

Развитие СВЧ-электроники на основе нитрида галлия

И. Викулов

УДК 621.38 | ВАК 05.27.00

Из всех типов сложных полупроводников наиболее эффективным остается нитрид галлия (GaN), который успешно конкурирует с другими полупроводниковыми материалами и широко используется во многих областях современной электроники: силовой электронике, оптоэлектронике, лазерной технике. Среди направлений GaN-электроники особое место занимает нитрид-галлиевая СВЧ-электроника, играющая важную роль как в развитии систем связи, так и в создании перспективных оборонных систем.

Переход на GaN СВЧ-технологии значительно повышает тактико-технические характеристики радиоэлектронных систем управления вооружением, увеличивая их дальность и разрешение, эффективность, компактность, а нередко и снижая стоимость. Как отмечалось [1], в США продолжается полномасштабная модернизация радиоэлектронных систем всех видов вооруженных сил с использованием GaN СВЧ-технологии. В настоящее время США приступили к экспорту основанных на GaN систем противоракетной обороны. Это обстоятельство имеет особое значение, поскольку может привести к нарушению баланса сил стратегического сдерживания.

КОМПОНЕНТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БАЗА GaN СВЧ-ПРИБОРОВ

Хронологически анализ формирования GaN СВЧ компонентно-технологической базы за рубежом представлен в статьях [2–4]. Начальным, исследовательским, этапом развития стала программа широкозонных полупроводников Wide Band Gap Semiconductor-RF, выполненная американским оборонным агентством DARPA. За этим последовала программа отработки промышленного выпуска GaN-компонентов, предусматривающая специальное финансирование технологий военного назначения согласно государственному акту Act Tittle III. Аналогичные госпрограммы развития технологии GaN были осуществлены в Японии. Сейчас мировой рынок высокочастотных GaN-приборов оценивается в 380 млн долл. (рис. 1 а, б).

Предполагается, что наибольший его рост придется на 2019–2020 годы, когда ожидается внедрение сетей связи поколения 5G, что приведет к увеличению рынка GaN-приборов к 2023 году в три-четыре раза [5, 6]. По объему продаж на рынке GaN СВЧ-приборов лидируют Sumitomo Electric Device (Япония), Wolfspeed и Qorvo (обе США). Японская компания предлагает приборы для инфраструктуры беспроводной связи, Wolfspeed разрабатывает

устройства как военного, так и коммерческого назначения. Продукция Qorvo применяется в основном в военной технике. На эти три компании приходится 82% общего объема продаж GaN СВЧ-приборов.

За рубежом действуют многочисленные дизайн-центры и технологические фабрики (foundry), проектирующие и изготавливающие транзисторы, монолитные интегральные схемы (МИС) по техническим требованиям заказчика. Во многих крупных компаниях, выпускающих военные системы (Raytheon, Northrop Grumman, BAE Systems), также есть собственные GaN-производства, предназначенные для обеспечения аппаратурных разработок. В преддверии рынка связи 5G они также начинают открывать foundry для оказания коммерческих услуг. За рубежомный рынок предлагает GaN СВЧ-компоненты для всех областей СВЧ-диапазона с разными уровнями мощности и в различном исполнении: бескорпусные и корпусные транзисторы, монолитные интегральные схемы, усилительные модули и блоки (см. таблицу).

Японские компании наряду с американскими определяют как объем мирового рынка, так и уровень технологии GaN СВЧ-приборов. Особенно выдающиеся

Максимальные мощности зарубежных корпусных GaN HEMT-транзисторов на SiC-подложках

Компании	Мощность в различных СВЧ-диапазонах, Вт				
	L	S	C	X	K _u
Qorvo	1 800	200		100	25
Sumitomo		570		340	
Microsemi	700	500	150		
Wolfspeed	1 200	500	350	100	
Mitsubishi					100

