

ЗАСЕДАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д212.277.01

Повестка дня:

Защита диссертации **Куликовым Александром Александровичем**
на соискание ученой степени *кандидата технических наук*:

"Неразрушающие методы и средства измерения напряжения шнурования тока в мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторах"

Специальности:

05.11.01 Приборы и методы измерения по видам измерения
(электрические измерения).

Официальные оппоненты:

Мещеряков Сергей Александрович, доктор технических наук,
доцент, начальник лаборатории ФАУ
«Государственный научно-
исследовательский испытательный
институт проблем технической защиты
информации Федеральной службы по
техническому и экспортному
контролю», г. Воронеж

Новиков Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук,
начальник лаборатории твердотельной
электроники Научно -
исследовательского технологического
института им. С.П. Капицы
Ульяновского государственного
университета

Ведущая организация - ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»

ЗАСЕДАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.277.01

от 28 декабря 2018 года

на заседании присутствовали члены Совета:

1.	Ярушкина Н.Г., председатель Совета	д.т.н., профессор	05.13.12	- технические науки
2.	Киселев С.К. зам. председателя Совета	д.т.н., доцент	05.11.01	- технические науки
3.	Смирнов В.И., уче- ный секретарь Со- вета	д.т.н., профессор	05.11.01	- технические науки
4.	Афанасьева Т.В.	д.т.н., доцент	05.13.12	- технические науки
5.	Васильев К.К.	д.т.н., профессор	05.13.05	- технические науки
6.	Дьяков И.Ф.	д.т.н., профессор	05.13.12	- технические науки
7.	Епифанов В.В.	д.т.н., доцент	05.13.12	- технические науки
8.	Иванов О.В.	д.ф-м.н.	05.11.01	- технические науки
9.	Крашенинников В.Р.	д.т.н., профессор	05.13.05	- технические науки
10.	Клячкин В.Н.	д.т.н., профессор	05.11.01	- технические науки
11.	Самохвалов М.К.	д.ф-м.н., профессор	05.11.01	- технические науки
12.	Сергеев В.А.	д.т.н., профессор	05.11.01	- технические науки
13.	Соснин П.И.	д.т.н., профессор	05.13.12	- технические науки
14.	Ташлинский А.Г.	д.т.н., профессор	05.13.05	- технические науки

Председатель Совета,
д.т.н., профессор

Ученый секретарь Совета,
д.т.н., профессор



Н.Г. Ярушкина

В.И. Смирнов

Председатель

Уважаемые коллеги !

На заседании диссертационного Совета Д212.277.01 из 21 члена Совета присутствуют 14 человек. Необходимый кворум имеем.

Членам Совета повестка дня известна. Какие будут суждения по повестке дня? Утвердить? (принято единогласно).

По специальности защищаемой диссертации **05.11.01 Приборы и методы измерения по видам измерения (электрические измерения)** (технические науки) на заседании присутствуют 6 докторов наук.

Наше заседание правомочно.

Председатель

Объявляется защита диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук **Куликовым Александром Александровичем** по теме: *"Неразрушающие методы и средства измерения напряжения шнурования тока в мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторах."*

Работа выполнена в Ульяновском государственном техническом университете

Научный руководитель - д.т.н., профессор **Сергеев В.А.**

Официальные оппоненты:

Мещеряков Сергей Александрович, доктор технических наук, доцент, начальник лаборатории ФАУ «Государственный научно-исследовательский испытательный институт проблем технической защиты информации Федеральной службы по техническому и экспортному контролю», г. Воронеж

Новиков Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук, начальник лаборатории твердотельной электроники Научно - исследовательского технологического института им. С.П. Капицы Ульяновского государственного университета

Присутствует 1 оппонент.

Письменные согласия на оппонирование данной работы от них были своевременно получены.

Ведущая организация - **ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет».**

Слово предоставляется **Ученому секретарю** диссертационного Совета д.т.н. **В.И.Смирнову Д212.277.01** для оглашения документов из личного дела соискателя.

Ученый секретарь

Соискателем **Куликовым Александром Александровичем** представлены в Совет все необходимые документы для защиты кандидатской диссертации (зачитывает):

- заявление соискателя;
- копия диплома о высшем образовании (заверенная);
- справка об обучении в аспирантуре;
- заключение по диссертации от организации, где выполнялась работа;
- диссертация и автореферат в требуемом количестве экземпляров.

Все документы личного дела оформлены в соответствии с требованиями Положений ВАК.

Основные положения диссертации отражены **Куликовым А. А.** в 30 научных работах, в т.ч. в **четырёх** статьях в изданиях из перечня ВАК, 2 статьях в журналах, индексируемых в Scopus и 2 патентах РФ на изобретения. Соискатель представлен к защите 24.10.2018г. (протокол №12). Объявление о защите размещено на сайте ВАК РФ 26.10.2018г.

Вся необходимая информация по соискателю внесена в ЕГИСМ.

Председатель

Есть ли вопросы по личному делу соискателя к ученому секретарю Совета? (Нет).

Есть ли вопросы к **Куликову А. А.** по личному делу? (Нет).

Александр Александрович, Вам предоставляется слово для изложения основных положений Вашей диссертационной работы.

Уважаемые члены диссертационного совета, вашему вниманию представляется диссертационная работа на тему «Неразрушающие методы и средства измерения напряжения шнурования тока в мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторах».

Особенностью применения современных мощных ВЧ и СВЧ биполярных транзисторов (МБТ) в радиоэлектронной аппаратуре является их работа в жестких эксплуатационных режимах в широком диапазоне рабочих токов, напряжений и частот. Поэтому основным требованием при проектировании и производстве мощных транзисторов является обеспечение эффективного отвода тепла от активной области прибора.

Одной из основных тенденций проектирования топологии структур современных мощных биполярных транзисторов стало максимально возможное увеличение отношения периметра эмиттера к его площади, для

уменьшения эффекта оттеснения эмиттерного тока к краям эмиттера. Поэтому для мощных транзисторов типичной является гребенчатая структура.

Для биполярных транзисторов характерно наличие положительной тепловой обратной связи за счет сильной температурной зависимости плотности эмиттерного тока. В результате положительной обратной связи токораспределение в структурах мощных транзисторов становится резко неоднородным, в структуре образуется шнур тока и так называемое «горячее пятно». При образовании «горячего пятна» в структуре транзистора на зависимости напряжения эмиттер-база от коллекторного напряжения появляется резкий излом или небольшой скачок.

Как правило, это приводит к катастрофическому отказу прибора в виде проплавления базы. Даже если отказа не происходит, резко неравномерное распределение тока весьма негативно сказывается на рабочих характеристиках и снижает надежность транзистора.

Электрические режимы работы биполярных транзисторов ограничены в координатах тока и напряжения. Эта область называется областью безопасной работы транзистора (ОБР). Тепловая неустойчивость ограничивает ОБР транзистора. Актуальной задачей является определение реальной границы ОБР.

В известном способе напряжение шнурования тока определяется по скачку или излому на зависимости напряжения эмиттер-база от коллекторного напряжения при постоянном эмиттерном токе. Серьезный недостаток данного способа – разрушающее воздействие, которому подвергается контролируемый транзистор, попадая в режим «горячего пятна».

В качестве критерия наступления локализации тока Гусевым В.А. предложено использовать ток индуцированного канала, образующегося в локальной области структуры при подаче в транзистор последовательности импульсов тока нарастающей амплитуды. Способ позволяет обнаруживать более ранние стадии локализации тока, чем при использовании других косвенных параметров.

