

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ СВЧ-ПРИБОРЫ И ТЕХНОЛОГИИ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ*

Во второй части нашей “СВЧ-трилогии” – беглого обзора современного состояния твердотельной СВЧ-электроники – рассмотрены как ставшие уже традиционными приборы, так и совсем новые технологии, которые только прокладывают себе путь из стен лабораторий в серийное производство.

ПОЛЕВЫЕ ГЕТЕРОТРАНЗИСТОРЫ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ А³В⁵

Полевые GaAs-транзисторы с гетеропереходом и управляющим затвором Шоттки (ГПТШ) за последние 10 лет вышли на уровень массового производства. Хотя они еще и не потеснили Si- и GaAs-биполярные транзисторы с гетеропереходом (HBT), однако такая тенденция прослеживается. Типичная структура GaAs ГПТШ приведена на рис. 1. Не вдаваясь в физику работы прибора, отметим, что он отличается от обычных полевых транзисторов с управляющим барьером Шоттки (MESFET) наличием гетероперехода между барьерным (донорным) и нелегированным каналными слоями (в данном случае между слоями GaAs и AlGaAs). Поскольку ширина запрещенной зоны материала канального слоя больше, чем барьерного, в канале у границы слоев формируется потенциальная яма – тонкий слой, в котором накапливаются свободные носители, образуя так называемый двумерный электронный газ (2DEG). А так как канальный слой не легирован, в нем рассеяние на примесных центрах и дислокациях решетки минимальны, а подвижность носителей, соответственно, высока. Поэтому данный класс приборов называют **транзисторами с высокой подвижностью электронов (HEMT)**. Задача буферного слоя – обеспечить структурный переход от полуизолирующей подложки к совершенной структуре канального слоя. Более подробно структура HEMT-транзистора и роль отдельных ее элементов рассмотрена в статье [1].

Постоянные кристаллических решеток AlGaAs и GaAs достаточно близки (рис. 2). HEMT-транзисторы, гетеропереход которых образован материалами с существенно различными константами решетки (AlGaAs/InGaAs, InGaAs/InAlAs, InGaP/InGaAs и т.п.), получили название **псевдоморфных транзисторов (рHEMT)**. Приборы этого типа за счет увеличения разрыва между границами зон проводимости и значениями подвижности электронов (рис. 3) обладают более высоким пробивным напряжением (свыше 12 В, типичное рабочее напряжение – 5–6 В) и рабочими частотами, их КПД достигает 60%.

Одним из лидеров в развитии промышленной рHEMT-технологии выступает компания TriQuint Semiconductor, которая уже создала рHEMT с минимальным размером элементов 0,15 мкм. Базовая структура транзистора формируется на полуизолирующей GaAs-подложке, на которой создают буферный слой в виде сверхрешетки

* Продолжение. Начало см.: Шахнович И. Твердотельные СВЧ-приборы и технологии. Невоспетые герои беспроводной революции. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, №4, с. 12–18.



И.Шахнович

AlAs/GaAs, InGaAs-канальный слой и AlGaAs-барьерный слой *n*-типа. Сверху и снизу к каналному слою примыкает так называемый спейсер (spacer) – тонкий слой нелегированного AlGaAs [2]. Концентрация электронов проводимости в канале достигает $3,2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, а их подвижность – $6500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. В результате максимальный ток канала транзистора может составлять 680 мА/мм (при напряжении канала 1,5 В), напряжение пробоя – 13 В, граничная частота f_T – 52 ГГц, максимальная частота усиления мощности f_{max} – 150 ГГц. Оптимальное рабочее напряжение транзистора – 6 В. Выходная мощность может достигать 815 мВт/мм , а КПД – 40%.

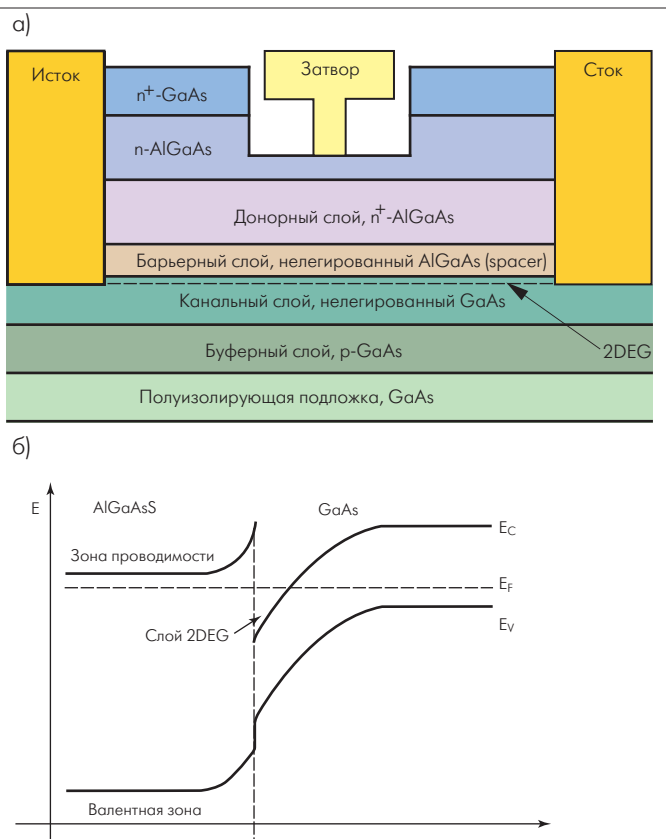


Рис. 1. Типичная структура GaAs ГПТШ (а) и его зонная диаграмма (б)

Компания готовится к освоению серийного производства по этой технологии ряда усилителей, в том числе 2-Вт усилителей TGA4516 и TGA4046, рассчитанных на диапазоны частот 32–38 ГГц и 45 ГГц, соответственно. Трехкаскадный усилитель TGA4516-EPU размещается на кристалле размером 2,8 x 2,3 мм, общая ширина затвора транзисторов в выходном каскаде – 4,16 мм. При пиковой выходной мощности 2,5 Вт в диапазоне 32–38 ГГц КПД прибора со-

