

СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА СЕГОДНЯ: НАПРАВЛЕНИЯ И ВЫЗОВЫ

И. Викулов, к.т.н. i_k_vikulov@mail.ru

Сложившиеся в 2000-е годы благоприятные международные торгово-экономические отношения способствовали созданию высококачественной отечественной радиоэлектронной аппаратуры, основанной на широком использовании импортных электронных, прежде всего, полупроводниковых СВЧ-компонентов, где отставание от зарубежного уровня было значительным. Предлагаемые рынком условия оказались настолько привлекательными, что закупались даже отдельные вакуумные СВЧ-приборы, которым, как считалось, отечественные приборы не уступали. С введением ограничений на импорт товаров и услуг ситуация изменилась, и особое значение приобретает выбор приоритетных направлений импортозамещения как сегодня, так и в перспективе. Рассмотрим последние разработки ведущих зарубежных компаний двух основных технологий СВЧ-электроники – вакуумной и полупроводниковой.

ВАКУУМНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

В 1990-е годы американская вакуумная СВЧ-промышленность стала сдавать свои позиции: уменьшилось финансирование, сократилось число НИОКР, возник дефицит кадров [1]. Аналогичные процессы наблюдались и в российской СВЧ-электронике. После 2000 года Управление перспективных исследований и разработок Министерства обороны США (DARPA) в результате проведения программ HiFIVE, Terahertz Technology Initiative и др. сосредоточило усилия на освоении миллиметровых и терагерцевых диапазонов частот вакуумной СВЧ-электроники [2]. Целью DARPA стало освоить ранее не используемый в радиоэлектронике диапазон частот 300 ГГц – 1 ТГц, так называемый терагерцевый промежуток (THz Gap), открывающий широкие возможности для совершенствования военной и коммерческой аппаратуры. Развитие этого направления иллюстрируют и работы, представленные на международной конференции по вакуумной СВЧ-электронике 2014 года (International Vacuum Electronics Conference, IVEC 2014) [3].

Приборы миллиметрового и терагерцевого диапазонов

Переход к коротковолновым диапазонам длин волн потребовал замены традиционных конструкций вакуумных СВЧ-приборов новыми типами. Так, вместо приборов с обычным цилиндрическим электронным лучом стали широко использоваться приборы

с ленточным лучом, представляющие собой так же, как и многолучевые, вариант с распределенным в пространстве лучом. При меньшем фокусирующем магнитном поле и компактной конструкции эти приборы обеспечивают более высокую эффективность взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем прибора. В США работы в этом направлении возглавляет Научно-исследовательская лаборатория ВМС (NRL) [3]. Главный конструктивный элемент ее приборов – специально разработанная электронная пушка с ленточным лучом размером 0,3×4 мм, дающая ток 3,5–4 А при напряжении около 20 кВ. На ее основе в NRL созданы два прибора:

- узкополосный трехрезонаторный клистрон с распределенным взаимодействием электронного потока с электромагнитным полем диапазона 94 ГГц мощностью 7,5 кВт и усилением в режиме насыщения 35 дБ (рис.1);
- ЛБВ на системе связанных резонаторов с выходной импульсной мощностью 10 кВт на 34 ГГц, усилением 15 дБ и полосой 5 ГГц по уровню 3 дБ. Длина системы взаимодействия лампы – менее 5 см.

Приборы с ленточным пучком активно разрабатываются и сотрудниками Института электроники Академии наук Китая. Мощность созданного ими клистрона W-диапазона (75–110 ГГц) составляет 30 кВт при напряжении 75 кВ и токе 4 А. Усиление прибора – 40 дБ, полоса – 100 МГц и КПД – 10%. Размеры плоского электронного луча – 10×0,5 мм.

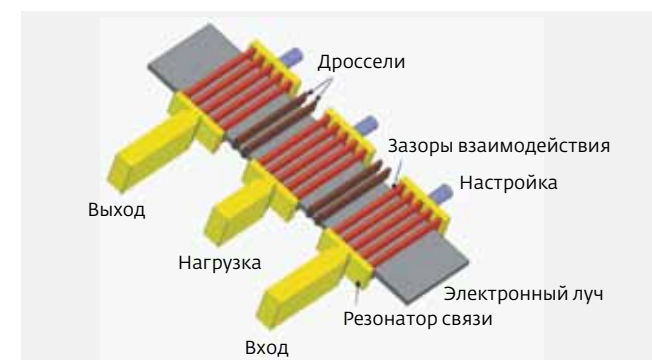


Рис.1. Топология клистрона с распределенным взаимодействием с ленточным электронным лучом

Компания L-3 Communications Electron Devices (США) специализируется в создании мощных передающих модулей (МРМ), совмещающих в одной конструкции ЛБВ, задающий твердотельный усилитель и источник питания. Последняя разработка специалистов компании – NanoМРМ типа M 1871. Непрерывная мощность прибора в режиме насыщения равна 50 Вт в диапазоне 29–31 ГГц при КПД 30%. Усиление малого сигнала – 34 дБ во всей полосе частот. Размеры прибора составляют 11,17×16,76×2,54 см. Предназначен он для систем связи и РЛС, размещаемых на малых мобильных платформах (беспилотных летательных аппаратах, спутниках и т.п.). Основа конструкции МРМ – миниатюрная ЛБВ.

