

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК 621.382

Кратович
Павел Сергеевич

Гетеропереходный биполярный транзистор на основе GaAs

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра
по специальности 1-41 80 01 «Микро- и наноэлектроника»

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Степицкий В.Р.

Минск 2024

Работа выполнена на кафедре микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **Стемпицкий Виктор Романвич**,
кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент: **Завадский Сергей Михайлович**,
кандидат технических наук, доцент кафедры электронной техники и технологии учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «25» января 2024 г. в 9⁰⁰ часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, 1 уч. корп., ауд. 114, тел.: 293-89-26, e-mail: kafme@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные требования к мощным электронным системам стимулируют исследования новых конструкций, технологий изготовления, материалов структурных элементов таких приборов и топологий. Развитие элементной базы специального назначения требует реализации особых подходов к проектированию и исследованию характеристик данной группы полупроводниковых приборов. Моделирование воздействия дестабилизирующих факторов на этапе проектирования ИМС позволяет сократить время проектирования изделий микроэлектроники, а также исправить допущенные ошибки еще до изготовления опытных образцов.

Для достижений в области связи, цифровой обработки сигналов и вычислительных систем необходимо использовать высокопроизводительных электронных схем. В последнее время рынок беспроводных локальных сетей быстро растет из-за увеличения требований к высоким скоростям передачи данных. Для этого требуется высоколинейные усилители мощности. ГБТ обладают потенциалом обеспечения эффективного решения ключевых системных требований за счет внутренних преимуществ.

Можно выделить следующие области применения сверхвысокочастотных гетеротранзисторов: техника связи на сантиметровых, миллиметровых и субмиллиметровых радиоволнах; космические технологии; военная промышленность; ядерная энергетика.

Актуальной задачей силовой и СВЧ-электроники является поиск и применение новых материалов, способных функционировать на заданных частотах и обеспечивать при этом стабильность электрических параметров от температуры. Также соединения A_3B_5 отличаются малой эффективной массой носителей электрического заряда, а, следовательно, их высокой подвижностью.

Схемы на основе кремния в данной сфере исчерпывают себя, т.к. не обеспечивают требуемого быстродействия, однако, приборы на основе полупроводниковых соединений групп A_3B_5 (InAs, GaAs и т. д.) и A_2B_6 (CdSe, ZnS и т. д.) таким недостатком не обладают. Основными преимуществами полупроводников группы A_3B_5 являются малая эффективная масса носителей электрического заряда и, соответственно, высокая подвижность этих носителей. Изменение атомарного состава соединений, например, $Al_xGa_{x-1}As$ или $GaAs_xP_{1-x}$, позволяет получать полупроводниковые кристаллы с вариациями периода кристаллической решетки и с разной шириной запрещенной зоны энергий от 0,17 эВ в InSb до 3,39 эВ – в GaN. Повышение

ширины запрещенной зоны по сравнению с кремнием обеспечивает увеличение диапазона рабочих температур.

Рассмотренные преимущества позволяют создавать полупроводниковые приборы с повышенными частотными характеристиками на основе гетероструктур – ГБТ и ТВПЭ. Характеристики устройства и принцип работы ГБТ на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs отличаются от характеристик обычных кремниевых биполярных транзисторов.

Таким образом, **целью** проекта является изучение физических процессов, протекающих в приборных структурах *npr*- и *pnp*-ГБТ на основе GaAs, и повышение посредством приборного моделирования их эксплуатационных характеристик.

Для достижения поставленной **цели** необходимо решить следующие **задачи**:

- выполнить анализ научно-технической литературы для определения основных параметров и конструктивных решений ГБТ на основе GaAs;
- провести моделирование эксплуатационных характеристик приборных структур ГБТ *npr*- и *pnp*-типа на основе GaAs, функционирующих в нормальных условиях;
- определить посредством компьютерного моделирования в соответствии с планом отсеивающего эксперимента конструктивные параметры, оказывающие наибольшее влияние на эксплуатационные характеристики ГБТ *npr*-типа на основе GaAs, в нормальных условиях работы.

В качестве объекта исследования выступает приборная структура *npr*- и *pnp*-ГБТ на основе GaAs. Предмет исследования – физические процессы, происходящие в приборных структурах *npr*- и *pnp*-ГБТ.

Пояснительная записка состоит из введения, четырех глав и заключения. В первой главе описываются принцип работы ГБТ, механизмы переноса носителей заряда, и наиболее важные для исследования электрические параметры транзистора. Во второй главе описаны возможности программного комплекса компании Silvaco. В третьей главе представлены результаты приборного моделирования *npr*- и *pnp*-ГБТ. В четвертой главе представлены результаты проведения отсеивающего эксперимента для оптимизации структуры *npr*-ГБТ. В заключении кратко перечислены полученные результаты.

