

МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СВЧ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА АФАР

И.Викулов, к.т.н. i_k_vikulov@mail.ru

Одна из основных тенденций современной радиолокации – стремительный рост применения активных фазированных антенных решеток (АФАР). Ожидается, что в ближайшие годы АФАР будут доминировать во всех РЛС наземных, морских, авиационных и космических систем. Появление АФАР стало возможным благодаря развитию технологии монолитных интегральных схем (МИС) СВЧ-диапазона – базовых электронных компонентов приемопередающих модулей (ППМ) активных антенн. Сегодня наиболее освоена технология построения модулей АФАР на основе GaAs-микросхем. Вместе с тем, в последнее десятилетие в США и некоторых других странах выполнены крупные научно-исследовательские проекты по изготовлению МИС с высокими параметрами на основе нитрида галлия (GaN), и сейчас начинается строительство и установка в радиолокационные системы первых АФАР с ППМ на GaN-микросхемах. Вместе с тем не прекращаются разработки новых типов GaAs-микросхем для перспективных АФАР. Рассмотрим состояние технологий и направления разработок новых МИС, а также примеры РЛС с GaAs и GaN АФАР, вошедших в состав новейших радиоэлектронных систем управления вооружением.

По оценкам экспертов, стоимость входящих в ППМ МИС составляет 60–80% от стоимости всего модуля. Согласно прогнозам, потребность АФАР в ППМ, а следовательно, и в МИС, будет быстро нарастать. Ожидается, что объем продаж ППМ для авиационно-бортовых АФАР вырастет к 2014 году в три раза. И это без учета таких новых проектируемых систем, как авиационная система дозора LEMV, прототип которой будет содержать до сотни тысяч модулей, а окончательная система – до 7 млн. [1]. Сегодня многочисленные ППМ для АФАР, которые уже вошли в состав радиолокационных комплексов различного назначения, значительно расширив их функциональные возможности, выполнены в основном на GaAs МИС.

GaAs-ТЕХНОЛОГИЯ

Технология GaAs МИС формировалась в 1980–1990-е годы, когда различные компании стремились

организовать собственное GaAs-производство [2]. Однако сейчас многие из них для изготовления МИС частично или полностью пользуются услугами специализированных контрактных производств – так называемых foundries. Ведущие контрактные производители на мировом рынке GaAs-микросхем – компании TriQuint Semiconductor (37% рынка) и WIN Semiconductor (36%). На долю Advanced Wireless Semiconductor (AWSC) приходится 12% рынка, Global Communication Semiconductor (GCS) – 6%. Продукция этих компаний предназначена в основном для массового рынка МИС для различных устройств и систем мобильной связи. Наиболее крупные европейские компании – United Monolithic Semiconductor (UMS) и OMMIC – специализируются главным образом на мелкосерийном выпуске схем аэрокосмического и военного назначения, но вместе с тем стремятся расширить свое присутствие на глобальном рынке GaAs МИС. Так, компания UMS

открыла дизайн-центр в Бостоне и офис по продажам в Шанхае.

Наиболее крупные компании-foundries обрабатывают GaAs-пластины диаметром 150 мм и выполняют заказ в течение шести-восьми недель. Компания WIN гарантирует исполнение заказа в срок от 23 до 48 календарных дней. Некоторые компании с небольшим объемом выпуска сохраняют производственные линии по обработке пластин диаметром 100 мм. Типичная производительность foundries – от нескольких сотен до нескольких тысяч пластин в месяц. Многие контрактные производители помимо выпуска МИС оказывают различные услуги в проектировании, моделировании, корпусировании и испытаниях. При этом сами они пользуются услугами других специализированных компаний по программному обеспечению, графическим системам и т.п.

Ряд крупных компаний, таких как Northrop Grumman, Cobham, Raytheon, BAE Systems, которые имеют собственное производство МИС и одновременно участвуют в больших правительственных программах по созданию радиоэлектронных систем вооружений, тоже предлагают специальные услуги. К менее крупным компаниям, имеющим собственные производственные мощности, относятся M/A-COM Technology Solutions, Skyworks, Anadigics, Avago, RFMD и Eudyna/Sumitomo. Как правило, каждая такая компания помимо разработки новых технологических процессов владеет и определенным числом отработанных и сертифицированных процессов, которые она предлагает заказчику (табл.1).

На рынке в основном представлены GaAs МИС для мобильных систем связи [3]. Однако не все компании выдерживают существующую здесь жесткую конкуренцию. Так, одна из успешных британских компаний Filtronic Compound Semiconductors, выпускавшая GaAs МИС СВЧ на 150-мм пластинах и владевшая технологией производства полупроводниковых приборов миллиметрового диапазона, была продана в 2008 году за 12,5 млн. фунтов (стоимость трансфера среднего европейского футболиста).

Рост потребности в ППМ для АФАР открывает новые возможности перед компаниями, разрабатывающими GaAs-микросхемы. МИС для ППМ изготавливаются по заказу или входят в номенклатуру уже готовых к продаже изделий в виде однофункциональных микросхем (усилители, аттенюаторы, фазовращатели, переключатели и др.) и наборов МИС или многофункциональных схем, включающих блоки управления.

Готовая продукция. Французское отделение компании UMS предлагает полный комплект ППМ X-диапазона [4]. В него входят микросхема двухкаскадного малошумящего усилителя (МШУ) СНА1014, многофункциональная управляющая схема-ядро модуля (core chip) СНА3014 и трехкаскадные усилители мощности СНА7115 и СНА7215, совместимые со схемой ядра. Все микросхемы изготавливаются с помощью собственных технологических процессов компании, отвечающих требованиям к производству изделий космического назначения. Микросхема МШУ и схема ядра выполнены на основе РНЕМТ с длиной затвора 0,25 мкм и одним подзатворным углублением. Одна схема усилителя мощности выполнена на основе 0,25-мкм РНЕМТ с двойным подзатворным углублением, обеспечивающим плотность мощности 850 мВт/мм, вторая – на основе GaInP/GaAs НВТ с плотностью мощности 3,5 Вт/мм и высоким КПД.

Рабочий диапазон частот микросхемы МШУ составляет 7–14 ГГц. Она согласована с сопротивлением 50 Ом, что позволяет использовать ее совместно с МИС ядра или в устройствах общего назначения. В состав микросхемы входят два усилительных каскада и схема компенсации технологических разбросов. Усилитель имеет очень плоскую характеристику усиления (17 дБ), коэффициент шума 1,5 дБ и выходную мощность 10 дБм при компрессии усиления 1 дБ.