Таблица 1. Параметры СВЧ-транзисторов компании Northrop Grumman Space Technology [4]

Процесс	1-мкм GaAs НВТ (цифр.)	0,8-мкм InP НВТ (цифр.)	1-мкм InP НВТ (мощный)	0,15-мкм GaAs рНЕМТ	0,1-мкм GaAs рНЕМТ	0,1-мкм InP рНЕМТ
f_t пик., ГГц	40	140	80	80	120	180
F_{max} пик., ГГц	70	150	150	200	250	350
β (для НВТ)						
G_m (для НЕМТ), мСм/мм	400	50	25	550	650	900
Напряжение пробоя коллектор-эмиттер / сток-затвор, В	> 13	> 4	> 13	10	7,5	2,5

кордные значения частоты. Так, их граничная частота может превышать 400 ГГц [3].

В частности, о создании рНЕМТ с InGaAs/InAlAs/InP-структурой на 100-мм пластинах по 0,1-мкм технологии одной из первых объявила компания Northrop Grumman Space Technology (NGST) (рис.4, табл.1). Эта технология – результат совершенствования уже освоенного компанией процесса изготовления рНЕМТ на 75-мм пластинах [5], на базе которого производятся серийные МИС.

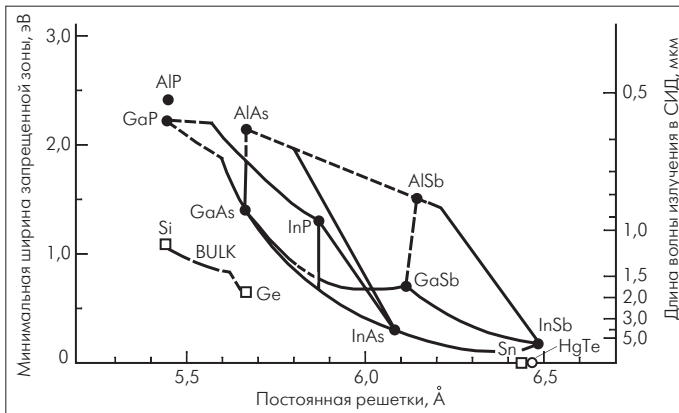


Рис.2. Минимальная ширина запрещенной зоны и постоянная решетки полупроводников группы A^3B^5 . Сплошная/пунктирная линии означают прямой/непрямой переход

ставил 25%, номинальное усиление – 18 дБ, рабочее напряжение – 6 В, напряжение пробоя сток-затвор – 11 В.

Усилитель TGA4046 с аналогичными электрическими параметрами в диапазоне 44–46 ГГц выполнен по балансной трехкаскадной схеме. Общая площадь кристалла – 3,4х4,3 мм. КПД усилителя при входной мощности 20 дБм (мощность сигнала по отношению к 1 мВт) составляет 14%.

С целью увеличения рабочих частот рНЕМТ-транзисторов на основе InAlAs/InGaAs-структур разработчики стремятся повысить концентрацию индия в $In_xGa_{1-x}As$ -канальном слое. Но это ведет к увеличению несоответствия постоянных кристаллических решеток материала канального слоя и GaAs-подложки, что, в конечном счете, ухудшает характеристики прибора. Одно из возможных решений – применение InP-подложек, постоянная решетки которых близка к InAlAs (см. рис.2). Для подобных структур получены ре-

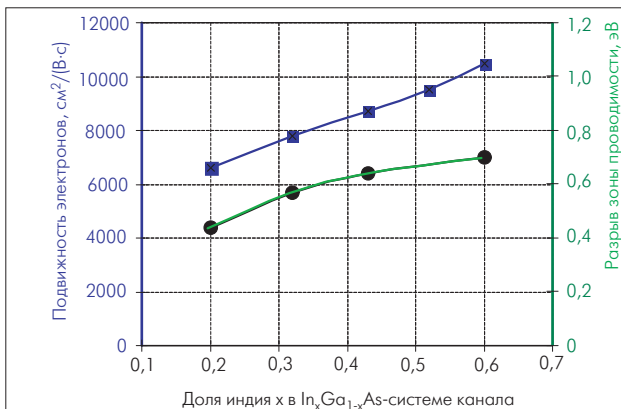


Рис.3. Зависимость подвижности электронов в системе InGaAs и величины разрыва границы зоны проводимости в переходе InGaAs / InAlAs от доли In в InGaAs-канале

В транзисторах, создаваемых в рамках данного процесса, концентрация индия в InGaAs-канальном слое составляет 60%, подвижность носителей в канале достигает $10000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при плотности электронов в 2DEG-слое $\sim 3,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. При этом крутизна транзистора G_m – примерно 800 мСм/мм, плотность тока – 540 мА/мм, граничная частота f_t – более 190 ГГц. На базе рНЕМТ с такой структурой компанией создан ряд МИС, в частности – маломощный двухкаскадный балансный усилитель Ka-диапазона с коэффициентом усиления свыше 17 дБ и уровнем шумов менее 2,4 дБ в диапазоне 27–39 ГГц.

Однако, несмотря на усилия производителей, даже с учетом перехода к 100-мм InP-подложкам, стоимость приборов на основе InP продолжает оставаться высокой. В качестве возможного решения этой проблемы рассматриваются так называемые **метаморфные НЕМТ-структуры (МНЕМТ)**, т.е. приборы со сложным многослойным буфером со ступенчатым изменением концентрации примеси для обеспечения плавного перехода от GaAs-подложки к InGaAs-каналу. Тем самым решается проблема применения более дешевых GaAs-подложек. Так, специалисты подразделения СВЧ-компонетов компании Raytheon [6] разработали технологию изготовления InAlAs/InGaAs/GaAs МНЕМТ-структур с концентрацией индия в InGaAs-канале 60%. Им удалось создать транзисторы с крутизной порядка 850 мСм/мм, напряжением пробоя 8 В и током канала до 700 мА/мм (в постоянном режиме). В импульсном режиме эти показатели составили 6 В и 200 мА/мм, соответственно. При суммарной ширине затвора 480 мкм усиление на частоте 94 ГГц при напряжении 2,5 В составило 12 дБ, выходная мощность 360 мВт/мм, КПД – свыше 30%. На базе этих МНЕМТ в компании создан ряд однокаскадных усилителей мощности W-диапазона (56–100 ГГц). Их усиление при напряжении 3,3 В составило 6,5 дБ, КПД – 17% при максимальной выходной мощности 226 мВт (при этом коэффициент усиления снижается на 1 дБ).

