выход из столь непростой ситуации? Конечно, есть.

НОВОЕ РАНО ИЛИ ПОЗДНО СТАНОВИТСЯ СТАРЫМ, ЕСЛИ ЕГО ЗАБЫВАТЬ, ИЛИ НАДЕЖНЫМ – ЕСЛИ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАТЬ

Очевидно, что «перескочить» через проблему надежности нитридной ЭКБ с ходу не удалось, и зарубежный опыт является тому прямым подтверждением. Это всего лишь означает, что пора, наконец, разложить проблему на составляющие и последовательно их решить. Тем более, что определенные наработки (да простят нам читатели невольную тавтологию) в отечественной практике все же есть.

На надежность полупроводниковой (и широкозонные нитриды не являются исключением) ЭКБ в течение ее жизненного цикла оказывают влияние сразу несколько 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 и недостаточный теплоотвод и т. д.).

Недостаток и сложность сложившейся практики проектирования и производства ЭКБ состоит в том, что испытывать изделие на надежность приходится **в конце** всего цикла разработки, и сразу – на воздействие всего комплекса перечисленных факторов. Использование аттестованных стандартных технологий, снабженных комплексными инструментами проектирования, помогает не только существенно сократить сроки цикла разработки ЭКБ, но и **эффективно оптимизировать** ресурсы, затрачиваемые на обеспечение надежности (рис. 1). С точки зрения конечного заказчика и бенефициара – государства, заинтересованного в возрождении сильной, импортонезависимой стратегически важной отрасли, каковой является электроника – такой подход означает перераспределение ресурсов в сторону затрат на развитие технологий. При этом затраты на разработку самих конкретных образцов ЭКБ – причем, ЭКБ специализированной, отвечающей самым насущным запросам разработчиков РЭА – сведутся к затратам на обеспечение работы дизайн-центров. С точки зрения конструкторов систем РЭА – такой подход принесет снятие ограничений на творческий поиск, продиктованных необходимостью использования узкой номенклатуры унифицированной ЭКБ и невозможностью финансово обеспечить комплекс дорогостоящих испытаний (в первую очередь, на надежность и стойкость к воздействию внешних факторов) ее новых видов. С точки зрения технологических компаний – такой подход кратное повысит эффективность разработок технологий благодаря их востребованности и отсутствию необходимости «подготовки и освоения» производства каждого конкретного образца изделия ЭКБ. В выигрыше останутся **все участники процесса**. И это – не благожелания. Вернемся к надежности нитридной СВЧ ЭКБ.

АО «Светлана-Рост» «живет» в нитридной тематике практически с момента своего образования и строит свои разработки «от печки» – от технологии выращивания гетероструктуры

с двумерным электронным газом, обеспечивающей уникальность электрофизических свойств приборов на ее основе [14]. Конструкция гетероструктуры выбиралась исходя из существующих на тот момент (и многократно подтвержденных последующими исследованиями) представлений о механизмах деградации канала с двумерным электронным газом, то есть применяя терминологию схемы, показанной на рис. 1, факторах, определяющих средний срок наработки на отказ и старение элементов, создаваемых на ее основе. Однако гетероструктура как таковая стоит в самом начале технологической цепочки создания ЭКБ, поэтому вклад деградации ее параметров в старение конечных приборов и систем необходимо было выявить и устранить как можно раньше. К сожалению, отечественная структура постановки и финансирования НИОКР и действующая нормативная база не предусматривали подобных действий, и в данном аспекте разработчикам пришлось положиться на зарубежный опыт и свое видение проблемы. Результаты, достигнутые за несколько лет [1], можно было бы назвать везением, однако случай проверить исходные постулаты разработки все же представился. В [15] 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 был впервые реализован принцип приборного тестирования гетероструктур для СВЧ МИС в «расширенном» объеме, включая испытания на стойкость к внешним воздействиям и ускоренные испытания на безотказность. При этом был применен комплекс методик, включающий в себя как неразрушающие измерения электрических параметров нитридных



Рис. 1. Схема обеспечения параметров надежности библиотек стандартных элементов на уровне фабрики foundry

гетероструктур, так и измерения специально подобранных тестовых элементов на пластине до и после воздействия спецфакторов, а также в ходе воздействия факторов ускорения деградации. Было показано, что «гетероструктурные» факторы в данном случае должны обеспечивать наработку на отказ не менее 10^6 ч, что было бы достаточной базой, по крайней мере, с точки зрения целевых показателей той же программы WBGs DARPA. Оставалось только сохранить и развить этот «потенциал» созданием столь же надежных стандартных элементов, и в первую очередь – СВЧ-транзисторов [16].

