

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БАЗА GaN СВЧ-МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ: КОМПАНИИ, ПРОЦЕССЫ, ВОЗМОЖНОСТИ

И.Викулов, к.т.н.<sup>1</sup>

УДК 621.38  
БАК 05.27.00

С начала активных исследований GaN как нового перспективного материала для микроэлектроники прошло около полутора десятка лет. За это время были достигнуты большие успехи не только в разработке технологических процессов получения GaN, но и в создании приборов на его основе. Параметры GaN-приборов оказались столь впечатляющими, что ведущие промышленные страны в целях совершенствования будущих информационных систем и систем национальной безопасности сочли необходимым сформировать государственные программы развития этого направления. В результате в ряде стран (США, Японии) сложились целые направления электронной промышленности, связанные с разработкой приборов и устройств на основе GaN. Сформировался и рынок GaN СВЧ-электроники. По данным аналитической компании Strategy Analytic, в период 2015–2020 годов он будет ежегодно расти в среднем на 17,5% и составит к 2020-му около 700 млн. долл.

По мере улучшения технологии и снижения стоимости GaN-приборов они все успешнее конкурируют с мощными кремниевыми LDMOS- и GaAs-аналогами в коммерческой области, где применяются в базовых станциях сотовой связи, кабельном телевидении, наземных станциях спутниковой связи и др. Значительная часть рынка GaN-электроники приходится на военные применения. В 2015 году эта часть составляла 40%, к 2020-му увеличится до 60%. Нацеленность на военное использование GaN в СВЧ-технике первоначально и была основой ряда специальных программ американского агентства DARPA по разработке технологии GaN СВЧ-микросхем (МИС) [1, 2].

В настоящее время развитие технологии GaN МИС достигло такого уровня, который позволяет закладывать ее в проектирование новейших радиоэлектронных систем управления вооружением и модернизацию большого парка действующих систем прежней разработки [3, 4]. Множится и число приборных СВЧ-компаний, стремящихся выйти на развивающийся рынок GaN СВЧ-микроэлектроники. При отсутствии собственной технологической базы все они нуждаются в услугах специализированных компаний (foundry), обладающих соответствующим технологическим оборудованием, средствами проектирования и владеющими процессами изготовления GaN МИС. Многие компании, работающие с GaN (Raytheon, GCS, Macom, Qorvo и др.), имеют такие технологические линии, но используют их только для внутренних задач или специальных программ.

<sup>1</sup> i\_k\_vikulov@mail.ru

## GaN-КОМПАНИИ (FOUNDRY)

Редакция журнала *Microwave Journal* провела опрос компаний, оказывающих услуги foundry по технологии GaN СВЧ МИС, и выяснила, что их не так много [5]. Несколько компаний в США, одна в Канаде, две-три в Европе и крупная тайваньская компания WIN Semiconductors (табл.1). Известны также две китайские компании – Chengdu HiWafer Semiconductor Co. и Xiamen San'an Integrated Circuit Co., работающие с 6-дюймовыми (150 мм) GaN-пластинами. Однако подробных сведений о них нет. Ряд американских предприятий не предоставили сведений, сославшись на ограничения ITAR (правительственный документ США, регулирующий экспорт военных технологий) или на особые обязательства перед своими стратегическими заказчиками. Не нашлось и японских компаний, предлагающих услуги foundry, включая крупнейшего производителя GaN-приборов Sumitomo.

Большинство GaN-компаний (foundry) используют подложки из карбида кремния SiC, который имеет хорошее согласование с GaN по кристаллической решетке и высокую теплопроводность. Вследствие большой мощности GaN-приборов указанное обстоятельство имеет особое значение при выборе как материалов подложки, так и корпусов GaN-приборов. Некоторые компании (прежде всего Masom) отдают предпочтение кремниевым Si-подложкам и доказывают, что в ряде применений такие приборы не уступают по надежности устройствам на SiC. Приборы на базе Si могут изготавливаться по КМОП-технологии на стандартных пластинах большого диаметра и недорогостоящих производственных линиях, что дает им существенное преимущество по стоимости. Пока все известные foundry-компании выполняют свои технологические процессы на GaN-пластинах диаметром 3 или 4 дюйма (75 или 100 мм), но планируют (некоторые в течение года-двух) переход на 6-дюймовые (150 мм) пластины. По некоторым оценкам, в результате перехода стоимость изготовления МИС уменьшится с 3 долл./мм<sup>2</sup> до 1,5 долл./мм<sup>2</sup>. Чаще всего в структуру транзисторов, формируемых на пластине в ходе технологического процесса, включают полевой электрод (field plate). Иногда такая конструкция предлагается как опция.

