

ELECTRONIC AND ELECTRICAL ENGINEERING

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 681.518.3

В.А. Сергеев, А.А. Куликов, Р.Г. Тарасов, Я.Г. Тетенькин

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ШНУРОВАНИЯ ТОКА В СТРУКТУРАХ МОЩНЫХ ВЧ- И СВЧ-ТРАНЗИСТОРОВ

Сергеев Вячеслав Андреевич, доктор технических наук, доцент, окончил физический факультет Горьковского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, заведующий базовой кафедрой «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» Ульяновского государственного технического университета. Имеет монографии, статьи и изобретения в области исследования характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем, измерения их тепловых параметров. [e-mail: sva@ulstu.ru].

Куликов Александр Александрович, окончил радиотехнический факультет УлГТУ. Ведущий инженер УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, аспирант базовой кафедры «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» УлГТУ. Имеет публикации в области разработки автоматизированных средств измерения параметров полупроводниковых приборов. [e-mail: ufire@mv.ru].

Тарасов Руслан Геннадьевич, окончил Ульяновское высшее военное инженерное училище связи. Директор АО «НПП «Завод Искра», соискатель базовой кафедры «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» УлГТУ. Имеет публикации в области разработки методов и средств измерения параметров и контроля качества изделий радиотехники. [e-mail: rgtarasov@mail.ru].

Тетенькин Ярослав Геннадьевич, кандидат технических наук, окончил радиотехнический факультет УлГТУ. Ведущий инженер Ульяновского конструкторского бюро приборостроения. Имеет научные публикации и изобретения в области автоматизации измерений и исследования характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем, измерения их тепловых параметров. [e-mail: a732041@yandex.ru].

Аннотация

Представлен краткий обзор известных способов и средств измерения напряжения шнурования тока в структурах мощных ВЧ- и СВЧ-биполярных и гетеробиполярных транзисторов (МБТ) в активном режиме включения. Показано, что для приборов, работающих в квазинепрерывном режиме, эффективными являются способы, основанные на измерении крутизны зависимости $U_{ЭБ}(U_{КБ})$ напряжения на эмиттерном переходе от коллекторного напряжения. Описана установка для измерения напряжения шнурования тока в МБТ, принцип работы которой основан на измерении амплитуды переменной составляющей напряжения $\tilde{U}_{ЭБ}$ на эмиттерном переходе МБТ при пропускании через транзистор постоянного эмиттерного тока и подаче на коллектор суммы линейно нарастающего и малого переменного напряжения. Шнурование тока в транзисторной структуре проявляется в резком возрастании крутизны зависимости $\tilde{U}_{ЭБ}(U_{КБ})$. Описан алгоритм косвенного определения напряжения локализации тока в транзисторной структуре по измеренным значениям на начальном участке указанных зависимостей без попадания контролируемого МБТ в режим «горячего пятна».

Ключевые слова: мощные ВЧ- и СВЧ-транзисторы, теплоэлектрическая неустойчивость, напряжение шнурования тока, установка, измерение.

INSTALLATION FOR MEASUREMENT OF CURRENT PINCHING VOLTAGE IN STRUCTURES OF POWER RF AND MICROWAVE BIPOLAR TRANSISTORS

Viacheslav Andreevich Sergeev, Doctor of Engineering, Associate Professor; graduated from the Faculty of Physics of Gorky State Technical University; Director of the Ulyanovsk Branch of the Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences; Head of the basic department of Radioengineering, Opto- and Nanoelectronics of Ulyanovsk State Technical University; an author of monographs, papers, and inventions in the field of modeling and researching semiconductor devices and integrated circuits parameters and measure of its thermal parameters. e-mail: sva@ulstu.ru.

Aleksandr Aleksandrovich Kulikov, graduated from the Faculty of Radioengineering of Ulyanovsk State Technical University; Senior Engineer at the Ulyanovsk Branch of the Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences; Postgraduate Student at Ulyanovsk State Technical University; an author of papers in the field of development of automated measurement tools for semiconductor devices. e-mail: ufire@mv.ru.

Ruslan Gennadevich Tarasov, graduated from Ulyanovsk High Military Engineering School; Director of JSC "NPP "Zavod Iskra", Postgraduate Student at Ulyanovsk State Technical University; an author of papers in the field of development of automated measurement tools for semiconductor devices. e-mail: rgtarasov@mail.ru.

Iaroslav Gennadevich Tetenkin, Candidate of Engineering; graduated from the Faculty of Radioengineering of Ulyanovsk State Technical University; Senior Engineer of Ulyanovsk Instrument Manufacturing Design Bureau; an author of scientific publications and inventions in the field of computer-aided measurement and parameter analysis of semiconductor devices and integrated circuits and measuring of their thermal characteristics. e-mail: a732041@yandex.ru.

