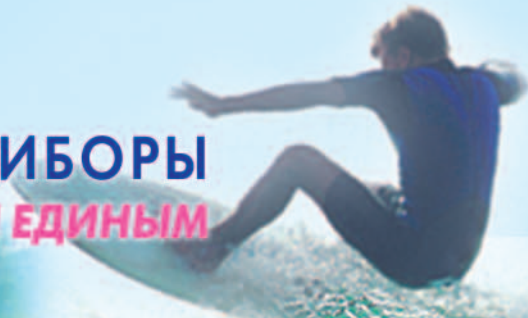


# ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ НЕ КРЕМНИЕМ И АРСЕНИДОМ ГАЛЛИЯ ЕДИНЫМ



В. Майская

Благодаря постоянному совершенствованию исходных материалов и технологических процессов характеристики ВЧ-приборов и микросхем достигают все более высоких уровней. Несколько десятилетий назад ВЧ-полупроводниковые приборы изготавливались исключительно на кремниевых пластинах. Сегодня арсенидгаллиевая технология настолько отработана, что GaAs-приборы находят не только военное, но и коммерческое применение. А компоненты на базе нитрида галлия и фосфида индия прочно завоевывают такие ниши рынка, как мощные ВЧ-транзисторы для систем WCDMA-стандарта и транзисторы сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Но и кремниевая технология не стоит на месте, она усовершенствована настолько, что транзисторы на этом материале вторгаются в “вотчину” арсенидгаллиевых устройств. Набирают силы и “отпрыски” традиционного кремния – кремний-германий и карбид кремния.

Сегодня свои изделия на рынок полупроводниковых ВЧ-приборов поставляют около 40 фирм (табл.1). Стимулируемые стремительным развитием систем Bluetooth-стандарта, мобильной связи, беспроводных локальных сетей, средств ВЧ-идентификации (RFID), производители предлагают самый широкий ассортимент ВЧ-устройств – от малосигнальных маломощных и мощных транзисторов до однокристалльных микросхем радиоприемных устройств, передатчиков и приемопередатчиков. Хотя компании с собственным производством разрабатываемых изделий по-прежнему процветают, стремительно растет число фирм, занимающихся только разработкой микросхем (fables) и передающих их производство кремниевым заводам (foundries). При этом усилия многих компаний-разработчиков направлены на освоение разнообразных новых технологий изготовления ВЧ- и СВЧ-устройств. Например, в исследовательские программы фирмы Hittite Microwave (www.hittite.com), образованной бывшими инженерами компании Raytheon, входит создание ВЧ-приборов и монокристаллических СВЧ-микросхем (MMIC) на GaAs, InGaP/GaAs, InP, SOI и SiGe. Одна из последних разработок компании, переданная для производства кремниевому заводу, – серия широкополосных квадратурных модуляторов и блоков усиления на диапазоны частот 250–800 МГц и 4–7 ГГц, выполненных на SiGe-биполярных

гетеротранзисторах (HBT) и смонтированных в корпус для поверхностного монтажа размером 3x3 мм. Модулятор типа HMC495LP3 на более низкий диапазон частот рассчитан на применение в GSM, CDMA, WCDMA, WLL-системах, модулятор типа HMC496LP3 на более высокие частоты предназначен для WLAN-систем IEEE 802.11 стандарта и СВЧ-радиоприемных устройств.

Недавно образованная фирма Centellax (www.centellax.com) передала кремниевому заводу изготовление созданного ее специалистами синтезатора частоты с дробным значением коэффициента деления N (Fractional-N synthesizer) (рис. 1). Блок широкополосных генераторов, управляемых напряжением (ГУН), входящий в микросхему синтезатора, выполнен на SiGe HBT с предельной частотой до 300 ГГц, тогда как остальные аналоговые и цифровые блоки синтезатора сформированы по традиционной КМОП-технологии. Синтезатор способен генерировать частоту до 30 ГГц с шагом до 25 кГц.

Выходная мощность синтезатора составляет +5 дБм, время перестройки частоты – около 1 мкс. Микросхема предназначена для перестраиваемых гетеродинов, используемых в цифровых радиостанциях; для РЛС с внутриимпульсной линейной частотной модуляцией; генераторов сигналов контрольно-измерительной аппаратуры; тактовых генераторов с регулировкой частоты для оптических систем связи.

