

На правах рукописи



Лэ Куанг Тук

Эффекты воздействия сверхкоротких импульсных перегрузок  
на биполярные транзисторы с гетеропереходом  
и малощумящие усилители на их основе

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико – математических наук

Воронеж – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико – математических наук,  
профессор **БОБРЕШОВ Анатолий Михайлович**

Официальные оппоненты: **ПОВЕТКО Василий Николаевич**  
доктор технических наук, профессор,  
АО «Воронежский научно-исследовательский  
институт «Вега» (АО «ВНИИ «Вега»), г. Воронеж  
главный специалист

**МЕЩЕРЯКОВ Иван Иванович**  
кандидат физико-математических наук  
АО «Концерн «Созвездие», г. Воронеж  
старший инженер

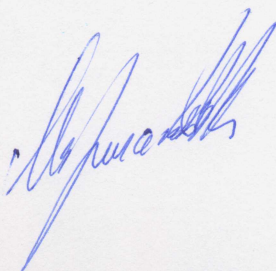
Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радио-  
технический университет», г. Рязань.

Защита состоится «22» декабря 2016 г. в 17<sup>00</sup> на заседании диссертационного  
совета Д.212.038.10 при Воронежском государственном университете по  
адресу: 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1, ауд. 428.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке  
Воронежского государственного университета по адресу 394018, г. Воронеж,  
Университетская площадь, 1, и на сайте ВУЗа <http://www.vsu.ru>, с  
авторефератом – также на сайте Высшей аттестационной комиссии при  
Министерстве образования и науки РФ <http://vak.ed.gov.ru>.

Автореферат разослан «21» ноября 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



**МАРШАКОВ**  
Владимир Кириллович

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы.

Развитие технологий производства полупроводниковых приборов позволило создавать генераторы сверхкоротких импульсных сигналов (СКИ) субнаносекундной длительности, в результате чего возникли качественно новые подходы к разработке сверхширокополосных (СШП) устройств связи и локации. Передатчики СШП систем могут выступать в роли источников мощных импульсных помех сверхмалой длительности для радиосистем, что естественным образом приводит к возникновению задач стойкости их узлов к воздействию СКИ. Влияние сверхкоротких импульсных помех на элементы и узлы радиоаппаратуры может приводить к негативным последствиям, которые не ограничиваются нелинейными эффектами, возникающими в приемных устройствах, но проявляются также в изменении параметров структур полупроводниковых элементов, входящих в их состав. Такое нарушение функционирования носит временный характер и называется обратимым отказом.

Как неоднократно было показано исследователями, узлами радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), наиболее подверженными обратимым отказам под действием СКИ, являются входные малошумящие усилители (МШУ). Отклик входного тракта приемного устройства на воздействие сверхкороткой импульсной помехи зависит от выбранного активного элемента. Современные МШУ СВЧ диапазона зачастую строят на основе одного из следующих типов транзисторов: полевой транзистор с затвором Шоттки (ПТШ), полевой транзистор с высокой подвижностью электронов (НЕМТ), биполярный транзистор с гетеропереходом (ГБТ). Исследованию работы указанных полевых транзисторов уделено достаточно много внимания. В отличие от этого, задачи функционирования биполярных транзисторов с гетеропереходом под воздействием СКИ до сих пор рассмотрены не были.

Также необходимо отметить, что при разработке РЭА, работающей в условиях сверхкоротких импульсных помех, становится невозможным применять классические методы исследования характеристик электромагнитной совместимости (ЭМС), при использовании которых, как правило, рассматривается

воздействие монохроматической помехи по входной цепи приемного устройства.

В этой связи работа, посвященная исследованию воздействия СКИ на характеристики биполярных транзисторов с гетеропереходом и усилителей на их основе, является актуальной.

**Цель работы:** исследование влияния сверхкоротких импульсных электроперегрузок на функционирование биполярных транзисторов с гетеропереходом и характеристики малошумящих усилителей на их основе.

