

## КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА МОЩНЫХ ВЧ И СВЧ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ПО ТЕМПЕРАТУРНЫМ ЗАВИСИМОСТЯМ ШУМОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

© 2008 О.А. Дулов, В.А. Сергеев, А.А. Широков

Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники РАН

На основе анализа температурной зависимости флуктуаций рекомбинационной составляющей эмиттерного тока показана и экспериментально подтверждена возможность контроля тепловых параметров мощных биполярных транзисторов по температурным зависимостям низкочастотного шума. В частности, величину теплового сопротивления транзисторов можно определить по величине отношения двух шумовых напряжений, измеренных при двух напряжениях на коллекторе и фиксированном коллекторном токе.

### Введение

Анализ работы мощных транзисторов в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) показывает, что в целях повышения эксплуатационной надежности ответственной РЭА необходимо проводить дополнительный контроль их качества в целях выявления и отбраковки дефектных приборов. При этом необходимо в первую очередь обеспечить выявление дефектов, способствующие развитию локализации тока и локальных перегревов в структуре транзистора. Большинство из таких дефектов можно выявить с помощью шумовых параметров.

Дефекты эмиттерного перехода и контактной металлизации выявляются по однократному измерению уровня шума на частоте 1 кГц при низком коллекторном напряжении и большом токе эмиттера [1]. Транзисторы, уровень шума которых на 2-3 порядка превышает среднестатистическое значение для данного типа транзисторов, являются потенциально ненадежными и подлежат отбраковке.

Дефекты коллекторного перехода выявляются по измерению уровня шума на той же частоте при высоком коллекторном напряжении (0,8 от предельно допустимого) и малом токе коллектора. При этом, распределение транзисторов по уровню шума аппроксимируется суперпозицией двух законов распределения Пирсона 1 типа [2]. Приборы, попадающие во вторую моду распределения, имеют интенсивность отказов на порядок выше по сравнению с приборами первой моды, поэтому в ответственной аппаратуре применяться не могут и подлежат отбраковке.

Оценка величины базового сопротивления

транзистора может быть произведена по отношению шумовых напряжений, измеренных при двух значениях сопротивления генератора [3]. Контроль и классификация по величине этого параметра решается в каждом конкретном случае, исходя из той роли, которую играет базовое сопротивление в разрабатываемой схеме.

Выявление приборов с сильной локализацией тока осуществляется путем измерения уровня шума при двух фиксированных для данного типа транзистора токах. В [4] показано, что отношение шумовых напряжений, измеренных при этих токах, является мерой степени локализации тока в транзисторной структуре.

Важнейшим параметром ВЧ и СВЧ мощных транзисторов, подлежащим контролю, является температура транзисторной структуры в эксплуатационном режиме, поскольку многие деградационные процессы носят активационный характер и срок службы приборов уменьшается с ростом температуры по экспоненциальному закону. Известны различные способы косвенной оценки температуры транзисторной структуры, однако, на наш взгляд, эта задача может быть решена с использованием температурной зависимости шумовых параметров с достоверностью, не уступающей известным методам.

### Анализ шумов кремниевого мощного биполярного транзистора с учетом тепловой обратной связи

Для учета влияния тепловой обратной связи на шумы тока рекомбинации в области пространственного заряда эмиттерного р-

п перехода введем ряд упрощающих предположений. Во-первых, будем считать, что вся мощность выделяется в обратно смещенном коллекторном p-n переходе, при этом температура эмиттерного перехода практически равна температуре коллекторного перехода и определяется выражением

$$T_n = T_0 + R_T \cdot I_K \cdot U_{КЭ}, \quad (1)$$

где  $I_K$  – ток коллектора;  $U_{КЭ}$  – напряжение на коллекторном переходе;  $T_0$  – температура окружающей среды,  $R_T$  – полное тепловое сопротивление прибора.

Во-вторых, будем считать, что транзисторная структура является однородной и состоящей из  $m$  идентичных областей. Изменение тока рекомбинации в эмиттерном переходе, передаваясь в коллекторный переход, вызывает изменение температуры и за счет действия тепловой обратной связи оказывает влияние на эмиттерный ток. С учетом этих предположений флуктуации тока рекомбинации  $I_{рек}$  эмиттерного перехода можно записать в виде:

$$\delta I_{рек} = \frac{\partial I_{рек}}{\partial T} \cdot \delta T + \frac{\partial I_{рек}}{\partial E} \cdot \delta E, \quad (2)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля в эмиттерном переходе, а

$$I_{рек} = \frac{q n_i A}{\tau_t} \cdot \frac{kT_n W_n}{q(\phi_k - U)} \cdot \exp \frac{qU}{2kT_n}, \quad (3)$$

где  $q$  – заряд электрона;  $n_i$  – концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике;  $A$  – площадь перехода;  $\tau_t$  – время жизни носителей на глубоких центрах;  $k$  – постоянная Больцмана;  $W_n$  – ширина p-n перехода;  $\phi_k$  – контактный потенциал;  $U$  – напряжение на переходе.