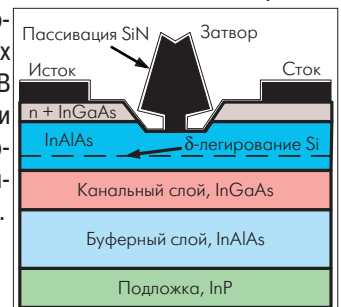


Рис.4 Структура InGaAs / InAlAs / InP рНЕМТ компании NGST

SiGe-ТРАНЗИСТОРЫ

В последние годы растет популярность СВЧ SiGe-устройств, которые уже сопоставимы по частотным характеристикам с GaAs-приборами. SiGe-транзисторы можно считать результатом развития кремниевой технологии. Первой промышленной технологической процесс создания SiGe-транзисторных структур разработала компания IBM в 1996 году. С тех пор эту технологию поддерживали многие ведущие производители [7]. Основные достоинства Si-Ge-структур – при незначительном (на 10–20%) увеличении стоимости процессов по сравнению со стандартной Si-технологией существенно возрастают рабочие частоты и

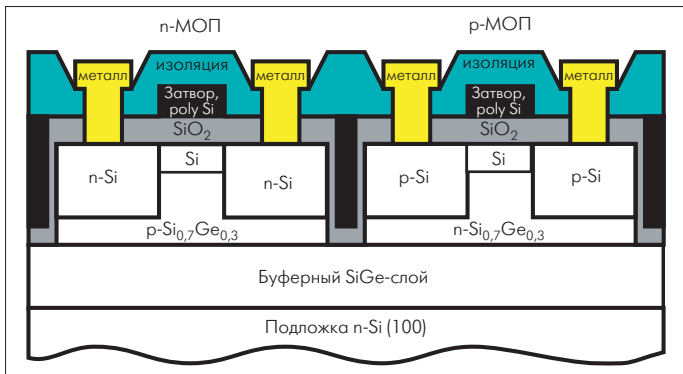


Рис.5. Структура SiGe КМОП-ячейки ИС

линейность характеристик. Так, компания IBM в рамках своего Би-КМОП-техпроцесса 7НР с технологическими нормами 0,18 мкм производит МИС с граничными частотами 70/45 ГГц для *n*-МОП/*p*-МОП транзисторов и 120 ГГц – для НВТ (напомним, Би-КМОП-технология является объединением КМОП- и биполярных транзисторов в единой приборной структуре). В августе 2005 года IBM объявила о создании БикМОП МИС четвертого поколения, изготавливаемых по технологии 8НР с 0,13-мкм топологическими нормами. Граничная частота ее биполярных *n-p-n*-транзисторов достигает 210 ГГц (100 ГГц для более дешевого варианта "8WL"), максимальная частота усиления – 185 ГГц.

Процесс изготовления SiGe-приборов, по сравнению с кремниевыми, требует нескольких дополнительных операций. Так, в биполярных кремниевых *n-p-n*-транзисторах в базе формируется эпитаксиальный SiGe-слой, в результате чего образуется гетеропереход Si/SiGe, позволяющий увеличить уровень легирования базы и тем самым снизить ее сопротивление. Это сокращает время переключения. Снижается и уровень шумов. Уменьшение ширины запрещенной зоны базы позволяет увеличить коэффициент усиления, поскольку из-за разрыва границ валентной зоны в переходе база-эмиттер сокращается инжекция дырок в эмиттер (что приводит к увеличению коэффициента эффективности эмиттера).

В МОП-транзисторах SiGe используется в буферном слое для формирования в канале области двумерного электронного газа (рис.5). В результате подвижность носителей в канале *n*- и *p*-типа составляет 2800 и 1400 см²/В·с, соответственно, что обуславливает

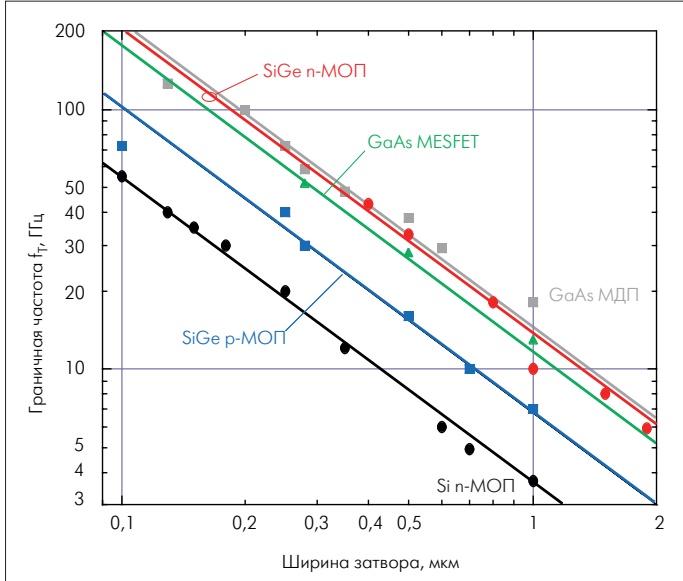


Рис.6. Зависимость граничной частоты транзисторных структур различных типов от ширины затвора

высокие частотные характеристики: граничные частоты SiGe МОП-транзисторов могут достигать 100 ГГц и даже выше (рис.6). И это не предел, учитывая тенденцию уменьшения геометрических размеров элементов транзистора.