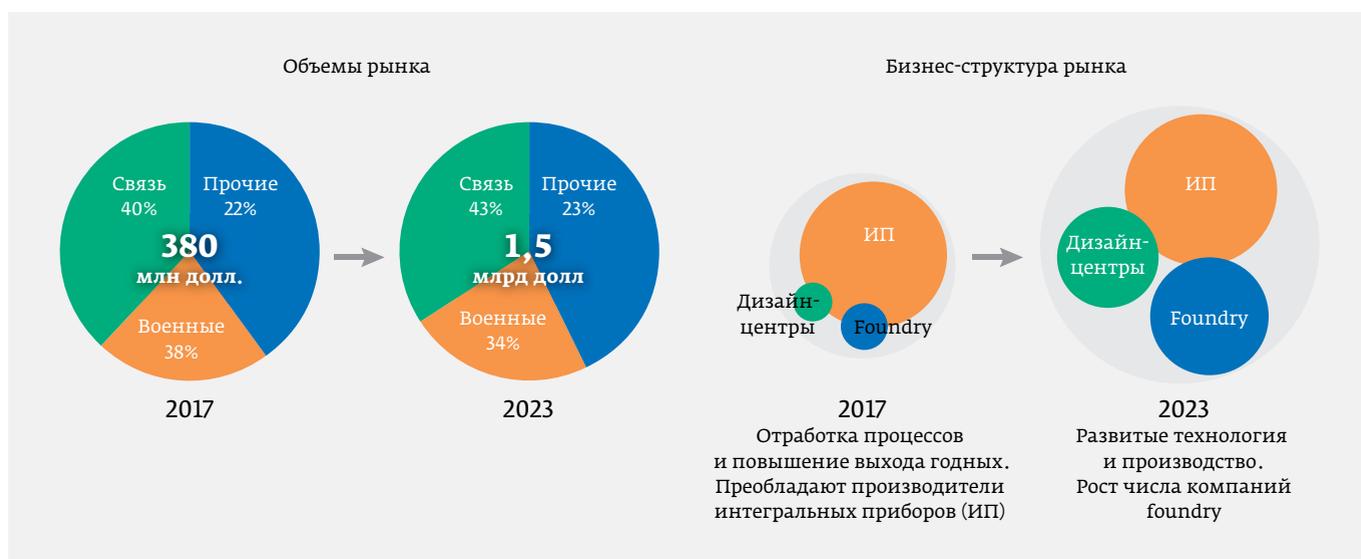


Рис. 1. Прогноз рынка GaN СВЧ-приборов. Источник: компания Yole Development

результаты они демонстрируют в миллиметровом диапазоне. Так, например, Mitsubishi Electric вывела на рынок корпусные МИС-усилители диапазона Ka (26–40 ГГц), в которых на одном чипе интегрированы усилительные транзисторные схемы, схемы согласования и линейризации. Выходная мощность такого усилителя составляет 8 Вт. Усилитель позволяет экономить на размерах и весе передатчика спутника связи.

Другая японская компания Fujitsu установила рекорд плотности мощности, приходящейся на миллиметр ширины затвора GaN/SiC транзисторов W-диапазона (75–110 ГГц), – 4,5 Вт/мм. При этом энергопотребление транзистора снижено на 26%. Сейчас компания работает над технологией присоединения теплоотвода из монокристаллического алмаза к SiC-подложке GaN HEMT-транзисторов при комнатной температуре. Разработан способ предотвращения разрушения верхнего слоя алмаза путем нанесения на его поверхность тончайшей металлической пленки (10 нм и менее). Это позволяет значительно уменьшить тепловое сопротивление на поверхности контакта и еще больше повысить мощность транзисторов. Моделирование прибора мощностью 200 Вт показало снижение пограничного теплового сопротивления на 60%. В компании считают, что использование усилителей на таких транзисторах в радарх увеличит дальность их действия в полтора раза. На 2020 год намечено промышленное освоение этой технологии [7].

Из последних прорывных американских разработок следует отметить технологию нанесения нитрида галлия на гибкие подложки. Для этого GaN выращивается на нитриде бора (BN), а затем переносится на гибкую подложку с использованием слабой химической связи с BN. Новая технология открывает перспективу создания

компактных конформных СВЧ-приборов и устройств для систем связи и радиолокации. Работа, выполняемая Лабораторией ВВС США, находится на стадии патентного оформления (рис. 2) [8].

Европейские GaN СВЧ-технологии отстают от американского уровня. Для преодоления зависимости Европы от поставок GaN СВЧ-компонентов из США Европейским оборонным агентством был выполнен ряд общеевропейских программ. Задачи проекта MANGA – разработка и сертификация технологического процесса (GH25) изготовления GaN/SiC 0,25 мкм HEMT-транзисторов компанией United Monolithics Semiconductor (UMS). Проект MAGNUS предусматривал создание конкретных типов GaN-компонентов и МИС. Цель действующего проекта EGUANIC – разработка СВЧ-компонентов для более высоких частот (диапазона Ka и выше) и с более широкими