Управляющая схема СНС3014 площадью 22,7 мм² включает:

- шестиразрядный фазовращатель, диапазон изменения фазы которого составляет 0–360° (шаг – 5,625°), максимальная фазовая ошибка не превышает ±6° при среднеквадратичной ошибке 2° и вариации амплитуды не более ±1 дБ;
- шестиразрядный аттенюатор, обеспечивающий малые вариации фазы при установке затухания (менее 10° в любом состоянии аттенюатора). Диапазон затухания составляет 34,5 дБ при типовой ошибке установки затухания -1,5–1 дБ (среднеквадратичная ошибка 0,3 дБ);
- двухразрядный подстроечный аттенюатор с шагом 2 дБ, который может вносить ошибку ±0,3 дБ и изменять фазу в пределах ±2°;
- два согласованных буферных каскада с усилением 12 дБ в режиме приема и 25 дБ в режиме передачи и с обратными потерями лучше 14 дБ при приеме и 12 дБ при передаче;
- трехканальный переключатель, обеспечивающий коммутацию входа приемника, выхода передатчика и общего канала выхода

Таблица 1. GaAs-технологии ведущих компаний

Тип прибора	TriQuint	WIN	AWSC	GCS	OMMIC	UMS
InGaP HBT	+	+	+	+	+	+
Мощные PHEMT с длиной затвора 0,5 мкм	-	+	+	+	-	+
Мощные PHEMT с длиной затвора 0,25 мкм	+	+	-	+	-	+
Переключающие PHEMT с длиной затвора 0,5 мкм	+	+	+	+	-	+
Переключающие PHEMT с длиной затвора 0,25 мкм	+	-	-	-	-	-
PHEMT с длиной затвора 0,15 мкм	+	+	-	-	+	+
PHEMT с длиной затвора $\leq 0,15$ мкм	+	+	-	-	+	-
Линейные HFET с длиной затвора 0,5 мкм	+	-	-	+	-	-
Линейные HFET с длиной затвора 0,25 мкм	-	-	-	+	-	-
BiHEMT	+	-	+	-	-	-
MHEMT	+	+	-	-	+	-
MESFET	+	-	-	-	-	-
Диоды	+	-	+	+	+	-
Пассивные МИС	+	-	+	+	-	-

приемника/входа передатчика. Во всех трех режимах он согласован с сопротивлением 50 Ом;

- совместимые с TTL-уровнем параллельные интерфейсы.

Фазовращатель и аттенюатор могут использоваться в режимах передачи и приема. Выходная мощность микросхемы составляет 19 дБм в режиме передачи и 16,5 дБм в режиме приема. Допустимые значения входной мощности – 0–16 дБм.

Линейное усиление усилителей мощности равно 28 дБ и полоса пропускания – 30%. Выходная мощность СНА7115 – 8 Вт, СНА7215 – 9 Вт при КПД 40 и 35% и площади 15,2 и 16,55 мм², соответственно.

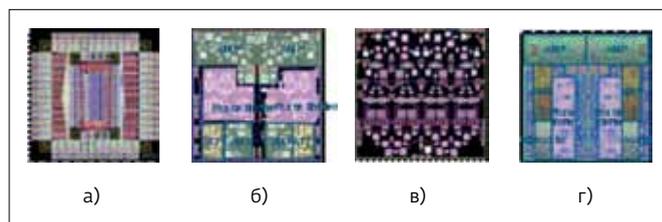


Рис.1. Микросхемы приемопередающего модуля АФАР РЛС S-диапазона: управляющая КМОП-схема (а); МИС на GaAs pHEMT передающего канала (б); мощного усилителя (в); приемного канала (г)

ВППМ входит также согласованная с управляющей схемой мощная выходная цепочка, состоящая из 1-Вт усилителя-драйвера СНА5014 и оконечного усилителя СНА8100. Обе схемы представляют собой мощные двухкаскадные усилители с полосой частот 25 и 15% и линейным усилением 20 и 18 дБ, соответственно. Выходная мощность СНА5014 равна 29 дБм при компрессии усиления 1 дБ и КПД 35%. В схеме предусмотрена компенсация ухода мощности в пределах 0,2 дБ и КПД не более 3% в интервале температур 120°C. Выходная мощность СНА8100 равна 10 Вт при компрессии усиления 3 дБ и 11 Вт в режиме насыщения при КПД 40%. Усилительные схемы устойчивы к воздействию внешних факторов



Рис.2. Недорогой приемопередающий модуль АФАР S-диапазона в сборке

и допускают снижение коэффициента усиления до 6 дБ при температуре до -40°C и рассогласованиях с нагрузкой 2:1.

Широкое применение АФАР ограничивает высокая стоимость СВЧ-компонентов – полупроводниковых, пассивных и, конечно, модулей. Для построения достаточно дешевых модулей АФАР РЛС коммерческого и гражданского назначения компания M/A-COM Technology Solutions использует следующие технологические решения [5]:

- недорогой процесс изготовления GaAs рНЕМТ, предназначенный для массового производства МИС и предусматривающий формирование Т-образного 0,5-мкм затвора GaAs рНЕМТ методом фотолитографии;
- сборка МИС в стандартные пластиковые корпуса;
- поверхностный монтаж МИС на стандартные печатные платы.

Предлагаемый процесс оптимизирован и обеспечивает хорошие характеристики приборов различного функционального назначения – маломощных и мощных усилителей, аттенюаторов, фазовращателей, переключателей. Он позволяет изготавливать на пластине толщиной 50 мкм все необходимые пассивные компоненты, в том числе конденсаторы емкостью 400 и 800 пФ/мм², индуктивности с малыми потерями, резисторы с сопротивлением 20 и 50 Ом/□. Схема защищена пленкой бензоциклобутена (BCB). Пока с помощью процесса реализованы только МИС на частоты 1-4 ГГц (рис.1, 2). При переходе на более высокие частоты X- и Ku-диапазонов потребуются 0,25-мкм GaAs НЕМТ и более сложная технология.

Снизить стоимость модуля можно и за счет сокращения в нем числа микросхем, т.е. путем увеличения их функциональности. Многофункциональную GaAs МИС-ядро XZ1002-BD предлагает тайваньская компания M/A-COM Tech Asia (рис.3) [6]. Микросхема содержит переключатели режимов приема/передачи, МШУ, шестиразрядный фазовращатель, пятиразрядный аттенюатор (АТТ), усилители ПЧ (У1 и У2) и усилитель средней мощности (УМ). В микросхему также входит КМОП-блок управляющей логики и схемы управления смещением затворов транзисторов. Благодаря тщательно подобранному балансу параметров фазовращателя и аттенюатора можно оптимизировать характеристики модуля, не прибегая к дополнительной цифровой обработке.

