

# Моделирование датчиков температуры мощных интеллектуальных ИС

К.О. Петросянц, Н.И. Рябов

Московский государственный институт электроники и математики  
(технический университет), eande@miem.edu.ru

**Аннотация** — В работе рассматривается моделирование датчиков температуры мощных интеллектуальных ИС двух типов. Точечные датчики представляют собой эмиттерные области малого размера. Полосковые датчики представляют собой длинные узкие эмиттерные области. Исходной информацией для анализа служит предварительно рассчитанное распределение температуры на поверхности кристалла ИС. Для обоих типов датчиков рассмотрены эффекты, искажающие определяемое ими значение максимальной температуры: для точечных датчиков – их удалённость от точек максимального нагрева, для полосковых – эффект растекания тока и эффект Зеебека.

**Ключевые слова** — Мощные интеллектуальные ИС, тепловые режимы, датчики температуры, эффект Зеебека, автоматизированное проектирование.

## I. ВВЕДЕНИЕ

“Интеллектуальные” (“разумные”) мощные ИМС и модули являются перспективной элементной базой систем промышленной автоматики, робототехники, авто- и авиаэлектроники, морской и космической навигации, телекоммуникаций, периферии ЭВМ, измерительной и бытовой техники, аппаратуры связи, сигнализации, контроля и т.д. Для них характерны следующие особенности: 1) совмещение в одной конструкции мощных выходных приборов или схем управления с мало- и среднemosными схемами контроля, диагностики и защиты, а также со схемами, выполняющими логические функции, А/Ц и Ц/А преобразователей информации, памяти и др.; 2) работа в “тяжелых” режимах: при повышенных уровнях тока (более 1 А) и напряжениях (до 1000 В и выше), в условиях сильного нагрева элементов (свыше 150 °С) для мощных выходных узлов, в сочетании с высокими требованиями к линейности, чувствительности для сенсорных и аналоговых элементов; 3) возможность работы на индуктивную нагрузку (обмотки мотора, генератора, реле и т.д.) в условиях внешней повышенной температуры, вибрации, загрязнении окружающей среды и т.д.

Преимущества “разумных” ИС реализуются благодаря созданию схем температурной защиты. Базовы-

ми элементами таких схем являются датчики температуры, встраиваемые в конструкции мощных приборов. В случае возрастания температуры свыше установленного уровня, датчик или отключает схему, или подключает цепь компенсирующей обратной связи. В качестве сенсоров температуры могут использоваться как биполярные, так и МОП транзисторы с малыми размерами. В практических схемах чаще применяются приборы на основе р-п перехода (биполярные транзисторы (БТ), диоды). Они имеют существенные преимущества перед МОПТ по таким параметрам, как чувствительность и стабильность в широком диапазоне температур.

Наиболее часто встречаются сенсоры двух конфигураций: точечные (в виде окружностей или квадратов и прямоугольников малого размера) и полосковые (в виде длинных узких полос).

Для точечного сенсора в качестве основной выходной информационной электрической величины, определяющей температуру, используется напряжение  $V_{BE}$  прямосмещённого эмиттерного р-п перехода:

$$V_{BE}(T) = V_{BE0} - S_T T - Q_T \left( \frac{T - T_0}{T_0} \right)^2, \quad (1)$$

где:  $T_0$  – некоторая заранее установленная средняя температура полупроводникового прибора,  $V_{BE0}$  – напряжение, не зависящее от геометрии транзистора и слабо зависящее от параметров его физической структуры,  $S_T$  и  $Q_T$  – температурно-независимые коэффициенты, определяемые геометрией транзистора [1].

Формула (1) представляет собой квадратичную зависимость  $V_{BE}$  от  $T$ . Для того, чтобы получить линейную зависимость, используются разность напряжений  $V_{BE}$  для двух транзисторов, близко расположенных на полупроводниковом кристалле, с существенно различными площадями эмиттеров  $S_{Э1}$  и  $S_{Э2}$ , которая прямо пропорционально зависит от абсолютной температуры (Proportional To the Absolute Temperature – PTAT):

$$V_{ptat} = V_{BE1} - V_{BE2} = \frac{kT}{q} \left[ \ln \left( \frac{I_{K1}}{J_S S_{Э1}} \right) - \ln \left( \frac{I_{K2}}{J_S S_{Э2}} \right) \right],$$

или

$$V_{ptat} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{K1} S_{Э2}}{I_{K2} S_{Э1}} \right) = S_{ptat} T, \quad (2)$$

где коэффициент  $S_{ptat}$  не зависит от технологических параметров.