Современные SiGe-приборы успешно конкурируют с СВЧ GaAs-устройствами, предназначенными для беспроводных систем связи, работающих при достаточно низких значениях напряжения и выходной мощности. В результате число компаний, выпускающих SiGe-приборы, непрерывно растет. Помимо разработчика SiGe-технологии – компании IBM – и фирмы SiGe Semiconductors, одной из первых обратившихся к этой технологии, SiGe-приборы сегодня создают и выпускают Atmel, Hittite Microwave, IceFyre, Infineon

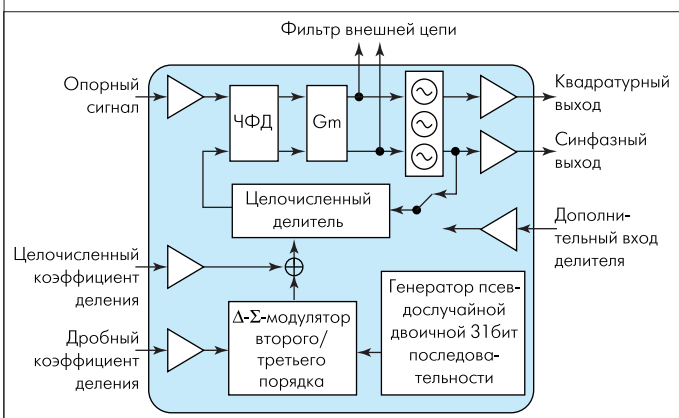


Рис. 1. Упрощенная блок-схема Fractional-N синтезатора частоты компании Centellax

**Таблица 1. Изготовители ВЧ и СВЧ-полупроводниковых приборов**

Компания	Изделия	Вебсайт
Advanced Power Technology RF	Si мощные транзисторы, модули	advancedpower.com
Agere Systems	Si дискретные приборы и ИС	agere.com
Agilent Technologies	GaAs и Si дискретные приборы	semiconductor.agilent.com
ANADIGICS	GaAs и InGaP ИС	anadigics.com
Analog Devices	Si ИС	analog.com
Araftek	GaAs и Si ИС и модули	araftek.com
Atmel	Si ИС	atmel.com
Boeing	Разработка GaAs, InP и SiGe приборов	boeing.com
California Eastern Labs (NEC)	GaAs и Si дискретные приборы	cel.com
Cambridge Silicon Radio	Si ИС (для систем Bluetooth)	csr.com
Celeritek	InGaP и GaAs ИС	celeritek.com
Chipcon	Si ИС	chipcon.com
Cree	SiC мощные транзисторы	cree.com
Cypress Semiconductor	Si ИС (на 2,4 ГГц)	cypress.com
Discovery Semiconductors	InGaAs оптические ИС	chipsat.com
EIC	InGaP ИС и модули	eiccorp.com
Excelics Semiconductor	GaAs дискретные приборы и ИС	excelics.com
Fairchild Semiconductor	GaAs ИС	fairchildsemi.com
Filtronic Solid State	GaAs дискретные приборы, ИС и модули	filss.com
Fujitsu Compound Semiconductor	GaAs дискретные приборы и ИС	fcsi.fujitsu.com
Fujitsu Microelectronics	Si ИС	fma.fujitsu.com
Future Electronics (distributor)	Si и GaAs дискретные приборы и ИС	futureelectronics/rf
Global Communications Semiconductors	Завод по производству InP HBT	gcsincorp.com
Hitachi Cable	GaAs пластины	hitachicable.com
Hitachi Semiconductor	Si ИС (RFID)	hitachi.co.jp
Hittite Microwave	SiGe и GaAs ИС	hittite.com
Honeywell	ИС для волоконнооптических систем	honeywell.com
IBM	Завод по производству Si и SiGe приборов	www306.ibm.com/chips
IceFyre Semiconductor	GaAs и Si ИС (WLAN)	icefyre.com
Infineon Technologies	Si ИС	infineon.com
Inphi	SiGe, GaAs, Si и InP ИС	inphicorp.com
Intersil	Si аналоговые ИС	intersil.com
ISG Broadband	Si ИС	isgbroadband.com
Knox Semiconductor	Si диоды	knoxsemiconductor.com
Linear Technology	Si ИС	linear.com
M/ACOM	Завод по производству GaAs ИС	macom.com
Maxim Integrated Products	Si ИС	maximic.com
Micrel Semiconductor	Si ИС	micrel.com
Microwave Technology	GaAs дискретные приборы, ИС и модули	mwtinc.com
Mimix Broadband	GaAs ИС	mimixbroadband.com
Mitsubishi Electric Semiconductor	Si, GaAs дискретные приборы и ИС	mitsubishichips.com
Motorola Semiconductor	Si дискретные приборы и ИС	motorola.com/rf

