

ISSN 1561-2430 (Print)
 ISSN 2524-2415 (Online)
 УДК 621.382
<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-2-232-241>

Поступила в редакцию 04.09.2020
 Received 04.09.2020

**В. Б. Оджаев¹, А. Н. Петлицкий², В. А. Пилипенко², В. С. Просолович¹,
 В. А. Филипеня², Д. В. Шестовский², В. Ю. Явид¹, Ю. Н. Янковский¹**

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

²Открытое акционерное общество «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл»,
 Минск, Беларусь

ВЛИЯНИЕ НЕКОНТРОЛИРУЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ БИПОЛЯРНОГО *n-p-n*-ТРАНЗИСТОРА

Аннотация. Исследованы температурные зависимости статического коэффициента усиления по току (β) биполярных *n-p-n*-транзисторов, сформированных по аналогичным технологическим маршрутам (серии *A* и *B*), в интервале температур 20–125 °С. Содержание неконтролируемых технологических примесей в приборах серии *A* было ниже предела обнаружения методом полного внешнего отражения рентгеновского излучения (по Fe < 4,0 · 10⁹ ат/см²). В приборах серии *B* вся поверхность пластин была покрыта слоем Fe со средней концентрацией 3,4 · 10¹¹ ат/см², наблюдались также пятна Cl, K, Ca, Ti, Cr, Cu, Zn. Установлено, что в приборах серии *B* при среднем уровне тока коллектора ($1,0 \cdot 10^{-6} < I_c < 1,0 \cdot 10^{-3}$ А) статический коэффициент усиления по току больше соответствующего значения в приборах серии *A*. Это обусловлено большей эффективностью эмиттера вследствие высокой концентрации основной легирующей примеси. Данное обстоятельство определяло и более сильную температурную зависимость β в приборах серии *B* вследствие значительного вклада в его величину температурного изменения ширины запрещенной зоны кремния. При $I_c < 1,0 \cdot 10^{-6}$ А β для приборов серии *B* становится существенно меньше соответствующих значений для приборов серии *A* и практически перестает зависеть от температуры. В приборах серии *B* рекомбинационно-генерационный ток преобладает над полезным диффузионным током неосновных носителей заряда в базе вследствие наличия высокой концентрации неконтролируемых технологических примесей. Для приборов серии *A* при $I_c < 10^{-6}$ А температурная зависимость β практически не отличается от аналогичной зависимости для среднего уровня инжекции.

Ключевые слова: биполярный *n-p-n*-транзистор, статический коэффициент усиления по току, рекомбинационно-генерационный ток, температурное изменение ширины запрещенной зоны

Для цитирования. Влияние технологических примесей на температурную зависимость коэффициента усиления биполярного *n-p-n*-транзистора / В. Б. Оджаев [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2021. – Т. 57, № 2. – С. 232–241. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-2-232-241>

**Vladimir B. Odzaev¹, Aliaksandr N. Pyatlitski², Vladimir A. Pilipenko², Uladislaw S. Prosolovich¹,
 Viktor A. Filipenia², Dmitry V. Shestovski², Valentin Yu. Yavid¹, Yuri N. Yankovski¹**

¹Belarusian State University, Minsk, Belarus

²JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company, Minsk, Belarus

THE INFLUENCE OF UNCONTROLLED TECHNOLOGICAL IMPURITIES ON THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE GAIN COEFFICIENT OF A BIPOLAR *n-p-n*-TRANSISTOR

Abstract. Herein, the temperature dependences of the static current gain (β) of bipolar *n-p-n*-transistors, formed by similar process flows (series *A* and *B*), in the temperature range 20–125 °C was investigated. The content of uncontrolled technological impurities in the *A* series devices was below the detection limit by the TXRF method (for Fe < 4.0 · 10⁹ at/cm²). In series *B* devices, the entire surface of the wafers was covered with a layer of Fe with an average concentration of 3.4 · 10¹¹ at/cm²; Cl, K, Ca, Ti, Cr, Cu, Zn spots were also observed. It was found that in *B* series devices at an average collector current level ($1.0 \cdot 10^{-6} < I_c < 1.0 \cdot 10^{-3}$ A) the static current gain was greater than the corresponding value in *A* series devices. This was due to the higher efficiency of the emitter due to the high concentration of the main dopant. This circumstance also determined a stronger temperature dependence of β in series *B* devices due to a significant contribution to its value from the temperature change in the silicon band gap. At $I_c < 1.0 \cdot 10^{-6}$ A β for *B* series devices became significantly less than the corresponding values for *A* series devices and practically ceases to depend on temperature. In series *B* devices, the recombination-generation current prevailed over the useful diffusion current of minority charge carriers in the base due to the presence of a high concentration of uncontrolled technological impurities. For *A* series devices at $I_c < 10^{-6}$ A, the temperature dependence of β practically did not differ from the analogous dependence for the average injection level.

