

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Лэ Куанг Тук «Эффекты воздействия сверхкоротких импульсных перегрузок на биполярные транзисторы с гетеропереходом и малошумящие усилители на их основе», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика»

Исследование функционирования радиоэлектронных средств в присутствии различных видов помех является важной задачей, имеющей большое практическое значение при разработке радиосистем. В известной литературе достаточно часто упоминается о возможности разработки и применения средств радиоэлектронной борьбы, которые мощными импульсными сигналами сверхмалой длительности могут необратимо вывести из строя радиоэлектронную аппаратуру (катастрофический отказ). За 20 с лишним лет наблюдения за этим направлением возможность создания таких средств так и не материализовалась. Энергии таких сигналов недостаточно, чтобы вызвать катастрофический отказ одного из узлов или радиоэлектронного средства в целом при использовании ослабляющих их металлических или металлизированных корпусов, защитных фильтров от импульсных помех и других технических решений по защите аппаратуры. Поэтому на практике результатом воздействия сверхкоротких импульсов может быть обратимый отказ, проявляющийся во временном ухудшении функциональных параметров элементной базы радиоаппаратуры. Причем как аппаратуры, не использующие сверх коротких импульсных излучений, так и аппаратуры, специально создаваемой для работы с такими излучениями. Поэтому задачи, сформулированные в диссертации актуальны, а результаты исследований представляют научный интерес.

В работе проведено исследование функционирования малошумящих усилителей в условиях действия сверхкоротких импульсных помех. В качестве активного элемента исследуемого усилителя выбран биполярный

транзистор с гетеропереходом, что обусловлено его широким применением в таких устройствах в диапазоне СВЧ. Структура работы включает в себя четыре логически связанные главы, введение, в котором формулируется постановка задач и дается обоснование их актуальности, и заключение.

В первой главе приводятся результаты теоретического исследования процессов, протекающих в кремний-германиевом биполярном транзисторе с гетеропереходом, в том числе, под действием сверхкоротких импульсных электроперегрузок по цепи базы. Основное внимание в этой части работы уделяется процессам модуляции ширины базы транзистора и рекомбинации в различных частях полупроводниковой структуры транзистора вследствие резкого увеличения коллекторного тока. Показано, что рост коллекторного тока, связанный с приходом на базу транзистора импульса большой амплитуды, приводит к снижению коэффициента усиления по току и эффективности эмиттера.

Остальная часть работы посвящена экспериментальному исследованию функционирования биполярного транзистора с гетеропереходом в условиях действия импульсных помех. Для этого автором диссертации реализована методика проведения экспериментальных исследований обратимой деградации, разработаны алгоритмы автоматизации этих исследований и их программная реализация на языке программирования National Instruments LabView. Во второй главе приведено описание указанных методики и алгоритмов, а также автоматизированного комплекса для проведения исследований.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию воздействия одиночных сверхкоротких импульсов и их последовательности на кремний-германиевые биполярные транзисторы с гетеропереходом. Получены экспериментальные зависимости характеристик обратимой деградации транзисторов от энергетических параметров воздействия, а именно амплитуды импульсов. Установлено, что степень проявления эффектов обратимой деградации зависит от режима работы транзистора в составе малозумящего усилителя. Также установлено влияние температуры на параметры обратимой деградации.

В четвертой главе приведены результаты исследования помехоустойчивости малошумящего усилителя в присутствии последовательности сверхкоротких импульсов. Измерены и рассчитаны параметры электромагнитной совместимости, которые позволяют оценить качество работы малошумящего усилителя в случае действия сверхкоротких импульсных помех. Проведенные экспериментальные исследования позволили получить зависимости параметров электромагнитной совместимости по обратимой деградации, таких как коэффициент обратимой деградации и верхняя граница динамического диапазона по обратимой деградации, от режимов работы усилителя. Проведено сравнение функционирования малошумящего усилителя в условиях действия импульсных и гармонических помех, в результате чего даны рекомендации по выбору его режима работы.