**Основные задачи диссертации:**

- теоретическое и экспериментальное исследование физических процессов в ГБТ, возникающих вследствие воздействия сверхкоротких импульсных электроперегрузок по входной цепи;
- исследование зависимости эффектов обратимой деградации статических характеристик под действием импульсных электроперегрузок от режима работы ГБТ в составе МШУ и параметров серии СКИ;
- разработка алгоритмов автоматизированной измерительной установки и методики измерений для экспериментального исследования характеристик ЭМС МШУ на основе ГБТ при воздействии сверхкоротких импульсных помех субнаносекундной длительности;
- выработка рекомендаций по выбору режима работы МШУ для устойчивого функционирования в условиях действия импульсных помех сверхкороткой длительности.

**Методы проведения исследования.** В работе использованы методы теории электрических цепей и сигналов, математического и компьютерного моделирования, математический аппарат аналитического и численного решения физических задач дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных, методы радиофизических измерений.

**Достоверность результатов диссертации** определяется корректным применением математических методов, соответствием выводов известным фундаментальным теоретическим представлениям, соответствием результатов моделирования полученным экспериментальным данным.

**Научная новизна.**

1. В результате проведения теоретического исследования работы биполярного транзистора с гетеропереходом в условиях воздействия сверхкоротких импульсов по входной цепи предложена физическая интерпретация эффектов обратимой деградации.

2. Разработана методика автоматизированного измерения статических характеристик ГБТ при воздействии сверхкоротких импульсных помех.

3. Экспериментально получены зависимости тока коллектора во время воздействия СКИ от режима работы биполярного транзистора с гетеропереходом и температуры окружающей среды, которые позволили подтвердить предложенную физическую интерпретацию возникающих эффектов деградации.

4. Разработаны алгоритмы и методика экспериментального определения параметров ЭМС МШУ при воздействии импульсных помех.

**На защиту выносятся:**

1. Методика исследования влияния сверхкоротких импульсных электроперегрузок на статические характеристики биполярного транзистора с гетеропереходом и характеристики электромагнитной совместимости малошумящего усилителя на его основе.
2. Автоматизированный программно-аппаратный комплекс для исследования эффектов обратимой деградации малошумящего усилителя на основе биполярного транзистора с гетеропереходом.
3. Зависимости эффектов обратимой деградации статических характеристик биполярного транзистора с гетеропереходом в составе малошумящего усилителя от режима его работы и их физическая интерпретация.
4. Характеристики электромагнитной совместимости малошумящего усилителя в условиях действия импульсных помех большой амплитуды.

**Теоретическая и практическая ценность работы.** Проведено исследование эффектов обратимой деградации кремний-германиевого биполярного транзистора с гетеропереходом. Полученные зависимости относительного тока коллектора и коэффициента усиления от параметров воздействия и режима работы МШУ позволили дать физическую интерпретацию эффектам обратимой деградации ГБТ и выработать рекомендации по отбору транзисторов, наиболее стойких к сверхкоротким импульсным электроперегрузкам.

Реализована методика и автоматизированный аппаратно-программный комплекс для измерений и расчета параметров электромагнитной совместимости МШУ при воздействии СКИ. Получены характеристики ЭМС, при помощи которых проведена оценка качества работы МШУ в условиях действия импульсных помех в виде последовательности СКИ. Предложены рекомендации по выбору режима работы МШУ на базе кремний-германиевого биполярного транзистора с гетеропереходом при сверхкоротких импульсных помехах.

Результаты диссертации могут быть использованы при разработке СШП систем для минимизации негативного влияния на уже функционирующие узкополосные системы, а также при проектировании других устройств на основе ГБТ.

**Внедрение научных результатов.** Полученные в диссертации результаты внедрены в научно-исследовательских работах, выполнявшихся на кафедре электроники ВГУ, а так же использовались в учебном процессе.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы были представлены в виде докладов и обсуждались на: международной научно-технической конференции “Радиолокация, навигация и связь” (г. Воронеж, 2015, 2016); Международной научно-технической конференции «NIDays-2015» (г. Москва 2015); Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий : РЭУС – 2016» (г. Москва, 2016); Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (г. Севастополь, 2016 г), Всероссийской научной школы–семинара «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро– и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами» (Саратов, 2016).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, 3 из которых в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов диссертационных работ.

