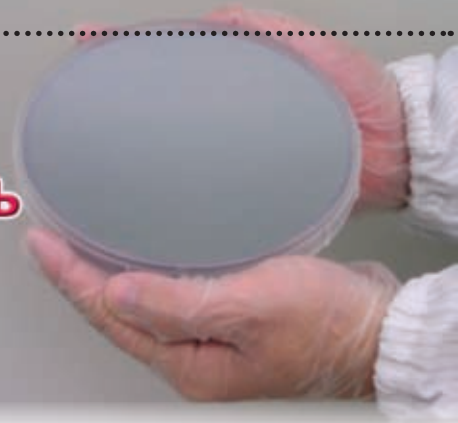


ЕВРОПЕЙСКАЯ GaAs-ПРОМЫШЛЕННОСТЬ ТЕХНОЛОГИЯ, ПРОДУКЦИЯ, РЫНКИ



В обслуживании уже сложившихся и формирующихся новых рынков GaAs-компонентов наряду с американской промышленностью, занимающей ведущее положение в мире, участвуют и европейские компании, выпускающие разнообразные GaAs-приборы и успешно разрабатывающие новые технологические процессы. Они располагают устойчивым портфелем заказов, что обеспечивает им хорошие позиции на мировом и европейском рынках. Рассмотрим производственно-технологические возможности основных европейских производителей GaAs-компонентов, а также виды продукции и предлагаемые ими услуги.

И.Викулов, к.т.н.

да в Newton Aycliffe на северо-востоке Англии, приобретенного в 1999 году у фирмы Fujitsu [1, 2]. Общая площадь завода – 29000 м², из которых 9300 м² занимают чистые комнаты классов 100 и 1000. Уже в феврале 2000 года на заводе было установлено более 100 единиц оборудования, окончательный монтаж завершился в мае того же года. В апреле 2000 года была выпущена первая партия GaAs-приборов, изготовленных на пластинах диаметром 150 мм. Завод рассчитан на непрерывное производство с высоким процентом выхода годных и постепенное увеличение производительности к 2008 году до обработки 30 тыс. пластин такого диаметра в год. Предельная производительность с учетом технических возможностей завода составляет 175 тыс. пластин [1]. Сейчас завод компании FCSL в Newton Aycliffe – крупнейшее и единственное в Европе предприятие по обработке GaAs-пластин диаметром 150 мм.

Технология. Компанией освоено пять технологических маршрутов, обеспечивающих крупносерийное, с высоким выходом годных, производство надежных и качественных дискретных псевдоморфных транзисторов с высокой подвижностью электронов (pHEMT) с длиной затвора 0,5 и 0,25 мкм и СВЧ МИС на их основе [2]. К четырем технологиям изготовления pHEMT с длиной затвора 0,5 мкм относятся:

- недорогой, так называемый "обедненный", процесс FLO5, в котором используется всего семь масок, а также очень тонкие стоп-слои и селективное травление для точного контроля напряжения отсечки и тока насыщения. Сквозные отверстия не применяются. Выход годных превышает 90%;
- "обедненный" процесс FD05, который, помимо операций технологии FL05, включает этапы создания тонкопленочных нитрид-танталовых резисторов с удельным сопротивлением 50 Ом/кв, нанесения третьего уровня металлических межсоединений и формирования сквозных отверстий. Подложки утоняются до 100 мкм. Процесс предназначен для изготовления усилителей мощности беспроводных устройств, широкополосных усилителей,

Современный мировой рынок GaAs-компонентов оценивается примерно в 3,5 млрд. долл., и, по прогнозам, к 2010 году он вырастет до 4,5 млрд. долл. (рис.1) [1]. Это связано с расширением применения GaAs МИС в телекоммуникационном оборудовании, в том числе высокочастотных диапазонов, где GaAs имеет лучшие электрические характеристики по сравнению с кремнием [2]. К быстро развивающимся секторам рынка относится инфраструктура базовых станций сотовой связи, для которых, согласно новым стандартам, требуются более высокочастотные линейные усилители приемлемой стоимости. Не прекращается и рост спроса на мобильные телефоны, объем продаж которых в 2007 году должен был превысить 1 млрд. шт. [1]. Достигнутые высокие значения КПД мощных GaAs усилительных МИС способствуют расширению их применения в новых конструкциях мобильных телефонов. Большие возможности для GaAs МИС открываются в таких системах, как наземные терминалы спутниковой связи VSAT (27–31 ГГц), сотовые системы цифровой радиосвязи типа "точка-точка" (cellular backhaul, 6–40 ГГц), позволяющие расширить зоны действия сотовой связи, автомобильные РЛС (76–77 ГГц) и специальная военная аппаратура – бортовые РЛС и системы РЭБ [3].