Компания	Изделия	Вебсайт
Murata North America	GaAs ИС и модули	www.murata-northamerica.com
National Semiconductor	Si ИС	national.com
Nitronix Corp.	GaN дискретные приборы	nitronix.com
NJR Corporation	Si ИС (видео и ПЧ)	njr.com
Northrop Grumman	SiGe мощные транзисторы, производство GaAs приборов	es.northropgrumman.com
Oki Semiconductor	GaAs и Si ИС	okisemi.com
ON Semiconductor	Схемы управления тактовой частотой, управления мощностью	onsemi.com
Peregrine Semiconductor	KHC ИС	peregrinesemi.com
Philips Semiconductor	Si дискретные приборы и ИС	philips.com
PointNine Technologies	Si мощные транзисторы	pointnine.com
Polyfet RF Devices	Si мощные транзисторы	polyfet.com
QUALCOMM	Si ИС (для CDMA систем)	qualcomm.com
RF Micro Devices	GaAs, Si и SiGe ИС и модули	rfmd.com
Richardson Electronics (distributor)	Si и GaAs дискретные приборы и ИС	rell.com
Rockwell Scientific	SiC мощные транзисторы, GaAs ИС	rockwellscientific.com
Seme Lab	Si транзисторы и диоды	semelab.co.uk
Siemens	Si дискретные приборы и ИС	siemens.com
SiGe Semiconductor	SiGe ИС	sige.com
Silicon Laboratories	Si, SiGe и GaAs приборы	silabs.com
Sirenza Microdevices	Si, SiGe и GaAs дискретные приборы, модули и ИС	sirenza.com
Skyworks Solutions	GaAs, Si дискретные приборы, ИС и модули	skyworksinc.com
Sony Semiconductor	Si дискретные приборы	products.sel.sony.com
STMicroelectronics	Si мощные транзисторы	st.com/rf
Sumitomo Electric USA	GaAs, InP пластины	sumitomoelectricusa.com
Taiwan Semiconductor Manufacturing Co. (TSMC)	Завод по производству Si и SiGe приборов	tsmc.com
Teledyne Wireless	GaAs ИС (усилители)	teledynewireless.com
Temex Electronics	Si диоды и модули	temexcomponents.com
Texas Instruments	SiGe ИС	ti.com
Toshiba America Electronic Components	GaAs и Si дискретные приборы и ИС	toshiba.com/taec
TriQuint Semiconductor	Завод по производству GaAs ИС	triquint.com
US Monolithics	GaAs ИС и модули (усилители мм-диапазона)	usmonolithics.com
Velocium	Завод по производству GaAs и InP ИС	velocium.com
Vitesse Semiconductor	GaAs цифровые ИС	vitesse.com
WIN Semiconductors	Завод по производству GaAs приборов	winsemiconductors.com
WJ Communications	Услуги по производству GaAs дискретных приборов и ИС	wjcommunications.com
Xemics	SiGe ИС	xemics.com
Zarlink Semiconductor	Услуги по производству Si биполярных приборов	zarlink.com
Zeevo	Si ИС (для систем Bluetooth)	zeevo.com

Technologies, Inphi, Intersil, Maxim Integrated Products, Sirena Microdevices и RF Micro Devices.

Расположенная в Оттаве компания-разработчик SiGe Semiconductors ([www.sige.com](http://www.sige.com)) в начале этого года сообщила о создании серии двухкаскадных усилителей мощности (УМ) для сотовых телефонов IS-95 и CDMA-систем, работающих в частотном диапазоне 824–849 МГц. Линейность усилителей типа SE5103, SE5106 и SE5107, выполненных по SiGe БикМОП-технологии, не превышает -50 дБс при пиковой выходной мощности +28 дБм, КПД суммирования мощности превышает 41%. Микросхема серии выдерживает электростатический разряд до 2 кВ. Кроме того, в ней предусмотрены схемы обеспечения устойчивости к рассогласованию. В результате усилитель надежно работает при КСВН 10:1. Каждый усилитель содержит внутрисхемный цифровой или аналоговый блок управления смещением, детектор мощности, 2,8-В стабилизатор напряжения, блоки согласования и настройки высших гармоник. Все это позволяет избавиться от ряда внешних компонентов, в том числе от стабилизатора напряжения и детектора выходного сигнала (рис.2). Поскольку ослабление мощности по соседним каналам не превышает 2 дБ, а рассогласование КСВН составляет 4:1, развязки между усилителем мощности и малошумящим усилителем не требуется. По оценке разработчиков, благодаря этим особенностям применение усилителя мощности новой серии в сотовых телефонах позволит экономить до 3 долл. на каждом.