Keywords: bipolar n - p - n -transistor, static current gain, recombination-generation current, temperature change in the band gap

For citation. Odzaev V. B., Pyatlitski A. N., Pilipenko V. A., Prosolovich U. S., Filipenia V. A., Shestovski D. V., Yavid V. Yu., Yankovski Yu. N. The influence of uncontrolled technological impurities on the temperature dependence of the gain coefficient of a bipolar n - p - n -transistor. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2021, vol. 57, no. 2, pp. 232–241 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-2-232-241>

Введение. В практическом плане при эксплуатации биполярных транзисторов важным параметром является статический коэффициент усиления по току, который определяет усилительные свойства как отдельного прибора, так и схемы в целом. Ранее было установлено [1], что электрофизические характеристики биполярных n - p - n -транзисторов существенным образом зависят от содержания неконтролируемых технологических примесей в материале подложки. Наличие высокой концентрации генерационно-рекомбинационных центров, связанных с металлическими примесями, приводит как к увеличению обратного тока через переход коллектор-база транзисторов, так и к существенному снижению напряжения пробоя коллекторного перехода. Это обусловлено тем, что при создании приборов по планарной технологии вблизи p - n -переходов в областях обеднения барьерных структур происходит аккумуляция генерационно-рекомбинационных центров (ГРЦ), что в значительной степени влияет на генерационно-рекомбинационные процессы, ухудшает эксплуатационные параметры полупроводниковых приборов и интегральных микросхем и приводит к снижению процента выхода годных приборов микроэлектроники [2]. Численным моделированием установлено [3], что управлять величиной статического коэффициента усиления по току можно путем изменения геометрических и физических параметров эмиттера и базы. Однако наличие в готовой структуре неконтролируемых технологических примесей может оказывать существенное влияние на усилительные свойства биполярных транзисторов и нивелировать те изменения, которые достигаются варьированием параметров эмиттера и базы. Кроме того, авторами [4] показано, что влияние ГРЦ наиболее существенно проявляется при низких ($I_c < 10^{-6}$ А) уровнях инжекции вследствие увеличения темпа рекомбинации носителей в эмиттерном переходе в приборах с высоким содержанием неконтролируемых технологических примесей. В связи с вышесказанным актуальным является выявление причин лабильной воспроизводимости основных характеристик биполярных планарных n - p - n -транзисторов с целью обнаружения основных факторов, определяющих надежность работы и стабильность эксплуатационных параметров полупроводниковых приборов.

Объекты и методы исследований. В настоящей работе проведены исследования температурных зависимостей статического коэффициента усиления по току биполярных n - p - n -транзисторов в интегральных схемах, сформированных по аналогичным технологическим маршрутам (серии A и B) с использованием идентичных материалов с помощью метода измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) на измерителе параметров полупроводниковых приборов Agilent B 1500A с применением зондовой станции Cascade Summit 11000 (минимальный измеряемый ток $\sim 10^{-15}$ А) в интервале температур 20–125 °С. Легированные слои создавались в пластинах кремния p -типа проводимости с удельным сопротивлением 10 Ом · см ионной имплантацией бора при формировании p -слоя, фосфора при формировании n -слоя. Содержание неконтролируемых технологических примесей на поверхности пластин кремния определялось методом полного внешнего отражения рентгеновского излучения на установке Rigaku TXRF 3750 [5, 6]. Содержание неконтролируемых технологических примесей (таких как Fe, Cl, Ca, Cu, Zn и др.) в приборах серии A было ниже предела обнаружения (по Fe $< 4,0 \cdot 10^9$ ат/см²). В приборах серии B вся поверхность пластин была покрыта слоем Fe со средней концентрацией $3,4 \cdot 10^{11}$ ат/см², наблюдались также пятна Cl, K, Ca, Ti, Cr, Cu, Zn по поверхности пластин. Повышенное содержание неконтролируемых технологических примесей на поверхности пластин серии B создавалось выдержкой пластин в открытой таре в обычном помещении в течение трех суток.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. На рис. 1 приведены зависимости коэффициента усиления β от величины коллекторного тока I_c при различных температурах для обеих исследовавшихся партий приборов. Видно, что для средних и высоких значений коллекторного

тока в приборах серии *B* имеют место более высокие значения статического коэффициента усиления по току в схеме с общим эмиттером β , чем в приборах серии *A*. В области больших токов для приборов обеих серий наблюдается спад коэффициента усиления вследствие действия следующих факторов: уменьшения удельного сопротивления базы, оттеснения тока эмиттера к периферии, увеличения физической толщины базы.