Размещение сенсоров температуры в конструкциях мощных элементов ИС является, как правило, нетривиальной задачей. Желательно разместить р-п переход – сенсор на локальном участке полупроводникового кристалла с максимальной температурой. Поэтому предварительно делается расчёт распределения температуры в конструкции мощного прибора.

## II. РАСЧЁТ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА КРИСТАЛЛА ИС

Математической моделью электро-тепловых процессов в мощных полупроводниковых приборах и ИС служит трехмерное уравнение теплопроводности для многослойного прямоугольного параллелепипеда (рис. 1) с нелинейным граничным условием, решаемое совместно с уравнением для плотности тока [2]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0, \quad (3)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = -P(x, y, T) = \begin{cases} V \cdot J(T(x, y, 0), U), & (x, y) \in S_{Э0} \\ 0, & (x, y) \notin S_{Э0} \end{cases} \quad (4a)$$

$$\lambda_\alpha \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z_{\alpha-1}+0} = \lambda_{\alpha-1} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z_{\alpha-1}-0}, \quad (4b)$$

$$T(x, y, z_{\alpha-1} - 0) = T(x, y, z_{\alpha-1} + 0), \quad (4c)$$

$$\alpha = 2, 3, \dots, \gamma,$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_c} = \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=y_c} = 0, \quad (4в)$$

$$T(x, y, z_\gamma) = T_{КОРП} = const,$$

$$\iint_{S_{Э0}} J(T(x, y, 0), U) dx dy = I = const, \quad (5)$$

где:  $T$  - температура кристалла,  $\lambda_\alpha$  - коэффициент теплопроводности слоя,  $P$  - плотность выделяемой мощности,  $J$  - плотность тока,  $V$  - напряжение на выводах прибора (для биполярного транзистора - напряжение коллектор-эмиттер),  $U$  - управляющее напряжение (для биполярного транзистора - напряжение база-эмиттер),  $T_{КОРП}$  - температура корпуса,  $I$  - полный ток прибора,  $\gamma$  - число конструктивных слоев,  $S_{ЭЛ}$  - площадь тепловыделяющей области прибора.

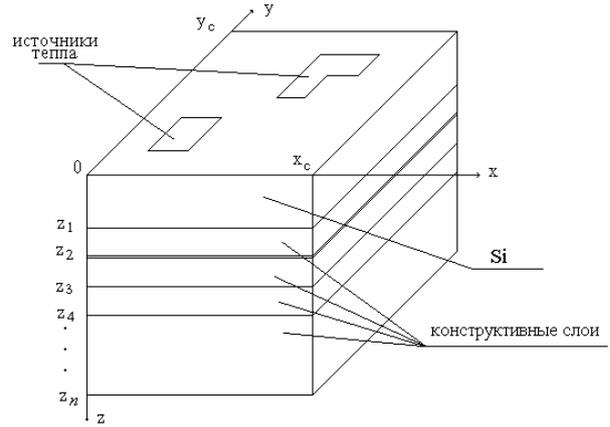


Рис. 1. Конструкция ИС

Трехмерное уравнение теплопроводности (3) с граничными условиями (4) решается совместно с интегральным уравнением (5) [2]. Такая модель позволяет учитывать перераспределение тока от менее нагретых областей к более нагретым и, вследствие этого, локальный рост температуры нагретых участков.

После расчета распределения температуры на поверхности кристалла, производится анализ влияния теплового режима на электрические характеристики датчика.

## III. РАЗМЕЩЕНИЕ ТОЧЕЧНЫХ СЕНСОРОВ

На рис. 2 приведены распределения температуры на поверхности полупроводниковых кристаллов мощных биполярных транзисторов с различной конфигурацией эмиттеров, расположенных в общей области базы. Транзисторы изготовлены по биполярной технологии мощных аналоговых ИС с проектными топологическими нормами 2 мкм.

