

Арсенидгаллиевые ИС

О. Сергеева

СОВРЕМЕННЫЙ УРОВЕНЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Совершенствование арсенидгаллиевой технологии ВЧ и СВЧ транзисторов, а также монолитных усилителей мощности активно способствует расширению рынка беспроводных систем связи. В то же время высокие темпы прироста продаж этого оборудования стимулируют создание относительно дешевых арсенидгаллиевых ВЧ схем, отличающихся большим быстродействием, ПД и меньшим, чем у кремниевых устройств, коэффициентом шума. В результате более половины выпускавшихся в 1995 году GaAs схем применялись в средствах связи. Ожидается, что к концу столетия эта тенденция только усилится.

По оценкам брокерской фирмы Robertson Stephens & Co, в 2000 году объем продаж GaAs приборов для систем связи (на частоту от 500 МГц до 80 ГГц и выше) достигнет 500 млн. долл. Прогноз фирмы Kenneth W. Taylor & Associates еще более оптимистичен: 2 млрд.долл. только для цифровых беспроводных систем связи, что составляет 20,8% от общего объема потребления ИС в системах этого типа. В целом объем продаж GaAs схем в 2000 году фирма Integrated Circuit Engineering (ICE) оценивает в 18,2 млрд. долл. (рис.1,2).

Несмотря на ожидаемые высокие темпы прироста объема продаж, с 1995 года отчисления американских фирм на НИОКР в этой области начали существенно сокращаться. Дело в том, что большая часть исследований по арсенидгаллиевой технологии проводилась по контрактам с Управлением перспективных разработок МО США (DARPA) в рамках программы MIMIC, финансирование которой завершилось в 1994 году.

Несмотря на то, что в конце того же года DARPA объявило о намерении финансировать программу MAFET (разработка перспективной технологии создания СВЧ аналоговых ИС), рассчитанную до конца 90-х годов, сохранить прежний уровень поддержки НИОКР до конца десятилетия не удастся. Одним из основных подрядчиков программы MAFET, очевидно, станет фирма Westinghouse, которая в I кв. 1995 года объявила об увеличении в два раза (до 929 м²) производственных мощностей своего предприятия по выпуску GaAs приборов.

В связи с уменьшением объемов финан-

сирования и свертыванием работ в области военной электроники многие изготовители осваивают рынок GaAs ИС гражданского назначения. С этой целью такие крупные поставщики арсенидгаллиевых схем по государственным заказам, как Hughes, Litton, M/A-COM, Northrop Grumman, Raytheon, Rockwell International, TRW, приступили к производству ИС на принципах арсенидгаллиевых заводов (предприятия, выполняющие те же функции, что и кремниевые заводы, т. е. полностью или частично изготавливающие полупроводниковые приборы по технической документации фирм-разработчиков, не имеющих необходимых производственных мощностей).

По оценкам специалистов отделения компонентов средств связи фирмы Hewlett-Packard, в усилителях мощности передатчиков портативных сотовых телефонов в основном используются шесть типов транзисторов: кремниевые биполярные и МОП, SiGe биполярные транзисторы на гетеропереходах (НВТ-

типа), арсенидгаллиевые НВТ-типа, полевые транзисторы с затвором Шоттки и псевдоморфные с высокой подвижностью электронов (РНЕМТ-типа) (табл. 1). Сравнение этих типов ВЧ устройств показало, что на более низких частотах рабочего диапазона сотовых систем (900 МГц) и при относительно больших значениях напряжения питания (4,8 В) предпочтение отдается кремниевым транзисторам прежде всего благодаря их более низкой стоимости. На этих частотах достаточно широкое применение находят и GaAs СВЧ монолитные схемы. При снижении напряжения питания на первый план выходят арсенидгаллиевые полевые транзисторы с затвором Шоттки и НВТ. Их положение на рынке упрочняется по мере повышения частоты и требований к величине выходной мощности. Однако здесь им могут составить конкуренцию более дешевые SiGe транзисторы НВТ-типа, сопоставимые по характеристикам с GaAs НВТ при напряжении питания 4,8 В. Правда, техно-

