



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», д.т.н., профессор
И.Г. Дроздов
« 13 » 11 2018 г.

ОТЗЫВ

на диссертацию Куликова Александра Александровича
«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 (электрические измерения)

1. Актуальность темы диссертации

Мощные биполярные и гетеробиполярные ВЧ и СВЧ транзисторы (МБТ) широко применяются в современной аппаратуре связи и инфокоммуникаций различного применения и работают, как правило, в жестких электрических режимах, близких к предельным. Предельные характеристики и надежность работы МБТ в этих режимах во многом определяются эффектами неоднородного и неустойчивого распределения плотности тока и температуры в приборных структурах. При этом различные дефекты структуры и конструкции прибора приводят к снижению устойчивости МБТ к шнурованию тока, и одним из наиболее информативных параметров дефектности МБТ является напряжение шнурования тока. Однако существующие методы измерения напряжения шнурования тока в МБТ имеют ограниченную чувствительность и разрушающий характер, поскольку позволяют регистрировать факт локализации тока в приборной структуре только при образовании горячего пятна.

В этой связи тема диссертации Куликова А.А., посвященная разработке неразрушающих методов и средств измерения напряжения шнурования тока в структурах МБТ, является актуальной как отвечающая потребностям развития диагностического приборостроения в электронной промышленности.

2. Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 132 наименований, 9 приложений. Общий объем диссертации составляет 135 страниц, включая 10 таблиц и 64 рисунков.

В первой главе рассматриваются особенности конструкции и условий работы, а также факторы, ограничивающие область безопасной работы МБТ и приводящие к их отказам. Показано, что одной из наиболее распространенных и опасных причин отказов является неустойчивость токораспределения в

транзисторной структуре, обусловленное действием положительной тепловой обратной связи. Представлен обзор методов и средств измерения напряжения шнурования тока в МБТ, выявлены их недостатки, главным из которых является их разрушающий характер.

Во второй главе представлены результаты компьютерного и аналитического моделирования неизотермического токораспределения в симметричной структуре МБТ с дефектами теплофизического и электрофизического вида. Показано, что крутизна зависимости коэффициента внутренней обратной связи по напряжению МБТ в схеме с общей базой от коллекторного напряжения определяется видом и величиной дефекта. Описаны оригинальные способы и устройства определения напряжения шнурования тока в МБТ по значениям коэффициента внутренней обратной связи по напряжению при различном коллекторном напряжении без введения контролируемого МБТ в режим «горячего пятна»

В третьей главе описана модернизированная экспериментальная установка УИТЭП-1М, реализующая разработанные способы измерения напряжения шнурования тока в МБТ. Приведены результаты измерения напряжения шнурования тока в МБТ различных типов в зависимости от тока эмиттера и температуры корпуса транзистора. Сравнение результатов измерения напряжения шнурования тока в МБТ разработанным способом и с помощью ИК микроскопа показало хорошее совпадение.

В четвертой главе показано, что характер изменения второй гармоники транзисторного усилительного каскада класса А с ростом частоты практически повторяет характер изменения модуля теплового импеданса транзисторов, что подтверждает тепловой характер нелинейных искажений в транзисторных усилителях мощности на низких частотах. Получены выражения для коэффициента гармоник в транзисторных усилительных каскадах различных классов с симметричным включением транзисторов, обусловленные различием тепловых сопротивлений транзисторов.

В приложениях приведены результаты измерения напряжения локализации на выборках МБТ различных типов, спецификации экспериментальной установки, результаты измерения теплового импеданса МБТ в диодном включении, а также акты использования результатов диссертационной работы.

Таким образом, материал диссертации изложен в логической последовательности, а ее структура соответствует современным требованиям к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук.

3. Оценка научной новизны исследований и результатов

Новые положения, связанные с исследованием неразрушающих методов и средств измерения напряжения шнурования тока в мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторах, заключаются в следующем:

1. На основе развитой дискретной двухэлементной теплоэлектрической модели МБТ с дефектами тепловой и электрофизической природы показано, что характер и крутизна зависимости малосигнального коэффициента h_{21B} 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 $h_{21Б}(U_{КБ})$ на ее начальном участке.

2. Разработаны новый способ и устройство измерения напряжения шнурования тока в МБТ при заданном эмиттерном токе по значениям малосигнального коэффициента $h_{21Б}$ внутренней обратной связи, измеренным при трех значениях коллекторного напряжения до образования «горячего пятна» в приборной структуре.