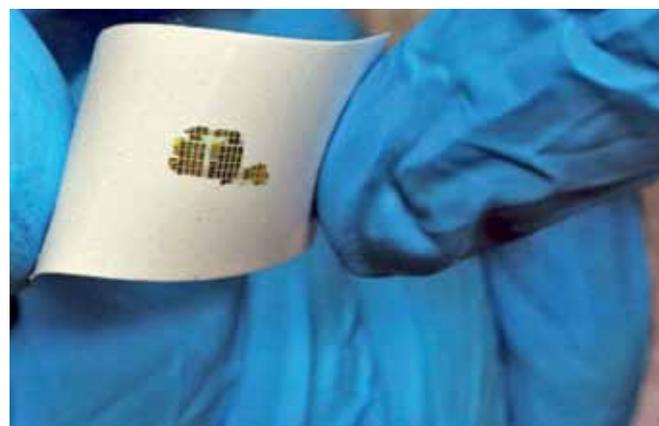


Рис. 2. Демонстрация Лабораторией ВВС США GaN-микросхемы на гибкой подложке

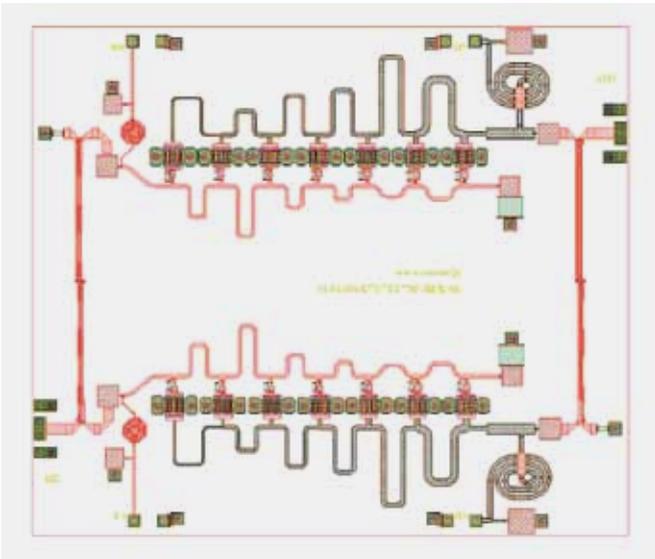


Рис. 3. Микросхема GaN широкополосного усилителя диапазона 6–18 ГГц с мощностью 10 Вт. Размеры чипа 5×4 мм. Источник: компания Thales UK

полосами рабочих частот (несколько гигагерц). Технологические процессы на 0,5 и 0,25 мкм разработала компания Selex ES, входящая в состав ведущей итальянской корпорации Leonardo. Тремя типами процессов располагает немецкий Институт прикладной физики полупроводников Fraunhofer IAF. Расширяет свою деятельность шведская компания-foundry SweGaN, производящая эпитаксиальные GaN-пластины. С 2018 года она переходит от производства 4-дюймовых пластин (диаметром 100 мм) к выпуску пластин диаметром 6 дюймов (150 мм).

В результате выполнения программ в Европе налажены связи между компаниями, заинтересованными в использовании GaN-технологии. Наиболее востребованный технологический процесс – GH25, который хотя и оптимизирован для получения большой мощности вплоть до частот 20 ГГц, но обеспечивает также приемлемые значения коэффициента шума. GH25, внесенный Европейским космическим агентством, в перечень рекомендуемых для создания космической аппаратуры, уже доказал свою работоспособность в ряде приборных разработок. Так, компания Thales UK выполнила проектирование и на основе этого процесса создала широкополосный GaN монолитный усилитель в корпусе для диапазона 6–18 ГГц с выходной мощностью 10 Вт и коэффициентом усиления 10 дБ (рис. 3) [9].

Схемное объединение четырех аналогичных усилителей позволило получить усилительный модуль мощностью 30 Вт в этом диапазоне. Такие приборы найдут применение в системах широкополосной связи и радиоэлектронной борьбы (РЭБ). На основе процесса GH25 немецким концерном Hensoldt (город Ulm) разработана

