

# Гетеропереходный биполярный транзистор со структурой *rnr*-типа в арсенид-галлиевой технологии НВТ-НЕМТ

И.Ю. Ловшенко<sup>1</sup>, П.С. Кратович<sup>1</sup>, В.Р. Стемпицкий<sup>1</sup>,  
О.В. Дворников<sup>2</sup>, А.В. Кунц<sup>1</sup>, А.А. Павлючик<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск,  
lovshenko@bsuir.by

<sup>2</sup>ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт», г. Минск

<sup>3</sup>ОАО «Минский НИИ радиоматериалов», г. Минск

**Аннотация** — Выполнен анализ современного состояния разработок интегральных микросхем (ИМС) для жестких условий эксплуатации, на основании которого предложено использование арсенид-галлиевой технологии НВТ-НЕМТ. Представлены результаты приборно-технологического (TCAD) моделирования электрических характеристик гетеропереходного биполярного транзистора со структурой *rnr*-типа на основе GaAs. Определены следующие основные параметры: напряжение Эрли  $V_A$ , коэффициент усиления базового тока в схеме с общим эмиттером  $\beta_{ЭЭ}$ , напряжение пробоя промежутка коллектор-эмиттер  $V_{КЭВР}$ , граничная частота  $f_{гр}$ . Исследовано влияние на указанные параметры атомарного состава  $x$  соединения  $Al_xGa_{1-x}As$ , ширины активной базы  $W_B$  и даны рекомендации по выбору их оптимальных значений. Приведена оценка изменения параметров приборной структуры *rnr*-НВТ при вариации температуры.

**Ключевые слова** — гетеропереход, гетеропереходный биполярный транзистор,  $A_{III}V_V$ , моделирование, эксплуатационные характеристики, коэффициент усиления по току, напряжение Эрли, напряжение пробоя.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Существующая потребность рынка в микросхемах для жестких условий эксплуатации стимулировала разработку технологических маршрутов изготовления и новых схемотехнических решений, гарантирующих работоспособность аналоговых микросхем при температурах около минус 200 °С и высоком уровне проникающей радиации. Приборы и схемы на основе кремниевой технологии не могут в полной мере обеспечить выполнение указанных требований, а также имеют существенные ограничения при применении в СВЧ-диапазоне [1]. Приборы же на основе арсенида галлия и других соединений групп  $A_{III}V_V$  не обладают такими недостатками при работе в СВЧ-области, а также позволяют технологически изменять атомарный состав [1, 2] и, соответственно, управлять их физическими параметрами, наиболее значимыми из которых являются ширина запрещенной зоны и эффективная масса носителей заряда [3].

Анализ известных технических решений показал, что для таких условий эксплуатации целесообразно применение совмещенных арсенид-галлиевых технологий, позволяющих формировать на одной подложке *n*-канальные транзисторы с высокой подвижностью электронов (high electron mobility transistor, НЕМТ) и *rnr*-типа гетеропереходные биполярные транзисторы (heterojunction bipolar transistor, НВТ) [4, 5].

В настоящее время российско-белорусскими специалистами проводятся совместные работы по одновременному созданию унифицированных схемотехнических решений и разработке технологического маршрута для изготовления в ОАО «Минский НИИ радиоматериалов» НАН Беларуси аналоговых микросхем, содержащих псевдоморфные НЕМТ (pНЕМТ) с каналом *n*-типа и *rnr*-НВТ [4-6].

Целью настоящей статьи является поиск конструктивного решения приборной структуры *rnr*-НВТ на основе гетероперехода AlGaAs/GaAs, обладающего эксплуатационными характеристиками, обеспечивающими выполнение требований, сформулированных разработчиками ИМС специального назначения.

## II. СТРУКТУРА

Существует большое разнообразие конструктивных решений приборных структур, которые можно условно объединить под общим названием «технология НВТ-НЕМТ» (другое часто встречающееся название –  $V_i$ НЕМТ) [7-9]. В этой технологии структура pНЕМТ выращивается первой, т.к. температуры роста для нее обычно выше, чем для НВТ. Главным недостатком такой технологии является увеличение площади и повышение сложности в реализации топологии готовой ИМС [10]. На рис. 1 представлена типовая конструкция, объединяющая *rnr*-НВТ и *n*-канальный pНЕМТ.

Ни один из используемых слоев не является общим: все слои накладываются друг на друга в соответствии с табл. 1. Слои №2-14 используются при

формировании приборной структуры *n*-канального рНЕМТ, №15-21 – *pnp*-НВТ.