К созданию источников мощности Ka-диапазона (26,5–40 ГГц) приступили и компании, не имеющие электронных приборов собственной разработки. Так, dB Control (дочерняя фирма Electronic Technologies Group, входящей в корпорацию HEICO, США) предлагает для наземных и мобильных РЛС промышленные образцы ЛБВ-усилителей с источником питания. Конструкция усилителей – модульная, с интегрированным воздушно-принудительным теплоотводом. Минимальная импульсная мощность устройства – 700 Вт в полосе 34,5–35,5 ГГц, коэффициент заполнения импульса – 10%.

В Национальной лаборатории вакуумной электроники Китая разработана ЛБВ Q-диапазона (33–50 ГГц) на замедляющей системе типа "свернутый волновод". Максимальная мощность прибора составляет 200 Вт в полосе частот 43,5–45,5 ГГц. При использовании одноступенчатого коллектора КПД прибора превышает 25%. Элементы лампы изготавливались с помощью таких современных технологий, как глубокое реактивно-ионное травление (DRIE), LIGA-технология, основные стадии которой – рентгеновская литография, гальванопластика, формовка и др.

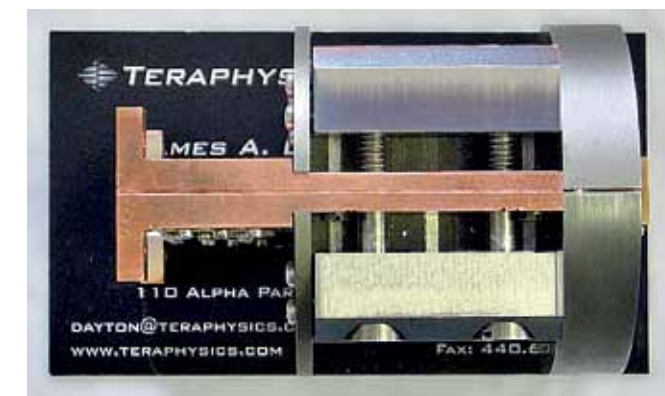


Рис.2. Спиральная микроЛБВ мощностью 25 Вт на диапазоне 94 ГГц, не превышающая по размерам бизнес-карту

Большое число работ направлено на освоение W-диапазона (в основном 94 ГГц). Различными китайскими институтами созданы как узкополосные (2 ГГц) ЛБВ с импульсной мощностью 100 Вт, так и широкополосные (10 ГГц) с непрерывной мощностью 20 Вт.

Интересную конструкцию спиральной микроЛБВ на 94 ГГц мощностью 25 Вт предложила корпорация Teraphysics (США). Электронная пушка, замедляющая система и коллектор ЛБВ изготавливаются одновременно по оригинальной технологии с точностью центровки до 2 мкм. Применена также новая компактная конфигурация периодической структуры фокусировки постоянными магнитами. Габариты лампы не превышают размеров обычной бизнес-карты: длина составляет 6,6 см, диаметр – 4,82 см (рис.2). Масса равна 450 г.

Что касается частотных полос миллиметрового диапазона, то особое значение придается полосе от 200 до 300 ГГц (G-диапазон), которой соответствует широкий минимум атмосферного затухания. Интерес к этому диапазону возник в ходе проведения программы HiFIVE, задача которой заключалась в создании вакуумного микроусилителя с выходной мощностью 50 Вт на центральной частоте 220 ГГц

[4]. Работы по программе продолжаются до сих пор. Научно-исследовательская лаборатория ВМС и компания Beam Wave Research разрабатывают ЛБВ с однокаскадной змеевидной замедляющей системой длиной 2,2 см. Электронный луч диаметром 170 мкм с током 124 мА при напряжении 20 кВ фокусируется полем с магнитной индукцией 6,6 кГс. Прибор рассчитан на выходную мощность 80–90 Вт в полосе 231,5–235 ГГц при входной мощности 113 мВт и усилении 30 дБ. При использовании одноступенчатого коллектора мощность в режиме насыщения может достигать 140 Вт при КПД 23%. Диаметр прибора равен 14 см, высота – 11 см. Масса с магнитной системой около 7 кг.

Канадское отделение компании Communications & Power Industries (CPI) продолжает развивать традиционные для нее клистроны с распределенным взаимодействием миллиметрового диапазона. На завершающей стадии разработки находятся импульсные усилители на частотные диапазоны 35,5 ГГц (мощностью 1 и 3 кВт) и 35,75 ГГц (1,5 кВт). Закончена разработка двух импульсных клистронов на 94 ГГц (1,7 кВт). На более высокочастотные диапазоны, включая S-диапазон, созданы:

- усилитель на частоту 187 ГГц с непрерывной мощностью 5 Вт;
- перестраиваемый генератор на 263 ГГц с непрерывной мощностью 5 Вт;
- усилитель на 264 ГГц с импульсной мощностью 20 Вт. Масса каждого прибора не превышает 8 кг.