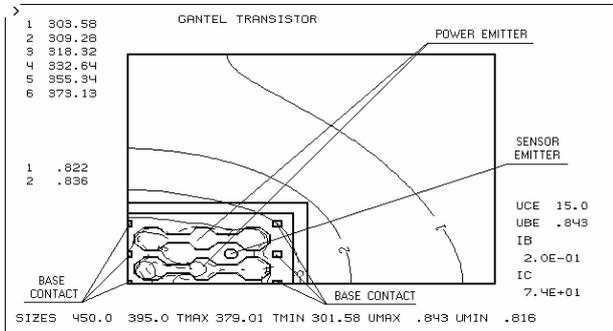
На рис. 2 видно, что участки полупроводникового кристалла с максимальной температурой заняты – на них размещены силовые эмиттеры. Поэтому эмиттеры - сенсоры размещены на свободных участках топологии базовых областей, наиболее близко прилегающих к нагретым участкам, в частности: для гантельного транзистора (рис. 2а) эмиттер - сенсор расположен между изотермами 4 и 5; для фигурного транзистора (рис. 2б) - на изотерме 5; для полосково-

го транзистора (рис. 2в) - на изотерме 4. В таблице 1 для каждого транзистора приведены значения максимальной температуры полупроводникового кристалла и температуры, регистрируемой сенсором, которая ниже на величину  $\Delta T$ .

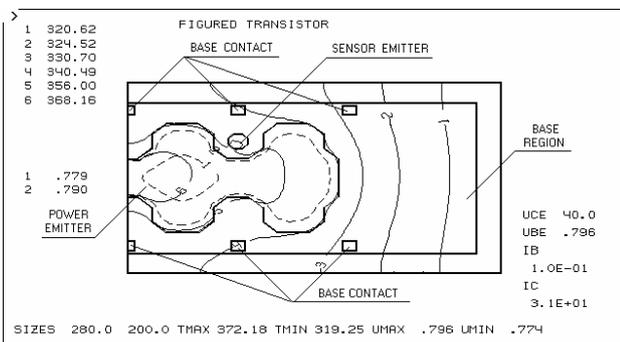
Таблица 1.

**Максимальная температура кристалла, температура сенсора и их разность**

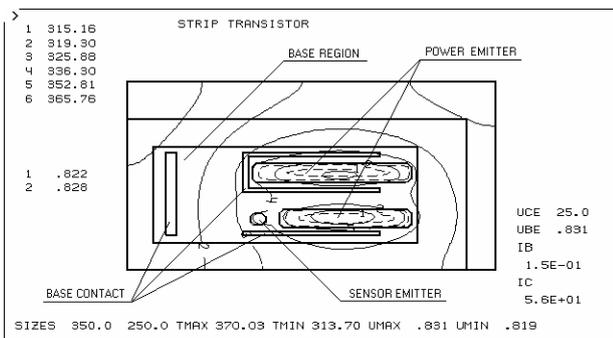
№ п/п	Тип транзистора	$T_{\text{МАКС}}$ , К	$T_{\text{СЕНС}}$ , К	$\Delta T$ , К
1	гантельный, рис.2,а	379	340	39
2	фигурный, рис. 2,б	372	356	16
3	полосковый, рис. 2,в	370	336	34



**а) гантельный**



**б) фигурный**



**в) полосковый**

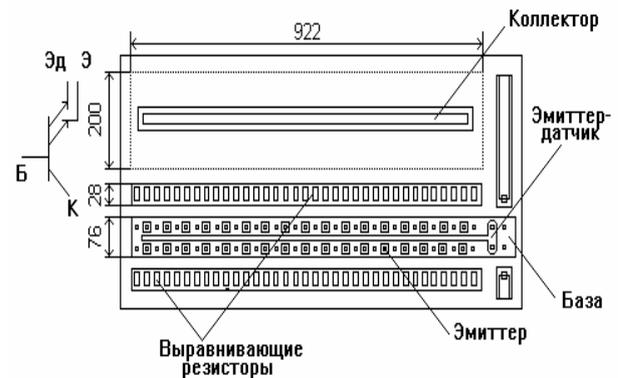
**Рис. 2. Электро-тепловые режимы мощных транзисторов**

То, что регистрируемая сенсором температура ниже максимальной температуры кристалла, необходимо учитывать при калибровке сенсора и построении на его основе схемы температурной защиты.

#### IV. РАСЧЁТ ПОЛОСКОВЫХ СЕНСОРОВ

Недостаток точечных сенсоров, связанный с разностью температур  $\Delta T = T_{\text{МАКС}} - T_{\text{СЕНС}}$ , устраняется при использовании полосковых сенсоров, которые, как правило, встраиваются непосредственно в конструкцию мощного полупроводникового прибора.