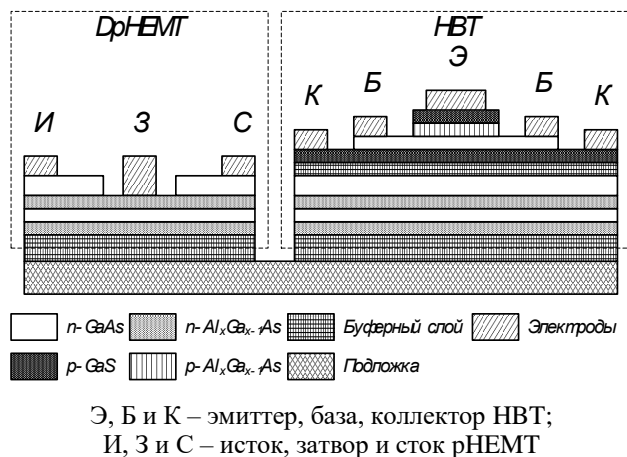


Рис. 1. Поперечное сечение транзисторов в технологии НВТ-НЕМТ

Таблица 1

Параметры слоев технологии НВТ-НЕМТ

Наименование	Материал	Толщина, нм	Степень легирования, см <sup>-3</sup>
22 Металлизация	AuGe/AuZn	200	
21 Эмиттерный зазор	<i>p</i> -GaAs	200	10 <sup>20</sup>
20 Контактный слой эмиттера	<i>p</i> -AlGaAs	30	10 <sup>19</sup>
19 Переходный слой эмиттера	<i>p</i> -AlGaAs	40	3·10 <sup>17</sup>
18 Спейсер	<i>i</i> -GaAs	4	–
17 База	<i>n</i> -GaAs	80	4·10 <sup>18</sup>
16 Коллектор	<i>p</i> -GaAs	280	3·10 <sup>16</sup>
15 Субколлектор	<i>p</i> -GaAs	600	7·10 <sup>19</sup>
14 Буферный слой	<i>i</i> -GaAs	100	–
13 Контактный слой	<i>i</i> -GaAs	60	–
12 Барьерный слой	<i>n</i> -AlGaAs	15	град.
11 Барьерный слой	<i>n</i> -GaAs	15	5·10 <sup>16</sup>
10 Донорный слой	<i>n</i> -AlGaAs	20	град.
9 Донорный слой	<i>n</i> -AlGaAs	20	5·10 <sup>18</sup>
8 Спейсер	<i>i</i> -AlGaAs	2	–
7 Активный слой	<i>n</i> -GaAs	60	2·10 <sup>12</sup>
6 Спейсер	<i>i</i> -AlGaAs	2	–
5 Донорный слой	<i>n</i> -AlGaAs	20	2·10 <sup>18</sup>
4 Донорный слой	<i>n</i> -AlGaAs	20	град.
3 Буферный слой	<i>i</i> -AlGaAs	40	–
2 Буферный слой	<i>i</i> -GaAs	200	–
1 Подложка	<i>i</i> -GaAs	200000	–

Посредством компьютерного моделирования в программном комплексе приборно-технологического проектирования компании Silvaco описана приборная структура *pnp*-НВТ на основе гетероперехода AlGaAs/GaAs. Технологически возможно получение соединения Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As с разным атомарным составом *x* принимающим значение от 0 до 1 [11]. В конструкции базовым значением принята величина *x* = 0,3. Площадь, занимаемая транзистором, составляет 30 мкм<sup>2</sup>, площадь эмиттера – 10 мкм<sup>2</sup>. Модели переноса носителей заряда, применяемые при моделировании, являются стандартными и не верифицировались под конкретный технологический маршрут.

Конфигурация зонной диаграммы при напряжениях на электродах в области эмиттера и базы, равном 0 В, представлена на рис. 2.

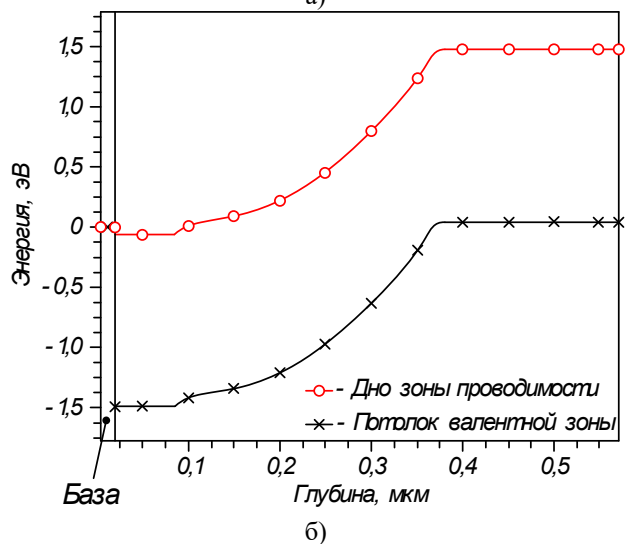
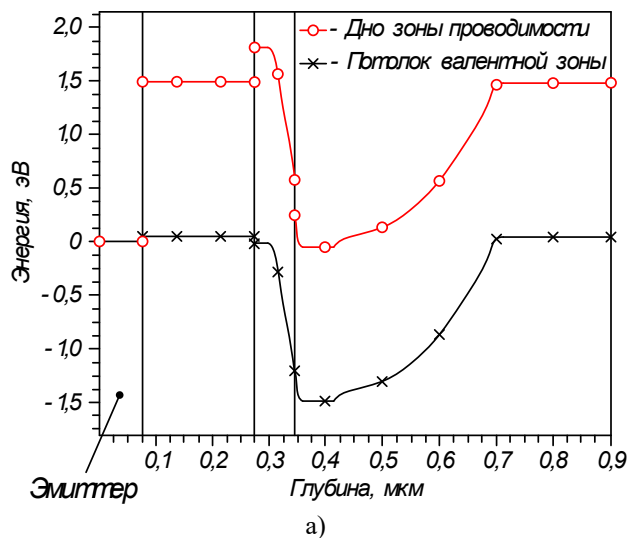


