

СВЧ-компоненты на основе технологии нитрида галлия: что изменилось за два года

А. Кищинский¹, В. Миннебаев²

10–11 ноября 2022 года в Москве состоялся II семинар-совещание специалистов радиоэлектронной промышленности на тему «Актуальные вопросы разработки и применения СВЧ-компонентов и приборов на основе технологии нитрида галлия (GaN-2022)». Мероприятие было организовано АО «Микроволновые системы» (Москва). Цель мероприятия – обмен опытом и налаживание прямого взаимодействия между руководителями, учеными, специалистами радиоэлектронной промышленности, представителями дизайн-центров, вузовской и академической науки в решении задачи становления и развития в России промышленных технологий производства нитрид-галлиевых СВЧ-компонентов (транзисторов и интегральных схем), повышения качества и технического уровня разрабатываемых на основе этих компонентов модулей, приборов и радиотехнических систем.

Научно-техническая программа семинара-совещания включала широкий круг вопросов: от создания гетероэпитаксиальных структур, разработки ростовых и пост-ростовых технологий, оборудования для их производства до особенностей проектирования, изготовления, испытания и эксплуатации радиолокационной, связной и другой аппаратуры на основе нитрид-галлиевых компонентов.

В течение двух дней на шести заседаниях, проходивших в пленарном режиме в конгресс-центре гостиничного комплекса «Измайлово», были заслушаны и обсуждены 36 докладов специалистов, представлявших 30 российских и белорусских предприятий и организаций. Всего в мероприятии принял участие 181 специалист из 82 предприятий и организаций.

Открыл заседание Андрей Александрович Кищинский, главный конструктор АО «Микроволновые системы», отметивший, что 10-летняя история проведения научно-технических семинаров по этой тематике показывает постоянный рост числа участников-специалистов и участников-предприятий.

Алексей Николаевич Алексеев, генеральный директор АО «НТО», единственного российского разработчика

и производителя установок молекулярно-лучевой эпитаксии для полупроводниковых материалов A_3N , A_3B_5 и A_2B_6 , в своем докладе сообщил, что в настоящее время предприятие серийно выпускает установки МЛЭ для работы с подложками диаметром до 100 мм и объемом загрузки источников до 100 см³, в которых используются собственные ключевые технические решения, в том числе целый ряд запатентованных ноу-хау. Среди них можно выделить оригинальную ростовую геометрию с возможностью оптимизировать расстояние от молекулярных источников до подложки, проверенную временем конструкцию криопанелей, молекулярных и газовых источников, ростового манипулятора, узла нагрева подложки, заслонок источников. В то же время актуальной в настоящее время является разработка производственно-ориентированной установки МЛЭ, оптимизированной для выращивания эпитаксиальных слоев и гетероструктур на подложках диаметром до 150 мм. Одним из наиболее перспективных применений установки, рассчитанной на подложки диаметром 100–150 мм, является получение так называемых невплавных зарощенных омических контактов к гетероструктурам для СВЧ-транзисторов и МИС на основе GaN. «Невплавные» контакты p+GaN позволяют значительно улучшить морфологию и края контакта, а также снизить сопротивление с 0,3–0,4 до 0,1–0,15 Ом·см, что позволит существенно улучшить параметры транзисторов и МИС на основе GaN (в том числе на основе гетероструктур GaN/Si) и заметно расширить частотный диапазон СВЧ-приборов до 100 ГГц и выше. В заключение были

¹ АО «Микроволновые системы», заместитель генерального директора, главный конструктор, ak@mwsystems.ru.

² АО «Микроволновые системы», заместитель генерального директора по развитию ЭКБ, vm@mwsystems.ru.

представлены результаты использования предприятиями-производителями СВЧ ЭКБ серийно выпускаемого АО «НТО» оборудования. В частности, на примере цикла «разработка-производство» в АО «Светлана-Рост» была показана возможность использования комплекса отечественного оборудования для основных операций технологического маршрута создания мощного нитридного транзистора.

Ведущий инженер-технолог АО «Элма-Малахит» Максим Олегович Никифоров отметил, что проблему развития достаточно объемного производства гетероэпитаксиальных структур на основе нитрида галлия и его соединений методом MOCVD можно решить на базе реактора, разработанного предприятием и обеспечивающего получение в одном процессе пяти структур диаметром три дюйма или четырех структур диаметром четыре дюйма. Были приведены основные характеристики получаемых структур: неоднородность слоевого сопротивления по площади подложек не превышает 1,5% для гетероструктур диаметром четыре дюйма; подвижность электронов в структурах для HEMT-транзисторов на подложках SiC достигает $2400 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, а реализуемая плотность носителей заряда двумерного газа составляет $(1,2-1,5) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. В докладе были также приведены результаты, полученные при использовании гетероструктур при создании СВЧ-приборов и схем на предприятиях-потребителях.

Сергей Дмитриевич Федотов, ведущий научный сотрудник АО «Эпиэл», представил совместный доклад АО «Эпиэл», НТЦ Микроэлектроники РАН и АО «НПП «Салют» (Нижний Новгород), в котором ознакомил участников с результатами разработки технологии выращивания гетероструктур Ga(Al)N/Si диаметром 100–150 мм на MOGFЭ-установке Dragon-125, разработанной в НТЦ Микроэлектроники РАН совместно с ООО «Софт-Импакт». На разработанных структурах в АО «НПП «Салют» были получены тестовые GaN HEMT СВЧ-транзисторы с максимальным током стока насыщения 1200 мА/мм , крутизной транзисторов не менее 300 мСм/мм , напряжением обратного пробоя более 50 В и граничной частотой около 80 ГГц .