### Компания BAE Systems

Компания работает с GaN-технологией МИС с 2000 года и ориентирована в основном на поставку продукции для военного применения. Сейчас использует пластины диаметром 100 мм. В 2014 году BAE Systems продемонстрировала возможность производства мощных МИС-усилителей на пластинах 150 мм с помощью своего процесса на транзисторах с полевым электродом. В планах – реализация аналогичного процесса на пластинах 150 мм с транзисторами без полевого электрода. Про-

цесс с затвором 0,2 мкм и полевым электродом, разработанный в 2005–2008 годы, сегодня является промышленным стандартом и обеспечивает параметры, широко востребованные рынком.

Новый процесс (без полевого электрода) отличается хорошими параметрами при умеренной стоимости, позволяет получать приборы с высокими мощностью, усилением и КПД в диапазонах частот до 50 ГГц. Использование пластин толщиной 0,025 мм дает возможность установить небольшое смещение под стоком каждого транзистора для снижения индуктивности заземления. В комбинации с уменьшенной выходной емкостью приборов это гарантирует широкополосность усилителей при хороших усилении и КПД. Высокое пробивное напряжение (140 В) транзисторов обеспечивает устойчивость как усилителей мощности при мгновенных колебаниях напряжения, так и маломощных усилителей при резких изменениях мощности на входе. Осваиваемый на 150 мм пластинах процесс без полевого электрода обещает невысокую стоимость производства, на его обработку компания потратила более десяти лет.

Все процессы компании аттестованы. Проводятся ускоренные испытания приборов на срок службы в СВЧ-режиме, на основании которых рассчитывается среднее время между отказами (МТТФ). Для транзисторов с затвором 0,18 мкм без полевого электрода значение МТТФ составляет 10<sup>7</sup> ч при температуре канала 200 °С и максимальных рабочих напряжениях до 30 В. Компания BAE Systems осуществляет тестирование схем на пластине, резку пластин, отбраковку кристаллов и их первоначальный контроль. Микросхемы могут поставляться в открытом виде, напаянными на специальные тонкие носители-подложки, согласованные с ними по КТР, либо закрытыми в простейшие корпуса.

Компания оказывает услуги по проектированию на индивидуальной основе, помогая заказчикам, желающим сконструировать собственные МИС. BAE Systems располагает собственными средствами нелинейного программного проектирования (Angelov nonlinear model), дающими необходимую информацию о моделях приборов и топологии схем. В ближайшее время завершается разработка полного пакета проектирования МИС Process Design Kit (PDK).

### Компания Fraunhofer IAF

Выпускаемые компанией приборы используются в научных исследованиях, базовых станциях, системах РЭБ, радиолиниях связи точка-точка и радаров. Компания предлагает три технологических процесса производства приборов, перекрывающих диапазоны от 0 до 100 ГГц:

- до 6 ГГц на транзисторах с длиной затвора 0,5 мкм и напряжением 50 В;

- до 20 ГГц на транзисторах с 0,25 мкм затвором с напряжением 20 В;
- до 94 ГГц с затвором 0,1 мкм и напряжением 15 В.

Процесс с затвором 0,5 мкм обеспечивает КПД приборо в 65% и плотность мощности 6 Вт/мм. Процессы на 0,5 и 0,25 мкм проводятся на пластинах толщиной

0,1 мкм с отверстиями для питания 50 мкм, а процесс с затвором 0,1 мкм – на пластинах толщиной 0,075 мкм и отверстиями питания 30 мкм. Каждые четыре месяца компания предоставляет заказчикам возможность проведения процессов с использованием масок типа pizza masks (маски для изготовления на одной пла-

