

На правах рукописи



Куликов Александр Александрович

**НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА
ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ШНУРОВАНИЯ ТОКА
В МОЩНЫХ БИПОЛЯРНЫХ ВЧ И СВЧ ТРАНЗИСТОРАХ**

Специальность: 05.11.01 – Приборы и методы измерения по видам
измерения (электрические измерения)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2018

Работа выполнена на базовой кафедре «Радиотехника, опто- и наноэлектроника»
Ульяновского государственного технического университета

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Сергеев Вячеслав Андреевич

Официальные оппоненты: **Мещеряков Сергей Александрович**, доктор технических наук, начальник лаборатории ФАУ «Государственный научно-исследовательский испытательный институт проблем технической защиты информации Федеральной службы технического и экспортного контроля» (г. Воронеж)

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

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Защита состоится «28» декабря 2018 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.277.01 при Ульяновском государственном техническом университете по адресу: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32 (ауд. 211, Главный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ульяновского государственного технического университета. Также диссертация и автореферат размещены в Internet на сайте УлГТУ - <http://www.ulstu.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Смирнов Виталий Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Мощные биполярные и гетеробиполярные ВЧ и СВЧ транзисторы (МБТ) до настоящего времени наряду с мощными полевыми транзисторами широко используются в современных устройствах связи и инфокоммуникаций различного применения. МБТ относятся к классу наименее надежных полупроводниковых приборов, поскольку работают, как правило, в жестких электрических режимах, близких к предельным, при большом уровне рассеиваемой мощности. Предельные характеристики и надежность работы МБТ в этих режимах во многом определяются эффектами неоднородного и неустойчивого распределения плотности тока, мощности и температуры в приборных структурах.

Хорошо известно, что в результате действия положительной тепловой обратной связи электрический ток в структуре МБТ стягивается в узкий шнур и в кристалле МБТ образуется «горячее пятно» (ГП). Образование в структуре МБТ «горячего пятна» заканчивается, зачастую, тепловым пробоем и катастрофическим отказом прибора. Даже при отсутствии необратимых разрушений сильный перегрев локальной области структуры сопровождается большими термодформациями, ростом числа дислокаций и микротрещин в полупроводнике, и ускорением деградации МБТ. Значения коллекторного тока и напряжения, соответствующих началу процесса локализации тока в МБТ, определяет одну из границ области безопасной работы (ОБР) транзистора. Выход режимов работы МБТ за пределы этой границы даже на короткое время крайне не желателен. Определение этой границы ОБР представляет важную и довольно сложную задачу.

Модели тепловой неустойчивости в структурах МБТ развиты в работах В.Л. Аронова, Б.С. Кернера, В.Ф. Синкевича, Б.К. Петрова, D'Alessandro, D. Navon, D.L. Blackburn, F.F. Oettinger. В большинстве работ рассматриваются модели бездефектных МБТ. Вместе с тем известно, что различные дефекты структуры и конструкции прибора приводят к снижению устойчивости МБТ к шнурованию тока и информативным параметром дефектности МБТ является напряжение шнурования тока.

Методы измерения тепловой границы ОБР МБТ развиты в работах Я.А. Федотова, В.Ф. Синкевича, В.М. Бойздренко, Н.А. Рабодзея, В.А. Гусева, В.А. Сергеева и др. Существующие методы имеют ограниченную чувствительность и позволяют регистрировать информативные сигналы, свидетельствующие о локализации тока в приборной структуре, только при образовании ГП. В результате, МБТ попадают в запредельные электрические режимы, что приводит к появлению дефектов в приборных структурах и ограничивает ресурс приборов. В связи с этим актуальной задачей является разработка неразрушающих методов и средств измерения напряжения шнурования тока в структурах МБТ.

Цель и задачи исследования – 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.

Методы исследований. При выполнении диссертационного исследования использовались методы физики полупроводниковых приборов, теории сигналов и цепей, оценки погрешностей, теории вероятности и математической статистики, а также методы математического моделирования с применением ЭВМ.

Научная новизна

1. На основе развитой дискретной двухэлементной теплоэлектрической модели МБТ с дефектами тепловой и электрофизической природы показано, что характер и крутизна зависимости малосигнального коэффициента $h_{21Б}$ 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 $\tilde{U}_{ЭБ}(U_{К})$ 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.

Практическая ценность и реализация результатов работы

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 проекта «Диагностика качества мощных СВЧ транзисторов по тепловым характеристикам» по гранту РФФИ №18-7321686.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» – ИНТЕРМАТИК (г. Москва, 2014–2017 гг.); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» – РАДИОИНФОКОМ (г. Москва, 2017 г.), Всероссийской молодежной НТК «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (г. Саратов, 2012 г., 2015г.), Всероссийской молодежной научной школе-семинаре «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники» (Ульяновск, 2012–2017 гг.); Всероссийской НТК «Современные проблемы проектирования и эксплуатации радиотехнических систем» (Ульяновск, 2016 г.).

На защиту выносятся:

1. Двухэлементная теплоэлектрическая модель токораспределения в структурах мощных ВЧ и СВЧ биполярных транзисторов с дефектами различной физической природы и формулы для расчета напряжения шнурования тока МБТ по зависимости малосигнального коэффициента $h_{21Б}$ 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 способами, указанными в п.2 и п.3.

5. Зависимости напряжения шнурования тока МБТ от температуры в диапазоне до –60 °С до 90 °С, имеющие немонотонный характер и позволяющие оценить изменение границы ОБР в рабочем диапазоне температур.

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

Публикации. По теме диссертации опубликовано 30 научных работ, включая 6 статей в изданиях из Перечня ВАК (в том числе 2 статьи в журналах, индексируемых в Scopus) и 2 патента РФ на изобретения.

Личный вклад автора. Основные научные результаты получены автором лично и в соавторстве с научным руководителем. Реализация ряда прикладных разработок и экспериментов осуществлялась с участием сотрудников и студентов кафедр «Радиотехника» и «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» УлГТУ. Внедрение результатов исследований проводилось при личном участии автора.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 132 наименования, 9 приложений. Общий объем диссертации составляет 135 страниц и содержит 10 таблиц и 64 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе рассмотрены особенности топологии, конструкции и условий эксплуатации мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторов, методы и средства контроля параметров их предельных режимов работы, показаны недостатки методов и средств измерения напряжения шнурования тока, сформулированы задачи исследования.

Основными регулярными причинами локализации тока в структуре МБТ являются отеснение тока к периферии эмиттера из-за падения напряжения на сопротивлении базы и неоднородность тока, обусловленная падением напряжения на сопротивлении дорожек металлизации эмиттера и базы. К случайным факторам, снижающим устойчивость МБТ к локализации тока, относятся разброс сопротивлений омических контактов эмиттера и базы, локальные отклонения величины теплового сопротивления переход–корпус из-за дефектов напайки кристалла, дефекты в области $p-n$ -переходов (дислокации, скопление примесей и т.д.), неоднородность удельного сопротивления и толщины полупроводниковых слоев и др.

В известном способе по авторскому свидетельству №983596 СССР напряжение $U_{\text{кл}}$ шнурования тока в МБТ определяется по скачку или излому на зависимости $U_{\text{ЭБ}}(t)$ при постоянном эмиттерном токе и линейно нарастающем напряжении $U_{\text{к}}$ на коллекторном переходе. Серьезный недостаток данного способа – разрушающее воздействие, которому подвергается контролируемый МБТ, попадая в режим «горячего пятна».

В работах Гусева В.А. в качестве критерия наступления локализации тока 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, и тем самым исключить катастрофические отказы испытуемых транзисторов. Однако наличие тока канала даже в несколько миллиампер есть результат разогрева области локализации до температуры собственной проводимости (для кремниевых приборов $\sim 250^\circ\text{C}$), следовательно, сопровождается циклическими термомеханическими напряжениями.

Во второй главе диссертации представлен аналитическая модель и компьютерный расчет токораспределения в симметричных структурах МБТ с дефектами различной физической природы и разработанные на основе этой модели способы и устройства для неразрушающего измерения напряжения шнурования тока в МБТ.

Теплоэлектрическая модель МБТ с симметричной геометрией активной области представляется в виде двух параллельно соединенных транзисторов (рис.1, а).

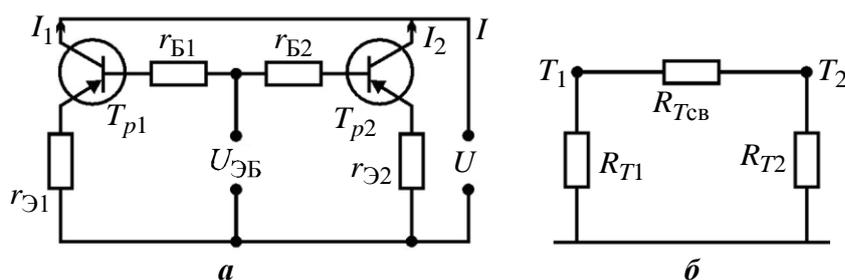


Рис.1. Электрическая (а) и тепловая (б) модель МБТ с симметричной структурой

Мощность, рассеиваемая i -м транзистором в активном режиме, определяется выражением $P_i = U_K I_i$, где коллекторное напряжение U_K полагается одинаковым для обоих транзисторов, а токи $I_{1,2}$ через транзисторы являются функциями температуры:

$$I_i = (S_0 A_i / 2) \exp \left[- \left(E_g - e U_{ЭБ} + e r_{ni} I_i \right) / k T_{ni} \right], \quad (1)$$

где S_0 – полная площадь структуры; A_i – слабо зависящие от температуры инжекционные параметры; $U_{ЭБ}$ – напряжение между эмиттером и базой БТ; $r_{ni} = r_{Эi} + r_{Би} / B_{cti}$ – входное сопротивление i -го транзистора в схеме с общей базой (ОБ); E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника; k – постоянная Больцмана; e – заряд электрона; B_{cti} – коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером (ОЭ).

