

ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРОЧНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ МОЩНЫХ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ПО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

© 2004 В.А. Сергеев

Ульяновское отделение Института радиотехники и электроники РАН

Приведены выборочные распределения нескольких типов серийно выпускаемых мощных биполярных транзисторов по величине теплового сопротивления переход-корпус и напряжения локализации тока. Методом кривых Пирсона определены типы и параметры выравнивающих распределений. Рассмотрены факторы, определяющие трансформацию распределений транзисторов по теплофизическим параметрам при изменении режимов их измерения. Обсуждаются возможности отбраковки дефектных приборов по теплофизическим параметрам.

Введение

Для оценки качества мощных биполярных транзисторов (МТ) на различных этапах их изготовления и применения широко используются такие теплофизические параметры (ТП) как тепловое сопротивление переход-корпус $R_{ТП-К}$ и напряжение локализации (шнурования) тока $U_{КЛ}$ [1–5]. Указанные параметры не только определяют предельно допустимые электрические режимы работы приборов в условиях эксплуатации, но и чувствительны к различного рода неоднородностям распределения плотности мощности и дефектам в структуре и конструкции прибора. Из-за наличия технологических дефектов и разброса конструкционно-топологических параметров приборов ТП серийно выпускаемых МТ существенно отличаются от расчетных и имеют значительный разброс от образца к образцу. Исследование закономерностей и особенностей трансформации распределений МТ по ТП при изменении режимов их измерения представляет интерес как для оценки реальных допусков на предельные режимы работы приборов, так и для определения оптимальных режимов и критериев отбраковки дефектных приборов по величине ТП.

Распределение мощных транзисторов по величине теплового сопротивления

Ранее [3, 4] по результатам измерения теплового сопротивления переход-корпус на достаточно представительных выборках мощных НЧ и ВЧ транзисторов нами было показано, что характер их распределения по величине $R_{ТП-К}$ изменяется при изменении режима измерения $R_{ТП-К}$: с увеличением коллекторного напряжения при постоянном коллекторном токе на гистограммах распределений появляется четко выраженный локальный минимум и распределение приобретает двухмодальный характер.

На рис.1. в качестве примера представлены гистограммы распределений выборки транзисторов КТ803А (153 шт.) по величине $R_{ТП-К}$, измеренного при $I_K=1$ А и двух значениях коллекторного напряжения $U_{КЭ}=10$ В и $U_{КЭ}=30$ В. При напряжении 30 В проявляется двухмодальность распределения; во вторую моду попадает примерно 35% приборов. У некоторых транзисторов, попавших во вторую моду распределения, путем наблюдения электролюминесцентного излучения в диодном и активном режиме включения были обнаружены аномалии токораспределения, аналогичные выявленным

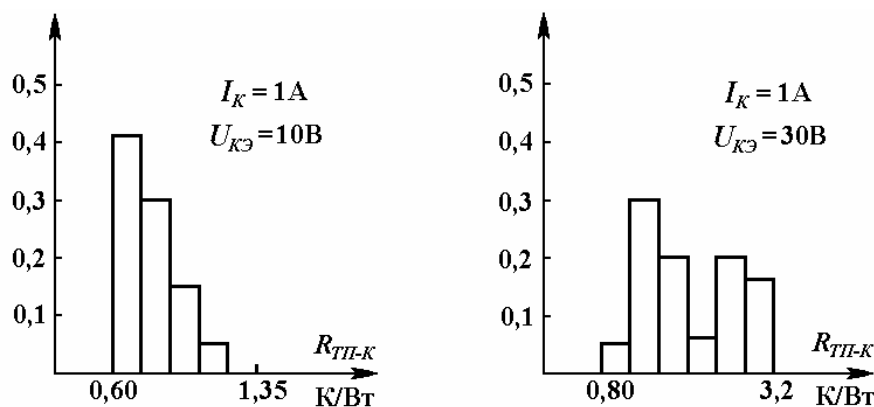


Рис.1. Распределение транзисторов типа КТ 803А по величине теплового сопротивления переход-корпус

в [6] и обусловленные дефектами металлизации. У другой части приборов из второй моды наблюдались дефекты типа “пустот” под активной областью структуры в слое припоя между кристаллом и компенсирующей накладкой. Таким образом, двухмодальность распределения свидетельствует о проявлении неоднородности распределения плотности мощности и температуры в структурах транзисторов, попавших во вторую моду.