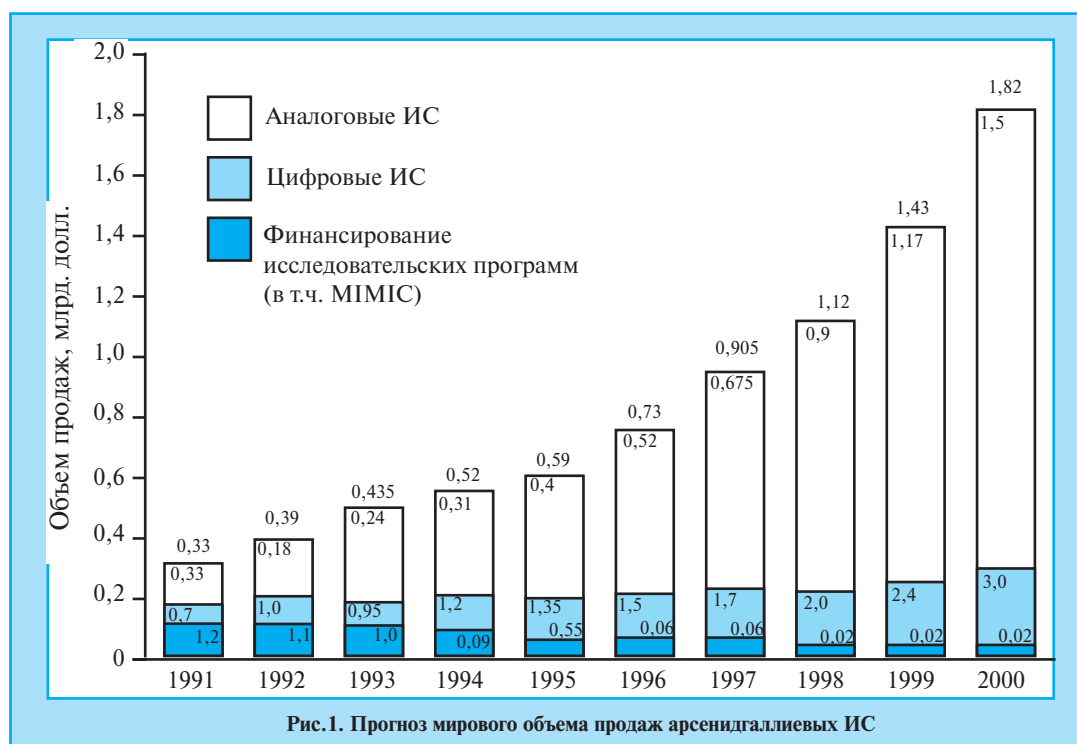


Таблица 1

Сравнение характеристик различных типов транзисторов, применяемых в усилителях мощности беспроводных портативных систем связи

Тип транзистора	РАЕ*, %		Стадия отработки технологии	Возможность работы от одного источника питания	Удельная стоимость в пересчете на 1 Вт выходной мощности
	4,8 В, 900МГц	3,0 В, 1,8ГГц			
Si биполярные	60-70	20-30	Отработана	Да	Низкая
Si полевые	40-60	15-25	Отработана	Да	Самая низкая
SiGe HBT-типа	60-70	40-50	НИОКР	Да	Потенциально низкая
GaAs полевые с затвором Шотки	60-70	45-55	Отработана	Нет	Средняя
GaAs PHEMT типа	60-70	50-60	На стадии освоения	Возможно	Высокая
GaAs HBT-типа	60-70	45-55	На стадии освоения	Да	Высокая

*Эффективная удельная мощность, равная выходной ВЧ мощности, деленной на сумму входной ВЧ мощности и общей входной мощности по постоянному току, и зависящая от частоты и напряжения питания.

логия SiGe транзисторов еще полностью не отработана, и крупносерийное производство их будет освоено лишь к концу столетия.