КОМПАНИЯ FILTRONIC COMPOUND SEMICONDUCTOR

GaAs-производство Filtronic Compound Semiconductor Ltd. (FCSL) находится на территории бывшего кремниевого заво-

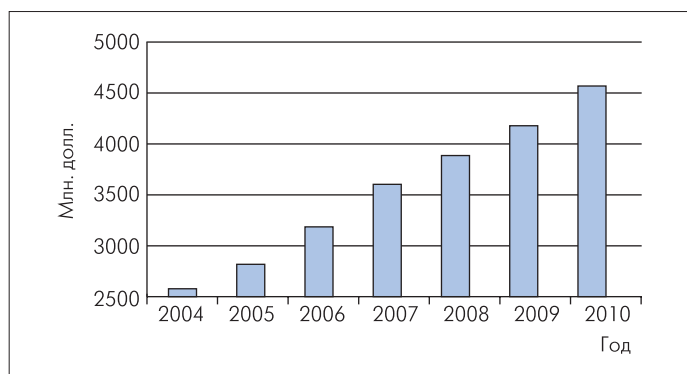


Рис. 1. Мировой рынок GaAs-приборов

ступенчатых цифровых аттенюаторов, синфазно-квадратурных демодуляторов, а также фильтров и схем подвода питания. С помощью процесса FD05 изготовлены МИС мощностью 10 Вт на частоте 10 ГГц при вариации коэффициентов усиления транзисторов на пластине менее 1 дБ. Выход годных превышает 95%;

- процесс FP05, рассчитанный на создание рHEMT для усилителей мощности до 60 Вт в непрерывном режиме. Транзисторы, изготовленные по этой технологии, обладают высокими пробивными напряжениями, большими максимальными токами, высокими значениями усиления в режиме большого сигнала (~14 дБ на 2 ГГц) и частоты отсечки (~20 ГГц). Такие частоты отсечки обеспечивают высокие значения КПД в L-диапазоне и позволяют усилителям мощности работать на частотах до X-диапазона. Для получения хорошего теплоотвода и минимального импеданса сквозных отверстий пластины утоняются до 50 мкм. Разработанная технология находит применение для производства таких компонентов, как усилители мощности для базовых станций систем сотовой связи третьего поколения, терминалов с очень малой апертурой систем спутниковой связи, а также активных фазированных антенных решеток (АФАР);
- так называемый "обогащенный" процесс FE05 формирования рHEMT, позволяющий создавать высоконадежные усилители мощности с повышенным КПД и линейностью, а также обеспечивающий переход на более высокий уровень интеграции микросхем для мобильных телефонов [3].

Для изготовления рHEMT с длиной затвора 0,25 мкм и МИС на их основе на диапазоны частот до 30 ГГц предназначен маршрут FD25.

Гетероструктуры рHEMT – AlGaAs/InGaAs – выращивают на полуизолирующих подложках арсенида галлия с использованием двух установок молекулярно-лучевой эпитаксии GEN 2000 фирмы Veeco-Applied Epi (США), а также получают от внешних поставщиков. Установка GEN 2000 одновременно обрабатывает семь 150-мм пластин, ее производительность составляет около 80 пластин в день. Статис-

тический контроль производственного процесса (Statistical Process Control – SPC) показывает хорошую воспроизводимость толщины слоев и электрических характеристик устройств на пластине.