С целью количественной оценки влияния сопротивления металлизации на величину теплового сопротивления у 10 приборов типа КТ803А зондовым методом с помощью измерительного моста постоянного тока Е2-12 (с погрешностью не более 20 %) измерялось сопротивление дорожек эмиттерной металлизации $R_{ЭМ}$. Распределение дорожек по величине сопротивления (рис. 2.) близко к нормальному со средним значением 0,32 Ом (расчетное значение $R_{ЭМ} = 0,16 \text{ Ом} \pm 0,4 \text{ Ом}$) и среднеквадратичным отклонением $\sigma_{\bar{R}_{ЭМ}} \approx 0,14 \text{ Ом}$. Такой разброс сопротив-

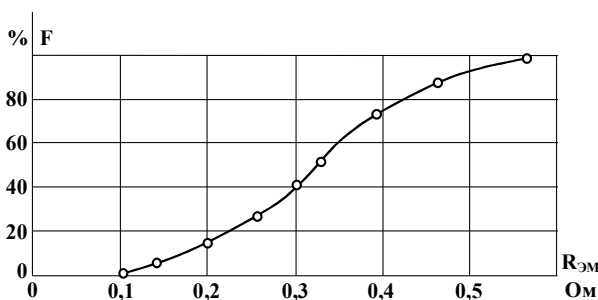


Рис. 2. Интегральное распределение дорожек эмиттерной металлизации транзисторов типа КТ803А по величине сопротивления.

лений дорожек металлизации обусловлен вероятнее всего технологическим разбросом толщины слоя золота.

При увеличении сопротивления дорожек металлизации эффективная площадь эмиттера уменьшается:

$$S_{ЭФФ} \sim S_{Э} (1 + R_{ЭМ} I_{Э} / 3\varphi_T)^{-1},$$

где φ_T -тепловой потенциал, и, соответственно, тепловое сопротивление переход-корпус прибора возрастает [3]. Коэффициент корреляции между усредненным по структуре сопротивлением металлизации $\bar{R}_{ЭМ}$ и тепловым сопротивлением $R_{ТП-К}$, измеренным при повышенном коллекторном напряжении составил 0,52 и значимо отличается от нуля с вероятностью 0,9. Несмотря на малость выборки, значительную погрешность измерения и существенный разброс сопротивления дорожек в пределах структуры, можно утверждать, что примерно у 50% приборов этого типа повышенное тепловое сопротивление определяется большим сопротивлением дорожек металлизации.

В развитие ранее проведенных исследований были выполнены измерения теплового сопротивления переход-корпус мощных генераторных ВЧ транзисторов 2Т 921А и 2Т 912Б. Измерения проводилось на установке УИТП [7] с погрешностью не более 10%.

Гистограммы распределений транзисторов КТ 921А (N=64 шт.) по величине теплового сопротивления переход-корпус, изме-

