

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ СВЧ-ПРИБОРЫ И ТЕХНОЛОГИИ НЕВОСПЕТЫЕ ГЕРОИ БЕСПРОВОДНОЙ РЕВОЛЮЦИИ

Твердотельная СВЧ-электроника в последнее десятилетие прогрессирует чрезвычайно бурно. И если цифровая электроника в тот же период в основном развивалась в направлении совершенствования существующих технологий, главным образом кремниевых, то в СВЧ-электронике происходит активное освоение новых материалов и приборных структур. Причем речь уже не идет о фундаментальных исследованиях – на рынке появляются все новые и новые приборы с невиданными ранее характеристиками. Все это открывает перед разработчиками и микросхем (в том числе – типа “система на кристалле”), и аппаратуры совершенно новые горизонты. Попробуем охарактеризовать современное состояние мировой твердотельной СВЧ-электроники, затронув вопросы конструкции приборов, перспективных материалов и технологий, а также экономический аспект изготовления СВЧ-компонентов.

ВОЕННЫЙ МИФ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ

Мы будем рассматривать в основном активные приборы – транзисторы и монолитные интегральные схемы (МИС). Однако прежде всего разберемся, каковы основные области применения твердотельных СВЧ-приборов. Отвечая на подобный вопрос, отечественный специалист сразу подумает об оборонном направлении. И действительно, все развитие СВЧ-электроники в нашей стране определялось и определяется военными программами. В качестве гражданских задач СВЧ-электроники называются РЛС для управления воздушным движением, спутниковые трансиверы и прочие не слишком массовые сферы применения. В то же время, в мире в це-

Таблица 1. Рынок мощных GaAs-транзисторов в 1999 году по данным корпорации Allied Business Intelligence [1]

Область применения	Объем продаж, млн. долл.	Доля, %
Сотовая / персональная связь	93	38
Радары	12	5
Военная техника	5	2
Авионика	7	3
Спутниковые системы	44	18
Системы связи "точка-точка" в лицензируемых диапазонах	34	14
Системы связи в нелицензируемых (ISM) диапазонах	17	7
LMDS-системы	17	7
Прочие	15	6
Всего	246	100



И.Шахнович

лом картина совершенно иная. Действительно, изначальный импульс перспективным исследованиям в СВЧ-электронике в значительной мере придает именно оборонные программы (в частности – знаменитая программа MIMIC в США). Но вот дальнейшая судьба СВЧ-технологий уже совсем другая – не только и не столько военная.

В диапазонах частот до 2 ГГц основной потребитель СВЧ-компонентов (пассивных, транзисторов и СВЧ МИС) – системы сотовой связи. В мире свыше миллиарда абонентов различных сотовых систем, объем годового производства сотовых телефонов уже в 2003 году превысил 500 млн. шт. Еще в 1999 году в аппаратуру сотовой связи (базовые станции) шло 38% GaAs-транзисторов мощностью свыше 10 Вт (табл.1).

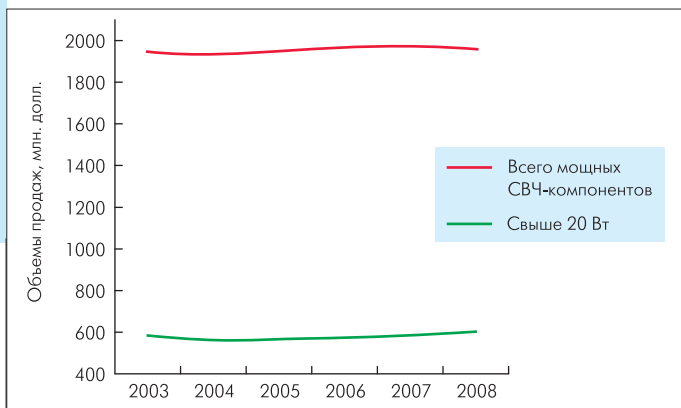


Рис. 1. Состояние и прогноз рынка мощных твердотельных СВЧ-компонентов. Источник: ABIresearch, Philips [2]

В 2003 году объем рынка мощных СВЧ-приборов аналитики компании ABIresearch [2] определили в 1946 млн. долл. Из них примерно 60% пришлось на приборы мощностью менее 4 Вт, а около 30%, или 579 млн. долл., – на приборы мощностью свыше 20 Вт (рис.1). Весьма показательным, что 76% рынка последних принадлежит базовым станциям сотовой связи. На военные и космические цели расходуется в сумме 9% (рис.2).

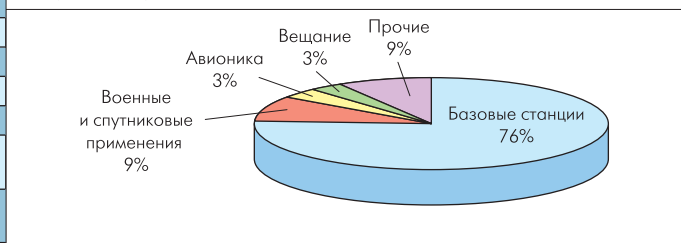


Рис.2. Области применения твердотельных СВЧ-компонентов мощностью свыше 20 Вт [2]

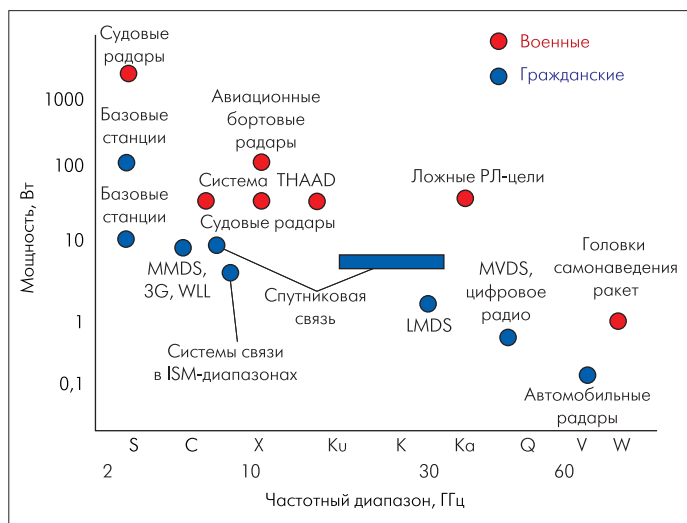


Рис.3. Прогноз основных областей применения высоковольтных GaN-транзисторов [3]. Ситуация характерна для всех мощных СВЧ-приборов

Очевидно, что львиная доля всех приборов гражданского назначения предназначена для диапазонов 0,8–1,9 (сотовая связь), 2,4 и 5–6 ГГц (беспроводные локальные и персональные сети передачи информации) (рис.3). В ближайшее время следует ожидать всплеска интереса к диапазонам от 3 до 11 ГГц, что связано с планами создания региональных и локальных беспроводных сетей передачи информации стандарта IEEE 802.16-2004 (WiMAX).