Обзор существующих методов измерения параметров границы ОБР МБТ, определяемой шнурованием тока, показал, что у них есть ряд существенных недостатков, а именно:

- разрушающее воздействие, которому подвергается контролируемый транзистор, попадая в режим «горячего пятна»;

- ток канала в несколько миллиампер разогревает область локализации до температуры собственной проводимости и как правило сопровождается циклическими термомеханическими напряжениями;
- необходимость использования импульсов тока определенной формы;
- недостаточная чувствительность при обнаружении перегретых областей малой площади при больших токах.

Целью работы является повышение чувствительности и точности неразрушающих методов и средств измерения напряжения шнурования тока мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторов и их автоматизация без введения приборов в критический режим работы с образованием «горячего пятна».

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Численное моделирование теплоэлектрических процессов в МБТ с дефектами теплофизической и электрофизической природы.

2. Анализ теплоэлектрических процессов в структурах МБТ на основе двухсекционной модели МБТ с макродефектами и определение влияния дефектов на вольт-амперные характеристики и малосигнальные параметры МБТ.

3. Разработка способов, алгоритмов и автоматизированных устройств измерения напряжения шнурования тока МБТ по зависимости коэффициента внутренней обратной связи по напряжению от коллекторного напряжения без введения приборов в режим «горячего пятна».

4. Разработка экспериментальной установки для апробации и исследования метрологических характеристик разработанных способов на образцах серийных мощных ВЧ и СВЧ транзисторов.

5. Исследование зависимостей напряжения шнурования тока от тока и температуры на представительных выборках МБТ и оценка характеристик выборочных распределений МБТ по теплоэлектрическим параметрам.

6. Исследование влияние тепловых параметров и параметров тепловой неустойчивости токораспределения в структуре МБТ на характеристики транзисторных усилительных каскадов на их основе.

Положения, выносимые на защиту

1. Двухэлементная теплоэлектрическая модель токораспределения в структурах мощных ВЧ и СВЧ биполярных транзисторов с дефектами различной физической природы и формулы для расчета напряжения шнурования то-

ка МБТ по зависимости малосигнального коэффициента h_{12B} внутренней обратной связи МБТ от коллекторного напряжения.

2. Способ и устройство для измерения напряжения шнурования тока в мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторах по значениям малосигнального коэффициента внутренней обратной связи, измеренным при трех значениях коллекторного напряжения до образования «горячего пятна» в приборной структуре.

3. Способ и устройство измерения напряжения шнурования тока в мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторах по значениям коллекторного напряжения, измеренным при трех заданных уровнях малосигнального коэффициента внутренней обратной связи по напряжению до образования «горячего пятна» в приборной структуре.

4. Расчетные формулы для оценки методической погрешности измерения напряжения шнурования тока МБТ способами, указанными в п.2 и п.3.

5. Зависимости напряжения шнурования тока МБТ от температуры в диапазоне до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, имеющие немонотонный характер и позволяющие оценить изменение границы ОБР в рабочем диапазоне температур.

6. Зависимости коэффициента гармоник транзисторных усилительных каскадов от теплоэлектрических параметров МБТ.

Компьютерное моделирование неизотермического токораспределения в транзисторах с симметричной структурой с дефектами проведено на основе схемы представленной на слайде. Рассмотрена дискретная модель биполярного транзистора из двух параллельно включенных транзисторов, электрические и тепловые параметры которых в общем случае различны. Моделирование проводилось с помощью программы Workbench, дополненной блоком расчета температуры переходов частей структуры. Алгоритм моделирования состоит в расчете мощностей, рассеиваемых транзисторами, и температур их переходов, а затем – в нахождении токов, протекающих через транзисторы. В начале расчета температуры обеих частей полагаются равными температуре корпуса; расчет заканчивается, когда новые расчетные значения токов отличаются от предыдущих значений не более чем на 0,5%.

Расчетные зависимости разности токов от коллекторного напряжения для двух типов дефектов в виде различия сопротивлений в эмиттерной цепи и различия тепловых сопротивлений частей структуры пред-

ставлены на слайде. Крутизна этих зависимостей практически линейно растёт с ростом величины дефектов.

Дефектность прибора сводилась к различию входных сопротивлений r_{ni} , тепловых сопротивлений R_{Ti} и инжекционных параметров A_i . Тогда выражения для токов можно записать в виде формул 4а и 4б.

Из выражения 5 следует, что величина разбаланса токов пропорциональна величине дефекта.

Зависимости переменной составляющей напряжения эмиттер – база от коллекторного напряжения для дефектов электрофизической и теплофизической природы представлены на слайде.

Неразрушающий метод определения напряжения шнурования тока без введения транзистора в режим «горячего пятна» основан на теплоэлектрической модели, согласно которой тепловая составляющая коэффициента внутренней обратной связи по напряжению в схеме с общей базой возрастает с увеличением коллекторного напряжения и при напряжении коллектора близком к напряжению локализации устремляется к бесконечности. Крутизна зависимости коэффициента внутренней обратной связи от коллекторного напряжения определяется типом и величиной дефектов в структуре и конструкции прибора.

В предлагаемом способе измерения напряжения шнурования тока контролируемый транзистор включается по схеме с общей базой, задается постоянный эмиттерный ток, на коллектор подается сумма линейно нарастающего напряжения и низкочастотного синусоидального напряжения, измеряется амплитуда переменной составляющей напряжения на эмиттере при трех значениях коллекторного напряжения. Погрешность определяется по приведенной на слайде формуле. Из формулы следует, что для снижения погрешности определения значения напряжения локализации тока необходимо выбирать такие значения U_{K1} и U_{K2} , при которых переменная составляющая эмиттер-база заметно возрастает по сравнению с начальным значением. На слайде приведен расчет погрешности при различных значениях коэффициентов $a1$ и $a2$.

Для снижения вероятности попадания контролируемого транзистора в опасный режим предложены способ и устройство измерения напряжения шнурования тока, в котором измеряются значения напряжения на коллекторе контролируемого транзистора, при которых амплитуда переменной составляющей эмиттер-база изменяется в заданное число раз.

Поскольку в предлагаемом способе заданы отношения значений амплитуды переменной составляющей напряжения на эмиттере, то относительная погрешность определения напряжения шнурования тока будет одинаковой для всех образцов контролируемых транзисторов и будет определяться значением коэффициента q и относительной погрешностью измерения напряжений U_{K1} и U_{K2} . При значениях параметра q , не сильно отличающихся от 1, методическая погрешность измерения напряжения локализации этим способом в несколько раз меньше, чем способом, описанным выше.

Разработана установка, реализующая предложенные способы. Транзистор включается по схеме с общей базой, задается эмиттерный ток, а на коллектор подается сумма линейно нарастающего напряжения и низкочастотного синусоидального напряжения. Основные характеристики установки представлены на слайде: амплитуда коллекторного напряжения задается в диапазоне от 20 до 100 вольт, ток эмиттера – до 1,5 ампер.

Повышение чувствительности определения момента наступления шнурования тока достигается тем, что при подаче на коллектор суммы гармонического и линейно нарастающего напряжений и при проявлении эффекта локализации тока амплитуда переменной составляющей напряжения на переходе эмиттер-база резко возрастает.

