

## Твердотельная электроника

УДК 621.315.596

А.В. Борисов, канд. техн. наук<sup>1</sup>, В.А. Гусев, д-р техн. наук<sup>2</sup>, Л.Н. Павлов, канд. техн. наук<sup>1</sup>,  
П.А. Яганов, канд. техн. наук<sup>1</sup>

### Микроэлектронные сенсоры для контроля температуры интегральных микросхем

Рассмотрены особенности микроэлектронных сенсоров, предназначенные для определения температуры подложки интегральных микросхем. Проведено сравнение термосенсоров на основе резистивных, диодных и транзисторных структур.

The microelectronic sensor peculiarities for IC chip temperature determining are considered. Resistor, diode and transistor thermosensors are compared.

**Ключевые слова:** температура подложки микросхемы, терморезисторы, диодные и транзисторные термосенсоры.

#### Введение

Температурное воздействие является одним из факторов, наиболее влияющих на параметры полупроводника и режимы функционирования микроэлектронного устройства. Для стабилизации температурных характеристик интегральных микросхем (ИМС) выбирают различные способы, которые являются наиболее эффективными для конкретных условий эксплуатации. Среди них чаще всего используют конструкторско-технологические и схемотехнические методы. Конструкторско-технологические методы связаны с термостатированием подложки, а схемотехнические предусматривают введение во вторичные каскады обработки сигнала дополнительных элементов компенсации температурного дрейфа [1, 2]. Результативность методов зависит от точности измерения, а качественное определение температуры подложки ИМС является одной из важнейших и актуальных задач, которую приходится решать в микроэлектронной схемотехнике.

Для определения температуры ИМС целесообразно использовать термочувствительные свойства структур, входящих в состав элементной базы ИМС. В этом случае нет необходимости применять термосенсоры специальных конструкций для измерения температуры микрообъектов, к которым относится ИМС. Однако выбор термосенсора связан с решением комpromиссной задачи: сочетать достаточный для

высокой точности измерения сигнал и чувствительность термометрической характеристики (ТМХ) с малыми геометрическими размерами измерительного преобразователя.

Цель данной работы заключается в анализе особенностей использования термосенсоров на основе резистивных, диодных и транзисторных структур для измерения температуры подложки ИМС.

#### 1. Резистивные термосенсоры

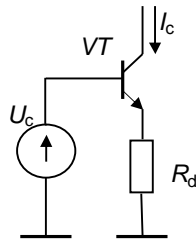
Диффузионные резисторы обладают положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), величина которого зависит от концентрации носителей заряда: чем ниже уровень легирования полупроводника, тем выше ТКС. Если рассматривать ИМС, выполненную по типовой биполярной технологии с минимальным набором компонентов элементной базы, то наибольшей чувствительностью обладают резисторы, изготовленные на основе эпитаксиальных структур. Но для получения информации о температуре к резистивным сенсорам необходимо подключать эталонные источники тока или напряжения. В случае использования такого сенсора в измерительном резистивном мостике требуется в состав элементной базы дополнительно включить высокостабильные пленочные резисторы. Такое решение используют в специализированных ИМС, например, контролирующих температуру потока газов [3, 4].

На кристаллах современных микросхем довольно часто сформированы автономные источники эталонного (опорного) напряжения. В этих источниках, как правило, используют генераторы тока на транзисторах, для которых важна минимальная зависимость их характеристик от температуры. То, что температурный коэффициент для напряжения база-эмиттер отрицателен, а температурный коэффициент диффузионных резисторов положителен [5], позволяет использовать эти резисторы в качестве термосенсоров, а за счет включения резистора в цепь отрицательной обратной связи по току – стабилизировать работу генератора тока и источника

опорного напряжения ИМС. Пример такого решения приведен на рис. 1, где представлена электрическая схема каскада генератора тока с термокомпенсацией. Ток коллектора  $I_c$  транзистора VT в этой схеме равен:

$$I_c = \frac{U_c - U_{be}}{R_d},$$

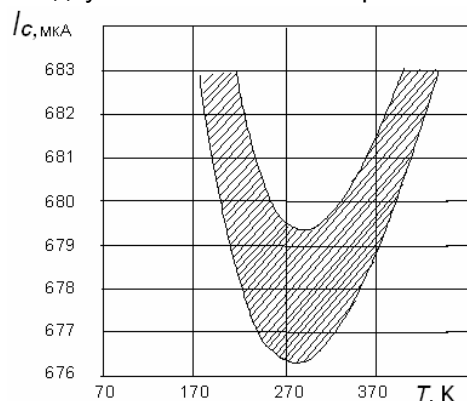
где  $U_c$  – напряжение источника стабильного напряжения;  $U_{be}$  – напряжение на переходе база-эмиттер;  $R_d$  – сопротивление диффузионного резистора.