Характеристики технологических процессов foundry-компаний

Тип процесса	l, мкм	V, В	V <sub>b</sub> , В	W, Вт/мм	f <sub>max</sub> , ГГц	КПД, %	FP	D, мм	Тип подложки
BAE Systems (США)									
0,2 μm FP	0,2	40	≥100	6	40 (f <sub>t</sub> )	60 (10 ГГц)	Есть	100	SiC
0,18 μm NFP	0,18	30	140	3	57 (f <sub>t</sub> )	45 (30 ГГц)	Нет	100	SiC
Fraunhofer IAF (Германия)									
GaN50	0,5	50	150	6	6	65 (3 ГГц)	Есть	100	SiC
GaN25	0,25	28	100	5	20	55 (10 ГГц)	Есть	100	SiC
GaN10	0,1	15	30	2	94	40 (30 ГГц)	Нет	100	SiC
National Research Council (Канада)									
GaN500	0,5	40	180	5	13 (f <sub>t</sub> )		Есть	75	SiC
GaN150	0,15	30	120	7	35 (f <sub>t</sub> )	33 (18 ГГц)	Опция	75	SiC
E-GaN (разработка)	0,15	30	180		20 (f <sub>t</sub> )		Опция	75	SiC
OMMIC (Франция)									
D01GH	0,1	12	40	3,5	50	48 (40 ГГц)	Нет	75	Si, SiC
D006GH (разработка)	0,06	8	25	1	100		Нет	75	SiC
United Monolithic Semiconductors (Франция)									
GH50	0,5	50	≥200	≥5	7	≥65 (2 ГГц)	Есть	100	SiC
GH25	0,25	30	≥100	≥4	20	50 (10 ГГц)	Есть	100	SiC
WIN Semiconductors (Тайвань)									
NP45	0,45	50	≥160	≥6,5	12 (f <sub>t</sub> )	≥60 (2,7 ГГц)	Есть	100	SiC
NP25	0,25	28	120	4,2	25 (f <sub>t</sub> )	50 (6 ГГц)	Есть	100	SiC
Wolfspeed (США)									
G50V3	0,4	50	≥150	8	6	65	Есть	100	SiC
G28V3	0,4	28	≥120	4,5	8	65	Есть	100	SiC
G284V4	0,25	28	≥120	4,5	18	65	Есть	100	SiC
G40V4	0,25	40	≥120	6	18	65	Есть	100	SiC

Обозначения: l – длина затвора транзистора, V – напряжение питания, V<sub>b</sub> – напряжение пробоя, W – удельная плотность мощности, f<sub>max</sub> – максимальная частота генерации, f<sub>t</sub> – предельная частота по усилению, FP (field plate) – полевой электрод, D – диаметр пластины.



стине нескольких различных типов МИС) для производства небольшого количества кристаллов произвольного размера. Для процессов GaN50 и GaN25 компания Fraunhofer проводит тестирование приборов на постоянном токе, на СВЧ, а также при высокой температуре и обратном напряжении на частотах 2 и 10 ГГц. Процесс GaN10 тестируется на 10 ГГц. Путем измерения импеданса при изменении нагрузки составляется карта годных кристаллов на пластине (load pull wafer mapping). Быстрая оценка параметров мощных приборов выполняется в специальном измерительном корпусе. Работа с SiC-подложками включает в себя обработку ее обратной стороны, изготовление отверстий и их металлизацию по желанию. Fraunhofer имеет полный пакет PDK автоматизированного проектирования МИС компании Keysight для микрополосковых и копланарных линий, включающий программу проверки норм проектирования Design Rules Checking (DRC).

### Компания National Research Council (NRC)

При поддержке канадского правительства компания построила полную технологическую линию, отвечающую всем требованиям GaN-foundry. NRC выполняет научные и коммерческие заказы, создает собственные ноу-хау и не ограничивается рамками Канады. Компания имеет один процесс для транзисторов с затвором 0,5 мкм и два процесса с затвором 0,15 мкм, работающие до 35 ГГц. Один из них (E-GaN) находится в разработке и является пока единственным на рынке процессом с транзисторами обогатленного режима. Процесс с транзисторами 0,15 мкм обедненного режима обеспечивает удельную плотность мощности 7 Вт/мм. Транзисторы, получаемые в процессе с затвором 0,5 мкм, имеют пробивное напряжение до 180 В. NRC предлагает тестирование на пластине, но не выполняет работы по монтажу и корпусированию. Для процесса GaN500 компания предлагает проектирование на основе моделей Root и Angelov, для процесса GaN150 используется только модель Root. Для процесса 0,15 мкм E-GaN-моделей пока нет. Что касается испытаний на надежность, то для процесса GaN150 они находятся в стадии проведения. На более старом процессе (GaN800) испытания показали значение MTTF  $2,5 \cdot 10^7$  часов при температуре канала 200 °C.