Микросхемы усилителей поставляются в QFN-корпусах со стандартным расположением выводов, благодаря чему могут непосредственно заменять ранее установленные устройства и тем самым обеспечить экономию при модернизации оборудования. В каждой герметизированной микросхеме предусмотрены отдельные выводы для сигналов управления и сигналов усилительных ячеек, что позволяет регулировать значение  $V_{CC}$  до 0,8 В. В дежурном режиме потребляемый ток составляет 2 мА. Усилитель типа SE5103 содержит цифровой блок управления смещением и поставляется в корпусе размером 4x4x0,9 мм по цене 0,8 долл. при закупке партии в 100 тыс. шт. Усилители SE5106 и SE5107 поставляются в корпусе размером 3x3x0,9 мм с цифровым и аналоговым блоками управления, соответственно, по цене 0,85 долл. в такой же партии.

Одна из последних разработок SiGe Semiconductors – УМ на частоте 5 ГГц семейства RangeCharger, предназначенный для PCMCIA-карт, карманных компьютеров и устройств 802.11a/b/g стандарта. В трехкаскадный усилитель типа SE2534A входят детектор мощности, аналоговая схема подачи смещения и межкаскадные блоки

согласования. Выходная мощность модуля – 17,5 дБм при токе 160 мА и амплитуде вектора ошибок менее 3%, благодаря чему снижается частота появления ошибок при передаче пакета данных и одновременно обеспечивается максимальная пропускная способность канала и максимальная дальность передачи. Поставляется модуль в стандартном промышленном 10-выводном корпусе LGA-типа размером 5x5 мм, совместимом по разъемам с корпусами УМ, используемых в 802.11a оборудовании. Стоимость при закупке партии в 100 тыс. шт. – 1,93 доллара.

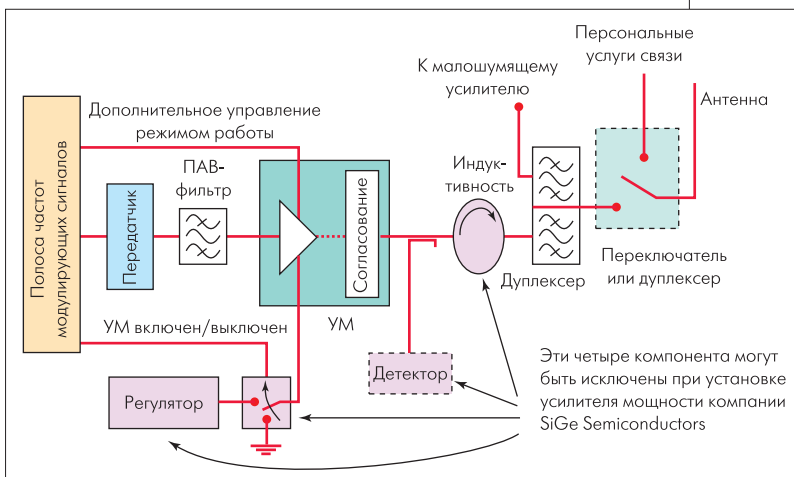
Многие фирмы создают SiGe-приборы на основе собственной технологии. Так, Infineon с помощью разработанного SiGe-процесса формирования 70-ГГц приборов создала *ppn*-транзисторы для WLAN-систем. Коэффициент шума транзисторов типа BFP640 и BFP650 составляет 0,65 дБ на 1,8 ГГц и 1,3 дБ на 6 ГГц, соответственно, что сопоставимо с этим параметром GaAs-приборов.

Самый известный изготовитель, разработавший SiGe-технологии и предоставляющий услуги по производству устройств на ее основе, – компания IBM – располагает разнообразными процессами, отработанными под конкретные приборы. Так, для изготовления HBT, используемых во многих схемах беспроводных систем связи, перспективен 0,18-мкм процесс BiCMOS 7HP, позволяющий формировать самосовмещенные эмиттеры, мелкие и глубокие изолирующие канавки и транзисторы с предельной частотой до 120 ГГц. Хорошо знаком фирмам-разработчикам и такой полупроводниковый завод, как Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC).

Мощные SiGe-приборы пока встречаются редко. Можно упомянуть созданный специалистами сектора электронных датчиков и систем компании Northrop Grumman ([www.es.northropgrumman.com](http://www.es.northropgrumman.com)) мощный SiGe-транзистор для РЛС управления воздушным транспортом. Коэффициент усиления HBT типа WPTB48F2729C составляет 7 дБ в диапазоне частот 2,7–2,9 ГГц при КПД цепи коллектора 46%. В усилителях класса С при включении по схеме с общей базой выходная мощность транзистора превышает 180 Вт при подаче на вход импульсов длительностью 60 мкс с коэффициентом заполнения 6%.