**Рис. 1. Электрическая схема генератора стабильного тока с резистивной термокомпенсацией**

С ростом температуры падение напряжения на диффузионном резисторе  $R_d$  возрастает. Если напряжение  $U_c$  согласовано с положительным ТКС резистора  $R_d$  [5], ток в выходной цепи транзистора  $I_c$  стабилизируется.

Авторами проведены измерения, в ходе которых исследована температурная зависимость тока коллектора  $I_c$  в транзисторной структуре с резистивной термокомпенсацией (рис. 2). Толщина слоя базовой диффузии структуры составляла 2,0 мкм, толщина слоя эмиттерной диффузии – 1,6 мкм, площадь эмиттера – 1000 мкм<sup>2</sup>,  $U_c = 1,35$  В,  $R_d = 1,0$  кОм, напряжение на коллекторе 5 В. Разброс значений определен по выборке из тридцати интегральных модулей двух технологических партий ИМС.

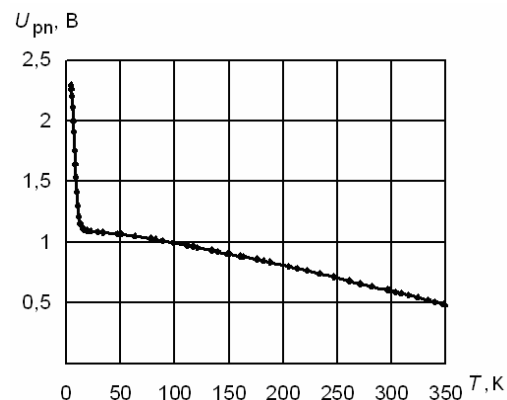


**Рис. 2. Зависимость тока коллектора  $I_c$  интегрального транзистора от температуры  $T$  в схеме генератора стабильного тока**

Если диффузионный резистор  $R_d$ , используемый в качестве термосенсора, расположен в непосредственной близости от транзистора и воздействие температуры одинаково как на транзистор, так и на резистор, то возможна эффективная компенсация температурного дрейфа генератора тока в широком температурном диапазоне. Измерения подтвердили, что температурная нестабильность тока такого генератора в температурном диапазоне 200...400 К составляет всего 0,73 %, что для ряда ИМС вполне приемлемо.

## 2. Диодные термосенсоры

Диодные термосенсоры являются одними из наиболее точных и технологически воспроизводимых для измерения температур в диапазоне 4,2...450 К. Стабильность и предсказуемость характеристик в условиях влияния внешних факторов предопределили их использование в измерительных преобразователях широкого спектра назначения. ТМХ широкодиапазонных диодных сенсоров (рис. 3) определяются конструкторско-технологическими параметрами и электрофизическими свойствами p-n структур [6–8].



**Рис. 3. Термометрическая характеристика  $U_{pn}(T)$  кремниевого диодного термосенсора [8]**

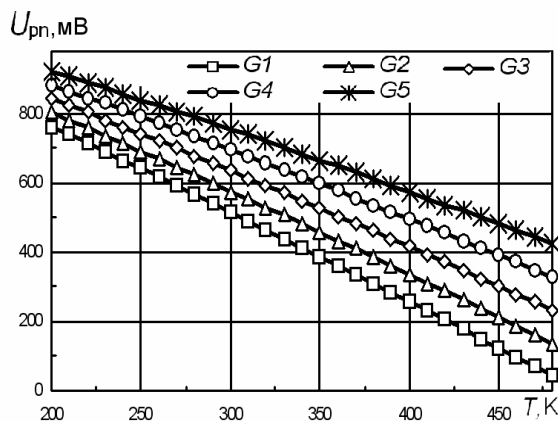
Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что для неравновесного состояния p-n перехода в режиме прямого смещения в невырожденном кремнии при низком уровне инжекции носителей заряда и температуре от 150 до 450 К напряжение на p-n переходе не зависит от объема полупроводника, в котором он сформирован. Температурную зависимость напряжения на p-n переходе  $U_{pn}(T)$  в неравновесном состоянии моделируют уравнением [9]:

$$U_{pn}(T) = \frac{kT}{q} \ln \left( 1 + \frac{G}{n_i^2} \right),$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура р-п перехода;  $q$  – заряд электрона;  $G$  – параметр генерации неравновесных носителей заряда;  $n_i$  – собственная концентрация носителей заряда.

