

ТЕХНОЛОГИЯ GaAs-МОНОЛИТНЫХ СХЕМ СВЧ В ЗАРУБЕЖНОЙ ВОЕННОЙ ТЕХНИКЕ

В последние 10–15 лет полупроводниковая электроника стала играть ведущую роль в сфере разработки и производства СВЧ-компонентов. И сегодня многие компании перешли от выпуска дискретных диодов и транзисторов к массовому производству GaAs-монолитных интегральных схем (МИС). МИС нашли применение в маломощных усилителях приемников прямого телевидения, мощных усилителях и переключателях сотовой телефонии, модемах кабельных сетей, компьютерных сетях и др. Годовой объем продаж мирового рынка МИС на арсениде галлия для телекоммуникационного оборудования оценивается в 2 млрд. долл. [1]. С другой стороны, достигнутый уровень технологии МИС СВЧ позволил вернуться к созданию активных фазированных решеток (АФАР). Это открыло путь к массовому использованию МИС СВЧ в различных системах вооружения. Рассмотрим обстоятельства, послужившие в свое время толчком к ускоренному развитию за рубежом технологии МИС СВЧ, а также результаты их внедрения в отдельные виды радиоэлектронной военной техники.

ПРОГРАММА MIMIC И ЕЕ РОЛЬ В РАЗВИТИИ ТЕХНОЛОГИИ МИС СВЧ

Уже в начале 80-х годов было ясно, что благодаря высокой подвижности электронов и возможности получения материала с полуизолирующими свойствами арсенид галлия более перспективен для создания СВЧ-устройств, чем кремний. Однако первоначально была сделана попытка реализовать на GaAs не СВЧ МИС, а цифровую микросхему. В 1982 году

И.Викулов, Н.Кичаева

Управление перспективного планирования оборонных научно-исследовательских работ (DARPA) с целью развития микросхем высокоскоростной цифровой обработки на GaAs инициировала программу Advanced On-Board Signal Processing (AOSP). Выбор арсенида галлия обусловлен возможностью изготовления GaAs СБИС на полуизолирующих подложках. Однако выход годных GaAs-схем оказался неудовлетворительным из-за низкого качества материала и недостаточной отработанности арсенидгаллиевой технологии по сравнению с кремниевой. Опыт показал, что необходимую производственную дисциплину следует отрабатывать на технологических линиях с производительностью не менее 100 пластин в неделю. Ряд фирм установили пилотные линии для изготовления как цифровых, так и аналоговых СВЧ-микросхем. Главной задачей программы стало наращивание объема обрабатываемых GaAs-пластин.

Сразу же после завершения программы создания цифровых GaAs-микросхем DARPA открыло программу Microwave and Millimeter Wave Monolithic Integrated Circuits (MIMIC). Объем ее финансирования составил 500–600 млн. долл. Цель программы состояла в создании приборов СВЧ- и миллиметрового диапазонов с требуемыми электрическими, механическими и климатическими характеристиками, цена которых допускала бы их применение в действующих военных системах. В частности, предстояла замена в военной аппаратуре гибридно-интегральных конструкций на монолитные устройства. Такая замена обещала большие преимущества в быстродействии, массогабаритных показателях и других характеристиках радиоэлектронного вооружения. Начатая в 1987 году программа MIMIC продолжалась до 1995-го включительно. Вначале в производственном процессе доля ручного труда была велика. Диаметр GaAs-пластин составлял всего 50 мм. Нерешенным оставался вопрос, какому методу формирования активных слоев — ионной имплантации или эпитаксии — отдать предпочтение. В рамках отдельной технологической задачи был осуществлен переход от эпитаксии в паровой фазе к молекулярно-лучевой эпитаксии и от полевых транзисторов с затвором



Шоттки (MESFET) к транзисторам с высокой подвижностью электронов (HEMT). В ходе программы был введен контроль технологических процессов, опирающийся на статистические методы. Кроме того, были внедрены методы быстрого измерения НЧ- и СВЧ-параметров приборов (на частотах вплоть до 95 ГГц) непосредственно на полупроводниковой пластине, установлена связь между параметрами изготавливаемых приборов и технологических процессов, созданы статистические модели приборов для систем проектирования. В результате появилась возможность проектирования требуемой монолитной схемы с первой попытки.

К концу первой фазы программы (1988 год) удалось добиться снижения стоимости МИС с 20 до 10 долл./мм², а в конце второй фазы (1991 год) – до 1 долл./мм². Сейчас стоимость GaAs МИС, выпускаемых в крупносерийном коммерческом производстве, составляет 0,1 долл./мм².