Abstract

The short review of the known ways and tools of current pinching voltage in structures of power RF and microwave bipolar and heterobipolar transistors (PBT) in the active mode of inclusion is submitted. The article shows that the ways based on measurement of the steepness of dependence $U_{EB}(U_{CB})$ of voltage on emitter junction from collector voltage are effective for the devices working in the quasicontinuous mode. Installation for measuring voltage of a current pinching in PBT which principle of work is based on measurement of amplitude of a variable component \tilde{U}_{EB} of voltage on emitter junction of PBT at transmission of direct emitter current via the transistor and giving on the collector of the sum of linearly increasing small alternating voltage is described. The current pinching in transistor structure is occurred in sharp increase of the steepness of dependence $\tilde{U}_{EB}(U_{CB})$. The algorithm of indirect determination of tension of current localization in transistor structure on the measured values on the initial site of the specified dependences without hit of the controlled PBT in the mode of "a hot spot" is described.

Key words: power RF and microwave bipolar transistors, electrothermal instability, current pinching voltage, installation, measurement.

ВВЕДЕНИЕ

Область безопасной работы (ОБР) мощных биполярных и гетеробиполярных транзисторов (МБТ) в активном режиме включения ограничена эффектом теплоэлектрической неустойчивости, при котором в локальной области полупроводниковой структуры образуется горячее пятно [1–3]. Этот режим, как правило, приводит к отказам МБТ в радиоэлектронной аппаратуре [2–4]. Даже кратковременное нахождение МБТ в этом режиме, не заканчивающееся катастрофическим отказом, сопровождается большими локальными перегревами и термомеханическими напряжениями в приборной структуре и, как следствие, интенсивной генерацией дефектов

в активной области, что приводит к значительному снижению времени безотказной работы МБТ.

В известных методах экспериментального определения границ ОБР МБТ в качестве информативных параметров, свидетельствующих о наступившей локализации тока, используются прямое напряжение на эмиттере [5, 6], токи базы и коллектора [7–10] или их производные по времени [7].

Следует отметить, что методы измерения границы ОБР, обусловленной теплоэлектрической неустойчивостью, в импульсных режимах дают завышенное значение напряжения локализации и недостаточно чувствительны при обнаружении «горячих пятен» на больших уровнях инжекции. В работах Гусева В.А. [9, 10] в каче-

стве параметра-критерия неразрушающего контроля транзисторов предложено использовать ток индуцированного канала $I_{кан}$, протекающего в локальной области структуры при подаче в транзистор последовательности импульсов тока нарастающей амплитуды. Использование пикового значения тока канала в качестве информативного параметра позволяет обнаруживать более ранние стадии локализации, чем при использовании производной базового тока, и тем самым снизить вероятность катастрофического отказа испытуемых транзисторов. Однако необходимо учитывать, что наличие тока канала даже в несколько миллиампер является результатом разогрева области локализации до уровня порядка температуры собственной проводимости (250°C), что сопровождается циклическими термомеханическими напряжениями. Такие режимы должны быть исключены в процессе контроля.

В работах Синкевича В.Ф., Кернера Б.С. и др. [11, 12] показано, что при появлении неоднородности распределения тока и температуры по площади активной области транзисторной структуры крутизна зависимости напряжения на эмиттерном переходе от коллекторного напряжения $U_{ЭБ}(U_K)$ заметно возрастает, а при образовании горячего пятна на этой зависимости появляется излом или скачок.

В известном способе измерения напряжения локализации тока $U_{КЛ}$ [12] транзистор включают по схеме с общей базой, задают постоянный эмиттерный ток, на коллектор подают линейно нарастающее коллекторное напряжение $U_K(t)$, напряжение на эмиттерном переходе $U_{ЭБ}$ подают на вход осциллографа и в момент появления излома или скачка на наблюдаемой зависимости $U_{ЭБ}(t)$ регистрируют коллекторное напряжение, которое и является искомым напряжением $U_{КЛ}$ локализации тока при заданном эмиттерном токе. Недостатком известного способа является большая погрешность регистрации момента наступления локализации с помощью осциллографа, поскольку величина скачка (или излома) у многих образцов транзисторов сравнима по величине

с предельной чувствительностью осциллографа. Другим, более важным недостатком этого способа является то, что контролируемый прибор подвергается опасному разрушающему воздействию, поскольку попадает в режим «горячего пятна».