входная GaN МИС приемопередающего модуля РЛС с АФАР X-диапазона [10]. На одном чипе объединены усилитель мощности, маломощный усилитель и переключатель/изолятор. Мощность выходного усилителя 13–17 Вт, коэффициент шума и допустимая мощность на входе соответственно 3,2 дБ и 5 Вт. Потери переключателя ниже 0,9 дБ при входной мощности 43 дБм. Диапазон рабочих частот МИС – от 8 до 12 ГГц. Использование в микросхеме GaN позволило значительно уменьшить размеры модуля, исключив из него защитное устройство и циркулятор. Концерн Hensoldt – преемник знаменитой Telefunken (сейчас входит в состав Airbus Defense and Space) – уже выпускает четырехкоординатные РЛС обзора TRS-4D на основе GaN АФАР С-диапазона для фрегатов ВМС Германии и кораблей береговой охраны США. Наряду с итальянской компанией Leonardo он производит также авиационную РЛС с АФАР Captor-E на арсенид-галлиевых приемопередающих модулях по программе Eurofighter для европейского истребителя Typhoon. Недавно по проекту Европейского космического агентства три компании – TNO (Нидерланды), UMS (Франция) и Airbus Defense and Space – разработали аналогичный монолитный GaN приемопередающий модуль размерами 6×6 мм. По сравнению с предыдущим аналогом модуль отличается повышенной эффективностью и в три раза более высокой мощностью, предназначен для использования в составе миниатюрных РЛС в последующих миссиях европейского спутника Sentinel-1 (рис. 4) [11].

В отличие от военных вариантов применения, где, как правило, отдают предпочтение GaN СВЧ-приборам на подложке карбида кремния (SiC), многие компании ориентируются на развитие GaN-приборов на кремниевой подложке (Si) для коммерческого использования. Приборы на Si существенно уступают устройствам на SiC по мощности из-за низкой теплопроводности кремния, но превосходят их по стоимости. Лидером в этом направлении является американская компания MACOM, которой удалось создать GaN/Si транзистор L-диапазона мощностью 500 Вт для аэродромных РЛС. MACOM стремится нарастить выпуск GaN/Si приборов, в частности за счет европейских компаний. Недавно MACOM заключила соглашение с европейским кремниевым гигантом STMicroelectronics (Женева) о массовом производстве GaN/Si 150-мм пластин на кремниевой фабрике STM в Италии. MACOM передает STM права не только на производство, но и на продажу изделий для определенных областей применения: приборов для повышения эффективности систем зажигания автомобилей, промышленных световых приборов, СВЧ-печей на полупроводниках, силовых электронных приборов. За собой MACOM сохраняет исключительное право на приборы для мобильных телефонов, инфраструктуры базовых станций беспроводной связи и других телекоммуникаций, включая

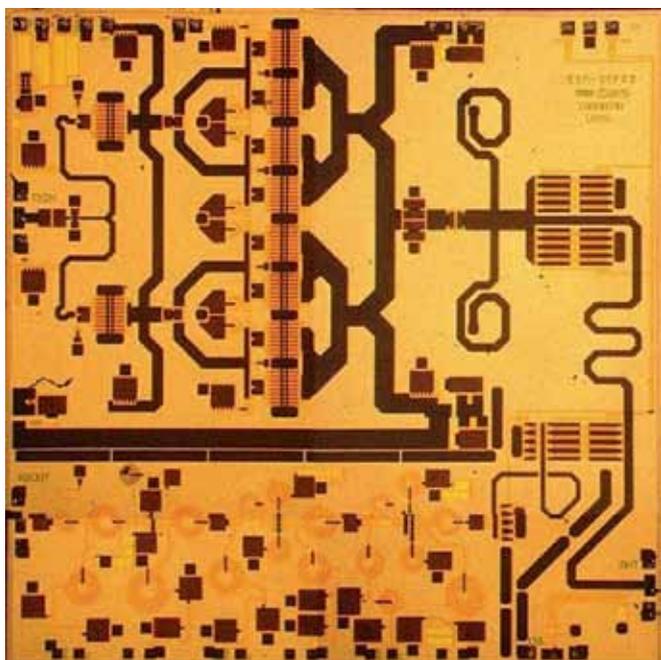


Рис. 4. Входной GaN приемопередающий модуль для РЛС европейского спутника Sentinel-1. Размеры чипа 6×6 мм

системы связи 5G. Переход с кремниевой КМОП-технологии на технологию GaN/Si занял несколько лет, с 2018 года STM приступает к промышленному выпуску приборов по новой технологии. В случае расширения потребности в приборах компания STM готова в дальнейшем выпускать 8-дюймовые пластины (200 мм).