### Компания OMMIC

Для оказания foundry-услуг и проектирования МИС компания предлагает свой процесс D01GH GaN на Si с транзисторами 0,1 мкм, стоимость которого ниже стоимости процесса GaN на SiC. Процесс D01GH выполняется на пластинах диаметром 75 мм. В 2017 году планируется увеличить диаметр пластин до 150 мм. Несмотря на то, что процесс разработан для мощных приборов и плот-

ность мощности составляет 3,3 Вт/мм, он годится также и для маломощных приборов (например, маломощных усилителей – МШУ). Так, в диапазоне от 15 до 50 ГГц он обеспечивает коэффициент шума 1 дБ на 30 ГГц, что эквивалентно существующим процессам на GaAs. Невысокое пробивное напряжение 30 В позволяет использовать низкие рабочие напряжения питания: около 12 В для усилителей мощности и 5 В для МШУ. Это ниже в сравнении с другими процессами, предлагаемыми рынком, в которых обычно используется напряжение около 28 В. В разработке находится процесс D006GH GaN на SiC для транзисторов с длиной затвора 60 нм. Его реализация намечена на первый квартал 2017 года. Предполагается, что он найдет применение при создании приборов в диапазонах от 40 до 100 ГГц. Разрабатываемые компанией мощные усилительные приборы предназначены для спутниковых систем связи Ka-диапазона, а маломощные усилители X- и Ku-диапазонов – для военных применений. В ближайшие три года компания намерена сосредоточиться на коммерческих рынках, таких как базовые станции связи 5G, для которых нужны приемопередающие МИС Ka- и W-диапазонов, и приборостроение в диапазонах от 0 до 67 ГГц, где требуются усилительные приборы с мощностью 32 дБм при компрессии 1 дБ.

Предварительные испытания на надежность проводились на постоянном токе в течение 2000 ч и не показали существенной деградации транзисторов. Условия испытаний – температура корпуса 80 °C,  $V_{ds} = 12$  В,  $I_{ds} = 200$  мА/мм, что эквивалентно температуре канала 200 °C. Другие виды испытаний на надежность продолжаются. OMMIC проводит тестирование на пластине, визуальное обследование (на соответствие коммерческим и космическим требованиям), тестирование партий приборов и тестирование пластин для космических программ. Обычно прибор помещается в пластиковый корпус типа QFN (до 30 ГГц) либо в негерметичный корпус. Для космических применений предлагается герметичное исполнение.

### Компания United Monolithic Semiconductors (UMS)

Компания обслуживает военный, космический и коммерческий рынки (главным образом телекоммуникационную инфраструктуру и автомобильный сегмент). Процесс GH5010 с транзисторами 0,5 мкм используется при разработке мощных усилителей на частоты до S-диапазона и обеспечивает плотность мощности 5 Вт/мм при напряжении 50 В. Процесс уже внесен в рекомендуемый перечень European Preferred Parts List Европейского космического агентства. Другой процесс, GH25 MMIC, дает плотность мощности более 4 Вт/мм при хорошем КПД до частот Ku-диапазона. Типовое рабочее напряжение составляет 30 В. Этот же процесс обеспе-



чивает коэффициент шума 1,8 дБ на частоте 15 ГГц при коэффициенте усиления 11 дБ. На основе процесса уже выполнено более 60 заказных проектов. Для выхода в более высокочастотные К- и Ка-диапазоны разрабатывается процесс с затвором на 0,15 мкм.

В компании налажена тесная связь между технологическим и приборным отделениями, что гарантирует согласование используемых моделей и процессов с требованиями заказчиков. Для оценки качества процессов UMS проводит испытания на хранение, повышенные температуры при обратном смещении, на срок службы при высокой температуре, на постоянный ток, а также форсированные и длительные испытания на СВЧ. В целом комплекс испытаний гарантирует надежную работу изделий в течение 20 лет при температуре перехода 200°C. Испытания проводятся на типовых элементарных ячейках, которые могут использоваться как в дискретных приборах, так и в составе МИС с большой шириной затвора.