**Научная новизна** проведенных в диссертации исследований заключается в получении зависимостей параметров обратимой деградации малошумящих усилителей от характеристик импульсных воздействий и режимов работы транзистора, в предложенной физической интерпретации эффектов обратимой деградации биполярных транзисторов с гетеропереходом, в значениях экспериментально измеренных параметров электромагнитной совместимости по обратимой деградации, а также в рекомендациях по выбору режимов работы малошумящего усилителя с целью улучшения его электромагнитной совместимости.

**Достоверность** результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается корректным использованием методов математической физики, систем автоматизированного проектирования и математических пакетов программ, корректностью подходов к проведению экспериментальных исследований и подтверждается результатами экспериментальных исследований.

**Научная и практическая ценность** работы состоит в том, что автором измерены зависимости параметров электромагнитной совместимости по обратимой деградации, с помощью которых можно оценить работу устройства в условиях действия импульсных помех, даны конкретные

рекомендации по выбору режимов работы транзисторов в составе усилителя. Разработаны и реализованы алгоритмы автоматизации исследований эффектов обратимой деградации, позволяющие существенно снизить временные затраты на проведение эксперимента и минимизировать влияние человеческого фактора на полученные результаты.

Основные результаты диссертационной работы обсуждены на международных научно-технических конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах из перечня, рекомендованного ВАК. Автореферат достаточно полно отражает материалы диссертации и соответствует ее содержанию.

Однако необходимо отметить ряд недостатков диссертационной работы:

1. Из текста диссертации и автореферата не ясно, какое количество образцов транзисторов было исследовано и какова статистическая погрешность результатов экспериментального исследования.

2. В работе исследовалась деградация тока коллектора и коэффициента усиления транзистора, но не рассматривалось влияние сверхкоротких импульсов на его другие характеристики.

3. В работе имеет место ряд редакционных и стилистических недостатков изложения материалов.

Так во введении к диссертации сформулированы 5 целей работы, которые по своей сути дублируют задачи исследования. В автореферате сформулирована одна цель, которая интегрально учитывает все задачи. Но ни в тексте диссертации, ни в автореферате не сформулирована прикладная цель исследований, которая следует из результатов исследования.

В выводах по третьей главе утверждается, что «Выработаны рекомендации по выбору режима работы ГБТ с точки зрения минимизации влияния СКИ на его статические характеристики». Однако по тексту главы эти рекомендации оппонентом не обнаружены.

По тексту диссертации (стр. 24, 30, 32, 33, 36, 62, 67,81) пропущены слова, допущены опечатки или некорректно использованы термины. Возможно, это обусловлено уровнем владения ее автором государственным

языком РФ.

В автореферате (в общей характеристике работы) было бы полезным указать авторов ранее выполненных исследований, послуживших основой для постановки задач, решаемых в диссертации.

4. В первой главе, а именно в аналитических выражениях для описания эффектов воздействия помех было бы полезным разделить их влияние и влияние параметров штатных режимов функционирования транзисторов.

Вместе с тем, указанные недостатки существенно не снижают общего положительного впечатления от материалов диссертации, ее научной и практической ценности. Диссертация Лэ Куанг Тук «Эффекты воздействия сверхкоротких импульсных перегрузок на биполярные транзисторы с гетеропереходом и малошумящие усилители на их основе» удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям ВАК, ее содержание соответствует специальности 01.04.03 – «Радиофизика», а Лэ Куанг Тук заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент

**Поветко Василий Николаевич**

*В. Поветко*

21

ноября 2016 года

доктор технических наук, профессор, главный специалист АО «ВНИИ «Вега»

394026, г. Воронеж, Московский проспект, д.7-Б,

тел. (473) 262-27-03,

e-mail: box@vega.techno-r.ru

Подпись Поветко В.Н. заверяю

Главный инженер АО «ВНИИ «Вега» к.т.н.



М.А. Туровцев