**Личный вклад.** Постановка задач, выбор направления и методов исследований осуществлялись совместно с научным руководителем. Личный вклад определяется проведением теоретических и экспериментальных исследований, а также разработкой и реализацией алгоритмов автоматизированного программно-аппаратного комплекса, позволяющего значительно снизить времен-

ные издержки на получение и анализ экспериментальных данных. Лично автором проведен анализ и дана физическая интерпретация полученных результатов. Автор внес значительный вклад в публикацию результатов исследований, раскрывающих суть работы.

### **Объем и структура диссертационной работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 82 наименования. Объем диссертации составляет 118 страниц, включая 54 иллюстрации.

## **Содержание работы**

**Во введении** к диссертации обсуждается актуальность темы исследования, приведён краткий анализ состояния проработанности проблем и задач по теме диссертации, сформулирована цель работы и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**Первая глава** диссертационной работы посвящена теоретическому исследованию основных процессов, протекающих в структуре ГБТ при его включении в малошумящий усилитель по схеме с общим эмиттером при условии действия сверхкоротких импульсных помех по входной цепи.

При работе биполярного транзистора с гетеропереходом в рабочем режиме протекают четыре основных физических процесса: инжекция носителей из эмиттера через n-p-переход в базу; диффузия носителей сквозь базу к коллекторному переходу; рекомбинация неосновных носителей в базе; экстракция носителей из базы в коллектор. При этом ток эмиттера представляет собой сумму тока базы и коллектора. Величина тока коллектора определяется коэффициентом усиления по току, который в свою очередь зависит от эффективности эмиттера (коэффициента инжекции)  $\gamma$  и коэффициента переноса эмиттерного тока  $k$ . Эффективность эмиттера зависит от конструктивных и технологических особенностей конкретного ГБТ. Коэффициент переноса эмиттерного тока  $k$  учитывает рекомбинационные потери в базе транзистора, и в известном упрощении может рассчитываться как:

$$\kappa = \frac{I_k}{I_e} \approx \text{ch}^{-1} \frac{W}{L}, \quad (1)$$

где  $I_k$  – ток коллектора,  $I_e$  – ток эмиттера,  $W$  – ширина базы,  $L$  – диффузионная длина неосновных носителей в базе.

Действие СКИ необходимо рассматривать для двух случаев – положительной и отрицательной полярностей. Вследствие малой длительности СКИ в обоих случаях не успевают развиться эффекты пробоя. Импульс отрицательной полярности смещает эмиттерный переход в обратном направлении, что приводит к уменьшению низкочастотной составляющей тока коллектора на время его воздействия. В случае СКИ положительной полярности также происходит уменьшение тока коллектора, которое можно связать с проявлением нескольких эффектов: эффект Кирка (увеличение ширины  $W$  базы при больших плотностях коллекторного тока), увеличение рекомбинационных процессов, падение коэффициента усиления по току.

В данной главе проводится рассмотрение процессов рекомбинации в активной и пассивной базе, в результате которого по полученным выражениям для потерь на рекомбинацию делаются выводы о уменьшении диффузионной длины неосновных носителей в базе во время действия СКИ. В совокупности с эффектом Кирка это приводит к резкому падению коэффициента переноса эмиттерного тока (1) и уменьшению низкочастотной составляющей коллекторного тока ГБТ под действием сверхкоротких электроперегрузок.

Помимо этого в первой главе работы проводится анализ влияния температуры окружающей среды на проявление эффектов обратимой деградации ГБТ под действием СКИ.

**Во второй главе** описываются разработанная методика и алгоритмы измерений для проведения экспериментальных исследований эффектов воздействия мощных сверхкоротких импульсов на малошумящий усилитель на базе биполярного транзистора с гетеропереходом.

Методика измерений заключается в следующем: для каждого режима работы МШУ из заданного диапазона и набора параметров серии СКИ производится регистрация контролируемой величины до воздействия, во время воздействия и после снятия воздействия СКИ. Под режимом работы понимается совокупность напряжений и токов на входе испытываемой схемы



МШУ. В качестве контролируемых параметров в работе были выбраны: низкочастотная составляющая тока коллектора для статических режимов работы МШУ и коэффициент усиления – для динамических.

Алгоритм проведения экспериментального исследования состоит из следующих основных задачи: калибровка управляемых источников, формирование задачи для измерений, проведение измерений, обработка экспериментальных данных. Конфигурация задачи включает в себя задание режимов работы и параметров серии импульсов, а также указание измеряемых величин.