Температуры переходов T_{ni} при заданной температуре корпуса T_K определяются тепловыми сопротивлениями частей структуры (рис. 1, б):

$$\Delta T_{ni} \equiv T_{ni} - T_K = P_i R_{Ti} - (-1)^i R_{Ti} (R_{T2} P_2 - R_{T1} P_1) / (R_{T1} + R_{T2} + R_{Tсв}). \quad (2)$$

Дефектность МБТ можно свести к различию входных сопротивлений r_{ni} , тепловых сопротивлений R_{Ti} и инжекционных параметров A_i . Причиной различия входных сопротивлений может быть технологический разброс последовательных ограничительных сопротивлений в цепи эмиттера или степени легирования активной и пассивной базы. Различие тепловых сопротивлений определяется наличием дефектов (непропаев или посторонних включений) в контактном слое между кристаллом и кристаллодержателем. Для определенности бездефектным будем считать второй транзистор и обозначим $R_{T2} = R_{T0}$; $\Delta R_T = R_{T1} - R_{T0}$ и $r_{n2} = r_{n0}$; $\Delta r_n = r_{n1} - r_{n0}$.

При заданном полном токе $I_1 + I_2 = I_0 = \text{const}$ токи I_1 и I_2 можно выразить через их отклонение $\delta = (I_1 - I_2) / I_0$ от среднего значения: $I_1 = I_0(1 + \delta) / 2$; $I_2 = I_0(1 - \delta) / 2$. В случае малых дефектов выражения (2) в линейном приближении преобразуются к виду

$$\Delta T_{n1,2} = \Delta \bar{T} \pm \Delta \tilde{T}, \quad (3)$$

где $\Delta \bar{T} = \Delta T_0(1 + \eta)$ – приращение средней температуры структуры; $\Delta \tilde{T} = \Delta T_0(1 - 2a)(\delta + \eta)$ – отклонение температуры частей структуры от средней; $\Delta T_0 = R_{T0} U_K I_0 / 2$, $\eta = \Delta R_T / 2 R_{T0}$, параметр $a = R_{T0} / (R_{T1} + R_{T2} + R_{Tсв})$ определяет степень тепловой связи между частями структуры: при слабой связи $R_{Tсв} \rightarrow \infty$ и $a \rightarrow 0$.

Поскольку $\Delta \tilde{T} \ll T_K$, то выражения для токов (1) можно записать в виде

$$I_1 \equiv \frac{I_0}{2} (1 + \delta) \approx (S_0 A_1 / 2) \exp \left[- \varepsilon - \nu_{n0} \delta - \Delta \nu_n + \varepsilon (\Delta \tilde{T} / T_K) \right]; \quad (4a)$$

$$I_2 \equiv \frac{I_0}{2} (1 - \delta) \approx (S_0 A_2 / 2) \exp \left[- \varepsilon + \nu_{n0} \delta - \varepsilon (\Delta \tilde{T} / T_K) \right], \quad (4б)$$

где $\varepsilon = \nu_{n0} + [(E_g / e) - U_{ЭБ}] / \varphi_{\bar{T}}$; $\varphi_{\bar{T}} = k \bar{T}_n / e$ – тепловой потенциал при средней температуре структуры $\bar{T}_n = T_K + \Delta \bar{T}$; k – постоянная Больцмана; $\nu_{n0} = r_{n0} I_0 / 2 \varphi_{\bar{T}}$; $\Delta \nu_n = \Delta r_n I_0 / 2 \varphi_{\bar{T}}$. Разделив (4a) на (4б), получим уравнение, связывающее величину разбаланса токов с параметрами структуры и дефектов:

$$\frac{(1 + \delta)}{(1 - \delta)} = \frac{A_1}{A_2} \exp \left[\varepsilon (\Delta \tilde{T} / T_K) - 2 \nu_{n0} \delta - \Delta \nu_n \right]. \quad (5)$$

Логарифмируя обе части (5) и ограничиваясь линейным приближением, получим

$$\delta = \frac{\varepsilon I_0 U_K (1-2a)(\Delta R_T/2) - \Delta v_n + \ln(A_1/A_2)}{2[1 - \varepsilon U_K I_0 (R_{T0}/2)(1-2a) + v_{n0}]} \quad (6)$$

Из (6) следует, что относительная величина разбаланса токов прямо пропорциональна величине дефекта и растет с увеличением коллекторного напряжения U_K .

Расчетные зависимости разности токов от коллекторного напряжения, полученные в программе Workbench, дополненной блоком расчета температуры переходов частей структуры, для двух указанных выше типов дефектов, представлены на рис. 2.

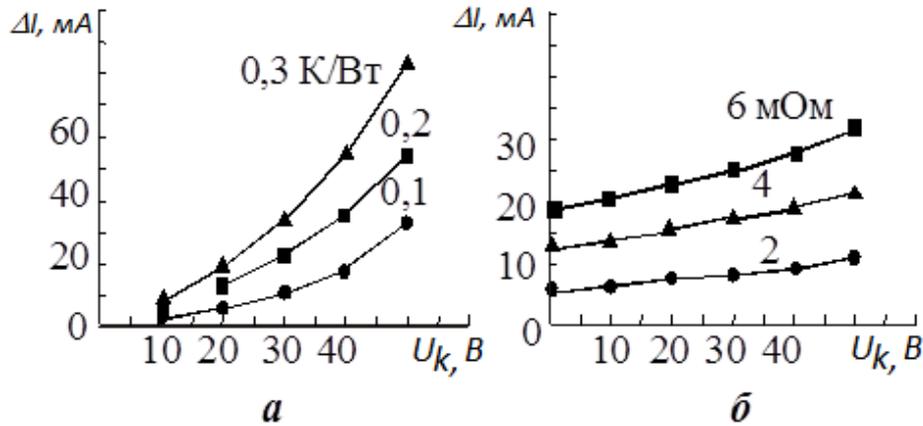


Рис. 2. Зависимость от U_K разности токов через симметричные части структуры с дефектами: а – разность тепловых сопротивлений ΔR_T ; б – разность сопротивлений эмиттера $\Delta r_э$

При этом крутизна этих зависимостей практически линейно растет с ростом величины дефектов (рис. 3).

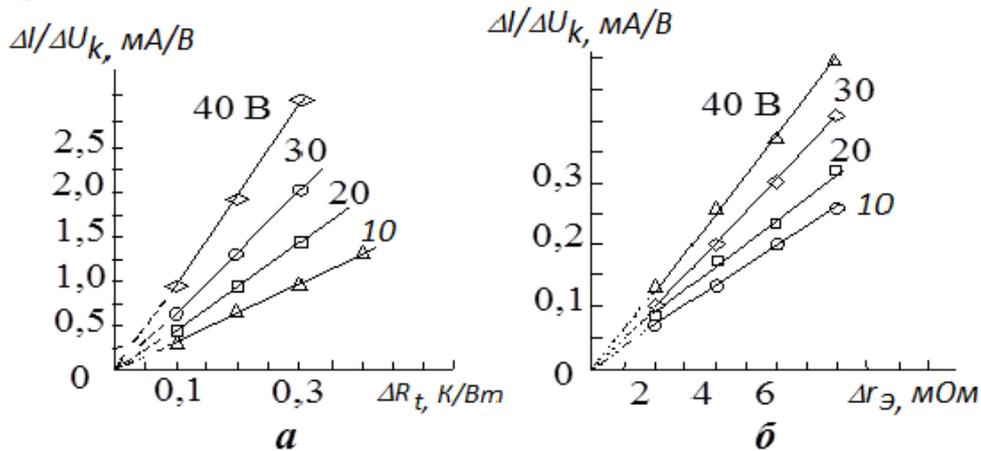


Рис. 3. Зависимость крутизны характеристик $\Delta I(U_K)$ от величины дефекта при заданном U_K : а – разность тепловых сопротивлений ΔR_T ; б – разность сопротивлений эмиттера $\Delta r_э$

В расчетах использованы электрические параметры, соответствующие паспортным данным кремниевых ВЧ транзисторов типа КТ803А: $B_{ст} = 20$, $r_{Б1} = r_{Б2} = 1,0$ Ом, $r_{Э0} = 0,1$ Ом, $R_{T0} = 1,0$ К/Вт, $I_0 = 1,0$ А, $U_{ЭБ} = 0,7$ В, $T_K = 300$ К и $R_{Тсв} = \infty$.

Выражение для относительного разбаланса токов $\delta = (I_1 - I_2)/I_0$, обусловленного наличием дефектов и тепловой обратной связью, можно представить в виде:

$$\delta = \frac{(1 + v_{n0})(U_K/U_{КЛ})(\Delta R_T/R_{T0}) - \Delta v_n + \ln(A_1/A_2)}{2(1 + v_{n0})[1 - (U_K/U_{КЛ})]} \quad (7)$$

где $U_{КЛ} = 2T_K(1 + v_{n0})/\varepsilon I_0 R_{T0}(1 - 2a)$ – такое коллекторное напряжение, при котором весь ток локализуется в дефектной части структуры.

