

# МОНОЛИТНЫЕ АРСЕНИДГАЛЛИЕВЫЕ ИС

*Может, они, наконец, станут реальностью?*

Л. Гусева

**Потенциальные достоинства арсенида галлия как полупроводникового материала известны уже свыше 40 лет: высокая подвижность электронов, широкая запрещенная зона, диапазон рабочих температур от криогенных до 350°C, возможность получения полуизолирующего GaAs, превосходные оптические характеристики. Вместе с тем GaAs-пластины очень хрупки, стойких природных оксидов GaAs не существует, производство GaAs-пластин достаточно большого диаметра освоено сравнительно недавно. И хотя массовый рынок сбыта арсенидгаллиевых изделий как отсутствовал, так и отсутствует сейчас, GaAs-приборы уверенно удерживают свои ниши рынка, в первую очередь микросхем мм- и см-диапазона для беспроводных систем связи и оборудования военного назначения. Так что в конце концов арсениду галлия, видимо, придется отказать в титуле “материала будущего”.**

До последнего времени GaAs монолитные ИС (МИС), перекрывающие диапазон частот от 1 до 100 ГГц, в основном находили применение в военных и гражданских РЛС, спутниковых системах навигации, средствах связи (включая спутниковые), приемопередатчиках поисково-спасательных систем [1]. И сейчас в аппаратуре, работающей на частотах свыше 3 ГГц, предпочтение перед кремниевыми приборами отдается арсенидгаллиевым. На более низких частотах выбор производится исходя из требований каждого конкретного устройства. Благодаря высокому быстродействию и малой потребляемой мощности GaAs-устройства успешно заменяют кремниевые ИС в автоматизированном тестовом оборудовании. Но сегодня рост спроса на GaAs МИС в первую очередь стимулирует стремительно развивающийся рынок беспроводных систем связи (табл. 1). По оценкам фирмы Conexant, темпы прироста продаж GaAs-устройств для входных сетевых приемопередатчиков в ближайшие годы превысят 100% [2]. Поэтому многие производители (Vitesse, Kopin, TriQuint, Conexant, M/A-COM, RF Micro Devices,

ATMI, Motorola) расширяют объемы производства GaAs-пластин (в первую очередь диаметром 150 мм) и приборов.

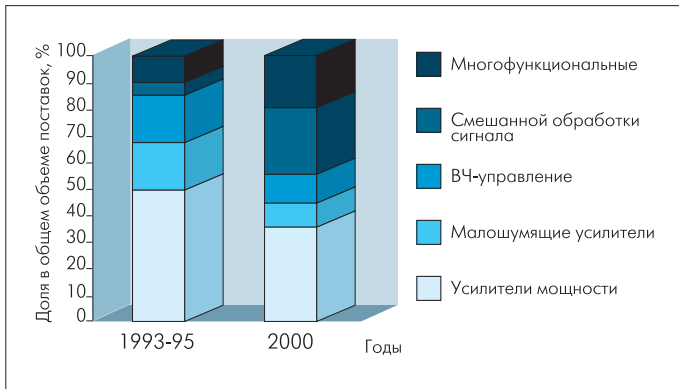
**Немного истории.** Потенциальные достоинства арсенида галлия как полупроводникового материала известны с начала 50-х годов. Одним из первых полупроводниковых приборов, выполненных на этом материале, был диод Ганна – генераторный прибор с отрицательной дифференциальной проводимостью, который до сих пор находит применение в некоторых устройствах мм-диапазона. Следующий важный этап на пути развития арсенидгаллиевой технологии – разработка в 1963 году фирмой GEC Marconi Material Technology процесса контролируемого выращивания высококачественных тонких пленок арсенида галлия. Результатом этой работы явилось создание основного активного элемента современной GaAs-индустрии – полевого транзистора с барьером Шотки (MESFET). Сразу же после появления первых GaAs MESFET начались работы по созданию арсенидгаллиевых МИС [3]. Но прежде чем концепция GaAs МИС приобрела необходимую технологическую зрелость, потребовался достаточно большой срок: лишь к середине 80-х годов многие крупные полупроводниковые фирмы сообщили о возможности промышленного производства GaAs МИС.

Толчком к интенсивному развитию GaAs-технологии послужили две программы МО США – MIMIC и MAFET, привлечшие пристальное внимание разработчиков компонентов РЭА и создателей военных систем во всем мире. Конечной целью этих программ было создание набора универсальных GaAs-устройств на частоты до 120 ГГц с тем, чтобы сформировать отечественную базу GaAs МИС, обеспечив тем самым лидерство США на мировом рынке компонентов см- и мм-диапазонов. Работы по этим программам финансировали все три военных ведомства США – Армия, ВВС и ВМС, а также Управление перспективных разработок DARPA. Это позволило сконцентрировать усилия лучших специалистов на решении основных задач программ при гарантированном выполнении требований отдельных потребителей, а также исключить дублирование работ.

Важной составляющей программы MAFET явилось создание проектной базы, что предусматривало разработку и совершенствование средств проектирования МИС и модулей на их основе, в том числе многофункциональных МИС и МИС со смешанными принци-

**Таблица 1. Динамика и структура рынка GaAs МИС**

Область применения	Изменение объема продаж, млрд. долл.		
	1999 г.	2000 г.	2004 г.
Системы телекоммуникации	1,5	1,8	2,5
Оборудование передачи данных/сетевое оборудование	0,325	0,350	0,400
Бытовая аппаратура	0,180	0,190	0,230
Другие системы	0,175	0,200	0,300
Всего	2,18	2,54	3,43



**Рис. 1. Тенденции изменения структуры арсенидгаллиевых МИС**

пами действия (оптоэлектронные, аналого-цифровые), доля которых в общем объеме производства МИС непрерывно растет (рис. 1). Работа проводилась консорциумом, в который вошли три фирмы, специализирующиеся в области САПР, – отделение Compact фирмы Ansoft, Cadence Design System и отделение EEsof фирмы Hewlett-Packard, – и четыре, занимающиеся производством МИС и модулей на их основе, – Hughes, Raytheon, Texas Instruments и TRW. Первые создавали программное обеспечение, которое фирмы-производители проверяли на соответствие задачам программы. Было показано, что ключ к снижению стоимости и сокращению цикла проектирования GaAs МИС на частоты более 10 ГГц – создание виртуальных моделей, учитывающих сложное взаимодействие между компонентами прибора, а также между прибором и корпусом [4].