GaN/Si технология положена в основу нового проекта Евросоюза SERENA, начавшегося в 2018-м и рассчитанного на три года. В проекте участвуют десять промышленных и академических организаций, в том числе EpiGaN NV (Бельгия), OMMIC SAS (Франция), Ericsson AB (Швеция) и др. Проектом предусмотрено создание платформы для системы формирования лучей в мультиантенных решетках мм-диапазона. При этом возможности устройства по обработке аналого-цифровых сигналов должны быть выше, чем у приборов, изготовленных по обычной используемой КМОП-технологии. Создаваемая архитектура предназначена для широкого применения: радары безопасности, высокоскоростная беспроводная связь, датчики изображения для системы 5G и автономных транспортных средств, то есть для всех сегментов, где требуются активные антенные решетки с электронным сканированием луча. Принципиально важные требования к устройству – обеспечение приемлемой стоимости и малого потребления энергии [12].

Развивающиеся страны также начинают осваивать технологию GaN СВЧ-электроники. Так, например, правительство Индии выделило грант в 465 млн долл.

Индийскому научному институту (Indian Science Institute) для создания крупной фабрики-foundry по освоению технологии нитрида галлия, чтобы обеспечить индийскую промышленность всеми видами GaN-компонентов. Подчеркивается, что инвестиции носят стратегический характер и преследуют долгосрочные цели. Среди возможных вариантов применения GaN-приборов – активные фазированные решетки для РЛС современных боевых самолетов, а также приборы силовой электроники, играющие важную роль в нарастающей мировой тенденции экономии энергии [13].

Стремление к ускорению развития GaN СВЧ-технологии демонстрирует и Китай. Недавно британская компания SPTS Technologies, входящая в состав Orbotech, получила заказ на установку плазменного травления Omega для китайской компании HiWafer Semiconductor Co., Ltd [14]. HiWafer – крупнейшая в Китае компания-foundry, выпускающая СВЧ-транзисторы pHEMT, HBT и МИС на основе GaAs 150-мм пластин, в том числе для систем связи 4G. Цель приобретения установки – создание собственной производственной линии по выпуску GaN СВЧ-приборов на основе GaN-пластин на SiC-подложках диаметром 6 дюймов (150 мм). Установка Omega включает в себя два процессорных модуля: для травления GaN эпитаксиальных слоев и сквозных отверстий в SiC-подложке. В качестве вариантов применения приборов, создаваемых на новой линии, называются системы связи 5G, другие телекоммуникационные и транспортные системы. Высокореабельная производственная линия по выпуску GaN СВЧ-приборов рассматривается как важный шаг в проводимой Китаем политике Made in China 2025. Быстрое развитие GaN-технологии в стране сопровождается появлением новых компаний. В 2015 году в Шанхае на базе исследовательской лаборатории Eta Research был создан стартап, разработавший оборудование и процесс гибридно-паровой эпитаксии с высоким процентом выхода годных GaN-пластин. Аппаратура для полировки пластин закуплена у надежного производителя, имеющего большой опыт работы с этой технологией. По заявлению Eta Research, в ближайшее время она начнет продажу пластин диаметром 50 и 75 мм. В 2019 году компания собирается выпускать пластины диаметром 100 мм. Для этого в китайском городе Tonglin строится завод высокой производительности, что позволит снизить стоимость пластин.

Развитие российской GaN СВЧ-технологии ориентировано на продвижение в стране систем связи пятого поколения 5G. Недавно воронежский НИИ электронной техники (входит в концерн «Созвездие») разработал GaN-транзистор для возможного применения в сети связи 5G. На тестовых частотах 4 и 2,9 ГГц мощность транзистора составляет от 5 до 50 Вт, коэффициент усиления 9–13 дБ, КПД 45%. Кроме того, предприятием «ГЗ «Пульсар»

совместно с Институтом СВЧ полупроводниковой электроники РАН выполнены работы по созданию приемопередающих модулей на основе GaN в диапазонах частот 23–25 ГГц и 57–64 ГГц [15].

Сообщалось также, что правительственная комиссия по использованию информационных технологий одобрила план мероприятий по четырем направлениям программы «Цифровая экономика». Сначала будут отработаны технологии производства монокристаллических интегральных схем на основе нитрида галлия. Затем появятся экспериментальные образцы МИС для диапазонов 23–25 ГГц и 57–64 ГГц. Далее совместно с производителями радиоэлектронного оборудования будут проведены испытания опытных образцов усилителей мощности и приемопередающих модулей [16]. По мнению председателя совета Ассоциации производителей электронного оборудования и приборов Светланы Апполоновой, пока рано говорить о производстве в России элементной базы для оборудования сетей 5G. «Сначала надо определить, есть ли спрос и перспективы у сетей 5G в России, – говорит С. Апполонова. – Потом неплохо было бы утвердить российский стандарт для сетей 5G. И только потом можно будет обсуждать возможности выпуска оборудования для этих сетей». Причины отставания от мирового уровня GaN-технологии – общие для всей отечественной полупроводниковой электроники и проанализированы в ряде специализированных статей [17].