Проверка способа с заданными отношениями значений амплитуды переменной составляющей напряжения на эмиттере проводилась на транзисторах типа КТ903, которые могут находиться в режиме «горячего пятна» некоторое время без катастрофического отказа. Результаты измерений для нескольких образцов при эмиттерном токе 0,5 А, максимальном коллекторном напряжении 50 В приведены на слайде. За действительное значение напряжения локализации тока принималось коллекторное напряжение, соответствующее максимуму амплитуды переменной составляющей эмиттерного напряжения. Для нескольких образцов с явно выраженным шнурованием тока напряжение локализации рассчитывалось по измеренным значениям на начальном участке зависимостей переменной составляющей напряжения эмиттер-база от коллекторного напряжения. Результаты расчета приведены в таблице.

Рассчитанные значения напряжения локализации, оказались несколько больше, чем измеренные. Погрешность составляет не более

6%. Эту систематическую погрешность можно оценить и учесть при необходимости более точного определения напряжения шнурования тока.

Проведено сравнение результатов измерения напряжения шнурования тока в транзисторах типа КТ903 предложенным способом и прямым способом с использованием ИК-микроскопа. По результатам измерений можно сделать вывод, что предложенные и прямой способы определения напряжения образования «горячих пятен» в структуре МБТ показывают хорошее соответствие. У транзистора с локализацией тока резко возрастает температура кристалла в момент образования горячего пятна.

Для автоматизации определения напряжения локализации по крутизне зависимости переменной составляющей эмиттер-база от коллекторного напряжения был предложен следующий алгоритм. Измеряем амплитуду переменной составляющей напряжения эмиттер-база, находим максимум положительный полуволны. Напряжение эмиттер-база измеряется с помощью АЦП с интервалом строба 100 мкс. Далее сравниваем максимумы полуволн и находим значения максимумов напряжений эмиттер-база, различающиеся в k раз. По трем значениям напряжения эмиттер-база находим напряжение шнурования тока. На слайде представлены результаты измерения напряжения локализации для различных значениях коэффициента k .

Разработанный алгоритм позволил провести измерения зависимости напряжения шнурования от эмиттерного тока для мощных СВЧ транзисторов. Видно, что, чем меньше ток эмиттера, тем меньше мгновенная мощность, при которой наступает шнурование тока, а напряжение шнурования тока соответственно возрастает. Эти результаты также соответствуют известным моделям тепловой неустойчивости в мощных биполярных транзисторах.

Впервые с помощью предлагаемого способа измерено напряжение шнурования тока в диапазоне температур от -60 до $+90^{\circ}\text{C}$. Показано, что зависимость напряжения шнурования тока от температуры корпуса транзистора имеет немотонный характер. Минимальное напряжение шнурования тока, характерное для конкретного типа транзистора, определяет максимально допустимое коллекторное напряжение в реальных условиях эксплуатации.

Для исследования влияния теплоэлектрических параметров транзисторов на характеристики усилительных каскадов класса А была исследована связь уровня второй гармоники с тепловыми параметрами транзи-

сторона и собрана экспериментальная установка по схеме показанной на слайде. Зависимости уровня второй гармоники каскада от коллекторного напряжения представлены на графике. Из графиков видно: чем больше тепловое сопротивление, тем больше и уровень второй гармоники. При этом у образца №4 наблюдался существенный рост второй гармоники, что обусловлено локализацией тока в транзисторной структуре.

Также проведен анализ линейных искажений в зависимости от теплоэлектрических параметров транзисторов в дифференциальных каскадах. Коэффициент линейных искажений, возникающих в дифференциальном каскаде из-за различия тепловых сопротивлений на низкой частоте, рассчитывается по выражению 1. На высоких частотах линейные искажения этой природы будут исчезать в результате инерционности тепловых процессов.

Результаты работы

1. Разработаны компьютерная и аналитическая теплоэлектрические модели токораспределения в структурах МБТ с дефектами электрофизической и теплофизической природы. Показано, что коэффициент внутренней обратной связи по напряжению МБТ нелинейно растет с увеличением коллекторного напряжения, при этом крутизна этой зависимости определяется видом и размером дефекта.

2. На основе развитой модели разработан неразрушающий способ и автоматизированное устройство измерения напряжения шнурования тока МБТ по значениям характеристики переменной составляющей напряжения эмиттер-база от коллекторного напряжения, измеренным при трех значениях коллекторного напряжения без введения контролируемого транзистора в режим «горячего пятна». Показано, что методическая погрешность способа уменьшается с ростом крутизны и не превышает 10 % при относительной крутизне характеристики переменной составляющей напряжения эмиттер-база от коллекторного напряжения порядка 5% в заданном диапазоне коллекторного напряжения. Значения напряжения шнурования тока, полученные предложенным способом для транзисторов типа КТ903А, отличаются от значений, полученных известным способом, не более, чем на 6%.

3. Разработан неразрушающий способ, автоматизированное устройство и алгоритм определения напряжения шнурования тока по значениям коллекторного напряжения, измеренным при двух значениях коэффициентов

превышения характеристики переменной составляющей напряжения эмиттер-база от коллекторного напряжения ее начального уровня. Показано, что методическая погрешность этого способа может быть снижена по сравнению с погрешностью способа по п. 2 в 3–5 раз путем выбора указанных коэффициентов. Способ и алгоритм апробированы на нескольких типах мощных биполярных СВЧ транзисторов.

4. Модернизирована экспериментальная автоматизированная установка для измерения теплоэлектрических характеристик мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторов, в части автоматизации обработки измерительной информации и расширения диапазонов задания режима по току от 0,1 до 1,5 А, по напряжению от 5 до 80 В и длительности тестового от 0,5 до 2,5 с.

5. Сравнение результатов косвенного измерения напряжения шнурования тока МБТ разработанными способами с результатами измерения локальной температуры транзисторной структуры с помощью ИК-микроскопа OPTOTHERM показали хорошее совпадение.

6. Впервые получены зависимости напряжения шнурования тока от температуры корпуса в диапазоне температур от -60 до $+90$ °С. Показано, что с увеличением температуры корпуса транзистора напряжение шнурования тока транзисторов КТ903 снижается, а при дальнейшем увеличении температуры увеличивается, то есть некоторой температуре корпуса транзистора существует минимальное значение напряжения шнурования тока. На основе полученных результатов может быть разработана методика отбраковки потенциально ненадёжных мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторов по минимальному напряжению шнурования тока в приборных структурах.

7. Получены выборочные распределения мощных биполярных транзисторов по значениям теплового сопротивления и напряжения шнурования тока.

8. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что нелинейность транзисторных усилителей класса А возрастает при приближении рабочей точки транзистора к границе ОБР.

Применяемость результатов:

Разработанные способы и автоматизированные устройства для измерения напряжения шнурования тока в мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторах могут быть использованы для технологического и выходного контроля качества продукции на предприятиях-производителях

МБТ, а также на входном контроле предприятий-производителей РЭА с использованием МБТ.

Модернизированная установка УИТП-1М для измерения теплоэлектрических характеристик мощных биполярных транзисторов используется на АО «НПП «Завод «Искра» для выборочного контроля качества выпускаемых МБТ.

Разработанные в рамках диссертационного исследования способы измерения напряжения шнурования тока в мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторах проходят экспериментальную апробацию в УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Результаты диссертационной работы частично использованы при выполнении проекта «Система мониторинга необслуживаемых телевизионных передатчиков» по Программе УМНИК-2009 и используются при выполнении проекта «Диагностика качества мощных СВЧ транзисторов по тепловым характеристикам» по гранту РФФИ №18-7321686.

По теме диссертации опубликовано 30 работ, в том числе 6 статей в научных журналах из перечня ВАК, получено 2 патента.

Председатель

У кого есть вопросы к соискателю?

д.т.н., профессор Васильев К.К.