МИС предназначена для работы в диапазоне частот 8,5-11 ГГц. В режиме приема ее коэффициент шума составляет 5,2 дБ, коэффициент

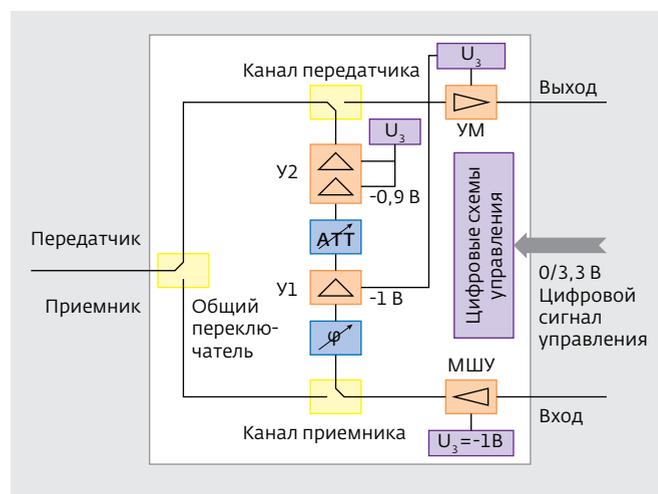


Рис.3. Блок-схема многофункциональной управляющей МИС приемопередающего модуля диапазона 8,5-11 ГГц

усиления – 21 дБ и мощность в точке пересечения с третьей гармоникой – 28 дБм. В передающем режиме коэффициент усиления схемы – 22 дБ, а мощность насыщения – 23 дБм. В режиме



Рис.4. Приемопередающий модуль АФАР Х-диапазона

приема ослабление, вносимое аттенюатором, может достигать 28,5 дБ при 32 возможных состояниях. На частоте 10 ГГц среднеквадратичная ошибка установки ослабления равна 0,3 дБ, среднеквадратичная фазовая ошибка – 1,5°, при этом диапазон изменения фазы фазовращателя достигает 360° при 64 состояниях.

Микросхема XZ1002-BD объединяет до 10 функций и позволяет реализовать ППМ всего на трех кристаллах, добавив к XZ1002-BD микросхемы 10-Вт усилителя мощности XR1006-BD и МШУ XL5017-BD, выпускаемых той же компанией. Это позволяет упростить конструкцию модуля, уменьшить число компонентов, сократить размеры несущей платы, повысить надежность, облегчить контроль параметров и снизить стоимость модуля. Возможна также поставка циркуляторов и ограничителей, производимых головной компанией M/A-COM Technology Solutions. Чтобы облегчить и ускорить разработку модуля, микросхема XZ1002-BD может поставляться со специальной управляющей платой, работа которой задается ПК. Компания M/A-COM Tech Asia проводит 100%-ный контроль микросхем XZ1002-BD на пластине по СВЧ и постоянному току, тестирование по мощности, а также 100%-ный визуальный осмотр в соответствии с военным стандартом MIL-STD-883, метод 2010. Микросхема предназначена для АФАР военных и метеорЛС, а также систем связи.

Ряд компаний не ограничиваются выпуском отдельных схем или комплектов МИС для ППМ АФАР, а готовы поставлять их полностью. Так, европейское отделение компании Cobham Sensor Systems предлагает демонстрационный образец ППМ Х-диапазона размером 60,8×13×5,7 мм (рис.4) со следующими параметрами [7]:

Диапазон частот, ГГц 9–11
 Выходная импульсная мощность, Вт 8,5
 Рабочая температура базовой платы, °С .. -40...50
 Мощность на входе передающего канала, дБм 6
 Диапазон изменения фазы, градусы (7 бит) 0–360, разрешение 6°
 Интервал изменения затухания, дБ (7 бит) 24, разрешение 0,4 дБ
 Коэффициент шума, дБ <4

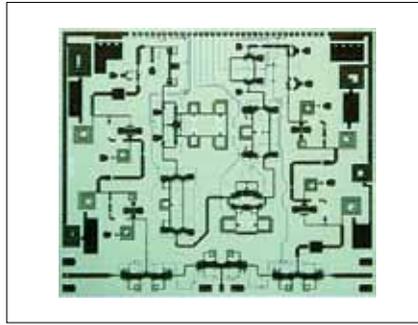


Рис.5. Многофункциональная МИС управления фазой и амплитудой модуля диапазона 2–18 ГГц

Длительность импульса макс., мкс 80
 Коэффициент заполнения импульса макс., % .. 30

Модуль поставляется с блоком питания и управления режимами работы и соединен с ним тремя шинами. В комплект поставки модуля входят программное обеспечение для управления графическим интерфейсом пользователя, с помощью которого можно легко управлять режимами приема/передачи и устанавливать нужные амплитудно-фазовые соотношения.

Тестирование модуля возможно в режимах приема, передачи непрерывного сигнала и комбинированного приема/передачи в реальном времени. Последний режим требует непосредственного управления логическим блоком ядра модуля и напряжением входящих в его состав МИС. Таким образом, с помощью программных средств модуль может быть настроен в соответствии с требованиями конкретного заказчика. Модуль поставляется в корпусе и тем самым защищен от воздействия окружающей среды.

РАЗРАБОТКИ. Несмотря на то, что GaAs-технология уже достаточно хорошо развита, работы по дальнейшему расширению ее возможностей продолжают. Для удовлетворения все новых требований к средствам вооружения необходимо, чтобы радиоэлектронные системы с АФАР выполняли одновременно функции РЛС, РЭБ и связи. Это означает, что используемые в них МИС должны функционировать в многооктавных диапазонах частот. Работы в этом направлении проводятся в рамках совместной научно-исследовательской программы M-AESA Италии и Швеции в соответствии с двухсторонним соглашением министерств обороны этих стран.

Итальянской компанией SELEX Sistemi Integrati разработан комплект МИС для модулей АФАР, включающий ядро модуля диапазона 2–18 ГГц размером 4,6×5,4 мм (рис.5) и микросхемы двух усилителей мощности: непрерывного режима в диапазоне 4,5–18 ГГц и импульсного режима в диапазоне 5–12 ГГц [8]. Усилители мощности выполнены на

