

## Биполярные СВЧ-транзисторы

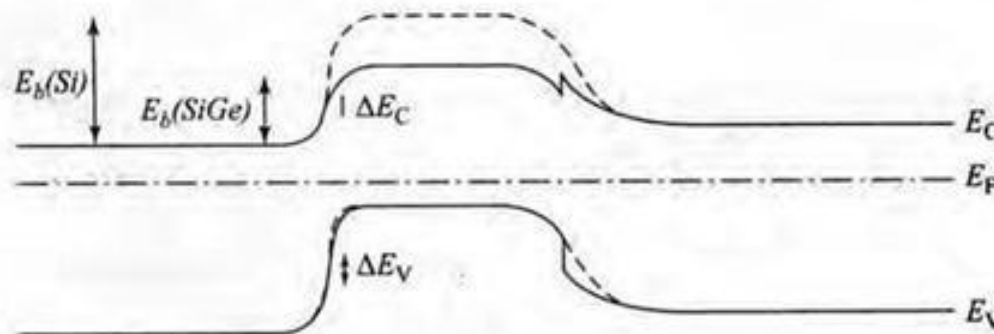
Одним из перспективных направлений по улучшению параметров биполярных транзисторов является замена эмиттерного  $p$ - $n$ -перехода на гетеропереход

### Типовая структура ГБТ на основе SiGe



Германий имеет ширину запрещенной зоны  $E_g=0,66\text{эВ}$ , а кремний – ширину  $E_g=1,12\text{эВ}$

Технология SiGe-транзисторов позволяет получить следующие параметры: легирующие концентрации эмиттера –  $10^{20}\text{см}^{-3}$ , базы –  $10^{20}\text{см}^{-3}$ , коллектора –  $10^{20}\text{см}^{-3}$ , граничные частоты до 300 ГГц.



Зонная диаграмма кремниевого биполярного транзистора с гетеропереходом

## Биполярные СВЧ-транзисторы

### Типовая структура ГБТ на основе GaAs



Типовая структура биполярного транзистора с эмиттерным гетеропереходом на основе арсенида галлия ГБТ на GaAs

Эмиттер-база	$\Delta E_c$ , эВ	$\Delta E_v$ , эВ	$\Delta E_g$ , 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

Ширина запрещенной зоны полупроводникового соединения AlGaAs в эмиттере больше, чем GaAs в базе на величину  $\Delta E_g = 0,37$  эВ. В случае использования  $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$  разрыв зоны проводимости составляет  $\Delta E_c = 0,24$  эВ, разрыв валентной зоны  $\Delta E_v = 0,13$  эВ.

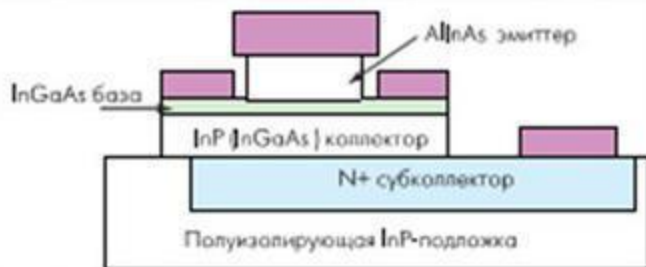
В последние годы в HBT-транзисторах стали активно использоваться новые полупроводниковые соединения группы  $A^3B^5$ : в эмиттере – InGaP, AlInAs, InP и т.п., в базе (и коллекторе) – InGaAs. Разработчики при этом стремятся сократить разрыв границы зоны проводимости и одновременно увеличить разрыв границы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

## Биполярные СВЧ-транзисторы

### Биполярные транзисторы с гетеропереходами на соединениях с фосфидом индия InP

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  $\mu_n = 4500$  см<sup>2</sup>/(В·с). 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 полуизолирующей InP-подложке и коллектор также создан из легированного InP (рис). 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. 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 получены InAlAs/InGaAs/InP SHBT и DHBT (рис.) 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 при токе коллектора 6 мА и пробивном напряжении 1,6 В.