Рис. 2. Зонная диаграмма в области эмиттерного (а) и базового (б) контакта НВТ

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Выполнено исследование статических и динамических характеристик приборных структур НВТ на основе гетероперехода AlGaAs/GaAs.

Обычно результаты TCAD-моделирования НВТ представляют в виде графиков Гуммеля, т.е. зависимости коллекторного *I*<sub>к</sub> и базового *I*<sub>б</sub> тока от напряжения на прямосмещенном эмиттерном переходе *V*<sub>бэ</sub> (рис. 3), и выходной вольтамперной характеристики (ВАХ) в схеме с общим эмиттером (ОЭ) – зависимости *I*<sub>к</sub> от напряжения коллектор-эмиттер *V*<sub>кэ</sub> при заданном *I*<sub>б</sub> (рис. 4). Такие зависимости наглядно иллюстрируют особенности режимов работы транзисторов, но редко используются при схематехническом проектировании.

При синтезе и параметрической оптимизации аналоговых схем важно знать информацию о следующих параметрах и характеристиках:

- напряжение Эрли  $V_A$  (рис. 5), характеризующее выходное малосигнальное сопротивление  $r_{OUT} \approx V_A/I_K$  и определяющее максимально возможный коэффициент усиления напряжения в схеме с ОЭ  $K_{VMAX} \approx V_A/\varphi_T$ , где  $\varphi_T$  – температурный потенциал;

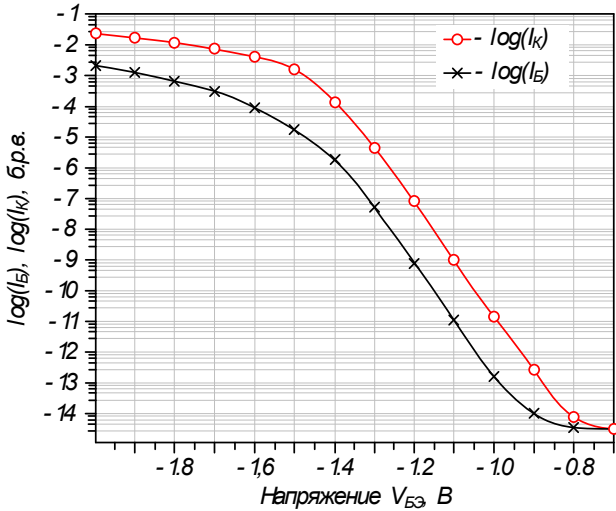


Рис. 3. Зависимости коллекторного  $I_K$  и базового  $I_B$  тока от напряжения на эмиттерном переходе  $V_{BE}$   $rnp$ -НВТ при  $W_B = 70$  мкм

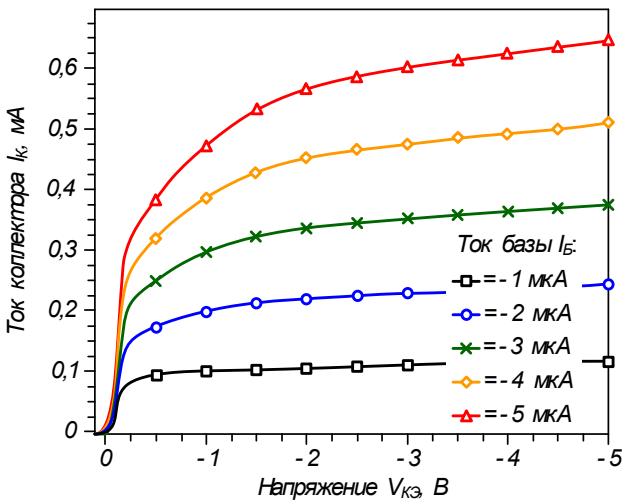


Рис. 4. Зависимости  $|I_K|$  от напряжения  $V_{CB}$  при разной величине базового  $I_B$  тока  $rnp$ -НВТ при  $W_B = 70$  мкм