Однако сдерживающий фактор для SiGe-приборов – малая ширина запрещенной зоны. У германия она равна 0,68 эВ, у кремния – 1,1 эВ, у их композиции зависит от концентрации германия и составляет ~1 эВ. Это существенно ограничивает (на уровне порядка 2 В) пробивное напряжение и мощностные показатели. Поэтому SiGe-приборы сегодня находят широкое применение в маломощных приложениях – сотовых телефонах, мобильных устройствах и т.п., то есть там, где важно минимизировать энергопотребление и не требуется высокая мощность. Отметим, что благодаря конструктивным особенностям пробивное напряжение перехода эмиттер-коллектор SiGe HBT может составлять 3,5–6 В [8].

Однако, возможно, наиболее существенная особенность SiGe-транзисторов – простота их формирования на одном кристалле с цифровыми кремниевыми схемами. Это важно прежде всего

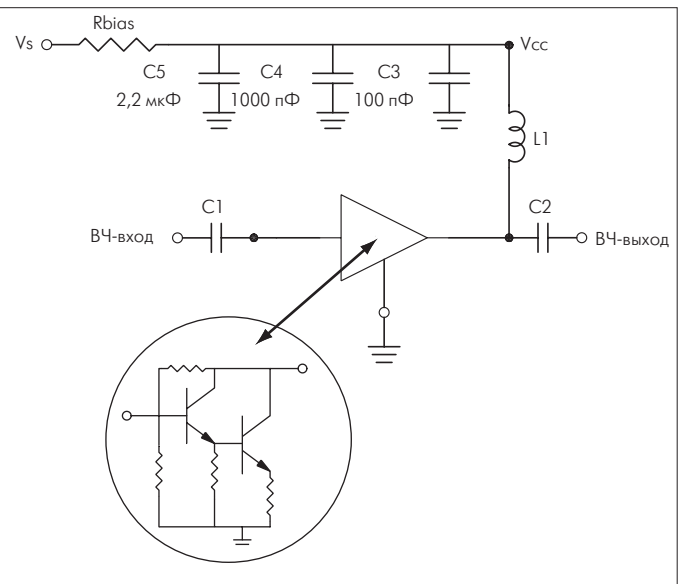


Рис.7. Схема включения SiGe-усилителя HMC474MP86 компании Hittite Microwave

для создания разнообразных СБИС смешанной обработки сигнала, включая "системы на кристалле". Не случайно SiGe-технология – одна из основных при изготовлении СВЧ-трансиверов, в том числе для сотовых телефонов (см. рис.5 в первой части статьи [9]). Этому способствует и современная тенденция применения трансиверов прямого преобразования, т.е. устройств с нулевой промежуточной частотой. Отметим, что в 2003 году рынок СВЧ-трансиверов для сотовых телефонов, по данным исследовательской фирмы iSupply, составлял 2,6 млрд. долл.

Типичный пример SiGe-усилителя – прибор HMC474MP86 компании Hittite Microwave, реализованный по схеме Дарлингтона (рис.7). Он рассчитан на диапазон частот 0–6 ГГц с усилением 9–15,5 ГГц (в зависимости от частоты). Выходная мощность достигает 10 дБм. Усилитель работает от однополярного источника питания с напряжением 3–10 В.

В качестве примера СВЧ SiGe-трансивера упомянем квадратурный модулятор HMC496LP3 той же компании (рис.8), работающий в диапазоне частот 4–7 ГГц с шириной полосы до 250 МГц. Прибор обеспечивает подавление несущей до 34 дБс (относительно несущей) и способен работать с уровнем сигнала внешнего тактового



генератора от -3 до 6 дБм. Поставляется в миниатюрном пластиковом корпусе QFN габаритами 3x3 мм.

МОЩНЫЕ СВЧ-ТРАНЗИСТОРЫ НА ШИРОКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ – GaN И SiC

Одно из наиболее активно осваиваемых сегодня направлений СВЧ-электроники – мощные приборы на основе полупроводниковых материалов с широкой запрещенной зоной. Широкая запрещенная зона – это большие значения пробивного и рабочего напряжения, высокая рабочая температура перехода. В гетероструктурах она обеспечивает значительный разрыв границ зоны проводимости. Однако сегодня активно развиваются всего два широкозонных полупроводниковых материала – карбид кремния и нитрид галлия.

Нитрид галлия представляется наиболее перспективным широкозонным полупроводниковым материалом, как и вся группа III-нитридов [1]. Совокупность свойств широкозонного материала и возможности формирования на основе GaN гетеропереходов позволяют добиться уникальных характеристик транзисторов – рабочего напряжения свыше 60 В, частот до 70 ГГц, мощности до 200 Вт. GaN-приборы и технологии, а также перспективы их развития подробно рассмотрены в работе [1], поэтому отметим только, что уже продемонстрированы GaN HEMT с выходной мощностью свыше 176 Вт, рабочим напряжением 63 В, КПД 54% при усилении 12,9 дБ на частоте 2,1 ГГц [10]. Рекордное на сегодня значение удельной мощности GaN HEMT – 32,2 Вт/мм при КПД 54,8%, рабочем напряжении 120 В и частоте 4 ГГц [11].

Карбид кремния как материал для СВЧ-приборов активно осваивается последние десять лет. Его главный недостаток – не-

Таблица 2. Подложки для приборов на широкозонных полупроводниках [13]

Материал	4H SiC	AlN	GaN	GaAs	Si
Ширина запрещенной зоны, эВ	3,26	6,2	3,36	1,42	1,12
Теплопроводность, Вт/(см·К)	4,9	3,4	1,3	0,6	1,3
Напряженность поля пробоя, МВ/см	4,9	3,4	1,3	0,6	1,3
Диаметр производимых пластин, мм	75	25	50	150	300
Цена пластин, долл./дюйм ²	700	> 1000	> 1000	< 10	~1

возможность создания на нем гетероструктур. Вследствие низкой подвижности носителей ($370 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ для политипа 6H) рабочие частоты SiC-приборов не превышают 4–7 ГГц. Однако остальные достоинства, прежде всего высокая плотность мощности и большая теплопроводность, заставляют активно развивать их промышленные технологии.