Из (3) можно записать выражения для

частных производных  $\frac{\partial I_{рек}}{\partial T_n}$  и  $\frac{\partial I_{рек}}{\partial E}$ :

$$\frac{\partial I_{рек}}{\partial T_n} = I_{рек} \left[ \frac{1}{T_n} - \frac{q(\phi_k - EW_n)}{2kT_n^2} \right];$$

$$\frac{\partial I_{рек}}{\partial E} = -I_{рек} \left( \frac{1}{E} + \frac{qW_n}{2kT_n} \right) \quad (4)$$

Приращение температуры  $\delta T_n$  в коллекторном переходе под действием приращения

тока  $\delta I$  в элементарном объеме  $\delta V$  в первом приближении будет равно

$$\delta T_{nj} = U_{КЭ} \cdot \sum_{i=1}^m R_{Tij} \cdot \delta I_i, \quad (5)$$

где  $\{R_{Tij}\}$  – матрица тепловых сопротивлений транзисторной структуры, определяющая тепловую связь между отдельными элементами. В целях упрощения анализа принимаем в дальнейшем  $R_{Tii} = mR_T$ .

Для приращения электрического поля в переходе можно записать:

$$\delta E = - \frac{\delta Q_t \cdot (W_n - x)}{\varepsilon \varepsilon_0 \cdot W_n} \cdot \Delta x, \quad (6)$$

где  $\delta Q_t$  – приращение заряда на глубоких центрах;  $x$  – текущая координата в пределах перехода;  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_0$  – соответственно, диэлектрическая проницаемость среды и вакуума.

Подставляя (6), (5), (4) в (2) определим флуктуации тока рекомбинации в элементарном объеме эмиттерного перехода транзистора:

$$\delta I_{рек}^{\delta V} = -I_{рек} \left\{ 1 - \frac{I_i \cdot U_{КЭ} R_{Tii}}{T_n} \left[ 1 - \frac{q(\phi_k - U)}{2kT_n} \right] \right\}^{-1} x$$

$$\left( \frac{qW_n}{2\varepsilon \varepsilon_0 kT_n} + \frac{W_n - x}{qN_a W_n^2} \right) \cdot \left( \frac{N_t f_t(x)}{\delta V} \right)^{1/2} \cdot q \cdot \exp \left( - \frac{t}{\tau_t} \right) \delta x \quad (7)$$

где  $f_t(x)$  – функция распределения Ферми-Дирака;  $t$  – время;  $N_t$  – концентрация глубоких центров. Применяя к выражению (7) теорему Винера-Хинчина и интегрируя по всей ширине эмиттерного перехода, получим значение среднего квадрата шумового тока эмиттерного перехода за счет процессов рекомбинации:

$$\delta I_w^{-2} = \frac{\sqrt{2} I_{рек}^2 N_t}{A(\varepsilon \varepsilon_0)^{1/2} N_a^{1/2} \omega} \cdot \left[ 1 - \frac{I_K R_T U_{КЭ}}{2T_n} \left( 5 - \frac{q(\phi_k - U)}{kT_n} \right) \right]^2 x$$

$$\left[ \frac{q^{3/2}(\phi_k - U)^{1/2}}{4} - \frac{q^{1/2}}{2(\phi_k - U)^{1/2}} - \frac{kT_n}{4(\phi_k - U)^{3/2} \cdot q^{1/2}} \right] \cdot (\arctg \cot_2 - \arctg \cot_1) \quad (8)$$

Для анализа температурной зависимости флуктуационной составляющей тока рекомбинации рассмотрим входящие в выражение (8) температурнозависимые величины и, прежде всего,  $I_{рек}$ . Согласно (3) рекомбинационный ток изменяется по экспоненциальному закону с влиянием температуры через величину  $n_0$ :

$$n_0 = (N_C N_V)^{1/2} \cdot \exp(-E_g / kT_n), \quad (9)$$

где  $n_0$  – равновесная концентрация электронов;  $N_C$   $N_V$  – соответственно, эффективные

плотности состояний в зоне проводимости и валентной зоне;  $E_g$  – ширина запрещенной зоны. Постоянная времени  $\tau_t$  релаксации электронов на глубоком уровне определяется выражением:

$$\tau_t = \frac{1 - f_t(x)}{C_n \cdot n_l}, \quad (10)$$

где  $C_n$  – вероятность захвата электрона ловушкой;  $n_l$  – концентрация электронов в предположении равенства уровня Ферми с уровнем ловушки.