- зависимость коэффициента усиления базового тока в схеме с ОЭ  $BETA = I_K/I_B$  от  $I_K$  (рис. 6). Данная зависимость определяет входное сопротивление транзистора в схеме с ОЭ и общим коллектором (ОК), выходное сопротивление в схеме с ОК. Входное сопротивление схем с ОЭ и ОК значительно снижает  $K_{VMAX}$  при последовательном соединении каскадов, а выходное сопротивление с ОК определяет нагрузочную способность;

- зависимость  $I_K = f(V_{BE})$  (рис. 7) влияет на величину минимально допустимого напряжения питания;

- при проектировании микросхем необходимо знать напряжение пробоя промежутка коллектор-эмиттер  $V_{KЭВР}$  (рис. 8), определяющее максимальное напряжение питания и, таким образом, динамический диапазон обрабатываемых сигналов;

- важнейшим параметром НВТ является граничная частота  $f_{гр}$  (рис. 9).

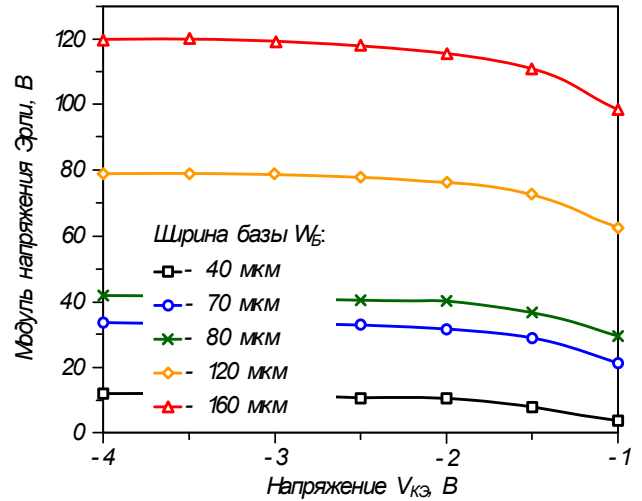


Рис. 5. Зависимость напряжения Эрли от коллекторного напряжения  $rnp$ -НВТ при разной  $W_B$

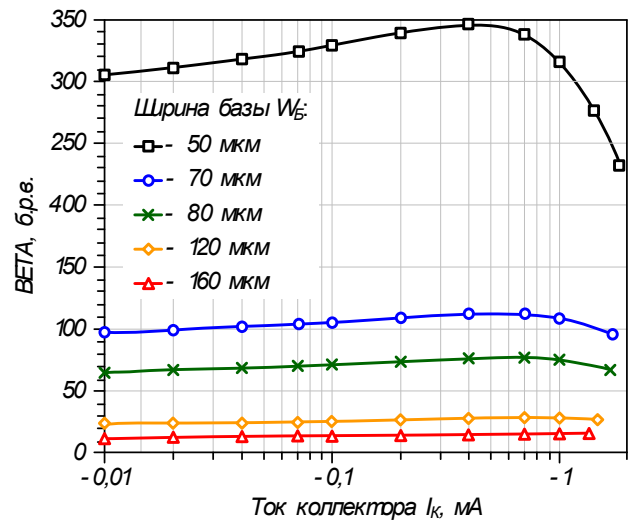


Рис. 6. Зависимость коэффициента усиления базового тока в схеме с общим эмиттером  $BETA$  от коллекторного тока при разной  $W_B$

На большинство указанных характеристик влияет толщина активной базовой области  $W_B$ , при этом необходим поиск компромиссного сочетания параметров, т.к. при уменьшении  $W_B$  увеличивается  $BETA$ , растет  $f_{гр}$ , что безусловно является положительным фактором. Однако, с другой стороны, ухудшается ряд параметров, а именно, уменьшается  $V_A$  и  $V_{KЭВР}$ .

По указанной причине в ряде работ введены критерии качества технологического маршрута в виде  $BETA \cdot V_A$  и  $f_{гр} \cdot V_{КЭВР}$ . Так, для кремниевых СВЧ транзисторов технологического маршрута АТТ СВІС V-2 получены следующие значения критериев качества  $BETA \cdot V_A \approx 3200$  В,  $f_{гр} \cdot V_{КЭВР} \approx 194$  ГГц·В для *pnp*-транзисторов и  $BETA \cdot V_A \approx 500$  В,  $f_{гр} \cdot V_{КЭВР} \approx 95$  ГГц·В для *npn* [12].