Пример размещения полосковых сенсоров в конструкциях мощных полупроводниковых приборов приведён на рис. 3. На рис. 3 видно, что эмиттер – датчик располагается внутри конструкции между двумя рядами эмиттеров мощного БТ и контролирует область, в которой температура нагрева структуры прибора максимальна. В этом случае разность  $\Delta T = 0$ .



**Рис. 3. Мощный многоэмиттерный биполярный транзистор с полосковым эмиттером - сенсором**

Однако, для полосковых сенсоров необходимо учитывать два паразитных эффекта, которые отсутствуют для точечных сенсоров: 1) падение напряжения  $\phi_{БЭ}$  от токов базы и эмиттера, протекающих вдоль полосы эмиттера – сенсора, 2) возникновение дополнительной термо-ЭДС, обусловленной градиентом температуры вдоль полосы сенсора. Если первый эффект хорошо известен и изучен для БТ, то второй эффект поясним на следующем примере. Если в полупроводниковом кристалле микросхемы рядом расположены несколько мощных БТ, которые нагревают друг друга, то может сложиться ситуация, приведённая на

рис. 4. Температура одного из мощных БТ может быть неравномерно распределена вдоль полосы сенсора температуры (см. кривую 1 на рис. 5.).

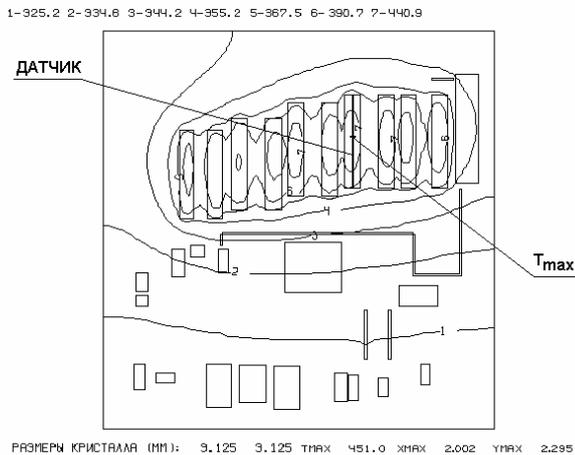


Рис. 4. Топология выходного транзистора перестраиваемого стабилизатора напряжения и изолинии температуры поверхности прибора.

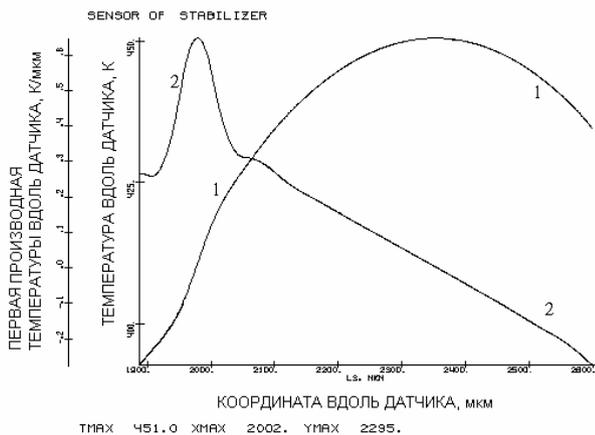


Рис. 5. Распределение температуры (кривая 1) и её производной (кривая 2) вдоль полосы сенсора, встроенного в структуру мощного БТ.

Будем рассматривать сенсоры на основе р-п перехода (см. рис. 6), у которых эмиттерная область имеет форму длинной узкой полосы с контактом на одном конце, а базовый контакт представляет собой: а) полосу вдоль эмиттера, благодаря чему базу датчика можно считать эквипотенциальной; б) площадку на одном конце, в этом случае необходим учет распределения потенциала в области базы.

Из-за наличия градиента температуры вдоль датчика (кривая 2 на рис. 5), в нем возникает термо-ЭДС, обусловленная эффектом Зеебека [3]. Она прибавляется к величине потенциала области эмиттера  $\varphi_{\text{Э}}$  или базы  $\varphi_{\text{Б}}$ . Оба эффекта могут внести существенную ошибку в определение температуры кристалла.