ЛБВ диапазона 220 ГГц на системе "свернутый волновод" с полосой 5 ГГц совместно проектируют сотрудники Института прикладной электроники и Центра терагерцевых исследований (Китай). При мощности 250 мВт получена полоса 3,5 ГГц и усиление 14 дБ.

В развитии приборов терагерцевого диапазона ведущая роль принадлежит компании Northrop Grumman Electronic Systems. Ранее ею продемонстрированы вакуумные усилительные приборы на частоты 0,65 и 0,67 ТГц (100 мВт). В результате последней разработки специалистами компании создан усилитель с выходной мощностью более 50 мВт в диапазоне 0,835–0,842 ТГц. На частоте 0,85 ТГц его мощность составила 39,4 мВт, мгновенная полоса – 11 ГГц в режиме малого сигнала. В приборе применен одноступенчатый понижающий коллектор.

Приборы сантиметрового диапазона

По оценкам американских специалистов, несмотря на все более широкое применение полупроводниковых приборов в радиоэлектронных системах, примерно в 70% систем военного назначения все еще используются вакуумные СВЧ-устройства [5]. С учетом сроков

разработки новых систем очевидна необходимость дальнейшего поддержания технологии вакуумных СВЧ-приборов этого диапазона.

Среди вакуумных СВЧ-приборов этого диапазона широкое применение находят космические ЛБВ, обеспечивающие ретрансляцию сигнала со спутников. Основные разработчики этих ЛБВ компании Thales Electron Devices (Франция) и L-3 Communications Electron Technologies. Важнейшие параметры спутниковых ЛБВ – выходная мощность, КПД, полоса частот, срок службы и линейность. С 1997 года компания L-3 Communications выпустила свыше 3200 ЛБВ на диапазон частот от 2 до 75 ГГц. В общей сложности время их наработки превысило 140 млн. ч. Недавно компания с помощью программ CHRISTINE (для расчета нелинейных характеристик спиральных ЛБВ на основе дисковой модели электронного потока) и MICHELLE (для расчета многоступенчатого коллектора) модернизировала ЛБВ X-диапазона типа 86160, введя в двуханодную пушку изолированный фокусирующий электрод. Это позволило улучшить фокусировку и работать помимо непрерывного режима в импульсном. Применение охлаждающего радиатора значительно снизило тепловую нагрузку на спутник. Непрерывная мощность лампы составляет 160 Вт в полосе более 500 МГц, КПД – 69%, ее масса с источником питания и линейаризатором – менее 2,9 кг. Как показали испытания, прогнозируемый срок службы лампы составляет 15 лет.

Для летных испытаний L-3 Communications предлагает спиральную ЛБВ модели 9250H на диапазон 20,2–21,2 ГГц с КПД 65%, способную функционировать на орбите более 20 лет. В режиме насыщения мощность лампы составляет 150–300 Вт в зависимости от назначения без изменения конструкции. Коэффициент амплитудно-фазового преобразования не превышает 3,4 град/дБ.

Серию спутниковых ЛБВ K_u - и K_a -диапазонов анонсировала компания Thales Electron Devices. Выходная мощность лампы K_u -диапазона равна 150 Вт в полосе 10,7–12,75 ГГц, лампы K_a -диапазона – 170 Вт на частотах 17,3–21,2 ГГц. В настоящее время специалисты компании разрабатывают лампы K_u - и K_a -диапазонов мощностью до 300 и 250 Вт соответственно и полосой 2,9 ГГц. Компания также модернизирует ЛБВ S-диапазона (2–4 ГГц). Так, вместо ЛБВ с выходной мощностью 250 Вт она предлагает ЛБВ модели TL2500 мощностью 500 Вт. Мгновенная полоса лампы в 150 ГГц может перестраиваться на 500 МГц. Приборы компании Thales – одни из лучших в Европе – используются и в ряде российских спутников.

Одно из традиционных применений ЛБВ сантиметрового диапазона – системы радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Компания e2v Technologies (Великобритания),

специализирующаяся в этой области, разработала лампу, перекрывающую весь нижний участок СВЧ-диапазона – от 2 до 7 ГГц. Выходная мощность лампы превышает 100 Вт, напряжение – менее 4 кВ, мощность источника питания – 540 Вт, размеры – 250×50×50 мм. В свое время компания предпринимала попытку создать ЛБВ, перекрывающую весь диапазон от 2 до 18 ГГц. Однако из-за трудностей согласования в столь широкой полосе частот работа не была закончена. Вероятно, теперь ставится задача перекрытия полного диапазона РЭБ двумя литерами: 2–7 ГГц и 6–18 ГГц.

Ряд разработок, представленных на Международной конференции по вакуумной электронике 2014 года [3], относится к категории мощных и сверхмощных приборов. В Институте электроники Академии наук Китая созданы и испытаны два образца 24-лучевого двухрезонаторного клистрона S-диапазона средней мощности 30 кВт. Выходная импульсная мощность прибора составляет 500 кВт, КПД – более 35%, мгновенная полоса частот – 10%, срок службы превышает 3000 ч.