Уменьшение коэффициента усиления при возрастании I_c известно под названием эффекта Вебстера [7], при высоком уровне инжекции β изменяется обратно пропорционально I_c . При малых токах коллектора ($I_c < 10^{-6}$ А) величина β в приборах серии *B* наоборот меньше соответствующего значения для приборов серии *A*. Это обусловлено тем, что вклад рекомбинационно-генерационного тока (так называемого тока Са – Нойса – Шокли [7]) в обедненной области эмиттера и поверхностных токов утечки вследствие наличия высокого содержания неконтролируемых технологических примесей может превышать полезный диффузионный ток неосновных носителей в базе, что приводит к снижению эффективности эмиттера γ . С увеличением температуры для приборов обеих серий β в интервале значений тока коллектора $10^{-6} < I_c < 10^{-3}$ А заметно увеличивается. Рост β связывают главным образом с улучшением эффективности эмиттера γ и коэффициента переноса носителей в базе α_T [7, 8]. Согласно [7] эффективность эмиттера выражается как

$$\gamma = \left[1 + \frac{p_E D_E L_B}{n_B D_B L_E} \operatorname{th} \left(\frac{W}{L_B} \right) \right]^{-1}, \quad (1)$$

где p_E – концентрация дырок в эмиттере, D_E – коэффициент диффузии носителей заряда в эмиттере, L_B – диффузионная длина носителей заряда в базе, n_B – концентрация электронов в базе, D_B – коэффициент диффузии носителей заряда в базе, L_E – диффузионная длина носителей заряда в эмиттере, W – ширина базы. Коэффициент переноса α_T выражается как

$$\alpha_T \approx 1 - \frac{W^2}{2L_B^2}. \quad (2)$$

Согласно (1) величину γ определяет непосредственно степень легирования эмиттера, которая в биполярном транзисторе должна быть во много раз выше, чем степень легирования базы, т. е. $N_E/N_B \gg 1$ (или для *n-p-n*-транзистора $p_E/n_B \ll 1$), где N_B и N_E – концентрация легирующей примеси в базе и эмиттере соответственно. При очень высокой концентрации примеси в эмиттере начинает сказываться эффект сужения ширины запрещенной зоны, который играет ключевую

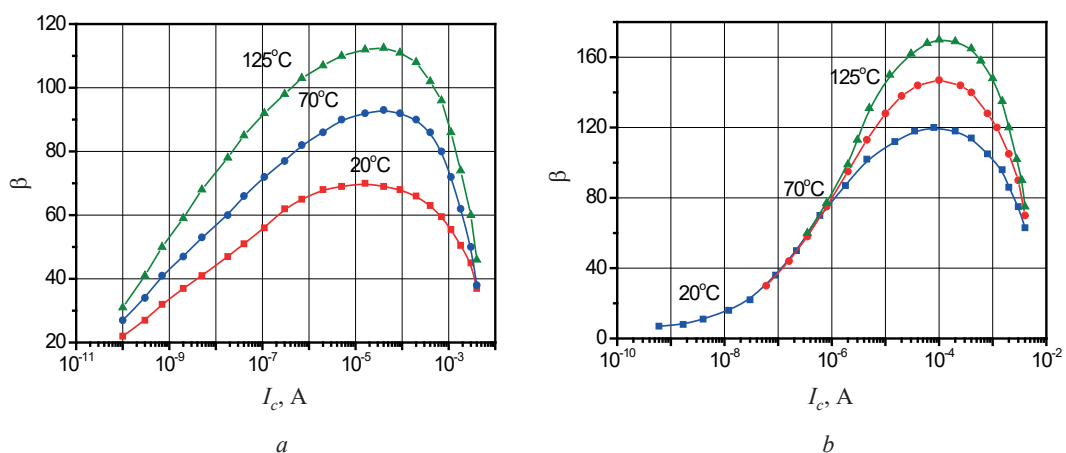


Рис. 1. Зависимость статического коэффициента усиления по току β биполярного *n-p-n*-транзистора от тока коллектора I_c при разных температурах в приборах серии *A* (а) и приборах серии *B* (б)

Fig. 1. Dependence of the static current gain β of a bipolar *n-p-n*-transistor on the collector current I_c at different temperatures in devices of the *A* series (а) and devices of the *B* series (б)

роль в зависимости β от температуры [7, 9]. Сужение ширины запрещенной зоны в сильнолегированном кремнии, как показали исследования [7, 10], связано с повышением энергии электростатического взаимодействия основных и неосновных носителей заряда. Уменьшение ширины запрещенной зоны ΔE_g определяется выражением [7]

$$\Delta E_g = \frac{3q^2}{16\pi\epsilon_s} \left(\frac{q^2 N_E}{\epsilon_s kT} \right)^{1/2}. \quad (3)$$

При комнатной температуре сужение ширины запрещенной зоны ΔE_g описывается формулой [7]

$$\Delta E_g = 22,5 \left(\frac{N_E}{10^{18}} \right)^{1/2} [\text{мэВ}]. \quad (4)$$

Ранее было установлено, что экспериментальные данные [7] хорошо согласуются с формулой (4).