Магистерская диссертация выполнена самостоятельно, проверена в системе «Антиплагиат». Процент оригинальности составляет 96,98 %. Цитирования обозначены ссылками на публикации, указанными в «Списке использованных источников». Отчёт приведён в приложении А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы магистерской диссертации. Актуальность темы заключается в определении зависимости электрических характеристик nnp - и npn -ГБТ от конструктивно-технологических параметров, а также от влияния ионизирующего излучения, и позволяющей прогнозировать поведение ИМС при его воздействии. Данная особенность приведет к существенному сокращению сроков разработки новых изделий микроэлектроники специального назначения и позволит провести модернизацию (повысить эксплуатационные характеристики) уже существующих приборных и схмотехнических решений.

Цель и задачи исследования. Целью магистерской диссертации проекта является изучение физических процессов, протекающих в приборных структурах nnp - и npn -ГБТ на основе GaAs, и повышение посредством приборного моделирования их эксплуатационных характеристик.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ научно-технической литературы для определения основных параметров и конструктивных решений ГБТ на основе GaAs;
- провести моделирование эксплуатационных характеристик приборных структур nnp - и npn -ГБТ на основе GaAs, функционирующих в нормальных условиях;
- определить посредством компьютерного моделирования в соответствии с планом отсеивающего эксперимента конструктивные параметры, оказывающие наибольшее влияние на эксплуатационные характеристики ГБТ nnp -типа на основе GaAs, в нормальных условиях работы.

Объект и предмет исследования. В качестве объекта исследования выступает приборная структура nnp - и npn -ГБТ на основе GaAs. Предмет исследования – физические процессы, происходящие в приборных структурах nnp - и npn -ГБТ.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

Методика повышения эксплуатационных характеристик приборных структур ГБТ nnp - и npn -типа на основе GaAs, включающая в себя отсеивающий эксперимент и оптимизационные расчеты с использованием модифицированного алгоритма Маркара-Левенберга, обеспечивает увеличение значений предельной частоты $f_{пр}$ при сохранении коэффициента усиления K_y (для npn -транзистора значения $f_{пр}$ и K_y равны 603 МГц и 24,84 дБ, 758 МГц (увеличено на 25,7%) и 25,14 дБ (1,2%) до и после оптимизации соответственно).

Личный вклад соискателя. В настоящую диссертационную работу

вошли результаты как личных исследований автора, так и его совместной деятельности с научным руководителем Стемпицким В. Р.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих научных конференциях: Международная научно-техническая конференция «Инженерная наука: проблемы, идеи, перспективы (ENGINEER-2022)» (2022, Пермь); 58-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов (2022, Минск); International scientific-technical conference «Digital Technologies: Problems and Solutions for Practical Implementation in an Industry» (2022, Ташкент); Всероссийская научно-техническая конференция: проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (2022, Москва); 32-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: КрыМиКо2022» (2022, Севастополь); 59-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов (2023, Минск); Юбилейная научно-техническая конференция: СВЧ-Электроника – 2023, АО «НПП «Исток» им. Шокина» (2023, Фрязино).

Публикации результатов диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в сборниках материалов: Международная научно-техническая конференция «Инженерная наука: проблемы, идеи, перспективы (ENGINEER-2022)» (2022, Пермь); 19-м томе 58-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов (2022, Минск); International scientific-technical conference «Digital Technologies: Problems and Solutions for Practical Implementation in an Industry» (2022, Ташкент); Сборник трудов. Выпуск IV Всероссийской научно-технической конференции: проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС – 2022) (2022, Москва); 4-й выпуск 32-ой Международной конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: КрыМиКо2022» (2022, Севастополь); 20-й том 59-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов (2023, Минск); Сборник докладов «Юбилейной научно-технической конференции: СВЧ-Электроника – 2023» АО «НПП «Исток» им. Шокина» (2023, Фрязино).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа выполнена самостоятельно, проверена в системе «Антиплагиат». Процент оригинальности составляет 96,98 %. Цитирования обозначены ссылками на публикации, указанными в «Списке использованных источников». Отчет приведен в приложении А. Общий объем диссертации составляет 83 страницы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы и потребность прогнозирования эксплуатационных характеристик ГБТ, определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации и их публикации, а также, структура и объем диссертации.

