

УДК 621.382

**АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ  
БИПОЛЯРНОГО *n-p-n* ТРАНЗИСТОРА**

**Оджаев В.Б.<sup>1</sup>, Петлицкий А.Н.<sup>2</sup>, Просолович В.С.<sup>1</sup>, Филипеня В.А.<sup>2</sup>, Шестовский Д.В.<sup>2</sup>,  
Черный В.В.<sup>3</sup>, Явид В.Ю.<sup>1</sup>, Янковский Ю.Н.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»  
Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Статический коэффициент усиления по току биполярных транзисторов ( $\beta$ ) определяет усиленные свойства, как отдельного прибора, так и схемы в целом. Авторами [1] показано, что влияние глубоких рекомбинационных центров (ГРЦ) наиболее существенно проявляется при низких ( $I_c < 10^{-6}$  А) уровнях инжекции вследствие увеличения темпа рекомбинации носителей в эмиттерном переходе. В связи с этим актуальным является выявление причин лабильной воспроизводимости основных характеристик биполярных *n-p-n*-транзисторов для выявления основных факторов, определяющих стабильность параметров приборов и поиска путей минимизации отрицательных эффектов.

Проведены исследования температурных зависимостей  $\beta$  в интегральных схемах, сформированных по аналогичным технологическим маршрутам (серии *A* и *B*) с использованием идентичных материалов методом измерения ВАХ в интервале температур 20–125 °С. Содержание технологических примесей (ТП) на поверхности пластин Si исследовалось методом полного внешнего отражения рентгеновского излучения. В приборах серии *A* оно было ниже предела обнаружения (по Fe  $< 4,0 \cdot 10^9$  ат./см<sup>2</sup>), а в серии *B* концентрация Fe =  $3,4 \cdot 10^{11}$  ат./см<sup>2</sup>, также обнаружены Cl, K, Ca, Ti, Cr, Cu, Zn.

Ранее было установлено [1], что в приборах серии *B* при среднем уровне тока коллектора ( $10^{-6} < I_c < 10^{-3}$  А)  $\beta$  в схеме с общим эмиттером превышает соответствующее значение в приборах серии *A*. При  $I_c < 10^{-6}$  А  $\beta$  для серии *B* становится существенно меньше  $I_c$  для серии *A*. Температурные зависимости  $\beta$ , представленные на рисунке 1, *a* и *б*, в данных областях также существенно различаются. Расчеты показали, что для серии *B* при  $I_c = 10^{-4}$  А температурное изменение  $\beta$  ( $\partial\beta/\partial T$ ) составляет  $0,49$  °С<sup>-1</sup>, а для серии *A* =  $0,39$  °С<sup>-1</sup>. При снижении  $I_c$  до  $10^{-6}$  А для серии *B*  $\beta$  становится значительно меньше значений чем для серии *A*. В данной области  $\beta$  для серии *B* практически не зависит от температуры. При снижении  $I_c$  от  $10^{-4}$  до  $10^{-7}$  А  $\partial\beta/\partial T$  для серии *A* уменьшается от  $0,39$  до  $0,34$  °С<sup>-1</sup>, а в серии *B* от  $0,49$  до  $0,02$  °С<sup>-1</sup>.

Согласно [2] в биполярном транзисторе с шириной  $W < 0.1 L_B$  при условии, что коэффициент переноса инжектированных носителей в

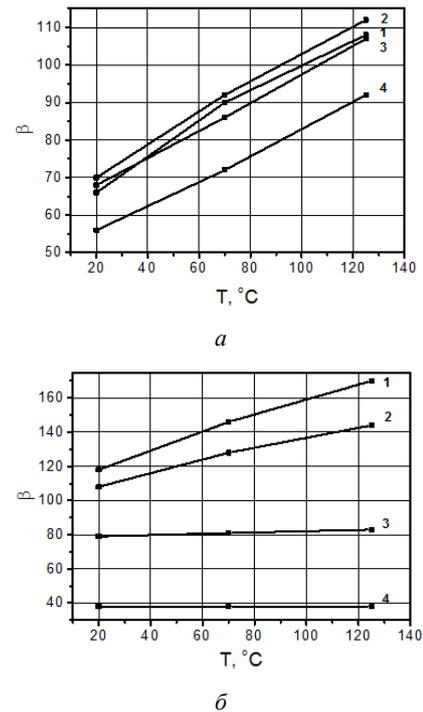


Рисунок 1 – Температурные зависимости  $\beta$  транзисторов серии *A* (*a*) и серии *B* (*б*)  
 $I_c$ , А: 1 –  $10^{-4}$ ; 2 –  $10^{-5}$ ; 3 –  $10^{-6}$ ; 4 –  $10^{-7}$

базе  $\alpha_T \approx 1$ ,  $\beta$  практически полностью определяется эффективностью эмиттера  $\gamma$

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

где  $N_B$  и  $N_E$  – концентрация легирующей примеси в базе и эмиттере соответственно,  $Q_b$  – число Гуммеля, количество примеси на единицу площади базы.

Для эффективности эмиттера справедливо соотношение [2]

$$\frac{\gamma n_B}{p_E \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right)}, \quad (2)$$

где  $\Delta E_g$  – изменение ширины запрещенной зоны, зависящее как от температуры, так и от концентрации свободных носителей заряда. Из (1) следует, что  $\beta$  будет тем выше, чем сильнее легирован эмиттер, и иметь такую же температурную

зависимость, как и  $\gamma$ . Поэтому  $\beta$  также будет пропорционален  $\exp(-\Delta E_g/kT)$ .