Результат программы MIMIC – освоение в США производства GaAs СВЧ-микросхем с широко развитой инфраструктурой, обеспечивающей разработку материалов, подложек, масок, оборудования, средств измерения, проектирования схем и др. Этот промышленный потенциал с одной стороны стал основой крупного коммерческого рынка СВЧ МИС, а с другой стимулировал коренную модернизацию радиоэлектроники в системах вооружения. На базе монолитной

СВЧ-технологии были модернизированы системы управления огнем Longbow миллиметрового диапазона для РЛС ударных вертолетов; самоприцеливающиеся боевые элементы SADARM; система связи в диапазоне 40–60 ГГц EHF; оружие высокоточного наведения X-ROD (95 ГГц) и др. Вслед за США выпуск GaAs МИС СВЧ начали осваивать и в Европе. Были образованы такие новые компании, как United Monolithic Semiconductors – UMS (Франция), TNO и OMMIC (Нидерланды), Filtronic и Bookham (Великобритания) и др. Аналогичные производства возникли в Японии и на Тайване.

Наибольшее применение GaAs СВЧ МИС в военной аппаратуре нашли в АФАР, требующих большое число приемопередающих модулей. Важные параметры таких модулей – выходная мощность и КПД, определяющие суммарную излучаемую решеткой мощность и конструктивные возможности отвода тепла. Модуль содержит несколько монолитных схем, в том числе микросхему выходного монолитного усилителя мощности. Импульсная мощность современной типичной GaAs МИС приемопередающего модуля АФАР X-диапазона (10 ГГц) составляет ~10 Вт, средняя – 1–3 Вт [2]. Конструкции АФАР на основе таких модулей ряда зарубежных фирм уже начали внедряться в новейшие системы вооружения.

СИСТЕМЫ ВООРУЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ СВЧ-МИС

Первые крупномасштабные применения монолитных схем, разработанных в рамках программы MIMIC, – системы HARM (противорадиолокационная ракета) и COBRA (противоартиллерийская система РЛС с АФАР С-диапазона) [1]. Приемопередающий модуль АФАР станции COBRA фирмы Electric Electronics Lab. содержал шесть GaAs МИС: предварительный усилитель, два мощных усилителя со сложением мощностей, фазовращатель, усилитель с регулируемым коэффициентом усиления и маломощный усилитель. Программа предусматривала поставку 25 тыс. таких комплектов, удовлетворяющих жестким техническим требованиям военных стандартов. Для гарантии требуемого выхода годных очень важным был предварительный отбор кристаллов с требуемыми параметрами на этапе сборки модулей. Решающую роль здесь сыграла методика измерения МИС на пластине, в частности импульсный метод измерения параметров мощных усилителей, разработанный в ходе выполнения третьей фазы программы MIMIC. Именно массовое производство МИС стимулировало отработку всего цикла операций технологического процесса: от проектирования МИС до их изготовления, тестирования, пайки и сборки модулей.

Сегодня РЛС с АФАР создаются для различных платформ – наземных, корабельных, самолетных, спутниковых. Рассмотрим несколько примеров бортовых и наземных систем, которые активно рекламируются в зарубежных источниках.

БОРТОВЫЕ РЛС С АФАР

Здесь интерес представляет РЛС AN/APG-79 разработки фирмы Raytheon. Разработка станции началась в 2000 году. Боевые возможности станции планировалось оценить в 2006 году, а в 2007-м – начать поставки станции на вооружение [3]. Сейчас она устанавливается на всех истребителях F/A-18E/F Super Hornet ВМС США (рис.1) [3]. В 2005 году фирма Raytheon выиграла пятилетний контракт на поставку фирме Boeing 190 РЛС APG-79 с АФАР [4].