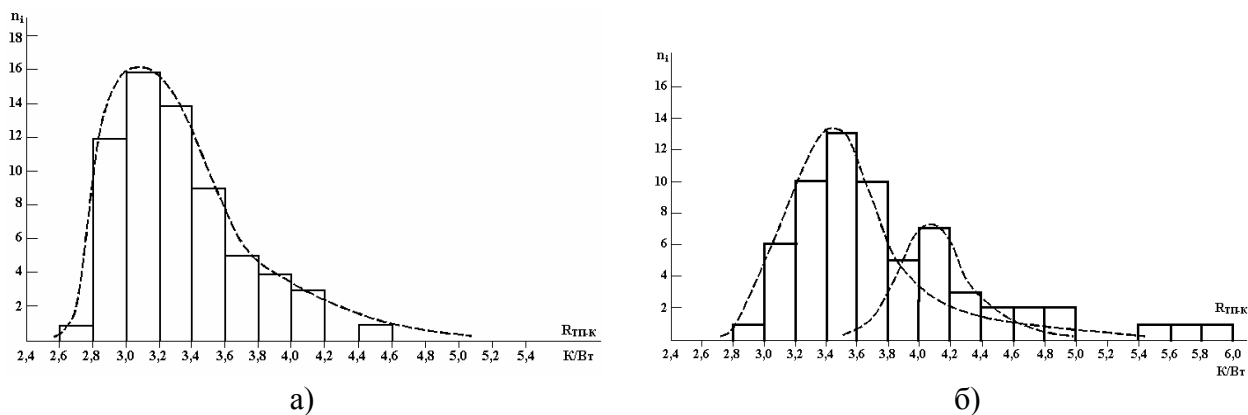


Рис. 3. Распределение транзисторов 2Т921А по величине теплового сопротивления:

а) $I_{Э} = 0,5 \text{ А}$, $U_{КБ} = 30 \text{ В}$; б) $I_{Э} = 0,5$, $U_{КБ} = 40 \text{ В}$.

ренного при эмиттерном токе $I_{Э} = 0,5 \text{ А}$ и двух коллекторных напряжениях: $U_{КБ1} = 30 \text{ В}$ и $U_{КБ2} = 40 \text{ В}$, приведены на рис.3. При $U_{КБ} = 40 \text{ В}$ проявляется двухмодальность распределения; во вторую моду попадает $\sim 34\%$ приборов. При увеличении коллекторного напряжения до 50 В у большей части приборов, попавших во вторую моду, появляется неустойчивость токораспределения и образуются “горячие пятна” [2].

Гистограммы распределений транзисторов 2Т912Б ($N=27$ шт.) по величине $R_{ТПК}$, измеренного при $I_{Э} = 0,5 \text{ А}$ и $U_{КБ1} = 40 \text{ В}$ и $U_{КБ2} = 50 \text{ В}$, показаны на рис 4. При $U_{КБ} = 50 \text{ В}$ на распределении также проявляется вторая мода, в которую попадает

$\sim 33\%$ приборов.

Для количественной оценки изменений характеристик распределения транзисторов по величине теплового сопротивления при изменении режимов измерения использовался один из наиболее общих методов описания эмпирических выборочных распределений – метод распределений (кривых) Пирсона [8], который позволяет по статистикам ряда выборочного распределения определить тип (один из 7-ми) распределения и функцию выравнивающих частот $\tilde{n}(x)$ в виде $f^T(x) = \tilde{n}(x) / \tilde{n}_0$, где индекс T соответствует типу распределения Пирсона, \tilde{n}_0 - частота появления наиболее частого значения исследуемой величины \hat{X} в ряде, $x = (X - \hat{X}) / c$, X - текущее значение величины, $c = (X_{\max} - X_{\min}) / k$ - величина

