

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

УДК 621.382

Тернов  
Роман Евгеньевич

Физико-топологическая модель арсенид-галлиевого транзистора с высокой подвижностью электронов, работающего в условиях воздействия ионизирующего излучения

## **АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра  
по специальности 1-41 80 03 «Нанотехнологии и наноматериалы»

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

Минск 2023

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

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

Рецензент: **Голосов Дмитрий Анатольевич**,  
кандидат технических наук, доцент кафедры электронной техники и технологии учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «24» января 2023 г. в 9<sup>00</sup> 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

Транзисторы с высокой подвижностью электронов находят применение в СВЧ-электронике, усилителях мощности, мобильной связи, а также военной промышленности. Их применение обусловлено высокой подвижностью носителей заряда и стойкостью к ионизирующему излучению. Способность полупроводниковых приборов работать на более высоких частотах связана со скоростью электронов, и на данный момент активно используется такой материал, как арсенид галлия. По сравнению с кремнием он обладает рядом преимуществ:

- более широкая запрещенная зона, что дает возможность выдерживать более высокие внутренние электрические поля и меньшую зависимость параметров материала от температуры, а также повышенную стойкость к ионизирующим излучениям;

- низкое значение диэлектрической постоянной, позволяет получить меньшую удельную емкость и работоспособность на более высоких частотах и больших ВЧ-токах;

- высокая теплопроводность, что особенно важно для приборов высокой мощности, так как данный параметр характеризует возможность отвода тепла от активной области;

- более высокая напряженность электрического поля пробоя, что обычно связано с большей шириной запрещенной зоны.

- высокая подвижность электронов, обеспечивающая более широкий диапазон частот.

В связи с этим в СВЧ-электронике активно применяются структуры *HEMT* на основе GaAs. Использование транзисторов на основе арсенида галлия позволяет получить большой коэффициент усиления, а также линейность коэффициента усиления в широкой полосе частот, в том числе при низких температурах. Также *HEMT* обеспечивают более высокий КПД при одинаковом напряжении питания. Благодаря меньшим емкостным эффектам *HEMT* позволяют использовать более высокую частоту и большую полосу пропускания.

Целью магистерской диссертации является разработка физико-топологической модели полупроводниковых приборов и ИМС специального назначения, сформированной по арсенид-галлиевой технологии, описывающей деградацию электрических характеристик под влиянием специальных внешних воздействующих факторов, предназначенной для моделирования статических и динамических характеристик в среде профессиональных программных комплексов проектирования ИМС.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ существующих стандартных моделей арсенид-галлиевой элементной базы радиационно-стойких интегральных схем;
- разработать электрическую модель арсенид-галлиевого транзистора с высокой подвижностью электронов, обеспечивающую учет воздействия ионизирующего излучения и низких температур на электрические характеристики;
- разработать стратегию экстракции параметров усовершенствованных стандартных электрических моделей транзистора с высокой подвижностью электронов;
- разработать параметризованную ячейку приборных структур транзистора с высокой подвижностью электронов.

Пояснительная записка состоит из введения, трех глав и заключения. В первой главе описываются принцип работы транзистора с высокой подвижностью электронов и дается обзор существующих моделей. Во второй главе описаны программные комплексы компаний *Silvaco* и *Cadence*. В третьей главе представлены результаты приборного, схемотехнического и топологического моделирования, а также учет радиационного воздействия. В заключении кратко перечислены полученные результаты.

Магистерская диссертация выполнена самостоятельно, проверена в системе «Антиплагиат». Процент оригинальности составляет 94,15%. 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 транзистора с высокой подвижностью электронов от конструктивно-технологических параметров, а также разработке компактной модели, учитывающей физические процессы, происходящие в приборных структурах с учетом 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 схемотехнических решений.

**Цель и задачи исследования.** Целью магистерской диссертации является разработка физико-топологической модели полупроводниковых приборов и ИМС специального назначения, сформированной по арсенид-галлиевой технологии, описывающей деградацию электрических характеристик под влиянием специальных внешних воздействующих факторов.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ существующих стандартных моделей арсенид-галлиевой элементной базы радиационно-стойких интегральных схем;
- выполнить моделирование электрических характеристик приборной структуры арсенид-галлиевого транзистора с высокой подвижностью электронов, функционирующей в нормальных условиях и при воздействии ионизирующего излучения;
- разработать электрическую модель арсенид-галлиевого транзистора с высокой подвижностью электронов, обеспечивающую учет воздействия ионизирующего излучения на электрические характеристики;
- разработать стратегию экстракции параметров усовершенствованных стандартных электрических моделей транзистора с высокой подвижностью электронов;
- разработать параметризованную ячейку приборных структур транзистора с высокой подвижностью электронов.

**Объект и предмет исследования.** В качестве объекта исследования выступают различные структуры транзистора с высокой подвижностью электронов с проектными нормами 0,2 мкм. Предметом исследования является взаимосвязь физических процессов, происходящих в приборных структурах транзистора с высокой подвижностью электронов при воздействии

ионизирующего излучения.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту.** Обобщенная физико-топологическая модель, реализованная на языке описания аппаратуры Verilog-A и предназначенная для математического описания статических и динамических характеристик транзистора с высокой подвижностью электронов, сформированного по технологическому процессу 0,2 мкм, отличающаяся учетом воздействия интегрального потока протонов, обеспечивает возможность схемотехнического и топологического моделирования данного типа устройств в программных комплексах проектирования ИМС.