1 СПОСОБ И УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ШНУРОВАНИЯ ТОКА

Для повышения чувствительности к изменению крутизны зависимости $U_{ЭБ}(U_{КБ})$ нами предложено [13] на линейно изменяющемся коллекторном напряжении накладывать малое переменное напряжение и регистрировать малый переменный сигнал на эмиттерном переходе. По существу, способ сводится к измерению тепловой составляющей малосигнального коэффициента обратной связи по напряжению в схеме с общей базой.

Структурная схема модернизированной измерительной установки, реализующей данный способ, показана на рисунке 1. Формы напряжений и сигналов, поясняющие принцип работы установки, приведены на рисунке 2.

Испытуемый транзистор включается по схеме с общей базой. В течение действия управляющего импульса длительностью $T_{изм}$, вырабатываемого блоком управления, через испытуемый транзистор протекает ток $I_{Э}$, задаваемый генератором стабильного тока (ГСТ), а на коллектор с выхода усилителя мощности подается сумма линейно нарастающего и синусоидального напряжений:

$$U_K(t) = U_{KM}t/T_{изм} + U_m \sin \Omega t, \quad (1)$$

вырабатываемых генераторами линейно нарастающего напряжения и низкой частоты соответственно. Блок контроля ВЧ-генерации позволяет отключать испытуемый транзистор при появлении паразитных ВЧ- или СВЧ-колебаний в контролируемом каскаде.

Переменная составляющая напряжения на эмиттере $\tilde{U}_{ЭБ}$ через разделительный конденсатор C_p поступает на вход усилителя. С выхода усилителя зависимость

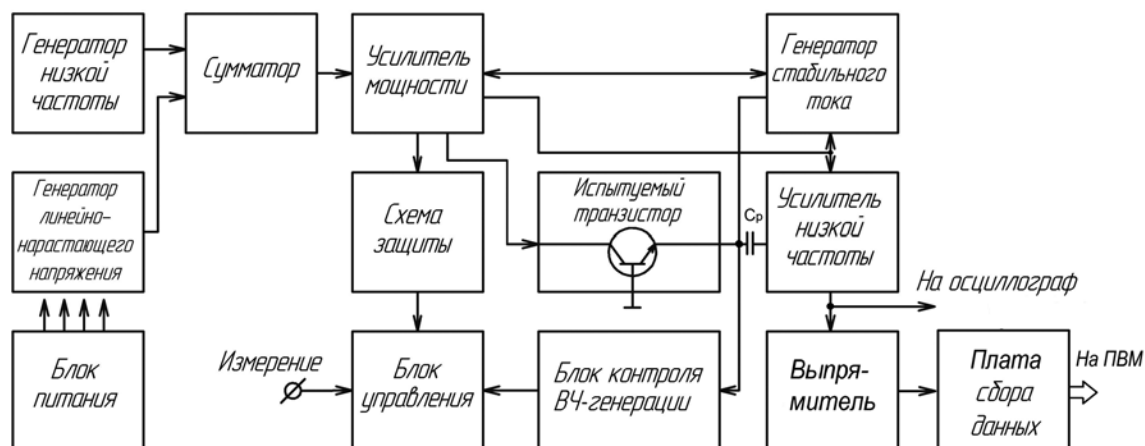


Рис. 1. Структурная схема установки для измерения крутизны зависимости $U_{ЭБ}(U_{КБ})$ мощных ВЧ- и СВЧ-биполярных транзисторов

$\tilde{U}_{ЭБ}(U_{КБ})$ детектируется выпрямителем и огибающая этой зависимости платой сбора данных преобразуется (с частотой дискретизации несколько МГц) в массив дискретных выборок и передается в компьютер.

Неоднородность токораспределения в структуре МБТ проявляется в виде резкого возрастания крутизны зависимости $\tilde{U}_{ЭБ}(U_{КБ})$.

Заметим, что составляющая сигнала, обусловленная внутренней электрической обратной связью по напряжению $\tilde{U}_{ЭБ}^{эл}$, может быть исключена путем измерения $\tilde{U}_{ЭБ}$ на высокой частоте $\omega \geq 10^2 \Omega$. Однако при достаточно больших эмиттерных токах ($I_Э > 0,3 \cdot I_{max}$, где I_{max} – максимально допустимый ток для данного типа транзисторов), при которых обычно работают МБТ, тепловая составляющая $\tilde{U}_{ЭБ}^T$ будет во много раз превышать электрическую составляющую $\tilde{U}_{ЭБ}^{эл}$ и влиянием $\tilde{U}_{ЭБ}^{эл}$ можно пренебречь.