Большие перспективы исследователи связывают со структурами типа InP/GaAsSb/InP.

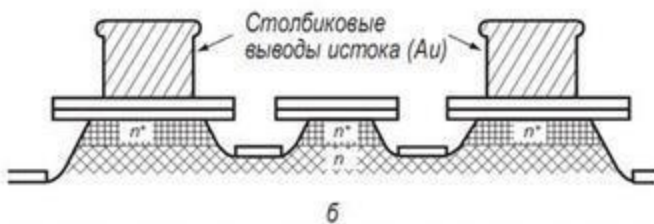
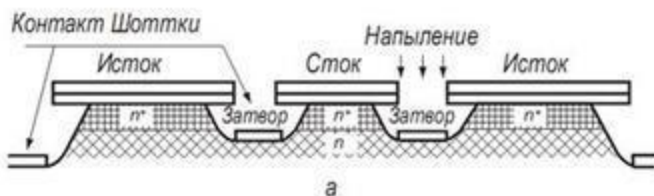
Пример InP DHBT-транзистора (AlInAs / InGaAs / InP) с субколлекторным слоем. Коллектор – четырехслойная InP-структура



## Полевые СВЧ-транзисторы с барьером Шоттки

Полевые транзисторы с управляющим переходом металл-полупроводник получили наибольшее распространение при производстве интегральных схем на основе арсенида галлия. Арсенид-галлиевые микросхемы имеют высокое быстродействие и могут работать в области сверхвысоких частот.

### GaAs-полевой транзистор с барьером Шоттки

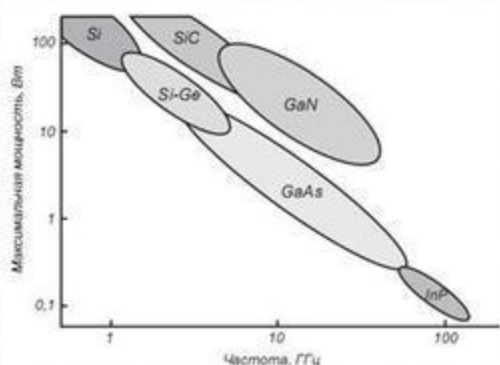


Конструкция мощного СВЧ GaAs полевых транзистора с затвором в виде барьера Шоттки

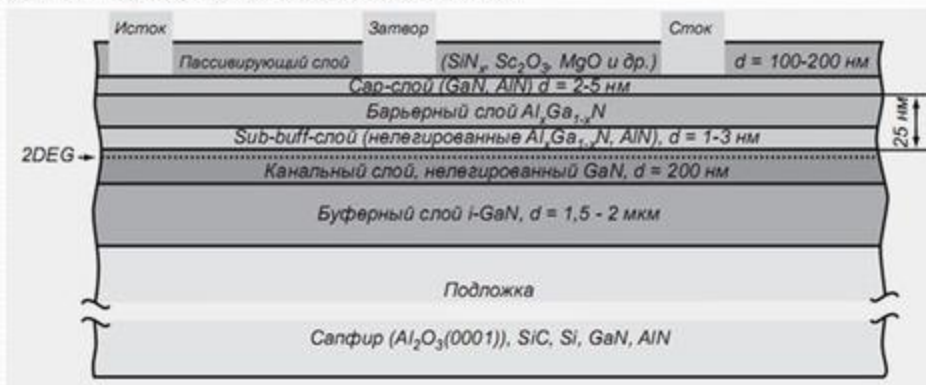
## Полевые СВЧ-транзисторы с барьером Шоттки

### GaN-полевой транзистор с гетеропереходом

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 широко-зонных полупроводниковых материала – карбид кремния и нитрид галлия.