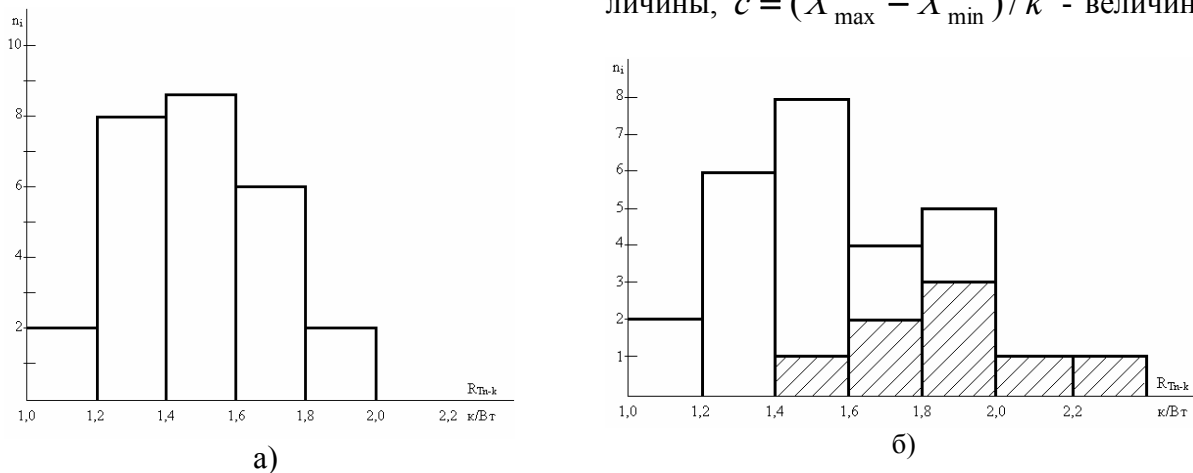


Рис. 4. Распределение транзисторов 2Т912А по величине теплового сопротивления:

а) $I_{Э} = 0,5 \text{ А}$, $U_{КБ} = 40 \text{ В}$; б) $I_{Э} = 0,5$, $U_{КБ} = 50 \text{ В}$.

разряда выборочного распределения, X_{\max} и X_{\min} - максимальное и минимальное значения исследуемой величины из ряда выборочного распределения, k - число разрядов (интервалов), на которые разбивается ряд.

При проявлении двухмодальности функция $F(x)$ выравнивающего распределения представляется в виде суммы функций $f_1^{T1}(x)$ и $f_2^{T2}(x)$, описывающих первую (основную) и вторую (побочную) моды распределения соответственно:

$$F(x) = f_1^{T1}(x) + f_2^{T2}(x)$$

При расчете параметров двухмодальных рас-

пределений частота разряда, разделяющего моды, n_i^{\min} делилась между модами в пропорции N_1 / N_2 , где N_1 - число приборов, попадающих в первую моду, N_2 - число приборов, попадающих во вторую моду, определялись по формулам

$$N_1 = \sum_{j=1}^{i-1} n_j / (1 - n_i^{\min} / N),$$

$$N_2 = \sum_{j=i+1}^k n_j / (1 - n_i^{\min} / N).$$

Результаты расчетов для исследованных типов транзисторов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Выравнивающие распределения Пирсона выборочных рядов распределений транзисторов по тепловому сопротивлению переход-корпус

Тип транзистора	Тип и функция выравнивающего распределения	
	Одномодальное распределение	Двухмодальное распределение
2Т912Б	Основная мода -тип I $\tilde{n}(x) = 9,4 \left(1 + \frac{x}{2,8}\right)^{1,8} \left(1 - \frac{x}{3,3}\right)^{3,3}$ $\bar{R}_{\text{П-К}} = 1,4 \text{ К/Вт}; \sigma_{R_T} = 0,21 \text{ К/Вт}$	Первая мода - тип I $\tilde{n}(x) = 8,3 \left(1 + \frac{x}{3,8}\right)^{10,8} \left(1 - \frac{x}{11,7}\right)^{33,5}$ $\bar{R}_{\text{П-К}}^I = 1,3 \text{ К/Вт}; \sigma_{R_T} = 0,2 \text{ К/Вт}$ Вторая мода - тип I $\tilde{n}(x) = 7,5 \left(1 + \frac{x}{3,8}\right)^{8,5} \left(1 - \frac{x}{5,6}\right)^{16,6}$ $\bar{R}_{\text{П-К}}^{II} = 1,8 \text{ К/Вт}; \sigma_{R_T} = 0,21 \text{ К/Вт}$
	Основная мода -тип I $\tilde{n}(x) = 14,4 \left(1 + \frac{x}{1,1}\right)^{0,26} \left(1 - \frac{x}{9,8}\right)^{2,4}$ $\bar{R}_{\text{П-К}} = 3,2 \text{ К/Вт}; \sigma_{\bar{R}_T} = 0,35 \text{ К/Вт}$	Первая мода -тип I $\tilde{n}(x) = 11,4 \left(1 + \frac{x}{3,8}\right)^{1,6} \left(1 - \frac{x}{2,7}\right)^{1,1}$ $\bar{R}_{\text{П-К}}^I = 3,3 \text{ К/Вт}; \sigma_{\bar{R}_T} = 0,28 \text{ К/Вт}$ Вторая мода - тип I $\tilde{n}(x) = 3,1 \left(1 + \frac{x}{2,2}\right)^{0,8} \left(1 - \frac{x}{2,2}\right)^{0,8}$ $\bar{R}_{\text{П-К}}^{II} = 4,3 \text{ К/Вт}; \sigma_{\bar{R}_T} = 0,46 \text{ К/Вт}$