На этапе измерений производится задание вида и параметров помехи, установка режима работы транзистора в составе МШУ, проведение измерений выходных напряжений МШУ.

Для повышения производительности, улучшения точности и объективности измерительного процесса был разработан автоматизированный аппаратно-программный комплекс на базе измерительной установки National Instruments (NI) PXI и среды разработки LabView. Основными блоками комплекса являются: испытательный модуль МШУ на основе ГБТ, генератор СКИ, осциллограф, анализатор спектра и установка NI PXI. ГБТ включен в МШУ по схеме с общим эмиттером. Воздействие СКИ производится по входной цепи. Осциллограммы испытательных импульсов положительной и отрицательной полярностей представлены на рисунке 1.

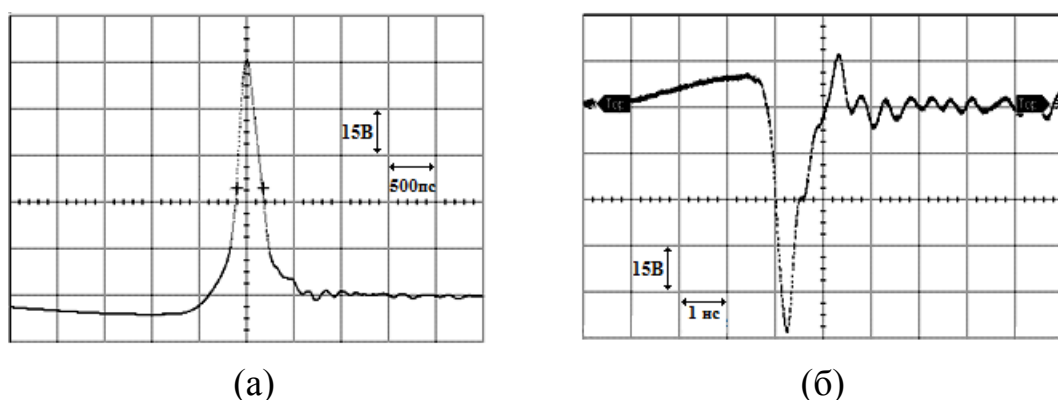


Рисунок 1 – Осциллограммы испытательных импульсов положительной (а) и отрицательной (б) полярностей

В ходе проведения измерений были получены временные диаграммы относительного тока коллектора  $I/I_0$ , который рассчитывается как отношение мгновенного значения тока коллектора к его значению до начала воздействия

СКИ (рисунок 2). Необходимо отметить, что отклик ГБТ на первый импульс серии для положительных (рисунок 2б) и отрицательных (рисунок 2а) СКИ различен. Объяснение этому было дано в первой главе диссертации и связано оно с тем, что при действии СКИ положительной полярности сначала происходит рост тока коллектора. Этот рост продолжается до проявления эффекта Кирка и увеличения рекомбинационных потерь. Затем наблюдается снижение тока коллектора. Если за время, составляющее межимпульсный промежуток, указанные процессы не успевают завершиться, то наблюдается кумулятивный эффект, сопровождающийся еще большим уменьшением низкочастотной составляющей тока коллектора.