Александр Сергеевич Гусев, заместитель директора Центра радиофотоники и СВЧ-технологий НИЯУ МИФИ, представил результаты исследования полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии с плазменной активацией азота AlN/GaN HEMT-гетероструктур, содержащих ультратонкий барьер AlN (5 нм), и влияния режимов роста нуклеационного слоя на кристаллическое качество, морфологию поверхности и электрофизические свойства экспериментальных ГС. Слоевого сопротивление оптимизированной ГС составило менее $230 \text{ Ом}/\square$. На основе гетероструктуры были изготовлены тестовые СВЧ-транзисторы с затвором Шоттки ($L_g = 250 \text{ нм}$), анализ характеристик которых показал, что они имеют максимальный

ток насыщения стока до $1,4 \text{ А/мм}$ (при $U_{GS} = +2,5 \text{ В}$), крутизну характеристики G_m до 330 мСм/мм и сопротивление в открытом состоянии $R_{on} = 2,8 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$. Предельные частоты усиления по току f_t и по мощности f_{max} достигают 50 и 80 ГГц соответственно. Было отмечено, что применение ультратонкого барьерного слоя AlN дает преимущества в плотности квазидвумерного электронного газа и в аспектном соотношении L_g/d (где L_g – длина затвора транзистора, d – толщина барьера). При этом высокое аспектное соотношение позволяет масштабировать длину затвора L_g транзистора, не опасаясь проявления эффектов короткого канала в полевом транзисторе.

Заместитель заведующего Центром Института физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси Евгений Викторович Луценко рассказал о результатах совместной работы с Минским НИИ радиоматериалов. Использование слоев $n++ \text{ GaN/Si}$ с концентрацией электронов около или более 10^{20} см^{-3} позволяет создавать ультранизкоомные омические контакты с сопротивлением менее $0,1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$. В Институте физики НАН Беларуси были исследованы технологии аммиачной и плазменной цифровой молекулярно-пучковой эпитаксии GaN/Si, позволяющей получить концентрации электронов $n++ \text{ GaN/Si}$ до $4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ без значительной самокомпенсации. Высокие концентрации кремния (электронов) приводили как к коротковолновому смещению полосы фотолюминесценции вследствие эффекта Бурштейна – Мосса, так и к образованию более длинноволновой полосы. Минимальное удельное сопротивление составило $2,4 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{мм}$ для концентрации электронов $3,55 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ с подвижностью $73,4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, что является лучшим мировым результатом для слоев $n++ \text{ GaN/Si}$ и имеет большое значение не только для нитридных СВЧ и силовых транзисторов, но и для светодиодов, лазеров и особенно для создания качественных туннельных переходов.

Сергей Арсеньевич Кукушкин, заведующий лабораторией Института проблем машиноведения РАН, представил результаты работы, выполненной предприятием в рамках госзадания № FFNF-2021-0001 Министерства науки и высшего образования РФ. В докладе были изложены основные положения нового метода синтеза эпитаксиальных пленок нанокарбида кремния на кремнии. Разработанный метод основан на замещении части атомов в кремнии на атомы углерода без разрушения кремниевой основы, что существенно отличает его от классического метода роста пленок. Качество структуры слоев, полученных данным методом, значительно превосходит качество пленок карбида кремния, выращенных на кремниевых подложках ведущими мировыми компаниями. Метод дешев и технологичен. Использование данного метода позволяет прямо на кремниевой подложке синтезировать широкий спектр широкозонных материалов, что открывает беспрецедентные возможности



Рис. 1.
Пластина
нано-SiC/Si
диаметром
150 мм,
полученная
методом
согласованного
замещения
атомов

для создания нового типа приборов – буферный слой карбида кремния на кремнии позволяет формировать на нем слои других широкозонных полупроводников на кремнии. В настоящее время в ИПМаш РАН начато производство пластин SiC/Si диаметром 2, 3, 4 и 6 дюймов (рис. 1); разработана технология создания светодиодных чипов для микро-LED на пластинах SiC/Si; изготовлены первые в мире опытные образцы микрочипов для микросветодиодов толщиной порядка 5–20 мкм на основе гетероструктуры AlInGaN/GaN, сформированной на пластинах SiC/Si; разработаны и созданы терагерцовые приемники и излучатели на подложках SiC/Si; разработана технология создания на подложках SiC/Si пиро- и пьезодатчиков с пирокоэффициентом $12 \text{ мкКл/м}^2 \cdot \text{К}$ со слоем AlN и $18 \text{ мкКл/м}^2 \cdot \text{К}$ со слоем AlGaIn, что на сегодняшний день в три раза превышает подобные коэффициенты известных материалов, изготовленных на основе AlN.

Олег Николаевич Минин, начальник лаборатории АО «НИИПП», представил результаты исследования удельного контактного сопротивления к p-слою нитрида галлия системы металлов Ti/Al/Ni/Au с различным соотношением Ti/Al с последующим процессом быстрого термического отжига в среде азота при температурах свыше 700 °С. Было отмечено, что использование предварительной ионной очистки поверхности образца позволяет получить значение удельного контактного сопротивления $\rho_c \approx 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ без проведения процесса отжига контактов, а также получена зависимость удельного контактного сопротивления после проведения последующей температурной обработки.