Созданные по военным программам СВЧ-компоненты и МИС нашли применение в активных РЛС с электронным сканированием, антенных решетках систем РЭБ, высокоточном интеллектуальном оружии и в системах связи, слежения и идентификации на поле боя и др. Но, что также важно, многие разработки представляли и коммерческий интерес, среди них – передатчики на частоты 28 и 38 ГГц для домашних цифровых ТВЧ-систем, автомобильные РЛС на частоту 76–77 ГГц, РЛС школьных автобусов (94 ГГц), предназначенные для наблюдения за детьми, находящимися вблизи автобуса или автофургона [5,6].

Программы MIMIC и MAFET сыграли большую роль в развитии арсенидгаллиевых МИС, и многие современные технологические методы и технические решения своим появлением обязаны именно им.

**Активные элементы GaAs МИС.** Выбор типа GaAs ИС для конкретного применения зависит как от степени отработанности технологии, так и от фундаментальных механизмов работы, определяющих характеристики прибора. И хотя, как уже отмечалось, основной активный элемент современных МИС – MESFET, достичь требуемых параметров схемы с помощью только этих транзисторов уже не представляется возможным. Высокочастотные характеристики MESFET ограничены подвижностью электронов и, следовательно, временем пролета канала. Длину затвора можно уменьшить и таким образом добиться повышения быстродействия MESFET, но для эффективного увеличения этого параметра требуются более сложные структуры. Поэтому сегодня растет интерес к активным приборам со сложной структурой – транзисторам с высокой подвижностью электронов, в том числе и псевдоморфным (HEMT/PHEMT) и биполярным гетеротранзисторам (HBT).

В структуре транзистора типа PHEMT в InGaAs-слое, расположенном между слоями AlGaAs и GaAs, формируется двухмерный электронный газ, благодаря чему носители движутся без рассеяния и имеют высокую подвижность. Это обеспечивает низкий коэффи-

циент шума PHEMT – около 0,5 дБ на 10 ГГц и 5 дБ на 94 ГГц. Процесс изготовления прибора достаточно хорошо согласуется с методами формирования пассивных элементов МИС.

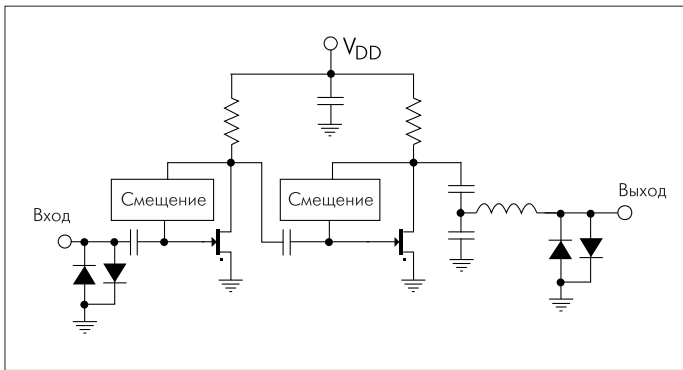
В HBT активной областью служит гетеропереход арсенид галлия – трех- или четырехкомпонентное соединение на его основе (например, GaAs/GaAlAs, GaAs/InGaAs или GaInP/GaAs). По своей структуре HBT во многом схожи с кремниевыми биполярными транзисторами, а по принципу действия – с HEMT: носители движутся в нелегированном канале без рассеяния на примесных ионах и вследствие этого скорость насыщения, а следовательно, и быстродействие их выше, чем у традиционных полевых транзисторов. Один из основных недостатков HBT – худшие тепловые характеристики при работе в импульсном режиме по сравнению с полевыми транзисторами. Однако проводимые работы по созданию термостабильных каскодных конструкций HBT уже дают хорошие результаты. Возможно и формирование термошунтов, отводящих тепло с наружной поверхности кристалла. Правда, это приводит к удорожанию МИС.

В разработке HEMT/PHEMT и HBT приборов принимают участие все крупнейшие изготовители GaAs-устройств [7]. Так, Raytheon концентрирует усилия на улучшении характеристик PHEMT и ведет поиск методологии моделирования HBT и PHEMT в статическом режиме. Texas Instruments проводит работы по моделированию HBT, а фирма Hughes – мощных PHEMT и MESFET, а также копланарных волноводов и flip-chip-структур. При этом следует отметить две важные тенденции: переход от дискретных и специализированных систем к МИС и объединение в них наряду с активными устройствами резисторов, конденсаторов и элементов индуктивности.

Расширение областей применения СВЧ-систем беспроводной связи открывает дорогу арсенидгаллиевым МИС на один из самых обширных рынков сбыта, разумеется, при приемлемой стоимости этой продукции. Растет потребность в таких ВЧ-схемах, как малошумящие усилители, смесители, усилители мощности. Каковы же достоинства и недостатки каждого типа транзистора для конкретных областей применения?

**Малошумящий усилитель** – один из основных компонентов беспроводных систем связи. Будучи первым блоком обработки сигнала, принятого антенной, это устройство задает коэффициент шума и коэффициент стоячей волны входного напряжения. Кроме того, малошумящий усилитель существенно влияет на критерий IP3, характеризующий степень интермодуляционных искажений третьего порядка. Шум ( $F_n$ ) полевых транзисторов в основном вызван термической диффузией. Для обеспечения минимального  $F_n$  необходимо минимизировать сопротивление области истока и максимизировать частоту отсечки транзистора. Последнюю до определенной степени можно контролировать током смещения. С этой точки зрения HEMT имеют некоторые преимущества перед более популярными пока MESFET, поскольку диапазон токов смещения, при которых достигается минимальный коэффициент шума, у них больше. Это в свою очередь облегчает достижение компромисса между двумя основными требованиями, предъявляемыми к малошумящим усилителям, – высоким усилением и малым коэффициентом шума.