При таких условиях для концентрации собственных носителей в эмиттере n_{iE} справедливо выражение

$$n_{iE}^2 = N_c N_v \exp \left[\frac{-(E_g - \Delta E_g)}{kT} \right] = n_i^2 \exp \left(\frac{\Delta E_g}{kT} \right), \quad (5)$$

где N_c и N_v – эффективные плотности состояний в зоне проводимости и в валентной зоне соответственно, n_i – концентрация собственных носителей заряда в отсутствие эффекта сужения ширины запрещенной зоны. Концентрации неосновных носителей заряда, фигурирующие в выражении (1), допускают следующую замену:

$$n_B = \frac{n_i^2}{N_B} \quad (6)$$

и

$$p_E = \frac{n_{iE}^2}{N_E} = \frac{n_i^2}{N_E} \exp \left(\frac{\Delta E_g}{kT} \right). \quad (7)$$

Следовательно, для эффективности эмиттера справедливо соотношение

$$\gamma \sim \frac{n_B}{p_E} \sim \exp \left(\frac{-\Delta E_g}{kT} \right). \quad (8)$$

На рис. 2 представлены расчетные температурные зависимости эффективности эмиттера γ для n - p - n -транзистора с различным уровнем легирования эмиттера, т. е. разным значением сужения ширины запрещенной зоны. Расчет проведен по формуле (1) с учетом (7) при значениях N_B/N_E , при которых величина γ при комнатной температуре (20 °С) для всех расчетных кривых имела бы приблизительно одно и то же значение, а $W/L_B = 0,1$.

Полученные расчетные данные, приведенные на рис. 2, иллюстрируют увеличение эффективности эмиттера с ростом температуры при различных значениях ΔE_g , т. е. различных уровнях легирования эмиттера. Следовательно, чем больше уровень легирования эмиттера, тем больше ΔE_g и тем сильнее зависимость γ от температуры.

Согласно [7] в биполярном транзисторе с шириной базы $W < 0,1 L_B$ при условии, что коэффициент переноса инжектированных носителей в базе $\alpha_T \approx 1$, коэффициент усиления по току практически полностью определяется эффективностью эмиттера

$$\beta \approx \frac{\gamma}{1 - \gamma} \sim \frac{N_E}{N_B W} = \frac{N_E}{Q_b}, \quad (9)$$

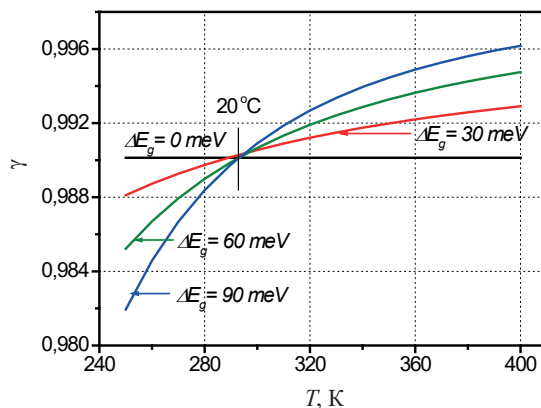


Рис. 2. Зависимости эффективности эмиттера биполярного $n-p-n$ -транзистора от температуры при различных значениях величины сужения ширины запрещенной зоны сильнолегированного кремния ΔE_g

Fig. 2. Dependences of the efficiency of the emitter of a bipolar $n-p-n$ -transistor on temperature at various values of the narrowing of the band gap of heavy doped silicon ΔE_g

где N_B и N_E – концентрация легирующей примеси в базе и эмиттере соответственно, Q_b – число Гуммеля, количество примеси на единицу площади базы (доза при имплантации)

$$Q_b = \int_0^W N_B(x) dx. \quad (10)$$

Из (9) следует, что β будет тем выше, чем сильнее легирован эмиттер, а также иметь такую же температурную зависимость, как и γ . Поэтому коэффициент усиления транзистора по току β также будет пропорционален $\exp(-\Delta E_g/kT)$. На рис. 3 приведены результаты расчетов зависимости коэффициента усиления транзистора по току β от обратной температуры. Расчет проводился по формуле (9) в соответствии с данными рис. 2. Из рис. 3 следует, что в соответствии с выражениями (7)–(9) γ зависит от температуры практически экспоненциально, эта зависимость определяется присутствием в (7) члена $\exp(-\Delta E_g/kT)$, который учитывает сужение запрещенной зоны в сильнолегированном эмиттере. Для умеренно и слаболегированных эмиттеров (концентрация ниже $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) величина ΔE_g достаточно мала и так же пренебрежимо мало влияние температуры на значение коэффициента усиления.