В модернизированном варианте установки параметры режима измерения могут задаваться в довольно широких пределах. Значение эмиттерного тока можно задавать в диапазоне от 0,1 до 1,5 А; максимальное коллекторное напряжение $U_{КМ}$ может устанавливаться в диапазоне от 10 до 100 В, длительность $T_{изм}$ управляющего импульса можно регулировать в пределах от 0,5 до 5 с. Амплитуду переменной составляющей коллекторного напряжения можно задавать в диапазоне от 0,1 до 2 В, а частоту – в диапазоне от 30 до 80 Гц.

В установке предусмотрена возможность задания до подачи линейно нарастающего коллекторного напряжения небольшого начального значения коллекторного

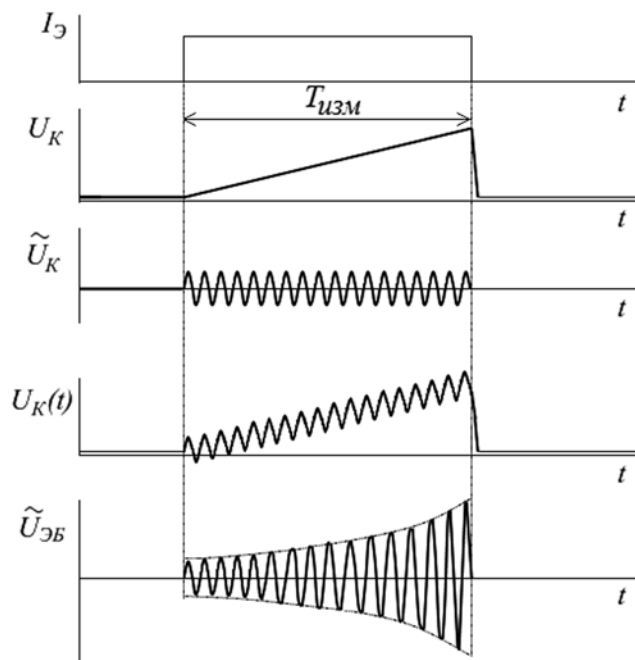


Рис. 2. Формы сигналов, поясняющие способ измерения напряжения шнурования тока

напряжения (пьедестала) $U_{К0}$ в пределах до 20 В.

Специализированная компьютерная программа позволяет вычислить напряжение локализации $U_{КЛ}$ по результатам измерения $\tilde{U}_{ЭБ}(U_{КБ})$ на начальном участке до появления локализации тока. Алгоритм расчета напряжения локализации $U_{КЛ}$ разработан на основе модели, развитой авторами в [14]. Согласно этой модели, для случая дефектов электрофизической природы, которые являются наиболее опасными с точки зрения неустойчивости токораспределения, зависимость $\tilde{U}_{ЭБ}(U_{КБ})$ описывается формулой:

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

где $\tilde{U}_{ЭБ}(0)$ – амплитуда переменного напряжения на эмиттерном переходе при коллекторном напряжении U_K , близком к нулю,

b – безразмерный параметр, зависящий от величины дефекта в структуре транзистора, причем, как правило, $b \ll 1$.

Вид характерной зависимости $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$ приведен на рисунке 3.

При трех неизвестных, входящих в выражение (2), значение $U_{КЛ}$ определяется по трем отсчетам зависимости $\tilde{U}_{ЭБ}(U_{КБ})$ при трех различных коллекторных напряжениях, существенно меньших $U_{КЛ}$ (то есть, по существу, путем экстраполяции функции (2)). Согласно предложенному в [13, 15] алгоритму, измеряют амплитуду $\tilde{U}_{ЭБ}(U_{К0})$, $\tilde{U}_{ЭБ}(U_{К1})$, $\tilde{U}_{ЭБ}(U_{К2})$ переменной составляющей напряжения на эмиттере контролируемого транзистора при трех значениях напряжения $U_{К0}$, $U_{К1}$, $U_{К2}$ на коллекторе контролируемого транзистора, и искомое напряжение локализации вычисляют по формуле:

$$U_{КЛ} = \frac{U_{К2} - mU_{К1}}{1 - m}, \quad (3)$$

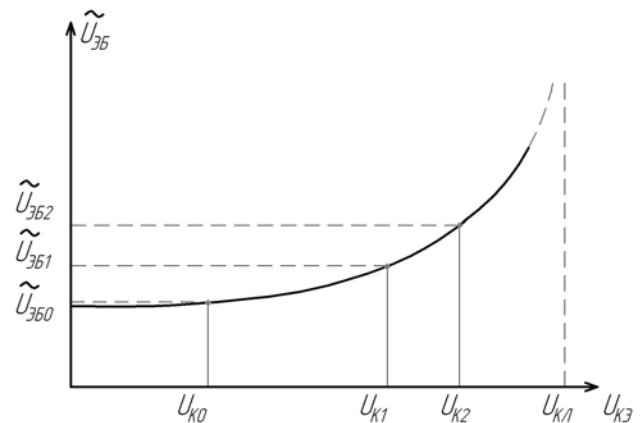


Рис. 3. Характерный вид зависимости $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$ для МБТ со шнурованием тока