Широкую номенклатуру малошумящих усилителей для разнообразных систем связи выпускает фирма TriQuint – один из основных поставщиков GaAs МИС. Одна из таких МИС на базе HEMT – малошумящий усилитель типа TQ9121 (рис. 2), рассчитанный на работу в диапазоне 1,2–1,6 ГГц и обеспечивающий типичный коэффициент усиления 16 дБ при максимальном коэффициенте шума 1,5 дБ (макс.) [8].



**Рис. 2. Блок-схема МИС малошумящего усилителя TQ9121 фирмы TriQuint**

По мере роста популярности беспроводных систем связи растет дефицит выделенных для таких систем частотных диапазонов. Появляющиеся сегодня системы беспроводных локальных сетей передачи данных уже рассчитаны на С-диапазон (4–8 ГГц). Так, в США для систем передачи данных, используемых в беспроводных локальных сетях, предложена частота 5,8 ГГц, а в Европе – 5,2 ГГц.

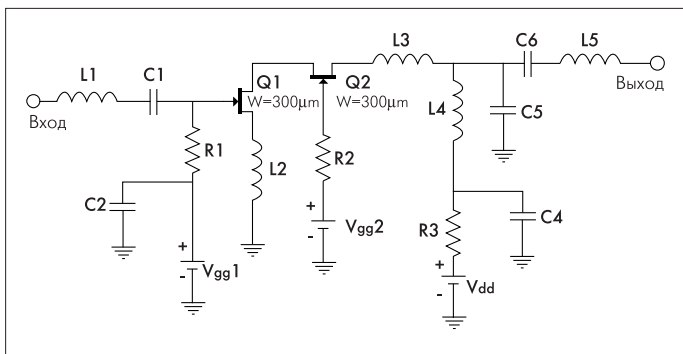
Одно из основных требований к усилителям для таких систем – широкий динамический диапазон при входном сигнале по уровню ИРЗ не менее –2 дБм. При этом потребляемая мощность должна быть невелика. В последнее время появились МИС малошумящих усилителей С-диапазона на базе различных активных элементов (табл.2), но полностью выполнить названные требования пока не удалось. По-видимому, наилучшее решение предложено учеными Исследовательского центра микроэлектроники Технологического института шт. Джорджия. Созданная ими схема С-диапазона выполнена на MESFET, работающем в режиме обеднения (рис. 3).

**Таблица 2. Характеристики МИС малошумящих усилителей С-диапазона**

Тип активного прибора	f, ГГц	F <sub>н</sub> , дБ	ИРЗ, дБм	P <sub>пит</sub> , мВт	U <sub>пит</sub> , В
GaAs MESFET	5	1,9	5	13,2	3
GaAs PHEMT	5	1,5	–	70	5
SiGe	5,8	2,1	-11	13	1
GaAs HBT	5	2,4	–	46,8	6

Схема спроектирована на базе малосигнальной модели зависимого от смещения внешнего сопротивления (bias-dependent extrinsic resistance small-signal model) и модели двухтемпературного источника шума (two-temperature noise source model), что обеспечило хорошую корреляцию измеренных параметров с расчетными [9].

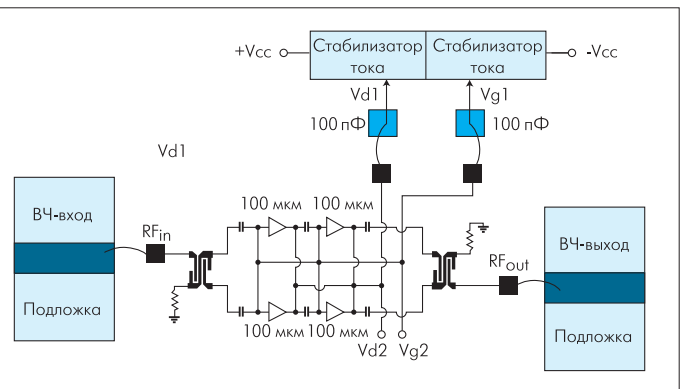
**Широкополосные малошумящие усилители** сегодня в основном изготавливаются на базе MESFET. Два таких усилителя для беспроводных систем связи в конце года выпустила фирма Watkins-Johnson [10]. Обе схемы – усовершенствованные варианты попу-



**Рис. 3. Схема малошумящего усилителя, спроектированного в Технологическом институте шт. Джорджия**

лярной МИС первого поколения типа АН1. Схема АН11 предназначена для применения в системах, где требуется высокая выходная мощность в сочетании с высокой линейностью характеристик. Выходная мощность схемы равна 17 дБм при выходном сигнале на уровне ИРЗ – более 50 дБм. Коэффициент шума составляет 3,7 дБ при мощности выходного сигнала +27 дБм на уровне компрессии усиления 1 дБ. Напряжение питания – 5 В. Поставляется МИС в корпусе типа SOIC-8. Стоимость ее при закупке партии более 10 тыс. шт. – 6,75 долл.

Вторая схема АН4 – предназначена для устройств, где требуется чрезвычайно широкий динамический диапазон работы на высоких частотах. Выходная мощность МИС на уровне ИРЗ составляет 41 дБм в диапазоне 0,1–6,0 ГГц. Коэффициент шума на 3,5 ГГц равен 3,5 дБ. Потребляемый ток 150 мА, напряжение питания 5 В. Монтируется схема в стандартный 3х3 ВГА-корпус. Стоимость МИС АН4 при закупке партии более 10 тыс. шт. – 4,5 долл.