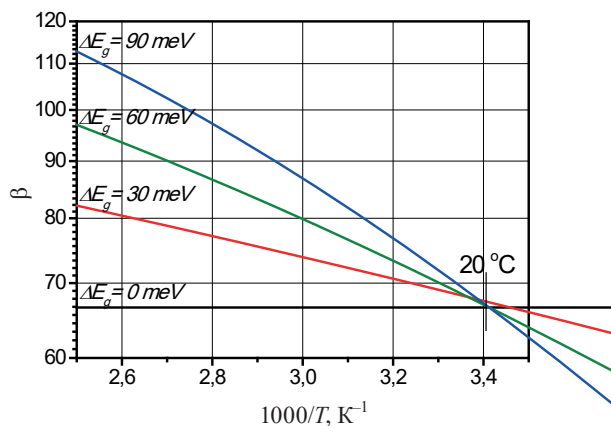


Рис. 3. Зависимости статического коэффициента усиления по току биполярного $n-p-n$ -транзистора от обратной температуры при различных значениях величины сужения ширины запрещенной зоны сильнолегированного кремния ΔE_g

Fig. 3. Dependences of the static current gain of a bipolar $n-p-n$ -transistor on the reciprocal temperature at different values of the narrowing of the band gap of heavy doped silicon ΔE_g

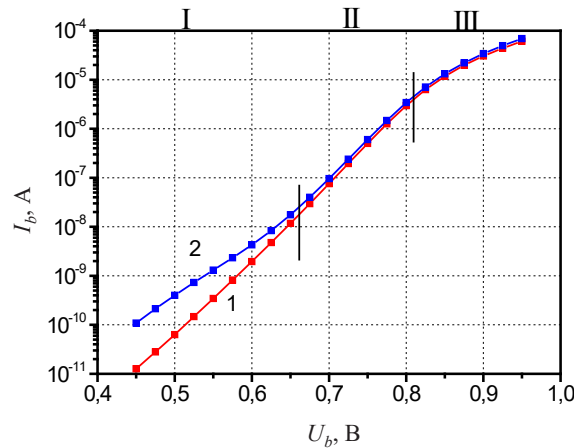


Рис. 4. Зависимость тока базы биполярного *n-p-n*-транзистора от напряжения эмиттер – база для приборов серии *A* (кривая 1) и серии *B* (кривая 2) при $U_{ce} = 3$ В

Fig. 4. Dependence of the base current of a bipolar *n-p-n*-transistor on the emitter-base voltage for devices of the *A* series (curve 1) and the *B* series (curve 2) by $U_{ce} = 3$ V

Из (1), (2) и (8) следует, что на температурную зависимость β в определенной мере могут оказывать влияние и температурные изменения коэффициентов диффузии носителей заряда в базе и эмиттере, а также изменения диффузионной длины неосновных носителей в базе. При уровнях легирования выше 10^{19} см⁻³ подвижность дырок в эмиттере практически не изменяется с ростом температуры [8]. Из соотношения Эйнштейна $D_p = (kT/q)\mu_p$ тогда следует, что коэффициент диффузии должен возрастать при увеличении температуры. Время жизни дырок в эмиттере τ_p также увеличивается при росте температуры [8], следовательно, диффузионная длина дырок в эмиттере $L_p = (D_p \cdot \tau_p)^{1/2}$ при увеличении температуры возрастает, и этот рост совместно с влиянием члена $\exp(-\Delta E_g/kT)$ также приводит к росту коэффициента усиления транзистора.

На рис. 4 приведены зависимости тока базы от напряжения эмиттер – база для приборов серии *A* и серии *B*, где можно выделить три участка [7]: I – область малых токов, где базовый ток изменяется по закону $\exp(qV_b/mkT)$, где m находится в диапазоне от 1 до 2; II – область, где $m = 1$; III – область среднего и высокого уровня инжекции, отличающаяся значительным падением напряжения на сопротивлении базы.

Наибольшее различие в представленных на рис. 4 ВАХ наблюдается в области малых токов (область I). Более высокие значения базового тока в образцах серии *B* определяются высокой плотностью рекомбинационных центров в обедненной области и на поверхности полупроводникового прибора [1]. В области не очень малого уровня инжекции, где $m = 1$, (область II) и области среднего и высокого уровня инжекции (область III) для обоих образцов различие в значениях базового тока невелико. Однако следует отметить, что во всем исследуемом диапазоне напряжений эмиттер – база величины тока базы для приборов серии *B* имели несколько более высокие значения, чем для приборов серии *A*. Ток базы в области III определяется прежде всего ее сопротивлением, которое в свою очередь зависит от профиля легирования базы и конструкции самого транзистора. Поскольку конструкционные и технологические условия изготовления обоих образцов примерно одинаковы, то и величины сопротивления базы r_b имеют близкие значения.

На рис. 5 представлены температурные зависимости коэффициента усиления β для приборов серии *A* и серии *B* при токе коллектора $I_c = 1,0 \cdot 10^{-4}$ А. При таком значении коллекторного тока величина базового тока попадает в интервал, соответствующий $I_b \sim \exp(qV_b/kT)$, где $m = 1$ (см. рис. 4, область II), β достигает области максимальных значений. Температурные зависимости коэффициентов усиления транзисторов по току β в интервале температур 20–125 °С практически параллельны и лишь немного отличаются температурными коэффициентами пропорциональности $\partial\beta/\partial T$ (температурный уход β) при $I_c = \text{const}$. Для транзисторов из серии *A* – 0,44 °С⁻¹, а для *B* – 0,50 °С⁻¹.