На всех технологических маршрутах структуры обоих типов транзисторов формируются с помощью оптической, а не электронно-лучевой литографии, обычно используемой для получения требуемых характеристик на СВЧ. Благодаря применению оптической литографии при изготовлении МИС на GaAs-пластинах большого диаметра обеспечиваются высокие параметры и выход годных МИС при их приемлемой стоимости [3]. К тому же однородность размеров затворов транзисторов по всей пластине (от центра к краю) выше, чем при их формировании методами электронно-лучевой литографии [2]. Для изготовления рHEMT с длиной затвора 0,5 мкм используется степпер фирмы Nikon с источником УФ-излучения на длине волны 365 нм, рHEMT с длиной затвора 0,25 мкм – степпер той же фирмы модели EX-12 с глубоким УФ-излучением. Завод компании FCSL был первым по обработке пластин диаметром 150 мм, располагавшим степпером с глубоким УФ-излучением.

Углубленный затвор создают методом сухого селективного травления, позволяющим получать однородность напряжения отсечки транзисторов по всей пластине. Одна камера установки травления VLR 700 компании Oerlikon способна обрабатывать ежедневно более 50 пластин.

Перемещение отдельных пластин или партии в ходе технологического процесса отслеживает специальная электронная система Manufacturing Execution System [2], фиксирующая изменения параметров производственного процесса и передающая соответствующую информацию оператору на линии. Измерения по постоянному току выполняются на пластине с помощью зондового измерителя фирмы Electroglas и автоматизированного тестера 4071 компании Agilent. Испытания на высокой частоте (до 1 ГГц) проводятся с помощью установки 8400 компании Agilent и автоматизированной зондовой станции 4090μ фирмы Electroglas. Для измерений на более высоких частотах используют полуавтоматическую зондовую станцию, векторный анализатор для малосигнальных измерений на частотах до 40 ГГц и автоматизированную систему измерения импедансов и шумов на частотах до 18 ГГц [2].

На базе программного обеспечения фирмы Applied Wave Research (США) создан пакет документов, позволяющий разрабатывать все активные и пассивные компоненты МИС. Моделирование в режиме малого сигнала выполняется на основе S-параметров и шумовых характеристик, а в режиме большого сигнала – с помощью модели TOM3 или Паркера-Скеллерна (Parker-Skellern) [3].

Сборка МИС выполняется на высокоавтоматизированной сборочной линии фирмы Palomar, США (рис.2) [4].



Рис.2. Автоматизированная линия сборки микросхем фирмы Palomar (США)

Продукция, рынки сбыта. Компания FCSL предлагает заказчикам разработку "под ключ" и крупносерийное производство на своем заводе арсенидгаллиевых приборов и МИС. В число услуг входит также изготовление транзисторов по требованию заказчика (услуги foundry). Компания уделяет большое внимание расширению номенклатуры предлагаемой продукции. При этом усилия ее специалистов направлены в основном на разработку компонентов и микросхем для инфраструктуры средств беспроводной и волоконно-оптической связи, оборудования военного назначения, работающего в широкой полосе частот, а также систем прямой радиосвязи.

Серийная продукция компании включает: дискретные бескорпусные и корпусированные рНЕМТ на диапазоны частот 0,5–18 ГГц; МИС усилителей мощности (до 10 Вт на частоте 10 ГГц и 2 Вт на 38 ГГц) и маломощных усилителей (коэффициент шума менее 1 дБ на 2 ГГц и 3,5 дБ на 38 ГГц) [1], а также переключатели для современных и будущих мобильных телефонов и локальных сетей WLAN [5]. Компания инвестировала значительные средства в организацию массового производства многоканальных переключателей, удовлетворяющих современным требованиям по стоимости и техническим характеристикам (переключение режимов передача/прием, выбор диапазонов). В результате за период с января 2005 года по январь 2007-го объем выпуска рНЕМТ-переключателей увеличился в 20 раз. Несмотря на рост сложности и функциональности, стоимость таких переключателей непрерывно снижается. МИС переключатели на диапазон до 6 ГГц выполняются на основе транзисторов с длиной затвора 0,5 мкм с оптимизированным числом слоев, без сквозных отверстий и воздушных мостов (процесс FL05). Пример такой МИС – шестиканальный переключатель типа FMS2028 для четырех-

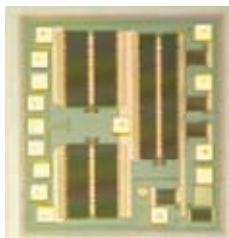


Рис.3. Шестиканальный четырехдиапазонный переключатель SP6T для системы GSM-связи. Размер кристалла 852×990 мкм

диапазонного мобильного телефона сети GSM (рис.3). Завод ежемесячно выпускает несколько миллионов таких переключателей. Вносимые потери МИС не превышают 0,5 дБ, развязка приемного и передающего каналов не хуже 40 дБ, а уровень гармоник менее -70 дБн при уровне передаваемой мощности 35 дБмВт. Общий выход годных превышает 90%.