Функция Ферми-Дирака  $f_t(x)$  в области пространственного заряда в общем случае зависит от значения потенциала в точке  $x$ . В целях упрощения дальнейшего анализа рассмотрим ее поведение в точке, соответствующей нулевому потенциалу:

$$\tau_t = \frac{1 - f_t}{C_n \cdot n_l}, \quad (11)$$

где, функцию  $f_t(x)$  можно определить через равновесную концентрацию электронов  $n_0$  и  $n_l$  согласно [5]:

$$f_t = \frac{n_0}{n_0 + n_l}. \quad (12)$$

Тогда (11) запишется в виде

$$\tau_t = \frac{1}{C_n(n_0 + n_l)}. \quad (13)$$

Концентрация носителей  $n_l$  может быть записана в виде [5]:

$$n_l = N_C \cdot \exp(-\Delta E_t/kT_n), \quad (14)$$

где  $\Delta E_t = E_C - E_t$ ,  $E_C$  – энергия дна зоны проводимости.

В области положительных температур можно принять  $n_0/n_l \ll 1$ , тогда с учетом (14) постоянная времени  $\tau_t$  определится как

$$\tau_t = [C_n \cdot N_C \cdot \exp(-\Delta E_t/kT_n) + (N_C N_V)^{1/2} \exp(-E_g/kT_n)]^{-1}. \quad (15)$$

Отсюда следует, что с увеличением температуры постоянная времени релаксации электронов на глубоких примесных центрах уменьшается. Подставляя в выражение для тока рекомбинации (15) после несложных преобразований флуктуационная составляющая тока запишется:

$$\delta \bar{I}_{рек}^2 = \frac{4,586 \cdot 10^{-17} \cdot A \cdot N_t kT_n}{C_n^2 \cdot N_a^{5/2} \cdot (\varphi_k - U)^{1/2} f} \cdot \exp\left(\frac{qU + 2\Delta E_t - E_g}{kT_n}\right) \times \left[1 - \frac{I_K R_T U_{КЭ}}{2T_n} \left(5 - \frac{q(\varphi_k - U)}{kT_n}\right)\right]^{-2} \quad (16)$$

Из рассмотрения (16) ясно, что основная температурная зависимость шумового тока определяется экспоненциальным членом.

### Экспериментальные исследования температурных зависимостей шумов кремниевых мощных биполярных транзисторов

Экспериментальные исследования проводились на кремниевых ВЧ транзисторах типа 2Т 903А и 2Т 803А. Зависимость уровня шума от температуры исследовалась на частоте 1 кГц при токе коллектора 0,2 А, напряжении между коллектором и эмиттером 4 В и сопротивлении генератора 20 Ом. Из графика (рис. 1) видно, что с увеличением температуры уровень шума падает по экспоненциальному закону. Причем имеются два участка, характеризующиеся различными значениями энергии активации. Полученные результаты можно объяснить, если учесть, что приведенный ко входу транзистора шум определяется выражением [3]:

$$\overline{U_{ш}^2} = \left\{r_{БП} + r_{ЭС}(h_{21Э} + 1)\right\}^2 + R_G^2 \left\{\overline{i_{рек}^{нас}}\right\}^2 + \left\{r_{БП} + r_{ЭС}(h_{21Э} + 1)\right\}^2 + R_G^2 \left\{\overline{i_{рек}^{акт}}\right\}^2, \quad (17)$$

где  $r_{БП}$  – сопротивление пассивной базы;  $r_{ЭС}$  – суммарное сопротивление в эмиттерной цепи;  $R_G$  – сопротивление генератора;  $i_{рек}^{нас}$  и  $i_{рек}^{акт}$  – шумовой ток пассивной и активной части эмиттерного перехода соответственно,  $h_{21Э}$  – коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером. Так как градиент концентрации примесей и, как следствие, дефектов в пассивной и активной областях эмиттерного перехода различны, то можно предположить, что различный вклад дают эти области в общий уровень шума, измеряемый на выходе транзистора.

