

# СВЧ-ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – СТАТУС РАВЕН. НО У КОГО ОН РАВНЕЕ?

Транзисторы — рабочая лошадка как цифровых, так и аналоговых устройств. С момента изобретения в середине XX века эти приборы, в том числе и предназначенные для применения в ВЧ- и СВЧ-аппаратуре, постоянно совершенствуются. И сегодня транзисторы, а также выполненные на их базе микросхемы — основа многих систем военного и гражданского назначения, не говоря о быстро развивающемся рынке оборудования беспроводной связи. За последние 15 лет они прошли путь от относительно простых систем до устройств со сложными схемами модуляции в соответствии с стандартами WiMAX и ZigBee. Для изготовителей полупроводниковых приборов, обслуживающих эти области применения, открылись большие перспективы, а перед их разработчиками по-прежнему стоят задачи совершенствования характеристик при обеспечении массового производства и низкой стоимости. Поэтому неудивительно существование, наряду с распространенной кремниевой, и многих других СВЧ-технологий. Сегодня кремниевые приборы находят применение в основном в системах, рассчитанных на частоты ниже 10 ГГц, тогда как транзисторы на полупроводниковых соединениях все шире используются в системах на частоты выше 10 ГГц. И хотя уже появляются SiGe-устройства миллиметрового диапазона, маловероятно, что они смогут вытеснить приборы на полупроводниковых соединениях в системах, требующих высокого усиления и большой мощности, или в сверхмаломощных устройствах. Вместе с тем, несмотря на то, что новые технологии активно завоевывают сегменты рынка, на которых ранее доминировали кремниевые приборы, они не смогут полностью вытеснить "старые добрые" устройства. Наоборот, разработчики СВЧ-систем и аппаратуры получают широкий выбор транзисторов и монолитных СВЧ-микросхем, позволяющих выполнять требования, предъявляемые к создаваемым системам.



В.Майская

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Переход от одной технологии исполнения СВЧ-транзисторов и монолитных микросхем к другой — задача совсем не простая. Особенно с учетом необходимости обеспечивать экономическую эффективность изделия. Тем не менее, уже существует множество самых разнообразных ВЧ- и СВЧ-приборов, выполненных на базе различных технологий. Чтобы лучше разобраться в достоинствах, недостатках и перспективах развития этих приборов, для начала рассмотрим возможности их применения в средствах беспроводной связи — самом крупном и быстро развивающемся секторе рынка СВЧ-устройств. Границы преобладания конкретной технологии четко не определены, что видно на примере спектра применения различных СВЧ-приборов в средствах беспроводной связи (рис.1). Причем границы областей применения тех или иных приборов постоянно меняются. Так, конкуренция между Si- и SiGe-транзисторами и транзисторами на полупроводниковых соединениях постепенно смещается в область все более высоких частот, тогда как раздел между областями применения GaAs- и InP-приборов сдвигается в область более низких частот. В ряде применений метаморфные транзисторы с высокой подвижностью электронов (MHEMT) начинают вытеснять GaAs псевдоморфные HEMT (pHEMT) и InP HEMT. Очевидно, в будущем области применения различных типов СВЧ-приборов будут определяться не столько предельными и граничными частотами этих приборов, сколько такими параметрами, как коэффициент шума, выходная мощность, КПД и линейность характеристик [2]. В ряде областей применения, таких как трансиверы сотовых систем, модули для терминалов карманных компьютеров, приемники миллиметрового диапазона, возможно сосуществование нескольких типов приборов.

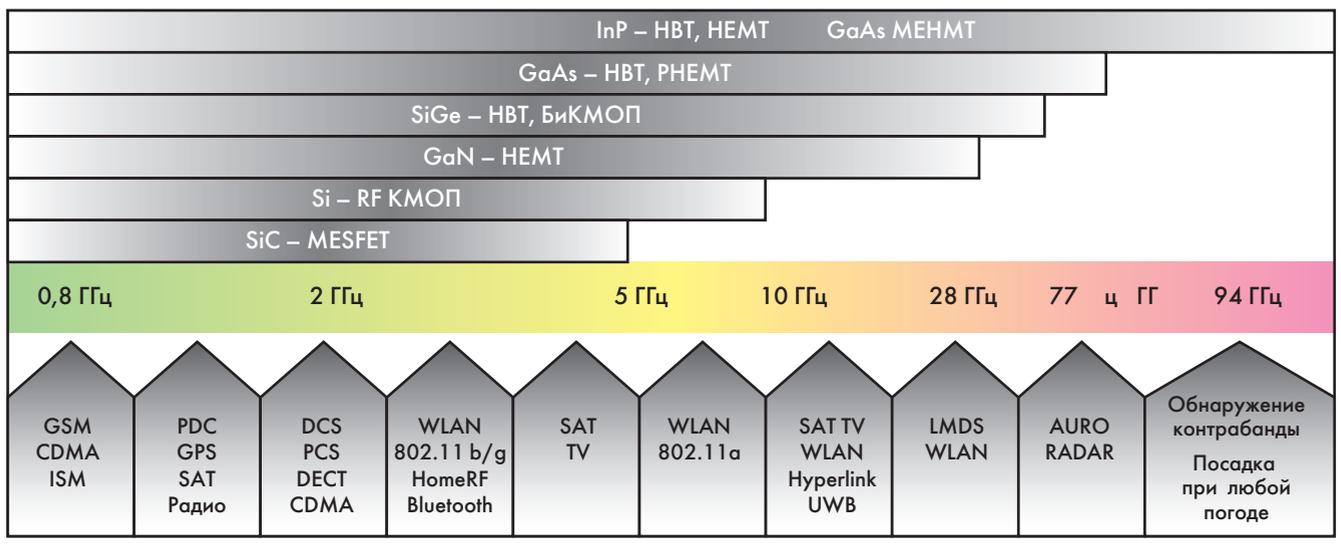


Рис. 1. Спектр применения различных ВЧ- и СВЧ-технологий

На рынке мощных транзисторов ведущее положение в сравнении с GaAs pHEMT и полевыми транзисторами с затвором Шоттки (MESFET) занимают GaAs биполярные гетеротранзисторы (HBT) и МОП-транзисторы, изготавливаемые продольной двойной диффузией (LDMOS-транзисторы). Но в дальнейшем их, вероятно, вытеснят SiC [3] и GaN-приборы. В приемниках миллиметрового диапазона сейчас в основном используются GaAs pHEMT и InP HEMT. В будущем им конкуренцию, по-видимому, составят SiGe HBT, GaAs MHEMT и GaN HEMT. Такова оценка Программы развития полупроводниковой технологии издания 2005 года (International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS) [4].