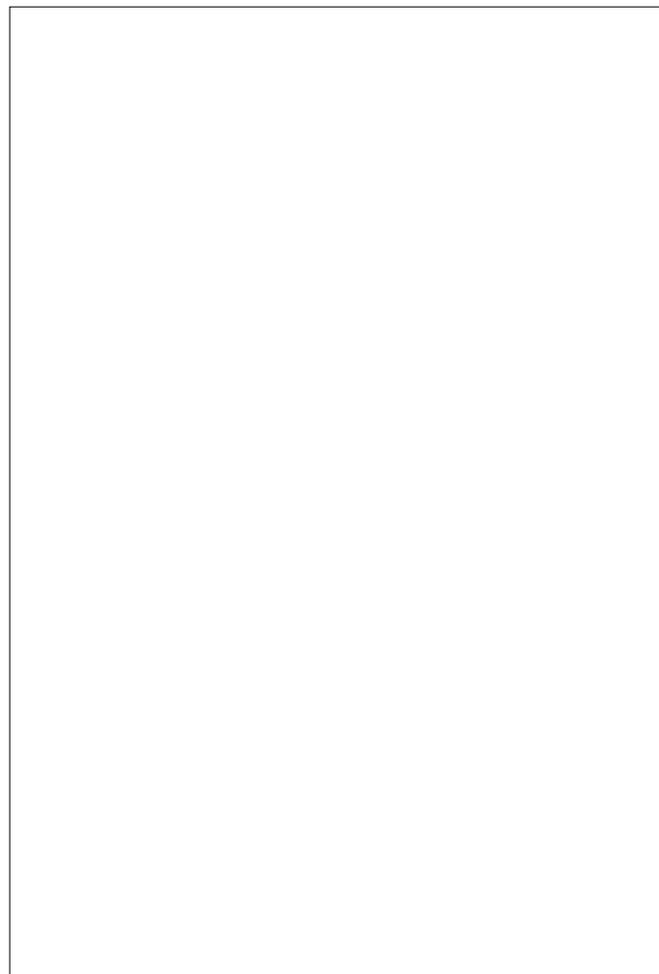
основе рНЕМТ с длиной затвора 0,25 мкм, формируемых электронно-лучевой литографией. Удельная проводимость транзистора превышает 350 мСм/мм, максимальная частота – ~60 ГГц, напряжение пробоя затвор-сток – более 17 В и плотность мощности – 630 мВт/мм при напряжении сток-исток 7 В. Широкополосная схема ядра выполнена на основе 0,4-мкм рНЕМТ, обеспечивающего внешнюю проводимость более 290 мСм/мм, максимальную частоту 40 ГГц, сопротивление при переключении 1,8 Ом·мм во включенном состоянии и емкость при выключении 0,23 пФ/мм. В отличие от обычной микросхемы ядра, содержащей фазовращатель, в схеме компании SELEX применена линия задержки сигнала. Это позволяет избежать искажения диаграммы направленности антенны при сканировании и облегчает управление ею в широкой полосе частот.

В многофункциональную управляющую схему ядра входят: пятиразрядные линии задержки и пятиразрядные цифровые аттенюаторы, широкополосные усилители с положительным наклоном характеристики усиления для компенсации потерь, вносимых линией задержки, и широкополосные SPDT-переключатели. Обратные потери переключателей не превышают 16 дБ по входу и выходу и 20 дБ по изолированному плечу, вносимые потери – от 1,3 дБ на частоте 2 ГГц до 1,7 дБ на частоте 18 ГГц. Развязка превышает 40 дБ во всей рабочей полосе частот. Цифровые аттенюаторы построены по стандартной технологии переключателей, минимальный дискрет переключения затухания составляет 0,75 дБ, максимальный – 12 дБ. Управление фазой выполняется за счет переключения пути прохождения сигнала между основным каналом и линией задержки. Минимальный дискрет времени задержки – 4 пс, максимальный – 124 пс. Ошибка по фазовым состояниям не выходит за пределы $\pm 7^\circ$ при максимальном значении 11° на верхнем краю рабочего диапазона. Этот результат отвечает системным требованиям. Нарастающий коэффициент усиления двухкаскадного усилителя с обратной связью, компенсирующий потери линии задержки, составляет 15 дБ на частоте 2 ГГц и 18,5 дБ на частоте 18 ГГц. Мощность усилителя при компрессии 1 дБ превышает 20 дБм, а коэффициент шума – не более 9 дБ.

Монолитные усилители мощности диапазонов 4,5–18 и 5–12 ГГц (рис.6) спроектированы для работы в импульсном и непрерывном режимах в диапазоне двух октав и могут использоваться в аппаратуре как РЛС, так и РЭБ. Оба усилителя работают в классе А при напряжении

сток-исток 7 В (ток покоя 1 и 1,5 А). Выходная мощность первого трехкаскадного усилителя размером 5,2×2,9 мм в импульсном режиме равна 33±1 дБм, КПД – 25–30 %. Его линейный коэффициент усиления, измеренный на пластине, составил 19,4±3,2 дБ. Выходная мощность второго негерметизированного двухкаскадного усилителя размером 5×3,5 мм в импульсном режиме (длительность импульса 50 мкс, коэффициент заполнения 10%) составила 36±1 дБм по уровню 3 дБ, КПД – 25–35%, линейный коэффициент усиления – 20±3 дБ во всем рабочем диапазоне частот.

Одна из задач разработчиков МИС для АФАР – повышение мощности и КПД в заданной полосе частот. Это особенно актуально для бортовых АФАР авиационного и космического назначения. Исследования в этом направлении проводятся рядом британских компаний при поддержке Министерства обороны [9]. Предлагаемое специалистами технической школы университета Кардиффа решение основано на согласовании импедансов на выходе МИС усилителя по множеству гармонических составляющих сигнала, благодаря чему



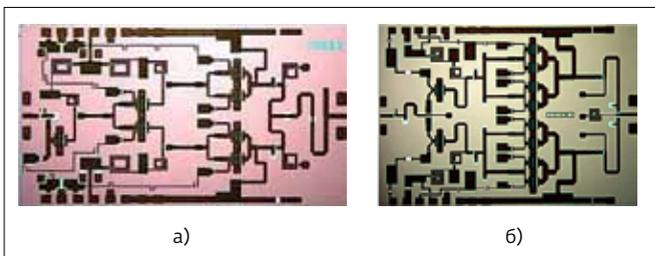


Рис.6. МИС-усилители мощности диапазона 4,5–18 ГГц (а) и 5–12 ГГц (б)

усилитель непрерывно работает в режимах от класса В до класса J. Пока с помощью стандартного технологического процесса создана GaAs pHEMT ячейка усилителя X-диапазона размером 10×75 мкм с плотностью мощности 0,7 Вт/мм. Для МИС получено рекордное значение КПД, равное 65% при мощности 0,5 Вт в полосе рабочих частот 30%.

РЛС с GaAs АФАР. Применение GaAs-микросхем в АФАР радиоэлектронных систем управления вооружением началось по завершении программы разработки МИС DARPA [10]. Ускоренное развитие GaAs АФАР получили для авиационной военной техники, в частности, для РЛС систем истребительной авиации (табл.2) [11].

Наибольшее число поставок приходится на долю РЛС с GaAs АФАР типа APG-79 компании Raytheon. Сегодня выпущено около 300 станций с такими

РЛС, которыми оснащено более десяти эскадрилий ВМС США [12, 13]. Суммарная летная наработка APG-79 превысила 250 тыс. ч. Компания Raytheon говорит о более высокой (в 10–15 раз) надежности этих РЛС по сравнению с РЛС с механическим сканированием, что снижает общую стоимость жизненного цикла станции. Утверждается также, что РЛС позволяет обнаруживать и идентифицировать цели за пределами досягаемости большинства современных ракет.

В последнее время различные страны стремятся обновить свой парк истребительной авиации. При этом наличие на борту самолета РЛС с GaAs АФАР, как правило, является обязательным условием контракта. Так, американские компании Boeing и Lockheed Martin проиграли широко освещавшийся тендер на поставку в Индию 126 средних многоцелевых истребителей MMRCA (Medium Multi-Role Combat Aircraft) для замены устаревших МиГ-21 из-за отказа комиссии экспортного контроля США передать Индии электронные технологии, включая технологии АФАР и ППМ, а также систем РЭБ и связи. Стоимость контракта превышала 10 млрд. долл.