На 18 слайде оценка погрешности напряжения шнурования, все как-то неопределенно, коэффициент q задается как отношение превышения напряжений, чему он все же равен? Когда он стремится к бесконечности, у Вас все хорошо, но реально он не может быть равен бесконечности, тогда и будет шнурование. Так какие же реальные значения q и какие реально погрешности получаются?

Соискатель

При q равном 1.2 погрешность составляет δU , где δU – погрешность измерения напряжения переменной составляющей эмиттер-база.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

Откуда берется формула определения погрешности и что это за погрешность?

Соискатель

Это систематическая погрешность и определяется как корень квадратный из суммы квадратов погрешностей измерения напряжений эмиттер-база.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

Откуда берется формула, для меня напряжения шнурование - это то напряжение, при котором происходит фактически пробой и эта формула получается только экспериментально. Как вы ее получили? Откуда берется формула?

Соискатель

Из формулы для расчета напряжения локализации, т.е. погрешности измерения U_k и погрешности измерения U_{k1} , из этой формулы получается формула для определения погрешности.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

А напряжение шнурование чему равно, как оно связано с этими напряжениями, как его определить?

Соискатель

Оно рассчитывается по крутизне зависимости переменной составляющей эмиттер-база от коллекторного напряжения.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

Тогда погрешность измерения напряжения шнурования зависит не только от этой крутизны, она меняется эта крутизна, при подходе к напряжению шнурования крутизна будет больше. Не будет ли погрешность больше, чем эти маленькие проценты? Что показали эксперименты?

Соискатель

Эксперименты показали следующее. При различных значениях коэффициентах q , мы получаем различные значения напряжения шнурования.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

Вы доводили измерения до шнурования? Нужно было взять, например 100 транзисторов и довести до шнурования.

Соискатель

Такие эксперименты проводились для транзисторов типа КТ903, т.к. они могут находиться в режиме горячего пятна некоторое время и не перегорать.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

Какие результаты получились при измерении транзисторов КТ903?

Соискатель

Результаты представлены в таблице, разница расчетных значений и измеренных составляет не более 6%.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

Т.е. похожи на Ваши оценки?

Соискатель

Да, полностью совпадают.

д.т.н., профессор Крашенинников В.Р.

27 плакат пожалуйста. Зависимость напряжения локализации от температуры корпуса. Как Вы можете объяснить эту зависимость физически? Почему у Вас так получилось, сначала характеристика убывает потом возрастает?

Соискатель

Сначала происходит спад, т.к. коэффициент передачи транзистора увеличивается с ростом температуры, а при прохождении минимума начинают работать выравнивающие сопротивления структуры.

д.т.н., профессор Крашенинников В.Р.

Может дело в погрешности?

Соискатель

Погрешность составляет не более 10 %

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

Вы упомянули, моделирование производилось с помощью программы WorkBench, дополненной блоком расчета температур. Что это за блок?

Соискатель

Блок нами разработанный, для расчета температуры транзистора.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

Как Вы интегрировали блок в оболочку WorkBench?

Соискатель

Т.к. программа WorkBench законченный программный продукт, нет возможности интегрировать наш блок в его оболочку. Моделирование производилось двумя программами. Сначала рассчитывалась температура транзистора, за тем данные заносились в WorkBench и т.д.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

Плакат 16. Что значит, заметно возрастает?

Соискатель

Коэффициент выбирается экспериментально, в данном случае 1,2 раза. Нельзя задавать коэффициент большим, т.к. транзистор будет попадать в режим горячего пятна, но так же нельзя задавать его сильно малым, т.к. возможны ложные срабатывания.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

Время стробирования 100 мкс чем обусловлено?

Соискатель

Период синусоиды составляет 25 мс, и чтобы достоверно измерить максимум переменной составляющей мы выбрали строб 100 мкс.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

Почему не выбрали 20 или 200 мкс?

Соискатель

Время стробирования 100 мкс выбиралось экспериментально.

д.т.н., профессор Смирнов В.И.

Все процессы шнурования вы применяете только для биполярных транзисторов, но это только часть компонентов силовой электроники. Для IGBT транзисторов вы проверяли свои методы?

Соискатель

Целью работы являлось измерение напряжения шнурования биполярных транзисторов. IGBT транзисторы не исследовались.

д.т.н., профессор Смирнов В.И.

Плакат 12. Вы моделируете и задаете дефекты. О каких дефектах идет речь?

Соискатель

Вводились дефекты теплофизического характера - это различие тепловых сопротивлений транзисторов, связанные с качеством посадки кристалла на корпус. И дефекты электрофизического характера, обусловленные различием входных сопротивлений, связанные с качеством изготовления кристалла.

д.т.н., профессор Киселев С.К.

Экспериментально исследовали для какой-либо партии транзисторов разброс напряжения шнурования тока?

Соискатель

Такие исследования проводились для транзисторов типа КТ903 в количестве 85 шт и КТ805 в количестве 26 шт. Диапазон измерения напряжения шнурования тока составил порядка 10 вольт при коллекторном напряжении 50 вольт и токе эмиттера 0,5 ампера. При увеличении тока разброс уменьшается. Результаты представлены в диссертационной работе.

д.т.н., профессор Киселев С.К.

Методы применяются для выборочного контроля. Предположим, Вы проверили один транзистор из партии сто штук. О чем это говорит? Что у других транзисторов в этой партии не может быть дефектов, приводящих к падению напряжения шнурования?

Соискатель

С замечанием согласен. Необходимо проводить 100% контроль, но разработанная установка пока не имеет сертификата.

Председатель

Есть еще вопросы? (Нет).

Согласны ли члены Совета сделать технический перерыв? (Нет).
Тогда продолжаем работу.

Слово предоставляется научному руководителю работы **профессору Сергееву В.А.**

Задачу, которую Александр решал вообще не новая, она появилась вместе с появлением мощных биполярных транзисторов. Существует много моделей описания процессов тепловой неустойчивости и шнурования тока. Все известные методы отбраковки делятся на качественные и количественные. Качественные условно определяют степень локализации напряжения шнурования, но не дают количественной оценки. Количественные сводятся как правило к тому, что транзистор загоняют в режим горячего пятна и затем быстро отключают его после процесса локализации, но нахождения прибора в таком режиме негативно сказывается на его характеристиках. Задача неразрушающего контроля напряжения шнурования всегда оставалась в поле зрения исследователей, но до настоящего времени подобных неразрушающих методов предложено не было. Александр включился в эту работу, когда учился в магистратуре в 2007 году, в то же время появились первые публикации по моделированию этих процессов. Было показано, что крутизна характеристики напряжения эмиттер-база от коллекторного напряжения зависит от дефектности прибора. Из этой зависимости можно получить напряжение шнурования методом экстраполяции. Было разработано несколько вариантов установок для определения напряжения шнурования

тока мощных биполярных транзисторов различных типов. Я считаю, что он вполне заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук.

(Отзыв прилагается).

Председатель

Ученому секретарю Совета предоставляется слово для оглашения заключения организации, где выполнялась работа и отзыва ведущей организации.

Ученый секретарь оглашает заключение организации, где выполнялась работа. Затем зачитывает отзыв ведущей организации.

(Заключение и отзыв прилагаются).

Председатель

На автореферат диссертации поступило 7 отзывов, все они положительные. Согласны ли члены Совета заслушать обзор отзывов или зачитать их полный текст?

Слово для обзора отзывов, поступивших на диссертацию, предоставляется **Ученому секретарю Совета**.

Ученый секретарь зачитывает обзор отзывов.

(Отзывы прилагаются).