При низком напряжении питания с первыми двумя типами GaAs транзисторов начинают соперничать транзисторы PHEMT-типа, работающие в режиме обогащения и не требующие подачи отрицательного напряжения. Но они пока дороже полевых транзисторов с затвором Шотки.

Расширению применения арсенидгалиевой технологии в портативных средствах связи способствует разработка СВЧ монолитных схем с размещенными на одном кристалле активными и пассивными компонентами. Изготовление последних на арсениде галлия проще, чем на кремнии, благодаря использованию в качестве подложки полупроводящего материала с высоким удельным сопротивлением. Кроме того, на кри-

стале со схемой усилителя могут располагаться генераторы отрицательного напряжения, необходимые для полного отключения полевых транзисторов с затвором Шотки, а также схемы смещения и согласования. По мнению разработчиков фирмы Philips Semiconductor, с помощью арсенидгалиевой технологии можно получить лучшие результаты, чем при кремниевой, если в одной монолитной схеме необходимо объединить усилитель мощности, малошумящий усилитель и ВЧ переключатель. К тому же специалисты фирмы Ericsson Components утверждают, что цифровые радиотелефонные трубки, схемы которых выполнены на арсенидгалиевых приборах, лучше воспроизводят речь, чем аналогичные устройства на кремниевых ИС.

В последнее время большой интерес вызывают арсенидгалиевые выпрямители на базе полевых транзисторов с затвором Шотки, успешно заменяющие

кремниевые устройства в стабилизаторах на напряжение 600 В (что приводит к увеличению их коэффициента мощности), в низковольтных системах синхронного детектирования и средневольтных источниках питания для стабилизации выходного напряжения. В сравнении с кремниевыми GaAs выпрямители характеризуются меньшими коммутационными потерями и шумами, более высокой скоростью изменения тока (di/dt), а также отсутствием потерь, связанных с восстановлением обратного тока. Достоинства арсенидгалиевых выпрямителей на базе полевых транзисторов с затвором Шотки более полно проявляются на частотах выше 100 кГц, на которых в мощных ключевых схемах на кремниевых приборах возникают большие механические нагрузки.

Перспективы применения цифровых GaAs ИС в вычислительной технике не столь определены. Фирма Convex Computer еще в 1991 году начала отгрузки первых суперкомпьютеров на базе GaAs схем, но в 1992 году рынок больших машин начал сокращаться. К тому же фирма Stay Computer из-за расторжения договора Ливерморской лабораторией Лоуренса не смогла довести до конца затянувшуюся разработку 16-процессорной супермодели на базе арсенидгалиевых схем. Сейчас она пытается создать четырех- и восьмипроцессорные системы. Тем не менее руководство фирмы Vitesse, специализирующейся на создании цифровых GaAs ИС, настроено оптимистично. По мнению фирмы, перспективность применения арсенидгалиевых компонентов в ПК стоимостью 1 тыс. долл. в значительной степени компенсируется возможностью их использования в серверах стоимостью 10 тыс. долл. Несмотря на то, что доля таких машин на рынке ПК не превышает 5%, ежегодные продажи схем для них могут достигать нескольких сотен миллионов долларов. Правда, высказывается предположение, что большая часть потребности в цифровых GaAs ИС для вычислительной техники будет удовлетворяться за счет их производства для собственных нужд такими фирмами, как Fujitsu, NEC и Hitachi.

Данные опроса 14 фирм-изготовителей GaAs приборов, выступающих в роли арсенидгалиевых заводов, показали, что объем их производства (исчисляемый по общей площади обрабатываемых пластин) увеличился в 1993—1996 годах почти в три раза—с 4,85 до 16,3 м². Это свидетельствует о хороших перспективах развития рынка данных изделий. Почти все арсенидгалиевые заводы (кроме фирм Hughes, Litton и TRW) обрабатывают пластины диаметром 100 мм. Максимальная производительность—400 исходных пластин в неделю при односменной работе—у фирмы Samsung, которая планирует довести