Математическая модель электро-тепловых режимов датчика, учитывающая два вышеупомянутых эффекта, имеет вид:

$$\frac{d^2 \varphi_{\xi}}{d\nu^2} + \left( \alpha_{\xi} + \frac{kL_N}{q} \right) \frac{d^2 T}{d\nu^2} = \rho_{\xi} J_{\xi}(\nu), \quad (6)$$

где:  $\xi = \text{Э, Б}$ ;  $\nu$  - текущая координата вдоль датчика ( $x$  или  $y$ );  $\varphi_{\xi}$  - электрический потенциал;  $\rho_{\xi} = 1/(\sigma_{\xi} h)$  - поверхностное сопротивление диффузионной области (Ом/кв.);  $\sigma$  - удельная проводимость полупроводникового слоя;  $\alpha$  - удельная термо-ЭДС, зависящая от уровня Ферми, ширины запрещенной зоны и электрофизических параметров полупроводниковых областей [3];  $L_N = \ln(N_c/N_d)$  - для полупроводника n-типа,  $L_N = -\ln(N_v/N_a)$  - р-типа;  $N_d, N_a$  - концентрация доноров и акцепторов;  $w, h$  - ширина и толщина диффузионной области датчика;  $J(\nu)$  - плотность тока, инжектируемого в область датчика р-п - переходом,  $q$  - заряд электрона,  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - абсолютная температура, определяемая заранее путём решения уравнений (3) - (5) для мощных прибора или микросхемы, в которые встраивается сенсор.

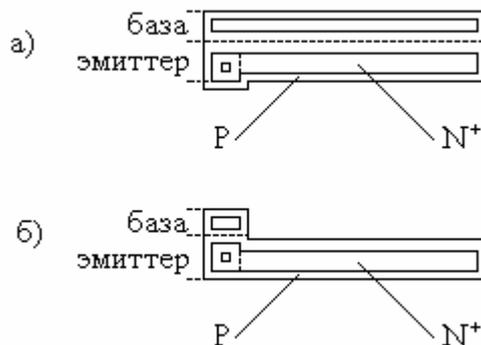


Рис. 6. Варианты топологии датчиков температуры: а) базовый контакт – полоса вдоль эмиттера, база эквипотенциальна, б) базовый контакт – площадка, база не эквипотенциальна

Первое слагаемое в левой части уравнения (6) учитывает эффект падения напряжения  $\varphi_{\text{БЭ}}$  при протекании тока вдоль полосы датчика; второе – термо-ЭДС, возникающую из-за градиента температуры.

Граничные условия для уравнений (6) имеют вид:

а) на контактах датчика потенциал фиксирован:

$$\varphi_{\xi}(V_{\text{КОИТ}}) = \text{const}, \quad (7)$$

б) на противоположном конце датчика полный ток, обусловленный как градиентом потенциала, так и градиентом температуры, равен нулю:

$$\frac{d\varphi_{\xi}}{dv} + (\alpha_{\xi} + \frac{kL_N}{q}) \frac{dT}{dv} = 0. \quad (8)$$

Ток датчика вычисляется как ток эмиттерного перехода:

$$\int_{v_1}^{v_2} J_{\xi}(T, \varphi_{\xi}, \varphi_B) w dv = I_{\xi} \quad (9)$$

где:  $v_1, v_2$  - начальное и конечное значения координаты по длине датчика.

Распределение температуры  $T(v)$  в уравнениях (6) – (9) известно из расчета теплового режима. Если датчик имеет структуру рис. 6а, то рассматривается только одно уравнение (6) для эмиттерной области, если структуру рис. 6б - два уравнения (6) для эмиттерной и базовой областей. Совместное решение уравнений (6) с граничными условиями (7-8) и интегральным уравнением (9) позволяет рассчитать электрический режим датчика, обусловленный эффектом вытеснения тока и эффектом Зеебека.

Для решения уравнений (6-9) используется алгоритм, основанный на конечных разностях, методах Ньютона-Канторовича и прогонки.

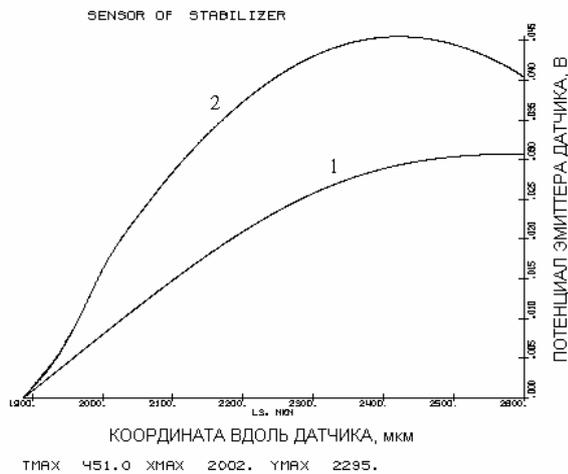


Рис. 7. Распределение потенциала эмиттера вдоль полосы сенсора рис. 6а без учёта (кривая 1) и с учётом (кривая 2) эффекта Зеебека.