Но хотя кремний-германий и пригоден для изготовления мощных компонентов, разработчиков приборов этого класса больше привлекает **карбид кремния**. Серьезную поддержку разработке SiC-технологии оказывает Исследовательский центр Гленна НАСА. Серию мощных полевых транзисторов с затвором Шоттки выпустила в конце 2003 года компания Rockwell Scientific ([www.rockwellscientific.com](http://www.rockwellscientific.com)) – ведущий разработчик ВЧ- и СВЧ-приборов на SiC. Коэффициент усиления транзистора, рассчитанного на частоту отсечки 3,6 ГГц, составляет 12 дБ на 2 ГГц, минимальная выходная мощность – 25 Вт. КПД стока достигает 40% при напряжении  $V_{DC}$  50 В и токе 1200 мА. Интермодуляционное искажение третьего порядка (IM3) в среднем равно -30 дБс. Транзисторы предназначены для CDMA- и WCDMA-систем.

Мощные SiC-полевые транзисторы выпускает и компания Cree Microwave ([www.cree.com](http://www.cree.com)) – поставщик SiC-пластин и производитель (foundry) SiC монолитных СВЧ-микросхем. Минимальная выходная мощность полевого транзистора с затвором Шоттки типа CRF24060-101 на частоте 2 ГГц составляет 50 Вт при компрессии 1 дБ, минимальный коэффициент усиления на малом сигнале на той же частоте – 13 дБ. Рабочая частота транзистора – 2,7 ГГц. КПД стока транзистора – 45% при напряжении питания 48 В и токе 250 мА, IM3 равно -31 дБс. Не-



**Рис.2. Усилитель мощности компании SiGe Semiconductors позволяет избавиться от ряда внешних компонентов**



смотря на высокую выходную мощность прибора, минимальный коэффициент шума его мал – 3,1 дБ. Транзисторы предназначены для широкополосных военных систем связи, усилителей класса А, АВ, а также TDMA-, EDGE-, CDMA- и WCDMA-систем.

Внимание разработчиков мощных ВЧ- и СВЧ-устройств все больше привлекает **нитрид галлия**, позволяющий в сравнении с другими полупроводниковыми материалами достичь большую плотность мощности и высокий КПД приборов, а также обеспечивающий минимальное искажение сигнала. Правда, пока GaN-транзисторы в основном находятся на стадии исследований. Но разработка их ведется в более чем 100 исследовательских организациях, в том числе и специалистами таких важнейших подрядчиков Министерства обороны США, как отделение информационных и электронных систем военного назначения компании BAE Systems ([www.baesystems.com](http://www.baesystems.com)) и сектор электронных датчиков и систем компании Northrop Grumman. Развитие GaN-технологии сдерживается высокой стоимостью исходных пластин, диаметр которых равен всего 50 мм (против 150 и 300 мм для пластин арсенида галлия и кремния, соответственно). Тем не менее, в конце 2003 года фирма Triquint Semiconductor ([www.triquint.com](http://www.triquint.com)) и крупный военный подрядчик Lockheed Martin объявили о разработке мощного GaN-транзистора с высокой подвижностью электронов (HEMT). Плотность мощности транзистора составляет 11,7 Вт/мм, выходная мощность – +34 дБм, коэффициент усиления на слабом сигнале – 9,83 дБ и КПД суммирования мощности – более 50% (к сожалению, частота не указывается).

Перспективным рынком для мощных GaN-приборов должны стать беспроводные системы связи третьего поколения (3G-систе-

мы). В 2003 году были достигнуты определенные успехи в области увеличения плотности мощности и выходной мощности GaN-усилителей, приблизивших разработчиков к выполнению жестких требований, выдвигаемых такими системами. Согласно этим требованиям, выходная мощность усилителей должна составлять 150 Вт при рабочем напряжении 48 В. Именно поэтому усилия разработчиков направлены на создание транзисторов с напряжением стока более 50 В. И в декабре 2003 года компания Cree Microwave объявила о разработке GaN-полевого транзистора для УМ на подложке карбида кремния с плотностью выходной мощности 32 Вт/мм и КПД суммирования мощности 55% на частоте 4 ГГц. На частоте 8 ГГц плотность выходной мощности составляет 30 Вт/мм при КПД 50%. Напряжение смещения стока достигает 120 В. Работа частично финансировалась Управлением исследований ВМС и Управлением перспективных разработок МО (DARPA).