Российский многоцелевой истребитель МиГ-35 поколения "4++" с РЛС "Жук-АЭ" выбыл из конкурса на первом этапе тендера. Одна из причин – недостаточная дальность обнаружения целей РЛС

Таблица 2. Состояние разработок РЛС с GaAs АФАР для истребителей различных стран на конец 2010 года

Тип самолета	Разработчик РЛС	Тип РЛС с АФАР	Состояние
F-15C/D	Raytheon (США)	AN/APG-63(V)3	На вооружении
F-15E	Raytheon (США)	AN/APG-82(V)1	Разработка
F/A-16E/F	Northrop Grumman (США)	AN/APG-80	Производство
F/A-18E/F	Raytheon (США)	AN/APG-79	На вооружении
F-22	Northrop Grumman (США)	AN/APG-77	Малая серия
F-35 JSF		AN/APG-81	Разработка/малая серия
Rafale	Thales (Франция)	RBE2	Разработка
EF-2000 Typhoon	SELEX Galileo, (Великобритания, Германия, Италия, Испания)	Captor-E	Разработка
Gripen NG	SELEX Galileo (Швеция, Италия)	Raven ES-05	Разработка
–	Израиль	EL/M 2052	Разработка
МиГ-35	Фазотрон-НИИР (Россия)	"Жук АЭ"	Разработка
Су-35	НИИП (Россия)	–	Разработка
ПАК ФА (Т-50)		–	Разработка

с АФАР (130 вместо 250 км). Это объясняется неполным числом ППМ в прототипе АФАР (680 вместо 1018). Разработку и поставку GaAs ППМ для РЛС "Жук-АЭ" выполняет компания "НПФ "Микран" (Томск) [14]. Разработку РЛС с АФАР для истребителя пятого поколения Т-50 или ПАК ФА (перспективный авиационный комплекс фронтовой авиации) ведет НИИП им. В.В.Тихомирова (Жуковский). Образец станции демонстрировался на международном авиационно-космическом салоне МАКС-2011 и сейчас проходит летные испытания. GaAs МИС и ППМ для АФАР этой станции разрабатывает НПП "Исток" (Фрязино) [15, 16].

GAN-ТЕХНОЛОГИЯ

Технологию изготовления GaN-транзисторов и МИС СВЧ сегодня освоили многие компании США, Японии и Европы. Некоторые имеют объединенную GaAs- и GaN-технологическую базу. Большинство компаний создают GaN НЕМТ на подложках карбида кремния с затворами длиной 0,25 мкм (для высокочастотных приборов) и 0,5 мкм (для низкочастотных приборов).

Но SiC-подложки, важное достоинство которых – высокая теплопроводность, – дороги. Поэтому ряд компаний (например, Nitronex) для снижения стоимости приборов используют кремниевые подложки. Типовые размеры эпитаксиальных GaN-пластин – 75 и 100 мм [17]. Согласно исследованию компании Strategy Analytics, среднегодовой прирост рынка GaN-микроэлектроники в ближайшие годы составит 29%. Рост спроса на GaN-приборы и МИС стимулирует расширение бизнеса полупроводниковых компаний не только за счет наращивания прямых продаж, но и предоставления различных услуг. Так, компания RFMD готова поставлять на российский рынок GaN-эпитаксиальные структуры, оказывать помощь в проектировании GaN-микросхем и выпускать разработанные заказчиком приборы на своих предприятиях (foundry-сервис) [18]. Правда, все это при условии получения экспортной лицензии.

В России развитие GaN-микроэлектроники началось со значительным опозданием [19]. Пока созданы только экспериментальные образцы МИС усилителей 4-ГГц диапазона. По оценке специалистов

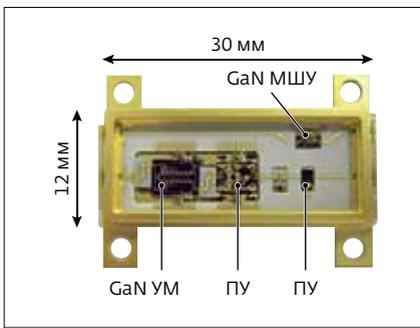


Рис.7. Входной блок ППМ на основе 0,25-мкм AlGaIn/GaN НЕМТ и многослойной высокотемпературной керамики

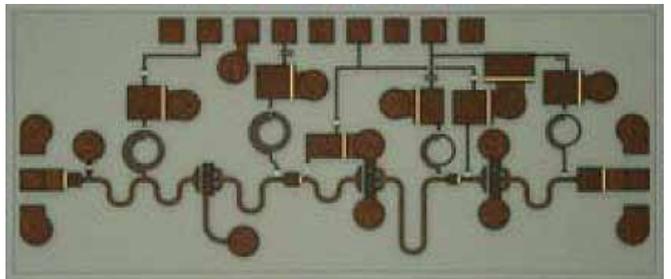


Рис.8. МИС малошумящего широкополосного GaN-усилителя размером 2,7x1,2 мм

ЗАО "Светлана-Рост", отставание от мирового уровня составляет три-четыре года [19].

Сейчас за рубежом серийными GaN-приборами (мощными транзисторами, усилителями и переключателями) в корпусах и в бескорпусном исполнении перекрыт диапазон до 18 ГГц при мощности от единиц до нескольких десятков ватт. Быстро развиваются разработки GaN МИС, предназначенных для формирования ППМ АФАР. Каковы же сегодня направления разработок в этой области и их результаты?

РАЗРАБОТКИ. Компания Fujitsu Laboratories в 2011 году впервые предложила GaN-блок ППМ с выходной мощностью 10 Вт, рассчитанный на диапазон частот 6–18 ГГц. В состав блока входят GaN МИС выходного усилителя мощности (УМ) и GaN МИС МШУ диапазона 4–18 ГГц с коэффициентами шума 2,3–3,7 дБ и усиления 15,9 дБ (рис.7) [20]. Изготовлены микросхемы на полупроводниковых SiC-подложках диаметром 75 мм. МШУ состоит из трех каскадов на основе GaN НЕМТ с длиной и шириной затвора 0,25 и 300 мкм, соответственно (рис.8). Минимальный коэффициент шума составляет 2,3 дБ на частоте 5 ГГц (рис.9). Усилитель и предусилитель (ПУ) смонтированы на многослойной алюмооксидной керамической

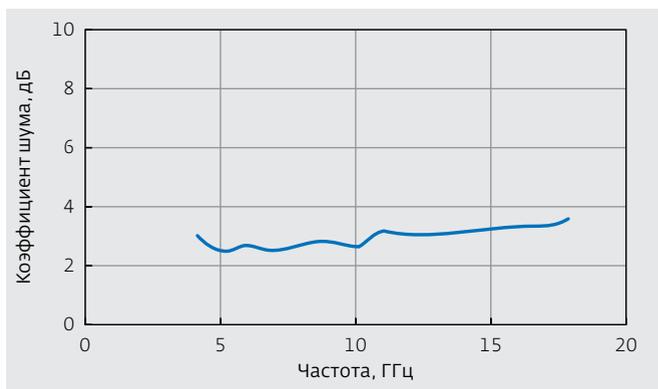


Рис.9. Зависимость коэффициента шума малошумящего GaN НЕМТ усилителя ($V_{си}=15 В$) от частоты

подложке. Схемы GaN-усилителя мощности и GaAs-драйвера для снижения теплового сопротивления смонтированы на встроенной теплоотводящей подложке из сплава CuMo. Передающие линии формируются на высокотемпературной многослойной керамике НТСС.