где $m = \sqrt{\frac{a1-1}{a2-1}}$,

$$a1 = \tilde{U}_{ЭБ}(U_{K1}) / \tilde{U}_{ЭБ}(U_{K0}),$$

$$a2 = \tilde{U}_{ЭБ}(U_{K2}) / \tilde{U}_{ЭБ}(U_{K0}).$$

На практике, в качестве $\tilde{U}_{ЭБ}(0)$ можно принять значение переменной составляющей напряжения на эмиттере при $U_{K0} \ll U_{KЛ}$ на «плоском» участке характеристики. Относительную погрешность такого приближения можно оценить по формуле $\delta_{U0} \approx 2bU_{K0}/U_{KЛ}$. Для дальнейших расчетов в качестве приближения к $\tilde{U}_{ЭБ}(0)$ было взято значение $\tilde{U}_{ЭБ}(5B)$ при $U_{K0} = 5B$.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА СПОСОБА

Проверка способа проводилась на МБТ типа КТ903, которые могут находиться в режиме «горячего пятна» некоторое время без катастрофического отказа. Зависимости $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$ для двух образцов МБТ при эмиттерном токе 0,5 А, максимальном коллекторном напряжении $U_{KM} = 60$ В, амплитуде переменной составляющей коллекторного напряжения 1 В, частоте 50 Гц и времени нарастания коллекторного напряжения $T_{изм} = 1$ с приведены на рисунке 4.

Примерно у 30% исследованных МБТ наблюдался режим «горячего пятна», которому соответствует ярко выраженный максимум на зависимости $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$. Коллекторное напряжение, соответствующее максимуму зависимости $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$, принималось за напряжение локализации тока. В таблице 1 приведены результаты измерения напряжения шнурования при токе 0,5 А для нескольких образцов МБТ типа КТ903А по максимуму зависимости $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$ и расчета этого значения по измеренным значениям $\tilde{U}_{ЭБ}$ на начальном участке зависимостей $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$ и $U_{K0} = 5$ В, $U_{K1} = 30$ В, $U_{K2} = 35$ В до наступления шнурования тока.

Таблица 1

Значения напряжения локализации тока транзисторов КТ903А, измеренные и рассчитанные по зависимостям

$$\tilde{U}_{ЭБ}(U_K) \text{ при токе } 0,5 \text{ А}$$

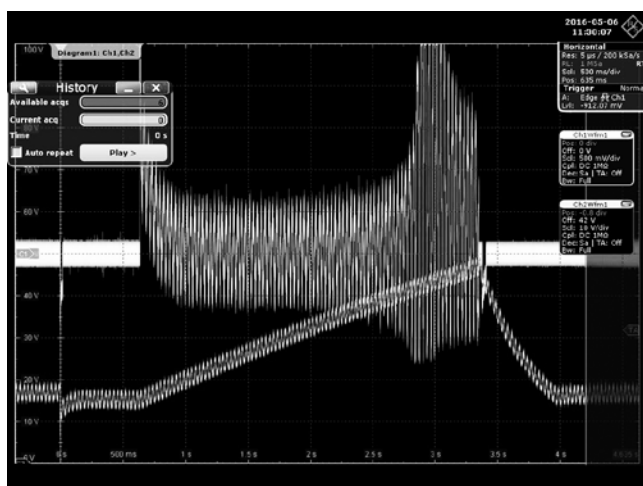
Номер МБТ	Расчетное значение $U_{KЛ}$, В	Значение $U_{KЛ}^И$ по максимуму $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$, В	Абсолютная разница значений $\Delta U = U_{KЛ} - U_{KЛ}^И$, В
281	44,8	43,0	1,8
271	45,4	43,5	1,9
243	38,4	36,4	2,0
316	36,7	36,0	0,7
452	38,3	37,0	1,3
737	∞	∞	–
418	∞	∞	–
454	48,6	47,8	0,8
264	45,0	42,8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