Насколько справедливы эти оценки? Что происходит на современном рынке ВЧ- и СВЧ-устройств?

## ВЧ- и СВЧ-ПРИБОРЫ

### Приборы малой мощности

Основные типы приборов этого класса, представленных на рынке, – кремниевые LDMOS-транзисторы и КМОП-микросхемы, SiGe HBT и БиКМОП-микросхемы и, наконец, приборы на полупроводниковых соединениях, в первую очередь на GaAs и InP.

Поскольку аналоговые схемы дороги и чувствительны к шумам, разработчики стремятся "продвинуть" цифровые модули как можно ближе к антенне. "Чисто" аналоговые устройства большей частью находят применение во входных ВЧ-блоках систем. Поэтому блоки портативных мобильных средств связи по-прежнему в основном выполняются на SiGe HBT и КМОП-устройствах, а усилители мощности и маломощные усилители – по GaAs-технологии.

Согласно оценкам аналитиков компаний IDC и Strategy Analytics, мировые отгрузки "мобильников" за 2006 год могут перешагнуть планку в 1 млрд шт. [5]. Если учесть, что в каждом сотовом телефоне используются два-три усилителя, то объем продаж усилителей может достичь ~2,5 млрд. шт.

О том, что GaAs-усилители мощности перспективны для применения в сотовых телефонах GSM- и DCS-стандартов, свидетельствует сопоставительный анализ, проведенный разработчиками компании Freescale Semiconductor [6]. Сравнение КПД усилителей сотовых телефонов GSM-стандарта (900 МГц) на базе InGaP HBT, выполненных на GaAs-подложках, GaAs-гетеротранзисторов, Si биполярных транзисторов, SiGe HBT и LDMOS-транзисторов, а также КПД КМОП-усилителей показало, что наибольшее значение КПД имеют GaAs-гетеротранзисторы (рис.2а). Поскольку корректную оценку

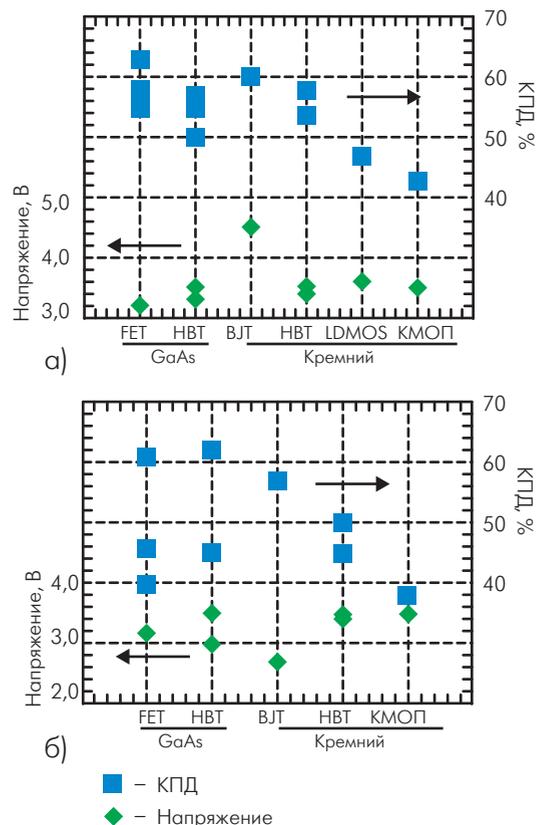


Рис. 2. КПД ВЧ-усилителей мощности, выполненных по различным технологиям и используемых в сотовых телефонах GSM- (а) и DCS-стандартов (б)

можно провести, лишь сравнивая значения КПД, полученные при одном и том же значении напряжения питания, что не всегда возможно, на рисунке приведены и значения напряжения питания. Поэтому, хотя КПД усилителя на Si биполярных транзисторах достигает 59%, следует учесть, что при этом напряжение питания его составляет 4,5 В и что при снижении напряжения питания КПД уменьшится. Выходная мощность рассматривавшихся усилителей была равна или превышала 35,5 дБмВт (за исключением усилителя на Si биполярных транзисторах и КМОП-усилителя, выходная мощность которых была равна 35 и 34,7 дБмВт, соответственно). Примерно такие же результаты получены и для усилителей DCS-стандарта (1800 МГц) (рис.26).

Еще один фактор, который необходимо учитывать при выборе усилителей для сотовых телефонов, – надежность, в том числе способность выдерживать рассогласование нагрузки без ухудшения выходной мощности. Усилители на AlGaAs и SiGe HBT выдерживали КСВН 10:1 при  $V_{cc} = 3,2$  и 5 В, соответственно.