В последнее время в системах связи "точка-точка", предназначенных для расширения зоны действия сотовых систем, дискретные транзисторы заменяли однофункциональными бескорпусными МИС на гибких подложках. Сейчас начался следующий этап – замена однофункциональных МИС многофункциональными схемами, позволяющими уменьшить габариты и снизить стоимость мобильных телефонов. Пример МИС высокой степени интеграции – приемное устройство на диапазон частот 17–23 ГГц (рис.4). Микросхема содержит маломощный усилитель, аттенюатор, предусилитель, смеситель и усилитель гетеродина. Еще несколько лет назад реализация МИС такой сложности была экономически невыгодной из-за низкого выхода годных. В будущем за счет применения МИС в пластмассовых корпусах под поверхностный монтаж планируется добиться дальнейшего снижения их стоимости.

На рынок оборудования военного и гражданского назначения фирма FCSL выпускает широкополосные и мощные усилители. В настоящее время идет отработка технологии массового выпуска МИС приемо-передающих модулей (до более 100 тыс. модулей в год) для бортовых РЛС с АФАР [4].

Исходя из нарастающих потребностей рынка оборудования военного и коммерческого назначения в GaAs-приборах миллиметрового диапазона, фирма Filtronic разработала рНЕМТ с длиной затвора 0,3 и 0,15 мкм. Максимальная плотность тока стока транзистора с длиной затвора 0,3 мкм составляет 490 мА/мм, напряжение отсечки – -1 В. Напряжение пробоя затвор-сток превышает 25 В, максимальное значение стабильного усиления равно 17 дБ на частоте 10 ГГц при напряжении стока 12 В.

Затворы рНЕМТ длиной 0,15 мкм формируются с помощью степпера с глубоким УФ-излучением. Типичные характеристики транзистора следующие:

Ток насыщение стока I_{DS} , мА/мм.....	320
Максимальный ток I_{MAX} , мА/мм.....	550
Напряжение отсечки V_p В.....	-1,5
Напряжение пробоя BV_{GD} , В.....	-15
Сопротивление во включенном состоянии R_{ON} , Ом-мм.....	1,7
Крутизна G_m , мСм/мм.....	640
Частота F_T , ГГц.....	85

В режиме большого сигнала при напряжении стока 8 В удельная мощность насыщения таких транзисторов с шириной затвора 200 мкм превышает 1 Вт/мм.

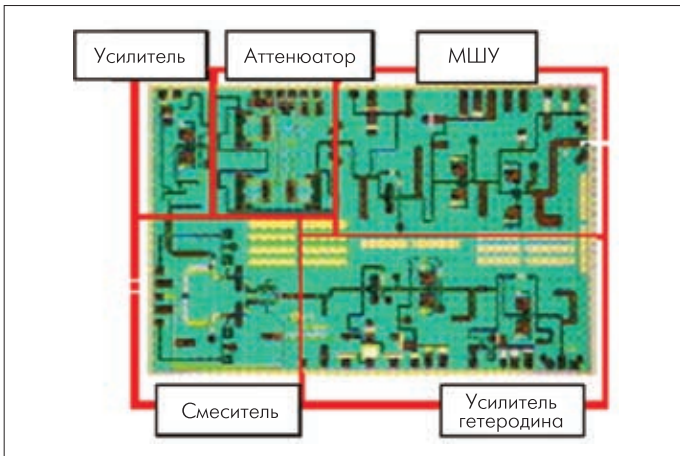


Рис.4. Интегрированный приемник диапазона 17–23 ГГц

UNITED MONOLITHIC SEMICONDUCTORS (UMS)

Фирма UMS в равных паях принадлежит компании Thales (Франция) и Европейскому аэрокосмическому концерну (European Aeronautic Defence and Space Company – EADS) [1]. Фирма создана с целью гарантированного обеспечения GaAs-, а теперь и GaN-компонентами обеих материнских компаний. GaAs СВЧ-микросхемы поставляются с 1996 года. Сейчас на фирме работают 220 человек. Завод по производству GaAs-компонентов с чистыми комнатами класса 1–100 находится в городе Ульм (Ulm), Германия. Служба заказов, а также отделения по проектированию и тестированию корпусированных и бескорпусных (на пластине) МИС – в городе Орсей (Orsey), Франция.