В качестве примера промышленного SiC MESFET назовем транзистор CRF-24060 компании Cree (рис.9), изготовленный на 4H-SiC-подложке. Его номинальная выходная мощность – 60 Вт. Это уже представитель второго поколения MESFET-транзисторов компании. КПД прибора при выходной мощности около 80 Вт и линейном усилении 12 дБ в полосе частот 0,9–1,6 ГГц превышает 40% (50% на частоте 1 ГГц).

Помимо мощных дискретных транзисторов компания Cree освоила процесс изготовления SiC МИС на 75-мм пластинах. Их базовыми элементами служат MESFET с шириной затвора 0,5 мкм. Плотность мощности MESFET – 4 Вт/мм, КПД – 60% (при комнат-

ной температуре), рабочее напряжение – 50 В, рабочая частота достигает 6 ГГц. При выходной мощности 3,8 Вт на частоте 3,5 ГГц транзисторы демонстрируют КПД 68% [12].

Но все достоинства SiC-структур, даже в частотном диапазоне менее 6 ГГц, разбиваются о чрезвычайно высокую стоимость SiC-пластин (табл.2). Проблема эта актуальна не только для SiC-транзисторов, но и для всех мощных приборов на основе широкозонных полупроводников. Действительно, большая плотность мощности означает малую площадь теплосъема. Следовательно, необходимы подложки с высокой теплопроводностью. Один из лучших с этой точки зрения материалов – карбид кремния. Практически все GaN-приборы с рекордными характеристиками выполнены именно на SiC-подложках.

Табл.4. Структура AlSb/InAs MHEMT компании Northrop Grumman Space Technology [16]

Слой	Материал	Толщина, нм
Сар-слой	InAs	2
Барьерный	$In_{0,4}Al_{0,6}As$	4
	AlSb	1,2
	InAs, легированный Si ($3 \cdot 10^{19}$)	1,2
	AlSb	7,5
Канальный	InAs	15
Нижний барьерный	AlSb	50
Буферный	$Al_{0,7}Ga_{0,3}Sb$	300
	AlSb	1700
	GaAs	230
Полуизолирующая подложка	GaAs	–

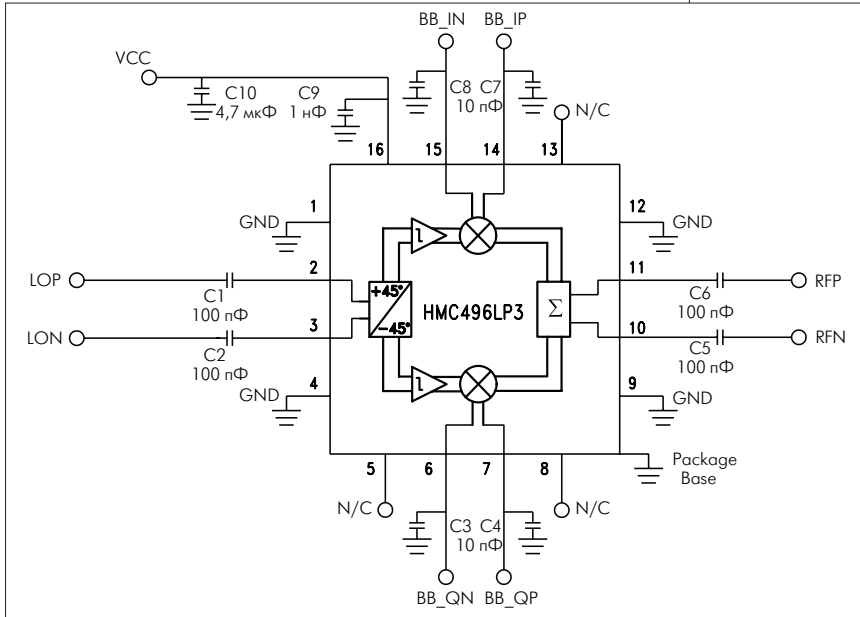


Рис.8. Квадратурный модулятор HMC496LP3

По состоянию на 2004 год, 85% рынка SiC-подложек принадлежало компании Cree. Она первой начала коммерческое производство 4H-SiC-пластин, которые используются главным образом для изготовления светодиодов. 6H-SiC-подложки в США в промышленном масштабе производит только компания с необычным названием II-VI. При этом стоимость 75-мм полуизолирующей SiC-пластины колеблется от 4 до 5 тыс. долл. К началу 2005 года первые шаги на коммерческий рынок SiC-пластин сделали еще несколько компаний – Dow Corning (США), SiXon (Япония), SiCrystal (Германия) и Okmetic (Финляндия). А фирмы Cree и II-VI объявили о запуске линий изготовления 100-мм SiC-пластин, но все это пока не изменило ценовой ситуации.

С ценой на GaN-подложки ситуация еще тяжелее. Этот материал хоть и уступает по теплопроводности SiC, но в качестве подлож-

Таблица 3. Свойства InAs и InSb в сравнении с другими полупроводниковыми материалами

Материал	Si	GaAs	$In_{0,58}Ga_{0,42}As$	InAs	InSb
Подвижность электронов в канале (концентрация носителей 10^{12} см^{-2}), $\text{см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$	600	4600	7800	16000–20000	30000
Скорость насыщения электронов, 10^7 см/с	1,0	2,2	0,8	3,5	5,0
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,12	1,42	0,72	0,36	0,18

ки для GaN-приборов предпочтителен благодаря структурному соответствию. Однако сегодня проводящие GaN-подложки, причем диаметром 50 мм, производят лишь три компании – ATMI, Кума, Sumitomo. Цены их высоки, число пластин ограничено, а их качество (плотность дефектов) не отвечает требованиям, предъявляемым к пластинам для крупномасштабного производства. Изготовление полуизолирующих GaN-подложек еще только осваивается.