Уже весьма ощутима потребность в компонентах для более коротковолновых изделий, вплоть до миллиметрового диапазона. Среди основных коммерческих областей применения СВЧ-приборов в этих диапазонах прежде всего отметим так называемые системы сотового телевидения – LMDS/ MVDS (Local Multipoint Distribution Service / Multipoint Video Distribution Systems) – американская / европейская системы, работающие в диапазонах 27–31 и 40,5–42,5 ГГц, соответственно. Еще больше расширил границы частотных диапазонов сетей передачи информации стандарт IEEE 802.16-2004, определив верхнюю границу в 66 ГГц. Кроме того, Федеральная комиссия связи США выделила лицензируемые диапазоны 71–76 и 81–86 ГГц для создания сверхбыстрых систем передачи данных с радиусом действия 1–2 км.

Не менее значимая область массового коммерческого применения СВЧ-приборов – системы спутниковой связи, прежде всего – оборудование наземных станций систем VSAT (спутниковых систем связи с малой апертурой – т.е. с относительно узконаправленным лучом). Подобные системы весьма распространены и работают в Ku- (13,75–14,5 ГГц) и Ka-диапазоне (29,5–30 ГГц). Отметим, что только для Ku-диапазона потребность 2004 года в корпусированных СВЧ-усилителях мощности превысила 300 тыс. шт. с тенденцией превысить уровень годовой потребности в 500 тыс. после 2005 года [4]. Причем здесь речь не идет о приемниках так называемых систем прямого спутникового вещания (DBS), рынок которых значительно шире (только в США свыше 18 млн. абонентов). Системы спутниковой связи Ka-диапазона лишь разворачиваются, но и здесь прогнозы весьма многообещающие – эксперты говорят об объемах продаж порядка 500 тыс. устройств в 2005 году с последующим увеличением этого показателя до 1,5 млн. устройств в год.

Многое сулит такой относительно новый сегмент СВЧ-рынка, как цифровое радиовещание (DAB). Подобные системы развертываются в диапазонах 6–42 ГГц, причем диапазон свыше 12 ГГц занимает 80% всех DAB-устройств. В 2003 году было произведено поряд-

ка 250 тыс. устройств для систем цифрового радиовещания, стоимость только GaAs-элементов в DAB-приемниках составила примерно 40 млн. долл. Отметим, что в данной области в 2002 году был резкий спад (менее 250 тыс. устройств по сравнению с 350 тыс. в 2000 году), однако сейчас наметился устойчивый рост.

Еще одна массовая область применения СВЧ-компонентов – это автомобильные радары различного назначения (радары дальнего действия для систем автоматического контроля курса, системы предупреждения/предотвращения столкновений, а также радары ближнего действия для бокового и заднего обзора). Рабочие диапазоны подобных систем различны – 19, 24, 60 и 77 ГГц. Автомобильные радары (рис.4) уже производятся и используются, но пока в дорогих автомобилях, составляющих менее 1% рынка, а потому не могут называться массовыми. Однако в этой области наметилась ярко выраженная тенденция к удешевлению устройств, в том числе связанная с развитием СВЧ МИС, что позволяет прогнозировать рост подобных устройств до 30 млн. единиц в 2008 году.

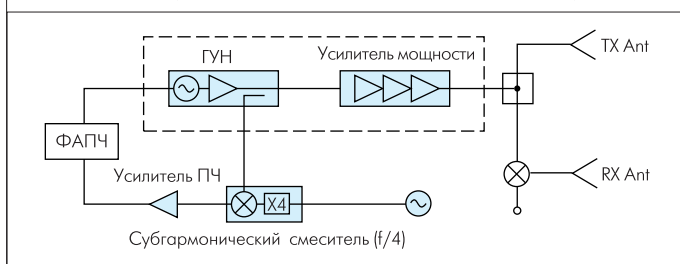


Рис.4. СВЧ-модуль одного канала типичного 77-ГГц автомобильного радара непрерывного излучения. Синим цветом выделены СВЧ МИС

Мы упомянули далеко не все возможные массовые области применения твердотельных СВЧ-устройств, однако даже этого достаточно, чтобы убедиться – рынок коммерческих СВЧ-систем, уже сегодня достаточно емкий, переживает стадию интенсивного развития. Если в 2003 году объем этого рынка составлял порядка 2 млрд. долл., то уже к 2006 аналитики компании Strategy Analytics [5] прогнозируют его рост до 4 млрд. долл. Помимо объемов продаж, постоянно совершенствуются и характеристики СВЧ-приборов. Причем кроме традиционного для СВЧ-электроники набора параметров – диапазон частот, мощность, рабочее напряжение, линейность, уровень собственных шумов, надежность, долговечность и т.п. – едва ли не на первый план выходит стоимостный показатель.

ДЕЙСТВУЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ

В области диапазонов частот от единиц до сотен гигагерц и мощностей от милливатт до сотен ватт используются разнообразные

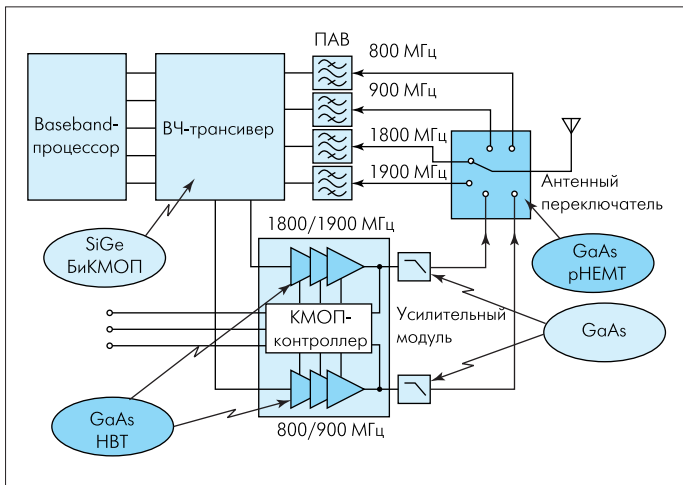


Рис.5. Основные СВЧ-блоки 4-диапазонного GSM/GPRS-телефона

полупроводниковые технологии и материалы. Основные типы транзисторов в этой области – это традиционные полевые и биполярные приборы, полевые транзисторы с затвором Шоттки (MESFET), полевые транзисторы с гетеропереходом (HFET, они же HEMT), а также биполярные транзисторы с гетеропереходом (HBT).

С точки зрения полупроводниковых материалов, на рынке СВЧ-электроники безраздельно доминируют GaAs-приборы: в самой емкой рыночной нише – усилители мощности сотовых телефонов – им принадлежит 80% всего рынка (рис.5) [6]. Причем когда сегодня говорят о GaAs, имеют в виду прежде всего гетероструктуры – AlGaAs/GaAs, InGaAs/GaAs и т.д. – и созданные на их базе транзисторы, биполярные (HBT) и полевые с барьером Шоттки (HEMT). Арсенид галлия традиционно рассматривался как основной материал для СВЧ-приборов. И тому есть очевидные предпосылки: подвижность электронов – $8500 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, ширина запрещенной зоны и напряженность поля пробоя – $1,42 \text{ ЭВ}$ и $4 \cdot 10^5 \text{ В/см}$, соответственно, – делают GaAs предпочтительнее кремния в области СВЧ. Это был первый освоенный промышленностью материал из группы полупроводников A^3B^5 , с которыми и сегодня связаны многие перспективы СВЧ-электроники.

Не сошел с арены и "старый добрый" кремний. В нише сотовых телефонов приборы на основе этого материала занимают порядка 20% рынка. Обладая приемлемыми характеристиками в области диапазонов частот до 3 ГГц (с тенденцией расширения до 10 ГГц), кремниевые транзисторы (биполярные, МОП, Би-КМОП) развиваются весьма интенсивно. Порядка 10 лет назад начали интенсивно прогрессировать и сегодня весьма распространены SiGe-технологии, прежде всего – SiGe HBT и Би-КМОП-транзисторов, которые можно рассматривать как развитие Si-технологий [7].

На фоне этих доминирующих сегодня технологий развиваются направления, которые, возможно, будут играть важнейшую роль в СВЧ-электронике завтра. Прежде всего, речь идет о фосфиде индия и твердых растворах на его основе (AlInP). В последние годы наблюдается необычайно бурное развитие широкозонных материалов – группы III-нитридов, прежде всего – GaN, а также приборов на основе карбида кремния SiC. Появляется все больше сообщений о транзисторах на основе экзотических пока материалов InAs, AlSb и InSb, сулящих сверхбыстродействие при минимальном энергопотреблении. Исследуются возможности создания полупроводниковых приборов на основе алмазов. Все эти технологии переживают различные фазы становления, не занимая пока ощутимой доли на рынке. Но их время еще впереди.

КРЕМНИЕВЫЕ LDMOS-ТРАНЗИСТОРЫ

Достоинства кремниевых приборов очевидны – это и низкая стоимость пластин, и отработанность технологии, и относительная простота интеграции аналоговых и цифровых схем на одном кристалле. Причем в связи с минимизацией размеров элементов частотные характеристики Si-транзисторов в последние 10 лет повысились настолько, что, обладая подвижностью электронов (в собственном полупроводнике) $1350 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ против $8500 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ для GaAs, они сегодня успешно конкурируют с последними в диапазонах до 3 ГГц.

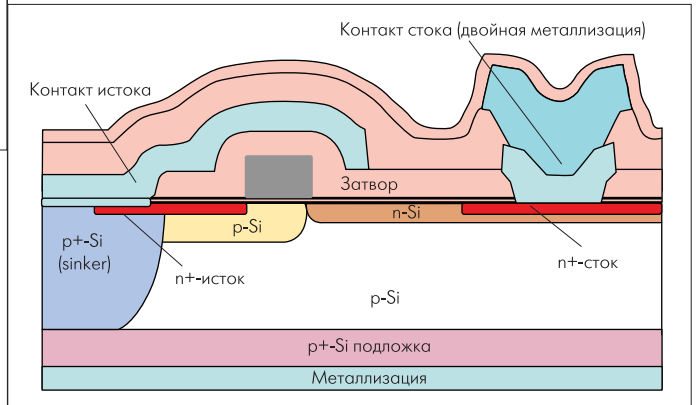


Рис.6. Сечение СВЧ LDMOS-транзистора

В области мощных кремниевых СВЧ-транзисторов лидируют приборы, произведенные по технологии LDMOS (МОП с боковой диффузией) (рис.6). Принципиальное ее отличие от традиционной МОП-технологии – несимметричная структура транзистора. На p^+ -подложке выращивается относительно слабо легированный эпитаксиальный p -слой, назначение которого – уменьшить выходную емкость сток-исток и увеличить пробивное напряжение. Со стороны истока формируется сильнолегированная p^+ -область – sinker (буквально – грузило, пирожок). Под высоколегированной n^+ -областью истока формируют дополнительную тонкую p -область, под областью стока – n -область. Первая определяет пороговое напряжение и параметры отсечки канала, вторая позволяет увеличить напряжение пробоя и предотвращает инжекцию горячих электронов в подзатворный окисел. Металл истока делают нависающим над затвором как экран, во избежание паразитной емкостной отрицательной обратной связи (эффект Миллера).