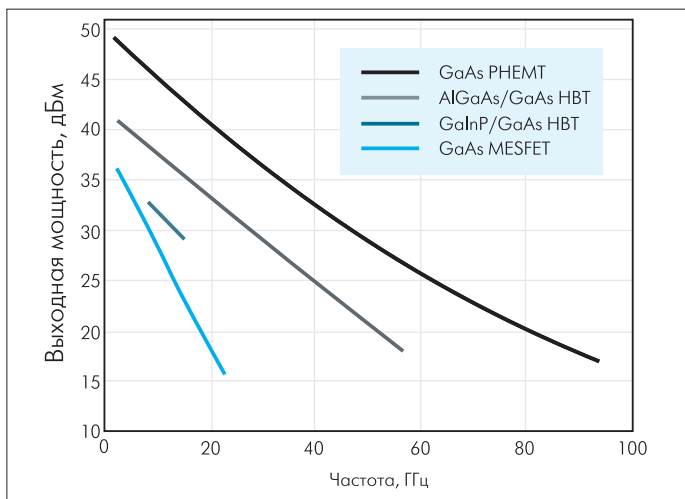


**Рис.4. Схема включения малошумящего усилителя Ka-диапазона фирмы TRW. Рекомендуется использовать керамические однослойные шунтирующие конденсаторы и располагать их не дальше 7 мм от усилителя. Лучшие результаты получены при использовании на входе и выходе полосковых 75-12,2-мкм линий длиной не более 0,25 мм**

Широкополосный двухкаскадный малошумящий усилитель ALN244C фирмы TRW, предназначенный для цифровых ВЧ-приемников и военного высоконадежного оборудования, выполнен на НЕМТ и рассчитан на работу в диапазоне 24–41 ГГц (рис. 4) [11]. Типичные значения коэффициентов усиления и шума МИС в этом диапазоне – 11,5 и 4 дБ, соответственно. КСВ входа и выхода в диапазоне 24–27 ГГц равны 1,3. Мощность выходного сигнала на уровне P1 – 15 дБм. Напряжение питания – 4 В, потребляемый ток – 75 мА. Крепится схема с помощью эвтектического припоя, методами термокомпрессии или термозвуковой сварки проволочных выводов. В качестве материала контактных площадок и металлизации тыльной поверхности используется сплав титан-золото.

В будущем можно ожидать, что возможность формирования сильно легированной базы по мере отработки технологии изготовления МИС откроет хорошие перспективы для применения НВТ.

**Усилители мощности** характеризуются такими параметрами, как компрессия мощности, интермодуляционные искажения третьего порядка и КПД сложения мощности (PAE). И для этих устройств наиболее полно отработана технология MESFET, но она не всегда дает лучшие результаты, поскольку канал их должен быть сильно легирован. А это приводит к снижению пробивного напряжения и выходной мощности (рис.5). Тем не менее, для MESFET с затвором длиной 0,3 мкм и GaAs-каналом, сформированном на диэлектрической пленке Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, удалось получить рекордное значение PAE, равное 80% на 8 ГГц при коэффициенте усиления 9,6 дБ, выходной

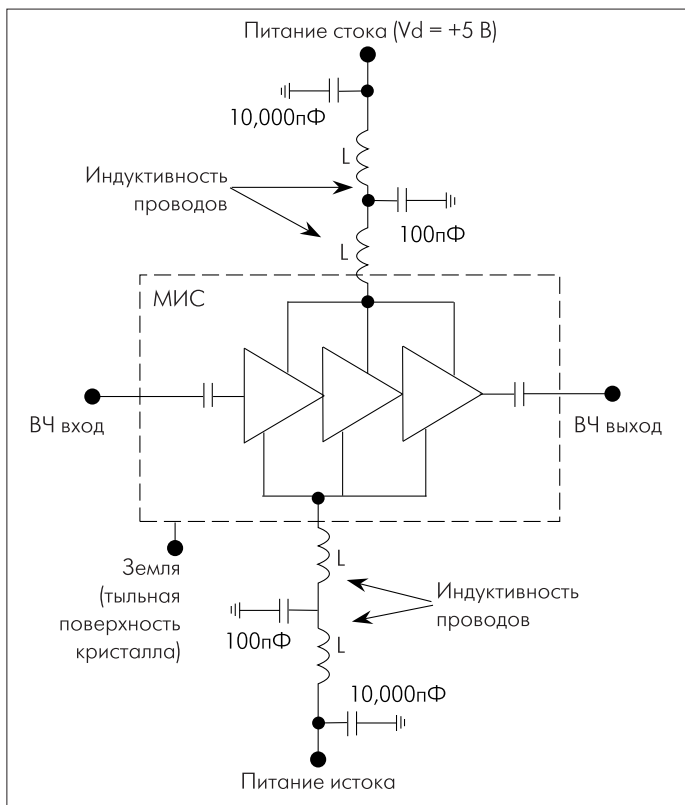


**Рис.5. Зависимость выходной мощности GaAs MESFET, PHEMT и HBT от частоты**

мощности 0,12 Вт/мм и напряжении смещения 3 В [12]. Более перспективны для усилителей мощности HEMT: выходная мощность транзистора этого типа с каналом длиной 86,4 мкм на частоте 2,1 ГГц составляет 100 Вт [13].

Дальнейшее улучшение усилителей мощности может быть получено за счет применения PHEMT и HBT. Пример усилителя на PHEMT – МИС типа RMPA39100 фирмы Raytheon, предназначенная для средств связи мм-диапазона. Схема трехкаскадного GaAs-усилителя на базе PHEMT с каналом длиной 0,15 мкм (рис.6) рассчитана на диапазон 37–40 ГГц, усиление ее на уровне компрессии сигнала 1 дБ составляет 19 дБ, PAE – 17%, выходная мощность в режиме насыщения – 30 дБм [14].