Гораздо сложнее с AlN-подложками. В промышленных масштабах во всем мире AlN-пластины производит только компания Crystal IS (США) и только (диаметром 25 мм). Правда, есть надежда, что в скором времени это положение изменится. Кроме того, ведутся работы по созданию подложек на основе искусственных алмазов.

В то же время значимые успехи достигнуты в области создания GaN-приборов на недорогих Si-подложках с кристаллографической ориентацией (111) [1]. Лидером освоения и коммерциализации GaN-эпитаксиальных структур на таких подложках выступила компания Nitronex. На ее подложках фирма TriQuint Semiconductor уже создала МИС двухкаскадного усилителя X-диапазона мощностью 25 Вт. Ширина затвора транзистора в выходном каскаде составляет 11,4 мм, размер кристалла – 3 x 4,5 мм. Мощность 25 Вт в импульсном режиме была достигнута на частоте 10 ГГц при напряжении стока 30 В и усилении 15 дБ, КПД – 21% [14].

БУДУЩЕЕ РОЖДАЕТСЯ СЕГОДНЯ

Остановимся на технологиях, которые еще не только не вышли из лабораторных стен, но даже ожидать этого события не приходится раньше, чем лет через пять. Учитывая, что цикл становления технологии составляет примерно 10–15 лет (от первых лабораторных до первых промышленных образцов), с определенной уверенностью отнесем описанные ниже технологии к разряду ближайшей перспективы.

Антимониды и арсенид индия

Первые сообщения о AlSb/InAs/AlSb HEMT появились в конце 80-х годов [15]. Однако вплоть до недавнего времени ощутимого прогресса в этой области не наблюдалось. Сегодня исследования приборов на основе этих материалов поддерживаны программой DARPA "Сложные полупроводники на основе антимонидов" (Antimonide Based Compound Semiconductor – ABCS). Речь идет о

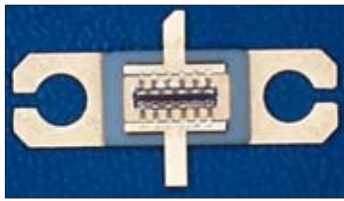


Рис.9. Транзистор CRF-24060 компании Cree (со снятой крышкой корпуса)

полупроводниковых соединениях GaSb, InAs, и AlSb с близкими значениями постоянных кристаллической решетки – примерно 6,1 ангстрем (см. рис.2). У таких материалов весьма узкая запрещенная зона, но чрезвычайно высокие значения подвижности электронов (до 33000 см²/В·с) и скорости насыщения носителей (свыше 4·10⁷ см/с) при комнатной температуре (табл.3). Это позволяет создавать на их основе HEMT и HBT с чрезвычайно высоким быстродействием и рабочими напряжениями порядка 0,5–1 В.

В этой области уже достигнуты значимые практические результаты. Так, сотрудники компании NGST совместно со специалистами Исследовательской лаборатории ВМС США (NRL) сообщили о создании AlSb/InAs MHEMT-структур с длиной затвора 0,1 мкм (табл.4). Разрыв границ зоны проводимости в области гетероперехода AlSb/InAs достигает 1,35 эВ, что приводит к формированию глубокой квантовой ямы и обуславливает высокую концентрацию носителей в 2DEG-области (до 1,28·10¹² см⁻² при подвижности электронов 26300 см²/В·с) [16].

Крутизна транзисторов достигает 1,3 См/мм при рабочем напряжении до 0,3 В, значения f_T и f_{max} превысили 220 и 270 ГГц, соответственно, напряжение пробоя сток-затвор – 1,42 В. При таких высоких частотах удельная рассеиваемая мощность приборов оказалась чрезвычайно низкой. В частности, при напряжениях сток-исток 0,2 и 0,5 В граничная частота в среднем составила 160 и 220 ГГц, а ток канала – 135 и 340 мА/мм, соответственно. Столь небольшая рассеиваемая мощность (27 и 170 мВт/мм) по меньшей мере в 5–10 раз ниже, чем у InP HEMT на аналогичных частотах. В диапазоне 2–26 ГГц удельная рассеиваемая мощность не превысила 6 мВт/мм при коэффициенте шума 0,85 дБ и усилении 11,5 дБ.

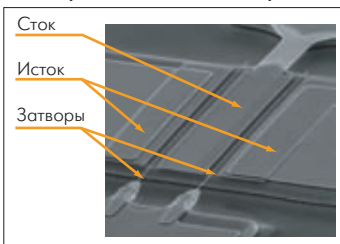


Рис.10. “Двухпальцевый” Al_xIn_{1-x}Sb / InSb MHEMT-транзистор с 0,1-мкм затвором

На базе AlSb/InAs HEMT уже создана МИС усилителя мощности, коэффициент шума которого в диапазоне 80–100 ГГц составил 5,4 дБ, усиление – 11,1 дБ, а общая рассеиваемая мощность – 1,8 мВт. При усилении 16 дБ в полосе 77–103 ГГц рассеиваемая мощность была равна 4,41 мВт [17].

Еще более многообещающим по сравнению с InAs-приборами выглядят транзисторы с каналным слоем из **антимонида индия**. InSb характеризуется самой высокой подвижностью носителей из известных полупроводников (см. табл.3). Его свойства были продемонстрированы более восьми лет назад в МДП-транзисторе с InSb-каналом, сформированном на InSb-подложке с SiO₂ в качестве подзатворного диэлектрика [18].