Перераспределение тока в структуре при изменении коллекторного напряжения имеет тепловую природу и проявляется в изменении напряжения $U_{ЭБ}$, которое одинаково для обеих частей транзисторной структуры:

$$U_{ЭБ} = (E_g/e) - \varphi_{T_k} \left\{ (1 + \Delta T_{n1}/T_k) \ln[2S_0 A_1 (1 + \delta)/I_0] + (v_{n1})(1 + \delta) \right\}, \quad (8)$$

где $\varphi_{T_k} = (kT_k/e)$ – тепловой потенциал при температуре корпуса T_k , а $v_{n1} = v_{n0} + \Delta v_n$.

Дифференцируя (8) по U_k в наиболее опасном случае отсутствия тепловой связи между частями структуры ($a \rightarrow 0$) для тепловой составляющей коэффициента внутренней обратной связи по напряжению получим

$$h_{12Б}^T = h_{12Б2}^T \left[1 + 2\eta + \delta + (U_k - U_r) \frac{d\delta}{dU_k} \right], \quad (9)$$

где $h_{12Б0}^T = -\varphi_{T_k} \left(\ln \frac{2S_0 A_0}{I_0} \right) \frac{R_{T0} I_0}{2T_k}$ – тепловая составляющая коэффициента внутренней обратной связи по напряжению в бездефектной структуре, т.е. при $\eta = 0$, $\delta = 0$, а через U_r обозначена величина $v_{n1} \varphi_{T_k} / h_{12Б2}^T$.

Для анализа зависимостей $h_{12Б}^T$ от коллекторного напряжения в приборах с дефектами запишем выражение для производной $d\delta/dU_k$ из (7) в общем виде:

$$\frac{d\delta}{dU_k} = \frac{(1 + v_{n0})(\Delta R_T/R_{T0}) - \Delta v_n + \ln(A_1/A_2)}{2(1 + v_{n0})[1 - (U_k/U_{кЛ})]^2 U_{кЛ}}. \quad (10)$$

Анализ (9) проведем для наиболее важных частных случаев.

Случай 1. Транзистор с теплофизическим дефектом; $A_1 = A_2$ и $\Delta r_n = 0$, $\Delta R_T > 0$. Подставляя в (9) выражения (7) и (10) для δ и $d\delta/dU_k$ соответственно, получим:

$$h_{12Б}^T = h_{12Б2}^T \cdot \left[1 + \left(1 + \frac{1 - (U_r/U_{кЛ})}{[1 - (U_k/U_{кЛ})]^2} \right) \eta \right], \quad (11)$$

откуда следует, что $h_{12Б}^T$ суперлинейно растет с увеличением U_k .

Случай 2. Транзистор с электрофизическим дефектом, обусловленным различием входных сопротивлений $A_1 = A_2$ и $\Delta R_T = 0$, $\Delta r_n > 0$. В этом случае после подстановки в (9) выражений для δ и $d\delta/dU_k$ получим:

$$h_{12Б}^T = h_{12Б2}^T \cdot \left[1 + \left(\frac{1 - (U_r/U_{кЛ})}{[1 - (U_k/U_{кЛ})]^2} \right) \frac{|\Delta v_n|}{2(1 + v_{n0})} \right]. \quad (12)$$

Характер зависимости $h_{12Б}^T(U_k)$ в этом случае подобен характеру зависимости при теплофизическом дефекте, но из-за отсутствия 1 в круглых скобках (12) суперлинейный характер зависимости $h_{12Б}^T(U_k)$ будет наблюдаться при меньших U_k .

Расчетные зависимости $h_{12Б}^T(U_k)$ для рассмотренных дефектов приведены на рис. 4.

Для более точной оценки напряжения шнурования тока при приближении коллекторного напряжения к $U_{кЛ}$ необходимо учитывать нелинейные члены в зависимостях (4).

Крутизна зависимости $h_{12Б}^T(U_k)$ определяется типом и величиной дефектов в структуре и конструкции прибора и является информативной характеристикой.

На основе рассмотренной выше модели разработаны способы и устройства измерения напряжения шнурования тока в МБТ по крутизне зависимости $h_{12Б}^T(U_k)$. Из-

мерение $h_{12Б}^T(U_K)$ сводится к измерению амплитуды $\tilde{U}_{ЭБ}$ переменной составляющей напряжения на эмиттере МБТ при наложении на коллекторное напряжение низкочастотной гармонической составляющей амплитудой 1 В.

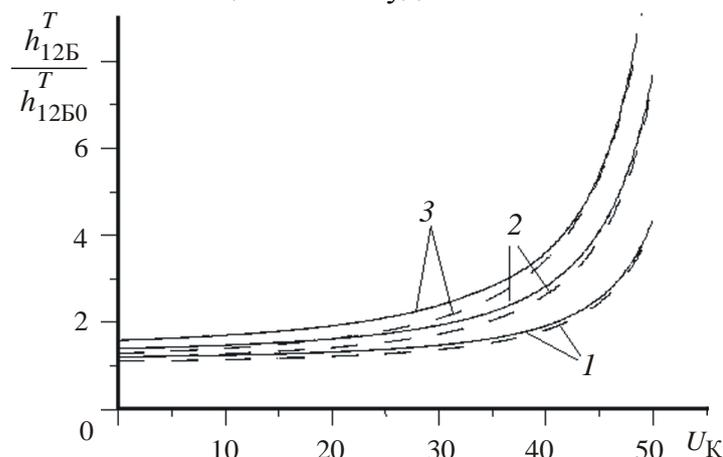


Рис. 4. Расчетные зависимости $h_{12Б}^T(U_K)$ транзистора с теплофизическим (сплошные линии) и электрофизическим (штриховые линии) дефектами при $U_{КЛ} = 60$ В, $(U_r/U_{КЛ}) = 0,2$ и различных размерах дефектов: 1 – $\frac{|\Delta v_n|}{2(1+v_{n0})} = \eta = 0,1$; 2 – $\frac{|\Delta v_n|}{2(1+v_{n0})} = \eta = 0,2$; 3 – $\frac{|\Delta v_n|}{2(1+v_{n0})} = \eta = 0,3$

В способе измерения $U_{КЛ}$ по патенту №2537519 РФ контролируемый МБТ включается по схеме с общей базой, задается постоянный эмиттерный ток, на коллектор подается сумма линейно нарастающего напряжения, не превышающего предельно допустимого значения $U_{Кmax}$ для данного типа МБТ при заданном токе, и низкочастотного синусоидального напряжения амплитуды 1 В, измеряется амплитуда $\tilde{U}_{ЭБ}$ переменной составляющей напряжения на эмиттере при трех значениях коллекторного напряжения $U_{К1}, U_{К2}, U_{К3}$.

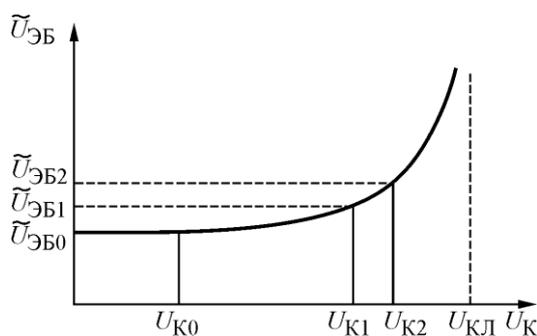


Рис. 5. Качественный вид зависимости $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$ МБТ с локализацией тока в транзисторной структуре

При дефекте электрофизической природы зависимость переменной составляющей напряжения $\tilde{U}_{ЭБ}$ от коллекторного напряжения U_K можно

$$\tilde{U}_{ЭБ}(U_K) = \tilde{U}_{ЭБ}(0) \left[1 + \frac{b}{(1 - U_K/U_{КЛ})^2} \right], \quad (13)$$

где $\tilde{U}_{\text{ЭБ}}(0)$ – амплитуда переменного напряжения на эмиттерном переходе при коллекторном напряжении $U_{\text{К}}$, близком к нулю; b – параметр, зависящий от величины дефекта в структуре транзистора, как правило, $b \ll 1$.

В качестве $\tilde{U}_{\text{ЭБ}}(0)$ принимается значение $\tilde{U}_{\text{ЭБ}}$ при $U_{\text{К}0} \ll U_{\text{КЛ}}$ на «плоском» участке характеристики $\tilde{U}_{\text{ЭБ}}(U_{\text{К}})$, например при $U_{\text{К}0} = 5$ В. По значениям переменной составляющей напряжения на эмиттерном переходе $\tilde{U}_{\text{ЭБ}}(U_{\text{К}1})$ и $\tilde{U}_{\text{ЭБ}}(U_{\text{К}2})$ при двух коллекторных напряжениях $U_{\text{К}1}$ и $U_{\text{К}2}$ ($U_{\text{К}1} < U_{\text{К}2}$) вычисляются параметра: $a1 = \tilde{U}_{\text{ЭБ}}(U_{\text{К}1})/\tilde{U}_{\text{ЭБ}}(5 \text{ В})$ и $a2 = \tilde{U}_{\text{ЭБ}}(U_{\text{К}2})/\tilde{U}_{\text{ЭБ}}(5 \text{ В})$, и значение $U_{\text{КЛ}}$ рассчитывается по формуле:

$$U_{\text{КЛ}} = \frac{U_{\text{К}2} - mU_{\text{К}1}}{1 - m}, \quad (14)$$

где $m = \sqrt{(a1 - 1)/(a2 - 1)}$.