Технология. Завод компании выпускает СВЧ МИС на основе маломощных и мощных рНЕМТ и биполярных транзисторов с гетероструктурой (НВТ), изготавливаемых на пластинах диаметром 100 мм. Годовая производительность – 10 тыс. пластин [6]. Наряду с хорошо отработанными процессами РН15 и РН25 изготовления маломощных рНЕМТ с одним подзатворным углублением отработаны процессы изготовления микросхем с различными уровнями мощности для разных частотных диапазонов (рис.5). Так, мощность МИС, выполняемых по технологиям НВ20РХ (2-мкм InGaP НВТ) и РРН25Х (0,25-мкм рНЕМТ), достигает 10 Вт в X-диапазоне.

С 2005 года компания разрабатывает GaN НЕМТ. Для производства компонентов военного и космического назначения, а также усилителей мощности для базовых станций сотовых систем связи разрабатываются процессы GH50 и GH25. Технологическая документация на все процессы и рабочие инструкции утверждается специальной административной комиссией (Management Committee) [6]. Затворы транзисторов с высоким разрешением формируются с использованием комбинации оптической и электронно-лучевой литографии. С целью повышения производительности

технологической линии планировалось в течение 2007 года перевести процесс изготовления затвора с одним углублением целиком на оптическую литографию.

UMS предлагает различные варианты взаимодействия по проектированию и производству компонентов для других фирм. Возможен прием заказов от внешних дизайн-центров на производство разработанных ими схем. В 2006 году компания на своей технологической базе выпустила 73 партии изделий по заказам фирм-разработчиков аппаратуры космического, военного и телекоммуникационного назначения.

UMS – один из пионеров в области корпусирования МИС. В продукцию компании входят микросхемы в корпусах под поверхностный монтаж, отвечающих требованиям стандартных сборочных линий. Частотный диапазон корпусированных изделий достигает 30 ГГц. Сейчас компания работает над созданием следующего поколения стандартных пластмассовых корпусов типа QFN для МИС на частоты свыше 40 ГГц. Разработаны также корпуса для многоканальных приемных и передающих устройств, предназначенных для автомобильных локаторов дальнего действия диапазона 77 ГГц.

Продукция и рынки сбыта. Наряду со стратегическими рынками военной и космической техники основная деятельность компании направлена на освоение рынков телекоммуникационного и автомобильного оборудования. С 2003 года UMS серийно выпускает компоненты для автомобильных радаров дальнего действия (на частоту 77 ГГц), так называемых радаров адаптивного управления курсом (Adaptive Cruise Control – ACC). В 2007 году планировалось освоить крупносерийное производство МИС для радаров ближнего действия (на частоту 24 ГГц) [1]. С 2006 года компания разрабатывает SiGe-изделия, опираясь на технологическую базу других фирм. В результате расширяются возможности поставки заказчикам конкурентоспособных изделий, объединяющих компоненты, выполненные по различным перспективным технологиям. Актуальность такого подхода связана с прогнозируемым ростом рынка датчиков автомобиль-