Кроме непосредственно температуры на формирование ТМХ оказывают влияние параметры, которые зависят только от фундаментальных свойств полупроводника и не зависят от его объема. Это обстоятельство является важным критерием выбора принципа функционирования сенсоров на р-п переходах, так как в составе ИМС они сохраняют уровень выходного сигнала, функциональность и чувствительность.

Параметр  $G$  рассматривают как обобщающий количественные оценки объективных физических процессов, связанных с рекомбинацией и генерацией носителей заряда в приповерхностных слоях полупроводника, а также явлениями на омических контактах. Поскольку учет всех факторов в этих явлениях с их сложными взаимосвязями значительно усложняет модель ТМХ, в расчетах реальных выходных характеристик термосенсоров на основе р-п перехода значения  $G$  целесообразно определять экспериментально. На рис. 4 приведена графическая иллюстрация ТМХ диодного сенсора  $U_{pn}(T)$  при разных значениях параметра  $G$ .



**Рис. 4. Термометрическая характеристика р-п перехода  $U_{pn}(T)$ :**  $G1 = 10^{29} \text{ см}^{-3}$ ,  $G2 = 10^{30} \text{ см}^{-3}$ ,  $G3 = 10^{31} \text{ см}^{-3}$ ,  $G4 = 10^{32} \text{ см}^{-3}$ ,  $G5 = 10^{33} \text{ см}^{-3}$

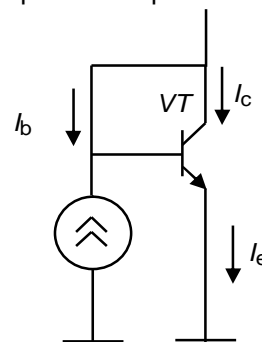
В общем случае о температуре р-п перехода можно судить по двум параметрам: току и падению напряжения. Их сочетание является уникальным набором данных, идентифицирующих температуру прямосмещенного р-п перехода [8]. Некоторые современные микроэлектронные системы содержат на кристалле аналого-цифровой преобразователь и встроенную микро-ЭВМ. Для подобных ИМС есть возможность восстановления температуры кристалла по этим двум параметрам, занесенным в память микро-ЭВМ при калибровке диодного тер-

мосенсора. В случае построения ИМС небольшой стоимости, для которых требования по точности измерения температуры составляют  $\pm 1 \dots 3 \text{ К}$ , чаще используют другой подход. Для установления ТМХ фиксируют ток, протекающий через диодный термосенсор, а температуру идентифицируют по падению напряжения на р-п переходе.

В составе ИМС трудно обеспечить наилучшую ТМХ диодного термосенсора, так как элементная база ИМС предполагает конструкторско-технологические параметры и электрофизические свойства р-п структур, обеспечивающие, прежде всего, частотные и усилительно-преобразовательные характеристики устройства в диапазоне температур  $200 \dots 400 \text{ К}$ . Поэтому широкодиапазонные высокоточные диодные термосенсоры сложно интегрировать в состав микросхемы. В связи с этим целесообразно рассмотреть температурные характеристики транзисторных структур, являющихся основой элементной базы современных ИМС.