На рис. 2 приведены спектры шума, измеренные при двух фиксированных температурах. Видно, что на всех частотах при увеличении температуры уровень шума уменьшается. В диапазоне частот  $2 \cdot 10^3 - 10^5$  Гц,

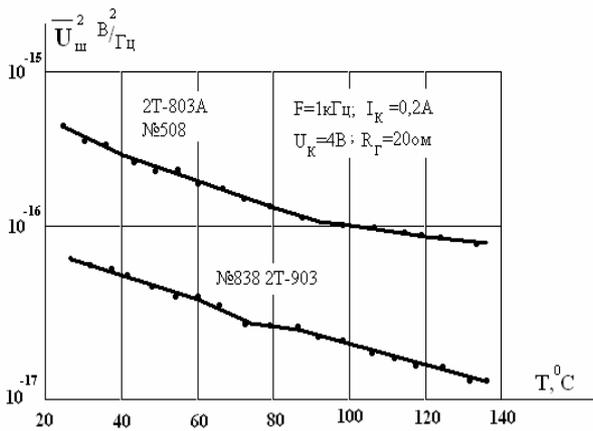


Рис. 1. Зависимость уровня шума мощных биполярных транзисторов от температуры

кроме того, изменяется величина коэффициента  $\gamma$ , характеризующего скорость спада спектра вида  $I/f^\gamma$ . Его уменьшение при увеличении температуры можно объяснить на основе анализа температурной зависимости постоянной времени релаксации  $\tau_t$  (15). Как уже отмечалось, с увеличением температуры постоянная времени релаксации уменьшается и как следствие возрастает рекомбинационная составляющая тока  $p-n$  перехода.

На основании проведенного теоретического и экспериментального исследования зависимости шума от температуры можно сделать вывод, что уровень шума, измеренный при определенных условиях, может служить мерой при оценке температуры транзисторной структуры. Возможность использования собственного шума для оценок теплового сопротивления или связанной с ним температуры структуры следует из выражений (16) и (17). Подставляя (1) в (16), получим

$$\overline{\delta I_{рек}^2} = \frac{4,6 \cdot 10^{-17} \cdot A \cdot N_t \cdot kT_n}{C_n^2 \cdot N_a^{5/2} \cdot (\varphi_k - U)^{1/2} \cdot f} \cdot \exp\left(\frac{qU + 2\Delta E_t - E_g}{I_K R_T U_{КЭ} + T_0}\right) \times \left[1 - \frac{I_K R_T U_{КЭ}}{2T_n} \left(5 - \frac{q(\varphi_k - U)}{kT_n}\right)\right]^{-2} \quad (18)$$

Из (18) видно, что если ток коллектора поддерживать постоянным, а напряжение на коллекторе изменять, то крутизна спада шума с увеличением  $U_{КЭ}$  будет определяться величиной теплового сопротивления  $R_T$ : чем больше  $R_T$ , тем сильнее будет уменьшаться уровень шума.

Выбор величины сопротивления генератора при проведении такого рода измерений можно сделать на основании анализа (17). Видно, что если величина сопротивления ге-

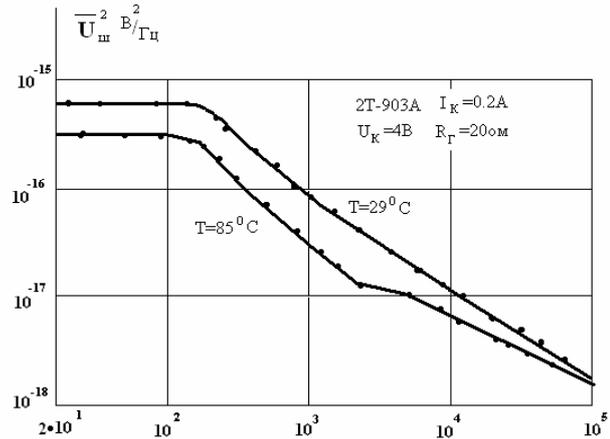


Рис. 2. Зависимость спектра шума мощного биполярного транзистора от температуры

нератора значительно меньше первого члена, то уменьшение уровня шума с температурой будет частично компенсироваться увеличением коэффициента передачи по току, что снизит точность измерений.

В целях проверки изложенных соображений были проведены экспериментальные исследования возможности контроля разброса  $R_T$  в выборке по уровню шума. Из результатов, представленных на рис. 3, видно, что связь между уровнями шума, измеренными при  $U_K = 4В$  и  $U_K = 20В$  близка к линейной. Угол наклона пропорционален величине теплового сопротивления  $R_T$ . На рис. 4 представлена корреляционная связь между приращением температуры структуры транзисторов типа 2Т 803А, измеренным с помощью термопары, и коэффициентом  $K_U$ , равным отношению шумовых напряжений, измеренных при  $U_K = 4 В$  и  $U_K = 20 В$  соответственно.

