

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Куликова Александра Александровича «Неразрушающие методы и средства измерения напряжения шнурования тока в мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторах», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.01 – «Приборы и методы измерения по видам измерения (электрические измерения)»

### 2. Актуальность темы диссертации

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 транзисторов 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 (БТ) 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.

### 1. Структура и объём диссертации

Диссертация выполнена на кафедре «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» Ульяновского государственного технического университета и состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 132 наименований и приложения. Общий объём работы 135 страниц, в том числе 113 страниц основного текста, содержащего 10 таблиц, 64 рисунка и приложение на 21 странице.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** диссертации посвящена анализу теплоэлектрических процессов и токораспределения в мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторах. Автором подробно рассмотрены структуры и конструкции мощных биполярных транзисторов их теплоэлектрические модели. Проанализированы виды и механизмы отказов и область безопасной работы мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторов. Большое внимание уделено методам и средствам контроля температурной границы области безопасной работы биполярных транзисторов. В результате анализа литературных данных показано, что одним их направлений повышения надежности аппаратуры с применением мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторов наряду с совершенствованием топологии транзисторных структур и тех-

нологии производства транзисторов является разработка промышленно ориентированных неразрушающих методов контроля качества и, в частности, методов и средств измерения параметров теплоэлектрической неустойчивости токораспределения. При этом существующие известные модели токораспределения в транзисторах с дефектами не позволяют в полной мере анализировать влияние различного рода дефектов на предельные теплоэлектрические параметры приборов. Результатом первой главы является аргументированная постановка задач диссертационного исследования в направлении повышения 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.

**Вторая глава** диссертации посвящена неразрушающим способам определения напряжения шнурования тока в мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторах. В главе представлены результаты теоретического анализа и расчет токораспределения в структурах мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторов с дефектами различной физической природы и разработанные на основе этой модели способы и устройства для неразрушающего измерения напряжения шнурования тока в биполярных транзисторах. На основе развитой дискретной двухэлементной теплоэлектрической модели биполярного транзистора с дефектами тепловой и электрофизической природы автором показано, что характер и крутизна зависимости малосигнального коэффициента  $h_{12Б}$  в схеме с общей базой от коллекторного напряжения  $U_{КБ}$  определяется типом и размером дефекта. С увеличением размера дефекта увеличивается крутизна зависимости  $h_{12Б}(U_{КБ})$  на ее начальном участке. В главе предложены и рассмотрены новые способы и устройства измерения напряжения шнурования тока в биполярном транзисторе при заданном эмиттерном токе по значениям малосигнального коэффициента  $h_{12Б}$  и по значениям коллекторного напряжения в режимах, не приводящих к деградации прибора. Новизна предложенных способов подтверждается двумя патентами РФ на изобретение.

**Третья глава** посвящена разработке экспериментальной установки для исследования процессов шнурования тока в мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторах. Подробно рассмотрены функционал и конструкции отдельных блоков установки. Проведена проверка предложенных способов определения напряжения шнурования тока в биполярных транзисторах. Разработан алгоритм определения напряжения шнурования тока. Кроме того, проведено исследование процессов шнурования тока в мощных СВЧ биполярных транзисторах. Показано, что предложенные способы и установка их реализующая позволяют определять напряжение шнурования тока с достаточной для производственного контроля точностью и хорошей чувствительностью, при этом исследуемые приборы не подвергаются разрушающим воздействиям.

**Четвертая глава** посвящена исследованию влияния процессов тепловой неустойчивости в мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторах на характеристики транзисторных усилителей. В главе приведены выборочные распределения биполярных транзисторов по тепловым параметрам и результаты исследований влияния теплоэлектрических параметров на характеристики усилительных каскадов различных классов. Автором показано, что абсолютный разброс тепловых

сопротивлений БТ возрастает с увеличением коллекторного напряжения, а напряжения шнурования – с уменьшением коллекторного тока, что объясняется определяющим влиянием технологического разброса распределенных (стабилизирующих) сопротивлений структуры: с ростом тока их стабилизирующее действие возрастает и их технологический разброс проявляется слабее. Также показано, что зависимость уровня второй гармоники от коллекторного напряжения практически повторяет зависимость модуля теплового импеданса, что подтверждает тепловую природу нелинейных искажений в транзисторных усилителях.

В заключении приведены выводы по работе.

### **3. Научно-технический уровень и научная ценность диссертации**

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  $U_{КБ}$  определяется типом и размером дефекта; при этом, чем больше дефект, тем больше крутизна зависимости  $h_{12Б}(U_{КБ})$  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 температуры тур 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.

### **4. Практическая ценность работы**

Одним из наиболее важных практических результатов работы является создание нового аппаратно-программного комплекса, для измерения напряжения шнурования тока в мощных биполярных ВЧ и СВЧ-транзисторах, который может быть использованы для технологического и выходного контроля качества продукции на предприятиях-производителях БТ, а также на входном контроле предприятий-производителей РЭА с использованием БТ.

### **5. Достоверность результатов работы.**

Достоверность представленных в работе результатов подтверждается правильным применением методов физики полупроводниковых приборов, теории сигналов и цепей, оценки погрешностей, теории вероятности и математической статистики, а также методов математического моделирования с применением ЭВМ, совпадением результатов измерений с аналитическими и численными рас-

четами, повторяемостью результатов при повторных измерениях, практической реализацией разработанных способов и средств.

## 6. Оформление материалов диссертации

Диссертация написана квалифицированно, литературно-техническим языком, снабжена достаточным количеством иллюстративного материала.

## 7. Замечания по диссертации

1. Не ясно почему для малосигнального статического коэффициент передачи тока со входа на выход  $h_{12Б}$  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 то-

го при оформлении диссертации не соблюдены требования ВАК (ГОСТ Р 7.0.11-2011), 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 не понятные фразы, например, стр. 11 «Предельная рабочая частота МБТ ограничивается временем  $\tau_{эк}$  переноса носителей заряда через пространство взаимодействия»

## 8. Заключение

Несмотря на отмеченные недостатки, диссертация Куликова А. А. является законченной научно-исследовательской работой и может быть квалифицирована как совокупность научно обоснованных технических и технологических решений, внедрение которых вносит вклад в развитие научно-технического прогресса в области приборостроения.

Работа выполнена на достаточно высоком научно-техническом уровне. Степень апробации работы путем опубликования основных положений в печати (30 публикаций) и путем использования полученных методик, моделей, алгоритмов и программ в Ульяновском филиале Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Как следует из вышеизложенного, представленная работа Куликова А.А. по актуальности, научно-техническому уровню и практическому значению выполненных исследований, технических и технологических разработок отвечает требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор Куликова А.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.01 «Приборы и методы измерения по видам измерений (электрические измерения)».

Официальный оппонент

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

Подпись Новикова С.Г. заверяю,

Проректор по НРИТ УлГУ

Сведения об оппоненте:

Новиков Сергей Геннадьевич  
к.т.н., спец. 05.27.01, начальник Лаборатории твердотельной электроники Научно-исследовательского технологического института им. С.П. Капицы Ульяновского государственного университета  
432017 г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, 42, тел. (8422) 67-50-54  
e-mail: [novikovsg@ulsu.ru](mailto:novikovsg@ulsu.ru), web-сайт: [www.ulsu.ru](http://www.ulsu.ru).



Новиков Сергей  
Геннадьевич

12.12.2018г.

В.Н. Голованов