Таблица 2. Коэффициент эффективности отбраковки при различных отбраковочных уровнях

Отбраковочный уровень $R_{ТП-К}^{ОТБР}$, К/Вт	1,6	1,7	1,8
Коэффициент эффективности отбраковки, $K_{ЭФФ}$	2,2	2,6	2,4

Основная мода распределения при небольших коллекторных напряжениях (то есть при квазиоднородном распределении плотности мощности и температуры в структуре) для исследованных транзисторов описывается кривой распределения Пирсона I-го типа (штриховая линия на рис.3а). Этот тип распределения характерен для физических величин ограниченных снизу и сверху. При увеличении коллекторного напряжения кривая выравнивающего распределения основной моды не меняет типа, но трансформируется к виду, схожему с нормальным распределением (штриховая линия на рис. 3б). При этом среднее значение, дисперсия и центральная частота выравнивающих распределений основной моды изменяются незначительно (в пределах погрешности измерения), тогда как показатели степени и размах распределений изменяются более существенно.

Вторая мода описывается распределениями Пирсона I типа со смещенным средним и большей дисперсией (рис. 3.б). Характер распределения приборов в этой моде определяется проявлением дефектов и механизмов неоднородного распределения плотности мощности и температуры в приборных структурах.

Дефекты приборов, попадающих во вторую моду, очевидно повышают вероятность отказов этих приборов в условиях эксплуатации и при испытаниях. Это подтверждается результатами электротермотренировки транзисторов типа 2Т 912Б в течение 24 часов при $U_K=45$ В, $I_Э=1$ А и температуре корпуса $T_K=80^\circ\text{C}$: один прибор отказал в результате проплавления базы, а у 7 приборов зафиксировано значительное (более 10%) изменение электрических параметров – об-

ратного тока коллекторного перехода и коэффициента передачи тока. Все отказавшие (по выбранным критериям) приборы попали на край распределения по тепловому сопротивлению (на рис.4б показаны штриховкой) при повышенном коллекторном напряжении. Отбраковка дефектных приборов может проводиться по величине теплового сопротивления $R_{ТП-К}$, измеренного при повышенных значениях коллекторного напряжения. Эффективность отбраковки оценивается коэффициентом $K_{ЭФФ} = (n_{ОТК}^Б / N_Б) (N / n_{ОТК})$, где N - общее число приборов в выборке, $N_Б$ - число отбракованных по заданному уровню приборов, $n_{ОТК}$ - общее число приборов отказавших в процессе испытаний, $n_{ОТК}^Б$ - количество отказавших приборов, попадающих в группу отбракованных. Как видно из приведенных расчетов (таблица 2) оптимальным по коэффициенту эффективности оказывается отбраковочный уровень на границе раздела мод.