Еще в 2000 году компания Motorola представила LDMOS-транзистор с длиной затвора 0,6 мкм, толщиной подзатворного окисла 40 нм и пробивным напряжением исток-подложка 65 В [8]. При суммарной ширине затвора 480 мм транзистор работал в двухтакт-

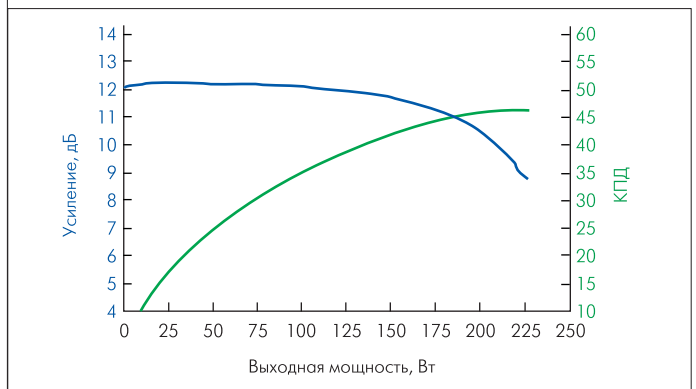


Рис.7. Мощностная зависимость КПД и усиления 220-Вт транзистора компании Motorola [8]

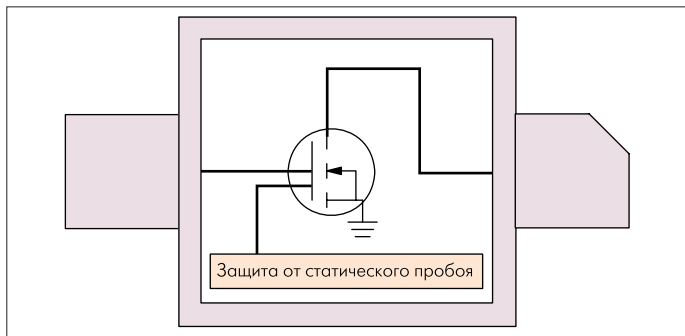


Рис. 8. LDMOS-транзистор SLD-2083CZ компании Sirena Microdevices

ном режиме с выходной мощностью 220 Вт на частоте 2,12 ГГц при рабочем напряжении 28 В, демонстрируя КПД 46% (рис. 7). Типичный современный LDMOS-транзистор – прибор SLD-2083CZ компании Sirena Microdevices (рис. 8). Он предназначен для работы в диапазоне 300–2200 МГц с усилением 18 дБ и выходной мощностью 10 Вт. Пороговое напряжение затвор-сток – 3,8 В, напряжение пробоя – 65 В. Диапазон рабочих температур – -20...+90°C, корпус – керамический, 4,1x12,7x2,3 мм.

Компания производит и LDMOS-усилители. Новинка – усилительный модуль SDM-09120 для базовых станций в диапазоне 925–960 МГц с выходной мощностью 120 Вт, усилением 15 дБ и рабочим напряжением до 35 В (рис. 9). КПД усилителя – до 42%, размеры корпуса – 50,8 x 50,8 x 8,4 мм.

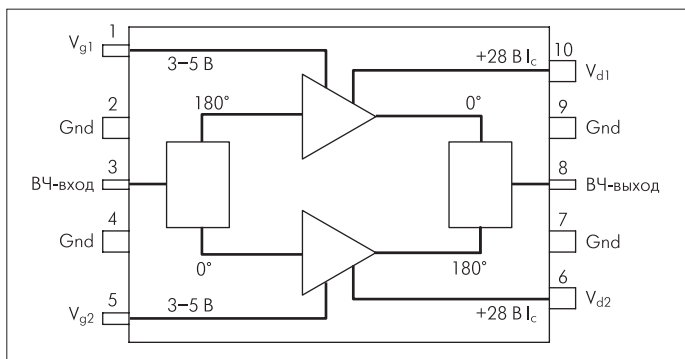


Рис. 9. Функциональная схема усилителя SDM-09120 компании Sirena Microdevices

Другой пример – *n*-канальный LDMOS-транзистор MRF6P3300H компании Freescale Semiconductor для диапазона 470–860 МГц с рабочим напряжением 32 В, усилением порядка 19 дБ и выходной мощностью 300 Вт при КПД 58% (на максимальной мощности). По утверждению представителей компании, построив на транзисторах MRF6P3300H усилитель типичной станции ТВ-вещания мощностью 5 кВт, благодаря высокому КПД можно ежегодно экономить до 5200 долл.

Сегодня самая масштабная область применения LDMOS-приборов – усилители базовых станций сотовой связи. Будучи разновидностью кремниевой технологии, LDMOS обладает огромным достоинством – гораздо более низкой по сравнению с остальными материалами себестоимостью. За это рынок "прощает" LDMOS-приборам низкую плотность мощности и проблемы с линейностью характеристик (уровень интермодуляционных помех достаточно высок – -30...-25 дБс).

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С ГЕТЕРОПЕРЕХОДОМ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ А³В⁵

Один из самых распространенных сегодня типов СВЧ-транзисторов – HBT-транзисторы на основе GaAs. По данным исследовательской

фирмы iSupply, в 2003 году 47,1% транзисторов, используемых в сотовых телефонах, представляли собой GaAs HBT. Основные причины тому – однополярное питание (по сравнению с необходимостью в отрицательном напряжении на затворе для MESFET), а также меньшая занимаемая площадь кристалла, поскольку структура транзистора – вертикальная.