GA N-ТЕХНОЛОГИИ В ВООРУЖЕНИЯХ. РАЗВЕРТЫВАНИЕ НОВЫХ СИСТЕМ

Системы ПВО/ПРО. Хотя в США продолжается процесс внедрения GaN-технологии в различные виды вооружений, они уже перешли к их экспорту. Прежде всего это касается систем ПРО. После успешного завершения испытаний (1000 ч непрерывной работы) модернизированной тактической системы ПВО/ПРО Patriot компании Raytheon (разработчик системы) заявила о готовности экспортировать новую технологию [18]. Все 14 стран, имеющие на вооружении эту систему, выразили желание принять участие в финансировании работ по модернизации своих систем. Пятнадцатой страной, от которой поступил запрос на систему, стала Польша. В конце марта 2018 года министр национальной обороны Польши и посол США подписали контракт на поставку четырех батарей Patriot PAC-3+, включающий четыре РЛС AN/MPQ-65, в которых использованы АФАР на GaN-компонентах [19]. Согласно польскому законодательству часть иностранного военного контракта должна выполняться внутри страны. Как считает Raytheon, это положит начало новой эры польской промышленности, так как размещение контрактов будет сопровождаться созданием в стране высокотехнологичных рабочих

мест. Польша проявляет интерес, в частности, к передаче ей технологии СВЧ-компонентов на основе нитрида галлия. И не без оснований. Так, например, в стране есть две пилотные линии по выпуску GaN эпитаксиальных пластин: одна в компании Ammono на основе аммонотермальной технологии и другая (строящаяся) – в Институте физики высоких давлений польской АН на базе технологии гибридно-паровой эпитаксии (HVPE). Согласно контракту работы по установке комплекса Patriot в Польше планируется завершить к концу 2020 года. Недавно госдепартамент США согласовал возможность продажи Швеции системы PAC-3+ в аналогичной комплектации. Как говорится в пресс-релизе, поставка улучшит безопасность стратегических партнеров США, которые представляют важную силу политической стабильности и экономического прогресса на Балтике и в Европе в целом [20].

В марте 2018 года компания Lockheed Martin закончила установку в Латвии новой РЛС наблюдения за воздушным пространством TPS-77 MRR (Multi-Role Radar) – первой из трех многофункциональных РЛС, предусмотренных контрактом (рис. 5). За счет использования в РЛС мощных GaN-усилителей значительно снижено потребление энергии, повышена надежность станции и уменьшена стоимость цикла ее эксплуатации. Примененная в станции технология single-scan позволяет наблюдать низколетящие цели одновременно на средней и большей дальности [21].

Активную деятельность по развертыванию современных комплексов ПРО на основе GaN-компонентов США проявляют в Японии. За заказы здесь соперничают две компании, специализирующиеся на производстве систем ПРО – Raytheon и Lockheed Martin, с которыми сотрудничают японские производители GaN-компонентов Mitsubishi и Fujitsu. Помимо имеющегося у Японии комплекса Patriot (Raytheon) и недавно купленной для нового эсминца корабельной системы Aegis, обсуждается возможность приобретения территориальной системы Aegis Ashore компании Lockheed Martin. Это сухопутный вариант базовой системы ПРО Aegis Combat System, которая размещена в Румынии и готовится к установке в Польше. Все эти системы построены с использованием GaN-компонентов. Согласно последним сообщениям, Lockheed Martin предлагает техническое решение, значительно расширяющее возможности системы Aegis Ashore. Новое программное обеспечение Aegis software variant Baseline 9 обеспечивает связь комплекса Aegis Ashore со строящейся РЛС дальнего обнаружения Long Range Discrimination Radar (LRDR). Станция предназначена для сбора данных о захвате, сопровождении и распознавании межконтинентальных баллистических ракет на среднем участке их траектории. В состав РЛС входит твердотельная АФАР



Рис. 5. РЛС TPS-77 MRR компании Lockheed Martin на базе GaN-технологии. Развернута в Латвии