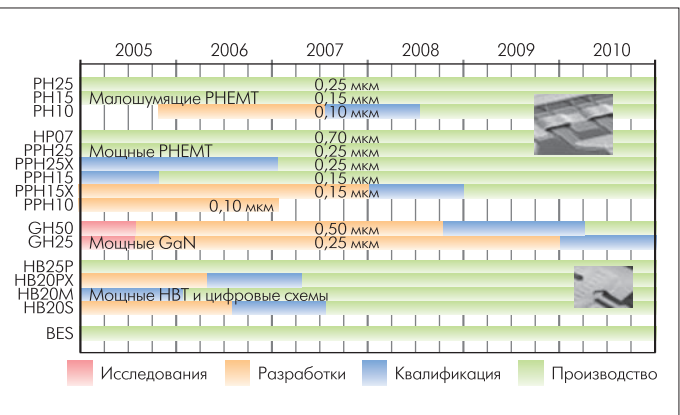


Рис.5. Технологические процессы фирмы UMS

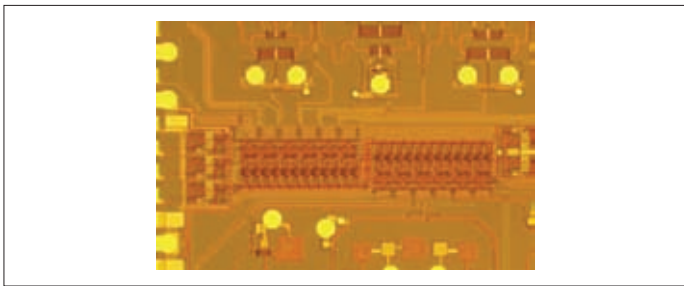


Рис.6. Конвертор с преобразованием последовательного кода в параллельный, а также часть аттенюатора и фазовращателя микросхемы

ных радаров ближнего действия на диапазон 24 ГГц и необходимостью дальнейшего снижения их стоимости.

Из последних разработок МИС для рынка телекоммуникационных систем можно отметить корпусированный малошумящий усилитель с автосмещением. Усилитель работает в диапазоне 5,8–17 ГГц. Усиление его превышает 21 дБ при коэффициенте шума 1,6 дБ. Напряжение питания составляет 4 В, потребляемый ток – 80 мА.

Изделия военного назначения компании целиком предназначены для европейского рынка систем РЛС, РЭБ, связи, высокоточного оружия. Это МИС, разработанные либо UMS, либо ее заказчиками и изготавливаемые на технологической базе компании. В номенклатуру таких изделий входят МИС малошумящих усилителей, аттенюаторов, фазовращателей, усилителей средней и высокой мощности. Пример МИС военного назначения – усилитель мощности X-диапазона для АФАР. Усилитель изготовлен с помощью технологического процесса HB20PX (GaInP/GaAs). Микросхема площадью 18,4 мм² содержит цепь регулировки рабочего напряжения и ТТЛ-интерфейс. Она отличается высокой надежностью, допуская работу при компрессии 8 дБ и КСВН 1,7:1 в широком диапазоне температур. На базе процесса PPH25X (pHEMT с длиной затвора 0,25 мкм) на кристалле такой же площади (18,4 мм²) был изготовлен двухкаскадный усилитель мощности X-диапазона с выходной мощностью 8 Вт при КПД 45% в полосе 8,6–11,6 ГГц.

Компания не оставляет без внимания и сектор рынка, связанный с заменой гибридных конструкций в действующих модулях и системах на МИС [1].

ОММИС

В последнее время на европейском рынке GaAs-устройств усиливается активность компании ОММИС – поставщика эпитаксиальных структур и услуг по обработке GaAs-пластин и разработке МИС [7]. Компания образована в 2000 году на базе французского отделения Philips Microwave Limeil, входящего в голландский концерн Royal Philips Electronics [7]. ОММИС имеет почти тридцатилетний опыт работы в области GaAs-технологии. В 2005 году компания заключила с Университетом Белфаста (Ирландия) соглашение о сотрудничестве, согласно которому университетская исследова-

тельская группа в области СВЧ-электроники должна действовать в интересах ОММИС как Европейский центр подготовки высококвалифицированных кадров, разрабатывающих GaAs МИС [8]. Разработанные университетской группой СВЧ-устройства для рынка телекоммуникационных систем будут выполняться на базе технологии ОММИС. В 2006 году французский инвестор Financiere Victoire S.A.S. при активном участии руководства ОММИС выкупил контрольный пакет акций у Philips, и компания получила самостоятельность. Руководство фирмы ОММИС с оптимизмом оценивает будущее компании и планирует ее рост [9].

Эпитаксия из паровой фазы металлоорганических соединений проводится на реакторе планетарного типа (planetary epitaxial reactor) фирмы Aixtron (Германия), в создании которого в свое время принимали участие специалисты ОММИС [10]. Так же, как и Filtronic, компания ОММИС проектирует свои микросхемы с помощью программных средств американской фирмы Applied Wave Research.