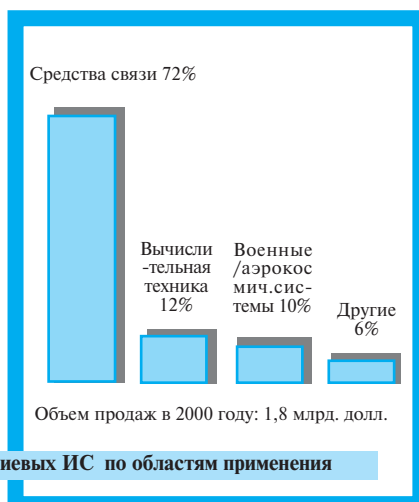


Рис. 2. Структура рынка арсенидгалиевых ИС по областям применения

этот показатель в 1999 году до 4000 исходных пластин в неделю. В 1999 году фирмы Celertek и M/A-COM планируют освоить обработку GaAs пластин диаметром 150 мм (производительность 1000 и 50 исходных пластин в неделю соответственно).

В 1996 году 52% выпускаемых арсенидгаллиевыми заводами схем предназначались для собственных нужд и 48% — для продажи на рынке (против 61 и 39%, соответственно, в 1994 году). Соотношение аналоговых и цифровых ИС в сравнении с 1994 годом не изменилось — 95:5%. В 1996 году цифровые ИС изготавливали фирмы Raytheon, Texas Instruments, TriQuint и TRW (речь идет только о фирмах, выступающих в роли арсенидгаллиевых заводов, и потому продукция фирмы Vitesse, крупного изготовителя цифровых GaAs ИС, не учитывается). Ожидается, что в 2000 году это соотношение составит 86:14%, а в число изготовителей цифровых ИС войдет фирма Hughes, которая полностью переориентируется на их производство.

На долю дискретных GaAs приборов в 1996 году приходилось 16% объема выпуска арсенидгаллиевых заводов, к 2000 году, по прогнозам, она составит 14%.

Все 14 фирм выпускают полевые транзисторы с затвором Шоттки, минимальная ширина линии в которых равна 0,25 мкм. В 1996 году транзисторы НЕМТ-типа выпускали лишь фирмы Texas Instruments и TRW (минимальная ширина линии 0,15 мкм), НВТ-типа — Rockwell, Texas Instruments и TRW (минимальная ширина линии — 2 мкм).

Основная задача поставщиков GaAs приборов — снижение их стоимости. Как отмечает руководитель отделения маркетинга фирмы Vitesse Гарднер, компании, продвигающие GaAs приборы на рынок, стремятся добиться двукратного улучшения технических характеристик изделий при увеличении цены менее чем в два раза. Этот процесс развивается довольно успешно: только в последние пять лет цены на арсенидгаллиевые приборы снизились в десять раз. Следует особо отметить роль фирм Fujitsu, Motorola и NEC в разработке арсенидгаллиевой технологии и становлении рынка GaAs ИС.

Наиболее удачные разработки GaAs приборов в последнее время созданы японскими фирмами Fujitsu и Oki Electronic, занимавших в 1995 году первое и восьмое место, соответственно, в списке ведущих изготовителей GaAs устройств (табл. 2). На фирме Fujitsu разработан арсенидгаллиевый усилитель мощности на полевых транзисторах с выходной мощностью более 10 Вт в диапазоне частот 12,7–13,7 ГГц, что в 1,5 раза улучшает характеристики предыдущих моделей фирмы. Fujitsu также выпускает GaAs СВЧ монолитные схемы для цифровых сотовых радиотелефонов, в которых на кристалле, помимо самой

схемы, изготовлены источник питания на напряжение 3,5 В, полевой транзистор и схема согласования.