### Заключение

Впервые на основе анализа рекомбинационной составляющей эмиттерного тока

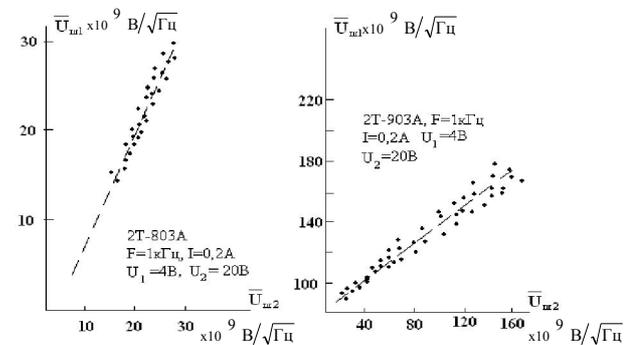


Рис. 3. Корреляционная связь между уровнями шума, измеренными при фиксированном коллекторном токе и двух напряжениях на коллекторе

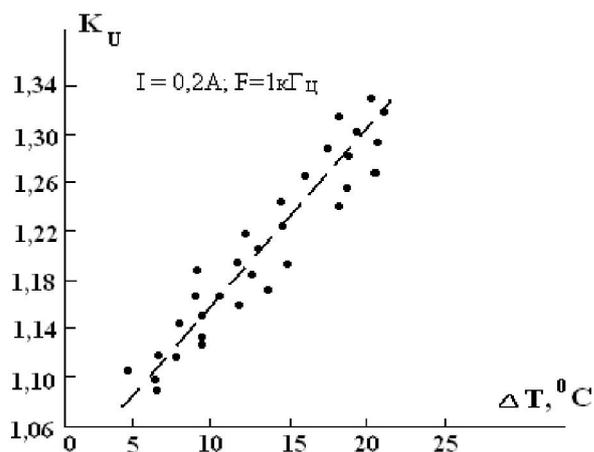


Рис. 4. Связь между перегревом структуры и отношением шумовых напряжений, измеренных при  $U_k=4\text{В}$  и  $U_k=20\text{В}$

показано, что температурная зависимость шумового тока может быть объяснена температурной зависимостью постоянной времени захвата глубоких уровней (ловушек) в ОПЗ эмиттерного перехода. В свою очередь температурная зависимость шумового тока может быть использована для оценки температуры перегрева транзисторной структуры в активном режиме работы транзисторов и их полного теплового сопротивления. Экспериментальные результаты дают хорошее согласие с результатами теоретического анализа и подтверждают возможность определения теплового сопротивления мощных биполярных транзисторов по величине отношения двух шумовых напряжений, измеренных при двух фиксированных напряжениях на коллекторе и фиксированном токе коллектора. Следует отметить, что полученные результаты

находят подтверждение и на других типах исследованных кремниевых биполярных мощных транзисторах: КТ904, КТ907, КТ920, КТ925, КТ 911.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что собственные электрические шумы мощных биполярных транзисторов являются весьма универсальным источником информации о качестве полупроводниковой структуры и прибора в целом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Придорогин В.М. Шумовые свойства транзисторов на низких частотах. М.: Энергия, 1976.
2. Широков А.А. Методика отбраковки потенциально ненадежных мощных транзисторов по значению среднего квадрата шумового напряжения // Электронная техника. Сер. 8. 1979. Вып. 7 (77).
3. Широков А.А., Дулов О.А., Сергеев В.А. Исследование токораспределения в биполярных транзисторах электрофлуктуационным методом // Известия вузов. Электроника. 2006. №2.
4. Пряников В.С., Широков А.А. Неразрушающий метод контроля качества мощных транзисторов по температурному коэффициенту шума // Радиоэлектроника и электросвязь. Рига, 1984.
5. Бонч-Бруевич В.Л., Калашиников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1977.

#### QUALITY CONTROL OF THE RF AND VHF POWER BIPOLAR TRANSISTORS ON TEMPERATURE DEPENDENCES OF THE NOISE PARAMETERS

© 2008 O.A. Dulov, V.A. Sergeev, A.A. Shirokov

Ul'yanovsk Branch of the Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences

Basing on the analysis of the temperature dependance of fluctuations of the recombination component of emitter current the opportunity of control of thermal characteristics of high-power bipolar transistors on temperature dependancies of low-frequency noise is demonstrated and experimentally validated. In particular, the thermal resistance value can be determined by the ratio value of two noise voltages, measured with two voltages on the fixed collector current.