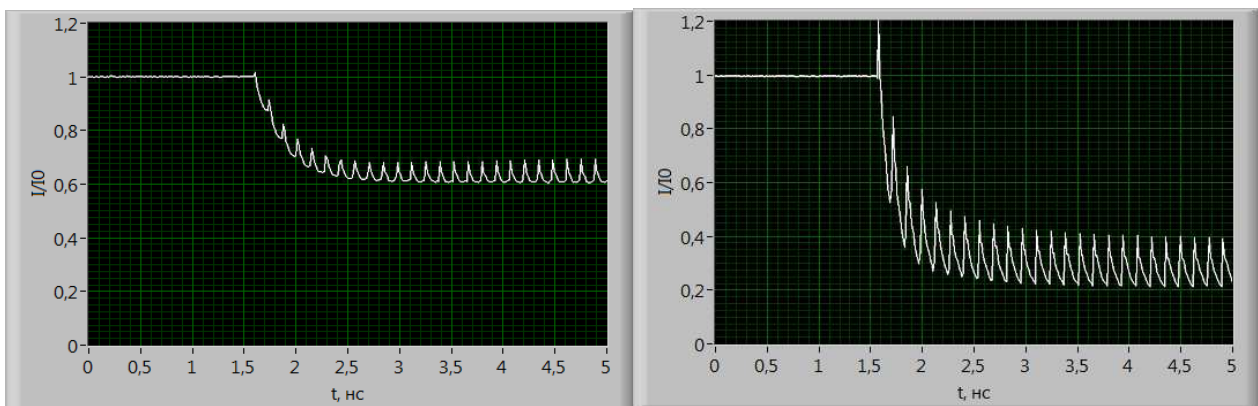


Рисунок 2 – Временные диаграммы выходного тока ГБТ под воздействием серии СКИ отрицательной (а) и положительной (б) полярностей

**Третья глава** диссертационной работы посвящена экспериментальному исследованию влияния импульсных помех субнаносекундной длительности на статические характеристики биполярных транзисторов с гетеропереходом серии VFP640. Актуальность этого исследования обусловлена необходимостью разработки современных полупроводниковых радиоэлектронных устройств, способных работать в условиях импульсных помех.

В ходе исследования контролировалось значение тока коллектора во время воздействия импульсной серии. Результаты проведенного экспериментального исследования работы маломощного усилителя на базе биполярного транзистора с гетеропереходом VFP640 показывают, что воздействие последовательности сверхкоротких видеоимпульсов может приводить к возникновению обратимых отказов, которые проявляются во временном уменьшении тока коллектора. В работе получены зависимости относительных минимальных значений тока коллектора  $I_{k1}/I_{k0}$ , которые рассчитывается как отношение мини-

мального значения тока коллектора  $I_{к1}$  во время действия СКИ к значению тока коллектора до воздействия  $I_{к0}$ , от напряжения коллектор-эмиттер (рисунок 3а) и от напряжения база-эмиттер (рисунок 3б). При этом амплитуда последовательности сверхкоротких импульсов принимала одно из значений: 25 В, 36 В, 51 В, 73 В, а частота следования была фиксированной и составляла 100 кГц