УМ на нитриде галлия для WCDMA-систем создан и на фирме NEC ([www.nec.com](http://www.nec.com)). Его рабочая частота – 2,1 ГГц, выходная мощность – 150 Вт, КПД суммирования мощности – 54%, напряжение стока – 63 В. Правда, чтобы такие GaN-приборы появились на рынке, необходимо решить проблему обеспечения их надежности. Достижение плотности мощности 30 Вт/мм ничего не дает, если характеристики усилителя быстро деградируют.

Выпуск AlGaIn/GaN-полевых гетеротранзисторов (HFET) для мобильных систем связи третьего поколения готова начать относительно новая компания, образованная в 1999 году выпускниками Университета шт. Северная Каролина, – Nitronex ([www.nitronex.com](http://www.nitronex.com)). Особенность этих приборов – изготовление по запатентованной компанией технологии, названной SIGANTIC и позволяющей выращивать

Таблица 2. Сравнительные характеристики опытных образцов LDMOS и GaN-транзисторов

Прибор, фирма	Средняя выходная мощность в WCDMA-системе, Вт	Коэффициент усиления, дБ	КПД, %	Рабочее напряжение, В
GaN N40, Nitronex	36	>13	25	28
LDMOS пятого поколения BLF5G22-100, Philips	26	17	30	28
LDMOS семейства Goldmos PTFA211001E, Infineon	22	16,5	30	28

высококачественный нитрид галлия на кремниевых пластинах диаметром 100 мм. Испытания HFET с периферией затвора 72 мм (длина затвора 0,7 мм) при рабочем токе 2 А и напряжении стока 28 В показали, что коэффициент усиления на малом сигнале равен 16,3 дБ, КПД стока – 62%, выходная мощность в режиме насыщения – 138 Вт. Это рекордное значение мощности для GaN-приборов на кремниевой подложке, работающих при напряжении стока 28 В. Результаты проведенных высокотемпературных испытаний позволили оценить жизненный цикл таких приборов в 20 лет.

В ноябре 2003 года Nitronex начала поставки опытных образцов мощных AlGaIn/GaN HFET на напряжение стока +28 В с выходной мощностью свыше 10 (модель N10) и 20 Вт (модель N20). Коэффициент усиления транзисторов в диапазоне частот 1,8–2,2 ГГц составляет 11,5 дБ при среднем КПД 25%. В ближайшем будущем фирма намерена выпустить приборы на напряжение 36 В. В начале 2005 года планируется освоить и выпуск коммерческих приборов.

Таким образом, в связи с развитием беспроводных 3G-систем сотовой связи GaN-приборы сейчас представляют собой серьезную угрозу широко используемым в УМ базовых станций МОП-транзисторам, изготавливаемым методом боковой (горизонтальной) диффузии – **LDMOS**. Помимо обеспечения высокой мощности (табл.2), к важным достоинствам GaN-транзисторов следует отнести повышение надежности и КПД, а также возможность работы при высоких температурах, что позволит уменьшить габариты УМ-модуля за счет отказа от средств охлаждения. К тому же, замена GaN-транзисторами LDMOS-приборов позволит обойтись одним транзистором там, где раньше применялись два, что значительно упростит согласование (и, возможно, снизит стоимость) приборов.

Но GaN-транзисторы появятся на рынке в 2005 году, а применяться в аппаратуре очевидно начнут лишь с середины 2006-го. К тому же, для обеспечения конкурентоспособности своих изделий производители пока будут вынуждены продавать GaN-приборы в ущерб себе.

Поэтому сейчас на долю LDMOS приходится примерно 90% рынка транзисторов для УМ базовых систем сотовой связи (остальные – на долю GaAs-приборов и незначительная часть – на долю традиционных биполярных транзисторов). И хотя теоретически LDMOS – не лучшая технология для выполнения УМ 3G-систем связи, изменить сложившуюся ситуацию будет нелегко. Постоянное совершенствование этих приборов несомненно способствует сохранению ими прочных позиций на рынке. Пример совершенствования LDMOS-технологии – транзисторы пятого поколения компании Philips ([www.philips.com](http://www.philips.com)), занимающей второе, после Motorola, место на рынке мощных приборов для базовых станций сотовых систем.