На международном симпозиуме по СВЧ-технике IMS 2012 компания Fujitsu продемонстрировала микросхему входного СВЧ-блока ППМ, выполненного на основе GaN НЕМТ. Микросхема содержит входной усилитель, переключатель (дуплексер) и выходной усилитель. С помощью специальных конструкторско-технологических решений компании удалось исключить взаимное влияние приемного и передающего каналов. Размер микросхемы – 3,6x3,3 мм, что на 90% меньше, чем у многокристального устройства с такими же параметрами. Выходная мощность на частоте 10 ГГц равна 6,3 Вт.

По утверждению разработчиков компании BAE Systems Electronic Solutions, им удалось реализовать максимальную (декадную) полосу усиления GaN МИС усилителей мощности – от 2 до 20 ГГц [21]. На основе AlGaIn/GaN НЕМТ с длиной затвора 0,2 мкм, формируемых на SiC-подложках диаметром 75 мм, созданы два варианта неоднородно

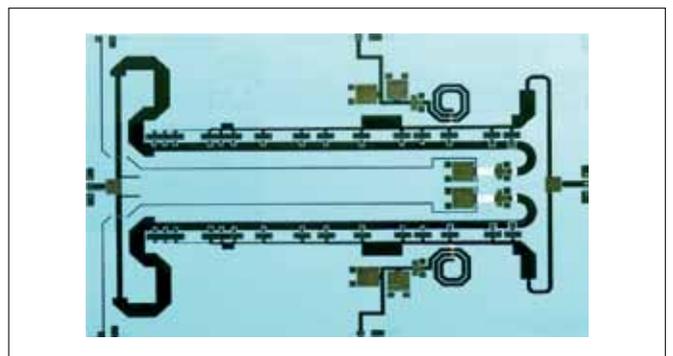


Рис.10. Микросхема неоднородно распределенного GaN-усилителя

распределенных усилителей – на транзисторах с двойным полевым затвором (Dual Field Plate) и транзисторах без него (No FP). Усилители состоят из двух рядов идентичных ячеек (по 15 в каждом) размером 2×100 мкм. Общая периферия равна 6 мм. Размер кристалла – $7,5 \times 5,1 \times 101,6$ мм (рис.10).

Для достижения декадной полосы усиления в цепях стоков транзисторов включены резисторы, полное сопротивление которых плавно изменяется вдоль всей цепочки. Максимальное, среднее и минимальное значения выходной мощности No FP-усилителя в полосе 2-20 ГГц составляют 21,6; 16 и 9,9 Вт, коэффициента усиления – 11,1; 9,7 и 8 дБ, КПД – 35,7; 25,9 и 15,3%, соответственно.

Компания Northrop Grumman Electronic Systems для достижения максимального КПД GaN МИС усилителя X-диапазона выбрала схему усилителя класса E [22]. МИС построена на основе GaN FET с T-образным затвором длиной 0,1 мкм. Транзисторы защищены пассивирующей пленкой нитрида кремния. В эпитаксиальную структуру транзисторов включены два AlGaIn барьерных слоя – верхний с высоким содержанием алюминия

и нижний с малым содержанием алюминия, способствующий ослаблению эффекта укороченного канала. Эпитаксиальная структура формируется методом химического осаждения из паровой фазы металлоорганических соединений (MOCVD). GaN МИС изготовлены на SiC-подложках диаметром 100 мм и толщиной 100 мкм. В подложке формируют сквозные отверстия для заземления и улучшения теплоотвода. Для защиты МИС и нанесения второго слоя металла сверху на ее поверхность осаждается толстый слой ВСВ. Металлизация поверхности ВСВ позволяет уменьшить потери, снизить емкость и увеличить индуктивность микрополосковой линии и тем самым улучшить СВЧ-характеристики МИС.

Типичные значения плотности двумерного электронного газа и подвижности составляют $1,5 \cdot 10^{13}$ см⁻³ и 1400 см²/В·с, соответственно. Сопротивление омических контактов – 0,1-0,15 Ом·мм. Максимальный ток транзистора превышает 1 А/мм, пиковая проводимость – 450 мСм/мм. Типичное рабочее напряжение – 15В при напряжении отсечки 1,5В и пробивном

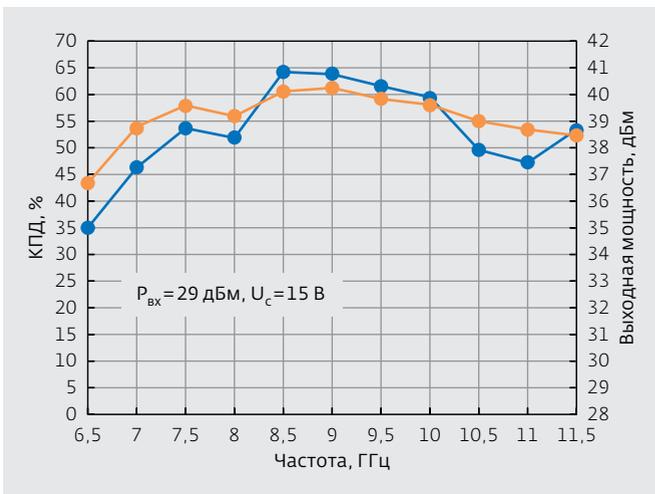


Рис.11. Зависимости мощности и КПД GaN монолитного усилителя класса E

напряжении около 50 В. Предельная частота усиления транзисторов составляет 95 ГГц, максимальная частота генерации – 200 ГГц. Значение плотности мощности при измерении в X-диапазоне, проведенном методом подвижной нагрузки, составило 3–4 Вт/мм при напряжении 15–20 В. Выходная мощность бескорпусной схемы превышала 10 Вт при максимальном КПД 65% (рис.11).