Неудивительно, что высокие темпы роста основного рынка сбыта GaAs-приборов стимулируют совершенствование существующих и выпуск новых изделий. Так, компания Skyworks Solutions в марте 2006 года опубликовала подробности процесса изготовления так называемого биполярного-

полевого транзистора (Bipolar Field Effect Transistor, BiFET), позволяющего объединить на GaAs-подложке InGaP HBT и полевые транзисторы [7]. Добавление полевых транзисторов к InGaP/GaAs HBT позволило реализовать на кристалле с усилителем мощности перспективные средства управления смещением и тем самым исключить внешнюю схему смещения. Новая технология позволяет упростить производство изделий на основе GaAs и снизить его издержки. BiFET-технология используется компанией для изготовления входных ВЧ-модулей сотовых телефонов CDMA- и WCDMA-стандартов и усилителей мощности WLAN-устройств.

Но сторонники КМОП-технологии не спешат уступить этот сектор рынка сотовых телефонов. Так, компанией Axiom разработана микросхема двухдиапазонного усилителя мощности для GSM/GPRS-систем, выполненная по 0,13-мкм КМОП-технологии. КПД усилителя – 55%. Его параметры и надежность отвечают основным требованиям, предъявляемым сотовыми системами.

Компания Silicon Laboratories, специализирующаяся в области разработки кремниевых полупроводниковых приборов, в 2004 году объявила о создании микросхемы двухдиапазонного (GSM/GPRS) усилителя мощности Si4300. Микросхема содержит усилители, фильтр гармоник, полную схему управления питанием и средства согласования импедансов, благо-

### Разработка AlSb/InAs СВЧ-приборов в России

С целью повышения обнаружительной способности РЛС X-диапазона на основе активных фазированных антенных решеток (АФАР) и увеличения срока службы СВЧ-устройств в аппаратах с автономным питанием в ИФП СО РАН проводится НИР по созданию на основе гетероструктур AlSb/InAs монолитной СВЧ-микросхемы маломощного усилителя на частотный диапазон 8–35 ГГц. НИР включает следующие этапы:

- исследование и разработка ИФП СО РАН гетероструктуры AlSb/InAs с высокой, не менее  $10^4$  см<sup>2</sup>/В·с, подвижностью электронов в двумерном электронном газе при концентрации в слое не менее  $5 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>;
- исследование, разработка и изготовление ФГУП "НПП "Пульсар" макетов полевых транзисторов на основе гетероструктур AlSb/InAs на частотный диапазон 8–35 ГГц с потребляемой мощностью не более 5 мВт, КПД не менее 50%, коэффициентом шума не более 2 дБ и коэффициентом усиления не менее 15 дБ на 35 ГГц.

ВЧ-транзисторы и микросхемы со сверхмалым энергопотреблением активно востребованы в системах вооружений с ограниченной емкостью источников питания – РЛС с электронным сканированием, электронных средствах разведки и противодействия, перспективных высокоскоростных средствах связи, размещаемых на мобильных и переносных системах с автономным питанием, например на самолетах и космических спутниках.

Транзисторы (полевые и гетеробиполярные) на основе InAs/AlSb-гетероструктур могут работать при напряжении питания 1 В, что позволяет существенно снизить потребляемую мощность в аналоговых и цифровых СВЧ-микросхемах по сравнению с подобными схемами, изготовленными на основе Si-, GaAs-, InP- или SiGe-транзисторов. Предельная частота  $f_T$  полевых транзисторов на InAs превышает 300 ГГц, а их низкий коэффициент шума (2 дБ на 35 ГГц) делает их привлекательными для конструирования маломощных усилителей приемных модулей АФАР, способных работать на частотах от X- до W-диапазона (от 8–12 до 75–111 ГГц). На этих транзисторах возможно и создание устройств терагерцевого диапазона частот ( $10^{12}$  ГГц).

Разработка технологии изготовления полупроводниковых соединений, содержащих сурьму, и СВЧ-транзисторов на их основе в США ведется в рамках четырехлетней программы МО. Цель программы – демонстрация аналоговых, цифровых или аналогово-цифровых СВЧ-микросхем на частоту ~100 ГГц с малой потребляемой мощностью (<1 фДж). Программа должна завершиться созданием микросхемы, содержащей не менее 5 млн. приборов. Аналогичные разработки активно ведутся в Европе и Японии.

Основная проблема, сдерживающая развитие этих приборов, – отсутствие подходящей полуизолирующей под-



даря чему удалось отказаться от внешних дискретных компонентов (рис.3). Выходная мощность Si4300 в GSM-диапазоне составляет 34,7 дБмВт, в GPRS-диапазоне – 32,3 дБмВт, КПД превышает 50%. Микросхема выполнена по 0,35-мкм КМОП-технологии. Монтируется в компактный керамический корпус размером 3,9х6,4 мм [8].

В следующем году компания сообщила о создании микросхемы Si4300T с расширенными возможностями, два тракта которой поддерживают стандарты GSM, DCS и PCS (стандарт персональной системы связи на 1900 МГц). В дальнейшем планируется выпустить вариант микросхемы четырехдиапазонного (GSM850, GSM900, DCS и PCS) усилителя.

Практически во всех приемниках средств связи можно найти маломощный усилитель (Low Noise Amplifier, LNA), определяющий минимальный уровень шума системы. И здесь преимущество перед кремниевыми устройствами получили приборы на полупроводниковых соединениях. Благодаря проводимым интенсивным разработкам HEMT и HBT на таких соединениях успешно конкурируют с лидировавшими в этом секторе рынка GaAs MESFET. Наилучшие шумовые характеристики на сегодняшний день имеют InP pHEMT.