На Международном симпозиуме по микроволновой технологии 2004 года компания Philips Semiconductor продемонстрировала мощный LDMOS-транзистор для WCDMA-систем типа BLF5G22-100 с коэффициентом усиления 17 дБ (против стандартного сейчас значения 14–15 дБ), ослаблением мощности по соседнему каналу -39 дБс, КПД 30% при среднем значении выходной мощности 26 Вт и с пиковой выходной мощностью 160 Вт. Изготовлены транзисто-

ры по 0,14-мкм КМОП-технологии с четырехслойной металлизацией на основе пленок алюминия–меди. Замена применявшейся ранее золотой металлизации системой на основе алюминия–меди большей толщины позволила увеличить температуру перехода со 160°C (для приборов с металлизацией золотом) до 185°C и, тем самым, в четыре раза улучшить надежность приборов (немаловажный фактор для УМ), а также снизить тепловое сопротивление с 0,76 до 0,5 К/Вт. И хотя уже появились LDMOS-транзисторы с еще меньшим тепловым сопротивлением (0,35 К/Вт при выходной мощности 180 Вт для транзистора компании Agere Systems), разработчики Philips утверждают, что низкое тепловое сопротивление в сочетании с рекордными значениями КПД и коэффициента усиления дает транзистору пятого поколения существенное преимущество. Немного уменьшены значения паразитных параметров транзисторов. Высокий коэффициент усиления позволяет конструкторам УМ сократить число усилительных каскадов и тем самым снизить затраты на реализацию проектируемого устройства.

Philips планировала выпустить транзисторы пятого поколения на рынок в конце 2004 года, с тем чтобы уже в середине 2005-го разработчики могли реализовать аппаратуру на их основе. Новая технология передана заводу по производству современных КМОП-микросхем, который сможет освоить 0,14-мкм технологию. По этой технологии, по-видимому, будут изготовлены LDMOS следующего поколения.

Значительных успехов в совершенствовании LDMOS-транзисторов достигли и компании Infineon ([www.infineon.com](http://www.infineon.com)) и STMicroelectronics ([www.st.com/rf](http://www.st.com/rf)), занимающие совместно третье место на рынке компонентов для базовых станций сотовых систем. Так, выходная мощность в непрерывном режиме LDMOS-транзисторов семейства GOLDMOS нового поколения типа PTFA211001E компании Infineon на частоте 2,1 ГГц составляет 100 Вт при компрессии 1 дБ, усиление – 16,4 дБ, КПД – 57%, напряжение питания – 28–30 В. В двухканальной 3GPP WCDMA-системе средняя выходная мощность транзистора составляет 22 Вт, коэффициент усиления – 16,5 дБ, КПД – 30%, ослабление мощности по соседнему каналу – менее -42 дБс, IM3 равны -37 дБс.

Еще один серьезный конкурент LDMOS-транзисторам в области УМ для следующего поколения беспроводных систем связи – **GaAs-приборы**. Как показали исследования компании PA Consulting Group (Великобритания), LDMOS целесообразно применять в устройствах, работающих в стабильных условиях и в ограниченном диапазоне мощностей, что приемлемо для GSM-систем. В базовых станциях WCDMA-систем выходная мощность зависит от трафика и, следовательно, УМ на LDMOS не всегда смогут работать в зоне наилучшего восприятия. Для таких систем более приемлемы GaAs-транзисторы.

Арсенидгаллиевые транзисторы (в основном HBT) доминируют и на рынке УМ для телефонов мобильных систем связи: на их долю в 2003 году приходилось 47,1% рынка. В этом секторе рынка лидируют три компании – RF Micro Devices, Skyworks и Renesas (образована в 2003 году фирмами Hitachi и Mitsubishi), на долю которых приходится 80% продаж.



Приборы на хорошо отработанном материале – арсениде галлия и фосфиде индия – занимают прочные позиции и в области приборов миллиметрового диапазона. И здесь все больший вес приобретают фирмы-производители (foundries). Можно отметить Velocium ([www.velocium.com](http://www.velocium.com)) – ранее отделение фирмы TRW, а теперь компания, входящая в концерн Northrop Grumman. Velocium разрабатывает и производит HEMT с минимальными размерами элементов 0,1 мкм как на арсениде галлия, так и на фосфиде индия. Граничная частота транзисторов – 120 и 180 ГГц, соответственно. Недавно компания объявила о создании двухкаскадного GaAs-усилителя для двухточечных цифровых радиостанций, рассчитанных на частоту 18, 23 и 28 ГГц. Коэффициент усиления прибора составляет 17 дБ, выходная мощность в режиме насыщения – 1 Вт.