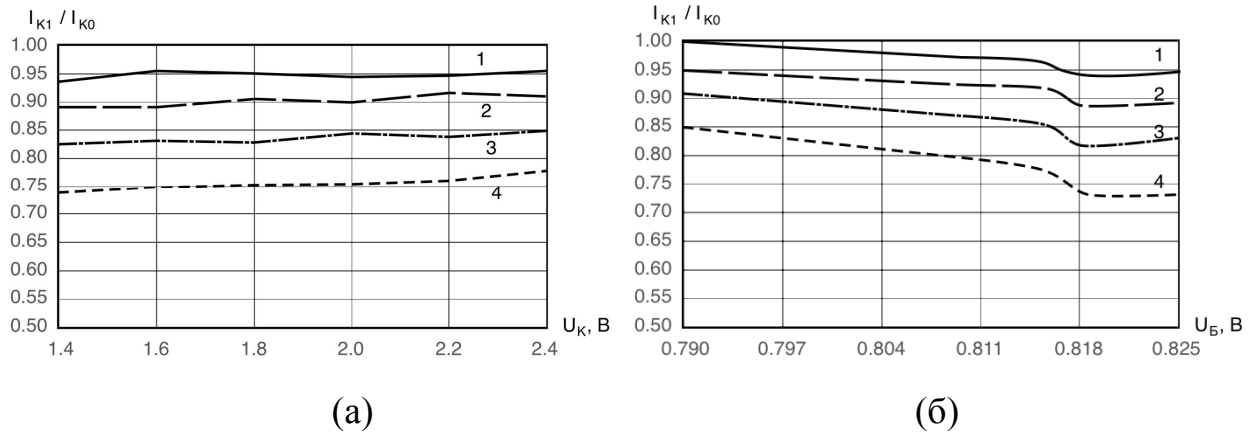


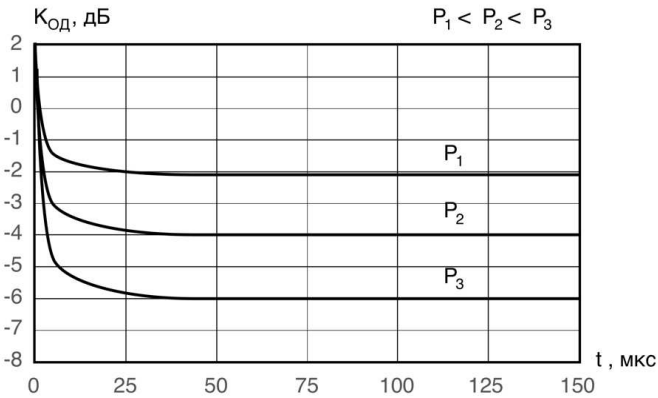
Рисунок 3 - Зависимости относительных минимальных значений тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер (а) и от напряжения база-эмиттер (б) при подаче последовательности сверхкоротких импульсов амплитудами 25 В (кривая 1), 36 В (2), 51 В (3), 73 В (4) и частотой следования 100 кГц

Из рисунка 3 видно, что увеличение амплитуды СКИ приводит к большему уменьшению тока коллектора. Причем это уменьшение практически не зависит от режима работы по напряжению коллектор-эмиттер (рисунок 3а). Напротив, выбором напряжения база-эмиттер можно добиться наименьшего влияния воздействия СКИ. С увеличением напряжения база-эмиттер воздействие усиливается, что связано с ростом коллекторного тока и уменьшением порогового значения амплитуды СКИ, при котором начинают падать эффективность эмиттера и коэффициент переноса эмиттерного тока.

Для упрощения процесса выбора режима работы ГБТ построены трехмерные зависимости относительного тока коллектора от режимов работы по току и напряжению коллектора.

**В четвёртой главе** рассматриваются задачи измерения и анализа характеристик электромагнитной совместимости малошумящего усилителя на основе биполярного транзистора с гетеропереходом под воздействием импульсных помех большой амплитуды. Показано, что помехи в виде импульсов субнаносекундной длительности могут приводить к возникновению обратимых отказов

МШУ, выражающихся во временном уменьшении коэффициента усиления. По полученным экспериментальным данным произведен расчет основных характеристик электромагнитной совместимости усилителя под действием импульсных помех, – коэффициента обратимой деградации  $K_{ОД}$  (формула 2) и верхней границы динамического диапазона (ВГДД) по обратимой деградации  $D_{ОД}$ .



$$K_{ОД} = 10 \lg \left( \frac{P_{ВЫХ}(P_{СКВИ} \neq 0)}{P_{ВЫХ}(P_{СКВИ} = 0)} \right) [dB] \quad (2)$$

$$K_{Б} = 10 \lg \left( \frac{P_{ВЫХ}(P_{ПОМ} \neq 0)}{P_{ВЫХ}(P_{ПОМ} = 0)} \right) [dB] \quad (3)$$

Рисунок 4 - Зависимость коэффициента обратимой деградации от времени при воздействии последовательности СКИ

На рисунке 4 приведены зависимости коэффициента обратимой деградации от времени при воздействии последовательности СКИ с разной средней мощностью. Видно, что ухудшение характеристик МШУ проявляется тем сильнее, чем выше средняя мощность серии СКИ.

В ходе исследования также были получены характеристики усилителя в рамках классической задачи электромагнитной совместимости, а именно: коэффициент блокирования  $K_{Б}$  (формула 3) и верхняя граница динамического диапазона по блокированию  $D_{Б}$  для различных режимов работы транзистора.

Для измерения всех указанных характеристик ЭМС был проведен ряд экспериментов, в ходе которых изменялись режимы работы и типы помехи. Затем были построены зависимости каждой из характеристик ЭМС от режима работы и проведено сравнение (рисунок 5). Кривая 1 соответствует значениям ВГДД по обратимой деградации, кривая 2 – ВГДД по блокированию.