на GaN-модулях. В 2017 году закончен этап проектирования станции, оперативная готовность которой намечена на 2020 год на Аляске. С помощью новой программы Aegis software variant Baseline 9 система Aegis Ashore приобретает возможность одновременно управлять задачами станции LRDR и получать от нее данные по сопровождению целей. Такое взаимодействие значительно улучшает характеристики Aegis Ashore: увеличивает дальность обнаружения, число одновременно атакуемых целей, снижает интерференцию с гражданскими и военными излучателями и приемниками, а также повышает эффективность использования новой ракеты-перехватчика SM-3 Block IIA. Проверка совместной работы двух систем по реальным целям уже проводилась в 2015 и 2016 годах. При этом в качестве прототипа станции LRDR использовалась версия, построенная с использованием GaN-компонентов компании Fujitsu. Привлечение промышленности Страны восходящего солнца к участию в проекте стимулирует заинтересованность японской стороны в размещении одновременно двух систем: ПРО Aegis Ashore и станции LRDR [22]. Недавно возможность функциональной совместимости систем различных уровней ПРО продемонстрирована также для комплексов Patriot и THAAD (Raytheon).

Крупный европейский производитель вооружений на основе GaN-технологии – шведская компания Saab, которая постоянно наращивает выпуск семейства экспортных радаров Giraffe (Giraffe 1X, Sea Giraffe 4A) на основе GaN АФАР, входящих в состав мобильных наземных и морских сил ПВО [23].

Бортовые системы. В последнее время Saab активно разрабатывает авиационные системы на основе GaN АФАР. Одна из них – система РЭБ (Arexis), установленная на новом варианте истребителя Gripen E/F [24], предназначена для работы в диапазоне низких частот. Это дает

возможность противодействовать современным системам ПВО, которые используют низкочастотные диапазоны для обнаружения слабо отражающих целей типа «стелс».

Аналогичную программу Next Generation Jammer Low Band (NGJ-LB) открыли ВМС США [25] как часть общей программы замены старой системы РЭБ на вакуумных лампах AN/ALQ-99. Три ее подпрограммы соответствуют диапазонам частот: низкие NGJ-LB, средние NGJ Mid-Band и высокие NGJ High Band. Система РЭБ для среднего участка диапазона частот (NGJ Mid Band) на основе GaN АФАР, созданная компанией Raytheon, уже принята на вооружение и установлена на самолете EA-18 Growler (Boeing).

Компания Saab прилагает большие усилия для вывода бортовых GaN-систем на международный рынок. В свое время она предлагала Индии разрабатывать интегрированную систему РЛС/РЭБ с GaN АФАР для индийского истребителя Tejas. Недавно Saab выполнила первый полет самолета дальнего радиолокационного обнаружения (ДРЛО) Saab Global Eye с активной ФАР, построенной на GaN приемопередающих модулях. По заявлению компании, использование GaN-компонентов в АФАР позволило увеличить дальность главного радара Erieye ER на 70%. Заказчиком самолета ДРЛО выступили ВВС Объединенных Арабских Эмиратов [26].

Недавно вслед за выделением Индией правительственного гранта на строительство GaN-фабрики последовало сообщение Индийского агентства авиационных разработок (Aeronautical Development Agency) о начале полномасштабного проекта создания истребителя нового поколения AMCA (Advanced Medium Combat Aircraft), оснащенного радаром с АФАР на нитриде галлия. Первый полет прототипа должен состояться в 2024 году, а на вооружение он поступит, как ожидается, в 2030 году [27].

Ракетная техника. Современная GaN компонентная база СВЧ-электроники достигла такого уровня, который позволяет применять ее в ракетной технике, в том числе в АФАР передатчиков ракетных головок самонаведения (ГСН). Публикации на эту тему крайне ограничены. Известно, например, что компанией Thales получен заказ от датского Министерства обороны на разработку 14 передатчиков непрерывного излучения X-диапазона для американской ракеты морского базирования Evolved Sea Sparrow Missile класса «поверхность – воздух». Передатчики строятся на современной GaN-технологии и предназначены для подсветки цели в системе управления огнем. Первые поставки планируются на середину 2019 года [28].

Сообщается также о начале совместной разработки Японией и Великобританией нового поколения ракет Meteor класса «воздух – воздух» с радиолокационной ГСН, разрабатываемой компанией Mitsubishi. Ракеты

предназначаются для установки накупаемых Японией американских истребителей F-35. Сборка прототипов намечена на 2018 год [29].

* * *

Сохраняющая актуальность задача развития отечественной GaN-электроники в последнее время сильно осложнилась из-за ряда ограничений международного характера. В связи с этим большое значение приобретает подписанное в августе 2017 года соглашение между АО «Росэлектроника» и китайской корпорацией CETC об организации контрактного производства полупроводниковых приборов. Российский холдинг берет на себя разработку и проектирование полупроводниковых приборов, а китайская компания обеспечивает их производство в заданном объеме в режиме foundry [30]. Такое взаимодействие позволит отечественным предприятиям приступить к созданию современной радиолокационной и связной аппаратуры на основе GaN-компонентов параллельно с развитием собственной GaN-технологической базы.