По окончании изготовления приборов UMS предлагает большой комплекс услуг, в том числе измерения коэффициента шума и мощности на пластине, визуальное обследование, отбраковку и корпусирование кристаллов. Программный комплекс PDK управления процессом GH25 совместим с известными средствами приборного проектирования ADS и Microwave Office. В них входят нелинейные и тепловые модели расчета мощных приборов, линейные модели МШУ, а также модели переключателей, диодов и пассивных элементов МИС. PDK включает в себя также программы проверки норм проектирования DRC и трехмерного электромагнитного анализа.

### Компания WIN Semiconductors

Помимо того, что компания WIN является крупнейшим производителем GaAs-приборов, она располагает также двумя GaN-процессами. Коммерческий GaN-рынок компании связан с разработкой мощных усилителей для инфраструктуры беспроводной связи. Для военного сегмента разрабатываются мощные и малошумящие усилители, используемые в РЛС. Оба действующих GaN HEMT-процесса выполняются на SiC-подложках диаметром 100 мм. В технологическом процессе NP25 создаются транзисторы с напряжением 28 В и затвором 0,25 мкм, соединенным полевым электродом с истоком. На частоте 6 ГГц измеренные на ячейке шириной 1,25 мм при напряжении 28 В значения плотности мощности и тока составляют соответственно 4 Вт/мм (КПД более 50%) и 100 мА/мм. Линейное усиление равно при этом 17 дБ. На частоте 15 ГГц процесс дает более 12 дБ линейного усиления и плотность мощности 4,2 Вт/мм (КПД более 40%). Второй процесс, NP45, создает транзисторы на напряжение 50 В с затвором 0,45 мкм, сое-

диненным полевым электродом с истоком. Приборы, получаемые в этом процессе, имеют линейное усиление 16 дБ и плотность мощности 6,5 Вт/мм при КПД 60%. Эти параметры измеряются на частоте 2,7 ГГц в ячейке 4 мм, настроенной на максимум выходной мощности при напряжении 50 В. Аналогичные измерения, проведенные при настройке на максимум КПД, показывают следующие значения: КПД – 75%, удельная мощность – 5 Вт/мм и усиление – более 17 дБ. Для подтверждения надежности приборов компания предоставляет заказчикам квалификационный отчет, включающий результаты измерений МТТФ при четырех значениях температуры. Кроме того, выполняются высоковольтное тестирование приборов на постоянном токе, резка и обследование пластин. Имеющийся в компании пакет проектирования совместим с платформами ADS и NI/AWR и включает оптимизированные модели, модели расчета малосигнальных параметров, шума и параметров при изменении нагрузки. WIN предлагает также программу проверки норм проектирования WebDRC, действующую через Интернет в течение 24 ч. Проверка построения топологии Layout verification производится с помощью программ компаний Cadence, а также платформ ADS и AWR.

### Компания Wolfspeed

Одна из наиболее востребованных в США foundry-компаний предлагает четыре технологических процесса, выполняемых на пластинах диаметром 100 мм. Продукция Wolfspeed применяется в различных областях, включая инфраструктуру беспроводной связи, авионику, линии передачи данных, РЛС, космос, кабельное телевидение и др. Процесс с транзисторами 0,4 мкм используется для двух значений напряжения: 50 и 28 В. Процесс на напряжение 50 В дает плотность мощности 8 Вт/мм и обеспечивает пробивное напряжение более 150 В. Для высокочастотных применений (до 18 ГГц) Wolfspeed предлагает процесс 0,25 мкм на два напряжения: 40 и 28 В. На процессах всех видов достигается КПД 65%. Компания выполняет резку пластин, проверку приборов на пластине по постоянному току и СВЧ, а также в специальных фиксирующих оправках. Предлагаемый Wolfspeed комплект проектирования PDK включает программы Automated Design System (ADS) и NI/AWR Microwave Office.

В качестве GaN-foundry компания Wolfspeed имеет статус категории 1A, полученный в результате сертификации от организации Defense MicroElectronics Activity. Кроме того, проведенная Министерством обороны США оценка производственной готовности компании соответствует уровню 8 (наивысшая равна 10). Созданные на основе ее технологических процессов дискретные транзисторы и многокаскадные МИС показали суммар-

ную наработку в полевых условиях в 100 млрд. ч при скорости отказа менее 5 на 1 млрд. ч работы. Недавно успешно закончены испытания GaN-транзисторов на соответствие стандартам НАСА по надежности для спутниковых и космических систем.