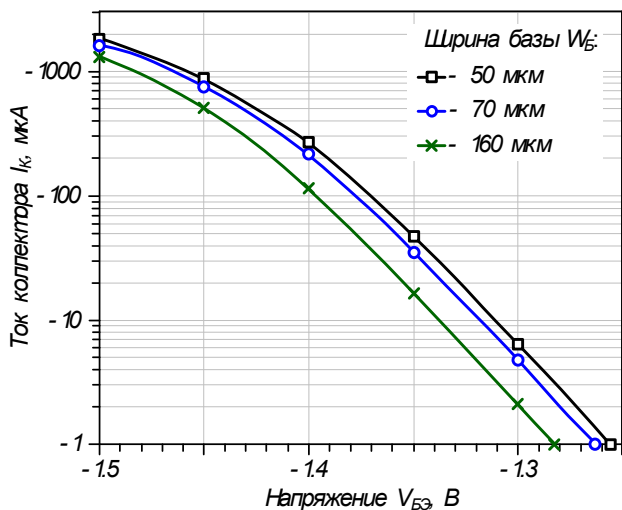


Рис. 7. Зависимость коллекторного тока от напряжения на эмиттерном переходе  $V_{БЭ}$  *pnp*- НВТ при разной  $W_B$

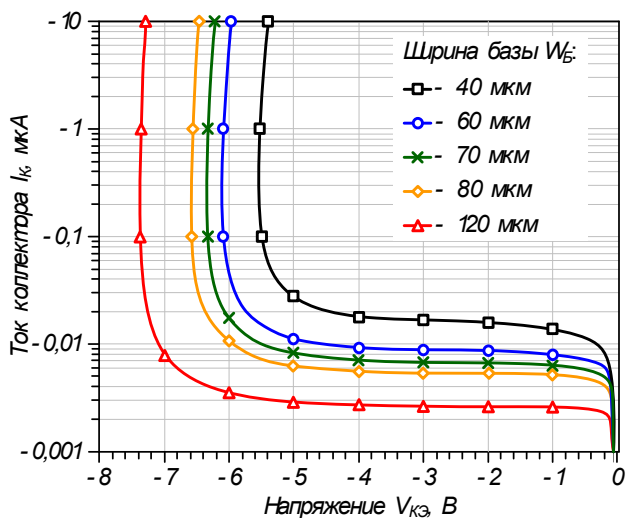


Рис. 8. Зависимость коллекторного тока от коллекторного напряжения при включении *pnp*- НВТ с ОБ для определения  $V_{КЭВР}$  при разной  $W_B$

Требуемые для синтеза аналоговых микросхем зависимости были определены по результатам TCAD-моделирования для различных значений  $W_B$  с применением известных методик [13]. Заметим, что моделирование  $V_{КЭВР}$  проводилось при включении *pnp*-НВТ в схеме с общей базой (ОБ) при прямо смещенном эмиттерным переходом ( $V_{БЭ} \approx -1,46$  В), обратно смещенном коллекторным и сопротивлением в базе, равном 1 ГОм. Такой режим наиболее близок к измерению  $V_{КЭВР}$  на характеристиках.

Анализ результатов, показанных на рис. 5-9, позволяет сделать следующие выводы:

- по совокупности параметров для проектирования аналоговых микросхем рекомендуется применять технологический маршрут с  $W_B = 70$  нм, для которого критерии качества будут  $BETA \cdot V_A \approx 3470$  В,  $f_{гр} \cdot V_{КЭВР} \approx 210$  ГГц·В;

- целесообразна доработка технологического маршрута для уменьшения величины  $V_{БЭ}$  и увеличения  $V_{КЭВР}$ .