В **первой главе** приведен анализ научно-исследовательской литературы по теме диссертационной работы. Рассматриваются принцип работы, структура и технология изготовления структуры ГБТ на основе арсенида галлия. Рассматриваются наиболее важные параметры транзистора определяемые на этапе моделирования. По итогу главы выбран оптимальный тип структуры ГБТ, его целевые электрические параметры, которые будут исследоваться при моделировании.

Во **второй главе** описан программный комплекс компании *Silvaco*, используемый для физико-топологического моделирования в микроэлектронике.

В **третьей главе** представлены результаты моделирования *npr*- и *prp*-ГБТ, без учета воздействия проникающего излучения. Приведено описание структур, полученных в программном комплексе компании *Silvaco*, описаны экстрагированные эксплуатационные характеристики.

В **четвертой главе** представлены результаты оптимизационного расчета структуры *npr*-ГБТ. Для определения наиболее значимых факторов был проведен отсеивающий эксперимент по плану Плакетта-Бермана, к изменению которых исследуемые функции (коэффициент усиления, граничная и предельная частота) наиболее чувствительны. В качестве конструктивных параметров использовалась толщина и ширина регионов структуры.

В **заключении** представлена оценка полученных результатов.

В **приложениях** приведены проверка на антиплагиат, набор директив используемых при моделировании и оптимизации *npr*- и *prp*-ГБТ, матрицы для отсеивающего эксперимента по плану Плакетта-Бермана, их результаты, и зависимости целевых функций от изменения наиболее важных факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполнения магистерской диссертации был проведён анализ и изучение научно-технической литературы по теме формирования и эксплуатации полупроводниковых приборов на основе гетероперехода. Рассмотрены основные физические процессы, протекающие в таких структурах и наиболее важные эксплуатационные характеристики, описано влияние проникающего излучения.

Дана краткая характеристика функциональных возможностей систем автоматизированного проектирования в микроэлектронике, которые позволяют значительно сократить время разработки и исследования, повысить точность расчётов и выбрать наилучшие варианты для реализации.

Проведено моделирование структуры *npr*-ГБТ на основе $\text{Al}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}/\text{GaAs}$, занимаемая площадь структуры составляет 1120 мкм^2 , электрода эмиттера – 75 мкм^2 , электрода базы – 135 мкм^2 , электрода коллектора – 243 мкм^2 . Определены и настроены модели переноса носителей заряда, обеспечивающие адекватное моделирование электрических характеристик ГБТ. По результатам проведения АС-анализа построены зависимости коэффициента усиления от частоты, диаграммы Вольперта-Смитта и график Гуммеля. Установлено, что при заданных конструктивных параметрах и нормальных условиях значение коэффициента усиления, предельной частоты и граничной частоты составляет 24,84 дБ, 603 МГц, 32,19 ГГц и 15,26 В, соответственно. По результатам проведения DC-анализа построена зависимость тока коллектора от напряжения на базе, и тока коллектора от напряжения на коллекторе. Установлено, что величина коэффициента усиления и максимального тока коллектора составляет 27,66 б.р.в. и 0,17 А соответственно. Показано, что электрический пробой структуры наступает при напряжении на коллекторе равном 15,26 В, и происходит на переходе подложка-субколлектор. Определены критерии качества структуры в зависимости от ширины активной базовой области, по результатам моделирования установлено, что наиболее оптимальные эксплуатационные характеристики обеспечивает структура с шириной базы 0,1 мкм, критерии качества при таком технологическом процессе равны $V_{\text{ЭТА}} \cdot V_{\text{А}} = 66,22 \text{ кВ}$, $f_{\text{гр}} \cdot V_{\text{пр}} = 8,77 \text{ ГГц} \cdot \text{кВ}$.

Для оптимизации эксплуатационных характеристик *npr*-ГБТ был проведен отсеивающий эксперимент по плану Плакетта-Бермана, для определения наиболее значимых факторов, к изменению которых исследуемые функции (коэффициент усиления, граничная и предельная частота) наиболее чувствительны. В качестве оптимизируемых

использовались 18 параметров толщины и ширины регионов структуры. Определенные факторы в процессе оптимизации варьировались в диапазоне от минус 25 до 25 %. Целевая функция по оптимизации – предельная частота. По проведению отсеивающего эксперимента без учета проникающего воздействия было установлено, что наиболее значимыми являются факторы: толщина базы Y_4 (фактор X_{15}), толщина n^+ -эмиттера Y_6 (фактор X_{17}), ширина электрода эмиттера X_{04} (фактор X_{04}). После оптимизации значение фактора X_{15} составило 0,22 мкм, X_{17} – 0,22 мкм, X_{04} – 2,2 мкм. Установлено, что оптимизированные значения обеспечили увеличение предельной частоты на 25,70 %, до значения 758 МГц, при этом также увеличилась граничная частота на 20,75 %, до значения 38,87 ГГц, максимальный ток коллектора снизился на 23,52 % до значения 0,13 А.