С целью максимального расширения диапазона частот МИС усилителей компания TriQuint Semiconductor взяла конструкцию мощного усилителя с неоднородно распределенными элементами, реализуемого на основе GaN НЕМТ с длиной затвора 0,25 мкм на SiC-подложке диаметром 100 мм и толщиной 100 мкм (рис.12) [23]. Трехслойная металлизация (толщина слоев – 0,7, 2 и 4 мкм) обеспечивает низкие потери соединительных линий и позволяет изготовить конденсаторы емкости

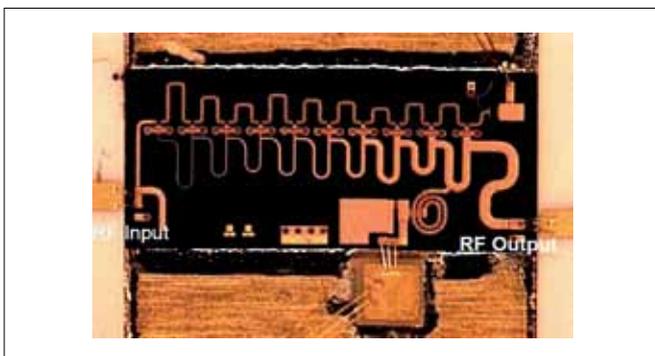


Рис.12. Микросхема мощного GaN-усилителя диапазона 2–18 ГГц с неоднородно распределенными элементами

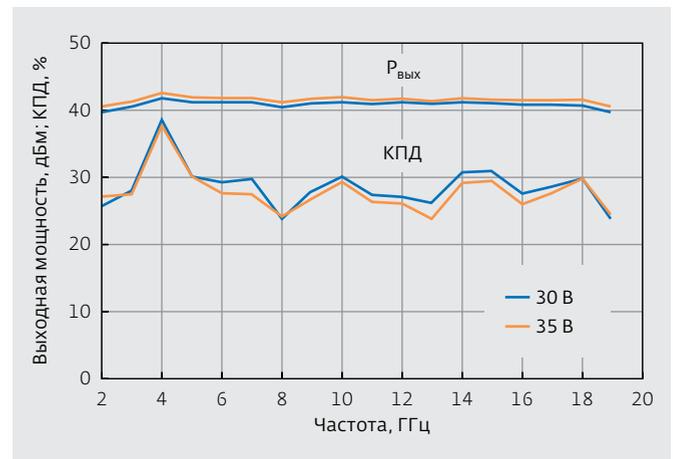


Рис.13. Зависимости выходной мощности и КПД GaN-усилителя мощности диапазона 2–18 ГГц с неоднородно распределенными элементами при значениях напряжения смещения 30 (синие линии) и 35 В (красные линии)

1200, 300 и 240 пФ/мм². Структура МИС в целом представляет собой длинную линию, образованную последовательно соединенными транзисторными ячейками. Значения емкости отдельных ячеек компенсируются индуктивностями отрезков микрополосковых линий, включенных в цепи затворов и стоков транзисторов. Конструкция МИС позволяет удерживать высокие значения мощности и КПД во всем диапазоне 2–18 ГГц (рис.13).

Наряду с усилительными МИС TriQuint разрабатывает и другие компоненты ППМ АФАР. Компания выпускает две серии GaN-микросхем переключателей: TGS2352 на диапазон 0–12 ГГц (рис.14) и TGS2353 на диапазон 0–18 ГГц. Переключатель TGS2352 имеет следующие характеристики:

Развязка, дБ	35
Вносимые потери, дБ	<1
Время переключения, нс	<25
Допустимая мощность, непр., Вт	20
Управляющее напряжение, В	-40...0

На Европейской СВЧ-неделе в Манчестере (European Microwave Week 2011) TriQuint представила вариант ППМ АФАР X-диапазона, содержащего две GaN-микросхемы переключателя TGS2352 [24]. Все остальные элементы (усилители, фазовращатели, аттенюаторы) – GaAs МИС, серийно выпускаемые компанией. Таким образом, СВЧ-блок модуля может быть полностью собран на основе компонентов, производимых компанией. Кроме того, TriQuint продемонстрировала образцы двух основных блоков модуля (управляющего и СВЧ), собранных в керамические корпуса (рис.15).

GaN ППМ и АФАР. В 2011 году две ведущие компании США Raytheon и Northrop Grumman почти одновременно сообщили об успешном завершении испытаний GaN ППМ для АФАР [25, 26]. Обе компании разрабатывают GaN АФАР в рамках программы Air and Missile Defense Radar (AMDR) с целью создания корабельной системы ПВО/ПРО. В систему входят РЛС S- и X-диапазонов. Станция S-диапазона осуществляет расширенный поиск, сопровождение целей, распознавание баллистических ракет и связь. Задачи РЛС X-диапазона – поиск по горизонту, точное сопровождение, связь и подсветка на конечном участке траектории [27]. Система будет установлена на эсминцах класса Arleigh Burke, но благодаря масштабируемой конструкции может быть легко перестроена под корабли других классов и назначения.

Northrop Grumman провела испытания модулей в режиме "нон-стоп" в течение более 180 дней при больших длительностях импульсов, что соответствует реальным условиям работы аппаратуры. Компания считает, что достигнутый уровень технологии ППМ позволит модернизировать ее

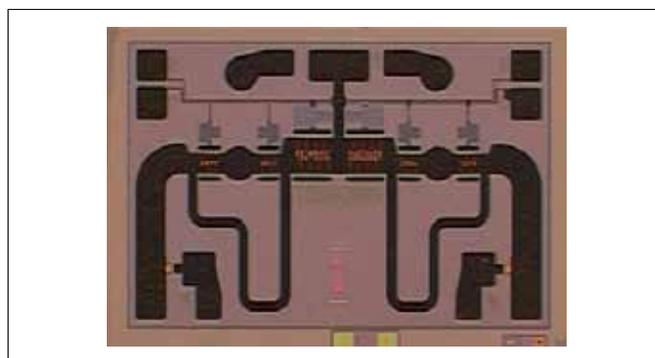


Рис.14. Микросхема GaN-переключателя отражательного типа серии TGS2352 размером 1,15×1,65×0,1 мм

производственную линию АФАР и создать следующее поколение более дешевых активных антенн с более высокими параметрами.

Компания Raytheon успешно провела испытания GaN ППМ S-диапазона. Непрерывная наработка модулей по большому числу каналов превысила 1 тыс. ч без ухудшения параметров. Испытания проводились по нормам ВМС и, как

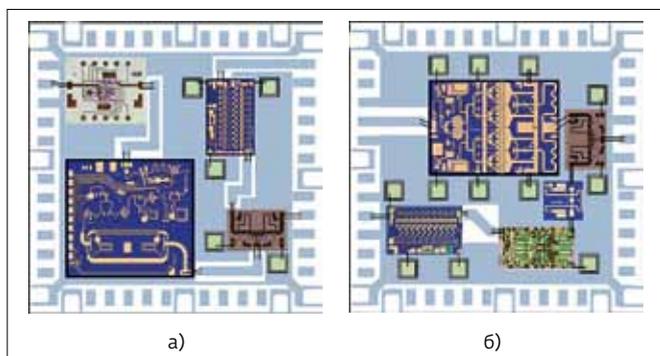


Рис.15. Субблоки приемопередающего модуля АФАР: управляющий (а) и входной СВЧ-блок (б). Размер керамических корпусов 8×8 мм

заявляют представители компании, характеристики превысили заявленные в требованиях значеня. Монтаж GaN МИС в модули компания Raytheon проводит на автоматизированной сборочной линии (рис.16) [28]. В настоящее время продолжают поставки GaN-модулей для комплектования АФАР S-диапазона [29].