Максим Леонидович Занавескин, начальник отдела ККНБИКС-пт НИЦ «Курчатовский институт», рассказал, что в 2022 году на предприятии начались подготовительные работы по организации мелкосерийного foundry-производства монолитных интегральных схем по технологии GaN/Si на пластинах диаметром 100 мм с проектными нормами 0,15 и 0,1 мкм. Основными особенностями технологии являются использование структур GaN-on-Si с барьерным слоем AlN и in-situ-пассивацией SiN на подложках диаметром 100 мм, а также применение технологии

эпитаксиальных дорасширяемых контактов с низким сопротивлением контакта к двумерному электронному газу. Технологические маршруты изготовления МИС были разработаны в отделе ККНБИКС-пт НИЦ «Курчатовский институт». При участии ООО «500m Технолджиз» были созданы тестовые структуры для измерения характеристик элементов СВЧ МИС и параметрические модули. Транзисторы с периферией затвора $2 \times 60 \text{ мкм}$, созданные по разработанной технологии, обладают выходной мощностью свыше 2,5 Вт/мм на частоте 30 ГГц.

Заместитель начальника научно-производственного комплекса АО «НПП «Исток им. А. И. Шокина» Константин Владимирович Дудинов сделал краткий обзор мирового развития GaN-технологий и представил критериальную оценку по величине максимальной выходной мощности между кристаллами транзисторов, МИС и корпусированными СВЧ-транзисторами. Было отмечено, что основные характеристики GaN-транзисторов зависят от применяемых подложек (в настоящее время применяются подложки SiC и Si), параметров буферных и активных слоев гетероструктуры, технологического процесса изготовления транзисторов и МИС. Подложки Si существенно дешевле, нежели SiC, однако достигнутый в России уровень сопротивления $2000 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$ недостаточен для МИС СВЧ в Ka-диапазоне частот и выше. Следующей проблемой, требующей скорейшего решения, является создание промышленной технологии создания GaN-транзистора с невжигаемыми омическими контактами, что позволяет такому транзистору работать не только в качестве усилителя большой мощности, но и в качестве МШУ, что решает задачу создания на одном кристалле СВЧ МИС полноценного приемопередающего устройства (front-end). В заключение докладчик отметил, что в НПП «Исток им. А. И. Шокина» в настоящее время полностью развиваются две технологии:

- на основе AlGaIn/GaN – для выходных ВЧ- и СВЧ-усилителей (включая Ku-диапазон) и в области силовой электроники;
- на основе AlN/GaN – для выходных усилителей широкого диапазона частот, включая мм и суб-мм диапазоны длин волн, для приемных усилителей с повышенным диапазоном предельных входных мощностей, приемопередающих СВЧ МИС с более высокой интеграцией элементов, в том числе front-end-устройств.

Старший научный сотрудник АО «НПП «Исток им. А. И. Шокина» Александр Борисович Пашковский представил конструкцию GaN полевого транзистора на кремниевой подложке с эффективным теплоотводом из области тепловыделения по слоям полиалмаза, сформированным на стенках заземляющих отверстий (рис. 2). По оценкам (3D-расчетам) в результате введения такого теплоотвода при одинаковом среднем расстоянии между

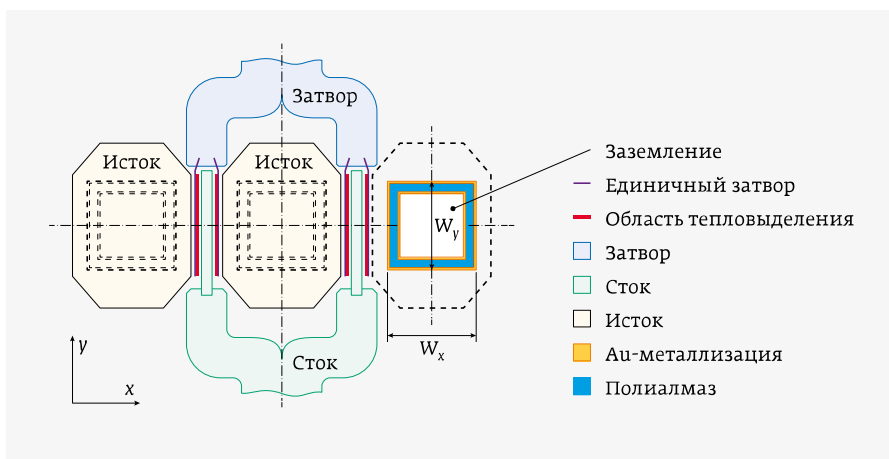


Рис. 2. Схематичный вид сверху на группу секций GaN-транзистора со слоями полиимазы, сформированными на стенках заземляющих отверстий

секциями затворов максимальная температура в канале GaN-транзистора на Si-подложке существенно уменьшается и становится сравнимой с максимальной температурой в канале GaN-транзистора на SiC-подложке.

Владимир Алексеевич Беляков, ведущий научный сотрудник АО «НПП «Салют» (Нижний Новгород), представил результаты изготовления HEMT-транзистора с длиной затвора $W_3 = 130$ нм на основе гетероструктур AlGaIn/GaN на подложке SiC, продемонстрировавшего следующие параметры: максимальная удельная крутизна $S = 350$ мСм/мм, пробивное напряжение $U_{си.проб} > 60$ В, предельная частота усиления по току $f_T \geq 70$ ГГц, выходная мощность $P_{вых.уд.} \geq 2,5$ Вт/мм на частоте $F_{изм} = 33$ ГГц.