Обзор отзывов

поступивших на автореферат диссертации Куликова А.А. "Неразрушающие методы и средства измерения напряжения шнурования тока в мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторах", представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.01 "Приборы и методы измерения по видам измерений (электрические измерения)".

На автореферат поступило 7 отзывов. Все отзывы положительные.

1. Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

Отзыв подписан д.т.н., профессором кафедры «Электронные приборы и устройства», **Захаровым А.А.**

Замечания:

- рассмотренные в теплоэлектрической модели дефекты сводятся к разнице входных сопротивлений и тепловых сопротивлений частей структуры транзистора, хотя в реальных приборах может быть существенным разброс и других параметров, например, коэффициента передачи тока;
- в автореферате не указано, на какой конкретно диапазон частот (ВЧ и СВЧ) распространяются выводы.

2. Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова.

Отзыв подписан д.т.н., профессором кафедры «Автоматика и телемеханика» **Лачиным В.И.**

Замечания:

- в формулировке новизны вместо коэффициента $h_{12Б}$ указан коэффициент $h_{21Б}$;
- в четвертой главе автор рассматривает влияние тепловых параметров СВЧ транзисторов на характеристики НЧ усилителей мощности, тогда как больший интерес представляют характеристики СВЧ-усилителей;
- в формулах (23) (24) не раскрыт ряд обозначений.

3. МИРЭА – Российский технологический университет.

Отзыв подписан к.т.н. профессором кафедры «Телекоммуникаций и радиотехники» **Трефиловым Н.А.**

Замечания:

- представленное на рис. 16 автореферата распределение транзисторов КТ903А по величине напряжения шнурования тока в интегральной форме является малоинформативным. Более наглядным и общепринятым являлось бы представление распределения в виде плотности вероятности или в виде гистограммы;
- в п. 5 основных результатов работы утверждается, что сравнение результатов косвенного измерения напряжения шнурования тока МБТ разработанными способами с результатами измерения локальной температуры транзисторной структуры с помощью ИК-микроскопа ОРТОТНЕРМ показали хорошее совпадение, однако в автореферате численные результаты сравнения не представлены.

4. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Отзыв подписан д.ф.-м.н., профессором кафедры «Конструирование узлов и деталей РЭА» **Еханиным С.Г.**

Замечания:

- соискателем предложены формулы (14), (21), по которым определяется $U_{кЛ}$, но из каких физических или математических соображений они получены по тексту автореферата понять нельзя;
- в автореферате не приводится описаний (даже кратких) ни алгоритма, ни работы блока, реализующего измерение $U_{кЛ}$, см. стр. 14;

• судя по осциллограммам, приведенным на рисунках 12 и 14, при переходе МБТ в режим с горячим пятном, наблюдается очень резкий рост (почти внезапный) $U_{эб}(U_k)$, поэтому не удивительно, что расчетные значения $U_{кл}$ всегда больше экспериментальных, см. таблицу 1. Поэтому, на мой взгляд, расчетную формулу надо было бы подкорректировать (может быть и модель МБТ).

5. Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева.

Отзыв подписан заведующим кафедрой «Системы автоматизированного проектирования» д.т.н., профессором **Беловым В.Ф.**

Замечание: Недостаточно полный обзор зарубежной научной литературы, посвященной исследованиям биполярных и гетеробиполярных ВЧ и СВЧ транзисторов, хотя зарубежные ученые работают в этой области в течение нескольких последних десятилетий.

6. АО «РНИИ «Электронстандарт».

Отзыв подписан к. ф.-м. н. **Левиным Р.Г.**

Замечание: Следовало бы, при определении зависимости шнурования тока от температуры корпуса расширить температурный диапазон до значений $+120^{\circ}\text{C}$, что позволило бы существенно повысить точность и практическую ценность методики при отбраковке потенциально ненадежных приборов.

7. Саратовский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Отзыв подписан д.ф.-м.н., профессором **Филимоновым Ю.А.** **Замечаний нет.**

Председатель

Слово для ответа на замечания по заключению и отзывам предоставляется соискателю.

Соискатель

По поводу замечаний ведущей организации. Дефект металлизации можно свести к дефекту электрофизической природы, т.е. к различию входных сопротивлений транзисторов.

По второму замечанию, в диссертации и автореферате указано, что период модуляции коллекторного напряжения выбирается во много раз больше тепловой постоянной времени кристалла испытуемого транзистора, так чтобы теплоемкость корпуса не сказывалась на результатах измерения.

По третьему замечанию. Детальное исследование механизмов и моделей температурных зависимостей напряжения шнурования тока МБТ не входило в задачи исследования.

По четвертому замечанию. ВЧ и СВЧ транзисторы в усилителях и генераторах могут работать и с низкочастотной модуляцией. Наша за-

дача сводилась к тому, чтобы показать, что вторая гармоника сильно возрастает при локализации тока в транзисторной структуре.

С пятым замечанием согласен.

Теперь относительно отзывов на автореферат.

По замечанию о разбросе коэффициента передачи. Значение коэффициента передачи тока входит в выражение для входного сопротивления транзистора, поэтому отдельно разброс коэффициента передачи тока не рассматривался.

По замечанию о диапазоне частот, на которых работают транзисторы. Измерения проводились для транзисторов, работающих в диапазоне частот от 30 до 700 МГц.

Касательно предложенных формул (14) и (21), по которым определяется $U_{кл}$. Подробный вывод данных формул приведен в диссертации. По замечанию о недостаточно полном обзоре зарубежной научной литературы. В списке литературы 26 наименований зарубежных источников. С остальными замечаниями я соглашаюсь.

Председатель

Один из оппонентов отсутствует по уважительной причине. Прошу ученого секретаря зачитать отзыв официального оппонента **-д.т.н. Мещерякова Сергея Александровича.**

(Отзыв прилагается).

Председатель

Соискателю предоставляется слово для ответа на замечания оппонента.

Соискатель

По первому замечанию: Исследуемые транзисторы устанавливались в самодельное контактирующее устройство без теплоотвода. В связи с короткой длительностью измерительного импульса теплоотвод устанавливать нет необходимости.

По второму замечанию: данный алгоритм подробно описан в патенте РФ №2616871, в диссертации есть ссылка.

По четвертому замечанию: В широком диапазоне температур исследовался один тип транзисторов. Но в ограниченном диапазоне температур (от -20 С до $+60$ С) температурные зависимости напряжения шнурования измерялись у транзисторов нескольких типов. Эти зависимости приведены в работе и имеют такой же немонотонный характер. С третьим и пятым замечаниями согласен.