ЛИТЕРАТУРА

- Виколов И.** Радиоэлектронные системы с АФАР: направления развития и применения // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2017. № 5. С. 126–134.
- Виколов И., Кичаева Н.** GaN-технология. Новый этап развития СВЧ-микросхем // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 4. С. 80–85.
- Виколов И.** Программа WBGs-RF. Фаза II // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2009. № 8. С. 62–65.
- Виколов И.** GaN-микросхемы претендуют на замену ЭВП // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2014. № 1. С. 168–175.
- Yole Development Reports Significant Boost Led by Implementation of 5G Networks to RF Ga N. <http://www.microwavejournal.com/articles/29682>.
- RF GaN market will be boosted by 5G, <https://www.ninja/V4/page/4901/258/6/1>.
- Fujitsu achieves record output density with power amplifier for W-band GaN transmitters. http://www.semiconductor-today.com/news_items/2017/jul/fujitsu_240717.shtml.
- US Researchers Make Flexible GaN Chips. <https://powerelectronicword.net/article/103007/>.
- Thales UK designs GaN MMIC/packaging for Europe's MAGNUS program using NI AWR software. http://www.semiconductor-today.com/news_items/2017/jun/thales-nawr_150617.shtml.
- Schuh P. et al.** High Performance GaN Single-Chip Fronted for Compact X-Band AESA Systems // Proceedings of the 12th European Microwave Integrated Circuits Conference.
- ESA Project Develops 6×6 mm GaN Transceiver. <https://powerelectronicwordl.net/article/102993/>.
- EpiGaN's GaN/Si RF material technology at core of EU's SERENA 5G project. http://www.semiconductor-today.com/news_items/2018/mar.
- Indian Institute Science gets government approval to establish commercial GaN foundry. http://www.semiconductor-today.com/news_items/2017/jul/iisc-cens_100117.shtml.
- SPTS's Omega plasma etch system chosen by HiWafer for new 6" GaN-on-SiC high power RF device production line. http://www.semiconductor-today.com/news_items/2017/nov/spts_271117.shtml.
- Росэлектроника выводит на рынок транзисторы для сетей связи 5G // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2018. № 1. С. 27.
- Оборудование для 5G будут делать на российской элементной базе. <https://vpk.name/news/202032>.
- Маянов Е., Пархоменко Ю., Наумов А.** Краеугольный кремний. Промышленное полупроводниковое материаловедение в России // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2017. № 4. С. 98–104.
- Raytheon's GaN-based AESA upgrade to Patriot radar surpasses 1000 hours of operation. http://www.semiconductor-today.com/news_items/2017/may/raytheon_240517.shtml.
- Poland to Purchase Patriot Defense System. <http://www.mwrf.com/>. Apr 03. 2018.
- Sweden Patriot Configuration 3+ Modernized Fire Units. <http://www.microwavejournal.com/articles/29861>.
- Lockheed Martin completes acceptance test of first GaN-based TPS-77 Multi-Role Radar. http://www.semiconductor-today.com/news_items/2018/mar/lockheed-martin_130318.shtml.
- Lockheed Martin Demonstrates GaN-based Radar. <https://powerelectronicworld.netarticle/103170>.
- Saab Receives Order for Giraffe 1X AESA Radar. <http://www.microwavejournal.com/articles/29098>.
- Saab using GaN-based AESA in new Arexis electronic warfare jammer pod for Gripen fighter. http://www.semiconductor-today.com/news_items/2017/sep/saab_200917.shtml.
- Cobham and Lockheed Martin Teem for Next Gen Jammer Low Band. <http://www.microwavejournal.com/articles/30127>.
- Сааб поднял самолет ДРЛО. <http://forum.militaryparitet.com/viewtopic.php?id=19874>.
- АМСА. АФАР на нитриде галлия. <http://forum.militaryparitet.com/viewtopic.php?id=20205>.
- Thales to Supply GaN-based CWI Transmitters to Royal Danish Navy // Microwave Journal. February 20. 2017. <https://vpk.name/news/199586>.
- Росэлектроника и китайская CETC согласовали механизм взаимодействия при контрактном производстве. <http://www.ruselectronics.ru/news/?id=2950>.