Главный конструктор ООО «Элиарс» Михаил Васильевич Съедин рассказал о результатах создания базовых усилительных модулей с выходной мощностью 10–20 Вт Ка- и V-диапазонов частот на основе GaN МИС, необходимых

для изготовления усилителей киловаттного класса на основе многоканальных волноводных сумматоров.

Дмитрий Михайлович Мосейкин, инженер первой категории ООО «НПП «Радар-прибор», представил внутрисогласованный импульсный транзистор с полосой частот 9–10 ГГц и выходной мощностью 150–200 Вт в типовом металлокерамическом корпусе (рис. 3), разработанный в качестве импортозамещения транзисторов SGK0910-I20A (Sumitomo) и NDNM01043 (NEDI). Отработка вариантов исполнения осуществлялась на кристаллах нескольких предприятий (АО «Светлана-Электронприбор», ООО «ИПК «Электрон-Маш» и др.).

Предварительный анализ характеристик полученных образцов был проведен на автоматизированной широкополосной установке измерения параметров с использованием электронных тюнеров Maury MT982BL, а оценка теплового распределения на поверхности кристаллов была выполнена с помощью ИК-микроскопа с разрешающей способностью 15 мкм/пикс.

Начальник лаборатории АО «НПП «Пульсар» Борис Вячеславович Емельянов представил результаты совместной с АО «Светлана-Рост» работы по созданию серийного производства предсогласованных транзисторов диапазона 2,7–3,1 ГГц (рис. 4). За основу были взяты кристаллы мощных GaN-транзисторов с $W_3 = 0,5$ мкм, изготовленные в АО «Светлана-Рост» в ходе полного производственного цикла – от роста эпитаксиальной гетероструктуры до разделения пластины на отдельные кристаллы. Транзистор обеспечивает $P_{вых} = 75$ Вт при $U_{си} = 50$ В и КПД $\geq 59\%$.

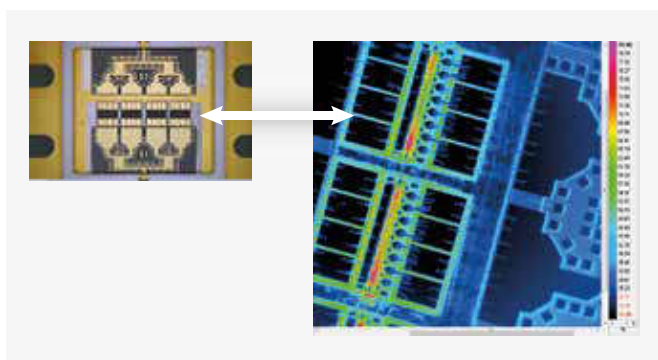


Рис. 3. Внутрисогласованный импульсный транзистор и тепловое распределение на поверхности GaN-кристаллов

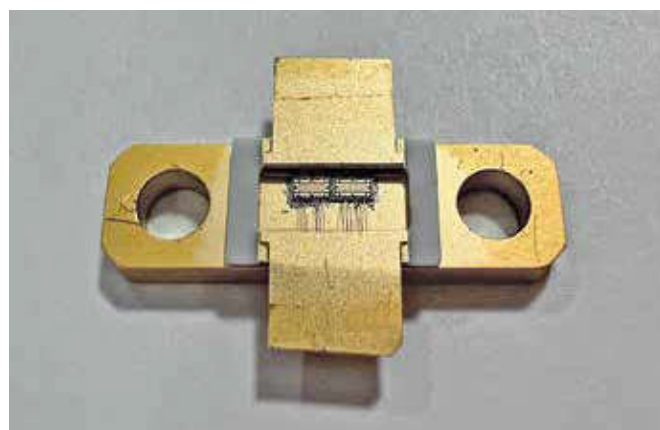


Рис. 4. 75-Вт GaN-транзистор S-диапазона

Заместитель генерального директора АО «Светлана-Рост» Алексей Гелиевич Филаретов предложил к обсуждению проблематику внедрения в массовое производство отечественных разработок в области создания мощной СВЧ ЭКБ на основе нитрида галлия. Было показано, что даже для относительно «освоенных» образцов мощных СВЧ-транзисторов диапазона до 6 ГГц (получены благоприятные оценки АО «НИИПП», АО «НПП «Пульсар», ООО «Радис», АО «НПП «Исток» им. А. И. Шокина») путь от поставки первых коммерческих партий до полного удовлетворения резко возрастающего спроса требует от разработчика технологии полномасштабных и ресурсоемких действий по постановке системы испытаний и выходного контроля, не имеющей аналогов в отечественной практике. В докладе были рассмотрены основные барьеры и неотложные задачи, решение которых необходимо для восполнения дефицита мощной СВЧ ЭКБ на основе нитрида галлия в условиях усилившегося санкционного давления на радиоэлектронную отрасль. Основной задачей поддержки/развития технологий автор считает немедленное начало государственного финансирования подготовленных и согласованных комплексных НИОКР.

Денис Анатольевич Киха, технический директор ООО «Эпсилон», представил технологические возможности фабрики NiWafer (КНР) в качестве доступной альтернативы WIN Semiconductors (Тайвань). Компания обладает первой в Китае технологической линией для производства пластин диаметром 6 дюймов на основе GaAs и GaN, осуществляет не только производство кристаллов, но и конструктивно завершенных компонентов и модулей на их основе (IDM-производитель), а также предоставляет услуги foundry.