Зависимость максимальной мощности от частоты для приборов на основе различных полупроводниковых материалов



Зависимость максимальной мощности от частоты для приборов на основе различных полупроводниковых материалов

В полевых транзисторах с гетеропереходом основным элементом является область двумерного электронного газа (2D), локализованная в ОПЗ гетероперехода между барьерным слоем  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  и нелегированным слоем GaN, являющимся канальным слоем полевого транзистора. Подвижность электронов в 2D-слое составляет  $2000\text{см}^2/\text{Вс}$ .

## Монолитные интегральные схемы с СВЧ-полевыми транзисторами

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

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.

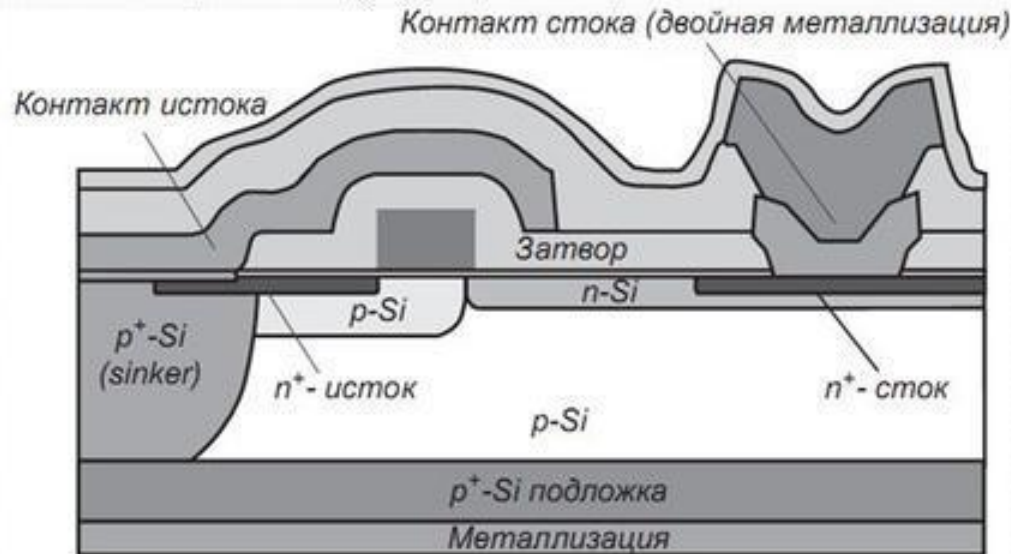
На фоне этих доминирующих сегодня технологий развиваются направления, которые, возможно, будут играть важнейшую роль в СВЧ-электронике завтра. Прежде всего, речь идет о фосфиде индия и твердых растворах на его основе (AlInP). В последние годы наблюдается необычайно бурное развитие широкозонных материалов – 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.



# Монолитные интегральные схемы с СВЧ-полевыми транзисторами

## Кремниевые LDMOS-транзисторы

В области мощных кремниевых СВЧ-транзисторов лидируют приборы, произведенные по технологии LDMOS (МОП с боковой диффузией) (рис.). Принципиальное ее отличие от традиционной МОП-технологии – несимметричная структура транзистора.