Тем не менее, совершенствование маломощных GaAs-усилителей успешно продолжается. В начале 2006 года компания Richardson Electronics выпустила семейство усилителей

**Таблица 1. Характеристики семейства маломощных усилителей компании Richardson Electronics**

Модуль	Частота, МГц	Коэффициент шума, дБ	Усиление, дБ	Линейность усиления, дБ	КСВН	$P_{\text{вых.1дБ}}$ , дБмВт
LAS0205A	200–500	0,50	43	$\pm 0,75$	1,18:1	18
LAS0510A	500–1000	0,40	38	$\pm 1,2$	1,22:1	19
LAS1216A	1200–1600	0,50	31	$\pm 1,0$	1,17:1	10
LAS1722A	1700–2200	0,55	30	$\pm 1,0$	1,17:1	19
LAS2026A	2000–2600	0,60	26	$\pm 0,75$	1,25:1	12,5

SuperLNA, выполненных на базе GaAs полевых транзисторов и работающих в диапазоне 500–600 МГц с коэффициентом шума не более 0,6 дБ (табл. 1) [9]. Усилители поставляются в монтируемом на поверхность корпусе размером 12,5х9х2 мм. Предназначены они для применения в коммерческих, промышленных и военных системах.

А в середине 2006 года крупнейшая американская компания закрытого типа Avago Technologies объявила о выпуске сверхмаломощного усилительного модуля сверхмалой толщины на базе GaAs pHEMT [10]. Модуль MGA-635T6 предназначен для применения в беспроводных системах связи стандартов GPS/ISM/WiMAX. На частоте 1,575 ГГц его коэффициент шума составляет 0,86 дБ, усиление – 14,6 дБ, выходная мощность  $P_{\text{вых.1дБ}} = 2,5$  дБмВт и  $P_{\text{вых.1РЗ}} = 3,5$  дБмВт. Напряжения питания от 1 до 3,3 В, при этом ток в рабочем режиме при напряжении 1 В составляет 4,5 мА, а

ложки. Сейчас используются GaAs- или InP-подложки, на которых формируются сложные метаморфные буферные слои, содержащие сурьму. Подробности конструкции и условия роста этих слоев в открытой печати не приводятся.

Для выполнения НИР в ИФП СО РАН используются установки молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) отечественного ("Катунь С") и зарубежного (фирмы Riber, Франция) производства, технические характеристики которых отвечают поставленной задаче. Кроме того, Институт имеет необходимое диагностическое оборудование, способное контролировать характеристики слоев и InAs/AlSb-гетероструктур.

В ИФП разработаны и утверждены ТУ на технологии получения методом МЛЭ структур  $n^+$ -GaAs/n-GaAs/ $n^+$ -GaAs/GaAs для мощных СВЧ MESFET и структур  $n^+$ -GaAs/n-AlGaAs/ $n^+$ -GaAs/GaAs для мощных СВЧ HFET. Сегодня уже ведутся поставки таких структур пяти электронным предприятиям России. Выполняется ОКР по разработке псевдоморфных AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктур для мощных СВЧ pHEMT.

В ходе выполнения НИР должны быть разработаны:

- гетероструктуры InAs/AlSb с двумерным электронным газом для маломощных экономичных СВЧ-транзисторов;

- лабораторная МЛЭ-технология роста гетероструктур InAs/AlSb с подвижностью электронов не менее  $10^4$  см<sup>2</sup>/В·с и концентрацией электронов в канале не менее  $5 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup> при комнатной температуре;
- технология изготовления тестовых транзисторов с малой потребляемой мощностью, высокими КПД и параметрами по шумам и усилению.

Таким образом, в ходе НИР для приемных модулей АФАР впервые будут созданы отечественные маломощные СВЧ-транзисторы с малым потреблением мощности на гетероструктурах InAs/AlSb, соответствующие по параметрам мировому уровню. В России будет разработана оригинальная конструкция InAs/AlSb гетероструктур с двумерным электронным газом, предназначенных для изготовления СВЧ-транзисторов и интегральных схем, и развита МЛЭ-технология роста этих структур.

Как результат НИР появятся предпосылки к существенному повышению обнаружительной способности локаторов на основе АФАР, увеличению сроков автономной работы СВЧ-устройств переносных и летательных аппаратов, снижению их массы и габаритов. Будет обеспечена и возможность сформулировать и обосновать технические требования к прикладным НИР и ОКР, направленным на создание приемных модулей АФАР РЛС, электронных средств разведки и наблюдения, а также перспективных средств связи.