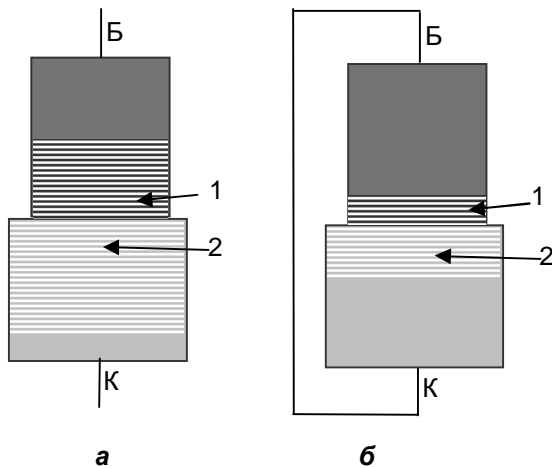
### 3. Транзисторные термосенсоры

В транзисторных биполярных структурах ИМС можно рассматривать различные комбинации переходов, которые несут информацию о температуре. Для большинства применений интерес представляет именно переход база-эмиттер, который определяет токи каждого транзистора ИМС и, следовательно, работоспособность всего устройства в заданном диапазоне температур. Особенность транзисторного термосенсора заключается в том, что при выполнении структуры на основе перехода база-эмиттер неизбежно возникает необходимость выбора коммутации диффузионной области кармана. Поскольку в п-р-п транзисторе она является коллектором, то ее подключение к источнику питания приведет к дополнительному разогреву структуры, что неминуемо сузит диапазон измеряемых температур и увеличит ошибку измерения. Наиболее рациональным решением является соединение этой области с базой, как это изображено на рис. 5.



**Рис. 5. Электрическая схема транзисторной структуры в режиме термосенсора**

Подключение коллекторной области к базе при проектировании ИМС используется при создании отражателей тока и является стандартным схемным решением. Но в качестве сенсора температуры такое включение имеет особенности [10]. В данном случае необходим анализ электрофизических процессов, протекающих в этой структуре, прежде всего в области пространственного заряда (ОПЗ) база-коллектор, которая упрощенно представлена на рис. 6 в виде диода.



**Рис. 6. Области пространственного заряда перехода база-коллектор: а – нормальный режим работы транзистора ( $U_{bc} = 1\text{ В}$ ); б – замыкание базы и коллектора ( $U_{bc} = 0\text{ В}$ ); 1 – ОПЗ базы; 2 – ОПЗ коллектора**

При нормальном режиме работы транзистора переход база-коллектор смещен в обратном направлении, например, напряжением  $U_{bc} = 1\text{ В}$  (рис. 6, а) и в области p-n перехода сформированы ОПЗ базы и коллектора. На рис. 6, а эти области (1 и 2) отображены в соответствии с эквипотенциальными линиями ОПЗ. При инжекции носителей в базу по структуре будет протекать ток, и носители в базе будут распределены практически линейно: максимальное значение на границе база-эмиттер и минимальное на границе база-коллектор. При разомкнутых электродах эмиттера, базы и коллектора, когда ток равен нулю, переход база-коллектор находится в равновесном состоянии и ширина p-n перехода определяется известной формулой [11]:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \phi_0}{q} \left( \frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D} \right)},$$

где  $\varepsilon_s$  – диэлектрическая проницаемость полупроводника;  $\phi_0$  – контактная разность потенциалов;  $N_A$  – концентрация акцепторов;  $N_D$  – концентрация доноров.

Нулевое значение тока также сохранится (при отсутствии освещения и, соответственно, эффекта Дембера), если эмиттер останется разомкнутым, а электроды базы и коллектора замкнуть, как изображено на рис. 6, б. Поэтому сохранится та же ширина перехода база-коллектор, что и при разомкнутых электродах. Следовательно, при смещении в прямом направлении перехода база-эмиттер и замыкании коллектора на базу распределение носителей в базе практически не изменится: максимальное значение сохранится на границе эмиттера, а минимальное – на границе коллектора. Таким образом, в соответствии с этим распределением носителей при замкнутых электродах базы и коллектора усилительные свойства транзистора должны сохраниться, а основной ток должен протекать через электрод коллектора.

Вариант модели Гуммеля-Пуна [11] учитывает особенность работы транзистора с коллектором, смещенным как в прямом, так и в обратном направлении. Частный случай – нулевое напряжение на переходе база-коллектор. В таком режиме эффект Эрли не проявляется. С учетом небольшой плотности тока, принятой для термосенсоров, не проявятся также эффекты Кирка и Вебстера. Пренебрегая и другими малыми эффектами для статического режима работы, получим упрощенные уравнения тока коллектора  $I_c$  и тока базы  $I_b$ :

$$I_c = \frac{I_s}{Q_b} \exp\left(\frac{U_{be}q}{kT} - 1\right); I_b = \frac{I_s}{\beta} \exp\left(\frac{U_{be}q}{kT} - 1\right), \quad (1)$$

где  $I_s$  – ток насыщения;  $Q_b$  – параметр базы, получаемый из соотношения Гуммеля;  $U_{be}$  – напряжение на переходе база-эмиттер;  $\beta$  – коэффициент усиления транзистора в статическом режиме.