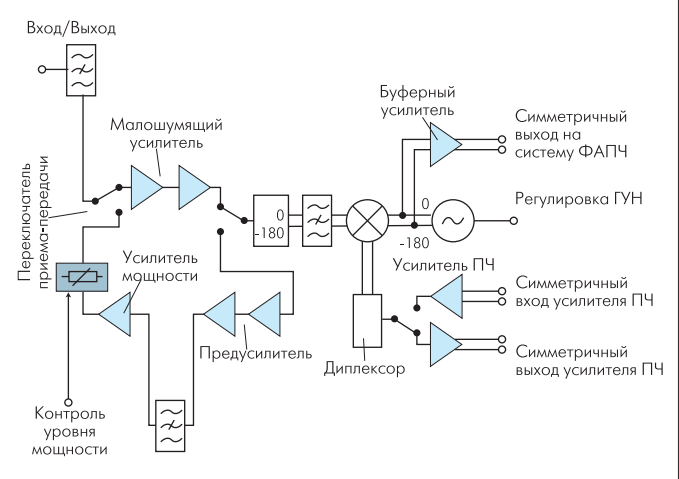
HBT в сравнении с PHEMT характеризуются большим напряжением пробоя и лучшей однородностью порогового напряжения.



**Рис.6. Блок-схема усилителя мощности RMPA39100 фирмы Raytheon с рекомендуемыми для включения в систему соединениями**

К достоинствам HBT относятся также высокие значения усиления и PAE (последнее имеет важное значение для МИС, используемых в портативных беспроводных устройствах связи с батарейным питанием и в спутниковых системах). Правда, как уже отмечалась ранее, технология их изготовления еще не отработана. Но ситуация меняется быстро: в середине 1999 года Raytheon освоила серийное производство модулей МИС усилителей мощности на HBT типа RMPA0950-78 и RMPA1950-78. Модули предназначены для сотовых телефонов AMPS/CDMA-стандартов и персональных систем связи на диапазон частот 800–1900 МГц. МИС, согласованные на 50-Ом нагрузку, монтируются в безвыводные керамические корпуса-носители. В режиме CDMA PAE усилителей составляет 35 и 33% при среднем значении выходной мощности 29 и 28 дБм, соответственно. С 2000 года Raytheon начала массовые отгрузки МИС, в основном на рынки Южной Кореи и Тайваня.

Среди появившихся в последнее время новых GaAs ИС для систем связи следует отметить и новый комплект схем на GaAs



**Рис.7. Принципиальная схема приемопередающего модуля фирмы GEC Marconi для беспроводной локальной сети**

MESFET с непосредственными связями фирмы Oki Semiconductor, выполненных по 0,5-мкм технологии с применением ионной имплантации. Схемы предназначены для 10 Гбайт/с-волоконно-оптических сетей, передающих как цифровые данные, так и голосовые сигналы. В комплект входят ограничивающий усилитель типа KGL4217 на частоту 12,5 ГГц, работающий от источника на 2 В и повышающий мощность всего 0,25 Вт, и схемы мультиплектора 16:1 KGL4221 и демультиплектора 1:16 KGL4222.

Для систем мм-диапазона (автомобильных систем предотвращения столкновений, космической аппаратуры) самый перспективный тип GaAs-транзистора – PHEMT, граничная частота которого может достигать 200 ГГц.

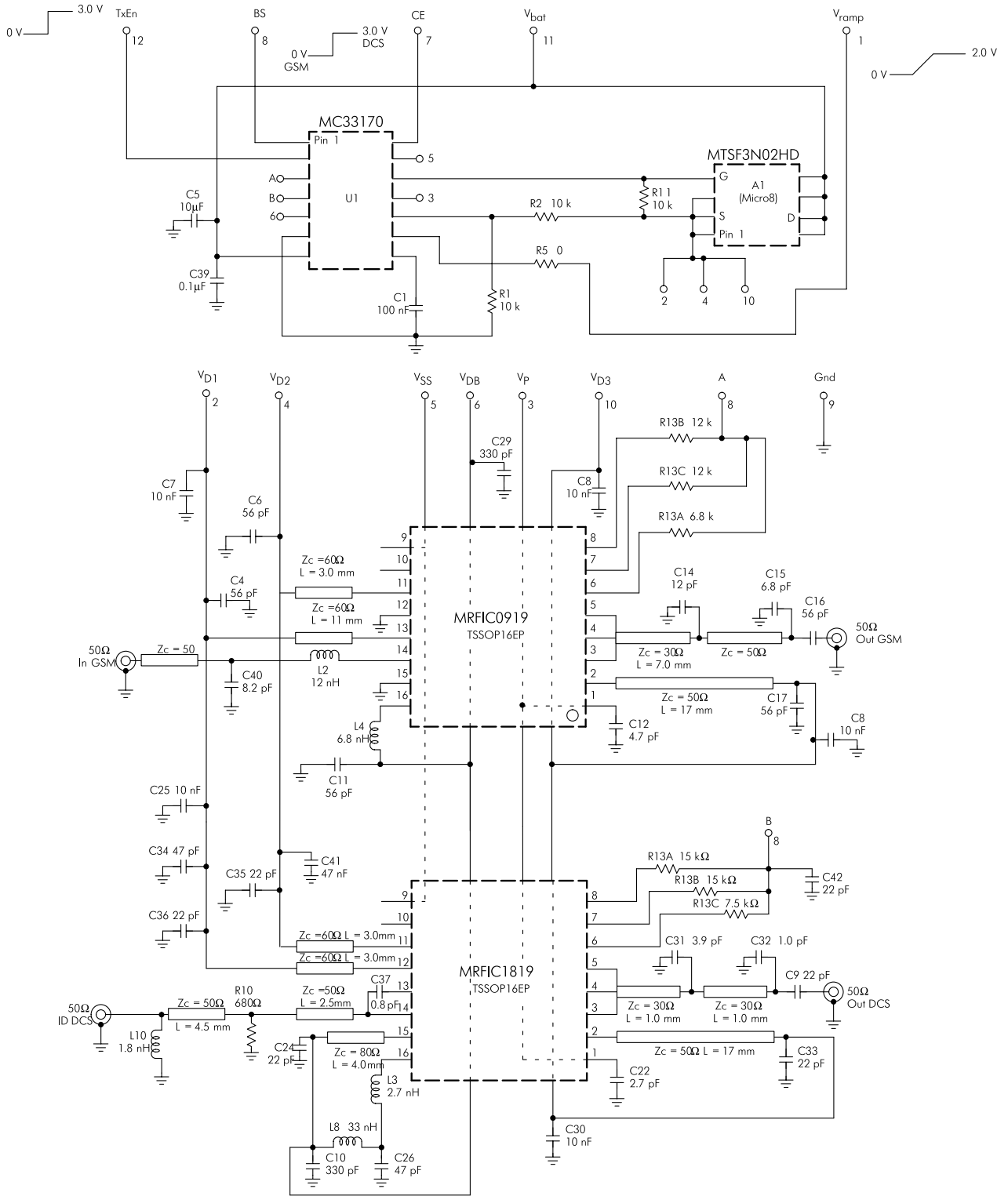
По мере развития технологии и совершенствования методов автоматизированного проектирования появляется все больше GaAs многофункциональных МИС, представляющих собой подмодули, изготовленные на одном кристалле. Примером может служить приемопередающий модуль фирмы GEC Marconi Communications, по функциональной сложности превосходящий большинство современных освоенных в массовом производстве GaAs МИС (рис.7). Однако переход от однофункциональных МИС к многофункциональным сдерживает пока недостаточно высокий выход годной продукции.