ОММИС изготавливает GaAs pHEMT-транзисторы по технологиям D01PH (мощные транзисторы на частоту 100 ГГц с длиной затвора 0,13 мкм для МИС усилителей мощности) и ED02AH (транзисторы на частоту 60 ГГц с длиной затвора 0,18 мкм для схем обработки смешанных сигналов). Освоены также процесс создания метаморфных HEMT с высоким содержанием индия: D01MH (частота 150 ГГц, длина затвора 0,13 мкм), E01MH (частота 150 ГГц, длина затвора 0,1 мкм) и D0071H (частота 160 ГГц, длина затвора 0,07 мкм). Для изготовления InP HBT на частоты от 500 МГц до 150 ГГц разработан технологический процесс DH151B. По мнению специалистов компании, особенно перспективна технология ED02AH, позволяющая изготавливать усилители на pHEMT с низким шумом, большим усилением и высокой линейностью, а также фазовращатели и аттенюаторы с малыми вносимыми потерями [11]. Главное достоинство технологии ED02AH – возможность создания на одном кристалле pHEMT-транзисторов "обедненного" и "обогащенного" режимов. На основе транзисторов "обедненного" режима (отрицательное напряжение V_t) реализуются СВЧ-функции, тогда как компактные цифровые устройства с малой потребляемой мощностью и высоким выходом можно выполнить только на основе транзисторов второго типа (положительное напряжение V_t).

МИС С-диапазона (4–6 ГГц) CGY2175AUN, выполненная с помощью процесса ED02AH и содержащая 6-бит фазовращатель и аттенюатор, а также переключатель прием/передача, буфер и конвертор с преобразованием последовательного кода в параллельный (рис.6) [11] позволяет сократить габариты, массу и стоимость приемо-передающих модулей для активных фазированных антенных решеток (АФАР), которые обычно содержат отдельные МИС этих устройств. В связи с быстрым развитием АФАР компания про-



гнозирует высокие темпы роста спроса на такие МИС, используемые в РЛС с АФАР как военного, так и гражданского назначения [9].

Европейская GaAs-промышленность располагает современными проектно-технологическими и производственными базами, позволяющими удовлетворять текущие и будущие потребности рынка в GaAs МИС как коммерческого, так и специального назначения. GaAs-промышленность Европы является инновационной и конкурентоспособной и успешно осваивает новые направления развития GaAs-технологии. Наиболее крупные европейские производители GaAs МИС – компании Filtronic и UMS. В отличие от UMS, продажи которой определяются главным образом интересами владеющих ею компаний, выпускающих электронную аппаратуру (Thales и EADS), Filtronic в большей степени зависит от внешних заказчиков. Продукция компании OMMIC в основном (60%) предназначена для телекоммуникационного оборудования. Сейчас компания пытается выйти на рынок АФАР, и ей еще предстоит утвердиться в качестве самостоятельного европейского производителя GaAs МИС.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bösch W.** GaAs Industry in Europe – Technologies, Trends and New Developments. Proceedings of the

CS MANTECH Conference, 2007, p. 7–10.

2. **O’Keefe M.** et al. GaAs pHEMT-Based Technology for Microwave Applications in a Volume MMIC Production Environment on 150-mm Wafers. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol.16, № 3, 2003, p. 376-383.

3. **O’Keefe M.** et al. Stepper Based Sub-0.25 μm Process for mm-Wave Applications. Proceedings of the 2005 International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing. New Orleans, USA, April 2005.

4. **McLachlan A.** et al. T/R Modules for Airborne Radar: The Challenges Ahead. Proceedings of the 35th European Microwave Conference. Paris, 2005, p.809-813.

5. www.filtronic.co.uk

6. www.ums-gaas.com.

7. www.ommic.com.

8. Compound Semiconductor, Oct. 13, 2005.

9. Compound Semiconductor, July 4, 2007.

10. Compound Semiconductor, March 7, 2000.

11. Highly Integrated MMIC Solutions for C-Band Applications.– Microwave Journal, vol. 50, № 6, 2007, p.124.