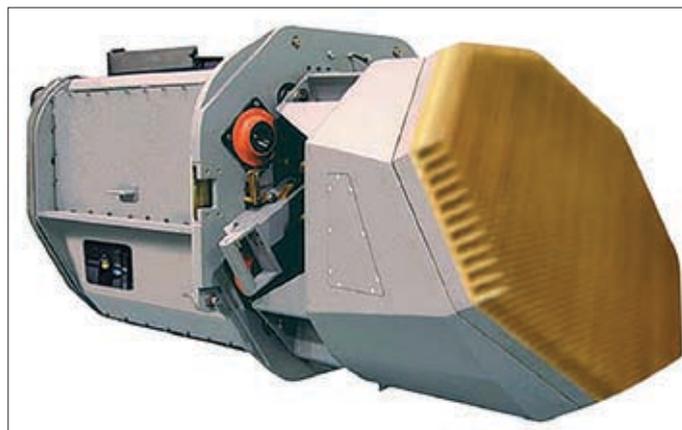


Рис. 1. РЛС AN/APG-79 фирмы Raytheon для самолета F/A-18E/F

У APG-79 ряд серьезных преимуществ перед ранее используемой в самолетах F/A-18E/F станцией APG-73, не имеющей АФАР. Она может сопровождать значительно большее число целей и работать одновременно в нескольких режимах: картографирования местности, сопровождения наземных движущихся целей, поиска в режиме «воздух-воздух» и др. Благодаря АФАР надежность APG-79 возросла в четыре раза по сравнению с APG-73. Средняя наработка станции до критического отказа превышает 15 тыс. часов. Станция компактная и легкая, ее масса – 43 кг. Эксплуатационная стоимость в расчете на час полета в два раза ниже, чем у APG-73.

Приемопередающие модули для РЛС фирма Raytheon производит в отделении высокочастотных компонентов Raytheon RF Components. Производственная площадь отделения с чистыми комнатами класса 100 составляет ~2300 м², экспериментального производства GaAs МИС – ~840 м². Фирма владеет всеми технологическими процессами, необходимыми для создания современных GaAs МИС на MESFET, PHEMT (псевдоморфные транзисторы с высокой подвижностью электронов), E/D PHEMT (псевдоморфные HEMT, работающие в режиме обогащения/обеднения).

Аналогичная РЛС с АФАР типа APG-81 (рис.2) для перспективного истребителя F-35 разрабатывается сейчас компанией Northrop Grumman [5].



Рис. 2. АФАР РЛС APG-81 для истребителя F-35

В последнее время за рубежом уделяется большое внимание беспилотным самолетам-разведчикам. DARPA проводит две большие программы по созданию таких самолетов типа X-45 (фирма Boeing) и X-47 (Northrop Grumman). Объем финансирования каждой ~1 млрд долл. [6]. В проектах предусмотрено применение АФАР на основе GaAs приемопередающих модулей, аналогичных используемым в РЛС APG-79. За разработку антенной технологии для этих программ отвечает фирма Raytheon.

В Европе в 1993 году начата совместная англо-французская программа разработки бортовой многофункциональной РЛС с АФАР на базе твердотельной электроники (Airborne Multirole Solid State Active Array Radar, AMSAR). Цель программы – создание бортовой РЛС с АФАР для самолета Tiphoo. Завершить ее планируется в 2010 году [7]. Общий вид станции показан на рис.3, приемопередающий модуль этой станции – на рис.4. Монолитные схемы и модули на основе



Рис.3. РЛС AMSAR для европейского истребителя Tірhoon

GaAs гетероструктурных биполярных транзисторов (HBT) разрабатывает компания UMS. Специалистами создан монолитный выходной усилитель мощности модуля АФАР (рис.5) со следующими параметрами:

- Выходная мощность 10 Вт
- Коэффициент усиления 18 дБ на 10 ГГц
- КПД >35% на 10 ГГц
- Размер кристалла 4,74×4,36×0,1 мм

Уровень развития арсенидгаллиевой технологии британской фирмы Filtronic позволяет выпускать в год более 100 тыс. надежных и доступных по стоимости приемо-передающих модулей на базе GaAs PHEMT для бортовых АФАР [8].

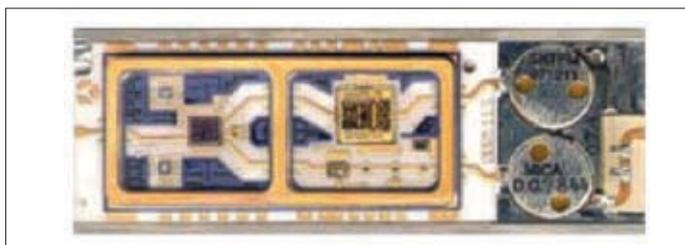


Рис.4. Приемо-передающий модуль РЛС AMSAR

Рассмотренные GaAs-МИС и модули для самолетных РЛС с АФАР лишь часть широкого фронта работ, проводимых за рубежом в этом направлении. Более подробный перечень различных типов бортовых РЛС с электронным сканированием разной степени готовности – от разработки до поставок – приведен в табл. 1 [7].