Фирма Oki Electronics, активно выступающая на рынке арсенидгаллиевых компонентов для персональных систем связи, в конце 1995 года выпустила три новые ИС на диапазон частот 850 МГц — 2,4 ГГц, работающие при напряжении 3 В: два усилителя и один предусилитель мощности. По утверждению администрации фирмы, новые низковольтные схемы по рабочим характеристикам (за исключением меньшей потребляемой мощности) не отличаются от устройств на напряжение 5 и 7 В. В персональных системах связи пиковый ток усилителей мощности типа KGF1606 и KGF1608 превышает 4,5 А, КПД — 70%. Схемы поставляются в керамических корпусах по цене 10,74 (KGF1606) и 11,53 долл. (KGF1608). Они предназначены для аналоговых и цифровых приемников сотовых систем связи, пейджеров и беспроводных локальных сетей.

Фирма Oki Electronics начала производство GaAs ВЧ приборов в 1980 году. Первую GaAs СВЧ монолитную схему широкополосного усилителя с АРУ для беспроводных систем связи она выпустила в 1994 году. Сейчас у нее два предприятия по обработке арсенидгаллиевых пластин.

Монолитную ВЧ схему преобразователя с понижением частоты на напряжение питания 3 В выпустила и фирма TriQuint Semiconductor, основными заказчиками которой являются изготовители сотовых радиотелефонов и модемов. Схема типа TQ92223 объединяет малошумящий усилитель и ВЧ смеситель. Она считается дешевой альтернативой устройствам на дискретных ком-

понентах, обладающим к тому же и лучшими характеристиками. В частности, коэффициенты усиления и шума схемы равны 20 и 2,5 дБ соответственно. Ее разработку стимулировали требования заказчиков к снижению напряжения питания. В настоящее время фирма разрабатывает вариант схемы с теми же параметрами, но на 30% дешевле. Это свидетельствует о больших перспективах GaAs-технологии.

К интересным разработкам фирмы TriQuint относят GaAs ВЧ усилители мощности, работающие в двух режимах. Усилитель мощности типа TQ9143 может работать в аппаратуре стандартов IS-54/136 (многостанционный доступ с временным разделением каналов — TDMA) и IS-19 (перспективная подвижная телефонная система — AMPS, разработанная в 70-е и реализованная в 80-е годы) в диапазоне частот 824–849 МГц. Большая часть устройства согласования с 500 Ом нагрузкой изготовлена на одном кристалле с двухкаскадным усилителем. В AMPS режиме выходная мощность схемы равна 1,4 Вт, в TDMA — 1,0 Вт. Цена схемы, монтируемой в пластмассовый корпус типа SO-16 — 4,5 долл. при закупке партии в 100 тыс. шт. Другая схема — типа TQ147 — по своим характеристикам во многом аналогична первой. Ее цена — 3,25 долл. при закупке таких же партий.

Большой интерес вызывают новые схемы фирмы Vitesse, занимающей пятое место в списке ведущих поставщиков GaAs приборов и успешно освоившей выпуск цифровых устройств (в 1995 году доходы фирмы составили 42,5 млн. долл. против потерь в 4,1 млн. долл. в 1994 году). Во второй половине 1995 года фирма объявила о создании нового по-

Таблица 2
Ведущие фирмы-изготовители GaAs ИС в 1994–1995 годах

Фирма	Место на рынке в 1995 г.	Объем продаж, млн. долл.		
		Аналоговые	Цифровые	Всего
Fujitsu	1	56 (45)*	36 (38)	92 (83)
Anadigics	2	53 (35)	—	53 (35)
TriQuint	3	19 (10)	28 (20)	47 (30)
Thomson-CSF	4	36 (44)	—	44 (36)
Vitesse	5	2 (—)	36 (28)	38 (28)
TI	6	30 (25)	5 (4)	35 (29)
Philips	7	32 (25)	—	32 (25)
Oki	8	27 (22)	4 (4)	31 (26)
Rockwell	9	22 (19)	5 (5)	27 (24)
NEC	10	25 (18)	—	25 (18)
Другие		90 (75)	21 (21)	111 (96)
Итого		400 (310)	135 (120)	535 (430)

*Здесь и далее в скобках приведены данные за 1994 год

коления быстродействующих GaAs специализированных схем семейства GLX для систем передачи и коммутации сигнала. Они выполнены по технологии изготовления GaAs ИС с высокой степенью интеграции H-GaAs IV с 0,5-мкм топологическими нормами. Схемы с архитектурой “моря вентиляей” содержат 25 тыс.—250 тыс. вентиляей. При их разработке ставилась задача обеспечить низкую рассеиваемую мощность (потребляемый ток — менее 0,1 мА/вентиляй). Схемы могут работать от одного источника питания на напряжение 3,3 В или от двух источников с пониженными значениями напряжения вплоть до 1,8 В без ухудшения характеристик.