Приборы сверхбольшой мощности, как правило, предназначены для ускорительной техники и систем энергетического оружия. Национальной лабораторией ускорителей США по контракту с Министерством энергетики разработан 16-лучевой клистрон с фокусировкой постоянными периодическими магнитами, выходная мощность которого на частоте 11,424 ГГц составляет 5 МВт, а КПД превышает 60%. У каждого электронного луча прибора отдельный выходной резонатор, энергия которого суммируется с энергией остальных лучей в общем выходном волноводе.

Разработчики CPI в конструкции сверхмощного клистроно X-диапазона использовали четырехзоровую распределенную схему взаимодействия. При мощности 50 МВт на частоте 11,994 ГГц усиление клистроно составляет 48 дБ и КПД – 40%. Длительность ВЧ-импульса – 1,5 мкс, частота повторения – 60 ГГц.

В настоящее время вакуумные СВЧ-приборы в основном разрабатываются для систем усиления и генерации мощных радиочастотных сигналов. Класс спутниковых ЛБВ сантиметрового диапазона средней мощности испытывает сильную конкуренцию со стороны твердотельных усилителей, прежде всего на нитриде галлия. В то же время проведенные компанией Boeing исследования большого числа проработавших на орбите приборов показали, что в области спутниковых устройств паритет вакуумной и полупроводниковой технологий все еще сохраняется [5]. Гораздо более сильную позицию полупроводниковые приборы занимают в передатчиках станций с РЛС с активной фазированной антенной решеткой (АФАР), в которых они фактически вытесняют мощные вакуумные приборы. Приведем примеры внедрения последних

достижений СВЧ-полупроводниковой технологии в радиоэлектронные системы.

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Полупроводниковая СВЧ-электроника построена на Si, GaAs, GaN, SiC, InP, SiGe. Сейчас основной материал для создания активных полупроводниковых СВЧ-компонентов – арсенид галлия. Главный стимул развития GaAs-приборов – мобильная связь: в каждом телефоне используется несколько GaAs СВЧ-усилителей и переключателей. Однако, как показывают прогнозы компании Strategy Analytics, рост объема продаж GaAs-устройств близок к насыщению (рис.3). Рынок GaAs СВЧ-приборов военного назначения невелик (~5%). Тем не менее они достаточно широко внедрены в военные системы, благодаря программе создания монолитных интегральных схем СВЧ/миллиметровых длин волн (Microwave/Millimeter Wave Monolithic Integrated Circuits MIMIC), проводимой DARPA с 1986 года. Цель программы – перевод систем радиоэлектронного вооружения с гибридно-интегральной технологии микросхем на монолитную [6]. Стоит отметить, что большинство современных РЛС с АФАР построено на основе GaAs монолитных интегральных схем (МИС).

Современный этап развития полупроводниковой СВЧ-электроники – освоение технологии нитрид галлиевых приборов (рис.4). Решающую роль на этом этапе сыграли две другие программы США: освоение технологии полупроводниковых материалов с широкой запрещенной зоной – WBGs (Wide Bandgap Semiconductor) и создание материально-технической и производственной базы для выпуска надежных и недорогих GaN СВЧ МИС мощных усилителей для радиоэлектронных систем вооружения – Title III [7, 8]. К настоящему времени ведущие американские компании (Raytheon, TriQuint, Cree) получили от Министерства обороны высшие оценки готовности к производству (уровни 8 и 9) GaN МИС для военных систем. От начала исследований GaN-приборов

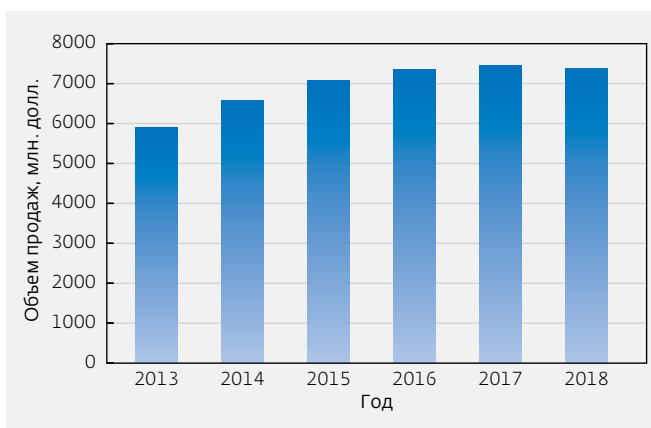


Рис.3. Динамика рынка ВЧ GaAs-микросхем и приборов (источник: компания Strategy Analytics)

(1999 год) до их внедрения в системы (2014) компаниями Raytheon и TriQuint прошло 15 лет.

Сейчас применение GaN-приборов и МИС в системах военного назначения расширяется. Лидер в этой сфере – Raytheon, GaN МИС которой отличаются хорошей устойчивостью к ионизирующему излучению: они не выходят из строя при ударном одноразовом воздействии радиации и не изменяют параметры при стандартном дозированном облучении, что обуславливает возможность их космического применения [9]. В числе разработанных систем вооружения на базе GaN-приборов компании:

- корабельная система ПВО S-диапазона AMDR;
- наземная трехмерная система дальнего слежения С-диапазона 3DELRR для ВВС.