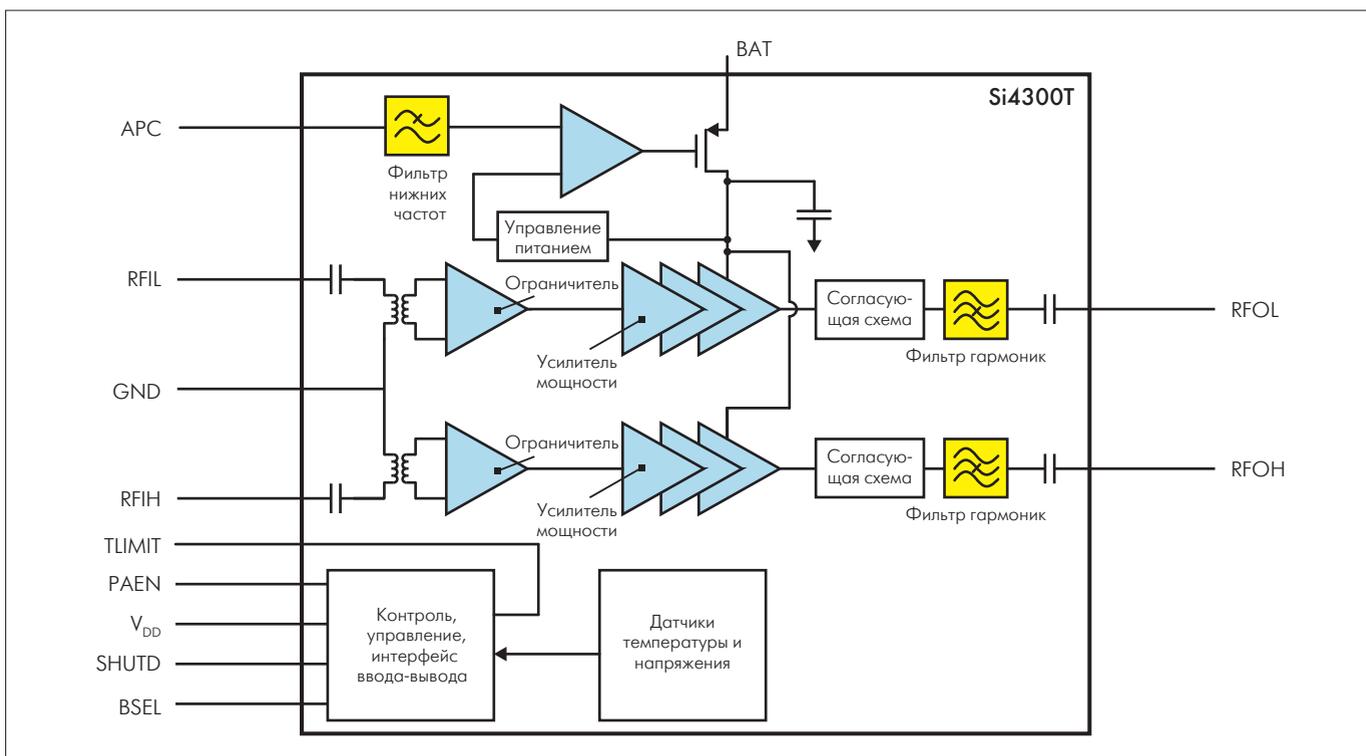


Рис.3. Микросхема усилителя мощности Si4300

ток в нерабочем режиме – 0,1 мкА. Размер модуля 2,0x1,3x0,4 мм. Малая толщина усилителя позволяет устанавливать его в гибридных сборках, в том числе и в LCCC-модулях [11], требующих, как правило, применения компонентов толщиной не более 0,6 мм.

Сверхмаломощные усилители X-диапазона (5,2–10,9 ГГц) – важный компонент развивающихся космических радиолокационных систем с активной фазированной антенной решеткой. Для таких систем многообещающими являются HEMT на основе InAs/AlSb, отличающиеся высокими значениями подвижности электронов и максимальной дрейфовой скорости наряду с высокой концентрацией электронов в области двумерного электронного газа (2DEG). Монолитная СВЧ-микросхема сверхмаломощного малозумящего усилителя X-диапазона с MHEMT, выполненными на полупроводниковом соединении на основе сурьмы (Antimonide Based Compound Semiconductor, ABCS), была представлена на конференции Mantech 2006 специалистами компании Rockwell Scientific и отделения электро- и компьютерной техники Калифорнийского университета в г. Санта-Барбара [12]. Усилитель изготовлен на GaAs-подложке толщиной всего 50 мкм. Коэффициент шума двухкаскадного LNA на InAs/AlSb MHEMT, занимающего площадь кристалла 0,7 мм<sup>2</sup>, составляет 1,25 дБ на частоте 10 ГГц при усилении 22,3 дБ,  $P_{\text{вых.3дБ}} = -3$  дБмВт. Измеренная потребляемая мощность на постоянном токе усилителя при напряжении  $V_{\text{dd}} = 0,35$  В и токе  $I_{\text{d}} = 9,2$  мА составила 3,2 мВт (1,6 мВт на каскад), что в десять раз меньше, чем у обычного InGaAs/AlGaAs/GaAs LNA с аналогичными характеристиками, и в три-четыре раза меньше, чем у InP HEMT.

В применениях, где допустимо снижение усиления, повышение коэффициента шума и работа при напряжении  $V_{\text{dd}} = 0,25$  В, потребляемая мощность может составлять всего 0,98 мВт. Применение такой MMIC в бортовой радиолокационной системе стратосферного или космического базирования благодаря малой потребляемой мощности позволит разместить в аппаратуре несколько сотен тысяч элементов при сохранении разумных габаритов источника питания и, таким образом, обеспечит приемлемые вес и стоимость оборудования.

По аналогичной технологии на фирме Rockwell Scientific был изготовлен однополюсный переключатель на два направления X-диапазона, занимающий площадь кристалла 0,9 мм<sup>2</sup>. Вносимые потери переключателя – 0,99 дБ, коэффициент развязки в выключенном состоянии – более 32 дБ. По мнению разработчиков, полученные данные свидетельствуют о хороших перспективах ABCS HEMT для применения в системах X-диапазона.

### СВЧ-приборы большой мощности

Передатчики и приемники используются как в портативных мобильных, так и в стационарных системах сотовой связи. При этом мощность стационарных станций, обеспечивающих соединение "мобильников" с проводными линиями связи, достигает 600 Вт. Сегодня основные приборы, обеспечивающие высокую мощность в диапазоне 900 и 1900 МГц, – кремниевые LDMOS-транзисторы, на долю которых приходится 90% рынка мощных СВЧ-приборов. Это объясняется самой низкой для транзисторов этого класса плотностью мощности (0,7 Вт/мм), самыми большими размерами кристалла и са-



мой низкой стоимостью. Плотность мощности GaAs HEMT с выходной мощностью более 10 Вт в зависимости от значения  $P_{\text{вых}}$  и рабочей частоты лежит в пределах от 1,8 до 0,4 Вт/мм. Это сопоставимо с результатами, полученными для GaN-транзисторов, выращенных на сапфировых или кремниевых подложках, – 1,5 Вт/мм при выходной мощности 55 Вт, частоте 2,14 ГГц и  $V_{\text{ds}} = 28$  В.

Перспективная область применения LDMOS-транзисторов – системы связи стандарта WiMAX, одного из самых состоятельных стандартов связи, по мнению специалистов компании Philips Semiconductors. Особенность стандарта WiMAX – требование высоких линейности и КПД транзисторов. Выходная мощность WiMAX-системы должна составлять 10–25 Вт при отношении максимальной и средней мощности до 12 дБ. А это значит, что максимальная выходная мощность СВЧ-сигнала может в пять раз превышать значение "средней" мощности и достигать 400 Вт.