Для обеспечения работы схем в системах дальней связи, автоматическом тестовом оборудовании и т.п. в любую вентиляйную матрицу семейства GLX могут быть включены блоки мегачеек (стандартных ячеек, обеспечивающих специализацию схемы: СОЗУ емкостью до 100 бит, многопортовые регистры, схемы ФАПЧ, синхронизирующие устройства и др.).

В I кв. 1996 года фирма планировала начать поставки опытных образцов новых схем, а во II кв. — освоить их серийное производство.

С помощью усовершенствованного процесса H-GaAs IV Vitesse объединила 16 мультиплексоров/демультиплексоров, обеспечивающих скорость передачи данных 622 Мбит/с в двух схемах для сетей SONET/SDH (синхронная оптическая сеть/синхронная цифровая сеть). По утверждению разработчиков, в этом комплекте ИС достигнут самый высокий на сегодня уровень интеграции для систем с пропускной способностью 10 Гбит/с по цене современных устройств с быстродействием 2,5 Гбит/с. Фирма планирует объединить элементы схем, выполненные в виде мегачеек, со специализированной схемой. Это позволит создать устройство, пригодное для использования в оборудовании глобальных сетей, поставляемом фирмами NEC, Alcatel, Lucent и Nortel. Начальная цена схем VSC80071/VSC8072 в СВЧ корпусах — 2,5 тыс. долл. Ведется разработка более дешевого корпуса. Кроме того, с вводом в строй во второй половине 1998 года новых производственных мощностей в Колорадо Спрингс, где будут обрабатываться арсенидгаллиевые пластины диаметром 150 мм, ожидается дальнейшее снижение цен на изделия фирмы.

В волоконно-оптических локальных сетях применяются и арсенидгаллиевые приборы фирмы Ericsson (в основном полевые транзисторы с затвором на основе p-n перехода). Фирма также выполняет модули для волоконно-оптических локальных сетей, обеспечивающие скорость передачи данных 2,5 Гбит/с на GaAs ИС со средним уровнем интеграции.

Большой интерес вызвала новая монолитная СВЧ схема приемника фирмы TRW, в которой впервые объединены 19 НЕМТ и 9 НВТ транзисторов, образую-

щих три усилителя на НЕМТ, НВТ смеситель и фильтр ПЧ. Усиление преобразования схемы, размещенной на кристалле размером 2,7х2,9 мм, равно 18 дБ в полосе частот 1,4 — 2,6 ГГц, минимальный коэффициент шума — 2,3 дБ. Разработчики считают, что это первая реально работающая монолитная схема усилителя и самый сложный прибор, объединяющий GaAs транзисторы НЕМТ и НВТ типа — для изготовления каждого типа транзистора требуется провести пять процессов МПЭ. Правда, с точки зрения изготовителей кремниевых схем 28 транзисторов на одном кристалле — далеко не рекордная плотность упаковки элементов.

Считается, что эта работа позволит в будущем создать монолитные схемы на более высокие частоты (максимальная частота GaAs НЕМТ достигает 94 ГГц, НВТ — 200—300 ГГц), которые найдут применение в передатчиках и приемниках спутниковых систем связи, работающих на 20, 35 и 44 ГГц.