**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: 19-й Международный симпозиум «Нанопроектирование, технология, компьютерное моделирование – NDTCS-2021»; 58-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов (2022, Минск); Международная научно-техническая конференция «Инженерная наука: проблемы, идеи, перспективы (ENGINEER-2022)»; Международная научно-техническая конференция «Цифровые технологии: проблемы и решения для практического внедрения в промышленности» (2022, Ташкент).

**Публикации результатов диссертации.** Основные результаты диссертации опубликованы в сборниках материалов: 19-м Международном симпозиуме «Нанопроектирование, технология, компьютерное моделирование – NDTCS-2021»; 19-м томе Докладов БГУИР; 58-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов; Международной научно-технической конференции «Инженерная наука: проблемы, идеи, перспективы (ENGINEER-2022)»; Международной научно-технической конференции «Цифровые технологии: проблемы и решения для практического внедрения в промышленности»; Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии».

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав, заключения и списка использованных источников. Общий объем диссертации составляет 64 страницы.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** рассмотрено современное состояние проблемы физико-топологического проектирования транзисторов с высокой подвижностью электронов, 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 опубликованность, 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 транзистора с высокой подвижностью электронов на основе арсенида галлия. Также рассматриваются различные типы компактных моделей, используемых для моделирования транзисторов с высокой подвижностью электронов. По итогу главы выбран оптимальный тип разрабатываемой модели.

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

**В третьей главе** представлены результаты моделирования. Приведено описание структуры, полученной в программном комплексе компании *Silvaco*, дана стратегия экстракции параметров. Представлены результаты схемотехнического и топологического проектирования. Получены результаты электрических характеристик при облучении структуры потоком протонов. Сделан вывод о деградации электрических характеристик прибора.

**В приложениях** приведены проверка на антиплагиат, параметры модели транзистора с высокой подвижностью электронов и спроектированная топология электрической схемы.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для достижения цели магистерской диссертации был проведен сравнительный анализ различных типов компактных моделей, используемых для моделирования электрических характеристик транзисторов с высокой подвижностью электронов.

Проведено приборно-технологическое моделирование структуры *HEMT* на основе GaAs в программном комплексе компании *Silvaco*. Приведена стратегия экстракции параметров и проведена настройка физической модели *ASM-HEMT*, обеспечивающей адекватное моделирование электрических характеристик *HEMT*. В программном комплексе компании *Cadence* получены электрические характеристики *HEMT* размерами 20/0,2 мкм. Проведен параметрический анализ выходной и передаточной ВАХ в зависимости от изменения величины напряжения затвора и напряжения стока соответственно. Установлено, что напряжение отсечки составляет -0,7 В и максимально допустимое напряжение питания составляет 5 В.

Собрана электрическая схема зарядочувствительного предусилителя и проведен временной анализ выходных напряжений. Спроектирована топология электрической схемы зарядочувствительного предусилителя с проектными нормами 0,2 мкм.

Также проведено моделирование электрических характеристик *HEMT* при воздействии потока протонов в диапазоне от  $1 \cdot 10^{10}$  до  $1 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup> с энергией 2 кэВ. Показаны зависимости тока стока и напряжения отсечки от флюенса протонов, а также и от их энергии. Проведенное моделирование показало, что при облучении *HEMT* на основе GaAs ток стока ухудшается на 9%, а напряжение отсечки уменьшается на 1,5%. Зависимость тока стока и напряжения отсечки от энергии протонов показала, что в диапазоне от 200 эВ до 1000 МэВ наблюдается отклонение тока стока максимум на 7%, а напряжения отсечки – на 1,2% за исключением диапазона энергии протонов от 4 до 10 кэВ, где отклонение происходит на 95% и 34% соответственно.

При повторном проведении схемотехнического моделирования в программном комплексе *Cadence* с учетом воздействия потока протонов показано изменение электрических характеристик *HEMT* размерами 20/0,2 мкм и зарядочувствительного предусилителя. Установлено, что помимо ухудшения тока стока больше проявляется эффект модуляции длины канала, а также изменяется порог срабатывания зарядочувствительного предусилителя.

## СПИСОК СОБСТВЕННЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

**1** – The proton flux influence on electrical characteristics of a dual-channel HEMT based on GaAs / I. Lovshenko, A. Voronov, P. Roshchenko, R. Ternov, V. Stempitsky // Нанопроектирование, технология, компьютерное моделирование – NDTCS-2021 : тез. докл. XIX Междунар. симпозиума (Республика Беларусь, Минск, 28-29 октября 2021 года). – Минск: БГУИР, 2021. – С. 66-68.

**2** – The proton flux influence on electrical characteristics of a dual-channel HEMT based on GaAs / I.Yu. Lovshenko, A.Yu. Voronov, P.S. Roshchenko, R.E. Ternov, Y.D. Galkin, A.V. Kunts, V.R. Stempitsky, J. Bi // Доклады БГУИР. – 2021. – Т. 19, № 8. – С. 81-86.

**3** – Кратович П.С., Тернов Р.Е., Ловшенко И.Ю. Эксплуатационные характеристики арсенид-галлиевого гетеропереходного биполярного транзистора. Материалы Международной научно-технической конференции «Инженерная наука: проблемы, идеи, перспективы (ENGINEER-2022)», 8 апреля 2022 г. : В 2 ч. Ч 1 / науч. редкол. А.П. Андреев [и др.]. – Пермь : Изд-во ИПЦ «Прокрость», 2022. с. 80-87.

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

**5** – 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.

**6** – Оптимизация конструктивных параметров гетеропереходного биполярного транзистора на основе арсенида галлия / Кратович П.С., Тернов Р.Е., Ловшенко И.Ю. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2022. – № 4. – С. 5-6.