Относительная погрешность $\delta_{U_{\text{КЛ}}}$ значения $U_{\text{КЛ}}$, вычисленного по формуле (14), зависит от погрешности δ_a определения параметров $a1$ и $a2$, а также от того, насколько сильно эти параметры $a1$ и $a2$ отличаются от 1:

$$\delta_{U_{\text{КЛ}}} \approx \frac{\delta_a}{2} \sqrt{\left(\frac{a1}{a1 - 1}\right)^2 + \left(\frac{a2}{a2 - 1}\right)^2}. \quad (15)$$

При использовании современных вольтметров несложно обеспечить относительную погрешность $\delta_{\tilde{U}_{\text{ЭБ}}}$ измерения $\tilde{U}_{\text{ЭБ}}$ в пределах 0,5%, и относительная погрешность δ_a измерения параметров $a1$ и $a2$ не будет превышать 0,7 %, а суммарная методическая погрешность измерения $U_{\text{КЛ}}$ даже изменении амплитуды $\tilde{U}_{\text{ЭБ}}$ всего на 10–15 % во всем диапазоне изменения коллекторного напряжения не будет превышать 10%.

В случае дефекта теплофизической природы зависимость переменной составляющей напряжения $\tilde{U}_{\text{ЭБ}}$ от коллекторного напряжения $U_{\text{К}}$ описывается формулой:

$$\tilde{U}_{\text{ЭБ}}(U_{\text{К}}) = \tilde{U}_{\text{ЭБ}}(0) \cdot \left[c + \frac{d}{[1 - (U_{\text{К}}/U_{\text{КЛ}})]^2} \right], \quad (16)$$

где $c = 1 + \eta$; $d = [1 - (U_r/U_{\text{КЛ}})]\eta$.

Для нахождения трех неизвестных c , d и $U_{\text{КЛ}}$ по результатам измерений $\tilde{U}_{\text{ЭБ}}$ при трех значениях коллекторного напряжения составим систему из трех уравнений:

$$g_i = c + \frac{d}{[1 - (U_{\text{К}i}/U_{\text{КЛ}})]^2}; \quad (17)$$

где $g_i = \tilde{U}_{\text{ЭБ}}(U_{\text{К}i})/\tilde{U}_{\text{ЭБ}}(0)$.

Данную систему в общем случае можно решить численным методом. Для получения аналитического решения системы составим отношение двух разностей $g_2 - g_1$ и $g_3 - g_2$, в которых уже отсутствует одна неизвестная величина c :

$$\frac{(g_2 - g_1)}{(g_3 - g_2)} = \frac{[(U_{\text{КЛ}} - U_{\text{К}1})^2 - (U_{\text{КЛ}} - U_{\text{К}2})^2]}{[(U_{\text{КЛ}} - U_{\text{К}2})^2 - (U_{\text{КЛ}} - U_{\text{К}3})^2]} \frac{(U_{\text{КЛ}} - U_{\text{К}3})^2}{(U_{\text{КЛ}} - U_{\text{К}1})^2}. \quad (18)$$

Аналитическое решение (18) можно получить, если значения коллекторного напряжения выбрать эквидистантными $U_{\text{К}3} = U_{\text{К}2} + \Delta U_{\text{К}} = U_{\text{К}1} + 2\Delta U_{\text{К}}$. При этом величина приращения коллекторного напряжения $\Delta U_{\text{К}}$, с одной стороны, должна быть достаточно

большой, чтобы обеспечить различие значений g_1 , g_2 и g_3 , заметно превышающее погрешность измерения $\tilde{U}_{ЭБ}$, а с другой стороны, существенно (в несколько раз) меньше ожидаемого значения напряжения локализации $\Delta U_K \ll U_{КЛ}$. В этом случае с учетом $\Delta U_K / U_{КЛ} = \nu \ll 1$ приближенное решение (18) можно записать в виде

$$U_{КЛ} \approx U_{К1} + \frac{2\Delta U_K}{1 - \left(\frac{\beta}{1+\nu}\right)}, \quad (19)$$

$$\text{где } \beta = \sqrt{\frac{g_2 - g_1}{g_3 - g_2}} \equiv \sqrt{\frac{\tilde{U}_{ЭБ}(U_{К2}) - \tilde{U}_{ЭБ}(U_{К1})}{\tilde{U}_{ЭБ}(U_{К3}) - \tilde{U}_{ЭБ}(U_{К2})}}.$$

Заметим, что, поскольку в выражение для β входят только отношения $g_2 - g_1$ и $g_2 - g_3$, то $\tilde{U}_{ЭБ}(0)$ сокращается, и необходимость измерения этой величины отпадает.

Для методической погрешности определения $U_{КЛ}$ по (19) получено следующее выражение:

$$\varepsilon_{U_{КЛ}} \approx \left(\frac{2\beta}{1-\beta}\right)\nu^2. \quad (20)$$

где значение параметра ν обычно не превышает 0,1; эта погрешность сильно возрастает при $\beta \rightarrow 1$, но уже при $\beta > 1,2$ не будет превышать 10%.

Поскольку изначально неизвестно, какой вид дефекта является преобладающим у конкретного образца МБТ, то в общем случае расчет напряжения локализации необходимо проводить по формулам (14) и (19) и для оценки качества МБТ принимать меньшее из полученных значений. Поскольку наиболее распространенными и опасными дефектами являются дефекты электрофизической природы, то для 90–95 % МБТ напряжение локализации может быть определено по формуле (14).

Схема устройства, реализующего способ, приведена на рис. 6, а эпюры токов и напряжений, поясняющие работу устройства – на рис. 7.

Устройство работает следующим образом. По сигналу «Запуск» устройство управления 2 вырабатывает управляющий импульс длительностью $T_{ИЗМ}$, который поступает на запускающие входы соответствующих устройств. В течение действия импульса управления источник тока 3 вырабатывает импульс постоянного эмиттерного тока (рис. 7, а). По сигналу управляющего импульса генератор линейно нарастающего напряжения 4 вырабатывает напряжение, изменяющееся по линейному закону (рис. 7, б) с максимальным значением $U_{КМ}$, которое поступает на один из входов сумматора-усилителя мощности 6, а генератор синусоидального напряжения 5 начинает вырабатывать переменное напряжение (рис. 7, в), которое поступает на второй вход сумматора-усилителя мощности 6. С выхода сумматора-усилителя мощности 6 усиленное суммарное напряжение (рис. 7, г) поступает на коллектор контролируемого МБТ. Переменное напряжение с эмиттера контролируемого МБТ через разделительный конденсатор 8 поступает на вход регистратора 7, который по сигналу устройства управления 2 регистрирует три значения $\tilde{U}_{ЭБ0}(U_{К0})$, $\tilde{U}_{ЭБ1}(U_{К1})$, $\tilde{U}_{ЭБ2}(U_{К2})$ амплитуды переменной составляющей напряжения на эмиттерном переходе контролируемого МБТ (рис. 7, д) при трех значениях коллекторного напряжения $U_{К0}$, $U_{К1}$, $U_{К2}$ и передает эти значения в вычислитель 9, который вычисляет искомое значение напряжения локализации тока по формуле (15). Если амплитуда $\tilde{U}_{ЭБ}$ не зависит от коллекторного напряжения при выбранном $U_{КМ}$, параметры a_1 и a_2 близки к единице $a_1 \approx a_2 \approx 1$ и по результатам этих измерений значение $U_{КЛ}$ будет стремиться к бесконечности.

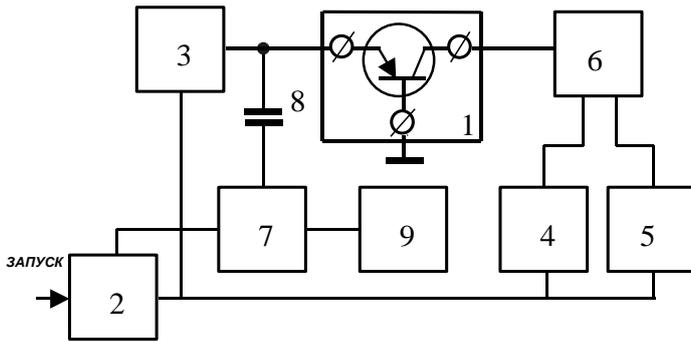


Рис. 6. Структурная схема устройства, реализующего способ измерения напряжения шнурования тока при трех коллекторных напряжениях: 1 – колодка с клеммами для подключения контролируемого транзистора, 2 – устройство управления, 3 – источник тока, 4 – генератор линейно нарастающего напряжения, 5 – генератор синусоидального напряжения, 6 – сумматор-усилитель мощности, 7 – регистратор, 8 – разделительный конденсатор