Эти формулы также подтверждают тот факт, что при замкнутой базе и коллекторе транзистор сохраняет усилительные свойства. В соответствии с уравнением (1) (см. рис. 5) выходное напряжение транзисторного термосенсора  $U_{be}$ , определяющее его ТМХ, равно:

$$U_{be} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{\beta I_b}{I_s}\right) + 1. \quad (2)$$

Зависимость (2) определяет отличие ТМХ транзисторного термосенсора от диодного, так как в это выражение в явном виде входит коэффициент усиления транзистора в статическом режиме  $\beta$ . На первый взгляд кажется, что при коротком замыкании участка база-коллектор транзистор утрачивает усилительные

свойства и коэффициент усиления транзистора в этом режиме  $\beta = 1$ . Экспериментальные измерения и расчеты подтверждают, что это не так.

Сопоставим толщину базы интегрального п-р-п транзистора с диффузионной длиной пробега  $L_n$  электрона, которую можно определить из известного соотношения Эйнштейна [11]:

$$L_n = \sqrt{\frac{kT\mu_n\tau_n}{q}},$$

где  $\mu_n$  и  $\tau_n$  – подвижность и время жизни соответственно неравновесного электрона в базе.

Рассмотрим типовую интегральную транзисторную п-р-п структуру (рис. 7), изготовленную на подложке р-типа. Толщина слоя базовой диффузии структуры составляет 2,2 мкм, толщина слоя эмиттерной диффузии – 1,6 мкм, площадь эмиттера – 600 мкм<sup>2</sup>. Толщина базы в этой структуре равна 0,6 мкм с удельным поверхностным сопротивлением 5 кОм/кв. Подставляя оценочные данные для этой структуры с учетом типового профиля легирования базы и концентрации примесей в ней, получаем для нормальных климатических условий длину пробега электрона:

$$L = \sqrt{0,026 \cdot 10^3 \cdot 10^{-7}} \approx 16 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 16 \text{ мкм}.$$

Оказывается, что расчетная длина пробега неравновесного носителя заряда в базе намного больше толщины базы. Следовательно, вероятность дрейфа в область коллектора носителя, инжектированного в базу из эмиттера, велика. Это обстоятельство играет существенную роль в распределении носителей между базой и коллектором.

Авторами проведено экспериментальное исследование электрических свойств интегральной транзисторной структуры, изображенной на рис. 7; измерены токи базы, коллектора и эмиттера. Благодаря использованию калибратора тока и напряжения реальная погрешность измерений не превосходила 0,1 %. Результаты измерений усреднены и сведены в таблицу. Они подтверждают, что ток эмиттера  $I_e$  является суммой токов базы  $I_b$  и коллектора  $I_c$ . При этом ток коллектора  $I_c$  значительно больше тока базы. Такое распределение токов является характерным для функционирующего транзистора.

Анализ результатов измерений, приведенных в таблице, свидетельствует также о том, что транзисторная структура в режиме термосенсора, электрическая схема которой представлена на рис. 5, сохраняет усилительные свойства транзистора. Несмотря на то, что база

и коллектор замкнуты, их функции остаются такими же, как и в случае обратного смещения коллекторного перехода.