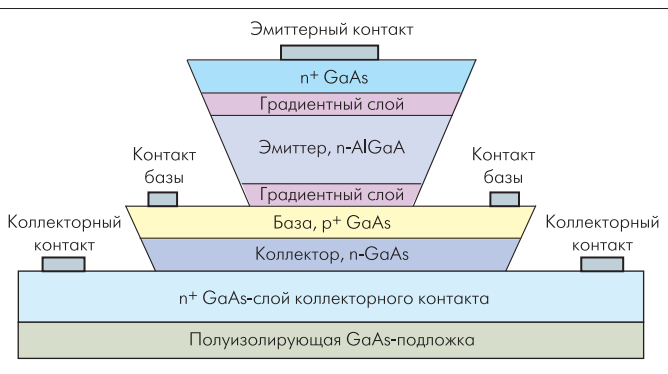


Рис. 10. Типовая структура GaAs HBT

Рассмотрим типичный GaAs HBT (рис. 10). Его структура формируется на GaAs-подложке с высоким сопротивлением (порядка 10^7 Ом/см). Коллектор образует *n*-GaAs-слой с концентрацией примеси $3 \cdot 10^{16}$ см⁻³. База представляет собой сильнолегированную *p*⁺-GaAs область с концентрацией примеси (как правило, бериллий или углерод) порядка $5 \cdot 10^{18}$ – 10^{19} см⁻³. Эмиттер – это слаболегированный слой AlGaAs *n*-типа, ширина запрещенной зоны которого выше, чем в GaAs-базе. В области омических контактов коллектора и эмиттера формируют дополнительные высоколегированные слои. Разумеется, приведенная структура – максимально упрощенная.

Не вдаваясь глубоко в физику работы прибора, отметим, что в силу различной ширины запрещенных зон в базе и эмиттере в районе перехода образуется разрыв границы валентной зоны и зоны проводимости (рис. 11). В результате высота потенциального барьера для дырок и электронов оказывается различной. Это приводит к увеличению инжекции электронов из эмиттера в базу и одновременно – к сокращению потока дырок из базы в эмиттер. Возрастает коэффициент эффективности эмиттера, а вместе с ним – и усиление транзистора. Важнейшее следствие данного эффекта – HBT-транзисторы можно производить с высоколегированной базой и слаболегированным эмиттером.

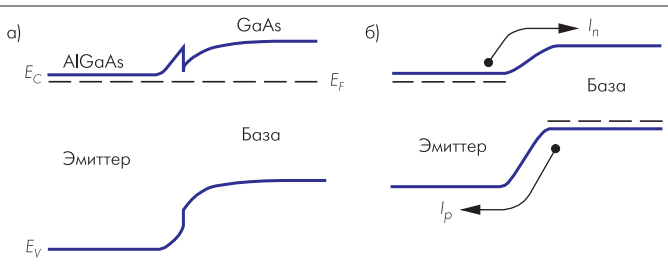


Рис. 11. Энергетическая диаграмма гетероперехода эмиттер/база: а) резкий переход AlGaAs/GaAs, б) плавный переход

Высокий уровень легирования базы, вкпе с низколегированным эмиттером, приводит к снижению сопротивления базы и емкости перехода эмиттер-база. Уменьшается и емкость коллектор-подложка. Это обуславливает высокочастотные свойства HBT – высокие значения граничной частоты f_T и максимальной частоты усиления мощности f_{max} . Кроме того, возможно добиться чрезвычайно низкого управляющего напряжения базы (в том числе используя специ-

Граничная частота f_T – частота, при которой усиление транзистора по току (β для биполярных транзисторов) становится равным 1 (0 дБ). В биполярном транзисторе зависит от времени пролета носителями базы и коллектора (τ_b и τ_c), а также от температуры структуры T , емкости переходов эмиттер-база C_{be} , база-коллектор C_{bc} , сопротивления эмиттера, коллектора и базы (R_e, R_c, R_b), а также тока коллектора I_c :

$$f_T = \frac{1}{2\pi \frac{qkT}{qI_c} (C_{be} + C_{bc}) + (R_e + R_c)C_{bc} + \tau_b + \tau_c} \beta$$

В полевом транзисторе $f_T = V_{sat} / (2\pi L)$, где V_{sat} – скорость насыщения носителей, L – длина канала.

Максимальная частота усиления мощности f_{max} – параметр, при котором коэффициент усиления по мощности становится равным 1. В зарубежной литературе ее еще называют максимальной частотой генерации (maximum frequency of oscillation). С граничной частотой (f_T) связана как

$$f_{max} = \sqrt{\frac{f_T}{\beta \cdot 8\pi C_{bc} R_b^2}}$$

альные слои в области перехода, например – увеличивая концентрацию Al в AlGaAs). Это также увеличивает f_{max} и снижает уровень шумов. Благодаря тому, что входные и выходные импедансы транзистора становятся в основном резистивными, упрощается проблема согласования приборов в СВЧ-схемах.

Наконец, отметим технологическую простоту структуры HBT. Будучи вертикальной, она существенно экономит площадь кристалла. Кроме того, тонкие слои транзистора формируются в процессе эпитаксии, что снижает требования к литографическому оборудованию и существенно удешевляет прибор. В частности, отпадает нужда в электронно-лучевой литографии (часто необходимой при формировании коротких затворов в полевых транзисторах). Однако в целом технология HBT-транзисторов, как и биполярных транзисторов вообще, по сравнению с полевыми приборами оказывается несколько сложнее и дороже, требуя большего числа операций. Кроме того, HBT уступают полевым транзисторам по параметрам энергопотребления, токов утечки и т.п. Но зато они выигрывают в линейности характеристик. И соотношения "плюсов" и "минусов" в каждом конкретном случае свое. Поэтому практически все ведущие производители СВЧ-приборов стараются поддерживать и развивать обе технологии.

В последние годы в HBT-транзисторах стали активно использоваться новые полупроводниковые соединения группы A^3B^5 : в эмиттере – InGaP, AlInAs, InP и т.п., в базе (и коллекторе) – InGaAs. Разработчики при этом стремятся сократить разрыв границы зоны проводимости и одновременно увеличить разрыв границы валентной зоны в переходе эмиттер – база для улучшения частотных (а с ними – и надежных) и энергетических характеристик (табл.2).

Появились и HBT с двумя гетеропереходами – эмиттерным и коллекторным. Соответственно, возникли обозначения SHBT (single HBT) и DHBT (double HBT) для одно- и двух-гетеропереходных биполярных транзисторов. DHBT позволяют повысить напряжение пробоя (вплоть до 10–40 В), поскольку гетеропереход база-коллектор снижает ударную ионизацию материала коллектора. Однако DHBT несколько проигрывают SHBT в граничной частоте.