На основе GaN приемопередающих модулей АФАР Raytheon модифицировала РЛС комплекса ПВО/ПРО Patriot и получила разрешение на его экспорт (рис.5) [10]. Компания провела успешные испытания системы РЭБ нового поколения (Next Generation Jammer) с GaN АФАР S-диапазона. Испытания подтвердили эффективность системы, способной нарушить работу РЛС ПВО путем создания различных помех с перестраиваемой мощностью и нелинейными искажениями. Оснащение самолетов Boeing EA-18G Growler новой системой РЭБ намечено на 2020 год.

Чтобы ликвидировать технологическое отставание и избежать проблемы экспортного лицензирования со стороны США, европейские компании также активно развивают производство GaN СВЧ-микросхем. Вслед за проектами США последовательно реализованы две европейские программы: KARRIGAN и MANGA. Последняя, цель которой – освоение полного цикла производства и поставок GaN- и SiC-подложек, а также GaN эпитаксиальных пластин, была начата в 2010 году и закончена в 2014-м [11]. В реализации программы

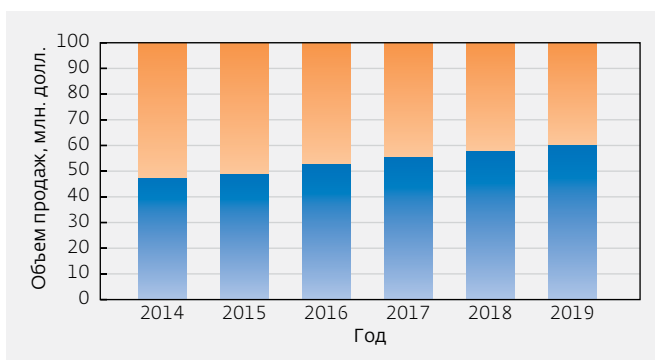


Рис.4. Объем продаж военных (синий) и коммерческих (красный) высокочастотных GaN-приборов (источник: компания Strategy Analytics)

участвовали: Институт прикладной физики твердого тела Фраунхофера (Fraunhofer IAF), компании Si Crystal (Германия), Norstel AB (Швеция), Alcatel THALES III-V Lab (Франция) и Бристольский университет (Великобритания). Основные итоги программы:

- разработка технологии высококачественных SiC-подложек диаметром 75 и 100 мм (выращивание кристаллов, резка пластин, полировка, подготовка к эпитаксии);
- сравнение физических, электрических и СВЧ-параметров HEMT с транзисторами компании Cree, изготовленными на SiC-подложках, и подтверждение пригодности полученных в рамках программы подложек, для промышленного эпитаксиального выращивания GaN HEMT;
- освоение производства эпитаксиальных GaN HEMT на 75- и 100-мм SiC-подложках европейского производства в объемах, достаточных для удовлетворения среднесрочных оборонных европейских потребностей;



Рис.5 Комплекс ПВО/ПРО Patriot с РЛС с АФАР, модернизированный на основе GaN-приемопередающих модулей

- дополнительная разработка пригодных для применения в миллиметровом диапазоне эпитаксиальных InAlN/GaN HEMT на SiC-подложках с более высоким КПД и лучшей надежностью, чем у обычных AlGaIn/GaN HEMT.

Несмотря на успешное завершение программы MANGA, некоторые европейские компании сочли необходимым развивать собственную технологию GaN МИС. Так, лидер поставки перспективных полупроводниковых пластин, на долю которого приходится более половины мирового рынка эпитаксиальных пластин для ВЧ-приборов на сложных полупроводниках, включая GaAs, – британская компания IQE – разработал технологию формирования полевых гетероструктурных транзисторов на SiC-подложках диаметром 75 и 100 мм и на 150-мм подложках кремния. Поверхностное сопротивление эпитаксиальных AlGaIn/GaN-подложек на SiC составило 350 Ом/кв при однородности по пластине 1,5%. Компания готова выступить в качестве поставщика эпитаксиальных структур для GaN МИС в рамках готовящегося европейского стандарта на пластины диаметром 100 мм.

Совместная франко-германская компания United Monolithic Semiconductors разработала технологию (GH25-10) изготовления AlGaIn/GaN-транзисторов с проектными нормами 0,25 мкм на эпитаксиальных

SiC-подложках диаметром 100 мм. Рабочая частота транзисторов достигает 20 ГГц. Приборы выдержали испытания на термоциклирование в интервале от –65 до 125°C (1000 циклов), на сохранность в течение 1000 ч при температурах 250 и 300°C и др. В 2014 году компания планировала аттестовать усилители X-диапазона мощностью 15 Вт и 8-Вт широкополосные усилители мощности диапазона 6–18 ГГц и начать их выпуск.

Сотрудниками Selex ES (Италия) – одной из передовых европейских компаний в области внедрения СВЧ GaAs и GaN МИС в системы вооружения, входящей в состав корпорации Finmeccanica, разработаны GaN МИС с топологическими нормами 0,5 мкм для приборов С-диапазона и 0,25 мкм для приборов на частоту вплоть до К_u-диапазона (см. таблицу).