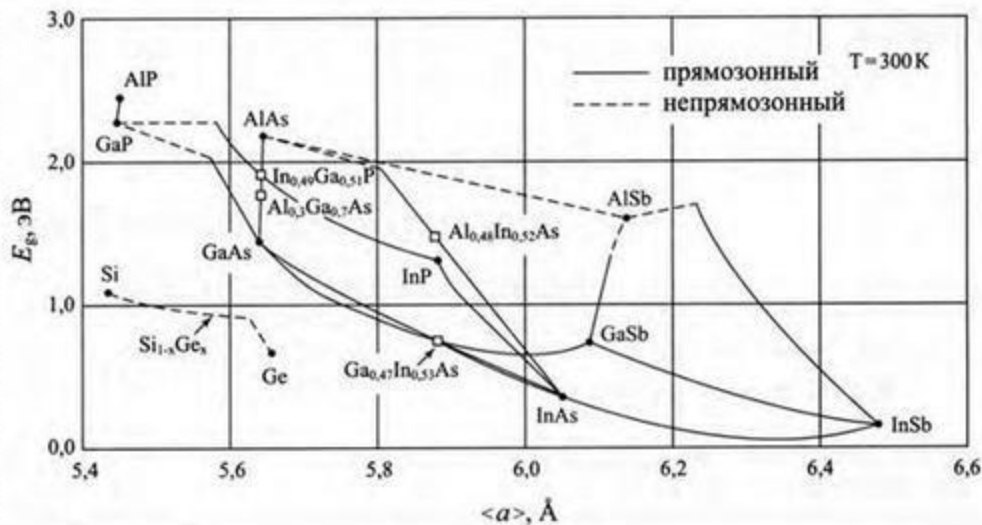
Еще в 2000 году компания Motorola представила LDMOS-транзистор с длиной затвора 0,6 мкм, толщиной подзатворного окисла 40 нм и пробивным напряжением исток-подложка 65 В. При суммарной ширине затвора 480 мкм транзистор работал с выходной мощностью 220 Вт на частоте 2,12 ГГц при рабочем напряжении 28 В, демонстрируя КПД 46%.

Типичный современный LDMOS-транзистор – прибор SLD-2083CZ компании Sirenza Microdevices. Он предназначен для работы в диапазоне 300–2200 МГц с усилением 18 дБ и выходной мощностью 10 Вт.

Базовая структура мощного СВЧ МДП полевого транзистора, созданного по технологии МОП с боковой диффузией

## Полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов в канале (HEMT транзисторы)

В англоязычной терминологии для обозначения GaAs полевых транзисторов с гетеропереходом и управляющим затвором в виде барьера Шоттки применяется аббревиатура HEMT (High Electron Mobility Transistors). Первая модификация полевых транзисторов с высокой подвижностью 2D электронов в канале была реализована на гетеропереходе  $p\text{-GaAs}/n\text{-AlGaAs}$  с постоянными кристаллических решеток  $\langle a_{\text{AlGaAs}} \rangle = 5,68 \text{ \AA}$  и  $\langle a_{\text{GaAs}} \rangle = 5,65 \text{ \AA}$ .

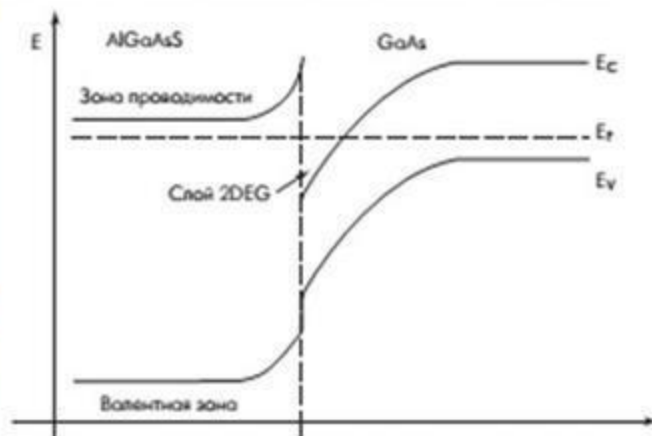
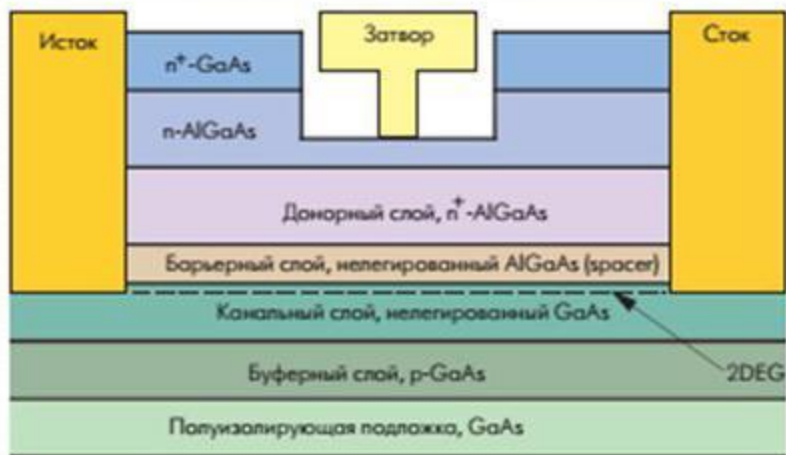