Таблица 2

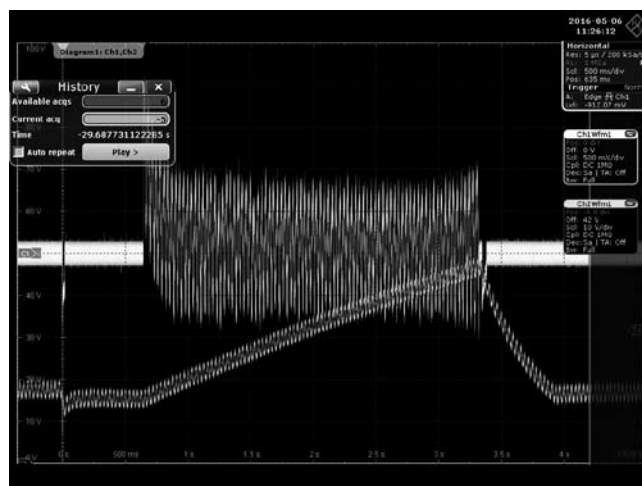
Значения напряжения локализации тока транзисторов КТ805А, измеренные и рассчитанные по зависимостям

$$\tilde{U}_{ЭБ}(U_K) \text{ при токе } 0,7 \text{ А}$$

Номер МБТ	Расчетное значение $U_{KЛ}$, В	Значение $U_{KЛ}^И$ по максимуму $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$, В	Абсолютная разница значений $\Delta U = U_{KЛ} - U_{KЛ}^И$, В
1	50,4	48,0	2,4
3	42,9	41,2	1,7
7	48,0	46,7	1,3
10	∞	∞	–
12	∞	∞	–
13	49,1	48,0	1,1
14	51,8	49,8	2,0
18	46,0	45,2	0,8
19	46,7	45,1	1,6
20	44,5	43,3	1,2
22	45,6	44,9	0,7



а)



б)

Рис. 4. Зависимости $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$ транзисторов КТ903А при эмиттерном токе 0,5 А и максимальном коллекторном напряжении $U_{Kmax} = 60$ В: а – без образования «горячего пятна»; б – с образованием «горячего пятна»

В таблице 2 приведены аналогичные результаты измерения $U_{КЛ}$ для нескольких образцов МБТ типа КТ805А при токе 0,7 А и расчета значения $U_{КЛ}$ по значениям $\tilde{U}_{ЭБ}$, измеренным при $U_{К0} = 5$ В, $U_{К1} = 38$ В, $U_{К2} = 40$ В.

Значения напряжения локализации, рассчитанные по измеренным значениям на начальном участке зависимостей $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$, оказались несколько больше, чем наблюдаемые по максимуму на характеристиках $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$. Одна из возможных причин такого отклонения – уменьшение напряжения локализации с ростом температуры. Эмиттерный переход МБТ нагревается практически линейно с ростом коллекторного напряжения, и расчетное значение $U_{КЛ}$ определяется при меньшей температуре, чем температура, при которой реально наступает шнурование. Эту систематическую погрешность можно оценить и учесть при необходимости более точного определения $U_{КЛ}$.

Для производственного контроля и разбраковки МБТ по устойчивости к шнурованию тока точность метода вполне приемлема.

Для обеспечения неразрушающего контроля в [16] предложено определять относительное изменение крутизны характеристики $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$. Алгоритм определения напряжения локализации по этому способу состоит в том, что, измерив начальную амплитуду $\tilde{U}_{ЭБ}(0)$ переменной составляющей напряжения на эмиттере контролируемого транзистора при напряжении на коллекторе, близком к нулю, определяют значения $U_{К1}$ и $U_{К2}$ коллекторного напряжения, при которых амплитуда $\tilde{U}_{ЭБ}(t)$ переменной составляющей напряжения на эмиттере становится равной $(1+k1)\tilde{U}_{ЭБ}(0)$ и $(1+k2)\tilde{U}_{ЭБ}(0)$ соответственно, где $k1$ и $k2$ – заданные коэффициенты превышения начальной амплитуды $\tilde{U}_{ЭБ}(0)$, причем $k2 > k1$, и искомое напряжение локализации тока вычисляют по формуле:

$$U_{КЛ} = \frac{cU_{К2} - U_{К1}}{c - 1},$$

где $c = \sqrt{\frac{k2}{k1}}$.

При достижении критического значения крутизны характеристики $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$ коллекторное напряжение отключается, что делает метод безопасным и неразрушающим.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная установка для измерения напряжения шнурования тока в МБТ позволяет определять напряжение шнурования тока в транзисторной структуре по крутизне зависимости $\tilde{U}_{ЭБ}(U_{КБ})$ в широком диапазоне рабочих токов и напряжений.

Алгоритмы косвенного определения напряжения шнурования тока в транзисторной структуре позволяют

определять данный параметр по измеренным значениям на начальном участке указанных зависимостей с погрешностью не более 6% без попадания контролируемого МБТ в режим «горячего пятна».