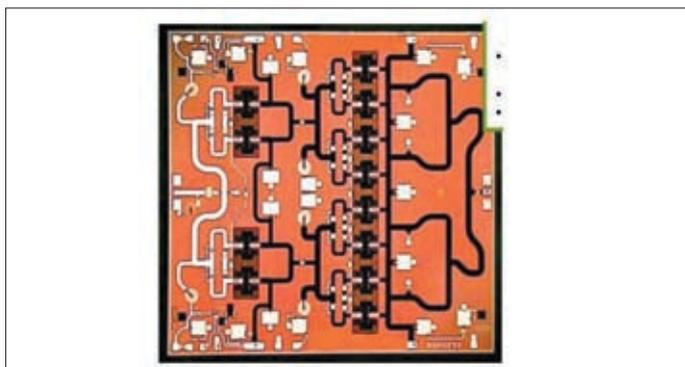


Рис.5. Монолитная схема выходного усилителя мощности модуля АФАР РЛС AMSAR

Таблица 1. Бортовые РЛС с АФАР

Тип РЛС	Фирма	Носитель
AN/APG-81	Northrop Grumman	F-35, истребитель
AN/APG-77	Northrop Grumman/Raytheon	F/A-22, истребитель
AN/APG-79	Raytheon	F/A-18E/F, истребитель
AN/APG-63(V)2 AN/APG-63(V)3	Raytheon	F-15C, истребитель
AN/APG-80	Raytheon	F-16E/F, истребитель
AN/APQ-181	Raytheon	B-2, бомбардировщик
AMSAR	BAE Systems Thales EADS	Tірhoon, истребитель Rafale, истребитель
Seaspray 7000E	BAE Systems	Вертолет
Не указан	Mitsubishi Electric	F-2, истребитель
AEW&C NORA	Ericsson	JAS-39, истребитель

НАЗЕМНЫЕ РЛС С АФАР

В 1992 году фирма Lockheed Martin Missiles and Space получила от МО США контракт на разработку мобильного комплекса противоракетной обороны THAAD (Theatre High Altitude Area Defense) [3, 9]. Комплекс THAAD (рис.6) предназначен для поражения баллистических ракет как в верхних слоях атмосферы, так и за ее пределами. Субподрядчиком по разработке наземной РЛС с АФАР и входящих в нее твердотель-



Рис.6. РЛС мобильного комплекса противоракетной обороны THAAD

ных приемо-передающих модулей стала компания Raytheon. Многофункциональная РЛС комплекса THAAD решает задачи обзора, обнаружения, сопровождения и распознавания баллистических целей, наведения на них противоракетных средств поражения и оценки результата. Характеристики комплекса THAAD:

Диапазон рабочих частот	X (10 ГГц)
Апертура АФАР	9,2 м ²
Число приемопередающих модулей АФАР	25344
Дальность обнаружения цели	до 1000 км
Дальность поражения	до 250 км
Высота поражения	до 150 км

На 2004–2007 годы запланированы две серии летно-конструкторских испытаний комплекса, на 2007–2008 годы – принятие его на вооружение, а на 2009–2010-е – войсковые испытания. Министерство обороны США намерено приобрести 18 наземных РЛС, входящих в состав комплекса.

ПЕРСПЕКТИВЫ

Пример внедрения GaAs МИС в военную радиоаппаратуру подтверждает известное правило: время от разработки новой технологии до реализации ее в системах вооружения составляет не менее 10–15 лет. И в ближайшие два-три года на вооружение развитых западных стран должны поступить бортовые и наземные системы с опережающими тактико-техническими характеристиками, обеспеченными GaAs СВЧ-МИС, разработанными в 90-е годы.

Это обстоятельство может иметь и важное экономическое значение. В печати уже появилась информация о переговорах по поводу возможной продажи Индии американских самолетов F/A-18 E/F с радиолокационной станцией APG-79, оснащенной АФАР [10]. Конечно, внедрение технологии АФАР в конкретные системы зависит от соотношения технических характеристик, стоимости, массы, габаритов, потребляемой мощности и т.п. [11]. Однако уже сегодня фирма Raytheon заявляет о том, что она уже владеет технологией недорогих ракетных АФАР, а фирма Thales демонстрирует полностью монолитную АФАР диапазона 95 ГГц для головок самонаведения [12].