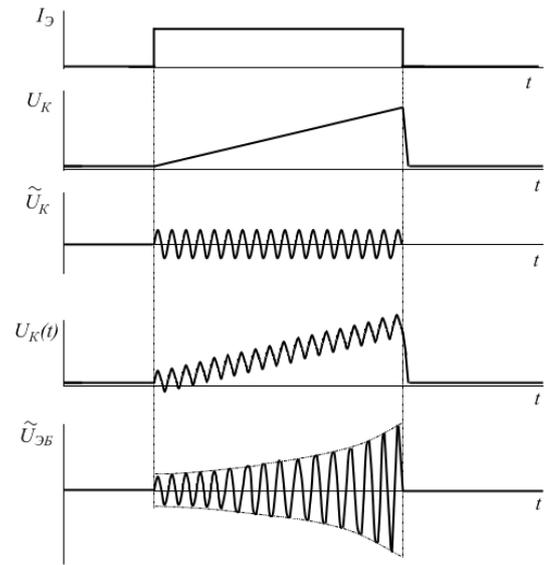


Рис. 7. Эпюры токов и напряжений, поясняющие работу устройства

Для снижения вероятности попадания контролируемого МБТ в опасный режим предложены способ и устройство измерения напряжения шнурования тока в МБТ по патенту №2616871 РФ, в котором измеряется не амплитуда $\tilde{U}_{ЭБ}$ контролируемого МБТ при заданных значениях напряжения на коллекторе, а значения напряжения $U_{К1}$ и $U_{К2}$ на коллекторе контролируемого МБТ, при которых амплитуда $\tilde{U}_{ЭБ}(t)$ становится равной $(1+k1)\tilde{U}_{ЭБ}(0)$ и $(1+k2)\tilde{U}_{ЭБ}(0)$, соответственно, где $k1$ и $k2$ – заданные коэффициенты, причем $k2 > k1$, $\tilde{U}_{ЭБ}(0)$ – начальное значение этой амплитуды при напряжении на коллекторе, близком к нулю (рис. 8), и напряжение шнурования тока вычисляются по формуле:

$$U_{КЛ} = \frac{qU_{К2} - U_{К1}}{q - 1}, \quad (21)$$

где $q = \sqrt{\frac{k2}{k1}}$.

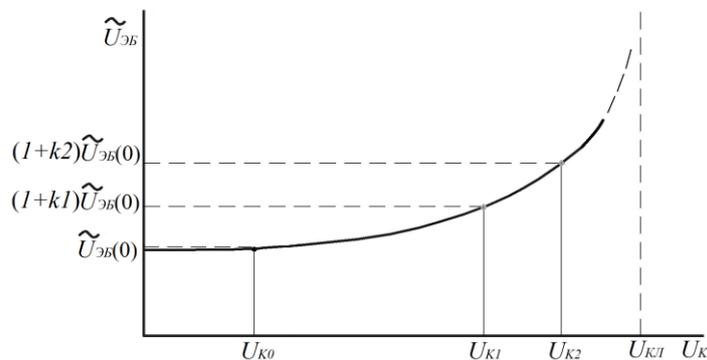


Рис. 8. Качественный вид зависимости $\tilde{U}_{ЭБ}(U_к)$ МБТ с локализацией тока в транзисторной структуре и заданными уровнями амплитуды

Методическая погрешность определения $U_{КЛ}$ по (21) определяется значением коэффициента q и относительной погрешностью δ_u измерения напряжений $U_{К1}$ и

$U_{K2}: \delta_{U_{KЛ}} \approx \delta_u \frac{\sqrt{q^2 + 1}}{(q-1)}$ и в пределе при $q \rightarrow \infty$ стремится к δ_U , которая, как отмечалось, не превышает 0,5%, и уже при $q > 1,2$ методическая погрешность измерения $U_{KЛ}$ этим способом в несколько раз меньше, чем способом, описанным выше.

Для реализации данного способа разработан алгоритм и блок обработки данных.

Структурная схема устройства, реализующего способ, приведена на рис. 9, а эпюры токов и напряжений, поясняющие способ – на рис. 10.

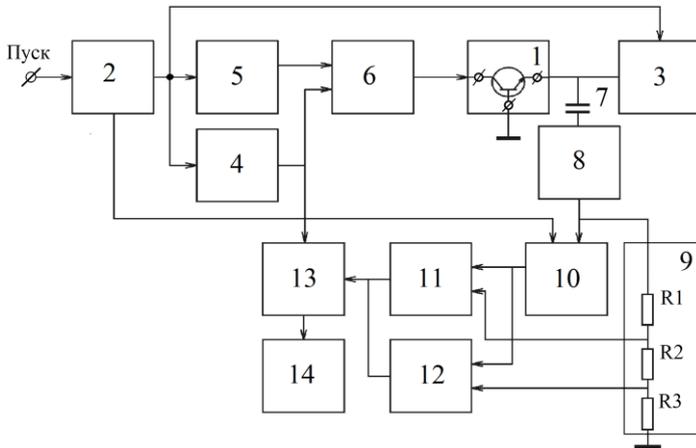


Рис. 9. Структурная схема устройства, реализующего способ измерения $U_{KЛ}$ по заданным уровням: 1 – колодка для подключения контролируемого транзистора; 2 – устройство управления; 3 – источник тока; 4 – генератор линейно нарастающего напряжения; 5 – генератор низкой частоты; 6 – сумматор-усилитель мощности; 7 – разделительный конденсатор; 8 – устройство выделения огибающей; 9 – резистивный делитель, содержащий три резистора $R1$, $R2$ и $R3$; 10 – устройство выборки и хранения; 11 и 12 – два устройства сравнения; 13 – регистратор; 14 – вычислитель

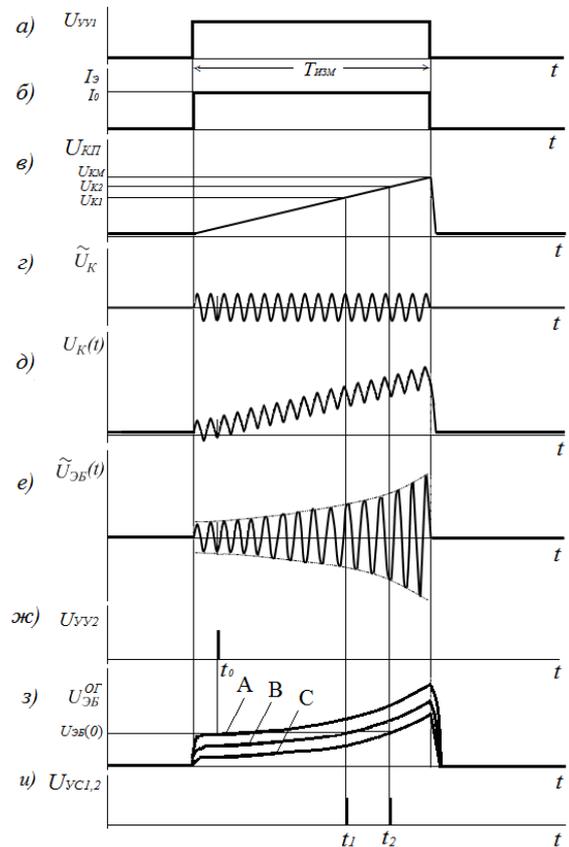


Рис. 10. Эпюры сигналов, поясняющие принцип работы устройства

В **третьей главе** описана экспериментальная установка для исследования тепло-электрических параметров мощных ВЧ и СВЧ-транзисторов (УИТЭП-1М) и представлены результаты апробации разработанных способов измерения $U_{KЛ}$.

Структурная схема установки УИТЭП-1М приведена на рис. 11. В ее состав входят: генератор низкой частоты (ГНЧ), генератор линейно нарастающего напряжения (ГЛНН), сумматор, усилитель мощности со схемой защиты, генератор стабильного тока (ГСТ), усилитель низкой частоты (УНЧ), блок управления, блок контроля высокочастотной генерации и блок питания. Установка работает в комплексе с цифровым осциллографом RIGOL DS1052E и платой сбора данных.

Проверка способа измерения $U_{KЛ}$ по амплитуде переменной составляющей напряжения на эмиттерном переходе, измеренной при трех значениях коллекторного напряжения, проводилась на МБТ типа КТ903, которые могут некоторое время выдерживать режим «горячего пятна» без катастрофического отказа. Зависимости $\tilde{U}_{эБ}(U_K)$ для нескольких образцов МБТ при $I_э = 0,5$ А, $U_{кМ} = 50$ В, амплитуде переменной составляющей коллекторного напряжения 1 В, частоте 50 Гц и времени нарастания $U_K t_{и} = 1$ с приведены на рис.12.