Изложенный подход использовался для расчёта электро-тепловых режимов датчика температуры с конфигурацией рис. 6а, встроенного в один из мощных транзисторов микросхемы стабилизатора напряжения 20-40 В мощностью 40-80 Вт (см. рис. 4), изготовленного по биполярной технологии мощных аналоговых ИС с топологическими проектными нормами 2.5-3 мкм и с поверхностными сопротивлениями  $\rho_{БПАС}=200$  Ом/кв.,  $\rho_{\xi}=4$  Ом/кв. Потенциал базовой области считается постоянным  $\varphi_B(v)=0.7$  В.

На рис. 7 показано: 1 - распределение эмиттерного потенциала без учета эффекта Зеебека для топологии сенсора рис. 6а; 2 - распределение потенциала в эмиттере датчика с эквивалентной базой с учетом эффекта Зеебека.

Из рис. 7 следует, что напряжение  $V_{БЭ}$  на  $p-n$  переходе датчика изменяется вдоль его координаты  $v$ . Максимальное уменьшение напряжения полосы  $p-n$  перехода датчика составляет  $\Delta\varphi_{БЭ}=45$  мВ, из них 30 мВ обусловлены падением напряжения на сопротивлении эмиттерной полосы от протекания тока эмиттера (эффектом растекания тока) и 15 мВ - возникновением термо-ЭДС, обусловленной градиентом температуры (рис. 5) вдоль полосы эмиттера (эффектом Зеебека).

Таким образом, напряжение  $V_{БЭ}$  не является удовлетворительной характеристикой температуры для датчиков с полосковым эмиттером. Для датчиков этого типа в качестве выходной информационной величины следует использовать ток эмиттера  $I_{\xi}$ , определяемый выражением (9). На рис. 8 приведены вольт-амперные характеристики эмиттера – датчика: 1 – без учёта паразитных эффектов; 2 – с учётом только эффекта растекания тока; 3 – с совместным учётом эффекта растекания тока и эффекта Зеебека. Из рис. 8 видно, что паразитные эффекты существенно влияют на величину тока датчика. На начальном участке, в режиме наноамперных токов, определяющим является эффект Зеебека, обусловленный градиентом температуры, а эффектом растекания тока вдоль эмиттерной полосы можно пренебречь. И, наоборот, на участке «больших» токов (микроамперы и выше) определяющим фактором является растекание тока, а эффектом Зеебека можно пренебречь.

Среднее значение температуры  $T_{CP}$ , регистрируемой встроенным датчиком с полосковой геометрией, можно оценить по величине тока  $I_{\xi}$ , определяемого кривой 2 на участке «больших» токов рис. 8. Превышение  $\Delta T$  максимальной температуры  $T_{МАКС}$  над средней температурой  $T_{CP}$  ( $T_{МАКС}=T_{CP}+\Delta T$ ) можно оценить по разности токов кривых 2 и 3 на начальном участке рис. 8.

## V. Выводы

1. Показано, что для датчиков температуры встраиваемых в конструкции современных мощных интеллектуальных ИС и приборов, применение известных аналитических моделей, использующих температурные зависимости напряжения  $p-n$  перехода  $V_{БЭ}(T)$  (формула (1)) или разность  $V_{\text{pnt}}(T)$  (формула (2)) напряжений эмиттерных  $p-n$  переходов двух соседних транзисторов, как правило, или даёт существенную погрешность в определении реальной температуры или вообще необоснованно из-за взаимного теплового