По контракту с ВВС США и компанией Lockheed Martin компания Wolfspeed закончила производство 36 000 мощных GaN-усилителей, вошедших в состав РЛС наземного базирования с АФАР S-диапазона Space Fence. Эта система предназначена для обзора, обнаружения, сопровождения и точного измерения космических объектов на низких околоземных орбитах. Выбор компании Wolfspeed для выполнения этого контракта был проведен по принципу "открытого foundry" (open foundry model), то есть открытого конкурса среди компаний-foundry, владеющих аналогичными коммерческими технологиями. Это существенно снизило стоимость работы для заказчика [4].

На последней СВЧ-неделе (European Microwave Week) в Лондоне 3–7 октября 2016 года компания Wolfspeed продемонстрировала GaN на SiC HEMT-транзистор с минимальной импульсной мощностью 800 Вт и КПД более 65% в диапазоне 1,2–1,4 ГГц.

## ЕВРОПЕЙСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Европейская GaN-технология значительно отстает от американской. Для ликвидации технологической зависимости от США Евросоюз реализовал ряд собственных программ развития GaN СВЧ-микрорелектроники [1, 6, 7]. В первой программе KORRIGAN (2005–2009 гг.) участвовало 19 промышленных компаний и десять исследовательских лабораторий из семи стран Евросоюза. Цель программы состояла в создании независимой цепочки поставок GaN-приборов и МИС для европейской оборонной промышленности. Предполагалось, что в состав цепочки войдут компании, выпускающие подложки, выполняющие процессы эпитаксии GaN и отвечающие за выпуск приборов и МИС. В рамках последующих программ продолжались развитие технологии и специализация компаний в отдельных направлениях, включая корпусирование и решение тепловых проблем.

В результате трехлетнего проекта MANGA, финансируемого Европейским оборонным агентством EDA, компании SiCrystal (Германия) и Norstel (Швеция) разработали процессы производства SiC-пластин, совместимых с процессами эпитаксии GaN. Для производства полуизолирующих SiC-подложек диаметром 75 и 100 мм компания SiCrystal использовала процесс физического переноса из паровой фазы. Выращенные на этих подложках по европейской технологии эпитаксии AlGaIn/GaN HEMT-транзисторы показали сравнимые с американскими (компания Cree) статические и динамические

характеристики. Компания Norstel для производства 4H-SiC-подложек диаметром 75 и 100 мм использовала процесс высокотемпературного химического осаждения из паровой фазы. Достигнутая на этих подложках плотность микропор не превысила  $0,003 \text{ см}^{-2}$ . Британской компанией IQE разработана технология эпитаксии GaN HEMT-структур на 75 и 100 мм SiC-подложках европейского производства. Эпитаксиальные пластины диаметром 100 мм, возможно, будут приняты в качестве европейского стандарта.

В задачу инициированного Еврокомиссией проекта EUSiC, ориентированного на космические применения, входила разработка 75 мм SiC-подложек, качественно превосходящих американские. Рассматривались также вопросы роста кристаллов, выпуска пластин, эпитаксии и отдельные приборные разработки. Проект MORGAN (2008–2011 гг.) выполнялся при финансовой поддержке Еврокомиссии в рамках общеевропейской исследовательской программы 7<sup>th</sup> Framework Program (FP7) Research и был посвящен исследованию алмаза в качестве подложки для GaN-эпитаксии. Выращенные на нанокристаллических алмазных пленках структуры InAlN/GaN HEMT показали хорошую стабильность до температур 750°C. Часть проекта MORGAN касалась разработки материалов для микросхем, работающих в условиях повышенных температур. Так, были исследованы керамические корпуса с платиновыми соединениями до температур выше 1000°C. Анализировались также электрические межсоединения на основе серебряной нанопасты, работающие в условиях температуры до 800°C.

Разработка корпусов МИС легла в основу проекта MAGNUS. Предлагались различные типы корпусов: пластиковые и керамические корпуса без выводов, корпуса типа QFN, корпуса из высокотемпературной керамики (HTCC), из жидкокристаллических полимеров, корпуса с фланцами и на основе органических шариковых матриц (BGA).