На крупнейшей международной выставке оборонных систем и оборудования для всех родов войск DSEi 2011 компания Cassidian (бывшее отделение европейского концерна EADS) представила многофункциональную РЛС обзора и целеуказания TRS-4D с АФАР диапазона 5–6 ГГц (G-диапазон по классификации НАТО). ППМ АФАР впервые реализованы на основе GaN-технологии [30]. Разработка и производство приемопередающих модулей станции TRS-4D выполняются на крупнейшем в Европе заводе микроволновой техники (Microwave Factory) компании Cassidian (Ульм, Германия).

* * *

Долгое время основными источниками энергии излучения радиолокаторов служили мощные электровакуумные приборы СВЧ, а функции передачи и приема сигнала были централизованы [31]. При этом, несмотря на применяемые методы электронного сканирования луча, антенные системы оставались пассивными. Попытки построения активных антенн на основе миниатюрных ЛБВ не увенчались успехом из-за больших габаритов, массы и высоких питающих напряжений электровакуумных приборов. СВЧ GaAs и GaN МИС позволили создать активные антенны (АФАР, или AESA), что значительно расширило возможности современных РЛС и систем радиоэлектронного вооружения. Сегодня влияние этих технологий

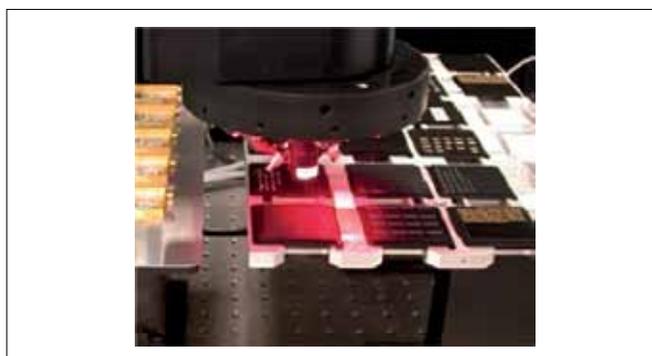


Рис.16. Линия автоматизированной сборки приемопередающих модулей на основе GaN-микросхем

на состояние обороноспособности и экспорта вооружений развитых стран возрастает.

Автор признателен руководителю службы GaAs&Compound Semiconductor Technologies Service компании Strategy Analytics Эрику Хаяму за предоставленную возможность ознакомиться с материалами его доклада.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Masse D.** Report Provides Data on Shipments and Market Values for Airborne AESA. – Microwave Journal, 2011, v.54, №9, p.43.
2. **Hindle P.** 2010 GaAs Foundry Services Outlook. – Microwave Journal, 2010, v.53, №6, p.146.
3. **Masse D.** Compound Semiconductor Market Product Development Efforts Reflect Diversification. – Microwave Journal, 2011, v.54, №, p.59.
4. T/R Module Solution for X-Band Phase-array Radar. – Microwave Journal, 2010, v.53, №10, p.146.
5. **Boles T. et al.** MMIC Based Phased Array T/R Modules. – Proceedings of the International IEEE Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS), 2011.
6. 8.5 to 11 GHz Highly Integrated Core Chip Provides High Degree of Functionality. – Microwave Journal, 2011, v.54, №1, p.118.
7. www.cobham/sensorsystems
8. **Bettidi A. et al.** MMIC Chipset for Wideband Multifunction T/R Module. – 2011 International Microwave Symposium.
9. **Powell J.R. et al.** GaAs X-band High Efficiency Broadband Amplifier MMIC based on the Class B to Class J Continuum. – 2011 International Microwave Symposium.
10. **Виколов И., Кичаева Н.** Технология GaAs монолитных схем СВЧ в зарубежной военной технике. – Электроника: НТБ, 2007, №2, с.56–61.
11. **Anwar A.** AESA Radar Trends: Fast-jets and Beyond. – www.microwavejournal.com/Slides_31_jan_12
12. **Masse D.** Raytheon Delivers 250th APG-79 AESA Radar. – Microwave Journal, 2011, v.54, №4, p.41.

13. **Masse D.** Raytheon Awarded Airborne Radar Contracts. – Microwave Journal, 2012, v.55, №3, p.43.
14. www.oc.ru/partners/micran
15. Интервью с генеральным конструктором НПП "Исток" С.И.Ребровым. – Электроника: НТБ, 2005, №4, с.8-11.
16. **Литовкин В.** АФАР тестирует оборонку и реформу армии. – Независимое военное обозрение, 2011, №8, с.12.
17. **Anwar A., Higham E.** Where are the Emerging RF Market Opportunities for GaN. – Microwave Journal, 2012, v.55, №6, p.24.
18. RF Micro Devices: от высоконадежных СВЧ компонентов до услуг фаундри. Интервью с руководителями компании RFMD. – Электроника: НТБ, 2012, №4, с.14-19.
19. **Красовицкий Д. и др.** Нитридная СВЧ-электроника в России: материалы и технологии. – Электроника: НТБ, 2011, №8, с.114.
20. **Masuda S. et al.** C-Ku Band GaN MMIC T/R Frontend Module Using Multilayer Ceramics Technology. – 2011 International Microwave Symposium.
21. **Komiak J.J. et al.** Decade Bandwidth 2 to 20 GHz GaN HEMT Power Amplifier MMICs in DFP and No FP Technology. – 2011 International Microwave Symposium.
22. **Freitag R. et al.** Wideband 3 and 10 Watt Class E X-Band GaN Power MMICs with Up to 75% Power-Added Efficiency. – 2011 International Microwave Symposium.
23. **Rease E. et al.** Wideband Power Amplifier MMICs Utilizing GaN on SiC. – 2010 International Microwave Symposium.
24. **White D.** GaN & GaAs MMIC and Module Technology Supporting the Needs of Phased Array Radars. – European Microwave Week. Defence and Security Forum, Oct.12, 2011.
25. **Masse D.** Northrop Grumman GaN-based Modules Set New Standard for High Power Operation. – Microwave Journal, 2011, v.54, №5, p.99.
26. Raytheon GaN modules excel during testing. – www.compoundsemiconductor.net, Sep 21, 2011.
27. **Masse D.** Defense News. – Microwave Journal, 2010, v.53, №11, p.39.
28. **Whelan C.S. et al.** GaN Technology for Radars. – 2012 CS Mantech Digest.
29. Company News. – Microwaves & RF, 2011, v.51, №6, p.28.
30. **Anwar A.** Defence & Security Equipment International (DSEI2011) Exhibition Review. – <http://blogs.strategyanalytics.com/ADS/default>
31. **Copp C.** Evolution of AESA Radar Technology. – Military Microwaves, 2012. A special Supplement to Microwave Journal, 2012, v.55, №8, p.6.