Председатель

Слово для отзыва предоставляется официальному оппоненту **-к.т.н. Новикову Сергею Геннадьевичу.**

Повышение качества и надежности современной электронной аппаратуры, а также ее элементной и компонентной базы является важной научно-технической задачей. Решение этой задачи основано на изучении механических, электрических, тепловых и других процессов протекающих, в как в дискретных элементах и компонентах, модулях и

блоках, узлах так и в устройствах в целом. Исследование критических тепловых режимов, причин их вызывающих, в мощных биполярных и полевых транзисторах является ключом к поиску методов и средств предотвращения ситуаций с их деградацией и выходом из строя во время эксплуатации. В частности, тепловой пробой мощных биполярных транзисторов может быть обусловлен многими причинами, одна из которых структурные дефекты, способствующие таким явлениям, как шнурование тока, перегрев локальной области полупроводникового кристалла транзистора, тепловая генерация дислокаций и микротрещин в полупроводнике. Своевременная эффективная диагностика дефектности и работоспособности структуры и всей конструкции транзистора с использованием неразрушающих методов не только на стадии производства, но и во время эксплуатации прибора является актуальной задачей. Решению этой задачи посвящена диссертационная работа А. А. Куликова. Научная ценность работы заключается в том, что на основе развитой дискретной двухэлементной теплоэлектрической модели БТ с дефектами тепловой и электрофизической природы впервые показано, что характер и крутизна зависимости малосигнального коэффициента $h_{12Б}$ БТ в схеме с общей базой от коллекторного напряжения $U_{кв}$ определяется типом и размером дефекта; при этом, чем больше дефект, тем больше крутизна зависимости $h_{12Б}(U_{кв})$ на ее начальном участке. Новые, разработанные способы и устройство измерения напряжения шнурования тока в БТ при заданном эмиттерном токе по значениям малосигнального коэффициента $h_{12Б}$ и по значениям коллекторного напряжения, с достаточной для производственного контроля точностью и хорошей чувствительностью обеспечивают измерение напряжения шнурования тока, при этом исследуемые приборы не подвергаются разрушающим воздействиям. Также ценность работы заключается в том, что впервые получены экспериментальные зависимости напряжения шнурования тока БТ от температуры корпуса в диапазоне температур от -60 °С до $+90$ °С, и установлено, что эта зависимость имеет немонотонный характер и достигает минимального значения при некоторой температуре корпуса БТ в указанном диапазоне температур. Указанные результаты демонстрируют высокий научно-технический уровень выполненной работы.

С учетом этого, при общем положительном заключении я позволил сформулировать следующие недостатки:

1. Не ясно почему для малосигнального статического коэффициент передачи тока со входа на выход в схеме с общей базой автором введено новое определение «коэффициент внутренней обратной связи». Более того, во введении, в разделе «научная новизна» и в положениях, выносимых на защиту, этот малосигнальный коэффициент обозначен как $h_{21Б}$, хотя, в главе 2 при описании теплоэлектрической модели ведется рассмотрение коэффициента $h_{12Б}$. Данное обстоятельство затрудняет восприятие логики представления материала.

2. Автор оперирует понятием «Горячее пятно» которое не раскрывается по тексту диссертации, не поясняется физика этого явления, более того не указан источник, в котором автор позаимствовал это понятие.

3. В выводе 2 к 2 главе указано, что на основе двухсекционной модели МБТ показано, что при наличии в транзисторе дефектов электрофизической и теплофизической природы, зависимость коэффициента обратной связи по напряжению от коллекторного напряжения имеет суперлинейный характер. Крутизна этой зависимости пропорциональна

величине дефекта. Не ясно, чем обоснован вывод о суперлинейном характере зависимости коэффициента обратной связи по напряжению от коллекторного напряжения. Характер этой зависимости линейный.

4. Вызывает сомнение ценность материала диссертации, представленного в приложениях, в частности, перечни элементов (Приложение В), описание блока обработки данных (Приложение Г), листинг программы определения напряжения шнурования в МБТ (Приложение Д), которые не дополняют и не раскрывают значимость основного материала диссертации.

5. В диссертации представлен иллюстративный материал плохого качества, на котором трудно различимы знаки и надписи, в частности некоторые графики представлены в виде скриншотов с экрана монитора, например рисунки 3.6., 3.9., 3.16, 3.17 и др. К некоторым рисункам даны пояснения не соответствующие изображению, например рисунок 1.15 б.

6. Результаты экспериментальных исследований, представленные в главе 3 базируются на единичных изменениях отдельных образцов, что снижает достоверность полученных результатов. Для подтверждения эффективности предлагаемых автором способов необходимы более тщательные исследования значительно большего количества образцов и разных партии образцов с дополнительной статистической обработкой результатов экспериментов.

7. К сожалению, текст диссертации не лишен орфографических, пунктуационных ошибок и опечаток, например стр.12, стр 79, рис 3.14, также в тексте встречаются повторы одних и тех же фраз, например стр. 89 и стр. 93. Кроме того при оформлении диссертации не соблюдены требования, в частности, не указаны названия приложений, не указан их тип, используются сокращения в оглавлении и в названиях глав, неправильно оформлены подписи к рисункам и таблицам и др.

8. В тексте встречаются непонятные фразы, например, стр. 11 «Предельная рабочая частота МБТ ограничивается временем переноса носителей заряда через пространство взаимодействия».

(Отзыв прилагается).

Председатель

Слово для ответа на замечания оппонента предоставляется соискателю.

Соискатель

С первым замечанием согласен.

По второму замечанию. Понятие «горячее пятно» используется как в отечественной, так и зарубежной литературе и является устоявшимся термином и используется, например, в статьях Гусева, Синкевича, Сергеева и др.

По третьему замечанию. Зависимость $U_{ЭВ}(U_K)$ имеет линейный характер только на начальном участке, а с ростом коллекторного напряжения и приближении к напряжению шнурования крутизна этой зависимости заметно возрастает.

С четвертым и пятым замечаниями согласен.

По шестому замечанию. В основном тексте работы приведены результаты для нескольких образцов исследуемых транзисторов. В приложении

А и Б диссертации приведены результаты измерений для 80 шт транзисторов типа КТ903А и 26 шт типа КТ805А.

С седьмым и восьмым замечаниями согласен.

Председатель

Кто хочет выступить?

д.т.н., профессор Васильев К.К.

В целом мне работа понравилась. Она лежит в русле тех исследований, которые проводятся в филиале Института радиотехники и электроники. Методы неразрушающего контроля весьма актуальны, т.к. позволяют сохранить приборы и определить их характеристики. С точки зрения недостатков, меня не убедили величины погрешности. Крутизна зависимости эмиттер-база от коллекторного напряжения индивидуальна для каждого прибора. Поэтому погрешность будет значительно больше. В целом работа хорошая, полезная, сделана на хорошем уровне и внедрение есть, поэтому я буду голосовать за.

д.т.н., профессор Смирнов В.И.

Я эту работу знаю достаточно неплохо и соискателя тоже. По своему уровню соискатель соответствует уровню кандидата технических наук. Что касается диссертации, то работа интересная, и по важности и по научной новизне, по объему полученных результатов. Работа соответствует требованиям к кандидатской диссертации. Недостатком я считаю ограничение объектов исследования только биполярными транзисторами, т.к. биполярные транзисторы давно не доминируют на рынке силовой электроники. Поэтому неплохо попробовать другие объекты исследования. Работа мне понравилась, соискатель достоин ученой степени кандидата технических наук.

д.т.н., профессор Киселев С.К.

На мой взгляд, работа содержит необходимые составные части чтобы признать ее успешной. Предложенный метод хорошо ложится на автоматизированные измерения и можно сделать установку для стопроцентного контроля выпускаемых транзисторов предприятием-изготовителем. Работа достаточно гармонична, соответствует специальности «Приборы и методы измерения».

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

Соискатель является выпускником нашей кафедры «Радиотехника», никогда не прерывал связи с кафедрой. Хочу отметить высокую инженерную составляющую, т.к. результаты работы доведены до установки, которая внедрена на мощном предприятии АО «НПП «Завод Искра». Оцениваю работу положительно, буду голосовать за.

д.т.н., профессор Самохвалов М.К.

Хочу сказать пару слов о самой диссертации. В работе представлены два метода измерения шнурования тока и схемы измерения. Дан-

ные методы применимы не только для ВЧ и СВЧ транзисторов, но и для низкочастотных транзисторов. Новизна заключается в том, чтобы избежать разрушения транзисторов при измерениях. Для этого измеряется переменная составляющая эмиттер-база на начальном участке и с помощью цифровой обработки определяется напряжение шнурования. В работе представлены экспериментальные данные измерения напряжения шнурования тока для многих типов мощных биполярных транзисторов. В целом задача решена, я буду голосовать за.