3. Разработаны 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 $\bar{U}_{ЭБ}(U_K)$ ее начального уровня до образования «горячего пятна» в приборной структуре.

4. Впервые получены экспериментальные зависимости напряжения шнурования тока МБТ нескольких типов 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 МБТ в указанном диапазоне температур.

5. Показано, что эффекты неоднородного и неустойчивого токораспределения в структурах МБТ приводят к резкому увеличению нелинейности (амплитуды второй гармоники) транзисторных усилителей мощности класса А при приближении рабочей точки к границе ОБР.

По каждому из отмеченных положений соискателем проведены исследования с применением теоретических методов и методов компьютерного моделирования, экспериментальных исследований с применением современного исследовательского оборудования.

Результаты проведенных исследований легли в основу разработки модернизированной экспериментальной установки УИТЭП-1М для исследования теплоэлектрических характеристик МБТ.

Из сказанного следует, что диссертация Куликова А.А. отвечает требованиям, относящихся к новизне исследований и научных результатов.

4. Теоретическая и практическая значимость.

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 УИТЭП-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 МБТ проходят экспериментальную апробацию в Ульяновском филиале ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, что подтверждается актами об использовании результатов работы.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации А.А. Куликова подтверждается выделением гранта РФФИ №18-7321686 на реализацию проекта «Диагностика качества мощных СВЧ транзисторов по тепловым характеристикам».

5. Оценка обоснованности и достоверности научных положений, выводов и заключений

Достоверность полученных результатов подтверждается повторяемостью результатов при многократных измерениях, совпадением результатов измерений с теоретическими расчетами и результатами моделирования, практической реализацией разработанных способов и измерительных устройств. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ряде представительных научно-технических конференций.

Степень апробации основных положений работы путем опубликования в печати, докладов на научно-технических конференциях различного уровня и использования в производстве достаточна.

Основные положения диссертации отражены в 30 научных работах, в том числе в 6 статьях в изданиях по Перечню ВАК (в т. ч. в 2-х работах в изданиях индексируемых в WoS и Scopus), в 2 патентах РФ на изобретения. В отношении публикаций работа соответствует положению ВАК.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

6. Рекомендации по использованию результатов работы.

Результаты диссертации могут быть рекомендованы к использованию в научно исследовательских организациях (Институт полупроводниковой СВЧ электроники Российской академии наук (г. Москва), ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (г. Москва), НИИ Радио (г. Москва) АО НПП «Пульсар» (г. Москва), НИИ полупроводниковых приборов (г. Томск), а также на предприятиях радиоэлектронной промышленности.

7. Замечания по работе

К недостаткам рецензируемой работы можно отнести следующее:

1) В работе не показано, как связаны дефекты металлизации структуры МБТ с рассмотренными видами дефектов.

2) Автор не приводит расчетов зависимости погрешности измерения напряжения шнурования тока в МБТ предложенными способами от частоты переменной составляющей коллекторного напряжения.

3) Приведенные в работе немонотонные температурные зависимости напряжения шнурования тока МБТ объясняются лишь на качественном уровне, количественных оценок диапазона изменения напряжения шнурования тока в исследованном интервале температур в работе не приводится.

4) В четвертой главе рассмотрены характеристики НЧ транзисторных усилителей, тогда как объектом исследования являются ВЧ и СВЧ транзисторы.

5) В работе имеются грамматические и стилистические ошибки и неточности: обозначения в формуле (23) автореферата не расшифрованы, список литературы оформлен с отступлениями от ГОСТа, нет ссылки на литературу, откуда взяты формулы.

В целом отмеченные недостатки не снижают научную и практическую ценность диссертации Куликова А.А.

8. Заключительная оценка диссертации

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.

Диссертация Куликова А.А. 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), а сам Куликов Александр Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук.

Отзыв обсужден на заседании кафедры полупроводниковой электроники и наноэлектроники Воронежского государственного технического университета 13 ноября 2018 г. (протокол № 13-46-02/5).

Заведующий кафедрой ППЭНЭ,
д.ф.-м.н., профессор



Станислав Иванович
Рембеза

Проректор по научной
работе
ФГБОУ ВО «ВГТУ»



Игорь Геннадьевич
Дроздов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет»,
394026, г. Воронеж, Московский проспект, 179. тел 8(4732) 43-76-95,
rembeza@yandex.ru