Помимо отдельных проектов, финансируемых Еврокомиссией, Европейским оборонным агентством и Европейским космическим агентством, большой объем работ по технологии GaN СВЧ МИС выполняется европейскими университетами. Некоторые страны, не полагаясь на создание единого европейского центра, открывают самостоятельные GaN-производства. Так, компания Selex ES, входящая в состав итальянской корпорации Finmeccanica, разработала два собственных технологических процесса GaN МИС [8]. На основе процесса с затвором 0,5 мкм можно создавать приборы до С-диапазона с плотностью мощности 9 Вт/мм, а на основе процесса с затвором 0,25 мкм – до частот Ku-диапазона с плотностью мощности 7 Вт/мм. Эти результаты сопоставимы с лучшими параметрами, демонстрируемыми американской компанией Wolfspeed.

Компания Selex ES не оказывает foundry-услуг по производству GaN МИС для сторонних заказчиков, а через свое головное предприятие непосредственно участвует в разработке систем вооружения. Известны ее разработки GaN МИС для АФАР европейского истребителя Gripen (шведская компания Saab), а также для АФАР радаров обнаружения огневых позиций Giraffe (Saab) [8].

Несмотря на значительный объем европейских разработок в области GaN-технологии, некоторые представители британского Минобороны считают, что в Европе так и не создано независимого GaN-производства, а европейские компании, разрабатывающие системы, по-прежнему продолжают пользоваться поставками GaN-компонентов из США [7]. Это создает большие трудности в обслуживании европейских экспортных заказов, поскольку все они попадают под действие ограничений ITAR. Объем же внутреннего европейского рынка недостаточен для развертывания GaN-промышленности до уровня, обеспечивающего обороноспособность Евросоюза. В то же время, вопреки мнению автора работы [7], с текущими поставками GaN-компонентов европейская промышленность пока справляется самостоятельно. Так, недавно компания Airbus Defence and Space получила от Европейского космического агентства 18-месячный контракт на разработку 350 GaN-усилителей для спутниковых ретрансляторов. Мощность усилителей 50–100 Вт, их масса, приходящаяся на один ватт выходной СВЧ-мощности, на 50% меньше, а КПД на 15% выше, чем у усилителей предыдущей конструкции. Выходная мощность усилителей в лабораторных условиях достигает 200 Вт в L-, S- и C-диапазонах [9].

Между тем микроэлектронику Европы ждут серьезные изменения. В июле 2016 года компания Infineon (Германия) объявила о покупке за 850 млн. долл. американской компании Wolfspeed со штатом 550 сотрудников и 2 000 патентов [10]. Целью приобретения является прежде

всего расширение рынков Infineon в области силовой электроники на основе материалов SiC и GaN. В отношении СВЧ-электроники акцент делается на приборах для систем беспроводной связи, в частности 5G, включая мм-диапазон вплоть до 80 ГГц. Сейчас зарубежные аналитики обсуждают, как изменится картина европейской полупроводниковой промышленности после завершения сделки, намеченной на начало 2017 года. Один из наиболее интересных вопросов – как сложатся отношения компании Wolfspeed с Минобороны США, для которой она является стратегическим партнером, участвующим в создании важнейших систем вооружения. По последним сообщениям, в ходе сделки предполагается заключение отдельного соглашения, предусматривающего ряд мер, исключающих возможные угрозы национальной безопасности США. Вместе с тем, в соглашении не содержится ограничений на развитие бизнеса самой Infineon в военном и аэрокосмическом направлениях. Это означает, что в дальнейшем Infineon может стать крупнейшим в Европе поставщиком GaN СВЧ-транзисторов и МИС не только для коммерческого, но и для военного рынков.

## НИТРИДНАЯ СВЧ-ТЕХНИКА В РОССИИ

В статье с аналогичным заголовком показаны этапы развития и состояние GaN-технологии в стране, сопоставлены результаты в сравнении с зарубежными и названы причины отставания [11]. В качестве российской foundry-компании выступает предприятие ЗАО "Светлана-Рост" [11–13]. На основе молекулярно-лучевой эпитаксии компания разработала технологию создания структур типа "двойная гетероструктура" и стандартизовала процесс DHFET05 для проектирования HEMT-транзисторов с затвором 0,5 мкм для S- и C-диапазонов (до 8 ГГц). Получены транзисторы с удельной мощностью 5,5 Вт/мм и гибридные усилители суммарной мощностью 20 Вт.