К выпуску ВЧ-транзисторов серий BLC/F6Gxx для усилителей мощности и базовых станций сотовых систем, выполненных по 0,4-мкм SiGe LDMOS-технологии шестого поколения, приступила компания Philips Semiconductors [13]. КПД усилителей с архитектурой Doherty превышает 42%, усилителя класса АВ равен 32%. Рабочий диапазон частот типичного транзистора серии BLC6Gxx – BLC6G22-130 составляет 2–2,6 ГГц, максимальная мощность – 165 Вт, средняя выходная мощность – 30 Вт, усиление – 16 дБ, напряжение питания – 28 В. Сверхмалое тепловое сопротивление (0,4 К/Вт) транзистора с четырехслойной AlCu-металлизацией позволяет уменьшить размер усилителя, ослабить требования к средствам теплоотвода и улучшить его надежность. В результате мощность транзистора в корпусе с односторонними выводами в непрерывном режиме может составлять 150 Вт. Среднее время наработки на отказ превышает 3 тыс. лет (при  $T_{\text{пер}} = 150^\circ\text{C}$  и  $P_{\text{cp}} = 26$  Вт).

Не отстает от компании Philips Semiconductors и другой крупный производитель LDMOS-приборов – Freescale Semiconductor, выпустившая в 2005 году первые изделия для WiMAX-систем диапазона 3,5 ГГц, которые начинают широко применяться в европейских странах (табл.2) [14]. Транзисторы серии MRF7S380xxx, работающие при напряжении питания 28 В, изготовлены по LDMOS-технологии седьмого поколения (HV7). Монтируются в корпуса с низким тепловым сопротивлением и со средствами защиты от воздействия электростатического разряда. По утверждению разработчиков Freescale, применение новых LDMOS-транзисторов на диапазон частот 2,5 и 3,5 ГГц позволит снизить стоимость WiMAX-систем базовой станции на 30–80%. И компания не собирается останавливаться на пути повышения рабочей частоты этих транзисторов. Доказательством возможности создания LDMOS-транзисторов на более высокие частоты служит тот факт, что десять лет назад LDMOS-технология была признана замечательным

**Таблица 2. Характеристики LDMOS-транзисторов серии MRF7S380xxx**

Модель	Частотный диапазон, ГГц	Выходная мощность, Вт, макс.	Выходная мощность, Вт, средн.	Напряжение питания $V_{\text{dd}}$ , В	Усиление, дБ	КПД, %
MRF7S38010H	3,4–3,8	10	2	28	14	18
MRF7S38040H	3,4–3,8	40	8	28	13	18
MRF7S38075H	3,4–3,8	75	16	28	13	18

достижением, но только для приборов на частоту до 1 ГГц. Сегодня 3,8-ГГц LDMOS-транзисторы по своим параметрам превосходят 1-ГГц приборы десятилетней давности.

Успехи в совершенствовании LDMOS-технологии не препятствуют дальнейшему развитию GaAs мощных СВЧ-транзисторов. Та же фирма Freescale Semiconductor, выпустившая серьезный LDMOS-конкурент GaAs pHEMT на частоту 3,5 ГГц, тем не менее продолжает разработку арсенид-галлиевых транзисторов этого типа, рассчитанных на частоту 6 ГГц. Выходная мощность транзисторов составит 100 Вт, напряжение питания – 20 В. Разработчики утверждают, что новые GaAs-приборы будут отвечать всем требованиям, предъявляемым к WiMAX-системам. Поставки опытных образцов планируется на третий квартал 2006 года.

А компания Toshiba America Electronic Components (TAEC) на симпозиуме MTT-S, проходившем 13–15 июня этого года, продемонстрировала два GaAs полевых транзистора на гетеропереходе (HFET) Ku-диапазона для спутниковых систем связи – TIM1314-9L и TIM1314-30L. Фирма приводит следующие характеристики транзисторов:

Параметр	TIM1314-9L	TIM1314-30L
Частота, ГГц	13,75–14,5	13,75–14,5
Выходная мощность		
$P_{1\text{дБ}}$ , тип., дБмВт	39,5	45,0
Усиление, дБ	6	5,5
Ток стока, А	3,0	10,0
Интермодуляция третьего порядка, дБн	-25	-25

Транзисторы TIM1314-9L предназначены для модулей преобразования частоты вверх трансверов Ku-диапазона, TIM1314-30L – для твердотельных усилителей мощности наземных базовых станций спутниковых систем связи.

Но наиболее перспективными мощными СВЧ-приборами на сегодняшний день можно считать GaN-транзисторы, характеризующиеся, в сравнении с транзисторами на других полупроводниковых материалах, более высокой плотностью тока насыщения, большим напряжением пробоя и большой плотностью мощности в пересчете на длину затвора. К технологии нитрида галлия обращаются все большее число полупроводниковых компаний. Среди них Eudyna Devices, Group 4, IMEC, Matsushita, RF Micro Devices, Technologies and Devices International (TDI), Toshiba, TriQuint. Всего за период с 2000 по 2005 год число компаний и исследовательских центров, заня-

тых разработкой приборов и изучением нитрида галлия, увеличилось с 500 до 2000. По оценкам компании Strategies Unlimited, продажи GaN-приборов (не только транзисторов, но и светодиодов) в 2006 году возрастут до 3,5–3,6 млрд. долл. против 3,3–3,4 млрд. долл. в 2005-м. К 2009 году они достигнут 7,2 млрд. долл. [15]. До сих пор разработку GaN-приборов сдерживало отсутствие подложек с требуемыми характеристиками. Сейчас на рынке имеются лишь 75-мм подложки с приемлемой теплопроводностью. Правда, фирма TDI объявила об изготовлении первых 100-мм подложек для приборов на полупроводниковых соединениях группы A<sup>3</sup>N. Отгрузка первых партий подложек планируется на четвертый квартал 2006 года. А известный европейский исследовательский институт IMEC уже продемонстрировал возможность выращивания эпитаксиальных AlGaIn/GaN HEMT-структур методом химического осаждения из паровой фазы металлоорганических соединений на 150-мм подложках.