Разработанные средства могут быть использованы на выходном контроле качества предприятий-производителей МБТ и на входном контроле предприятий-производителей изделий радиоэлектроники с использованием ВЧ- и СВЧ-биполярных транзисторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Application Note AN1628/D. Understanding Power Transistors Breakdown Parameters // March, 2017 – Rev. 3. – Semiconductor Components Industries, LLC.
2. Мощные высокочастотные транзисторы / Ю.В. Завражнов, Е.З. Мазель [и др.]; под ред. Е.З. Мазеля. – М. : Радио и связь, 1985.– 176 с.
3. Сергеев В.А. Горячие пятна в мощных биполярных транзисторах // Петербургский журнал электроники. – 1997. – Вып. 2.– С. 40–42.
4. Liu W. Failure mechanisms in AlGaAs/GaAs power heterojunction bipolar transistors // IEEE Trans. on Electron Devices. 1996. Iss. 2. pp. 220–227.
5. MIL-STD/MIL-STD-750-3.– URL: <https://snebulos.mit.edu/projects/reference/MIL-STD/MIL-STD-750-3.pdf/>.
6. Pat. US 20080228415 A1, Int. Cl. G 01 R 19/00. Semiconductor testing instrument to determine safe operating area / P. Ladbroke et al. – 11/370588 ; Appl. 08.03.2006; Pub. 18.09.2008.
7. Рабодзей А.Н. Исследование динамики локализации тока в мощных транзисторах // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1981. – Вып. 2. – С. 24–28.
8. Загрязский Н.В., Шерстюк В.А., Студенков Н.И. Исследование границ области безопасной работы мощных транзисторов для активных импульсных режимов // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1985. – № 2. – С. 35–41.
9. Гусев В.А., Капранов И.Ю. Неразрушающий метод контроля образования «горячих» областей в структуре транзистора // Вестник СевГТУ. Сер. Информатика, электроника, связь : сб. науч. тр. – Севастополь, 2008. – Вып. 93. – С. 106–109.
10. Гусев В.А., Капранов И.Ю. Стенд неразрушающих испытаний транзисторов // Вісник СевНТУ. Вип. 101 : Информатика, електроніка, зв'язок: зб. наук. пр. – Севастополь : Вид-во СевНТУ, 2010. – С. 80–84.
11. Синкевич В.Ф. Физические основы обеспечения надежности мощных биполярных и полевых транзисторов // Электронная промышленность. – 2003. – № 2. – С. 232–244.
12. А. с. 619877 СССР, МКИ G 01 R 31/26. Способ отбраковки мощных транзисторов / Б.С. Кернер, Е.А. Рубаха, В.Ф. Синкевич. – 2408855/1825 ; заявл. 01.10.76 ; опубл. 15.08.78, Бюл. № 30.

13. Пат. 2537519 Российская Федерация, МПК G01R31/26. Способ определения напряжения локализации тока в мощных ВЧ и СВЧ биполярных транзисторах / Сергеев В.А., Дулов О.А., Куликов А.А. – № 2013134095/28 ; заявл. 19.07.2013 ; опубл. 10.01.2015, Бюл. № 1.

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

15. 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.

16. Пат. 2616871 Российская Федерация, МПК G01R31/26. Способ определения напряжения локализации тока в мощных ВЧ и СВЧ биполярных транзисторах / Сергеев В.А., Куликов А.А. – № 2015146219 ; заявл. 27.10.2015 ; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.

REFERENCES

1. Application Note AN1628/D. Understanding Power Transistors Breakdown Parameters. *Semiconductor Components Industries, LLC*, March, Rev. 3, 2017.

2. Zavrazhnov Iu.V., Mazel E.Z. et al. *Moshchnye vysokochastotnye tranzistory*. Pod red. E.Z. Mazelia [High-Power and High-Frequency Transistors. Edited by E.Z. Mazel]. Moscow, Radio i sviaz Publ., 1985. 176 p.

3. Sergeev V.A. Goriachie piatna v moshchnykh bipoliarnykh tranzistorakh [Hot Spots on High-Power Bipolar Transistors]. *Peterburgskii zhurnal elektroniki* [St. Petersburg Journal of Electronics], 1997, iss. 2, pp. 40–42.

4. Liu W. Failure Mechanisms in AlGaAs/GaAs Power Heterojunction Bipolar Transistors. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 1996, iss. 2, pp. 220–227.