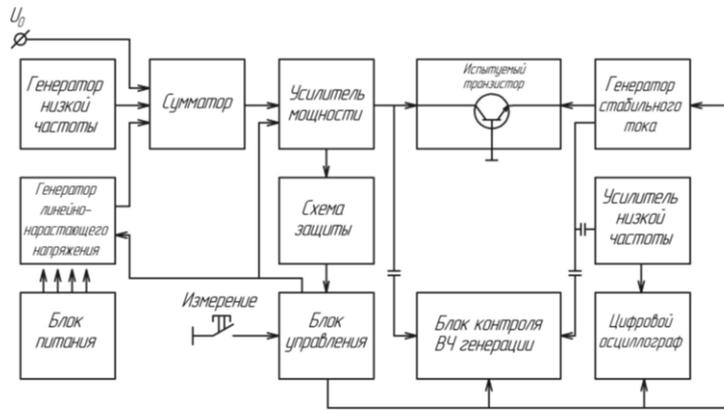
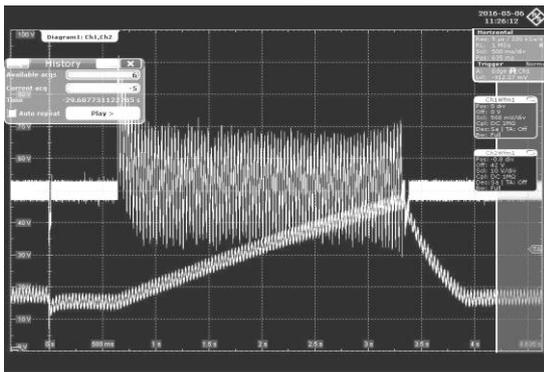
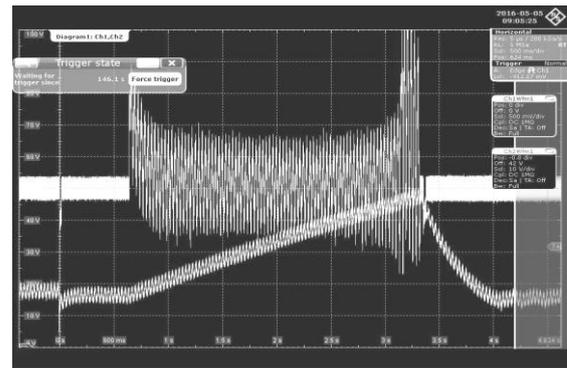


Рис. 11. Установка УИТЭП-1М: структурная схема

Примерно у 30% исследованных приборов наблюдается режим «горячего пятна», которому на зависимости $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$ соответствует ярко выраженный максимум. Коллекторное напряжение, соответствующее максимуму характеристики $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$, принималось за напряжение локализации тока. Для нескольких образцов с явно выраженным шнурованием тока напряжение локализации рассчитывалось по измеренным значениям на начальном участке зависимостей $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$. Результаты расчета приведены в таблице.



а. №737



б. №454

Рис.12. Зависимости $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$ транзисторов КТ903А при эмиттерном токе 0,5 А и $U_{KM}=50$ В: а – без образования «горячего пятна»; б – с образованием «горячего пятна»

Таблица 1 – Значения напряжения локализации тока транзисторов КТ903А, измеренные и рассчитанные по зависимостям $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$ при токе 0,5 А

Номер МБТ	Расчетное значение $U_{КЛ}$, В,	Значение $U_{КЛ}^И$ по максимуму $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$, В	Абсолютная разница значений $\Delta U = U_{КЛ} - U_{КЛ}^И$, В	Относительная разница значений $\xi = (\Delta U / U_{КЛ}^И) \cdot 100\%$
281	44,8	43,0	1,8	4,3
271	45,4	43,5	1,9	4,6
243	38,4	36,4	2,0	5,7
316	36,7	36,0	0,7	2,0
452	38,3	37,0	1,3	3,5
737	∞	∞	-	-
418	∞	∞	-	-
454	48,6	47,8	0,8	1,7
264	45,0	42,8	2,2	5,0

Значения $U_{\text{кл}}$, рассчитанные по измеренным значениям зависимости $\tilde{U}_{\text{ЭБ}}(U_{\text{к}})$, оказались несколько больше, чем наблюдаемые по максимуму на характеристиках $\tilde{U}_{\text{ЭБ}}(U_{\text{к}})$. Это различие не превышает 6 %, что для производственного контроля и разбраковки МБТ по устойчивости к шнурованию тока вполне приемлемо. Более того, способ позволяет задать в качестве отбраковочного уровня коллекторное напряжение, при котором крутизна характеристики $\tilde{U}_{\text{ЭБ}}(U_{\text{к}})$, превышает некоторое критическое значение.

Сравнение косвенного и прямого способов измерений $U_{\text{кл}}$ проводились на выборке транзисторов типа КТ903А в количестве 20 шт. при $U_{\text{км}} = 50$ В, токе эмиттера 0,7А, времени нарастания $U_{\text{к}}$ $t_{\text{и}} = 2,5$ с. Температура кристалла контролировалась с помощью ИК микроскопа OPTOTHERM. Предварительно у транзисторов были спилены крышки корпуса, а сами кристаллы очищены от компаунда.

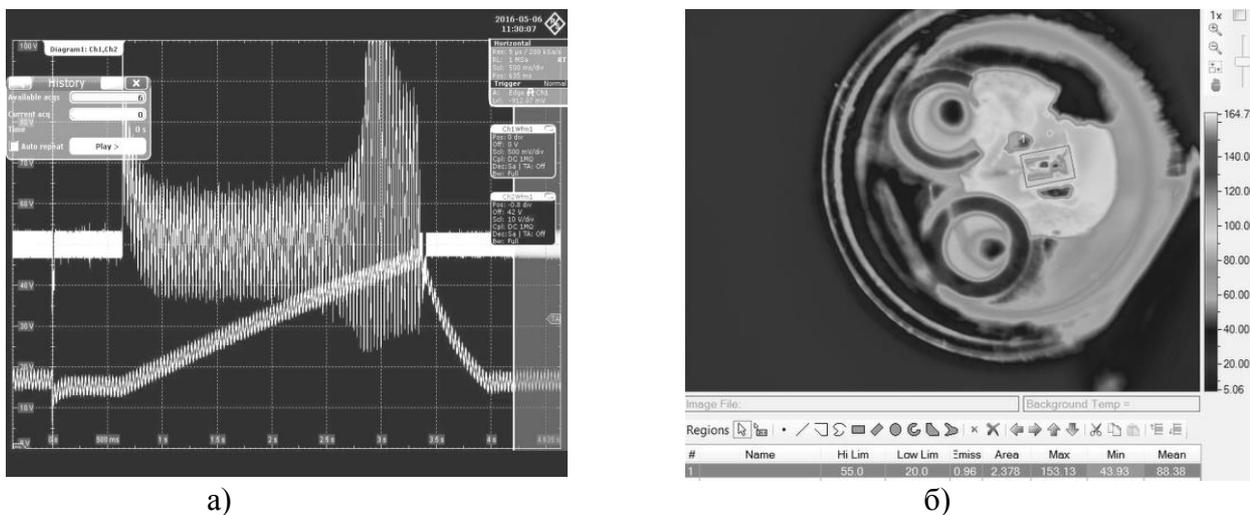


Рис.14. Осциллограмма (а) зависимости $\tilde{U}_{\text{ЭБ}}(U_{\text{к}})$ и фотография (б) экрана ИК микроскопа для транзистора КТ903А №7

На рис. 15. приведены графики зависимостей напряжения шнурования тока от температуры корпуса $U_{\text{кл}}(T_{\text{к}})$ нескольких образцов транзисторов типа КТ903А, измеренные при $U_{\text{кмакс}} = 54$ В, $\Omega=40$ Гц, эмиттерном токе 0,8 А и длительности импульса 1,5 с в диапазоне температур от -60 °С до $+90$ °С.

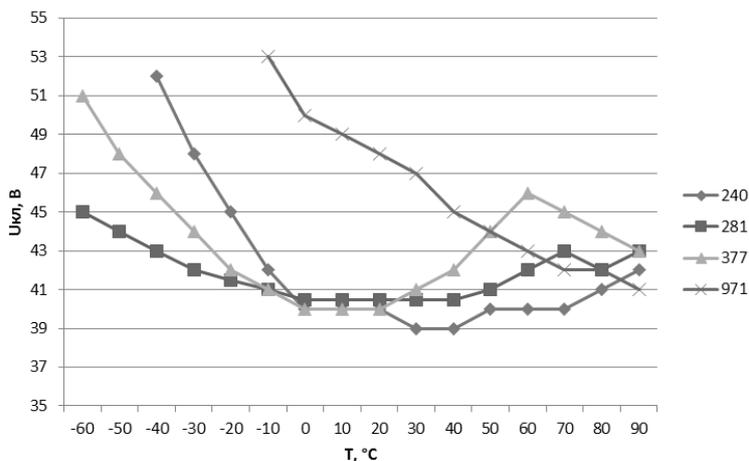


Рис. 15. Зависимости напряжения шнурования тока от температуры корпуса транзисторов типа КТ903А при эмиттерном токе 0,8 А

Из графиков видно, что с увеличением температуры корпуса напряжение $U_{КЛ}$ шнурования тока сначала несколько снижается, а затем увеличивается, то есть существует минимальное напряжения $U_{КЛmin}$ шнурования тока при некоторой температуре $T_{КР}$ корпуса транзистора. Это минимальное напряжение локализации тока и определяет реальное максимально допустимое коллекторное напряжение транзистора.

В четвертой главе приведены выборочные распределения МБТ по тепловым параметрам и результаты исследований влияния теплоэлектрических параметров МБТ на характеристики усилительных каскадов различных классов.

Интегральные распределения 90 штук транзисторов типа КТ903А по величине напряжения $U_{КЛ1}$ и $U_{КЛ2}$ шнурования тока, измеренного при двух токах $I_{К1} = 0,5A$ и $I_{К2} = 0,8A$, соответственно, приведены на рис. 16.