Ширина запрещенной зоны и период кристаллической решетки для некоторых твердых растворов типа  $A^{III}B^V$



## Полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов в канале (HEMT транзисторы)

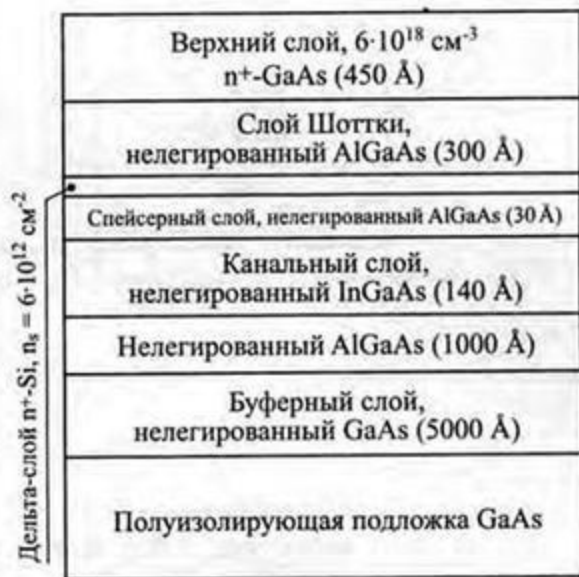
Материал для канального слоя выбирают изначально с высокой подвижностью электронов. Так как канальный слой HEMT-транзисторов не легирован, в нем рассеяние электронного газа на примесных центрах и дислокациях решетки минимальны, соответственно подвижность электронов остается такой же высокой, как в объемном материале.



Типичная структура GaAs ГПТШ и его зонная диаграмма

## Полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов в канале (HEMT транзисторы)

HEMT-транзисторы, у которых гетеропереход образован материалами с существенно различными постоянными решетки  $\langle a \rangle$  (AlGaAs/InGaAs, InGaAs/InAlAs, InGaP/InGaAs) получили название псевдоморфных транзисторов с высокой подвижностью электронов в канале (p-HEMT).

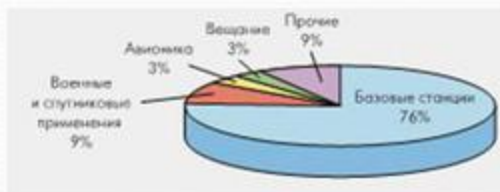


P-HEMT-транзисторы за счет увеличения разрыва между границами зон проводимости и большими значениями подвижности электронов в канальном слое обладают по сравнению с HEMT-транзисторами как более высоким пробивным напряжением (свыше 12 В), так и более высокими рабочими частотами. Одним из лидеров в развитии p-HEMT-транзисторов выступает компания TriQuint Semiconductor. Максимальный ток канала транзистора составляет 680 мА/мм при напряжении пробоя 13 В, граничной частоте 52 ГГц и коэффициенте полезного действия 40%.

Структура псевдоморфного p-HEMT транзистора  
AlGaAs/InGaAs/GaAs

## Области применения твердотельных СВЧ-приборов

В диапазонах частот до 2 ГГц основной потребитель СВЧ-компонентов (пассивных, транзисторов и СВЧ МИС) - системы сотовой связи.



Области применения твердотельных СВЧ-компонентов мощностью свыше 20 Вт

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). 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).

Среди основных коммерческих областей применения СВЧ-приборов миллиметрового диапазона 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.

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 пучком).

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 занимают 80% всех DAB-устройств.

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.