Компания sp3 Diamond Technologies – поставщик алмазных подложек и изделий из алмаза для решения тепловых проблем систем с высокими характеристиками – сообщила о заключении контракта на сумму 750 тыс. долл. с Управлением противоракетной обороны США (Missile Defense Agency, MDA). Контракт предусматривает разработку GaN-приборов на подложках "кремний на алмазе" (Silicon-on-Diamond, SOD), пригодных для применения в приемопередающих модулях РЛС.

Таким образом, в создании транзисторов и MMIC на нитриде галлия заинтересованы не только разработчики новейших систем беспроводной связи, но и военные организации. Подтверждение тому – доклады, посвященные приборам на этом широкозонном полупроводниковом соединении, представленные на последнем симпозиуме MTT-S [16–18]. Так, компания TAEC сообщила о создании GaN HFET с выходной мощностью 174 Вт на частоте 6 ГГц. Такие параметры достигнуты в результате оптимизации процесса выращивания эпитаксиальной пленки и применения четырехкаскадной структуры, позволившей минимизировать количество выделяемого тепла. Сейчас усилия разработчиков направлены на решение проблемы рассеяния тепла, после чего планируется разработка серии изделий для спутниковых и наземных средств прямой связи. Кроме того, по мнению специалистов компании, созданные GaN-транзисторы найдут применение в РЛС, домашних системах безопасности и медицинском оборудовании (например, для лечения раковых опухолей).

Компания Nitronix, еще в 2001 году сообщившая об освоении производства GaN HEMT на кремниевых пластинах, представила на симпозиуме 28-В транзистор с максимальной выходной мощностью 50 Вт, предназначенный для систем WiMAX-стандарта, работающих на частотах в диапазоне 3,3–3,8 ГГц. Ток стока при напряжении 28 В на центральной частоте 3,5 ГГц составляет 750 мА. По утверждению

специалистов компании, транзистор NPT35050 – первый коммерческий GaN-прибор, реализованный на кремниевой подложке.

Фирма RFMD, планирующая в 2007 году начать производство GaN HEMT, сообщила о создании HEMT с удельной мощностью 4 Вт/мм. Напряжение смещения транзистора 28 В, усиление 16 дБ. Новый транзистор – основа 120-Вт комплекта схем для систем WCDMA и WiMAX. КПД усилителей на базе новых транзисторов для систем UMTS-стандарта составит 67%, для WiMAX – 60%. Благодаря высокой линейности характеристик эти приборы смогут обеспечивать высокий КПД при уровнях мощности, достаточно близких к максимальному значению. К тому же, надежность при высокой температуре перехода составляет 1 тыс. ч. Транзисторы также найдут применение в каскадах предварительного усиления усилителей класса АВ. В третьем квартале этого года RFMD намерена выпустить GaN HEMT на напряжение смещения 48 В.

Компания Cree сообщила о разработке GaN-транзистора с максимальной выходной мощностью 400 Вт на частоте 3,3 ГГц, усилением 10 дБ и КПД 62% при напряжении смещения 40 В. Но пока же компания выпускает опытные образцы GaN HEMT с выходной мощностью 15 и 30 Вт и планирует в сентябре начать поставки 120-Вт HEMT.

Тем временем фирма TriQuint получила заказ от Управления перспективных исследований DARPA на разработку мощных широкополосных усилителей на GaN. Программа разбита на две фазы. На первой, оцениваемой в 15,8 млн. долл., должны проводиться работы по совершенствованию материалов и созданию приборов с улучшенными характеристиками и надежностью. На второй фазе предусматривается создание GaN мощных широкополосных усилителей для военных систем, разрабатываемых МО США. На эти работы будет затрачено 15,9 млн. долл.

Следует отметить, что несмотря на большой объем работ в области GaN-технологии, проводимых американскими и европейскими фирмами, значительный успех в этом направле-

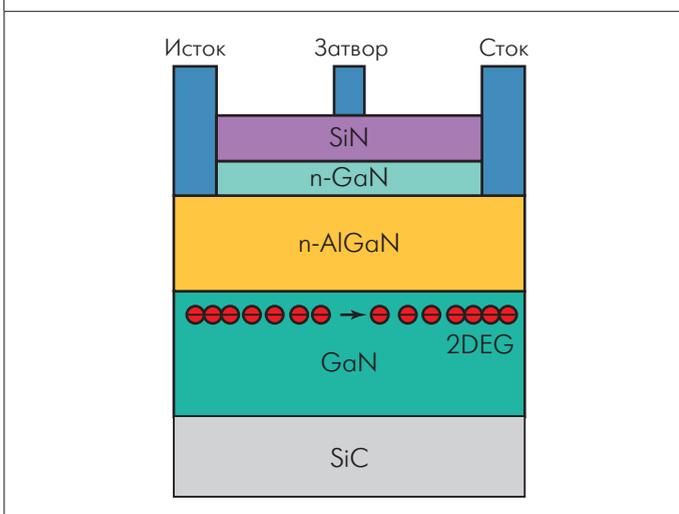
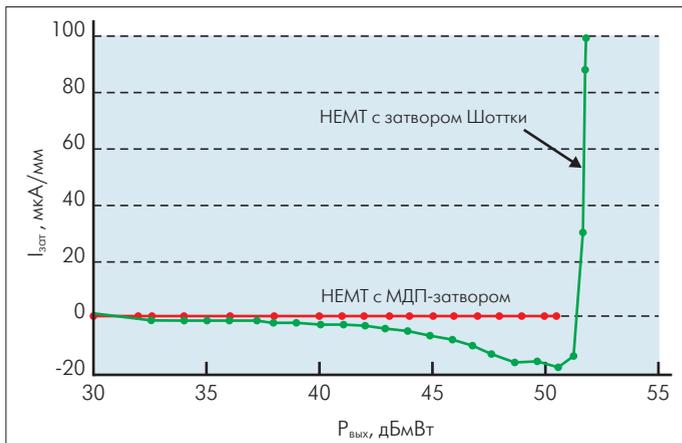