Сформированная библиотека стандартных элементов и PDK позволили изготовить СВЧ-транзисторы S-диапазона мощностью до 12,5 Вт и тестовые МИС X-диапазона с коэффициентом усиления 13 дБ [13]. Институтом полупроводниковой СВЧ-электроники ИСВЧПЭ РАН изучается возможность построения GaN МИС миллиметровых диапазонов на гетероструктурах различных производителей, включая ЗАО "Светлана-Рост", "Элма-Малахит" и НИЦ "Курчатовский институт". Материалы подложек: SiC, Si, сапфир. На гетероструктурах типа AlGaIn/AlN/GaN/SiC реализован трехкаскадный МИС-усилитель с выходной мощностью 0,3 Вт для диапазонов 85–95 ГГц [14]. Исследования GaN СВЧ-транзисторов и усилителей проводятся также другими компаниями: ОАО "НПП "Пульсар", ОАО "НПП "Исток" и др. [15]. Недавно концерн "Созвез-

дие" сообщил о завершении разработки воронежским "НИИ электронной техники" (входит в состав концерна) транзисторов GaN на SiC с мощностью 10 Вт на частоты до 6 ГГц [16]. Транзисторы имеют повышенную устойчивость к воздействию широкого интервала температур и других внешних факторов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Викулов И., Кичаева Н.** GaN-технология: новый этап развития СВЧ-микросхем // Электроника: НТБ. 2007. № 4. С. 80–85.
2. **Викулов И.** GaN-микросхемы претендуют на замену ЭВП, Электроника: НТБ. 2014. № 1. С. 168–175.
3. **Gallaher J.** et al. Space Fence Radar Leverages Power of GaN // Microwave Journal. 2016. vol.59. August. Military Microwaves Supplement. P. 6–18.
4. Lockheed Martin introduces GaN-based Digital Array Row Transceiver radar technology. [http://www.semiconductor-today.com/news\\_items/2015/nov/lockheedmartin\\_171115.shtml](http://www.semiconductor-today.com/news_items/2015/nov/lockheedmartin_171115.shtml)
5. **Patrick Hindle** et al. Get your GaN here: RF GaN Foundry Survey // Microwave Journal. 2016. V. 59. June. P. 16.
6. **Викулов И.** Модернизация военной ВЧ- и СВЧ-электроники в Европе // Электроника: НТБ. 2011. № 3. С. 86–89.
7. **Kevin N Martin.** European gallium nitride capability // Proceedings of the Conference 2015 IEEE RadarCon.
8. **Викулов И.** СВЧ-электроника сегодня: направления и вызовы // Электроника: НТБ. № 3. 2015. С. 64–72.
9. Airbus Defence and Space awarded third contract in 18 months for GaN-based satellite amplifiers. [http://www.semiconductor-today.com/news\\_items/2016/jul/airbus\\_110716.shtml](http://www.semiconductor-today.com/news_items/2016/jul/airbus_110716.shtml)
10. Infineon to acquire Wolfspeed for \$850m. [http://www.semiconductor-today.com/news\\_items/2016/jul/infineon\\_140716.shtml](http://www.semiconductor-today.com/news_items/2016/jul/infineon_140716.shtml)
11. **Красовицкий Д., Филаретов А., Чалый В.** Нитридная СВЧ-техника в России: материалы и технологии // Электроника: НТБ. 2011. № 8. С. 114.
12. **Красовицкий Д., Филаретов А., Чалый В.** Стандартизованные процессы производства нитридной СВЧ ЭКБ // Состояние и ближайшие перспективы. Электроника: НТБ. 2013. № 3. С. 70.
13. **Алексеев А., Петров С.** Создание мощных СВЧ-транзисторов и микросхем на основе GaN. Отечественный комплекс технологического оборудования // Электроника: НТБ. 2016. С. 48.
14. **Мальцев П., Федоров Ю., Галиев Р., Михайлович С., Гнатюк Д.** Нитридные приборы миллиметрового диапазона // Наноиндустрия. 2014. № 3. С. 40.
15. **Романова И.** Отечественная СВЧ-электроника. 70 лет развития // Электроника: НТБ. 2013. № 6. С. 122.
16. Концерн "Созвездие" разработал первый в России транзистор, работающий в экстремальных условиях. <http://www.sozvezdie.ru/news/archive/1/>