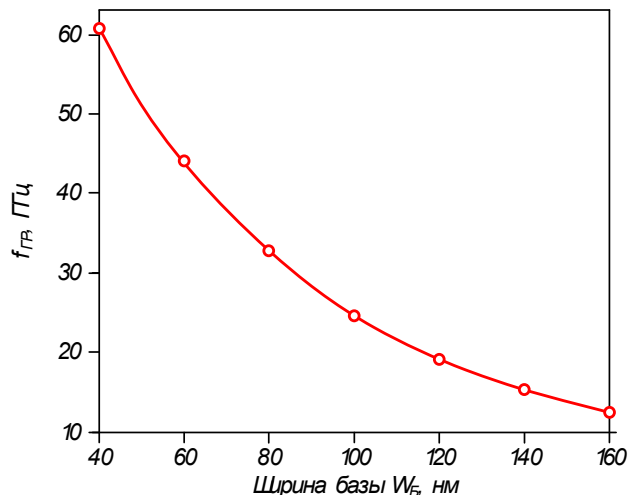


Рис. 9. Зависимость максимальной граничной частоты от ширины базы  $W_B$

Дополнительно выполнено исследование влияние атомарного состава  $x$  соединения  $Al_xGa_{1-x}As$  на электрические характеристики структуры *pnp*-НВТ. Для тройных полупроводников соединений ( $AlGaAs$ ) использована модель запрещенной зоны, которая интерполирует значение в зависимости от ширины запрещенных зон конечных бинарных соединений ( $AlAs$  и  $GaAs$ ). Так, ширина запрещенной зоны для  $AlGaAs$  может принимать значение от 2,15 эВ ( $E_{gAlAs}$ ) до 1,42 ( $E_{gGaAs}$ ) в зависимости от атомарного состава соединения. Формулы, по которым ведется расчет, нелинейные. Средство к электрону для этих материалов также оценивается с использованием формул интерполяции для конкретных материалов [14]. На рис. 10 представлены зависимости критериев качества от атомарного состава  $x$  соединения  $Al_xGa_{1-x}As$ .

Установлено, что наибольшее влияние атомарный состав  $x$  соединения  $Al_xGa_{1-x}As$  оказывает на  $BETA$  и напряжение Эрли  $V_A$ . Так в исследуемом интервале значений  $x$  величина  $BETA$  изменяется на минус 4,8 % для  $x = 0,2$  и 2,15 % для  $x = 0,2$  от номинального значения, а напряжение Эрли на 2,7 % и минус 0,19 % соответственно. Величины же граничной частоты  $f_{гр}$  и напряжения пробоя остаются практически постоянными – величина максимального отклонения не превышает 0,36 % ( $f_{гр}$ ) и 1,3 % ( $V_{КЭВР}$ ). Таким образом, критерий качества  $BETA \cdot V_A$  в большей

степени зависит от атомарного состава  $x$  соединения  $Al_xGa_{1-x}As$ .

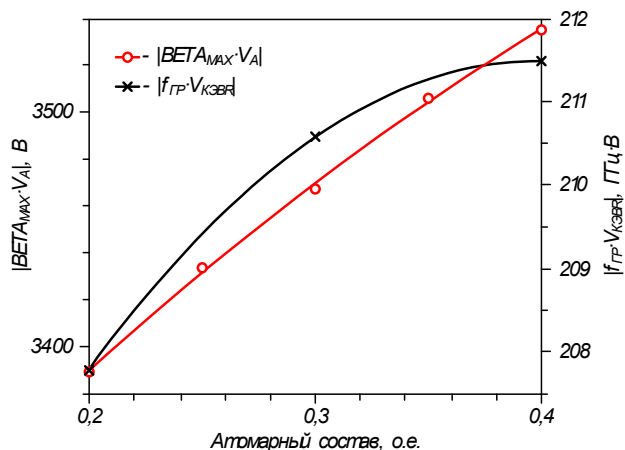


Рис. 10. Зависимости критериев качества от атомарного состава соединения  $Al_xGa_{1-x}As$  при  $W_b=70$  нм

Температурно-зависимая модель подвижности для  $Al_xGa_{1-x}As$  также использует интерполяционные формулы. Результаты моделирования критериев качества  $npn$ -HBT при разной температуре представлены на рис. 11.

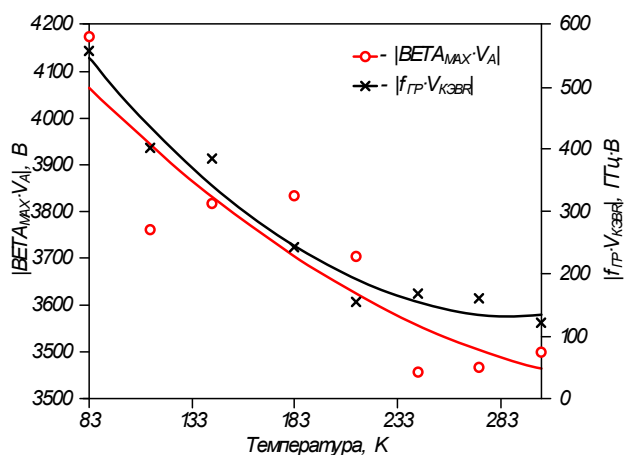


Рис. 11. Зависимости критериев качества от температуры при  $W_b=70$  нм

Установлена сильная зависимость граничной частоты от температуры: увеличение более чем в 2 раза при уменьшении температуры на 130 К. При этом напряжение пробоя  $V_{КЭВР}$  практически не изменяется, а максимальное отклонение  $BETA$  и напряжения Эрли от значения при температуре  $T=273$  К составляет 7,8 % и 2,1 % соответственно. Полученные результаты носят оценочный характер. Для повышения точности TCAD моделирования необходимо проведение натурального эксперимента и верификация параметров используемых моделей переноса носителей заряда.