Распределения транзисторов по параметрам тепловой неустойчивости

Статистические закономерности и особенности распределений транзисторов по величине напряжения локализации тока исследовались на приборах типа КТ903А. Измерения проводились на установке УИТЭП-1МТ [3]. Заметим, что неустойчивость токораспределения наблюдается только в определенном ограниченном диапазоне параметров электрического режима и проявляется не у всех экземпляров приборов.

В [4] приведено интегральное распределение выборки транзисторов типа

КТ903А в количестве $N=290$ штук по величине мгновенной мощности локализации $P_{КЛ} = I_K U_{КЛ}$, измеренной при коллекторных токах $I_{K1} = 0,75\text{ А}$ и $I_{K2} = 0,82\text{ А}$ и при скорости нарастания коллекторного напряжения 300 В/с . У 114 приборов ($\sim 33\%$) при токе $I_{K1} = 0,75\text{ А}$ локализация наступает при напряжении меньше 40 В , то есть при мгновенной мощности меньше предельно допустимой 30 Вт . При токе $I_{K2} = 0,82\text{ А}$ у всех транзисторов “горячее пятно” образуется при большей мощности, что объясняется выравнивающим действием распределенных сопротивлений эмиттера и базы и лишь у 84 приборов локализация наступает при мощности меньше предельно допустимого значения. Для оценки величины распределенных сопротивлений структуры можно использовать разность значений мгновенной мощности $P_{КЛ1}$ и $P_{КЛ2}$, при которой происходит локализация тока в структуре транзистора, измеренных при различных значениях I_{K1} и I_{K2} коллекторного тока:

$$r_n = (P_{КЛ2} - P_{КЛ1}) / (I_{K2} P_{КЛ1} - I_{K1} P_{КЛ2})$$

В [4] было также показано, что в результате электротермотренировки при форсированных режимах отказывали приборы с меньшим значением напряжения локализации. Однако эффективность отбраковки дефектных приборов по этому параметру не превышает 2.

Значительный разброс транзисторов по величине напряжения локализации тока обусловлен как разбросом электрофизических параметров структуры так и наличием дефектов в приборных структурах. С увеличением коллекторного тока, при котором измеряется напряжение локализации тока $U_{КЛ}$, характер распределения транзисторов по величине $U_{КЭЛ}$ изменяется: абсолютный разброс приборов по величине $U_{КЛ}$ увеличивается. Это особенно наглядно видно на рис.5, где приведены интегральные распределения

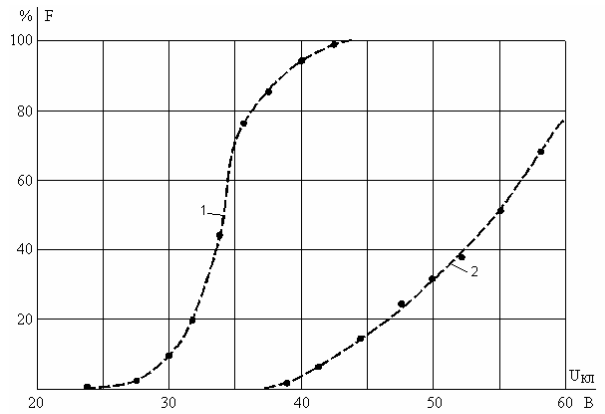


Рис. 5. Интегральное распределение транзисторов КТ903 по напряжению локализации тока: 1 — $I_K = 0,8\text{ А}$; 2 — $I_K = 0,5\text{ А}$

транзисторов типа КТ903А (90 шт.) по величине напряжения локализации тока, измеренного при двух коллекторных токах $I_{K1} = 0,5\text{ А}$ и $I_{K2} = 0,8\text{ А}$. При выборочное среднее значение напряжения локализации составило $\bar{U}_{КЛ} \approx 34\text{ В}$, а среднеквадратическое отклонение среднего $\sigma_{\bar{U}_{КЛ}} \approx 3\text{ В}$; при $I_{K2} = 0,5\text{ А}$ — $\bar{U}_{КЛ} \approx 55\text{ В}$ и $\sigma_{\bar{U}_{КЛ}} \approx 6\text{ В}$. Относительный разброс напряжения локализации изменяется заметно слабее. Такое изменение характера распределения определяется влиянием распределенных сопротивлений r_n транзисторной структуры: с ростом тока стабилизирующее действие распределенных сопротивлений возрастает и технологический разброс этих сопротивлений проявляется слабее.