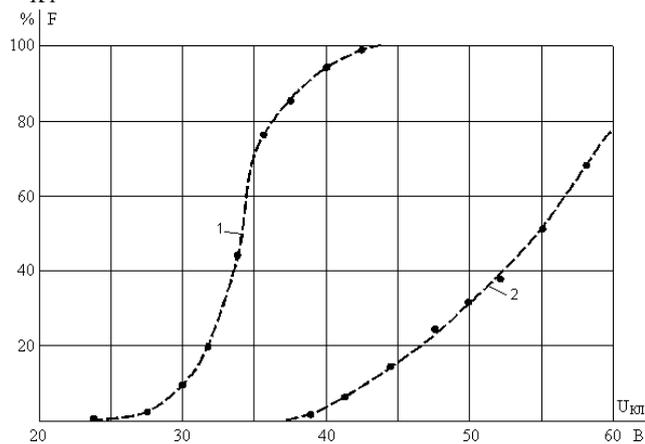


Рис. 16. Интегральные распределения транзисторов КТ903А по величине напряжения локализации тока: 1 – $I_K = 0,8 A$; 2 – $I_K = 0,5 A$

С увеличением тока, при котором измерялось напряжение шнурования, характер распределения транзисторов по величине $U_{КЛ}$ изменяется: абсолютный разброс приборов по величине $U_{КЛ}$ увеличивается.

При коллекторном токе $I_{К1} = 0,5A$ выборочное среднее значение $\bar{U}_{КЛ}$ напряжения локализации составило $\bar{U}_{КЛ} \approx 55 В$ и среднеквадратическое отклонение среднего $\sigma_{\bar{U}_{КЛ}} \approx 6 В$, а при $I_{К1} = 0,8A$ – $\bar{U}_{КЛ} \approx 34 В$ и $\sigma_{\bar{U}_{КЛ}} \approx 3 В$, соответственно.

Абсолютный разброс тепловых сопротивлений МБТ 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.

Для исследования связи уровня второй гармоники в транзисторных каскадах класса А с тепловыми параметрами транзисторов была собрана экспериментальная установка по схеме на рис. 17. Испытуемый транзистор VT1 включался по схеме с общим эмиттером и размещался на радиаторе с площадью рассеяния 100 см^2 с принудительным воздушным охлаждением. Величина коллекторного тока задавалась источником смещения E_B и переменным резистором $R1$ и измерялась встроенным амперметром источника E_K питания каскада. В качестве нагрузки $R2$ использовался реостат с полным сопротивлением 50 Ом . В базу транзистора через разделительный конденсатор $C1$ подавался синусоидальный сигнал. Уровень второй гармоники измерялся селективным вольтметром V , как на входе транзистора, так и на сопротивлении нагрузки

Зависимости уровня второй гармоники каскада на транзисторах КТ805Б от коллекторного напряжения U_K на частоте 30 Гц при амплитуде входного сигнала $1,5 В$ представлены на рис.18.

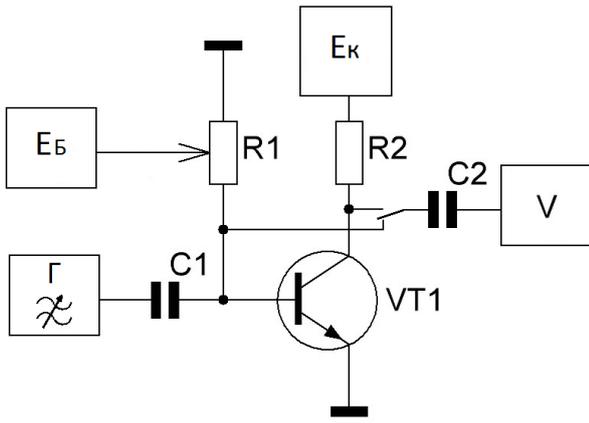


Рис. 17. Структурная схема экспериментальной установки: Г - НЧ генератор; V – селективный вольтметр; E_б и E_к

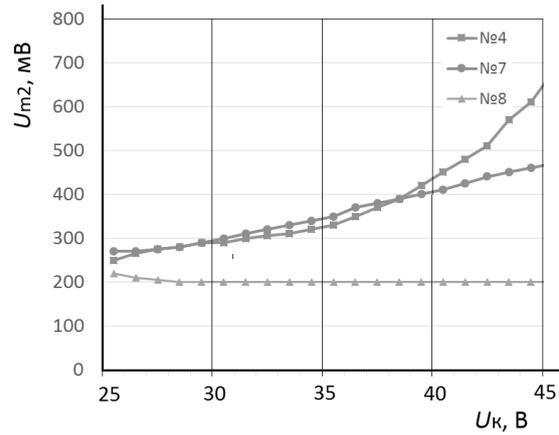


Рис. 18. Зависимость уровня второй гармоники каскада на транзисторах КТ805Б от коллекторного напряжения U_K : №4 – $R_{ТП-К} = 6,1$ К/Вт; №7 – $R_{ТП-К} = 5,6$ К/Вт; №8 – $R_{ТП-К} = 5$ К/Вт

Из графиков видно: чем больше тепловое сопротивление, тем больше и уровень второй гармоники при $U_K > 40$ В. При этом у образца №4 наблюдался существенный рост второй гармоники при $U_K > 38$ В, что обусловлено локализацией тока в транзисторной структуре. Аналогичные эффекты были выявлены и в транзисторных каскадах на СВЧ транзисторах типа КТ904Б. Резкий рост уровня второй гармоники в этих каскадах при коллекторном токе 0,3 А наблюдался при $U_K > 18-20$ В.

В дифференциальных каскадах (ДК) на биполярных транзисторах (рис. 19) при подаче на вход ДК гармонического сигнала $\Delta U = U_1 - U_2 = U_m \sin \omega t$ переменная составляющая мощности P_{im} приводит к появлению переменной составляющей температуры, амплитуда которой T_{im} в результате действия ТОС с коэффициентом $K_T \approx -2,0$ мВ/К на входах транзистора создает дифференциальный сигнал

$$\Delta U_m = K_T \Delta \tilde{T}_{1,2}, \quad (22)$$

который приводит к дополнительным линейным искажениям.

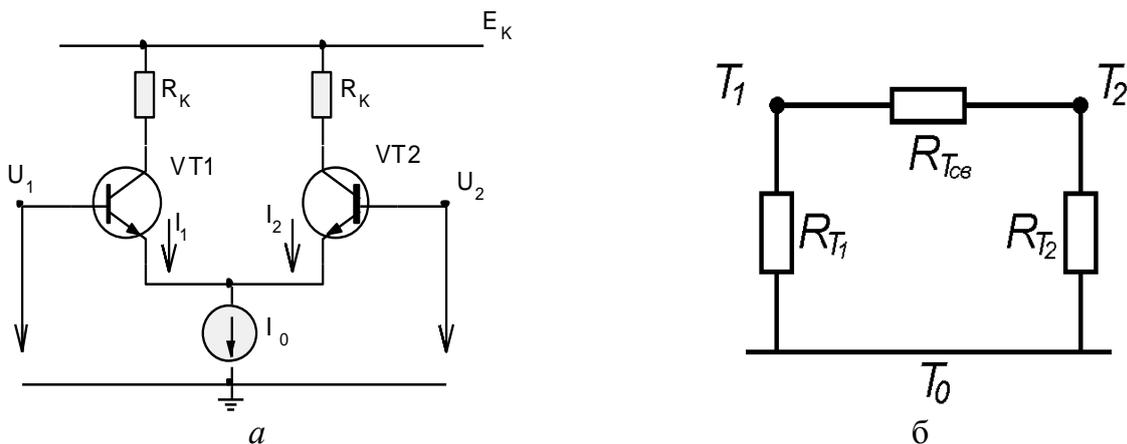


Рис. 19 Схема дифференциального каскада (а) и его эквивалентная тепловая схема (б)

Коэффициент линейных искажений, возникающих в дифференциальном каскаде из-за различия тепловых сопротивлений на низкой частоте, будет равен:

$$\begin{aligned}
K_{JT} &= \Delta R_T K_T \sqrt{[(R_{T1} + R_{T2}) \cdot 2b\theta + (1 - 2\theta)]^2 E_K^2 I_m^2 + P_m^2} / U_m = \\
&= \Delta R_T K_T K_V \sqrt{[(R_{T1} + R_{T2}) \cdot 2b\theta + (1 - 2\theta)]^2 E_K^2 + R_K^2 I_m^2} / R_K,
\end{aligned} \tag{23}$$

где K_V – коэффициент усиления дифференциального сигнала.

На высоких частотах $\omega \gg \tau_{Ti}$ линейные искажения этой природы будут исчезать в результате инерционности тепловых процессов. Для расчета искажений тепловой природы в диапазоне средних частот необходимо учитывать частотную зависимость теплового импеданса.

В двухтактных усилителях класса В различное смещение рабочих точек БТ обусловлено разностью средних температур транзисторов $\overline{\Delta T}_{12} = (E_K I_m / \pi) \Delta R_T$. Это смещение приводит к различию крутизны сквозных входных характеристик S_1 и S_2 . По оценке методом трех ординат, полагая в первом приближении, что разность крутизны пропорциональна разности температур $\Delta S = K_S \overline{\Delta T}_{12}$ коэффициент гармоник можно записать в виде

$$K_G = K_S E_K I_m (R_{T1} - R_{T2}) / 4\pi(S_1 + S_2). \tag{24}$$

Приведенные оценки показывают, что при изготовлении прецизионной аппаратуры необходимо подбирать МБТ не только по электрическим, но и по тепловым параметрам.