#### ПОДДЕРЖКА

Исследования выполнены при финансовой поддержке и в рамках решения задач государственной

программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций» (задание 3.4).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Войтович В., Гордеев А., Думаневич А. Si, GaAs, SiC, GaN-силовая электроника. Сравнение, новые возможности // Силовая электроника. 2010. №. 28. С. 4–10.
- [2] Adachi S., Tu C. Physical Properties of III-V Semiconductor Compounds: InP, InAs, GaAs, GaP, InGaAs and InGaAsP // Physics Today. 1994. Vol. 47. №. 2. P. 99.
- [3] Fresina, M. Trends in GaAs HBTs for wireless and RF / Proceeding 2011 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. 2011. P. 150-153.
- [4] Дворников О.В., Павлючик А.А., Прокопенко Н.Н., Чеховский В.А., Кунц А.В., Чумаков В.Е. Арсенид-галлиевый аналоговый базовый кристалл / Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2021. Выпуск 2. С. 47-54.
- [5] Прокопенко Н.Н., Дворников О.В., Чумаков В.Е., Клейменкин Д.В. Арсенид-галлиевые операционные усилители с умножителями каскадов / Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2022. D036.
- [6] Дворников О.В., Павлючик А.А., Прокопенко Н.Н., Чеховский В.А., Кунц А.В., Чумаков В.Е. Унифицированные схемотехнические решения аналоговых арсенид-галлиевых микросхем / Известия высших учебных заведений. Электроника. 2022. Т.27. №4.
- [7] Lu C.-H., Lin C.-H., Liao Y.-H., Chang H.-Y., Wang Y.-C. Monolithic 2- $\mu$ m/0.5- $\mu$ m GaAs HBT-HEMT (BiHEMT) process for low phase noise voltage controlled oscillators (VCOs) / 2012 Asia Pacific Microwave Conference Proceedings. Kaohsiung : IEEE. 2012. P. 1235–1237.
- [8] Shokrani M., Xie K., Gedzberg B., Krystek W., Mushini P., Gupta A., Fowler P., Peatman W. InGaP-Plus: A Low Cost Manufacturable GaAs BiFET Process Technology / Proceedings CS MANTECH (2006). Vancouver. 2006. P. 153–156.
- [9] Lin C.K., Tsai T.C., Yu S.L., Chang C.C., Cho Y.T., Yuan J.C., Ho C.P., Chou T.Y., Huang J.H., Tu M.C., Wang Y.C. Monolithic Integration of E/D-Mode pHEMT and InGaP HBT Technology on 150-mm GaAs Wafers / Proceedings CS MANTECH (2007). Austin. 2007. P. 251–254.
- [10] Tiku S., Biswas D. III-V Integrated Circuit Fabrication Technology. Boca Raton : CRC Press, 2016. 706 p.
- [11] Дроздов Ю.Н., Дроздов М.Н., Данильцев В.М., Хрыкин О.И., Юнин П.А. Анализ состава твердых растворов (Al,Ga)As методами вторично-ионной масс-спектрометрии и рентгеновской дифрактометрии // Физика и техника полупроводников. 2012. Том 46. Вып. 11. С. 1419–1423.
- [12] Koen, Smith, Damitio. A very high speed operational amplifier array / Proceedings of IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. 1993, P. 153–156.
- [13] Прокопенко Н.Н., Дворников О.В., Бугакова А.В. Проектирование низкотемпературных и радиационно-стойких аналоговых микросхем для обработки сигналов датчиков : монография. М. : СОЛОН-Пресс, 2021. 200 с.
- [14] Adachi, S. Band gaps and refractive indices of AlGaAsSb, GaInAsSb, and InPAsSb: Key properties for a variety of the 2-4  $\mu$ m optoelectronic device applications // Journal of Applied Physics. 1987. Vol. 61, № 10, 15. P. 4896–4876.

# Heterojunction Bipolar Transistor with *pnp* Structure in Gallium Arsenide Technology HBT-HEMT

I.Yu. Lovshenko<sup>1</sup>, P.S. Kratovich<sup>1</sup>, V.R. Stempitsky<sup>1</sup>,  
O.V. Dvornikov<sup>2</sup>, A.V. Kunts<sup>1</sup>, A.A. Paulyuchyk<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,  
lovshenko@bsuir.by

<sup>2</sup>JSC “Minsk Research Instrument-Making Institute”, Minsk, Republic of Belarus

<sup>3</sup>JSC “Minsk Research Institute of Radiomaterials”, Minsk, Republic of Belarus

**Abstract** — An analysis of the current state of the development of integrated circuits for harsh operating conditions was performed, on the basis of which the use of the gallium arsenide technology HBT-HEMT was proposed. The results of TCAD modeling of the electrical characteristics of a heterojunction bipolar transistor with a *pnp* structure based on GaAs are presented. The following main parameters were determined: Early voltage  $V_A$ , base current amplification factor in the circuit with a common emitter  $BETA$ , breakdown voltage of the collector-emitter gap  $V_{CEBR}$ , cutoff frequency  $f_T$ . The effect of the material composition  $x$  of the  $Al_xGa_{1-x}As$  compound and the width of the active base  $W_B$  on these parameters is studied, and recommendations are given for choosing their optimal values. An estimate of the change in the parameters of the *pnp* HBT device structure with temperature is given.