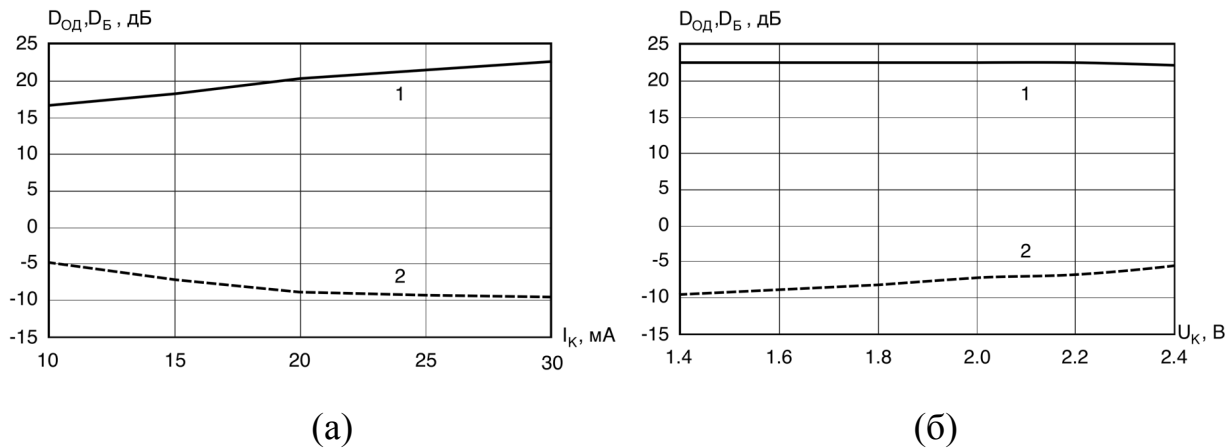


Рисунок 5 - Зависимости ВГДД по обратимой деградации и по блокированию от режима работы по току коллектора (а) и напряжению коллектор-эмиттер (б).

На основе сравнения показано, что выбором режима работы усилителя можно контролировать степень влияния импульсных или гармонических помех. При выборе напряжения коллектор-эмиттер необходимо руководствоваться помехоустойчивостью МШУ к гармоническим воздействиям (рисунок 5б). Выбор режима работы по току коллектора (рисунок 5а) должен производиться исходя помеховой обстановки. Помимо этого, при решении практических задач режим работы усилителей на основе биполярных транзисторов с гетеропереходом выбирается исходя из необходимых требований по коэффициенту усиления и динамическому диапазону. Увеличение коэффициента усиления можно достичь установкой больших значений тока коллектора. Динамический диапазон зависит в большей степени от выбора напряжения коллектор-эмиттер. Таким образом, исходя из условий работы конкретного МШУ и руководствуясь полученными в данной работе результатами, можно произвести выбор режима работы с точки зрения наибольшей стойкости радиоустройства в целом к действию мощных сверхкоротких импульсных помех. Необходимо отметить, что разработанные методика и автоматизированный комплекс может применяться для решения задач отбора полупроводниковой элементной базы, наиболее стойкой к воздействиям СКИ.

**В заключении** подведены итоги по диссертационной работе в целом и сформулированы основные результаты, которые сводятся к следующему:

1. По результатам проведенного теоретического и экспериментального исследования работы биполярных транзисторов с гетеропереходом дана физи-

ческая интерпретация явлениям, возникающим при их работе в составе малошумящего усилителя в условиях воздействия мощных импульсных помех сверхкороткой длительности. Приведенные аналитические выражения позволяют дать качественное объяснение эффектам воздействия сверхкоротких импульсов на динамику носителей заряда в полупроводниковой структуре ГБТ. Проведен анализ влияния температуры окружающей среды на проявление эффектов обратимой деградации ГБТ под действием СКИ.

2. Разработаны методика проведения экспериментальных исследований обратимой деградации ГБТ и работы малошумящего усилителя на их основе в условиях сверхкоротких электроперегрузок, а также алгоритмы автоматизации и аппаратная платформа для их проведения.

3. Разработана программная реализация алгоритмов автоматизации экспериментальных измерений и обработки их результатов.

4. Проведенное экспериментальное исследование статических характеристик ГБТ под действием импульсных помех субнаносекундной длительности показывает, что эффекты обратимой деградации зависят от режима работы ГБТ.

5. Экспериментально измерены параметры электромагнитной совместимости МШУ под действием сверхкоротких импульсных помех. Показано, что коэффициент обратимой деградации зависит от режима работы по току коллектора и практически не имеет зависимости от напряжения питания в допустимом рабочем диапазоне.