Что понимать под **выходом годных GaAs МИС**? Оценка этого важнейшего производственного показателя, как правило, выполняется следующим образом [15].

Двухдиапазонный усилитель мощности GSM900/DCS1800-стандартов типа AN1697 фирмы Motorola

Двухдиапазонный усилитель мощности для сотовых систем связи выполнен на базе двух GaAs-усилителей мощности – MRFIC0919, рассчитанного на работу в GSM900-стандарте, и MRFIC1819, работающего в DCS1800 (1900)-стандарте – и специализированного контроллера MC33170, используемого в сочетании с коммутирующим устройством MTSF3N02HD. МИС усилителей мощности представляют собой усовершенствованные варианты схем MRFIC0917 и MRFIC1817. В отличие от них в этих устройствах предусмотрен источник напряжения смещения по постоянному току, работа которого основана на принципе синхронного выпрямления ВЧ-несущей (подана заявка на патент). Это позволяет отказаться от внешнего источника питания ключевого типа, требующего из-за вносимых помех серьезного

внимания при размещении на плате. Значение отрицательного напряжения (-5 В) достаточно для одновременного смещения активного ВЧ-канала и блокировки другого. Положительное напряжение используется для возбуждения л-канального МОП-ключа, выполняющего функцию распределения выходной мощности. Эти напряжения используются и контроллером MC33170, который выполняет функцию задания полосы путем установления или отключения требуемого значения смещения. Усилители мощности нового поколения также характеризуются большими значениями выходной мощности и монтируются в корпуса достаточно малых размеров – TSSOP-16EP (5x6,5x1,2 мм). Кроме того, благодаря высокому усилению МИС MRFIC0919 может работать при уровне входной мощности 3,0 дБм.





$$\text{Результирующий выход годных GaAs МИС} = \frac{\text{Суммарное число годных МИС, удовлетворяющих техническим условиям по всем параметрам}}{100\% \cdot \text{Число МИС, сформированных на подложке в начале технологического процесса}}$$

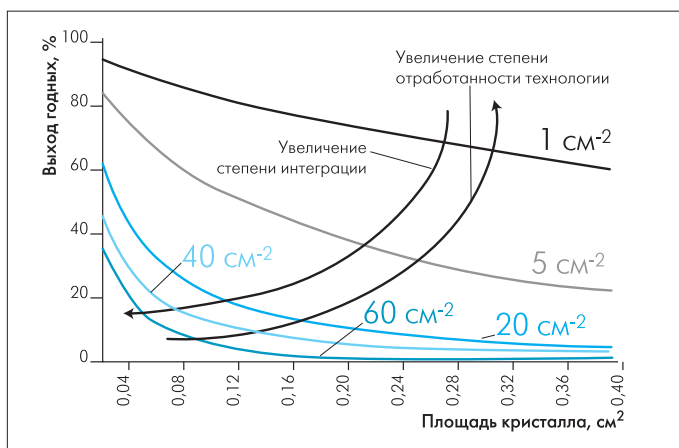
Арсенид галлия – хрупкий материал, поэтому утонение пластин до толщины менее 100 мкм (что желательно для МИС мм-диапазона) приводит к резкому уменьшению выхода годных. Учесть все факторы, влияющие на выход годных, чрезвычайно трудно, однако, используя статистические методы, применяемые в кремниевой технологии, можно получить удовлетворительную модель, позволяющую судить об экономической эффективности проектируемых арсенидгаллиевых МИС. Так, согласно методу, известному как статистика Мэрфи–Сидса [16,17], вероятный выход годных составляет:

$$P = 0,5 \left\{ \exp[-(A \cdot D)^{1/2}] + \left[ \frac{1 - \exp(-A \cdot D)}{A \cdot D} \right]^2 \right\},$$

где  $P$  – вероятный выход годных;  $A$  – площадь прибора (кристалла МИС);  $D$  – плотность дефектов.

Этот метод применим при допущении, что дефекты распределены однородно, что в общем случае вполне приемлемо.