Первый MHEMT-транзистор на основе Al_xIn_{1-x}Sb/InSb-структуры с 0,1-мкм затвором создали сотрудники технологического центра QinetiQ и компании Intel [19] (рис.10). Прибор был изготовлен на GaAs-подложке, на которой располагались Al_xIn_{1-x}Sb-буферный слой толщиной 3 мкм, нижний барьерный слой Al_xIn_{1-x}Sb, InSb-каналный слой толщиной 20 нм и Al_xIn_{1-x}Sb-слейсер толщиной 5 нм. Выше следовали δ-легированный теллуром тонкий слой Al_xIn_{1-x}Sb (с концентрацией донорной примеси 10¹² см⁻²) и верхний барьерный слой

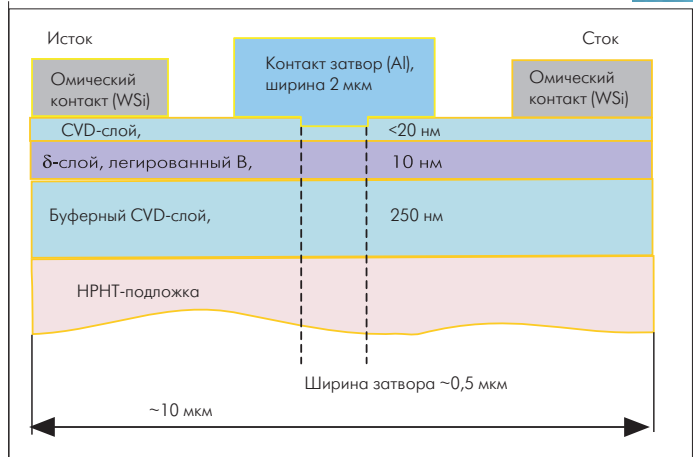


Рис.11. Структура первого MESFET-транзистора на основе алмаза с δ-слоем, легированным бором [23]

Al_xIn_{1-x}Sb толщиной 15–45 нм. При доле алюминия в барьерном слое 30% подвижность электронов в канале составила 30000·см²/В·с при концентрации носителей 1,3·10¹² см⁻².

В испытуемых InSb-транзисторах с затвором длиной 0,1 мкм и шириной 40 мкм доля Al в Al_xIn_{1-x}Sb составляла 20%, что обеспечивало концентрацию носителей в канале 10¹² см⁻² и их подвижность 25000 см²/В·с. Максимальная крутизна прибора при напряжении сток-исток 0,5 В – 800 мСм/мм, ток в канале – 250 мА/мм, экстраполированные значения f_T и f_{max} – 210 и 270 ГГц, соответственно. Рассеиваемая мощность InSb-прибора примерно в 10 раз меньше, чем у кремниевого *n*-канального МОП-транзистора с 80-нм каналом на такой же граничной частоте. Задержка включения (вентильная задержка) по крайней мере второе меньше, чем в современных или перспективных Si-транзисторах при равной длине затвора.

Алмаз как материал для СВЧ-приборов

Алмаз как полупроводниковый материал давно привлекает внимание исследователей благодаря своим выдающимся электрофизическим характеристикам. При комнатной температуре ширина его запрещенной зоны – 5,47 эВ, подвижность электронов и дырок – 1800 и 1200 см²/В·с, соответственно (может достигать 4500 и 3800 см²/В·с, соответственно [20]). Как показывают расчеты, на основе алмазов можно

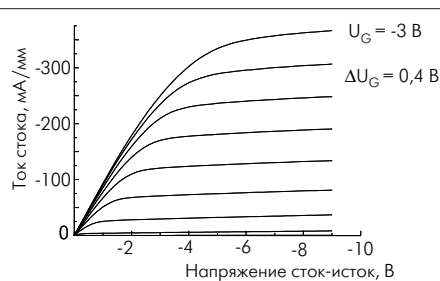


Рис.12. ВАХ MESFET на HPHT-алмазе [21]

создавать МДП-структуры с удельной плотностью мощности до 27 Вт/мм, плотностью носителей заряда в тонком слое до 10¹³ см⁻², напряжением пробоя порядка 10 МВ/см и рабочими частотами 100 ГГц [20]. Не менее важное свойство алмазов – их высокая теплопроводность, около 20 Вт/К см, что более чем в 30 раз выше, чем у GaAs (см. табл.2). Поэтому первые попытки применения алмазов в СВЧ-приборах были направлены на создание теплопроводящих подложек, как правило, методом химического осаждения тонких пленок из газовой фазы (CVD-алмазы) [21]. Это направление развивается и сегодня, в том числе в России [22].

С формированием активных приборных структур на основе алмазов трудностей гораздо больше. Технические проблемы главным образом связаны с легированием. Легирующие примеси ал-

маза – бор (акцептор), азот и фосфор (доноры). Но в структуре алмаза энергия активации (ионизации) этих элементов весьма высокая – у бора $E_A = 0,37$ эВ, фосфора и азота – 0,62 и 1,7 эВ, соответственно. Это означает, что при комнатной температуре донорная примесь не будет активироваться, и единственный легирующий элемент – это бор. Но энергия ионизации бора также велика, и полная активация акцепторных связей при комнатной температуре наступает при концентрации свыше 10^{20} см⁻³.

Путем легирования тонкого слоя алмаза бором ученые факультета электронных приборов и схем университета г. Ульм (Германия) совместно со специалистами компании Element Six (Великобритания) создали в начале 2005 года действующую MESFET-структуру (рис.11) [23]. На подложку искусственного алмаза, выращенного при высоких значениях давления и температуры (НРПТ) (ориентация 100), наносился слой CVD-алмаза толщиной 250 нм. На нем вырастили δ -слой CVD-алмаза, легированного бором с максимальной концентрацией $5 \cdot 10^{20}$ см⁻³. Толщина этого δ -слоя на уровне половины максимальной концентрации не превышала 10 нм. Поверх δ -слоя осаждался тонкий (<20 нм) слой CVD-алмаза. Переход Шоттки создавался путем нанесения на этот CVD-слой алюминиевого затвора. Канал формировался непосредственно над легированным δ -слоем. Отметим, что чем острее профиль легирования δ -слоя, тем выше подвижность дырок в канале, которая может достигать 3800 см²/В·с. Ток сток-исток первого "алмазного" транзистора не превысил 1 мкА при размере затвора 100 x 0,5 мкм. В целом эксперимент подтвердил правильность расчетов. Таким образом, первый транзистор на CVD-алмазах может стать родоначальником семейства перспективных приборов.