В заключении представлены основные 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 $U_{кл}$ шнурования тока МБТ по значениям характеристики $\tilde{U}_{эб}(U_K)$, 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 $\tilde{U}_{эб}(U_K)$ порядка 5% в заданном диапазоне коллекторного напряжения. Значения $U_{кл}$, 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 $U_{кл}$ по значениям коллекторного напряжения, измеренным при двух значениях коэффициентов превышения характеристики $\tilde{U}_{эб}(U_K)$ 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 $U_{кл}$ 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 $U_{кл}$ шнурования тока транзисторов КТ903 снижается, а при дальнейшем увеличении температуры увеличивается, то есть некоторой температуре $T_{кр}$ корпуса транзистора существует минимальное значение напряжения $U_{клmin}$ шнурования тока. На основе полученных результатов может быть разработана методика отбраковки потенциально ненадёжных мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторов по минимальному напряжению $U_{клmin}$ 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.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Сергеев, В. А. Компьютерное моделирование неизотермического токораспределения в симметричных биполярных транзисторных структурах с дефектами / В.А. Сергеев, О.А. Дулов, А.А. Куликов // Известия вузов. Электроника. – 2008. – №5. – С. 84–86.

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

3. Sergeev, V. A. Monitoring of the Current-Distribution Uniformity in Bipolar Transistors from the dependence of Internal-Feedback Factor on Collector Voltage / V. A. Sergeev, O.A. Du-lov, A.A. Kulikov // Semiconductors. – 2010. – Vol. 44, No. 13. – pp. 1675-1679.

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

5. Sergeev, V. A. Nondestructive Method for Determining the Voltage of Current Pinching in Powerful Radiofrequency and Microwave Bipolar Transistors / V. A. Sergeev, A.A. Kulikov // Russian Microelectronics. – 2015.- №7. – С. 473-477.

6. Сергеев, В. А. Установка для измерения напряжения шнурования тока в структурах мощных ВЧ- и СВЧ биполярных транзисторов / В.А. Сергеев, А.А. Куликов, Р.Г. Тарасов, Я.Г. Тетенькин // Автоматизация процессов управления. – 2017. – №3. - С. 43-51.

Патенты и авторские свидетельства

7. Патент №2537519 РФ МКИ G01R 31/26. Способ определения напряжения локализации тока в мощных биполярных транзисторах / Сергеев В.А., Дулов О.А., Куликов А.А. – Заявл. 2012009436 от 14.09.2012. – опубл. 21.04.2013, Бюл. 17.

8. Патент №2616871 РФ МКИ G01R 31/26. Способ определения напряжения локализации тока в мощных биполярных транзисторах / В.А. Сергеев, А.А. Куликов – Заявл. 2012009436 от 14.09.2013. – опубл. 21.01.2015, Бюл. 2.

Основные публикации в других изданиях

9. Козликова, И.С. Токовые зависимости теплового сопротивления переход-корпус мощных ВЧ транзисторов / И.С. Козликова, С.О. Мисбахова, А.А. Куликов // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 19-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара. – Ульяновск : УлГТУ, 2016. – С. 77–78.
10. Куликов, А.А. Теплофизические характеристики мощных транзисторов при гармонической модуляции греющей мощности // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 9-й региональной научной школы-семинара. – Ульяновск : УлГТУ, 2006. – С. 21 – 22.
11. Куликов, А.А. Блок генераторов для установки измерения теплофизических параметров мощных транзисторов / А.А. Куликов, О.А. Дулов // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 9-й региональной научной школы-семинара. – Ульяновск : УлГТУ, 2006. – С. 26 – 27.
12. Куликов А.А. Исследование теплофизических параметров мощных биполярных транзисторов с применением программы Electronics Workbench / А.А. Куликов, О.А. Дулов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: XIII-я Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: тезисы докл. В 3 т. Т.1. – М.: МЭИ, 2007. – С. 277–278.
13. Куликов, А.А. Разбаланс токов тепловой природы в дифференциальных транзисторных каскадах / А.А. Куликов // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 11-й региональной научной школы-семинара. – Ульяновск : УлГТУ, 2008. – С. 39 – 41.
14. Куликов, А.А. Контроль качества мощных биполярных транзисторов по малосигнальным параметрам / А.А. Куликов, О.А. Дулов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: 14-я Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тезисы докл. В 3 т. Т.1. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – С. 232–234.
15. Куликов, А.А. Установка для измерения теплофизических параметров мощных биполярных транзисторов / А.А. Куликов, В.А. Сергеев // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники. Материалы 12-й региональной научной школы-семинара - в 2 Т. Т1 Ульяновск : УлГТУ, 2009. – С.60.
16. Куликов, А.А. Идентификация искажений тепловой природы в симметричных транзисторных каскадах / А.А. Куликов, В.А. Сергеев // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: 14-я Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3 т. Т.1. – М. : Издательский дом МЭИ. – 2010. – С. 283–284.
17. Куликов, А.А. Аппаратно-программный комплекс для измерения напряжения локализации мощных биполярных транзисторов / А.А. Куликов // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники. Материалы 15-й региональной научной школы-семинара. Ульяновск : УлГТУ, 2012. – С. 38–39.
18. Куликов, А.А. Способ определения напряжения локализации тока в мощных биполярных транзисторах по трем значениям $U_{кб}$ / А.А. Куликов, В.А. Сергеев // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 18-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара. – Ульяновск : УлГТУ, 2015. – С. 56-57
19. Куликов, А.А. Контроль качества мощных СВЧ биполярных транзисторов по величине тепловых сопротивлений, измеренных в диодных режимах / А.А. Куликов, В.А. Сергеев // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 18-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара. – Ульяновск : УлГТУ, 2015. – С. 58-59.

20. Куликов, А.А. Сравнительный анализ результатов измерения параметров шнурования тока в мощных ВЧ и СВЧ биполярных транзисторах прямым и косвенным методом / А.А. Куликов, В.А. Сергеев // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 19-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара. – Ульяновск : УлГТУ, 2016. – С. 77–78.
21. Куликов, А.А. Влияние материала подложки на тепловые характеристики бескорпусных мощных биполярных транзисторов в статическом режиме / А.А. Куликов, В.А. Сергеев // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 19-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара. – Ульяновск : УлГТУ, 2017. – С. 58–59.
22. Куликов, А.А. Автоматизированный неразрушающий контроль напряжения шнурования тока в мощных биполярных СВЧ транзисторах / А.А. Куликов, А.И. Ишелев // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 19-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара. – Ульяновск : УлГТУ, 2017. – С. 170–171.
23. Сергеев, В.А. Искажения тепловой природы в транзисторных усилителях с симметричным включением транзисторов / В.А. Сергеев, А.А. Куликов // Тезисы докладов НТК ППС УлГТУ «Вузовская наука – производству». - Ульяновск: УлГТУ – 2009. – С. 100.
24. Сергеев, В.А. Зависимость напряжения локализации тока в структурах мощных биполярных СВЧ-транзисторов от температуры / В.А. Сергеев, А.А. Куликов // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: Тез. докл. VII Всероссийской конф. молодых ученых. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2012. – С. 131–132.
25. Сергеев, В. А. Косвенный метод оценки параметров «горячих пятен» в мощных биполярных транзисторах / В.А. Сергеев, А.А. Куликов // Радиоэлектронная техника : межвуз. сб. науч. тр. / под ред. В. А. Сергеева. – Ульяновск : УлГТУ, 2012. – С. 66–72
26. Сергеев В.А. Выборочные распределения мощных биполярных транзисторов по теплофизическим параметрам / В.А. Сергеев, А.А. Куликов // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: сборник научных трудов восьмой Всероссийской научно-практической конференции (с участием стран СНГ), Ульяновск, 1-2 июля 2013 г. – Ульяновск : УлГТУ, 2013. – С. 211–213.
27. Сергеев, В.А. Установка для измерения напряжения шнурования тока в структурах мощных ВЧ и СВЧ биполярных транзисторов / В.А. Сергеев, А.А. Куликов // Материалы Международной научно-технической конференции, 1 – 5 декабря 2015 г. INTERMATIC-2015.– М. : МИРЭА. – 2015. – С. 222–223.
28. Сергеев, В.А. Искажения тепловой природы в транзисторных каскадах класса А на мощных биполярных ВЧ и СВЧ транзисторах / В.А. Сергеев, А.А. Куликов // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: тезисы докладов IX Всеросс. конф. молодых ученых. – Саратов : Техно-Декор, 2015. – С.73–74.
29. Сергеев, В.А. Установка для измерения напряжения шнурования тока в структурах мощных ВЧ и СВЧ биполярных транзисторов / В.А. Сергеев, О.А. Дулов, А.А. Куликов // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем: сб. науч. тр. 9-й Всеросс. научно-практич. конференции (с участием стран СНГ). – Ульяновск : УлГТУ, 2015. – С. 173–176.
30. Сергеев, В.А. Установка для измерения напряжения шнурования тока в структурах мощных ВЧ- и СВЧ биполярных транзисторов / В.А. Сергеев, А.А. Куликов, Р.Г. Тарасов // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем : сб. науч. тр. III Международной НПК РАДИОИНФОКОМ-2017»; в 2-х частях, Ч1. – М.: МИРЭА, 2017. – С. 529–533.

Куликов Александр Александрович

Неразрушающие способы и средства измерения напряжения шнурования тока
в мощных биполярных ВЧ и СВЧ-транзисторах

Автореферат

Подписано в печать .10.2018. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 1,17.

Тираж 120 экз. Заказ _____

ИПК «Венец» УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, Северный Венец, 32.