Для умеренно и слаболегированных эмиттеров (концентрация ниже  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) величина  $\Delta E_g$  достаточно мала и так же минимально влияние температуры на значение  $\beta$ . Расчеты показали, что  $\Delta E_g$  при  $20^\circ\text{C}$  в эмиттере, ответственное за рост  $\beta$ , равно 36 и 48 мэВ в приборах из партий *A* и *B*, соответственно. Сопоставив расчетные значения  $\Delta E_g$ , была оценена  $N_E$ . Для партии *A* –  $N_E \approx 1,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , а для партии *B* –  $N_E \approx 4,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Таким образом, при  $I_c = 10^{-4} \text{ А}$ , большее значение  $\beta$  для серии *B* обусловлено более высокой  $N_E$ , несмотря на повышенное содержание ТП. Это связано и с более сильной температурной зависимостью  $\beta$  в данной области. Для серии *A* с низким содержанием фоновых ТП при  $I_c < 10^{-6} \text{ А}$  температурная зависимость  $\beta$  практически не отличается от аналогичной зависимости для среднего уровня инжекции. Таким образом, при малых  $I_c$  из-за существенного вклада ГРЦ в обедненной области эмиттера и поверхностных токов утечки в транзисторах из партии *B* эффект влияния температуры на величину  $\beta$  существенно выше, чем в партии *A*.

Наиболее чувствительными величинами к загрязнению ГРЦ, оказывающими влияние на  $\beta$ , являются отношения  $p_E/n_B \approx N_B/N_E$  и  $W/L_B$ . Требуемое соотношение  $N_B/N_E$ , выбирается исходя от оптимальной  $N_E$ , при которой влияние Оже-рекомбинации [2] и изменения  $\beta$  с температурой будут минимальны. В свою очередь,  $N_B$  будет детерминирована величиной  $N_E$ , с учётом требуемого значения сопротивления базы  $r_B$ .

На рисунке 2 показана расчетная зависимость  $\beta$  от величины отношения  $N_B/N_E$  для *n-p-n* транзистора. Расчет проводился для  $20^\circ\text{C}$  при  $N_E = 7,11 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  ( $\Delta E_g = 60 \text{ мэВ}$ ) и  $W/L_B = 0,1$ . Другим важным фактором, определяющим  $\beta$ , является отношение толщины базы к диффузионной длине неосновных носителей в базе  $W/L_B$ .

На рисунке 3 показана расчетная зависимость  $\beta$  от величины отношения  $W/L_B$  для *n-p-n* транзистора. Расчет проводился для  $20^\circ\text{C}$  при  $N_E = 7,11 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  ( $\Delta E_g = 60 \text{ мэВ}$ ) и  $N_B/N_E = 9,29 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3}$ . При топологии интегральной схемы БИКМОП  $W = \text{const}$  и отношение  $W/L_B$  будет полностью определяться диффузионной длиной, связанной, в свою очередь, со временем жизни электронов  $\tau_n$  в базе *n-p-n* транзистора соотношением  $L_B = (D_n \cdot \tau_n)^{1/2}$ . Поэтому, весьма эффективными методами являются проведение входного контроля исходных материалов и соблюдение технологической гигиены в процессе создания ИС.

Установлено, что в биполярном *n-p-n* транзисторе с высоким содержанием фоновых ТП для увеличения  $\beta$  необходима более высокая концентрация основной легирующей примеси в эмиттере по сравнению с приборами, с низким содержанием фоновых ТП. Данное обстоятельство обуславливает и более сильную температурную зависимость  $\beta$  вследствие значительного вклада в его величину температурного изменения ширины запрещенной зоны в сильнолегированном кремнии.

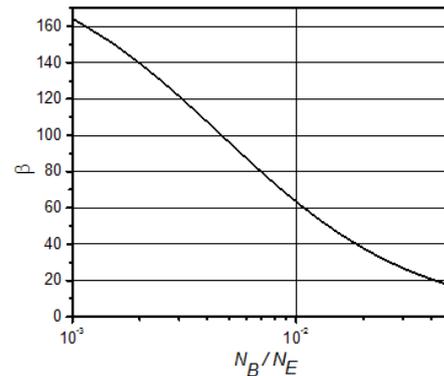


Рисунок 2 – Зависимость  $\beta$  от величины отношения  $N_B/N_E$  для *n-p-n* транзистора

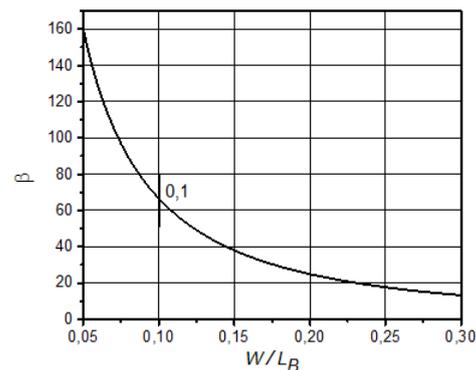


Рисунок 3 – Зависимость  $\beta$  от величины отношения  $W/L_B$  для *n-p-n* транзистора

#### Литература

- Оджаев В.Б. Зависимость коэффициента усиления биполярного *n-p-n* транзистора от параметров легированных областей и содержания технологических примесей / В.Б. Оджаев, А.К. Панфиленко, А.Н. Петлицкий, В.А. Пилипенко, В.С. Просолович, В.А. Филипеня, В.Ю. Явид, Ю.Н. Янковский // Материалы VIII Международной научной конференции «Материалы и структуры современной электроники». Минск. – 2018. – С. 195–199.
- 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.