Проведено моделирование pnp -ГБТ на основе $Al_{0,3}Ga_{0,7}As/GaAs$, по результатам исследования показано, что наиболее оптимальным для проектирования аналоговых микросхем рекомендуется применять технологический маршрут с $W_B = 70$ нм. Для транзистора, изготовленного по данному маршруту ожидаются следующие эксплуатационные характеристики: максимальный ток коллектора $I_K = 6,5$ мкА, при токе базы $I_B = 5$ мкА; напряжение Эрли V_A не превышает минус 33 В; максимальный коэффициент усиления базового тока в схеме с ОЭ $BETA = 115$ б.р.в.; напряжение пробоя перехода коллектор-эмиттер $V_{КЭВР} = -6,4$ В, граничная частота $f_{гр} = 35$ ГГц.

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 $Al_xGa_{1-x}As$.

Установлена сильная зависимость граничной частоты от температуры: увеличение более чем в два 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.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

[A.1] Кратович, П. С. Эксплуатационные характеристики арсенид-галлиевого гетеропереходного биполярного транзистора / П. С. Кратович, Р. Е. Тернов, И. Ю. Ловшенко // Инженерная наука: проблемы, идеи, перспективы : материалы Международной научно-технической конференции, Пермь, 08 апреля 2022 года / Федеральное гос. бюджет. образ. учреждение высшего образ. «Пермский гос. аграрно-технологич. ун-т им. акад. Д.Н. Прянишникова». – Пермь: ИПЦ Прокрость, 2022. – С. 80-87.

[A.2] Кратович, П. С. Арсенид-галлиевый гетеропереходный биполярный транзистор / Кратович П. С., Тернов Р. Е. // Радиотехника и электроника : сборник тезисов докладов 58-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, апрель 2022 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск: БГУИР, 2022. – С. 32.

[A.3] Kratovich, P. S. GaAs Heterojunction Bipolar Transistor under Proton Flux Conditions / Kratovich P. S., Ternov R. E., Lovshenko I. Yu. // International scientific-technical conference «Digital Technologies: Problems and Solutions for Practical Implementation in an Industry, Muhammad Al-Xorazmiy Nomidagi Toshkent Axborot Texnologiyalari Universiteti. Toshkent. – 2022. pp. 53-55.

[A.4] Гетеропереходный биполярный транзистор со структурой рпр-типа в арсенид-галлиевой технологии НВТ-НЕМТ / П. С. Кратович [и др.] // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2022. – № 4. – С. 149-154. – DOI 10.31114/2078-7707-2022-4-149-154.

[A.5] Кратович, П. С. Оптимизация конструктивных параметров гетеропереходного биполярного транзистора на основе арсенида галлия / Кратович П. С., Тернов Р. Е., Ловшенко И. Ю. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: КрыМиКо2022. Вып. 4: Сб. науч. тр. 31-й Междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 11–17 сентября 2022 года / Севастопольский гос. университет, под ред. И. Л. Афонин, П.П. Ермолова. – С. 5-6.

[A.6] Физико-топологическая модель арсенид-галлиевого транзистора с высокой подвижностью электронов / П. С. Кратович [и др.] // XII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Сборник докладов. Санкт-Петербург. 29 мая - 2 июня 2023 г. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2023. – С. 107-111.

[A.7] Гетеропереходный биполярный транзистор со структурой р-п-р-типа в арсенид-галлиевой технологии НВТ НЕМТ / П.С. Кратович [и др.] // Юбилейная научно-техническая конференция: СВЧ-Электроника – 2023, Фрязино: АО «НПП «Исток» им. Шокина». – 2023.– С. 40-41.

[A.8] Разработка методов определения параметров физико-топологической модели арсенид-галлиевого транзистора с высокой подвижностью электронов / П. С. Кратович [и др.] // International Scientific and Technical Conference «Digital Technologies: Problems and Solutions of Practical

Implementation in the Industry», Science and innovation, Tashkent, Uzbekistan, – vol. 2, – no. Special Issue 3. – pp. 935-939, April 2023.

[А.9] Кратович, П. С. Сравнение параметров и возможностей моделей гетеропереходных биполярных транзисторов на основе GaAs / П. С. Кратович, И. Ю. Ловшенко // Радиотехника и электроника : сборник материалов 59-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, апрель 2023 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск: БГУИР, 2023 г. – С. 157–158.