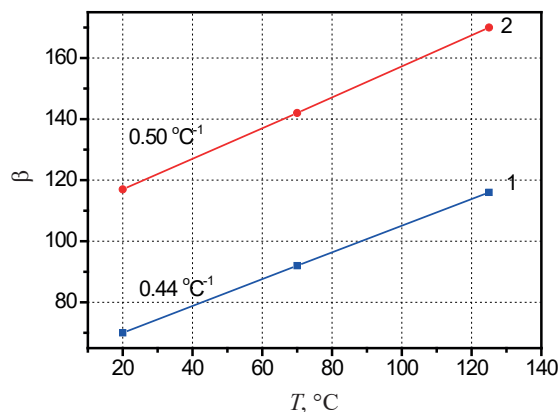


Рис. 5. Температурные зависимости статического коэффициента усиления по току биполярного $n-p-n$ -транзистора приборов серии A (кривая 1) и серии B (кривая 2) для тока коллектора $I_c = 1,0 \cdot 10^{-4}$ А

Fig. 5. Temperature dependences of the static current gain of a bipolar $n-p-n$ -transistor of the A series (curve 1) and the B series (curve 2) for the collector current $I_c = 1.0 \cdot 10^{-4}$ A

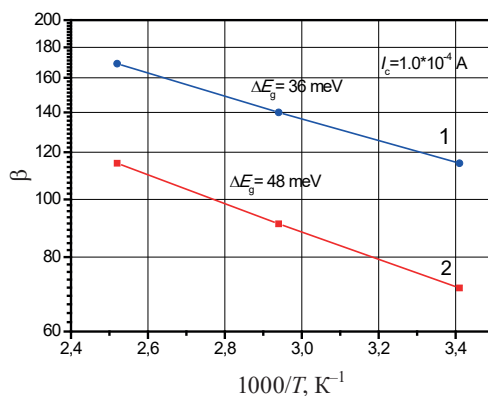


Рис. 6. Зависимость статического коэффициента усиления по току биполярного $n-p-n$ -транзистора приборов серии A (кривая 1) и серии B (кривая 2) от обратной температуры для тока коллектора $I_c = 1,0 \cdot 10^{-4}$ А

Fig. 6. Dependence of the static current gain of a bipolar $n-p-n$ -transistor of the A series (curve 1) and the B series (curve 2) on the reciprocal temperature for the collector current $I_c = 1.0 \cdot 10^{-4}$ A

Если предположить, что основная причина роста коэффициента β с температурой связана с сужением запрещенной зоны при высоких уровнях легирования эмиттера, анализ зависимости $\ln\beta = f(1000/T)$, приведенной на рис. 5, позволил оценить величину ΔE_g . Проведенные при данном предположении расчеты показали, что сужение ширины запрещенной зоны кремния в эмиттере $n-p-n$ -транзистора, ответственное за рост β , должно быть равно 36 и 48 мэВ в приборах из серий A и B соответственно.

Сопоставив полученные расчетные значения ΔE_g , нами была оценена концентрация основной легирующей примеси в эмиттере. Для транзисторов из серии A она приблизительно равна $1,2 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Для транзисторов из серии B $N_E \approx 4,5 \cdot 10^{18}$ см⁻³, что примерно в 3,5 раза больше, чем для приборов из серии A . Таким образом, для $I_c = 1,0 \cdot 10^{-4}$ А при зависимости $I_b \sim \exp(qV_b/kT)$, где $m = 1$, большее значение коэффициента усиления по току для приборов серии B , несмотря на большее содержание в них неконтролируемых технологических примесей, обусловлено в первую очередь более высокой концентрацией основной легирующей примеси в эмиттере. Это, однако, связано и с более сильной температурной зависимостью β в данной области токов инжекции.

При уменьшении токов инжекции менее $1,0 \cdot 10^{-6}$ А коэффициент усиления по току для приборов серии B становится существенно меньше соответствующих значений для приборов се-

рии *A*. В данной области β для приборов серии *B* практически перестает зависеть от температуры. Это обусловлено тем, что при низких ($I_c < 10^{-6}$ А) уровнях инжекции при наличии в приборах серии *B* высокой концентрации неконтролируемых технологических примесей (таких как Fe, Cl, Ca, Cu, Zn и др.) весьма существенным становится вклад рекомбинационно-генерационного тока вследствие наличия большого количества поверхностных состояний в обедненной области эмиттера на границе раздела кремний–окисел по сравнению с полезным диффузионным током неосновных носителей в базе.

Увеличение темпа рекомбинации носителей в эмиттерном переходе в приборах с высоким содержанием неконтролируемых технологических примесей приводит к уменьшению коэффициента инжекции и, как следствие, к уменьшению коэффициента усиления по току.