5. MIL-STD/MIL-STD-750-3. Available at: <https://snubulos.mit.edu/projects/reference/MIL-STD/MIL-STD-750-3.pdf/>.

6. Ladbroke P. et al. *Semiconductor Testing Instrument to Determine Safe Operating Area*. Pat. US 20080228415 A1, Int. Cl. G 01 R 19/00. 11/370588. Appl. March 08, 2006. Pub. September 18, 2008.

7. Rabodzei A.N. Issledovanie dinamiki lokalizatsii toka v moshchnykh tranzistorakh [Operational Analysis of Electrical Current Localization in High-Power Transistors]. *Elektronnaia tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronics. Ser. 2. Semiconductor Devices], 1981, iss. 2, pp. 24–28.

8. Zagriazhskii N.V., Sherstiuk V.A., Studenkov N.I. Issledovanie granits oblasti bezopasnoi raboty moshchnykh tranzistorov dlia aktivnykh impulsnykh rezhimov [Research of Limits of Safe Operating Areas of High-Power Transistors for Active Pulse Modes]. *Elektronnaia tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronics. Ser. 2. Semiconductor Devices], 1985, no. 2, pp. 35–41.

9. Gusev V.A., Kapranov I.Iu. Nerazrushaiushchii metod kontroliia obrazovaniia "goriachikh" oblastei v strukture tranzistora [Non-Destructive Method for Testing the Hot Spots in the Transistor Structure]. *Vestnik SevGTU. Ser. Informatika, elektronika, sviaz* [Proc. of Sevastopol State Technical University. Informatics, Electronics, and Communications Series]. Sevastopol, 2008, iss. 93, pp. 106–109.

10. Gusev V.A., Kapranov I.Iu. Stend nerazrushaiushchikh ispytanii tranzistorov [Non-Destructive Transistor Testing Table]. *Visnik SevNTU. Informatika, elektronika, zviazok* [Proc. of Sevastopol State Technical University. Informatics, Electronics, and Communications Series]. Sevastopol, Vidvo SevNTU Publ., 2010, iss. 101, pp. 80–84.

11. Sinkevich V.F. Fizicheskie osnovy obespecheniia nadezhnosti moshchnykh bipoliarnykh i polevykh tranzistorov [Reliability Physics of Power Bipolar and Field-Effect Transistors]. *Elektronnaia promyshlennost* [Electronics Manufacturing Industry Journal], 2003, no. 2, pp. 232–244.

12. Kerner B.S., Rubakha E.A., Sinkevich V.F. *Sposob otbrakovki moshchnykh tranzistorov Avtorskoe svid-vo* [Screening Procedures of Power Transistors. Certificate of Authorship] 619877 USSR, MKI G 01 R 31/26. 2408855/1825. Appl.: October 01, 1976. Publ.: August 15, 1978. Bull. no. 30.

13. Russian Federation Patent 2537519, Int.Cl.: G01R31/26. *Sposob opredeleniia napriazheniia lokalizatsii toka v moshchnykh VCh i SVCh bipoliarnykh tranzistorakh* [A Method for Determining Voltage of Current Localization in High-Frequency and Microwave Transistors]. Inventors: V.A. Sergeev, Dulov O.A., Kulikov A.A. No. 2013134095/28. Appl.: July 19, 2013. Publ.: January 10, 2015. Bull. No. 1.

14. Sergeev V.A., Dulov O.A., Kulikov A.A. Kontrol' odnorodnosti tokoraspredeleeniia v bipoliarnykh tranzistorakh po zavisimosti koeffitsienta vnutrennei obratnoi svyazi ot kollektornogo napriazheniia [Control of Uniformity Current Distribution in Bipolar Transistors by the Dependence of Self-Feedback Factor from Collector Voltage]. *Izvestiia vuzov. Elektronika* [Proc. of Higher Educational Institutions. Electronics], 2009, no. 2, pp. 10–16.

15. Sergeev V.A., Kulikov A.A. Nerazrushaiushchii metod opredeleniia napriazheniia shnurovaniia toka v moshchnykh VCh i SVCh bipoliarnykh tranzistorakh [Non-Destructive Method for Determination of Current Voltage in Power RF and Microwave Bipolar Transistors]. *Izvestiia vuzov. Elektronika* [Proc. of Higher Educational Institutions. Electronics], 2014, no. 4, pp. 46–53.

16. Russian Federation Patent 2616871, Int.Cl.: G01R31/26. *Sposob opredeleniia napriazheniia lokalizatsii toka v moshchnykh VCh i SVCh bipoliarnykh tranzistorakh* [A Method for Determining Voltage of Current Localization in Power RF and Microwave Transistors]. Inventors: V.A., Sergeev, A.A. Kulikov. No. 2015146219. Appl.: October 27, 2015. Publ.: January 10, 2017, Bull. No. 1.