Недавно консорциум Eurofighter заключил с Selex контракт на разработку АФАР РЛС Cartor E для европейского истребителя Turboprop (технология АФАР не раскрывается). Аналогичный заказ Selex выполняет для истребителя Gripen шведской компании Saab. На Международном авиационно-космическом салоне 2014 года компания Saab Electronic Defence Systems продемонстрировала самолет Gripen E, законцовки крыльев которого оснащены системой РЭБ с антенной, выполненной на основе GaN-технологии. Saab, которая работает с GaN-устройствами с 2005 года, использует их

Характеристики GaN МИС компания Selex ES

Параметр	0,5-мкм процесс	0,25-мкм процесс
Проводимость g_m , макс., См/мм	>320	>350
Ток насыщения I_{DSS} , мА/мм	>500	>800
Обратное напряжение V_{BGD} , В	>100	>60
Частота отсечки F_c при 25 В, ГГц	>21	>25
Максимальная частота F_{max} при 25 В, ГГц	>40	>50
Усиление G_{max} при 10 ГГц, макс., дБ	13	16
Плотность мощности, Вт/мм	9 при 35 В	7 при 30 В
Коэффициент шума на 10 ГГц при $V_{DS} = 15$ В и ширине затвора 0,2 мм, мин., дБ	1,2	1,0

и в АФАР новой наземной станции Giraffe. В нее входят три системы наземного базирования и два их морских варианта, работающие в X- и S-диапазонах [12].

Подложкой мощных GaN-приборов и МИС обычно служит карбид кремния SiC. Однако это дорогой материал, который больше подходит для военных применений. Одна из причин его дороговизны – в 200–300 раз меньшая скорость роста, чем у кремния. Поэтому сейчас для коммерческих применений рассматриваются GaN МИС на кремниевой подложке. Главный идеолог развития технологии GaN на Si – компания MАСOM, президент и исполнительный директор которой Джон Крото считает, что GaN-технология следует перенести на дешевые кремниевые подложки диаметром 200 мм. Это позволит снизить стоимость нитрид галлиевых приборов до уровня кремниевых, которые сейчас обходятся дешевле серийных GaAs-устройств в три раза и современных GaN-приборов на SiC-подложках – в 100 раз [13]. С этой целью MАСOM заключила долгосрочное соглашение с компанией IQE о поставках пластин эпитаксиального GaN на Si диаметром 100, 150 и 200 мм. На выставке Европейской СВЧ-недели 2014 года (European Microwave Week 2014) MАСOM демонстрировала серию GaN на Si интегральных широкополосных усилителей мощности, работающих в диапазоне 30–2500 МГц.

Некоторые европейские предприятия также приступают к разработке технологии GaN МИС на кремнии. Исполнительный директор французской компании OMMIC Марк Роччи на четвертой конференции по сложным полупроводникам (полупроводниковым соединениям) заявил, что, в конце концов, GaAs-технология умрет. Поэтому инженеры компании ставят задачу при изготовлении приборов на частоты до 100 ГГц заменить GaAs-процессы технологией GaN на Si, что позволит снизить удельную стоимость в пересчете на площадь кристалла. Первый этап – замена 135-нм GaAs-процесса изготовления усилителей

мощности для бортовых моделей аэрокосмических систем, а также высокопроизводительных усилителей мощности для наземных систем технологией формирования 100-нм GaN-устройств на кремнии – D01GH. С помощью этой технологии изготовлены транзисторы с рабочим током 650 мА/мм, максимальным значением крутизны характеристики прямой передачи 600 мСм/мм, граничной и максимальной частотой 100 и 180 ГГц соответственно и плотностью выходной мощности в режиме насыщения более 2,5 Вт/мм на 30 ГГц. По мнению Роччи, переход на технологию GaN на Si позволит создать приборы с выходной мощностью 12 Вт на 30 ГГц, 6 Вт на 45 ГГц и 1 Вт на 94 ГГц. В поставках эпитаксиальных GaN на Si пластин компания ориентируется на европейских производителей [14].

По мере расширения применения пластин GaN на Si растут и предложения поставщиков. Так, Научный центр микро- и наноэлектроники в Лёвене IMEC (Бельгия) сообщил о производстве недорогих эпитаксиальных пластин GaN на Si диаметром 200 мм и о готовности к их поставкам.

Вместе с тем, результаты последних разработок показали, что кремниевые приборы не исчерпали своих возможностей в СВЧ-диапазоне, несмотря на большие потери на высоких частотах.

КРЕМНИЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Компания Peregrine развивает запатентованную технологию UltraCMOS, позволяющую изготавливать на кремнии сверхмалой толщины на изолирующих сапфировых подложках устройства, которые объединяют на одном кристалле ВЧ, цифровые и аналоговые компоненты. Переключатели типа SP4T, выполненные по этой технологии и работающие в диапазоне частот от 9 кГц до 18 ГГц, – прямые конкуренты подобных GaAs-устройств, при меньшем энергопотреблении. На европейской неделе СВЧ-техники компания

демонстрировала выполненные по UltraCMOS-технологии микросхемы "полноценного" ключа постоянного тока и схему-ядро X-диапазона.