Высокими темпами развития характеризуются и GaAs-монокристаллические микросхемы. По данным исследовательской фирмы Strategy Analytics, совокупные темпы прироста рынка GaAs-мощных усилителей составят 16% и к 2006 году продажи их будут равны 0,77–1,2 млрд. долл. К числу последних достижений в области GaAs-приборов относится монокристаллическая микросхема усилителя средней мощности на базе псевдоморфных HEMT, работающих в обогащенном режиме (E-pHEMT), модели MGA-425P8 фирмы Agilent Technologies ([www.semiconductor.agilent.com](http://www.semiconductor.agilent.com)). Микросхема предназначена для применения в качестве задающего устройства в беспроводных системах связи, рассчитанных на частоту до 10 ГГц, т. е. в беспроводных локальных сетях IEEE 802.11a стандарта; в не имеющих лицензии национальных информационных инфраструктурах на частоту 5 ГГц; беспроводных локальных сетях 802.11g/b стандартов, работающих в диапазоне частот 2,4 ГГц, выделенном для промышленных, научных и медицинских систем (ISM), и в беспроводных локальных сетях, беспроводных телефонах на частоту 2,4 и 5,8 ГГц.

При частоте 5,25 ГГц, напряжении питания 3 В и потребляемом токе 58 мА выходная мощность микросхемы при амплитуде вектора ошибок 5% составляет 13,3 дБм, КПД суммирования мощности – 10,3%, выходная мощность при компрессии 1 дБ – 20,3 дБм, коэффициент усиления – 16 дБ, коэффициент шума – 1,7 дБ, КСВН при выходном сопротивлении 50 Ом – 2:1. Следует отметить, что несмотря на низкий потребляемый ток, микросхема удовлетворяет всем требованиям беспроводных локальных сетей к линейности. Необходимое смещение задается внешним резистором, а благодаря функции “разумного смещения” линейность IP3 можно регулировать в пределах 20–35 дБм путем изменения сопротивления внешнего резистора. Это позволяет использовать микросхему в различных блоках одной и той же системы.

Монтируется микросхема в стандартный промышленный безводной восьмиконтактный корпус типа DRP-N LPCC размером 2x2x0,75 мм. При закупке партиями от 5,5 тыс. до 14,5 тыс. шт. цена микросхемы равна 1,73 долларов.

В последнее время все больше внимания уделяется **СВЧ-приборам на основе фосфида индия** – материала с прямой запрещенной зоной, высокими подвижностью электронов и пробивным напряжением. К тому же, фосфид индия – единственный материал, на основе которого можно изготовить приборы, генерирующие, модулирующие, усиливающие и принимающие световое излучение на длинах волны 1,55 и 1,3 мкм, т.е. на длинах волн, используемых в телекоммуникационных системах на основе одномодовых оптических волокон. Поэтому по мере расширения возможностей ОС-192 систем со скоростью передачи 10 Гбит/с и разработки ОС-178 систем со скоростью 40 Гбит/с разработчики телекоммуникационного оборудования с целью снижения его стоимости, очевидно, вынуждены будут обратиться к новым материалам, в том числе и к фос-

фиду индия. Возможности этой технологии демонстрирует созданный недавно компанией Vitesse Semiconductor биполярный HBT второго поколения, изготавливаемый методом двойной диффузии. Его предельная частота превышает 300 ГГц, а напряжение пробоя составляет 4,5 В. Достоинство нового прибора – возможность изготовления на пластинах диаметром 100 мм по технологии с четырехслойной металлизацией, близкой к КМОП-технологии. Новый HBT использовался разработчиками компании BAE Systems в цифровом синтезаторе частоты с рекордной рабочей частотой 152 ГГц.

Работы компании Vitesse совместно с BAE Systems и Университетом шт. Иллинойс финансировались DARPA.

Одна из основных проблем технологии приборов на InP – сложность интеграции оптических и электронных элементов. Сейчас на кристалле с цифровыми устройствами пока удалось объединить лишь *pin*-детектор, да и то малой дальности действия. Конечно, лет через десять появятся фосфидиндиевые микросхемы с сложными *pin*-детекторами, объединенными с усилителем напряжения, управляемым током, схемами модуляции и управления. А пока... Интерес представляет подход фирм Inphi (разработчика InP-приборов) и Broadcom (занимающейся созданием КМОП-устройств), предложивших использовать два чипсета – на InP для входных блоков и КМОП для выходных блоков.

Какой бы ни был выбран подход, победителем станет компания, которая сумеет раньше других объединить основные элементы системы на одном кристалле. И, по-видимому, этого можно ожидать через два-три года.

Microwaves & RF, Feb. 2004.

Материалы фирм Agilent Technologies, Centellax, Infineon, STMicroelectronics, SiGe Semiconductor, Hitite Microwave, Velocium, Vitesse Semiconductor и других.