Рис. 5. Конструктивно унифицированные модули 2,4- и 5,8-ГГц модема системы связи с OFDM-сигналом

Андрей Александрович Кишинский, главный конструктор АО «Микроволновые системы», представил дорожную карту предприятия по созданию и применению GaN-транзисторов и МИС собственной разработки по схеме fables – foundry.

Ведущий инженер-электроник АО «НТЦ «Элинс» Владимир Владимирович Жук сообщил в своем докладе о разработке унифицированных усилителей мощности для системы связи с OFDM-сигналом для двух частотных диапазонов Wi-Fi 2,4 и 5 ГГц (рис. 5). Для конструктивной унификации двух усилителей и удешевления их производства для работы в обоих диапазонах были выбраны широко распространенные одинаковые нитрид-галлиевые транзисторы в бескорпусном исполнении (кристаллы), изготовленные по технологии 0,25 мкм, с заявленной выходной мощностью 5 и 10 Вт. Эти широкополосные транзисторы позволяют реализовать оба усилителя в одинаковых корпусах с идентичной технологией сборки, монтажа ЭРИ и регулировки этих устройств. В выходном тракте усилителей установлены ФНЧ для подавления гармоник и циркуляторы для развязки с нагрузкой.

Александр Сергеевич Андреев, инженер первой категории АО «Микроволновые системы», представил результаты разработки и совместных с филиалом ФГБУ «НИИР» – «СОНИИР» испытаний усилителя мощности для тропосферно-релейной связи диапазона 4,5–5 ГГц (рис. 6). Усилитель мощности имеет выходную мощность $P_{\text{ВЫХ}}=165$ Вт при потребляемой мощности $P_{\text{ПОТР}}=530$ Вт, КПД=27–30% и интермодуляционных искажениях от –25 до –30 дБн при снижении выходной мощности на 3 дБ от $P_{\text{МАКС}}$.

Генеральный директор ООО «Микровейв АйСи» Борис Вячеславович Калинин рассказал о создании и исследовании параметров линейности СВЧ МИС усилителя мощности собственной разработки на гетероструктурах нитрида галлия (рис. 7). Усилитель обладает

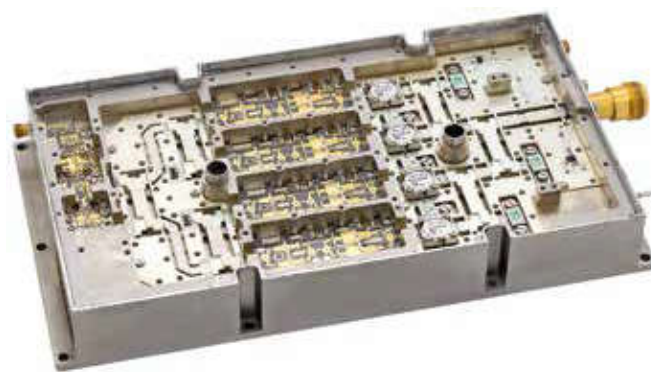


Рис. 6. Усилитель мощности диапазона 4,5–5 ГГц со снятой крышкой

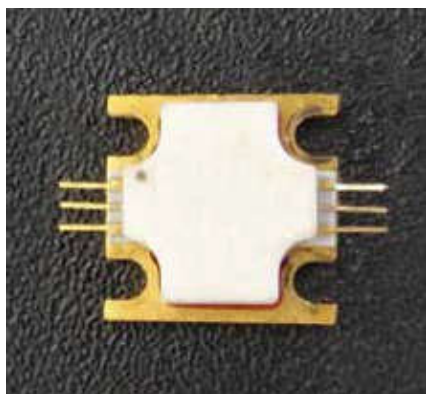


Рис. 7.
СВЧ МИС
30-Вт усилителя
мощности
диапазона
2,9–6,0 ГГц

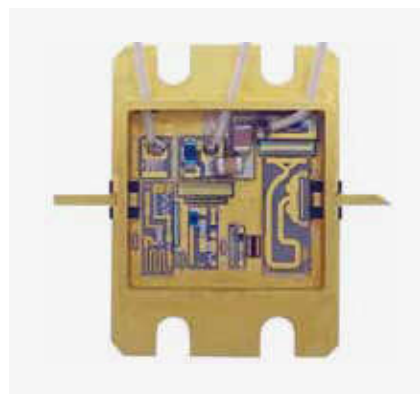


Рис. 9.
ГИС МУМ-60

следующими основными параметрами: диапазон рабочих частот $\Delta F = 2,9\text{--}6,0$ ГГц, выходная мощность насыщения $P_{\text{ВЫХ.НАС.}} \geq 45$ дБм при $K_{\gamma} = 20$ дБ и КПД = 38%. При уровне IMD3 = -25 дБн усилитель обеспечивает $P_{\text{ВЫХ.}} = 37,5$ дБм на тон в диапазоне частот 4,4–5,1 ГГц при отстройках 1, 10 и 100 МГц.

Заместитель главного конструктора АО «Микроволновые системы» Алексей Владимирович Радченко представил результаты разработки и направления развития конструкции двухканальных СВЧ-усилителей мощности в диапазонах 1,0–4,0 ГГц, 4,0–12,0 ГГц и 6,0–18,0 ГГц на основе дискретных GaN-транзисторов и монолитных интегральных схем, позволяющих существенно уменьшить габариты изделий, а также повысить их эффективность (рис. 8). В докладе было отмечено, что длительные жизненные циклы продукции подталкивают инженеров к созданию и применению в усилителях мощности СВЧ ЭКБ преимущественно собственной разработки на базе как GaAs-, так и GaN-технологий.