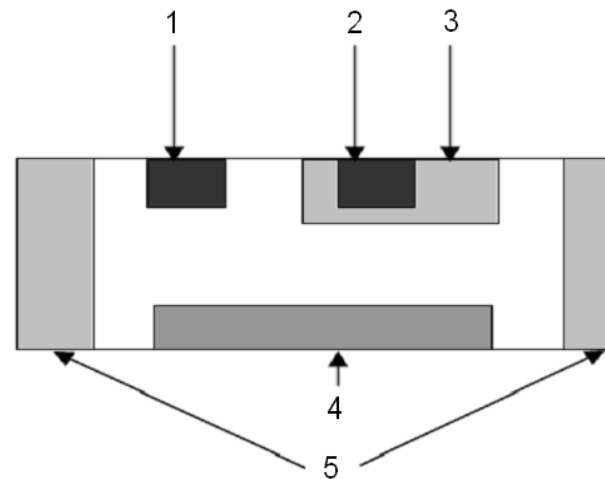


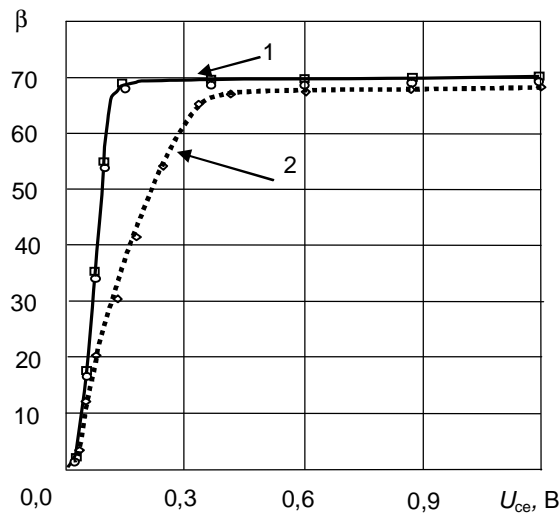
Рис. 7. Структура интегрального п-р-п транзистора: 1 – область коллектора; 2 – область эмиттера; 3 – область базы; 4 – область скрытого слоя  $n^+$ ; 5 – области разделения карманов

Таблица

$T, K$	$I_b, \text{мкА}$	$I_c, \text{мкА}$	$I_e, \text{мкА}$	$U_{be}, \text{мВ}$
290	0,149	9,923	10,073	572,8
300	0,149	9,941	10,088	551,1
310	0,132	9,926	10,060	529,1
320	0,121	9,945	10,064	506,8
330	0,111	9,948	10,059	484,6
340	0,103	9,970	10,072	462,2
350	0,092	10,000	10,093	439,9
360	0,086	9,968	10,052	416,8
370	0,081	9,991	10,070	394,4
380	0,075	9,987	10,072	371,3
390	0,071	9,946	10,018	348,6

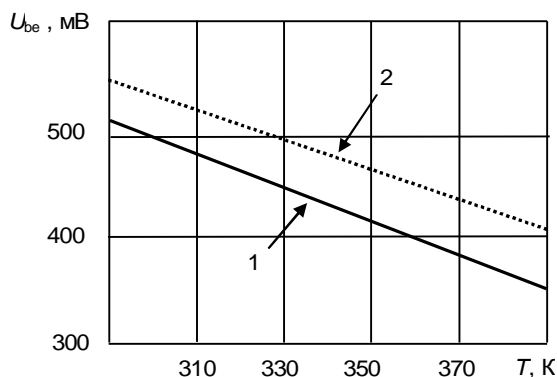
Подтверждена тенденция к увеличению коэффициента усиления с повышением температуры. Для дополнительной проверки этого вывода была снята зависимость коэффициента усиления  $\beta$  от напряжения на коллекторе интегрального п-р-п транзистора при токе базы от 0,1 до 10 мкА (рис. 8). Приведенный график убедительно демонстрирует эффективную работу коллектора при напряжении на нем даже ниже уровня напряжения базы. Снижение коэффициента усиления начинается при значении напряжения на коллекторе в среднем ниже 0,3 В, когда транзистор входит в область квазинасыщения. И только при токе базы равном 10 мкА из-за существенного падения напряжения на базе активизируется паразитный р-п-п транзистор при значении напряжения на коллекторе меньше 0,6 В. При этом эмиттером паразитного транзистора является база п-р-п

транзистора, базой становится область коллектора n-p-n транзистора, а коллектором – диффузионная p-область разделения карманов.



**Рис. 8. Зависимость коэффициента усиления  $\beta$  от напряжения на коллекторе: 1 – ток базы равен 0,1 мкА; 2 – ток базы равен 10,0 мкА**

Дополнительные исследования проведены с дискретным транзистором КТ315И, у которого коэффициент усиления по току  $\beta = 100$  при токе базы равном 0,5 мкА. В целом результаты измерения токов аналогичны, приведенным в таблице, и свидетельствуют о том, что дискретный транзистор также находится в активном режиме при значениях тока базы от 0,1 до 10 мкА во всем температурном диапазоне. Кроме того, исследование этого транзистора позволило измерить напряжение на переходе эмиттер-база как при замкнутом на базу, так и при оборванном коллекторе. Результаты при токе эмиттера равном 10 мкА усреднены и отражены на графике (рис. 9). Сдвиг напряжения эмиттер-база при подключении коллектора к базе вызван тем, что основной ток проходит через относительно тонкую базу непосредственно на коллектор, минуя электрод базы.