Как видно из табл. 1, наиболее дешевые арсенидгаллиевые ИС освоены в крупносерийном производстве схемы на полевых транзисторах с затвором Шоттки. Однако у них есть серьезный недостаток — необходимость применения второго источника питания с отрицательным напряжением. Поэтому преимуществ таких транзисторов и схем на их основе по рабочей частоте и выходной мощности часто сводятся на нет увеличением размеров и стоимости прибора. Попытки решения этой проблемы путем использования кремниевых ИС преобразователей постоянного тока не дали ощутимых результатов: экономия площади платы оказалась недостаточной, а необходимость применения внешних конденсаторов емкостью 5 мкФ вызывала дополнительные проблемы, в том числе связанные с увеличением занимаемой площади платы.

С появлением на рынке GaAs преобразователя постоянного напряжения фирмы Anadigics на ток 100 мА, работающего на частоте 250 кГц с внешним конденсатором емкостью всего 0,1 мкФ и монтируемого в малогабаритный корпус типа S0-25 размером 4х5 мм, ситуация может измениться (аналогичный кремниевый преобразователь типа 7660 на частоту 10 кГц требует применения конденсатора емкостью 10 мкФ и поставляется в корпусе типа SO-8 больших размеров). В новой схеме типа AVC7660, выполненной на базе четырех GaAs полевых транзисторов с затвором Шоттки, использованы такие их преимущества перед кремниевыми приборами, как большая скорость переключения, меньшие значения сопротивления во включенном состоянии, порогового напряжения и паразитной емкости (благодаря изготовлению на подложке с удельным сопротивлением $10^{18} — 10^{19}$ Ом·см).

В настоящее время на фирме создаются схемы с высоким КПД преобразования для работы с единичными батареями А-типа. По мнению разработчиков, эта схема открывает новые возможности для применения арсенидгаллиевой технологии.

Не прекращаются НИР, направленные на совершенствование процессов изготовления и улучшения характеристик GaAs приборов. Так, учеными лаборатории Линкольна Массачусетского технологического института предложен низкотемпературный (220°C) МПЭ процесс для формирования диэлектрического слоя под затвором, представляющего собой пленку арсенида галлия с равномерно распределенными преднамеренно внесенными дефектами. Утверждается, что при значениях прямого напряжения смещения 3 В вместо обычных 0,6–0,7 В для транзисторов этого типа ток утечки затвора равен примерно 1 мкА на 1 мкм² его площади.

Хотя ввод дополнительной операции МПЭ-формирования диэлектрического затворного слоя приводит к удорожанию технологического процесса, затраты могут быть компенсированы положительным эффектом при создании приборов для конкретных областей применения. При изготовлении цифровых GaAs ИС на базе полевых транзисторов с затвором Шоттки новая технология позволяет отказаться от этапа формирования разделительного слоя между металлическим затвором и сильнолегированной имплантированной областью, что способствует сохранению высокого пробивного напряжения затвора.

Как утверждают, с помощью новой технологии возможно создание комбинированных GaAs ИС (на базе p- и n-канальных полевых транзисторов с затвором Шоттки). Правда, пока параметры этого процесса не оптимизированы.

Весьма перспективны и арсенидгаллиевые полевые транзисторы с затвором Шоттки нового типа для построения усилителей с высоким КПД, работающих от одного источника питания. Это позволяет упростить конструкцию источника питания и продлить срок службы батарей. В результате формирования затворного диэлектрика транзистора НЕМТ-типа с помощью низкотемпературного процесса удалось исключить достаточно трудоемкую операцию изготовления утолщенного затвора. По новой технологии также могут быть изготовлены фотопроводящие переключатели и сверхширокополосные фотодетекторы.

*Status-96, ICE Corp., 1996, p.4-19 —4-23.
Electronic Components, 1996, May, p.E46-E56
Solid State Technology, 1996, v.39, N3, p.184
Electronic Engineering Times, 1996, N927, p.33,38
Semiconductor International, 1996, v.19, N5, p.28;
1995, v.18, N13, p.23
Electronic News, 1995, v.41, N2083, p.2,62
IEEE Journal of Solid State Circuits,
1995, v.30, N10, p.1088-1095
IEEE Electron Device Letters,
1995, v.16, N10, 451-453
Microelectronic Journal, 1995, v.26, N6, p.579-594;
1995, v.26, N8, p.737-738*