Рис.4. Структура GaN HEMT с МДП-затвором



**Рис.5. Зависимость тока утечки затвора от выходной мощности HEMT**

нии достигнут японскими компаниями. Так, достижение компании Cree – не рекорд. Фирма Eudyna Devices, образованная компанией Fujitsu Quantum Devices и отделением электронных приборов фирмы Sumitomo Electric Industries, утверждает, что смогла получить пиковую импульсную мощность разработанных транзисторов в 500 Вт. Сейчас 100-Вт GaN-транзисторы фирмы нашли применение в разрабатываемых английской компанией EADS Astrium мощных твердотельных усилителях для мобильных и навигационных систем.

В середине 2006 года компания Matsushita Electric Industrial Co. сообщила о разработке GaN-транзистора с вертикальной структурой, благодаря которой размер транзистора составляет 1/8 размера обычного GaN-транзистора с планарной структурой. Ширина канала транзистора, изготовленного по новому процессу с самосовмещением, составляет 0,3 мкм. Материалом контакта с низким сопротивлением служит четырехкомпонентное соединение InAlGaN.

Программу совершенствования GaN HEMT активно проводит компания Fujitsu. В ходе программы специалистами компании на SiC-подложках диаметром 75 мм созданы транзисторы, работающие при напряжении 60 В с плотностью мощности 7 Вт/мм и КПД 70% на частоте, отведенной 3G базовым станциям, – 2,14 ГГц. Кроме того, для обеспечения возможности работы транзисторов вблизи точки насыщения (что необходимо для получения высоких КПД и снижения тем самым потребляемой мощности, но ведет к высоким токам утечки затвора и ухудшению надежности и усиления транзистора) специалистами Fujitsu разработаны GaN HEMT с затвором со структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) (рис.4). Выходная мощность транзистора составила 100 Вт при отсутствии токов утечки в прямом направлении (рис.5)

Однако несмотря на расширение работ по совершенствованию GaN-приборов крупные поставщики LDMOS-транзисторов пока не испытывают особого беспокойства, хотя и разрабатывают нитрид-галлиевую технологию. По мнению директора по маркетингу компании Freescale Semiconductor Джима Норлинга (Jim Norlung), кремниевые LDMOS будут доминировать на рынке еще несколько лет. Рынок GaN HEMT и

HFET начнет формироваться с появлением новых 3G-стандартов и стандартов систем связи следующего поколения, предусматривающих повышение уровня выходной мощности и КПД.

Производители полупроводниковых приборов на протяжении последних нескольких лет активно ведут работы по удовлетворению требований существующих и будущих перспективных стандартов систем связи. В истории промышленности СВЧ-устройств впервые наблюдается такой богатый выбор полупроводниковых приборов различных типов, выполненных на различных материалах. Желательно ли такое разнообразие?

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шахнович И. Твердотельные СВЧ-приборы и технологии. Состояние и перспективы. – ЭЛЕКТРОНИКА:НТБ, 2005, №5, с.58–64.
2. Белов Л. Твердотельные усилители малой и средней мощности. – Наст.№, с.46.
3. Лебедев А., Сбруев С. SiC электроника. Прошлое, настоящее, будущее. – Наст.№, с.28.
4. International Technology Roadmap for Semiconductors. <http://www.itrs.net/home.html>
5. [www.strategyanalytics.net/default.aspx?mod=ReportAbstractViewer&a0=3023](http://www.strategyanalytics.net/default.aspx?mod=ReportAbstractViewer&a0=3023)
6. [www.gaasmantech.org/Digests/2005/2005papers/1.3.pdf](http://www.gaasmantech.org/Digests/2005/2005papers/1.3.pdf).
7. [www.skyworksinc.com](http://www.skyworksinc.com).
8. CMOS Power Amp Drives Dual GSM Dands. Microwave & RF, March, 2004.
9. [www.mwrf.com/Articles/Index.cfm?ArticleID=11911](http://www.mwrf.com/Articles/Index.cfm?ArticleID=11911)
10. [www.avagotech.com/rf/](http://www.avagotech.com/rf/)
11. Егоров Г., Капкин С., Стельмахович Л., Трофименков В., Хрипко В. Многослойные керамические микросхемы. Низкотемпературная совместно обжигаемая керамика. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2006, №3, с.60–65.
12. [www.gaasmantech.org/Digests/2006/index.htm](http://www.gaasmantech.org/Digests/2006/index.htm).
13. [www.semiconductors.philips.com/acrobat\\_download/literature/9397/75015585.pdf](http://www.semiconductors.philips.com/acrobat_download/literature/9397/75015585.pdf).
14. Microwave & RF, July 2006.
15. [www.mwrf.com/Articles/Print.cfm?ArticleID=13015](http://www.mwrf.com/Articles/Print.cfm?ArticleID=13015).
16. [www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=190300189](http://www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=190300189).
17. High-Power Transistors Surf GaN Wave. Microwave & RF, July 2006.
18. [www.mwrf.com/Articles/Print.cfm?ArticleID=13001](http://www.mwrf.com/Articles/Print.cfm?ArticleID=13001)
19. [Rfdesign.com/microwave\\_tech/Amplifiers/radio-highpower\\_gallium\\_nitride](http://www.rfdesign.com/microwave_tech/Amplifiers/radio-highpower_gallium_nitride)
20. [www.rfdesign.com](http://www.rfdesign.com). January 2006.