**Рис. 9. Температурная зависимость напряжения на переходе эмиттер-база: 1 – коллектор замкнут на базу; 2 – коллектор разомкнут с базой**

Необходимо отметить, что в структуре, изображенной на рис. 7, удельное сопротивление области базы между эмиттером и коллектором составляет значительную величину – 5 кОм/кв. При этом падение напряжения на электроде базы определяется в основном рекомбинационным током. Если при исходной температуре 293 К разница между напряжениями эмиттер-база составляет 41 мВ (рис. 9), то в конце температурного диапазона эта величина равна уже 56 мВ. Таким образом, наблюдается не только изменение абсолютной величины напряжения, но и некоторое изменение крутизны термометрической характеристики. Полученные результаты доказывают, что анализ термосенсора в этом режиме можно проводить с учетом известных электрических моделей транзистора.

Подробное исследование процессов в сенсоре с коллектором, замкнутым на базу, представляет отдельную задачу с привлечением методов сеточного моделирования, которая будет решаться при проведении дополнительных исследований.

## Выводы

В работе обосновано, что эффективными первичными измерительными преобразователями для определения температуры подложки ИМС являются компоненты элементной базы самой микросхемы. Рассмотрены физические и конструкторско-технологические особенности микроэлектронных термосенсоров на основе резистивных, диодных и транзисторных структур.

Показано, что термочувствительные свойства диффузионных резисторов целесообразно использовать для термокомпенсирующих каскадов в составе генераторов тока. В диапазоне температур 200...400 К их использование снижает температурную нестабильность до 0,73 %.

Термосенсоры на основе p-n переходов имеют термочувствительность 2,5...1,5 мВ/К в том же температурном диапазоне. Их использование для измерения температуры подложки ИМС эффективно за счет того, что температурная чувствительность падения напряжения на прямосмещенном p-n переходе не зависит от объема полупроводника, в котором он сформирован. Поэтому свойства термосенсора и требования микроэлектронной технологии, направленной на уменьшение габаритных размеров элементов ИМС, согласованы.

Особенность функционирования транзисторных термосенсоров обусловлена тем, что в схеме с закороченным база-коллекторным переходом интегральный транзистор не утрачивает усилительные свойства. Это объясняется

тем, что эффективная толщина базы меньше длины пробега инжектированного в базу неосновного носителя заряда. Поэтому ток перехода база-коллектор в такой структуре отличен от нуля, а транзистор сохраняет активный режим функционирования. Это обстоятельство подтверждает возможность использования транзисторной модели для установления термометрической характеристики транзисторного микроэлектронного термосенсора.

### Литература

1. *Васильев В.А.* Классификация и методы уменьшения температурных погрешностей датчиков на основе твердотельных структур // Датчики и системы. – 2001. – № 12. – С. 6–7.
2. *Радіаційний детектор температури.* Заявка № 61-38806 Японії, МКІ G01 J 5/08, 5/50. Публ. 01.09.1986.
3. *Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC:* Пер. с англ. / Под ред. У. Томпкинса, Дж. Узбстера. – М.: Мир, 1992. – 592 с.
4. *Бартенев В.Г.* Цифровые датчики температуры // Датчики и системы. – 2004. – № 12. – С. 33–38.
5. *Гребен А.Б.* Проектирование аналоговых интегральных схем. – М.: Энергия. – 1976. – 256 с.
6. *Kulish N.R., Shwartz Yu.M., Borblik V.L. et c.* Self-consistent method for optimization of parameters of diode temperature sensors / Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 1999. – Vol. 2, № 2. – P. 15–27.
7. *Shwartz Yu.M., Borblik V.L., Kulish N.R. et c.* Limiting characteristics of diode temperature sensors // Sensors and Actuators. – 2000. – A.86. – P. 197–205.
8. *Яганов П.О., Шварц Ю.М.* Апроксимація термометричної характеристики діодних сенсорів методом багатофакторного аналізу // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2005. – № 30. – С. 5–11.
9. *Яганов П.А.* Моделирование температурных характеристик кремниевых датчиков при малых уровнях инжекции // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2005. – № 6. – С. 72–78.
10. *Оптимизация структуры кремниевых транзисторных термосенсоров* / В.А. Гусев, А.В. Борисов, П.А. Яганов, Л.Н. Павлов // Электроника и связь. – 2006. – № 2(31). – С. 5–10.
11. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах / Пер. с англ. – 2-е перераб. и доп. изд. – М.: Мир, 1984. – Кн.1. – 456 с.

<sup>1</sup> *Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»*

<sup>2</sup> *Севастопольский национальный технический университет*