Представитель организации внедрения «Завод Искра», директор по науке Лагун М.М.

Хочу сказать, как представитель предприятия, которое использует результаты соискателя, что данная методика очень помогает нам отбраковывать потенциально ненадежные транзисторы. С помощью разработанной соискателем установки мы проверяем высокочастотные, переключаемые, усилительные транзисторы. По результатам опытной эксплуатации мы планируем получить промышленный образец установки для стопроцентного контроля выпускаемой продукции. Биполярные транзисторы будут производиться еще не менее 10 лет, поэтому данные методы неразрушающего контроля являются весьма актуальными. Мне бы хотелось, чтобы соискатель продолжал работу в этом направлении. Данную работу я поддерживаю.

Председатель

Кто еще хочет выступить? Нет желающих?

Соискателю предоставляется заключительное слово.

Соискатель

Я хочу выразить свою благодарность членам Совета за внимание и желание выслушать, научному руководителю, оппонентам за замечания по работе.

Председатель

Переходим к голосованию. Какие будут предложения по составу счетной комиссии? Поступили предложения включить в состав счетной комиссии профессора Васильева К.К., профессора Дьякова И.Ф. и профессора Клячкина В.Н.

Прошу голосовать. Возражений нет.

Председатель

Прошу счетную комиссию приступить к работе.

Председатель

Коллеги! Продолжаем нашу работу. Слово предоставляется председателю счетной комиссии профессору **Васильеву К.К.**

Оглашается протокол счетной комиссии.

Кто против? (Нет).

Кто воздержался? (Нет).

Протокол счетной комиссии утверждается.

Таким образом, на основании результатов тайного голосования (за - 13 , против - нет, недействительных бюллетеней - 1) диссертационный совет Д212.277.01 при Ульяновском государственном техническом университете признает, что диссертация **Куликова А. А.** содержит новые решения в неразрушающих методах и средствах измерения напряжения шнурования тока в мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторах, соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям (п.9 "Положения" ВАК), и присуждает **Куликову Александру Александровичу** ученую степень кандидата технических наук по специальностям **05.11.01.**

Председатель

У членов Совета имеется проект заключения по диссертации **Куликова А. А.** Есть предложение принять его за основу. Нет возражений? (Нет). Принимается.

Какие будут замечания, дополнения к проекту заключения?

(Обсуждение проекта).

Председатель

Есть предложение принять заключение в целом с учетом редакционных замечаний. Нет возражений? Принимается единогласно.

Заключение объявляется соискателю

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.277.01
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФГБОУ ВО «УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 28.12.2018 № 16

О присуждении Куликову Александру Александровичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Неразрушающие методы и средства измерения напряжения шнурования тока в мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторах» по специальности 05.11.01 «Приборы и методы измерения по видам измерения (электрические измерения)» принята к защите 24.10.2018 г. протокол № 12 диссертационным советом Д 212.277.01 на базе ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, приказ № 105н/к от 11.04.2012.

Соискатель Куликов Александр Александрович 1985 года рождения, в 2008 году соискатель окончил магистратуру Ульяновского государственного технического университета; обучается в целевой аспиран-

туре ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»; работает в Ульяновском филиале ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук в должности ведущего инженера.

Диссертация выполнена в ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» на базовой кафедре «Радиотехника, опто- и наноэлектроника».

Научный руководитель – доктор технических наук, Сергеев Вячеслав Андреевич, директор Ульяновского филиала федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук.

Официальные оппоненты: **Мещеряков Сергей Александрович**, доктор технических наук, доцент, начальник лаборатории Федерального автономного учреждения «Государственный научно-исследовательский испытательный институт проблем технической защиты информации Федеральной службы по техническому и экспортному контролю», **Новиков Сергей Геннадьевич**, кандидат технических наук, начальник лаборатории твердотельной электроники Научно-исследовательского технологического института им. С.П. Капицы Ульяновского государственного университета дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» в своем положительном заключении, подписанном С.И. Рембезой, д.ф.-м.н., профессором, заведующим кафедрой «Полупроводниковая электроника и наноэлектроника» и И.Г. Дроздовым, д.т.н., профессором проректором по научной работе указала, что диссертация Куликова А.А. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую решение актуальной задачи совершенствования методов и средств измерения напряжения шнурования тока в мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторах для целей диагностики их качества, соответствует требованиям ВАК Минобрнауки РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.01 – Приборы и методы измерения по видам измерения (электрические измерения).

Соискатель имеет 31 опубликованную работу, в том числе по теме диссертации 30 работ, в том числе опубликованных в изданиях их перечня ВАК – 6 статей, и 2 патента на изобретения. Общий объем опубликованных работ 6,8 п. л. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Сергеев В.А., Куликов А.А., Тарасов Р.Г. Установка для измерения напряжения шнурования тока в структурах мощных ВЧ- и СВЧ биполярных транзисторов // Автоматизация процессов управления. – 2017. – №3. – С. 96-102.

2. Сергеев В.А., Куликов А.А. Неразрушающий метод определения напряжения шнурования тока в мощных ВЧ и СВЧ биполярных транзисторах // Известия вузов. Электроника. – 2014. – №4. – С. 46-53.

3. Сергеев В.А., Куликов А.А., Дулов О.А. Контроль однородности токораспределения в биполярных транзисторах по зависимости коэффициента внутренней обратной связи от коллекторного напряжения // Известия вузов. Электроника. – 2009. – №2. – С.10-16.

На диссертацию и автореферат поступило 7 отзывов; все отзывы положительные.

1. ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.». Отзыв подписан профессором кафедры «Электронные приборы и устройства», д.т.н., профессором А. А. За-

харовым. Замечания: 1) Рассмотренные в теплоэлектрической модели дефекты сводятся к разнице входных сопротивлений и тепловых сопротивлений частей структуры транзистора, хотя в реальных приборах может быть существенным разброс и других параметров, например, коэффициента передачи тока. 2) В автореферате не указано, на какой конкретно диапазон частот (ВЧ и СВЧ) распространяются выводы.

2. **«Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (г. Новочеркасск).** Отзыв написан профессором кафедры «Автоматика и телемеханика», д.т.н., профессором **В.И. Лачиным. Замечания:** 1) В формулировке новизны вместо коэффициента h_{12B} указан коэффициент h_{21B} . 2) В четвертой главе автор рассматривает влияние тепловых параметров СВЧ транзисторов на характеристики НЧ усилителей мощности, тогда как больший интерес представляют характеристики СВЧ-усилителей. 3) В формулах (23) (24) не раскрыт ряд обозначений.

3. **ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (МИРЭА)» (г. Ульяновск).** Отзыв подписан профессором кафедры телекоммуникаций и радиотехники, к.т.н. профессором **Н.А. Трефиловым. Замечания:** 1) Представленное на рис. 16 автореферата распределение транзисторов КТ903А по величине напряжения шнурования тока в интегральной форме является малоинформативным. Более наглядным и общепринятым являлось бы представление распределения в виде плотности вероятности или в виде гистограммы. 2) В п. 5 основных результатов работы утверждается, что сравнение результатов косвенного измерения напряжения шнурования тока МБТ разработанными способами с результатами измерения локальной температуры транзисторной структуры с помощью ИК-микроскопа OPTOTHERM показали хорошее совпадение, однако в автореферате численные результаты сравнения не представлены.