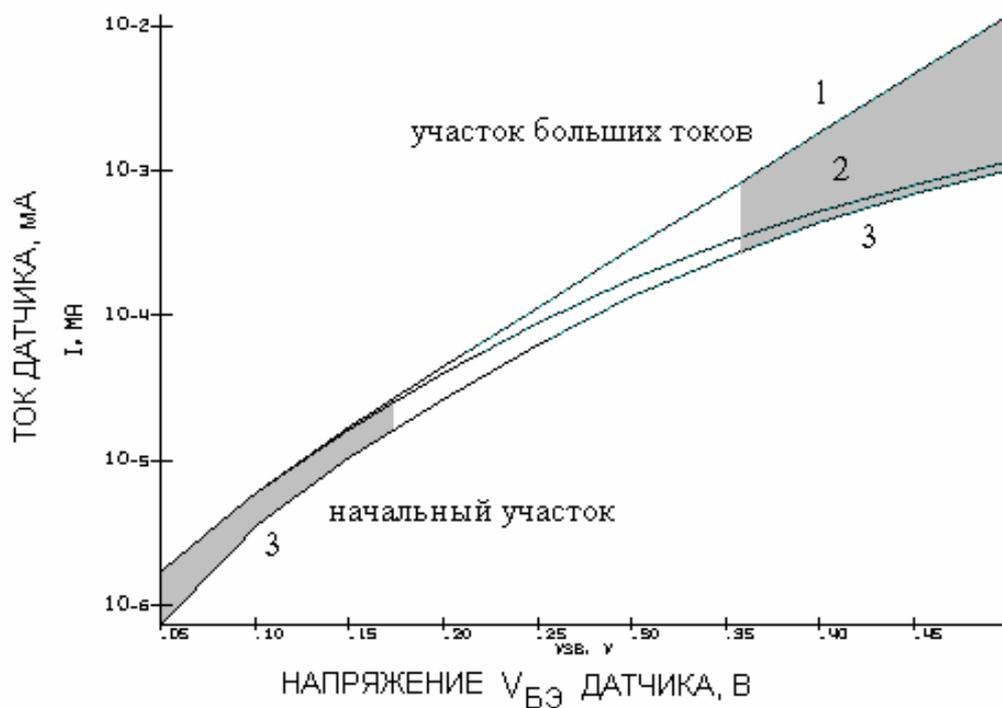


Рис. 8. I-V характеристики эмиттера – датчика:

1 – без учёта паразитных эффектов; 2 – с учётом только эффекта растекания тока; 3 – с совместным учётом эффекта растекания тока и эффекта Зеебека..

влияния соседних компонентов через полупроводниковый кристалл.

2. Разработана двухуровневая модель для расчета датчиков температуры на основе p-n перехода, встроенных в конструкции мощных интеллектуальных ИС.

Модель первого уровня – классическое уравнение теплопроводности (3) с граничными условиями (4,5), которое решается численно для определения трёхмерного распределения температуры в конструкции мощного прибора или микросхемы, обусловленного выделением джоулева тепла. Модель учитывает взаимное тепловое влияние компонентов, расположенных на кристалле.

Модель второго уровня учитывает дополнительно паразитные эффекты растекания тока и возникновения термо-ЭДС, обусловленной градиентом температуры, в датчиках, встроенных в структуры мощных транзисторов и других компонентов ИС. Модель описывается уравнением (6) с граничными условиями (7-9) и решается численными методами.

3. Показано, что для расчёта интегральных датчиков температуры точечного типа достаточно использовать модель первого уровня. При этом необходимо учитывать, что температура, регистрируемая senso-

ром по формулам (1) или (2), ниже максимальной температуры кристалла на величину  $\Delta T$  (см. табл. 1).

4. Показано, что для расчёта датчиков полоскового типа, встроенных в конструкции мощных транзисторов, важную роль могут играть паразитные эффекты растекания тока вдоль эмиттерной полосы датчика и эффект возникновения термо-ЭДС (эффект Зеебека). Оба этих эффекта учитываются с помощью предложенной авторами модели второго уровня.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] R.A. Bianchi, F. Vinci Dos Santos, J.M. Karam, B. Courtois, F. Pressecq, S. Sifflet. CMOS compatible temperature sensor based on the lateral bipolar transistor for very wide temperature range applications // Sensors and Actuators. 1998. V. A 71, N 1, p.p. 3-9.
- [2] Рябов Н.И. Алгоритм расчёта тепловых режимов полупроводниковых приборов и элементов ИС // Системы автоматизированного проектирования БИС и радиоэлектронной аппаратуры. М.: Наука. 1991. с. 118 – 122.
- [3] Шалимова К.В. Физика полупроводников. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1976. 416 с., ил.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 10-07-00689-а