Высокий вклад рекомбинационно-генерационных процессов в приборах серии *B* превалирует над эффектом температурного изменения ширины запрещенной зоны. Для приборов серии *A* с низким содержанием неконтролируемых технологических примесей при токах коллектора $I_c < 10^{-6}$ А температурная зависимость коэффициента усиления по току практически не отличается от аналогичной зависимости для среднего уровня инжекции. Таким образом, при малых токах коллектора из-за существенного вклада рекомбинационно-генерационных процессов (так называемого тока Са – Нойса – Шокли [7]) в обедненной области эмиттера и поверхностных токов утечки в транзисторах из серии *B* эффект влияния температуры на величину β существенно ниже, чем в транзисторах из серии *A*.

Как сказано выше, ток базы в области III (а следовательно, и ток коллектора) определяется прежде всего сопротивлением базы, которое в свою очередь зависит от профиля легирования базы и конструкции самого транзистора.

Зависимость статического коэффициента усиления по току от изменения температуры способствует образованию горячих точек [9, 10] и изменению энергетической границы появления вторичного пробоя. Следовательно, для уменьшения температурной зависимости статического коэффициента усиления по току необходимо, например, снижение уровня легирования базы транзистора и/или ограничение поверхностной концентрации примесей в эмиттере [9, 10].

Заключение. Установлено, что в биполярном *n-p-n*-транзисторе с высоким содержанием неконтролируемых технологических (фоновых) примесей для увеличения статического коэффициента усиления по току при среднем уровне тока коллектора ($1,0 \cdot 10^{-6} < I_c < 1,0 \cdot 10^{-3}$ А) необходима более высокая концентрация основной легирующей примеси в эмиттере по сравнению с приборами с низким содержанием неконтролируемых технологических (фоновых) примесей. Данное обстоятельство обуславливает и более сильную температурную зависимость β вследствие значительного вклада в его величину температурного изменения ширины запрещенной зоны в сильнолегированном кремнии.

При низких токах инжекции ($I_c < 1,0 \cdot 10^{-6}$ А) статический коэффициент усиления по току для приборов серии *B* становится существенно меньше соответствующих значений для приборов серии *A* и практически перестает зависеть от температуры. Это вызвано существенным вкладом рекомбинационно-генерационного тока в приборах серии *B* по сравнению с полезным диффузионным током неосновных носителей в базе вследствие наличия высокой концентрации неконтролируемых технологических примесей (таких как Fe, Cl, Ca, Cu, Zn и др.) и, соответственно, большим количеством поверхностных состояний в обедненной области эмиттера на границе раздела кремний–окисел.

Для приборов серии *A* с низким содержанием неконтролируемых технологических (фоновых) примесей при токах коллектора $I_c < 10^{-6}$ А температурная зависимость коэффициента усиления по току практически не отличается от аналогичной зависимости для среднего уровня инжекции.

Список использованных источников

1. Исследование влияния технологических примесей на вольт-амперные характеристики биполярного *n-p-n*-транзистора / В. Б. Оджаев [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 2. – С. 244–249. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-244-249>
2. Челябинский, А. Р. Дефектно-примесная инженерия в имплантированном кремнии / А. Р. Челябинский, Ф. Ф. Комаров // Успехи физ. наук. – 2003. – Т. 173, № 8. – С. 813–846.

3. Белоус, А. И. Проектирование интегральных микросхем с пониженным энергопотреблением / А. И. Белоус, В. А. Емельянов, В. С. Сякерский. – Минск: Интегралполиграф, 2009. – 320 с.
4. Зависимость коэффициента усиления биполярного $n-p-n$ -транзистора от параметров легированных областей и содержания технологических примесей / В. Б. Оджаев [и др.] // *Материалы и структуры современной электроники: Материалы VIII Междунар. науч. конф.* – Минск, 2018. – С. 195–199.
5. SEMI M33–0988.
6. Surface analysis for Si–Wafers using total reflection X-ray fluorescence analysis / W. Berneike [et al.] // *Fresenius' Zeitschrift für analytische Chemie.* – 1989. – Vol. 333, № 4/5. – P. 524–526. <https://doi.org/10.1007/bf00572369>
7. Sze, S. M. *Semiconductor Devices: Physics and Technology* / S. M. Sze, M. K. Lee. – 3rd ed. – John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited, 2012. – 582 p.
8. Блихер, А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов: пер. с англ. / А. Блихер. – Л.: Энергоатомиздат: Ленингр. отд-ние, 1986. – 248 с.
9. Buhanan, D. Investigation of current-gain temperature dependence in silicon transistors / D. Buhanan // *IEEE Trans. Electron Devices.* – 1969. – Vol. 16, № 1. – P. 117–124. <https://doi.org/10.1109/t-ed.1969.16573>
10. Фистуль, В. И. Сильнолегированные полупроводники / В. И. Фистуль. – М.: Наука, – 1967. – 416 с.