6. Проведен сравнительный анализ эффектов воздействия импульсных и гармонических внеполосных помех на малошумящий усилитель на основе биполярного транзистора с гетеропереходом.

7. Выработаны рекомендации по выбору режима работы ГБТ с точки зрения минимизации влияния СКИ на его статические характеристики, а также помехоустойчивости и стабильного функционирования МШУ в зависимости от вида помехи.

#### **Список публикаций:**

1. Бобрешов А. М. Характеристики электромагнитной совместимости малошумящего усилителя на биполярном транзисторе с гетеропереходом

- при воздействии сверхкоротких импульсных помех / А. М. Бобрешов, И. С. Коровченко, В. А. Степкин, Г. К. Усков, **Лэ Куанг Тук** // Радиотехника. – Москва, 2016. – № 6. – С. 154–158.
2. Бобрешов А. М. Обратимые отказы малошумящих биполярных транзисторов с гетеропереходом под действием сверхкоротких импульсов / А. М. Бобрешов, И. С. Коровченко, В. А. Степкин, Г. К. Усков, **Лэ Куанг Тук** // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика, 2016. – № 3. – С. 23–33.
  3. Бобрешов А. М. Экспериментальное исследование работы узкополосного приемника в присутствии сверхширокополосных помех / А. М. Бобрешов, **Лэ Куанг Тук**, В. А. Степкин, Г. К. Усков // Радиолокация, навигация, связь: XXI международная научно–техническая конференция, г. Воронеж, 14–16 апр. 2015 г. – Воронеж, 2015. – Т. 2. – С. 968–972.
  4. Бобрешов А. М. Экспериментальное исследование воздействия последовательности сверхкоротких видеоимпульсов на биполярные транзисторы с гетеропереходом / А. М. Бобрешов, И. С. Коровченко, В. А. Степкин, Г. К. Усков, **Лэ Куанг Тук** // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий : Рэус – 2016, Москва, Россия: Доклады международной конференции. – Москва, 2016. – Т. 1. – С. 145–149.
  5. Бобрешов А. М. Воздействие сверхкоротких импульсов большой амплитуды на маломощные биполярные транзисторы / А. М. Бобрешов, И. С. Коровченко, В. А. Степкин, Г. К. Усков, **Лэ Куанг Тук** // Труды 26–ой Международной Крымской конференции «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо\*2016)», Севастополь, 2016. – С. 1798–1803
  6. Бобрешов А. М. Обратимые отказы малошумящих усилителей при мощных импульсных воздействиях / А. М. Бобрешов, И. С. Коровченко, В. А. Степкин, Г. К. Усков, **Лэ Куанг Тук** // Сборник трудов Всероссийской научной школы–семинара «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро– и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами» 19 – 20 мая 2016г, Саратов, 2016. – С. 118–121.

7. Бобрешов А. М. Генератор сверхкоротких импульсов с электронным управлением длительностью / А. М. Бобрешов, А. С. Жабин, В. А. Степкин, Г. К. Усков, **Лэ Куанг Тук** // Успехи современной радиоэлектроники. – Москва, 2015 . – № 11. – С. 24–28.
8. Бобрешов А. М. Автоматизированный измерительный комплекс для отбора НЕМТ–транзисторов, стойких к воздействию импульсных помех / А. М. Бобрешов, А. С. Жабин, И. С. Коровченко, В. А. Степкин, Г. К. Усков, **Лэ Куанг Тук** // Инженерные и научные приложения на базе технологий NI: NIDAYS – 2015: сборник трудов XIV международной научно–технической конференции . – Москва, 2015. – С. 353–356.
9. Бобрешов А. М. Автоматизированный комплекс для определения параметров диода с накоплением заряда / А. М. Бобрешов, И. С. Емельяненко, **Лэ Куанг Тук**, В. А. Степкин, Г. К. Усков // Радиолокация, навигация, связь : XXII Международная научно–техническая конференция, г. Воронеж, 19–21 апр. 2016 г. – Воронеж, 2016. – Т. 1. – С. 338–344.

Работы [1, 2, 7] опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК для публикаций основных результатов диссертаций.