Приведенный способ определения неисправностей не пригоден для конструкций, содержащих монолитные схемы с резко отличающимися значениями выхода годных. Казалось бы, чтобы уменьшить затраты на монтаж кристаллов и выполнение проволочных соединений, достаточно объединить на одном кристалле как можно больше функций и тем самым снизить стоимость модуля. Но известно и то, что увеличение сложности МИС приводит к увеличению ее габаритов и снижению выхода годных (рис.8). Если многофункциональная



**Рис. 8. Зависимость выхода годных МИС от ее размера**

МИС содержит несколько устройств с различными значениями выхода годных, ее выход годных будет равен наименьшему значению этого показателя, и даже экономия на стоимости сборочных операций не сможет перекрыть этот дисбаланс. В результате издержки производства в пересчете на одну ИС возрастут. Таким образом, на стоимость МИС влияют два фактора, один из которых вызывает ее рост, а другой – снижение. Поэтому разработчик, исходя из требований обеспечения максимального выхода годных и минимальной стоимости, должен применять в одном устройстве как сложные многофункциональные арсенидгаллиевые МИС, так и отдельные кремниевые ИС. Используя уравнение Мэрфи-Сидса для оценки стоимости МИС, на основе плотности дефектов и неисправностей

можно с определенной степенью достоверности выбрать оптимальное соотношение между числом МИС в модуле и степенью их функциональной сложности.

Важный параметр, непосредственно связанный с выходом годных, – надежность GaAs МИС. Сегодня основное внимание в контексте надежности уделяется проблемам диффузии водорода при герметизации полевых транзисторов. Этот эффект приводит к разбросу значений порогового напряжения. На величину этого параметра влияет также и изменение размеров затвора Шотки вследствие диффузии металлов в канал. До некоторой степени диффузию можно контролировать путем ввода в состав пленок молибдена. На фирме Lockheed Martin создана МИС на PHEMT, работающая в диапазоне 60 ГГц, где господствуют ЛБВ. Среднее время наработки на отказ схемы составляет  $10^7$  ч при температуре канала 120°C. Выходная мощность МИС – 550 мВт, PAE – 23,5%.

На надежность HBT влияет диффузия базовой примеси в область эмиттера и образование дефектов в этой критичной для функционирования транзистора области. Поэтому сейчас разработчики активно изучают зависимость усиления HBT от продолжительности работы. Жизненный цикл HBT со структурой AlGaAs/GaAs почти обратно пропорционален квадрату плотности рабочего тока. Поэтому в первую очередь высоконадежные HBT должны работать при пониженных значениях рабочего тока. Кроме того, необходимо контролировать их температуру. Оба требования легче выполнить в приборе достаточно больших размеров, но при этом уменьшится импеданс транзистора и согласование схемы с нагрузкой будет затруднено. Совершенствование исходного материала и процессов обработки позволило создать HBT со сроком наработки до  $10^9$  ч при температуре перехода 120°C и плотности тока 25 кА/см². В Центральной исследовательской лаборатории фирмы Thomson-CSF разработаны GaInP/GaAs-транзисторы, деградация коэффициента передачи по току которых при плотности тока 40 кА/см² за 800 ч работы не превысила 2%. Сегодня оценка надежности HBT производится и на основе их низкочастотных шумовых характеристик. Этот метод хорош тем, что позволяет также определять причину и механизм деградации коэффициента передачи по току.

Серьезным конкурентом GaAs МИС могут стать появившиеся недавно SiGe-транзисторы [18]. SiGe МИС, изготавливаемые на кремниевых пластинах больших размеров, чем арсенидгаллиевые, вызвали большой интерес у разработчиков СВЧ-аппаратуры, поскольку частотный диапазон, перекрываемый кремниевыми приборами, может быть сдвинут до 5 ГГц. Однако продвижение кремниевых МИС в область более высоких частот все еще мало вероятно. К тому же разработчики GaAs МИС не дремлют. Недавно фирма M/A-COM сообщила о новом процессе изготовления полевых транзисторов, работающих в режиме обогащения/обеднения [19]. Приемопередатчики сотовых телефонов на базе таких транзисторов потребляют в полтора раза меньший ток, чем новые SiGe ИС на тот же ВЧ-диапазон. Новый технологический процесс фирмы M/A-COM позволяет объединять на одном кристалле ВЧ аналоговые и быстродействующие цифровые устройства. Согласно этому процессу, на кристалле изготавливаются два полевых транзистора. Один работает в режиме обогащения и обеспечивает выполнение функции коммутации режима усиления без дополнительного источника отрицательного напряжения. Второй работает в режиме обеднения и предназначен для выполнения функций переключения, смещения и усиления ВЧ-сигнала. Коэффициенты шума и усиления МИС усилителя, изготовленной по новой технологии, на частоте 2 ГГц равны 0,3 и 16 дБ, соответственно. M/A-COM уже начала массовое производство первых МИС по новой технологии: маломощающего усили-

теля/понижающего преобразователя типа MD59-0021 и повышающего преобразователя/драйвера типа MD59-0022. Оба устройства предназначены для применения в беспроводных телефонных аппаратах, работающих от батареи на 2,7 В.

Изначально разработка арсенидгаллиевых МИС велась с целью удовлетворения военных требований, но поскольку военная РЭА изготавливается по самым передовым технологиям и обладает высокими рабочими характеристиками, ее компоненты могут найти самое широкое применение в различных областях промышленности и в первую очередь при создании систем телекоммуникации следующего поколения.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Semiconductor International, 1999, N4, p.81 - 87.
2. www.semibiznws.com/story/OEG20000410S0061
3. Electronic Letters, 1976, v.12, N10, p.251 - 253.
4. www.gasnet.com/news/CompSem-1097.html