Таблица 2. Разрывы зон проводимости ΔE_c , валентной зоны ΔE_v , и запрещенной зоны ΔE_g наиболее популярных структур эмиттер-база

Эмиттер/база	ΔE_c , эВ	ΔE_v , эВ	ΔE_g , эВ
$Al_{0,3}Ga_{0,7}As / GaAs$	0,24	0,13	0,37
$In_{0,5}Ga_{0,5}P / GaAs$	0,19	0,29	0,48
$InP / In_{0,53}Ga_{0,47}As$	0,25	0,34	0,59

Казавшиеся еще несколько лет назад экзотическими технологии GaAs HBT с InGaP-эмиттером (InGaP HBT) сегодня вышли на промышленный уровень. В частности, еще в 2001 году компания Alpha Industries по своей InGaP HBT-технологии произвела цифровой синтезатор с прямым преобразованием, спроектированный компанией Rockwell Colin. Прибор содержал свыше 8 тыс. транзисторов на кристалле размером 4 x 4 мм (рис. 12) [9].

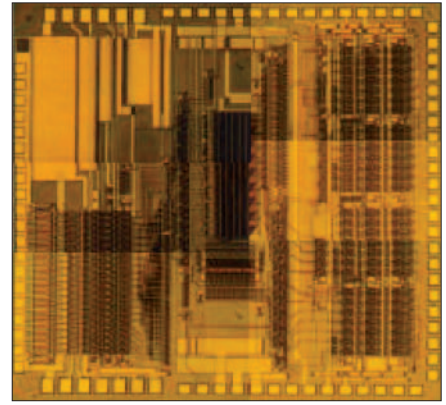


Рис. 12. Кристалл ММС (4 x 4 мм) цифрового синтезатора с прямым преобразованием разработки компании Rockwell Colin, созданный по InGaP HBT-технологии компании Alpha Industries [9]

Характерный современный пример – представленное в апреле 2005 года компанией Agilent Technology семейство модулей усилителей мощности размерами 4x4 мм, произведенных по фирменной технологии CoolPAM. Эти усилители построены на InGaP HBT и обеспечивают, по утверждению представителей компании, минимальное энергопотребление по сравнению с остальными устройствами данного класса. Приборы WS2512, WS2411, WS2111 предназначены для работы в частотном диапазоне 1920–1980, 1850–1910 и 824–849 МГц, соответственно. Устройства рассчитаны на три независимых режима работы – с высокой, средней и малой мощностью, различающихся главным образом КПД (для WS2111 КПД составляет 34, 14 и 8%, соответственно), максимальной выходной мощностью и токами потребления в режиме покоя (90, 12 и 10 мА). Усилитель WS2111 (рис.13) в режиме высокой мощности обеспечивает $P_{вых}$ не менее 27, 5 дБм, усиление при этом – до 29 дБ. Уровень комбинационных помех в канале, отстоящем от несущей на 5 МГц (при максимальной мощности) – -40 дБс. Напряжение питания усилителя – 3,4–5 В.

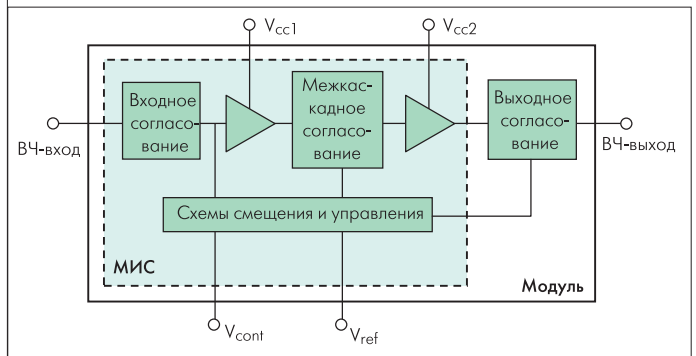


Рис. 13. Функциональная схема усилителя WS2111 компании Agilent Technology

Компания Freescale Semiconductor также недавно представила семейство новых усилителей на основе InGaP HBT, включенных по схеме Дарлингтона. Один из представителей нового семейства – прибор MMG3013NT1, предназначенный для работы в диапазоне 0–6 ГГц с выходной мощностью 20,5 дБм и усилением до 20 дБ (рис.14). Напряжение питания – 5 В, вход и выход согласованы с нагрузкой в 50 Ом. Прибор выпускается в миниатюрном пластиковом корпусе SOT-89.

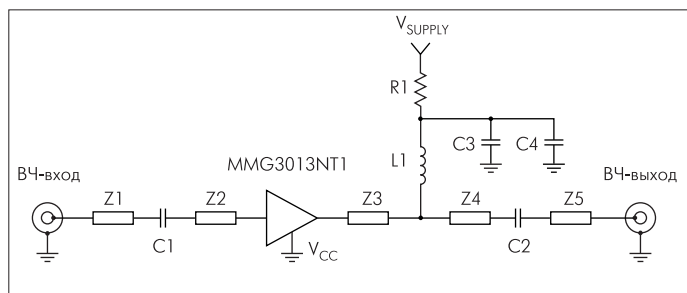


Рис. 14. Пример схемы включения усилителя MMG3013NT1 компании Freescale Semiconductor

Компания TriQuint Semiconductor – один из ведущих производителей СВЧ МИС – предлагая услуги “кремниевой фабрики” (foundry), объявила следующие параметры своего InGaP HBT-технологического процесса: $f_T = 28$ ГГц, $f_{max} = 46$ ГГц, $b = 75$, напряжение пробоя коллектор-эмиттер – 12 В.

Еще более улучшает частотные характеристики приборов применение **фосфида индия**. Этот материал группы A^3B^5 обладает сходными с GaAs шириной запрещенной зоны $E_g = 1,35$ эВ и подвижностью электронов $m_e = 4500$ см²/(В·с). Но его использование в транзисторных структурах вместо GaAs приводит к увеличению пробивного напряжения, резкому росту граничной частоты и крутизны прибора, повышению линейности и уменьшению размеров кристалла. Это связано с увеличением ширины запрещенной зоны в области гетеропереходов (см. табл.2), что позволяет повысить уровень легирования базы более 10^{20} см⁻³. У InP-коллектора, по сравнению с InGaAs, выше напряжение пробоя (не менее 6 В), поскольку запрещенная зона в InP шире, чем в InGaAs (1,35 эВ против 0,75 эВ).