4. **ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).** Отзыв подписан профессором кафедры конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР), д.ф.-м.н. **С.Г. Еханиным. Замечания:** 1) Соискателем предложены формулы (14), (21), по которым определяется $U_{кл}$, но из каких физических или математических соображений они получены по тексту автореферата понять нельзя. 2) В автореферате не приводится описаний (даже кратких) ни алгоритма, ни работы блока, реализующего измерение $U_{кл}$, см. стр. 14. 3) Судя по осциллограммам, приведенным на рисунках 12 и 14, при переходе МБТ в режим с горячим пятном, наблюдается очень резкий рост (почти внезапный) $U_{эб}(U_{кб})$, поэтому не удивительно, что расчетные значения $U_{кл}$ всегда больше экспериментальных, см. таблицу 1. Поэтому, на мой взгляд, расчетную формулу надо было бы подкорректировать (может быть и модель МБТ).

5. **ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева».** Отзыв подписан заведующим кафедрой систем автоматизированного проектирования, д.т.н., профессором **В.Ф. Беловым. Замечания:** Недостаточно полный обзор зарубежной научной литературы, посвященной исследованиям биполярных и гетеробиполярных ВЧ и СВЧ транзисторов, хотя зарубежные ученые работают в этой области в течение нескольких последних десятилетий.

6. **АО «РНИИ «Электронстандарт» (г. Санкт Петербург).** Отзыв подписан заместителем генерального директора к.ф.-м.н. Р.Г. Левиным и главным специалистом, к.э.н. доцентом **И.М. Чангли. Замечания:** Следовало бы, при определении зависимости напряжения шнурова-

ния тока от температуры корпуса расширить температурный диапазон до значений $+120^{\circ}\text{C}$, что позволило бы существенно повысить точность и практическую ценность методики при отбраковке потенциально ненадежных приборов.

7. Саратовский филиал ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук. Отзыв подписан директором филиала, д.ф.-м.н., профессором **Ю.А. Филимоновым**. **Замечаний нет.**

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью в области исследования по теме диссертации, подтверждаемой публикациями в рецензируемых научных изданиях.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований **разработаны:**

- дискретная двухсекционная теплоэлектрическая модель мощных биполярных транзисторов (МБТ) с дефектами тепловой и электрофизической природы;

- новый способ и устройство измерения напряжения шнурования тока в МБТ при заданном эмиттерном токе по значениям малосигнального коэффициента $h_{12Б}$ внутренней обратной связи, измеренным при трех значениях коллекторного напряжения до образования «горячего пятна» в приборной структуре;

- новый способ и устройство определения напряжения шнурования тока в МБТ при заданном эмиттерном токе по значениям коллекторного напряжения, измеренным при двух заданных значениях коэффициентов превышения характеристики $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$ ее начального уровня до образования «горячего пятна» в приборной структуре.

- модернизированная установка УИП-1М для измерения теплоэлектрических характеристик и отбраковки дефектных и потенциально ненадежных МБТ по значению напряжения шнурования тока;

предложен алгоритм определения напряжения шнурования тока в МБТ по крутизне характеристики $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$ на ее начальном участке;

доказано, что:

- характер и крутизна зависимости малосигнального коэффициента $h_{12Б}$ внутренней обратной связи МБТ в схеме с общей базой от коллекторного напряжения $U_{КБ}$ определяется типом и размером дефекта; при этом, чем больше дефект, тем больше крутизна зависимости $h_{12Б}(U_{КБ})$ на ее начальном участке;

- температурная зависимость напряжения шнурования тока в мощных ВЧ и СВЧ транзисторов в диапазоне температур корпуса прибора от -60°C до $+90^{\circ}\text{C}$ имеет немонотонный характер, при этом значение напряжения шнурования тока изменяется на 15-20% и при некоторой критической температуре корпуса принимает минимальное значение.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано:

- что характер и крутизна зависимости малосигнального коэффициента $h_{12Б}$ внутренней обратной связи МБТ в схеме с общей базой от коллекторного напряжения $U_{КБ}$ определяется типом и размером дефекта; при этом, чем больше дефект, тем больше крутизна зависимости $h_{12Б}(U_{КБ})$ на ее начальном участке;

- что методическая погрешность измерения напряжения шнурования тока в мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторах предложенными способами даже при незначительном (5-10%) изменении $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$ в заданном диапазоне изменения коллекторного напряжения не превышает 10 %:

изложены: результаты моделирования токораспределения в структурах МБТ с дефектами тепловой и электрофизической природы на основе дискретной двухсекционной теплоэлектрической модели; результаты сравнительных измерений напряжения шнурования тока в МБТ предложенными способами и с использованием ИК-микроскопа;

изучены источники методических погрешностей при измерении напряжения шнурования тока в МБТ предложенными способами;

проведена модернизация установки для измерения теплоэлектрических характеристик и отбраковки дефектных и потенциально ненадежных мощных биполярных транзисторов путем расширения диапазонов параметров режима измерения по току и напряжению и с повышением точности.

Значение полученных соискателем результатов исследования **для практики подтверждается тем, что:**

разработаны и внедрены:

- на АО «НПП «Завод «Искра» – модернизированная установка УИТП-1М для измерения теплоэлектрических характеристик и отбраковки дефектных и потенциально ненадежных МБТ по значению напряжения шнурования тока;

- при выполнении проекта «Система мониторинга необслуживаемых телевизионных передатчиков» по Программе УМНИК-2009 и проекта «Диагностика качества мощных СВЧ транзисторов по тепловым характеристикам» по гранту РФФИ №18-47-730024 – неразрушающие способы и устройства измерения теплоэлектрических характеристик;

- неразрушающие способы и устройства измерения напряжения шнурования тока в мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторов проходят апробации в УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН;

определены возможности и условия применения предложенных способов и устройств измерения для диагностики качества мощных ВЧ и СВЧ транзисторов;

создана методическая основа для повышения точности достоверности неразрушающего контроля качества мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторов;

представлены новые экспериментальные результаты измерения напряжения шнурования тока в широком диапазоне температуры.

Оценка достоверности результатов исследования выявила что:

результаты получены с методически правильным применением поверенных измерительных приборов с известными метрологическими характеристиками;

идея базируется на использовании связи крутизны зависимости мало-сигнального коэффициента внутренней обратной связи МБТ от коллекторного напряжения с напряжением шнурования тока;

использованы известные положения теории теплоэлектрической неустойчивости в мощных биполярных транзисторах и теории погрешностей;

установлено соответствие теоретических (модельных) положений с результатами экспериментальных исследований;

использованы современные методы компьютерного моделирования и обработки результатов измерений.

Личный вклад соискателя состоит в его непосредственном участии на всех этапах выполнения исследования, включая разработку и изготовление экспериментальных установок; получение и систематизацию данных, апробацию результатов исследования, подготовку публикаций. Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований проводился при непосредственном участии автора.

На заседании 28.12.2018 диссертационный совет принял решение присудить Куликову А.А. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 6 докторов наук (отдельно по каждой специальности рассматриваемой диссертации), участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 13, против нет, недействительных бюллетеней 1.

Защита окончена. Есть ли замечания по процедуре защиты? (Нет).

Поздравляет соискателя с успешной защитой. Благодарит членов совета и всех участников за внимание.

Заседание объявляется закрытым.

Председатель Совета Д212.277.01,
профессор

Н. Г. Ярушкина

Ученый секретарь Совета Д212.277.01,
профессор

В. И. Смирнов



(Handwritten signatures in blue ink)