По утверждению разработчиков, представленная модель PE42020 – первый и пока единственный в промышленности радиочастотный ключ с реальной возможностью переключения по постоянному току. Ключ работает в ранее недоступном диапазоне частот – 0–8 ГГц – чрезвычайно важном для поставщиков прецизионного оборудования, такого как контрольно-измерительные системы. Он способен переключать пиковые напряжения от 10 до –10 В по постоянному и переменному току, значение которого достигает 80 мА. При этом время переключения составляет 10 нс, время установления – 15 нс. Компания рассчитывает, что полноценный ключ прямого тока сможет заменить в контрольно-измерительном оборудовании проблематичные механические реле и МЭМС-переключатели.

По UltraCMOS-технологии на сапфировой подложке создана и кремниевая микросхема-ядро для применения совместно с МИС в АФАР X-диапазона. Схема содержит цифровой семиразрядный фазовращатель, семиразрядный ступенчатый аттенюатор, переключатель с высокой развязкой, совместимый с последовательным интерфейсом. Предельно допустимая мощность схемы в диапазоне 9–10,1 ГГц составляет 18 дБм [15].

Значительный прорыв кремниевых приборов в высокочастотный диапазон сделала компания Northrop Grumman Aerospace Systems, которая в ходе финансируемой DARPA программы создания эффективной интегральной схемы линейаризованного передатчика, полностью выполненного на кремнии (Efficient Linearized All-Silicon Transmitter IC's ELASTx), разработала кремниевую систему передатчика на кристалле на частоту 94 ГГц (рис.6). Кремниевая технология позволила объединить схему передатчика с цифровыми устройствами, оптимизировав тем самым его мощность, эффективность и линейность [16]. Передатчик предназначен для

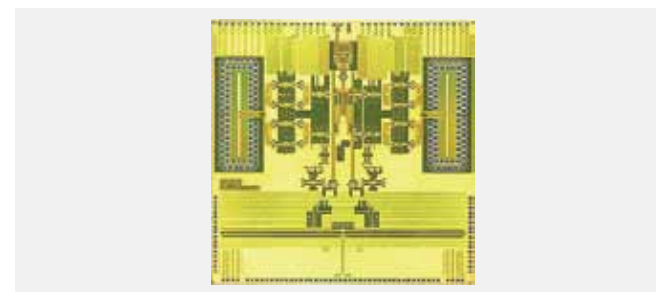


Рис.6. Кремниевая интегральная схема передатчика на 94 ГГц типа системы на кристалле

обеспечения отрядов передового базирования связью через спутники и наземные терминалы.

И СНОВА GaN-ТЕХНОЛОГИЯ

Похожие цели преследует и программа DARPA Hotspots, рассчитанная на применение коммерческих устройств E-диапазона (71–76, 81–86 ГГц) для связи в "горячих точках" [17]. Задача программы – создание в миллиметровом диапазоне сети связи по линиям передачи воздух-воздух и воздух-земля с гигабитной производительностью. Ведущую роль в программе играет компания L-3 Communications Systems-West. Участвуют также Millitech, BAE Systems и др. За разработку мощных GaN-приборов отвечает HRL Laboratory. Модуль усилителя мощности (10–20 Вт) передатчика выполнен на GaN МИС второго поколения компании по восьмиканальной схеме сложения. На частоте 74 ГГц при мощности 17 Вт его КПД составляет 25%. По своим размерам модуль усилителя не больше смартфона iPhone. Систему предполагается использовать в обоих поддиапазонах E-диапазона.

Заметным событием в СВЧ-электронике стали достижения компании Northrop Grumman, создающей в рамках программы терагерцевой электроники Terahertz Electronics электронную компонентную базу этого диапазона. Разработана МИС усилителя, содержащего десять 25-нм InP НЕМТ на частоту более 1 ТГц (наивысшая частота современных МИС усилителей). Усиление на частоте 1 ТГц составляет 10 дБ, на частоте 1,03 ТГц – 9 дБ. Ранее компанией были получены аналогичные результаты на частотах 700 и 850 ГГц [18]. Устройства ТГц-диапазона перспективны для применения в системах формирования изображения с высоким разрешением, сверхточных локационных системах предупреждения столкновений, системах связи большой пропускной способности, спектрометрах для дистанционного определения потенциально опасных химических и взрывчатых веществ и др.

В настоящее время сложные радиоэлектронные устройства создают путем объединения микросхем и приборов, выполненных на различных материалах и по различным технологиям. Это приводит к удорожанию процессов корпусирования и сборки. Каждый из применяемых сейчас полупроводниковых соединений имеет свои достоинства, но все они по достижимой плотности интеграции на несколько порядков уступают кремниевой КМОП-технологии. Управлением DARPA открыта программа "Доступной разнотипной гетерогенной интеграции" (Diverse Accessible Heterogeneous Integration, DAHI), задача которой – разработка единой технологии, которая позволит создавать монолитные гетерогенные интегральные

схемы на основе различных полупроводниковых материалов и кремниевых КМОП-схем. Предполагается совместить в одной интегральной схеме все известные типы электронных, фотонных приборов, МЭМС и компонентов других классов. Конечная цель программы – построение комплекса по производству на общей кремниевой подложке МИС на основе разнородных материалов для широкого военного и коммерческого применения [19]. Программа ДАНИ базируется на двух предыдущих программах: "Сложные полупроводники на кремнии" (Compound Semiconductor Materials on Silicon, COSMOS) и "Гетерогенная интеграция фотонной электроники" (Electronic Photonic Heterogeneous Integration, E-PHI).