Павел Леонидович Куршев, начальник лаборатории проектирования мощных СВЧ-транзисторов и полупроводниковых устройств АО «НИИЭТ», сообщил о результатах проектирования и изготовления на основе GaN-транзисторов ГИС МУМ-60 с выходной импульсной мощностью

$P_{\text{ВЫХ.ИМП.}} \geq 60$ Вт в диапазоне частот $\Delta F = 1090\text{--}1600$ МГц с $K_{\gamma} = 38$ дБ и КПД = 50% при длительности импульса $\tau = 1$ мс и $Q = 5$ (рис. 9). Особенностью разработанной ГИС являются ее малые габариты и масса, но, несмотря на компактную конструкцию, в нее встроены все необходимые функциональные блоки, такие как фильтры питания с накопительными керамическими конденсаторами, цепи смещения, развязки и управления по постоянному току.

Александр Владимирович Бутерин, руководитель обособленного подразделения в г. Саратов АО «Микроволновые системы», представил результаты изготовления малогабаритного импульсного 150-Вт усилителя мощности в диапазоне частот 8,0–10,5 ГГц на базе восьмиканального микрополоскового делителя/сумматора с малыми вносимыми потерями и 25-Вт GaN МИС собственной разработки (рис. 10). Отличительными особенностями усилителя являются: возможность работы в квазинепрерывном режиме с длительностью импульса до 42 мс и минимальной скважностью $Q = 1,6$, малые габариты и масса (130 × 120 × 20 мм, 500 г), различные варианты исполнения СВЧ-входов/выходов (коаксиальные, волноводные).

Ведущий конструктор АО «Микроволновые системы» Сергей Викторович Гармаш рассказал о совместной с АО «НИИП им. В.В.Тихомирова» работе по исследованию амплитудных и вносимых фазовых флуктуаций импульсных сверхширокополосных СВЧ-усилителей мощности на GaAs- и GaN-транзисторах. Измеренный уровень относительной спектральной плотности мощности амплитудных шумов выходного сигнала составил -149...-155 дБ/Гц при отстройке 10 кГц, а уровень вносимых фазовых шумов: -140...-150 дБ/Гц при той же отстройке. Различия в уровне амплитудных флуктуаций выходного сигнала у GaN- и GaAs-приборов



Рис. 8. Серия двухканальных СВЧ-усилителей мощности на базе GaN-транзисторов и МИС



Рис. 10. Внешний вид усилителя без корпуса и GaN МИС выходного каскада

незначительны и составляют не более 2...6 дБ. Несколько худшие значения амплитудных флуктуаций у GaN-приборов (по сравнению с GaAs) в диапазоне отстроек 5...50 КГц связаны с более плавным ограничением амплитуды сигнала, характерным для GaN-приборов.

Начальник отделения АО «НПП «Пульсар» Алексей Владимирович Редька представил результаты изготовления, испытаний и опытной эксплуатации СВЧ-усилителя X-диапазона с выходной мощностью 360 Вт и воздушным охлаждением на GaN HEMT. Характеристики усилителя: длительность импульса от 0,5 до 1100 мкс, минимальная скважность $Q=5$, подавление выходного сигнала в паузе между импульсами не менее 130 дБ. Докладчик отметил, что преимущества новой промышленной технологии GaN СВЧ-приборов особенно ярко проявляются при обеспечении выполнения специальных требований, предъявляемых при использовании СВЧ-приборов в различных типах современных РЭС. Кроме того, использование блочной компоновки сокращает трудозатраты на наладку и проверку изделия в целом, применение цифровых фазовращателей в каждом канале модуля ПУМ позволяет оперативно производить замену блоков выходных усилителей при наладке и ремонте. Предварительное тепловое моделирование позволило оптимизировать не только конфигурацию радиатора охлаждения, но и взаимное расположение теплонагруженных блоков в составе изделия в целом.

Анастасия Владимировна Анисимова, инженер-разработчик, и Денис Владимирович Перевертайло, начальник отдела ООО «Резонанс», в своих докладах сообщили о разработанном усилителе импульсной мощности $P_{\text{вых.имп}} \geq 450$ Вт ($\tau=3$ мкс, $Q=10$, КПД $\geq 10\%$) миллиметрового диапазона на основе GaN МИС (рис. 11) и освоении

технологии его производства. Суммирование мощности 25-Вт усилителей мощности осуществляется многоканальными волноводными сумматорами. Размеры изделия составили 350×240×30 мм, масса 5 кг.

Технический директор ООО «Радар-прибор» Алексей Андреевич Евстигнеев представил результаты разработки твердотельного СВЧ-усилителя X-диапазона с импульсной выходной мощностью $P_{\text{вых.имп}} \geq 4500-5500$ Вт ($\tau=200$ мкс, $Q_{\text{мин}}=5$, $\Delta F=9,2-10,0$ ГГц), предназначенного для замены ЛБВ в составе РЛС обзора летного поля и посадочного локатора. Выходные каскады СВЧ-усилителя построены на 120-Вт внутрисогласованных GaN-

транзисторах, суммирование которых осуществляется с помощью микрополосковых и волноводных сумматоров типа «бегущая волна». Габариты модуля составили 550×700×100 мм, масса 30 кг.