References

1. Odzhaev V. B., Panfilenko A. K., Pyatlitski A. N., Prosolovich V. S., Shvedau S. V., Filipenya V. A., Yavid V. Yu., Yankovsky Yu. N. Investigation of influence of technological impurities on the I–V characteristics of the bipolar $n-p-n$ -transistor. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 244–249 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-244-249>
2. Chelyadinsky A. R., Komarov F. F. Defect-impurity engineering in implanted silicon. *Physics-Uspokhi*, 2003, vol. 46, no. 8, pp. 789–820. <https://doi.org/10.1070/pu2003v046n08abeh001371>
3. Belous A. I., Emelyanov V. A., Syakersky V. S. *Design of Integrated Circuits with Reduced Power Consumption*. Minsk, Integralpoligraf Publ., 2009. 320 p. (in Russian).
4. Odzaev V. B., Panfilenko A. K., Pyatlitski A. N., Pilipenko V. A., Prasalovich V. S., Filipenia V. A., Yavid V. Yu., Yankovsky Y. N. Dependence of the gain of a bipolar $n-p-n$ -transistor on the parameters of doped regions and the content of technological impurities. *Materialy VIII Mezhdunarodnoi konferentsii "Materialy I struktury sovremennoi elektroniki"* [Proceedings of the VIII International Scientific Conference “Materials and Structures of Modern Electronics”]. Minsk, 2018, pp. 195–199 (in Russian).
5. SEMI M33–0988.
6. Berneike W., Knoth J., Schwenke H., Weisbrod U., Fresenius Z. Surface analysis for Si-wafers using total reflection X-ray fluorescence analysis. *Fresenius' Zeitschrift für analytische Chemie*, 1989, vol. 333, no. 4–5, pp. 524–526. <https://doi.org/10.1007/bf00572369>
7. Sze S. M., Lee M. K. *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, 3rd ed. John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited, 2012. 582 p.
8. Blikher A. *Field-Effect and Bipolar Power Transistor Physics Paperback*. Academic Press, 1981. 336 p. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-105850-0.50012-6>
9. Buhanan D. Investigation of current–gain temperature dependence in silicon transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1969, vol. 16, no. 1, pp. 117–124. <https://doi.org/10.1109/t-ed.1969.16573>
10. Fistul V. I. *Heavy Doped Semiconductors*. Moscow, Nauka Publ., 1967. 416 p. (in Russian).

Информация об авторах

Оджаев Владимир Борисович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики полупроводников и нанoeлектроники, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: odzaev@bsu.by

Петлицкий Александр Николаевич – кандидат физико-математических наук, директор центра, ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл» (ул. Казинца, 121а, 220108, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: petan@tut.by

Пилипенко Владимир Александрович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заместитель директора ГЦ «Белмикроанализ» ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл» (ул. Казинца, 121а, 220108, г. Минск, Республика Беларусь).

Просолович Владислав Савельевич – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий НИЛ

Information about the authors

Vladimir B. Odzaev – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Semiconductor Physics and Nanoelectronics, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: odzaev@bsu.by

Aliaksandr N. Pyatlitski – Ph. D. (Physics and Mathematics), Director of the “Belmicroanalysis” state Center of the JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: petan@tut.by

Vladimir A. Pilipenko – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sc. (Engineering), Professor, Deputy Director of the “Belmicroanalysis” State Center of the JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus).

Uladislaw S. Prasalovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of the Laboratory of

спектроскопии полупроводников, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: prosolovich@bsu.by

Филипеня Виктор Анатольевич – ведущий инженер ГЦ «Белмикрoанализ», ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл» (ул. Казинца, 121а, 220108, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: office@integral.by

Шестовский Дмитрий Викторович – инженер-технолог отдела перспективных технологических процессов, ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл» (ул. Казинца, 121а, 220108, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: DShestovski@integral.by

Явид Валентин Юльянович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник НИЛ спектроскопии полупроводников, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: yavid@bsu.by

Янковский Юрий Николаевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник НИЛ спектроскопии полупроводников, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: yankouski@bsu.by

the Semiconductor Spectroscopy, Assistant Professor at the Department Semiconductor Physics and Nanoelectronics, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: prosolovich@bsu.by

Viktar A. Filipenia – Lead Engineer of the “Belmicrоanalysis” State Center of the JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company (121а, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: office@integral.by

Dmitry V. Shestovski – Engineer-Technologist of the Advanced Technological Processes Department of the JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company (121а, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: DShestovski@integral.by

Valentin Yu. Yavid – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Laboratory of the Semiconductor spectroscopy, Assistant Professor at the Department Semiconductor Physics and Nanoelectronics, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yavid@bsu.by

Yuri N. Yankovski – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher of the Laboratory of the Semiconductor Spectroscopy, Assistant Professor at the Department Semiconductor Physics and Nanoelectronics, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yankouski@bsu.by