Как было отмечено в начале статьи, за последнее пятилетие развитие тематики было заметно заторможено вследствие недостаточного финансирования и, к сожалению, отсутствия достаточной кооперации отечественных разработчиков разного уровня. В ситуации, когда основным критерием оптимизации конструкций и технологий нитридной ЭКБ должны были бы стать вопросы надежности, на всех ступенях процесса вылезли наружу многочисленные препятствия – путаница и неопределенность требований к приборным параметрам, несовершенство методик и нормативной базы испытаний, отсутствие подходящей оснастки и т.д. Тем не менее, достигнутые в эти годы отдельные перспективные результаты [17, 18] не дали направлению окончательно угаснуть. Но одна из важнейших целей отечественных нитридных разработок, а именно получение «долгоживущих» СВЧ-транзисторов – осталась по-прежнему нереализованной.

АО «Светлана-Рост» начало борьбу за надежность СВЧ мощных транзисторов в инициативном порядке. Большой собственный экспериментальный задел и достаточно широко освещенная в зарубежных публикациях и стандартах общая методология квалификации технологических процессов [12, 19] позволили путем совершенствования технологического процесса увеличить наработку на отказ (соответствующую правой границе центральной области кривой на рис. 1) нагруженного СВЧ-транзистора S-диапазона с суммарной шириной затвора (периферией) 3,5 мм до психологически важной отметки – не менее 1000 ч (рис. 2). Примечательно, что эти результаты были достигнуты на зафиксированной год назад конструкции стандартного транзистора, что свидетельствует о правильности определения перечня факторов оптимизации и методологии ее проведения.

Достигнутый результат соответствует уровню «первых побед в битве за надежность», которую развернули и выиграли участники программы WBGs DARPA около десяти лет назад. Уровню, показывающему, что эту битву можно и нужно выиграть. Пока еще не стало слишком поздно.

Сравнение динамики развития разработок в области СВЧ-электроники на основе соединений широкозонных нитридов III группы показывает, что за минувшее десятилетие отставание Российской Федерации от ведущих зарубежных центров увеличилось. Для обеспечения

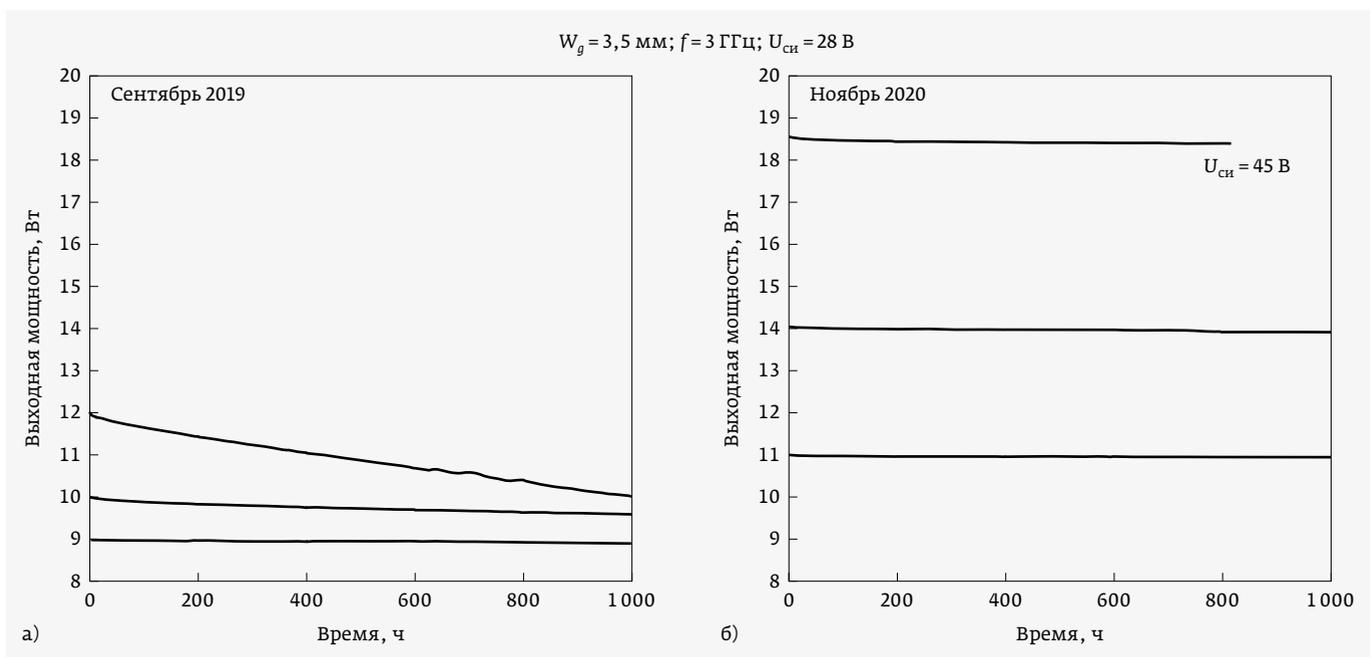


Рис. 2. Результаты оптимизации технологии изготовления стандартного транзистора S-диапазона по наработке на отказ под СВЧ-нагрузкой на постоянной волне (кривые на графике слева показывают явную зависимость степени деградации транзистора от уровня СВЧ-нагрузки)

технологической безопасности государства в этой области жизненно необходим пересмотр принципов выделения и использования ресурсов, заключающийся в смещении акцента государственной поддержки с разработок конкретных образцов ЭКБ в сторону разработки и квалификации стандартных технологий ее проектирования и производства.