Ведущий научный сотрудник АО «НИИМЭ» Александр Владимирович Царев сообщил о результатах математического моделирования схем суммирования мощности единичных GaN-транзисторов в составе МИС. Представленные результаты показали, что по сравнению с суммированием типа «шина», априори обладающим набором фаз, симметричные цепи сложения избавляют от дополнительных потерь на рассогласование суммируемых транзисторов, что добавляет не менее 10% к максимальной выходной мощности на частоте 10 ГГц.

Александр Сергеевич Самсонов, старший научный сотрудник ФГБУ «ВНИИР», отметил, что, несмотря на то, что технология GaN не является новинкой, она и по сей день наравне с SiGe-технологией продолжает оставаться востребованной благодаря свойствам этого материала. GaN-технология постепенно занимает свое место на рынке военных и космических систем и заменяет часть

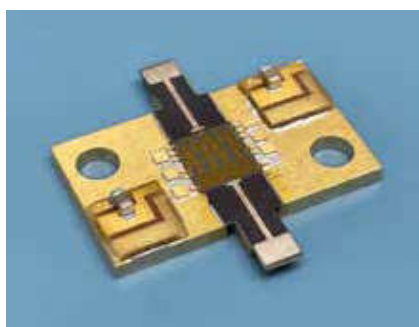


Рис. 11. ГИС с элементами ВПП на основе GaN МИС

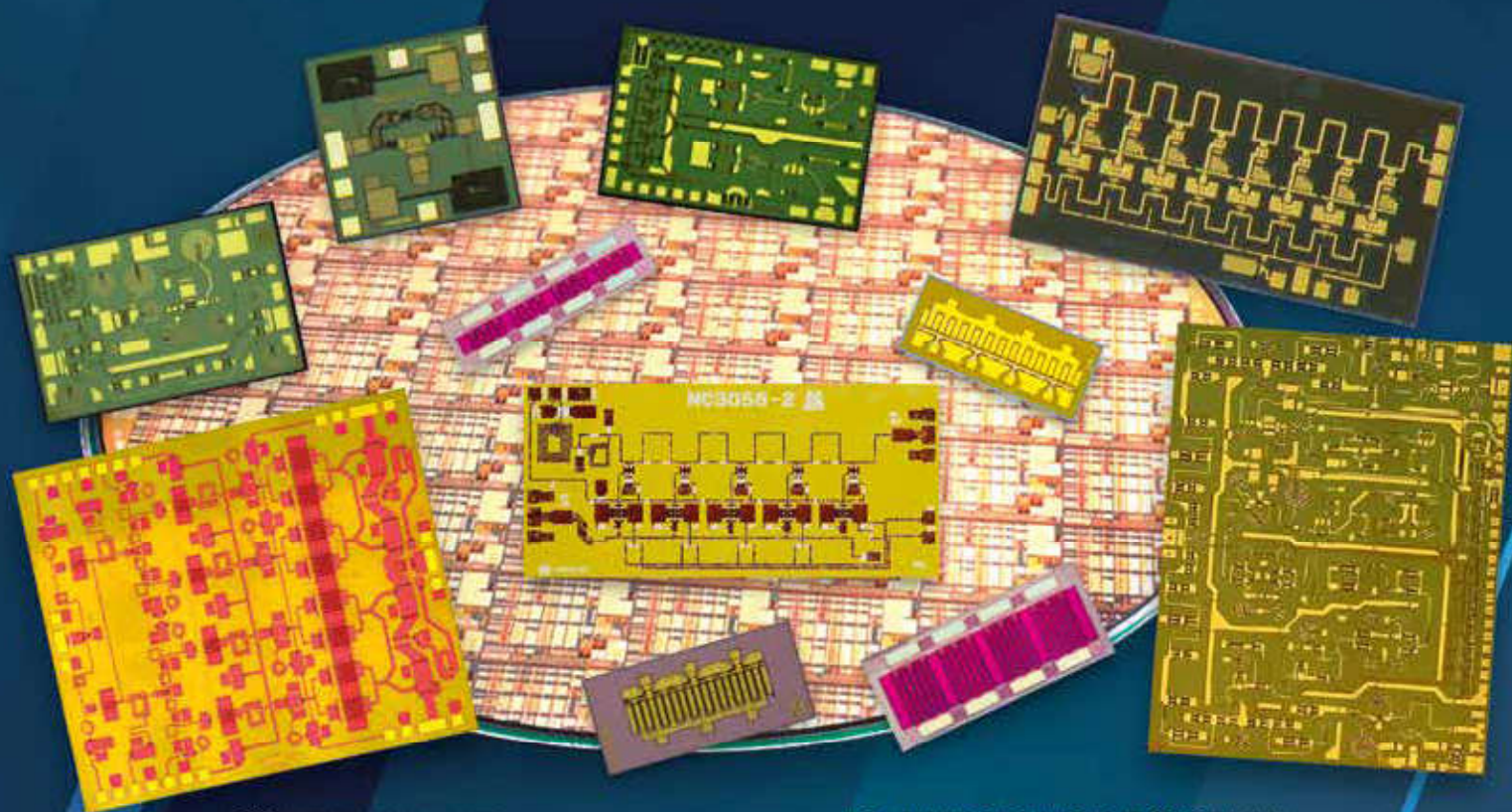


МИКРОВОЛНОВЫЕ
СИСТЕМЫ

ИНТЕЛЛЕКТ • КАЧЕСТВО НАДЕЖНОСТЬ

- ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО СВЧ GaAs И GaN ТРАНЗИСТОРОВ, МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ И МИКРОМОДУЛЕЙ
- СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА
- ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СВЧ МОДУЛЕЙ, МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ И БЛОКОВ РЭА
- НАИЛУЧШЕЕ СООТНОШЕНИЕ ЦЕНА / КАЧЕСТВО / СРОКИ

СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА СЕРТИФИЦИРОВАНА НА СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ ИСО9001



Область применения

- Широкополосная связь и телекоммуникации
- Контрольно-измерительные приборы
- Радиорелейная и спутниковая связь
- Специальная и космическая аппаратура
- Радиолинии «точка-точка», «точка-многоточка»

АО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»

Москва, Щёлковское шоссе, д. 5, стр. 1

Тел.: +7(499) 644-21-03

e-mail: mwsystems@mwsystems.ru

www.mwsystems.ru

GaAs-продуктов в приемопередающих модулях АФАР сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Основной проблемой в разработке и освоении производства СВЧ-изделий на технологии GaN в современных условиях является организация производственных мощностей в Российской Федерации.

Заместитель генерального директора АО «НИИМЭ» Петр Васильевич Панасенко представил к рассмотрению конструктивные решения с использованием кремниевого кристалла, так называемого «интерпозера», в качестве коммуникационного интерфейса для межсоединений расположенных на нем (или в его объеме) кристаллов GaAs, GaN, SiGe СВЧ МИС и цифровых интегральных схем. С целью изучения возможности использования в качестве базовых конструкции и технологии СВЧ-узлов на основе разработанного интерпозера было изготовлено несколько схемотехнических модификаций СВЧ ППМ X-диапазона, в том числе ППМ с выходной мощностью 20 Вт в импульсном режиме при замене GaAs УМ на УМ из GaN, ППМ с выходной мощностью 8 Вт в непрерывном режиме работы и других образцов, подтвердивших правильность выбранных конструктивных решений.

Сергей Михайлович Никулин, профессор НГТУ им. Р.Е.Алексеева, в совместном с ООО «Микроволновые измерения» докладе предложил оригинальный способ технической реализации измерений нелинейных S-параметров в частотных окнах с заданными центральными частотными точками с использованием трансформаторов сопротивлений. Докладчик отметил, что оптимизация топологии согласующих цепей требует создания специального программного модуля, выполняющего функцию формирования нелинейных S-параметров транзистора из библиотеки данных измерений, и симулятора, восстанавливающего S-параметры транзистора на каждой частотной точке при заданной амплитуде и форме входного сигнала и выбираемых на каждом шаге оптимизации значениях коэффициентов отражения от входной и выходной согласующих цепей, создаваемых в полосковой линии, в которую будет установлен транзистор.

Денис Иванович Сотсков, научный сотрудник АО «ЭНПО «СПЭЛС», представил показатели чувствительности изделий твердотельной СВЧ-электроники на основе GaN при радиационном воздействии и анализ результатов исследований и механизмов отказа. В силу конструктивно-технологических особенностей изделия ТСВЧЭ на основе GaN, как правило, малочувствительны к дозовым эффектам до предельных уровней воздействия. Критичными радиационными эффектами являются катастрофические отказы при воздействии ТЗЧ и длительные времена восстановления параметров при импульсном воздействии ионизирующего излучения. В докладе были представлены также результаты разработки и практической эксплуатации автоматизированного аппаратно-программного

измерительного комплекса, позволяющего проводить автоматизированные исследования в диапазоне частот до 110 ГГц на пластине.

Максим Викторович Селиванов, инженер третьей категории ООО «ИнноЦентр ВАО», посвятил свой доклад обзору основных современных тенденций в области построения схем управления питанием мощными GaN-усилителями, привел результаты разработок предприятия на основе отечественной и зарубежной ЭКБ.

В процессе работы II семинара-совещания, выступлений участников, обсуждения тематики и вопросов по докладам, а также в ходе свободной дискуссии были высказаны следующие мнения:

- кооперация групп российских и белорусских разработчиков GaN-технологий и приборов остается «стихийной», что не позволяет в условиях санкций недружественных стран обеспечить эффективное взаимодействие по всей цепочке производства;
- основной задачей развития и поддержки широкозонных технологий должно стать немедленное начало государственного финансирования подготовленных и согласованных комплексных НИОКР, включающих в себя разработку специальных материалов, технологического, аналитического, измерительного и испытательного оборудования, а также приведения системы государственных стандартов к реалиям сегодняшнего дня;
- несмотря на предсказуемую массовость российского рынка базовых станций 5G/6G для потребления GaN-технологий представители системообразующих компаний игнорируют отечественного производителя, о чем свидетельствует и отсутствие докладов по данной тематике;
- принятая в марте 2020 года Стратегия развития радиоэлектронной промышленности Российской Федерации не исполняется, в том числе в части создания в России foundry на широкозонных материалах;
- введенные против России в 2022 году санкции заставили разработчиков аппаратуры «через плечо» посмотреть на отечественных производителей GaN-приборов и модулей, однако и здесь взаимодействие пока очень поверхностное, на уровне «рынка».

* * *

II семинар-совещание GaN-2022, работа которого была направлена на ликвидацию взаимного недопонимания всех участников жизненного цикла радиоэлектронных средств, всемерно способствовал организации коллективных встреч специалистов разного уровня. Безусловную пользу мероприятия и пожелания проведения его впредь подтвердили все выступившие участники. ●