Разнообразие различных структур на основе InP весьма велико. Сам термин “InP-транзистор” означает, что структура выращена на полупроводящей InP-подложке и коллектор также создан из легированного InP (рис.15). Разнообразны и комбинации материалов слоев транзистора, наиболее часто используются сочетания типа InAlAs/InGaAs/InP и InP/InGaAs/InP, однако возможны и структуры типа AlInP/InP [10]. Более того, InP-транзисторами могут называть и структуры типа InAlAs/InGaAs, выращенные на InP-подложке.

InP-транзисторы обладают поистине выдающимися частотными характеристиками. Так, в HRL Microelectronics Laboratory в 2003 году [11] получены InAlAs/InGaAs/InP SHBT и DHBT (см. рис. 15) с граничными частотами 250 и 230 ГГц, соответственно ($U_{кз} = 1$ В, $I_k = 10$ мА). При этом напряжения пробоя составили 3,1 и 4,5 В. Особенностью приборов явилось формирование дополнительного высоколегированного субколлекторного n^+ -InP слоя. В декабре 2004 года исследователи этой компании сообщили о DHBT-структуре с $f_T = 370$ ГГц и $f_{max} = 430$ ГГц при токе коллектора 6 мА и пробивном напряжении 1,6 В [12].

В области создания InP HBT-структур с рекордными характеристиками работает группа сотрудников Иллинойского университета

(University of Illinois Urbana-Champaign) во главе с профессором Милтоном Фенгом. В 2003 году этот коллектив сообщал о создании InP/InGaAs SHBT с граничной частотой 509 ГГц [13]. Прибор включал коллектор толщиной 300 нм (n -слой, $4 \cdot 10^{19}$ см⁻³), 75-нм субколлектор (10^{16} см⁻³), 25-нм базу со сложной структурой (мольная доля индия в $In_xGa_{1-x}As$ изменяется от 0,53 до 0,5). База легировалась углеродом до $6 \cdot 10^{19}$ см⁻³. Толщина эмиттерного слоя составляла 40 нм, уровень легирования кремнием – $4 \cdot 10^{19}$ см⁻³. Горизонтальные размеры эмиттера – 0,35 x 12 мкм. При токе коллектора 1 мА транзистор демонстрировал напряжение пробоя коллектор-эмиттер 2,7 В. Однако в области максимальной граничной частоты, при токе 47,2 мА, напряжение пробоя падало до 0,92 мА, что объясняется тепловыми эффектами, проявляющимися при таких плотностях тока. Были исследованы структуры с различной длиной эмиттера – 4, 8, 12 и 16 мкм (при ширине 0,35 мкм) (рис.16).

Именно малое пробивное напряжение, связанное с малой шириной запрещенной зоны InGaAs-коллектора, и заставило исследователей обратиться к структуре с двойным гетеропереходом с InP-коллектором. В апреле 2005 года группа М.Фенга объявила о создании рекордного на тот момент InP/InGaAs псевдоморфного HBT-транзистора на InP-подложке с граничной частотой 604 ГГц и $f_{max} = 246$ ГГц [14]. При размерах эмиттера 0,4 x 6 мкм плотность тока коллектора составила 16,8 мА/мкм², напряжение пробоя по постоянному току – 1,7 В. Размеры эмиттера – 0,4 x 6 мкм, коллектор и база представляли собой многослойные структуры с плавным (градиентным) легированием: мольная доля In в коллекторе изменялась в пределах 10%, в базе – в пределах 6%.

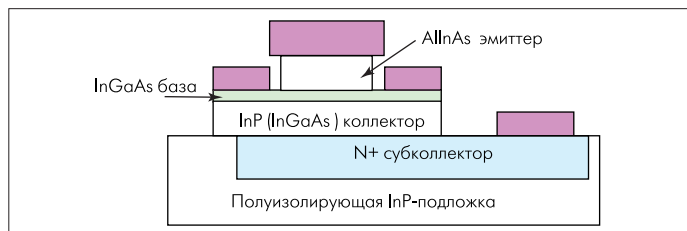


Рис. 15. Пример InP DHBT-транзистора (AlInAs / InGaAs / InP) с субколлекторным слоем. Коллектор – четырехслойная InP-структура

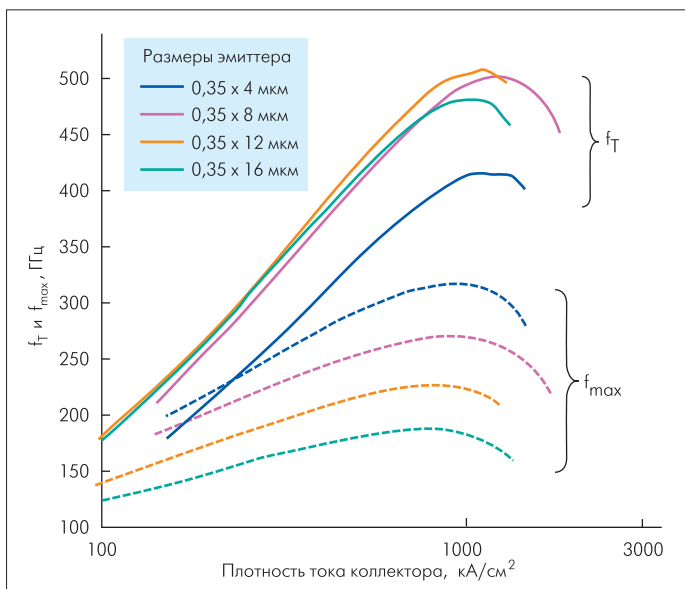


Рис. 16. Частотные характеристики InP/InGaAs SHBT-транзистора с толщиной коллектора 75 нм [13]

Большие перспективы исследователи связывают со структурами типа InP / GaAsSb / InP. Так, в 2001 году была продемонстрирована возможность получения InP/GaAsSb/InP DHBT-структур с максимальными значениями f_T и f_{max} порядка 300 ГГц при плотности тока коллектора 410 кА/см^2 и напряжении пробоя коллектор-эмиттер 6 В [15]. Толщина коллектора при этом составляла 200 нм. Группа М.Фенга в 2005 году представила ряд DHBT-транзисторов на основе InP/GaAsSb/InP с различными конструктивными особенностями (толщина коллектора составляла 150 и 75 нм). Все они продемонстрировали максимальную граничную частоту f_T 244–358 ГГц и f_{max} в диапазоне 225–279 ГГц [16]. Причем целью работ было не получение рекордных показателей, а достижение удовлетворительных пробивного напряжения и плотности тока коллектора.