Заключение

Приведенные результаты показывают, что при изменении режима измерения характер распределения мощных транзисторов по величине теплового сопротивления переход-корпус изменяется: при увеличении коллекторного напряжения распределение становится двухмодальным. Во вторую моду распределения попадают приборы с неоднородным токораспределением, которое в значительной степени определяются повышенным сопротивлением токоведущей металлизации. Основная мода распределения у исследованных типов приборов при малых коллектор-

ных напряжениях и квазиоднородном токо-распределении описывается кривой распределения Пирсона первого типа, близкой к Джей-кривой. При увеличении коллекторного напряжения тип распределения сохраняется, но кривая распределения трансформируется к виду, сходному с нормальным законом; среднее значение, дисперсия и центральная частота основной моды при этом изменяется незначительно.

Вторая побочная мода описывается распределениями Пирсона I типа, но со смещенным средним, большей дисперсией и размахом.

В качестве уровня отбраковки дефектных приборов рекомендуется выбирать границу раздела мод распределения приборов по величине теплового сопротивления переход-корпус измеренного при повышенных коллекторных напряжениях.

Мощные транзисторы имеют значительный разброс по величине напряжения локализации и, соответственно, мощности локализации тока при фиксированном токе эмиттера. Характер распределения при повышенных токах близок к нормальному. Абсолютный разброс напряжения локализации возрастает с уменьшением тока, что объясняется определяющим влиянием технологического разброса распределенных (стабилизирующих) сопротивлений структуры.

Статья подготовлена в рамках проекта Б0107 ФЦП "Интеграция".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Евдокимова Н.Л., Ежов В.С., Минин В.Ф., Перельман Б.Л.* Оценка качества мощных транзисторов по предельно допустимым и теплофизическим параметрам // *Электронная промышленность*. 2003. №2.
2. *Синкевич В.Ф.* Физические основы обеспечения надежности мощных биполярных и полевых транзисторов // *Электронная промышленность*. 2003. №2.
3. *Сергеев В.А.* Контроль качества мощных транзисторов по теплофизическим параметрам. Ульяновск: УлГТУ, 2000.
4. *Сергеев В.А.* Контроль качества и отбраковка мощных транзисторов по теплофизическим параметрам. Научно-технический калейдоскоп. Ульяновск. 2000. №1.
5. *Сергеев В.А.* Методы и средства измерения тепловых параметров полупроводниковых приборов и интегральных схем // *Электронная промышленность*. 2004. №1.
6. *Буслаев С.Ю., Клейнфельд Ю.С., Синкевич В.Ф.* Влияние дефектов металлизации на предельные режимы работы мощных биполярных транзисторов // *Электронная техника*. Сер.2. "Полупроводниковые приборы". 1990. №2.
7. *Сергеев В.А., Дулов О.А., Широков А.А.* Установка для измерения теплоэлектрических параметров мощных транзисторов // *Петербургский журнал электроники*. 2002. №1.
8. *Митропольский А.Г.* Техника статистических вычислений. М.: Наука, 1971.

THE CHARACTERISTICS AND FEATURES OF POWER BIPOLAR TRANSISTORS SAMPLING DISTRIBUTIONS ON THERMAL PARAMETERS

© 2004 V.A.Sergeev

Ulyanovsk Branch of Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences

There were presented several types of sampling distributions of serial produced power bipolar transistors on junction-case thermal resistance and current localization voltage. The types and parameters of fitted distributions were determined by the Pearson's curves method. The factors determining the distributions transformations on measurement regimes changes are considered. There were proposed certain recommendations on defect devices screening on thermal parameters.