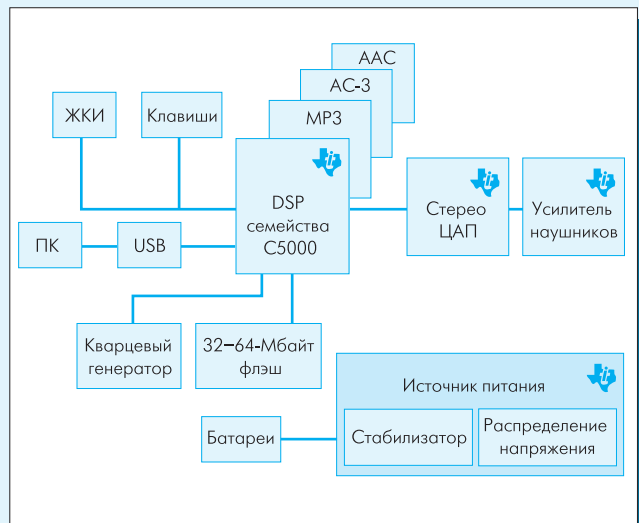
5. www.darpa.mil/MTO/MAFET/index.html
6. www.darpa.mil/into/mafet/mafet-more.html
7. www.eet.com/news/97/960news/darpa.html
8. www.triquint.com
9. www.git.com
10. www.wj.com
11. www.trw.com
12. T. Jenkins et al. GaAs IC Symposium, Atlanta, GA, Nov. 1998, p.259-262.
13. S.Goto. GaAs IC Symposium, Atlanta,GA, Nov. 1998, p.77-80.
14. www.raytheon.com/micro
15. Microwave Journal, 1998, v.41, N1, p.158-168.
16. GEC Review, 1998,v.13, p.67 - 73.
17. IEEE, 1964, v.52, p. 1537 - 1545.
18. ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 1998, № 5/6, с.25-28.
19. www.edtn.com/story/tech/OEG20000316S0022

**Toshiba выбирает для своего аудиоплеера сигнальный процессор фирмы Texas Instruments**

Toshiba и Texas Instruments в конце мая сообщили о достигнутом соглашении по использованию в новом аудиоплеере MEA110AS фирмы Toshiba маломощных сигнальных процессоров (DSP) семейства TMS320C5000. В плеере впервые предусмотрен слот для карт защищенной цифровой (Secure Digital – SD) памяти для хранения контента, на который получены авторские права. Музыкальные файлы из Интернета могут загружаться во встроенную флэш-память плеера емкостью 64 Мбайт или в карты SD-памяти. Применение передовой DSP-технологии фирмы Texas Instruments должно облегчить продвижение нового плеера на быстро развивающийся рынок аудиоинтернет-устройств. По данным прогностической фирмы Forrester Research, к концу этого года парк портативных Интернет-плееров составит 3 млн., к концу 2001 года – 7 млн. и к концу 2003-го – уже 32 млн. устройств.

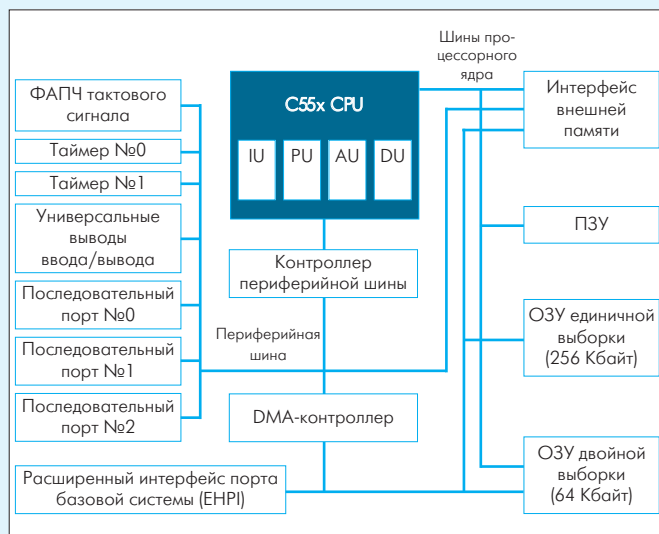
Процессоры семейства TMS320C5000, которые установлены в более чем 30 моделях портативных аудиоплееров следующего поколения, поддерживают все существующие и разрабатываемые форматы сжатия данных, в том числе и AAC и MP3, используемые в плеере фирмы Toshiba. Благодаря малой потребляемой мощности (0,05 мВт/MIPS) при производительности 800 MIPS процессоры платформы TMS320C5000 продлевают продолжительность работы батарей портативного плеера на 50%. Длительность воспроизведения при использовании новейших DSP серии TMS320C55x сможет составить 200 ч.

[www.ti.com/sc/docs/news/2000/00087.htm](http://www.ti.com/sc/docs/news/2000/00087.htm)



Архитектура портативного цифрового аудиоплеера

**Сигнальный процессор TMS320C5510 фирмы Texas Instruments**



Блок-схема сигнального процессора TMS320C5510

Процессор выполнен на базе процессорного ядра серии TMS320C55x, архитектура которого благодаря высокому уровню параллелизма обеспечивает высокую производительность устройства. Внутренняя шинная структура процессора содержит: шину программ, три шины считывания данных, две шины записи данных и дополнительные периферийную и DMA-шины. Это позволяет выполнять за один цикл три операции считывания и две операции записи. DMA-контроллер может за цикл выполнить две операции передачи данных независимо от процессорного ядра. В процессорное ядро C55x входят два умножителя с накоплением, каждый из которых за цикл выполняет умножение 17х17 бит. Помимо центрального 40-разрядного АЛУ в процессор входит дополнительное 16-разрядное устройство. Этими ресурсами управляют устройство адресации (AU) и устройство данных (DU). Командное устройство (IU) выполняет 32-разрядные команды, выбираемые из внутренней или внешней памяти, и выстраивает команды перед вводом в программное устройство (PU), которое декодирует команды и направляет задания AU и DU ресурсам. Для минимизации обращений к внешней памяти в процессоре предусмотрен 24-Кбайт флэш.

Версии 160 и 200 сигнального процессора TMS320C5510 работают, соответственно, на тактовой частоте 160 и 200 МГц, производительность их – 320 и 400 MIPS, время цикла – 6,25 и 5 нс, общий объем адресуемого пространства – 8 Мслов (16 Мбайт), ОЗУ – 160 Кслов (320 Кбайт), ПЗУ – 16 Кслов (32 Кбайт). Напряжение питания процессорного ядра – 1,6 В, общее напряжение питания – 3,3 В.