Приход в радиолокацию технологии монолитных схем в принципе позволяет разработчикам радиоаппаратуры полностью исключить ламповые СВЧ-передатчики со всеми сопутствующими им проблемами. Очевидно, в дальнейшем эта тенденция будет усиливаться, поскольку технология СВЧ-МИС продолжает быстро развиваться. Недавно американская компания M/A-COM сообщила об освоении серийного выпуска GaAs монолитного усилителя 10-ГГц диапазона с КПД 30%, полосой 30% и выходной мощностью 20 Вт, что вдвое превышает достигнутый ранее уровень выходной мощности [13].

В 2004 году DARPA объявило о начале новой программы – Wide Band-Gap Semiconductor Technology Initiative (WBGSTI). Цель программы – создание СВЧ-приборов и МИС на основе широкозонных полупроводниковых соединений (GaN, SiC и AlN) [14]. Первая фаза программы (2005 год) завершилась разработкой технологии получения стабильных SiC-подложек диаметром 75 мм и эпитаксиального выращивания структур AlGaIn/GaN HEMT. Задача второй фазы (2005–2007 годы) – реализация надежных GaN-транзисторов СВЧ- и миллиметрового диапазонов с высокими параметрами и выходом годных. Третья фаза (2008–2009 годы) должна доказать возможность изготовления недорогих надежных GaN МИС и их применения в различных типах модулей. Для конкретной отработки намечены три типа модулей – приемопередатчик X-диапазона для РЛС, широкополосный усилитель мощности для систем электронного противодействия и усилитель мощности миллиметрового диапазона для систем космической связи.



Таблица 2. Целевые параметры GaN-модулей, разрабатываемых в рамках программы WBGSTI

Тип модуля	Рабочая частота, ГГц	Выходная мощность, Вт	КПД, %	Коэффициент усиления, дБ	Основная фирма-разработчик
Приемопередатчик для РЛС	8–12	60	35	18–20	Raytheon
Широкополосный усилитель для РЭБ	2–20	100	20	30	Northrop Grumman
Усилитель мощности для систем связи Q-диапазона	>40	20	30	13	TriQuint

Параметры этих модулей (табл.2) по уровню мощности, КПД и диапазону частот намного превосходят результаты, полученные для GaAs МИС в рамках программы MIMIC и последующих работ. По заявлению руководителей программы WBGSTI, ее реализация позволит значительно улучшить характеристики военных систем, в том числе РЛС, высокоточного оружия, систем электронного противодействия и связи. Планируется также широко применять эти приборы и МИС в устройствах гражданского назначения.

Как уже отмечалось, период между разработкой новой технологии и внедрением ее в системы всегда довольно длителен. DARPA поставило задачу сократить его в ходе реализации программы WBGSTI. С этой целью DARPA обязало участников уже на третьей фазе программы подготовить бизнес-планы ускоренного внедрения своих изделий в конкретные системы [15]. Таким образом, по-видимому, GaN-приборы и МИС, созданные в рамках программы WBGSTI, найдут применение в системах вооружения быстрее, чем GaAs-устройства в рамках программы MIMIC.

Не остается в стороне и Европа. В 2005 году началась разработка крупномасштабного многонационального европейского проекта KORRIGAN. Цель его – создание в Европе современ-

ного производства GaN HEMT и микросхем на их основе [16]. В проекте участвуют семь стран: Франция, Италия, Голландия, Германия, Испания, Швеция и Великобритания. Руководит проектом французская фирма Thales Airborne Systems. Общая стоимость его оценивается в 40 млн. евро. К 2009 году планируется создать единую европейскую систему поставок, которая обеспечит военную промышленность надежными, отвечающими современному уровню развития GaN-приборами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Microwave Journal, 2006, v.49, N6, p.22.
2. 2005 IEEE MTT-S Digest.
3. www.raytheon.com
4. Compound Semiconductor, July 2005.
5. www.northropgrumman.com
6. Compound Semiconductor, March 2005.
7. en.wikipedia.org
8. Proceedings of the 35th European Microwave Conference, 2005, p.809–812.
9. Воздушно-космическая оборона, 2005, N2 (21).
10. Aviation Week and Space Technology, 2005, N 8.
11. Military Microwaves Supplement, June 2006.
12. Microwave Journal, 2005, v.49, № 1, p.24.
13. Electronics EEPRESS, March 2006.
14. GaAs Mantech Digest, 2004; 2005.
15. Compound Semiconductor, May 2005.
16. 13th GaAs Symposium, Paris, 2005, p.361–363.