**Keywords** — heterojunction, heterojunction bipolar transistor,  $A_{III}B_V$ , simulation, performance characteristics, current gain, Early voltage, breakdown voltage.

## REFERENCES

- [1] Vojtovich V., Gordeev A., Dumanevich A. Si, GaAs, SiC, GaN-silovaya elektronika. Sravnenie, novye vozmozhnosti (Si, GaAs, SiC, GaN-power electronics. Comparison, new opportunities) // Silovaya elektronika. 2010. №. 28. S. 4–10.
- [2] Adachi S., Tu C. Physical Properties of III-V Semiconductor Compounds: InP, InAs, GaAs, GaP, InGaAs and InGaAsP // Physics Today. 1994.Vol. 47. №. 2. P. 99.
- [3] Fresina, M. Trends in GaAs HBTs for wireless and RF / Proceeding 2011 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, 2011. P. 150-153.
- [4] Dvornikov O.V., Pavluchik A.A., Prokopenko N.N., Tchekhovski V.A., Kunts A.V., Chumakov V.E. GaAs analog master slice // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2021. Issue 2. P. 47-54. doi:10.31114/2078-7707-2021-2-47-54
- [5] Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Chumakov V.E., Klejmenkin D.V. Gallium Arsenide Operational Amplifiers with Slope Multipliers of Input Differential Stages / Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - (MES). 2022. D036.
- [6] Dvornikov O.V., Pavlyuchik A.A., Prokopenko N.N., Chekhovskij V.A., Kunc A.V., Chumakov V.E. Unificirovannye skhemotekhnicheskie resheniya analogovyh arsenid-gallievyyh mikroskhem (Unified circuit solutions for analog gallium arsenide microcircuits) / Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektronika. 2022. T.27. №4.
- [7] Lu C.-H., Lin C.-H., Liao Y.-H., Chang H.-Y., Wang Y.-C. Monolithic 2- $\mu$ m/0.5- $\mu$ m GaAs HBT-HEMT (BiHEMT) process for low phase noise voltage controlled oscillators (VCOs) / 2012 Asia Pacific Microwave Conference Proceedings. Kaohsiung : IEEE. 2012. P. 1235–1237.
- [8] Shokrani M., Xie K., Gedzberg B., Krystek W., Mushini P., Gupta A., Fowler P., Peatman W. InGaP-Plus: A Low Cost Manufacturable GaAs BiFET Process Technology / Proceedings CS MANTECH (2006). Vancouver. 2006. P. 153–156.
- [9] Lin C.K., Tsai T.C., Yu S.L., Chang C.C., Cho Y.T., Yuan J.C., Ho C.P., Chou T.Y., Huang J.H., Tu M.C., Wang Y.C. Monolithic Integration of E/D-Mode pHEMT and InGaP HBT Technology on 150-mm GaAs Wafers / Proceedings CS MANTECH (2007). Austin. 2007. P. 251–254.
- [10] Tiku S., Biswas D. III-V Integrated Circuit Fabrication Technology. Boca Raton : CRC Press, 2016. 706 p.
- [11] Дроздов Ю.Н., Дроздов М.Н., Данильцев В.М., Хрыкин О.И., Юнин П.А. Анализ состава твердых растворов (Al,Ga)As методами вторично-ионной масс-спектрометрии и рентгеновской дифрактометрии // Физика и техника полупроводников. 2012. Том 46. Вып. 11. С. 1419–1423.
- [12] Koen, Smith, Damitio. A very high speed operational amplifier array / Proceedings of IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. 1993, P. 153–156.
- [13] Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Bugakova A.V. Proektirovanie nizkotemperaturnykh i radiacionno-stojkikh analogovyh mikroskhem dlya obrabotki signalov datchikov (Design of low-temperature and radiation-resistant analog microcircuits for sensor signal processing) : monografiya. M. : SOLON-Press, 2021. 200 s.
- [14] Adachi, S. Band gaps and refractive indices of AlGaAsSb, GaInAsSb, and InPAsSb: Key properties for a variety of the 2-4  $\mu$ m optoelectronic device applications // Journal of Applied Physics. 1987. Vol. 61, № 10, 15. P. 4896–4876.