Главной и неотложной задачей разработчиков таких технологий должна стать выработка методологии, сконцентрированной на решении проблем надежности перспективной ЭКБ. Основные черты такой методологии можно сформулировать следующим образом:

- параметры надежности должны быть установлены применительно к стандартным элементам (и их библиотекам), как неотъемлемой части стандартных технологий. Это даст возможность строить поведенческие модели, дающие разработчикам РЭА инструмент предсказания параметров надежности на всех уровнях системной архитектуры;
- «правильный подход» к построению системы определения надежности стандартных элементов должен базироваться на понимании физической природы отказов (механизмов деградации) и требует целенаправленного и серьезного изучения этих механизмов;
- методики испытаний параметров надежности стандартных элементов должны быть **разработаны** с учетом этих механизмов и **стандартизованы**, в том числе методики испытаний наработки под СВЧ-нагрузкой. Параметры надежности изделий ЭКБ, спроектированных и произведенных на основе стандартных элементов с установленным уровнем надежности, должны оцениваться при помощи поведенческих моделей и, при необходимости, подтверждаться испытаниями в составе аппаратуры.

С использованием ключевых элементов описанного подхода к методологии разработки, в АО «Светлана-Рост» получены первые результаты, демонстрирующие пригодность разработанного технологического процесса для производства «полностью отечественных» СВЧ-транзисторов S-диапазона и усилителей на их основе со средним временем наработки на отказ не менее 1000 ч при удельной плотности СВЧ-мощности более 5 Вт/мм в транзисторе с абсолютным значением СВЧ-мощности 18 Вт.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Красовицкий Д. М., Филаретов А. Г., Чалый В. П.** Нитридная СВЧ-электроника в России: материалы и технологии // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2011. № 8. С. 114.
2. **Asif Khan M. et. al.** High electron mobility transistor based on a GaN-Al_xGa_{1-x}N heterojunction // Appl. Phys. Lett. 1993 (63). P. 1214.
3. **Викулов И.** Технологическая база GaN СВЧ-микроэлектроники: компании, процессы, возможности // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2017. № 1. С. 106.
4. **Wu Y. et al.** 30-W/mm GaN HEMTs by field plate optimization // IEEE Electron Device Letters. 2004 (25). № 3. P. 117.
5. **Zolper J. C.** A DARPA Perspective on the Future of Electronics // CS MANTECH Conference Digest. 2003.
6. **Rosker M.** Wide Bandgap Semiconductor Devices and MMICs: A DARPA Perspective. CS MANTECH Conference Digest, 2005.
7. **Matsushita K. et. al.** Reliability Study of AlGaIn/GaN HEMTs Device // CS MANTECH Conference Digest. 2007. P. 87.
8. **Conway A. M. et. al.** Failure Mechanisms in GaN HFETs under Accelerated RF Stress. CS MANTECH Conference Digest, 2007. P. 99.
9. **Singhal S. et. al.** Qualification and Reliability of a GaN Process Platform. Nitronex Corporation/CS MANTECH Conference Digest, 2007. P. 83.
10. **Rosker M. et. al.** The DARPA Wide Band Gap Semiconductors for RF Applications (WBG-S-RF) Program: Phase II Results // CS MANTECH Conference Digest, 2009.
11. <https://www.edn.com/triquint-launches-gan-foundry-service/>
12. <https://www.jedec.org/standards-documents>
13. **Кищинский А.** Твердотельные усилители мощности СВЧ-диапазона со сверхоктавной полосой // СВЧ-электроника. 2019. № 1. С. 20.
14. **Алексеев А. Н. и др.** Многослойные гетероструктуры AlN/AlGaIn/GaN/AlGaIn – основа новой компонентной базы твердотельной СВЧ-электроники. Компоненты и технологии. 2008. № 2. С. 138.
15. **Архипова И. В. и др.** Реализация приборного тестирования при разработке гетероструктур // В сб.: Микроэлектроника-2015. Интегральные схемы и микроэлектронные модули: проектирование, производство и применение. Сборник докладов Международной конференции. 2016. С. 361.
16. **Красовицкий Д., Филаретов А., Чалый В.** Стандартизованные процессы производства нитридной СВЧ ЭКБ. Состояние и ближайшие перспективы // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2013. № 3. С. 70.
17. **Тарасов С. В. и др.** Мощные GaN-транзисторы для применения в модулях L- и S-диапазона мобильных средств связи // В сб. докладов Международной конференции: Микроэлектроника-2015. Интегральные схемы и микроэлектронные модули: проектирование, производство и применение. 2016. С. 355.
18. **Великовский Л. Э. и др.** Разработки и исследования СВЧ транзисторов на основе AlGaIn/GaN и InAlN/GaN гетероструктур // В сб.: Мокеровские чтения. 10-я Юбилейная Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. 2019. С. 33.
19. **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, p. 4A-3-1.