О растущем интересе к технологии построения СВЧ-приборов на основе сложных полупроводников свидетельствует организация в ряде стран новых полупроводниковых институтов. Так, Министерство обороны США объявило конкурсный проект с финансированием в 200 млн. долл. (из них – 100 млн. предоставляются правительством и 100 млн. – частными организациями) по созданию Института проблем производства интегральной фотоники (The Integrated Photonics Manufacturing Institute). Задача института – разработка технологии объединения электронных и фотонных технологий на основе сложных полупроводников A^3B^5 : GaAs, InP, InGaAs и др. [20].

В Великобритании при Университете Кардифа создается Институт сложных полупроводников (Institute of Compound Semiconductors). На 200-мм кремниевых подложках предполагается изготавливать различные типы приборов: от транзисторов и интегральных схем до полупроводниковых лазеров, фотонных структур и квантовых приборов. Расчетный объем финансирования – 300 млн. фунтов стерлингов. После завершения строительства в 2016 году институт станет пятым полупроводниковым кластером в Европе наряду с уже действующими в Эйнховене, Дрездене, Гренобле и Лёвене [21]. Исследования в новом институте предполагается проводить в тесном партнерстве с компанией IQE. По словам руководителя IQE, британское правительство рассматривает технологию СВЧ-приборов на основе сложных полупроводников как одно из восьми важнейших направлений, способных обеспечить опережающее промышленно-экономическое развитие страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Викулов И., Кичаева Н.** Вакуумная СВЧ-электроника в США: состояние и тенденции развития. – Электроника: НТБ, 2007, № 5, с. 66–71.
2. **Викулов И.** Вакуумная СВЧ-электроника в 2010 году. К миллиметровым и терагерцовым диапазонам. – Электроника: НТБ, 2011, № 2, с. 108–119.
3. International Vacuum Electronics Conference, 2014.
4. **Викулов И., Кичаева Н.** Американская программа по СВЧ вакуумной электронике HiFIVE. – Электроника: НТБ, 2008, № 5, с. 70–74.
5. International Vacuum Electronics Conference, 2013.
6. **Викулов И., Кичаева Н.** Технология GaAs монолитных схем СВЧ в зарубежной военной технике. – Электроника: НТБ, 2007, № 2, с. 56–61.
7. **Викулов И.** Программа WBSG-RF, Фаза II. Итоги и намерения. Электроника: НТБ, 2009, № 8, с. 62–65.
8. **Викулов И.** GaN-микросхемы претендуют на замену ЭВП, Электроника: НТБ, 2014, № 1, с. 168–174.
9. Raytheon's GaN MMIC technology validated for space applications. – www.semiconductor-today.com/news_items/2014/DEC/raytheon_171214.shtm.
10. ЗРК "Тэтриот" получил новую РЛС с активной ФАР, Военный паритет. – www.militaryparitet.com/ttp/data/ic_ttp/7701.
11. **Mikula M. et al.** Manga: Manufacturable GaN SiC substrates and GaN epi wafer supply chain. – Proceedings of the 9th European Microwave Integrated Circuits Conference, 2014, p. 229–232.
12. Saab Showcases Fighter Aircraft Featuring GaN Technology, – www.compoundsemiconductor.net/article.
13. **Joosting J.P.** The rise of GaN on Si to take on high-power and high volume markets. – Microwave Engineering Europe, 2014, Nov./Dec., p. 15.
14. **Stevenson R.** GaN-on-Silicon Gathers Momentum. – www.compoundsemiconductor.net/article.
15. Peregrine expands integrated product portfolio into both ends of frequency spectrum. – www.semiconductor-today.com/news_items/2014/OCT/PEREGRINE_081014.shtml.
16. DARPA's ELASTx program demos 94 GHz fully integrated all-silicon system-on-chip transmitter. – www.semiconductor-today.com/news_items/2014/JUL/DARPA_020714.shtml.
17. DARPA's mobile Hotspots Program Drives E-Band Performance Benchmarks. – Microwave Journal, 2014 Oct. 14, – www.microwavejournal.com/articles/23121.
18. Terahertz Triumph. – www.compoundsemiconductor.net/article/95740-terahertz-triumph.html.
19. **Green D.S. et al.** The DARPA Diverse Accessible Heterogeneous Integration (DAHI) Program: Status and Future Directions. – CS MANTECH Conference, 2014, p. 343–346.
20. US DoD Launches Competition For Integrated Photonics Manufacturing Institute. – www.compoundsemiconductor.net/article/integrated-photonics-manufacturing-institute.html.
21. Hybrid Hope. – www.compoundsemiconductor.net/article/95650-hybrid-hope.html.
22. "Green Light" for UK's first Compound Semiconductor Research Foundation. – www.compoundsemiconductor.net/articles/compound-semiconductor-foundation.html.