Есть сообщения и о другом способе создания транзисторных структур на основе алмазов. Так, обработка поверхности алмазной пластины водородом (hydrogen termination) приводит к появлению тонкого приповерхностного слоя с проводимостью p -типа, в результате формируется слой двумерного дырочного газа с концентрацией носителей $\sim 10^{13}$ см⁻². Однако пока физика этого эффекта до конца не объяснена. Тем не менее, уже созданы опытные МДП-структуры на основе поверхностной проводимости алмазных пленок. Успехов в этой области добились упомянутые исследователи университета г. Ульм, создав как планарный МДП-транзистор с использованием CaF₂ в качестве затворного диэлектрика, так и MESFET с самосовмещенным Т-образным затвором [21]. MESFET-транзисторы изготавливались на различных подложках – искусственных НРПТ-алмазах с ориентацией 111 и 100, CVD-монокристаллических подложках, и квазиподложках, выращенных на Ir/SrTiO₃. Во всех случаях были сформированы транзисторные структуры с нормально обогащенным каналом и малыми токами утечки. При длине канала 0,2 мкм плотность тока достигала 360 мА/мм (рис.12). Измеренная подвижность дырок на поверхности оказалась на порядок ниже расчетной (150 см²/В·с), что объясняется рассеянием на поверхностных состояниях. Тем не менее, при низких уровнях тока удалось добиться превосходных частотных характеристик: $f_T = 25$ ГГц и f_{max} до 81 ГГц. На частоте 3 ГГц уровень собственных шумов составил 0,72 дБ.

Окончание следует

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилин В., Жукова Т. и др. Транзистор на GaN. Пока самый "крепкий орешек". – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, №4, с.20–29.
2. Sabyasachi Nayak, Ming-Yih Kao et al. 0.15 μ m Power pHEMT Manufacturing Technology for Ka- and Q- Band MMIC Power

- Amplifiers. – 2005 GaAs MANTECH Conf. Dig. Ppr., 2005.
3. K. Shinohara et al. Ultrahigh-Speed Pseudomorphic InGaAs/InAlAs HEMTs With 400-GHz Cutoff Frequency. – IEEE Electron Device Letters, Vol. 22, No. 11, p. 507–509, Nov. 2001.
4. www.st.northropgrumman.com/velocium
5. J. Uyeda et al. 0.1 μ m InP HEMT MMIC Fabrication on 100 mm Wafers for Low Cost, High Performance Millimeter-Wave Applications. – 2004 GaAs MANTECH Conf. Dig. Ppr., 2004.
6. C. S. Whelan et al. High Frequency Power Metamorphic HEMT. – 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. J. S. Dunn et al. Foundation of RF CMOS and SiGe BiCMOS technologies. – IBM Journal of Research & Development, 2003, Vol. 47, N 2/3.
9. Шахнович И. Твердотельные СВЧ-приборы и технологии. Невоспетые герои беспроводной революции – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, №4, с.14.
10. Toshihide Kikkawa et al. An Over 100 W CW Output Power Amplifier Using AlGaIn/GaN HEMTs. – 2004 GaAs MANTECH Conf. Dig. Ppr., 2004.
11. Y.-F. Wu, A. Saxler et al. 30W/mm GaN HEMTs by Field Plate Optimization. – IEEE Electron Device Letters, Vol. 25, No. 3, March 2004, p. 117.
12. J.W. Milligan, J. Henning et al. SiC MESFET and MMIC Technology Transition to Production. – 2005 GaAs MANTECH Conf. Dig. Ppr., 2005.
13. John D. Blevins. Wide Bandgap Semiconductor Substrates: Current Status and Future Trends. – 2004 GaAs MANTECH Conf. Dig. Ppr., 2004.
14. D.M.Fanning, L.C.Witkowski, C.Lee et al. 25 W X-band GaN on Si MMIC. – 2005 GaAs MANTECH Conf. Dig. Ppr., 2005.
15. G.Tuttle, H. Kroemer. An AlSb/InAs/AlSb quantum well HFT. – 45th Device Res. Conf. Abstr., June 1987.
16. P.Nam, R.Tsai et al. Shallow Mesa Isolation of AlSb/InAs HEMT with AlGaSb Buffer Layer Using Inductively Coupled Plasma Etching. – 2005 GaAs MANTECH Conf. Dig. Ppr., 2005.
17. W.Deal et al. Proceedings of GaAs IC Symposium, p. 301–304, 2004.
18. T.Ashley et al. – IEDM Technical Digest, 1997, p.751.
19. T. Ashley et al. InSb-based Quantum Well Transistors for High Speed, Low Power Applications. – 2005 GaAs MANTECH Conf. Dig. Ppr., 2005.
20. E. Kohn et al. Diamond. A New Materials Base for Future Ultra High Power RF Electronics. – 2004 GaAs MANTECH Conf. Dig. Ppr., 2004.
21. G.J.Sullivan, E.Yablomovich et al. Flexible, Thin-Film, GaAs Hetero-Junction Bipolar Transistors Mounted On Natural Diamond Substrates. – Solid-State Electronics, 1995, Vol. 38, No. 11.
22. НПП "Исток" развивает технологии твердотельной СВЧ-электроники. Интервью с С.И.Рибровым. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, №4, с.8–11.
23. E. Kohn, M.Schwitters et al. Diamond-MESFETs – Synthesis and Integration. – 2nd EMRS DTC Technical Conference, Edinburgh 2005 (www.emrsdte.com/conferences/2005/downloads/pdf/A26.pdf).

С материалами конференций GaAs MANTech можно ознакомиться на сайте www.gaasmantech.org