Столь показательные результаты в сравнении с InP/InGaAs/InP-структурами объясняются тем, что у последних в переходе база-коллектор разрыв зоны проводимости между InGaAs и InP составляет порядка 0,25 эВ. Этот потенциальный барьер способствует развитию эффекта блокировки тока (current blocking), проявляющегося в том, что при определенной плотности тока ВАХ прибора становится подобной ВАХ резистора – ток в коллекторе нарастает линейно с напряжением коллектор-эмиттер, а не экспоненциально. Граница зоны проводимости в GaAsSb находится выше, чем в InP, поэтому замена в базе InGaAs на GaAsSb приводит к отсутствию потенциального барьера между коллектором и эмиттером. Одновременно при этом повышается барьер, препятствующий инжекции дырок из базы в коллектор. Однако эффект блокировки тока может наблюдаться и в структурах InP/GaAsSb/InP при высоких плотностях тока, приводящих к высокому уровню инжекции [17].

Отметим, что пока массового промышленного распространения InP HBT не получили, хотя уже начали появляться специализированные МИС на их основе – в основном для транзисторов волоконно-оптических сетей со скоростями обмена 40 Гбит/с. В то же время, ряд производителей (Alpha Industries, Space & Electronics Group корпорации TRW, Global Communication Semiconductors, EpiWorks, IQE, HRL и др.) объявили об освоении технологического процесса производства InP HBT-структур на основе 75- и 100-мм пластин и готовности принимать заказы на производство МИС по этой технологии. В частности, полупроводниковый завод компании Northrop Grumman Space Technology анонсировал запуск 0,8-мкм InP HBT-

технологического процесса для маломощных (цифровых) схем с параметрами структур $f_T = 140$ ГГц, $f_{max} = 150$ ГГц, $b = 50$ и напряжением пробоя более 4 В. Для мощных МИС предназначен 1-мкм техпроцесс с $f_T = 80$ ГГц, $f_{max} = 150$ ГГц, $b = 25$ и напряжением пробоя более 13 В. Все это позволяет ожидать массового появления InP-транзисторов и МИС общего назначения в ближайшие годы.

Продолжение следует...

ЛИТЕРАТУРА

1. Lynelle McKay, Lance Wilson. RF Power GaAs for Wireless Infrastructure Markets. – 2001 GaAs MANTECH Conf. Dig. Ppr., 2001.
2. S. McGrath, T. Rodle. – Moving past the hype: real opportunities for wide band gap compound semiconductors in RF power markets. – 2005 GaAs MANTECH Conf. Dig. Ppr., 2005.
3. Mishra U.K. et al. Proceedings of the IEEE, Vol. 90, No. 6, 2002.
4. Gailon E. Brehm, Dan L. Green, Larry J. Mowatt. Commercial Applications for GaAs Millimeter Wave MMICs. – 2004 GaAs MANTECH Conf. Dig. Ppr., 2004.
5. Ralph Quinsey. State of the Compound Semiconductor Industry – 2004 GaAs MANTECH Conf. Dig. Ppr., 2004.
6. Paul J. Augustine. Trends and Opportunities for Gallium Arsenide Semiconductors in Handsets. – 2005 GaAs MANTECH Conf. Dig. Ppr., 2005.
7. Майская. В. SiGe-устройства. Нужная технология в нужное время. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2001, №1, с.28–32.
8. Wayne R. Berger et al. RF-LDMOS: A Silicon-Based, High Power, High Efficiency Linear Power Amplifier Technology. – 2000 GaAs MANTECH Conf. Dig. Ppr., 2000.
9. Mike Sun, Juntao Hu, Wu-Jing Ho et al. A Non-Self Aligned InP HBT Production Process. – 2002 GaAs MANTECH Conf. Dig. Ppr., 2002.
10. Y.M. Hsin et al. Pseudomorphic AllInP/InP heterojunction bipolar transistors. – Electronics Letters, 1995, Vol.31, N. 2.
11. M. Sokolich, M.Y. Chen, D.H. Chow, Y. Royter, S. Thomas III, C. H. Fields et. al. InP HBT Integrated Circuit Technology with Selectively Implanted Subcollector and Regrown Device Layers. – Proceedings of the 25th Annual IEEE GaAs IC Symposium, San Diego, CA, November 9–12, 2003, p.219–222.
12. Jack Browne. Devices Advance At 2004 IEDM. – Microwaves & RF, November 2004 (www.mwrf.com).
13. W. Hafez, Jie-Wei Lai, M. Feng. InP/InGaAs SHBTs with 75nm collector and $f_T > 500$ GHz. – Electronics Letters, 2nd October 2003 Vol. 39 N 20.
14. Walid Hafez, Milton Feng. Experimental demonstration of pseudomorphic heterojunction bipolar transistors with cutoff frequencies above 600 GHz. – Applied Physics Letters, 86, 15 April 2005.
15. M. W. Dvorak, C. R. Bolognesi, O. J. Pitts, S. P. Watkins. 300 GHz InP/GaAsSb/InP Double HBTs with High Current Capability and $BV_{CEO} 6$ V. – IEEE Electron Device Letters, Vol. 22, N. 8, August 2001.
16. Benjamin F. Chu-Kung, Shyh-Chiang Shen, Walid Hafez, Milton Feng. Process and Performance Improvements to Type-II GaAsSb/InP DHBTs – 2005 GaAs MANTECH Conf. Dig. Ppr., 2005.
17. Benjamin F. Chu-Kung, Shyh-Chiang Shen, Walid Hafez, Milton Feng. Observations of Current Blocking in InP/GaAsSb DHBTs – 2004 GaAs MANTECH Conf. Dig. Ppr., 2004.