

УДК 621.382

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

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

¹Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

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

³Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Статический коэффициент усиления по току биполярных транзисторов (β) 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 β 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./см²), а в серии *B* концентрация Fe = $3,4 \cdot 10^{11}$ ат./см², 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) β в схеме с общим эмиттером превышает соответствующее значение в приборах серии *A*. При $I_c < 10^{-6}$ А β для серии *B* становится существенно меньше I_c для серии *A*. Температурные зависимости β , 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 β ($\partial\beta/\partial T$) составляет $0,49$ °С⁻¹, а для серии *A* = $0,39$ °С⁻¹. При снижении I_c до 10^{-6} А для серии *B* β становится значительно меньше значений чем для серии *A*. В данной области β 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⁻¹, а в серии *B* от $0,49$ до $0,02$ °С⁻¹.

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

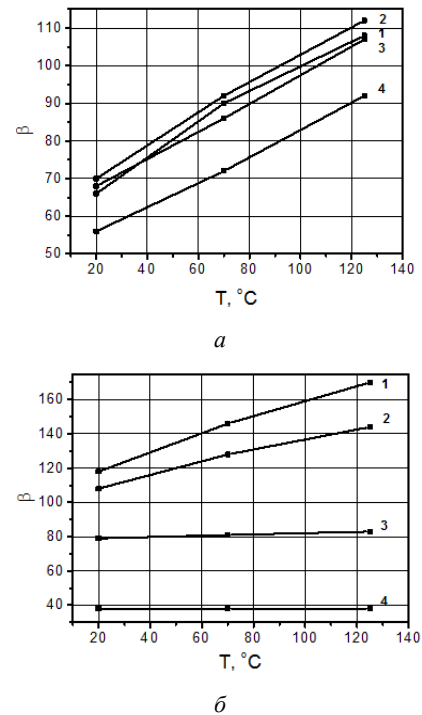


Рисунок 1 – Температурные зависимости β транзисторов серии *A* (*a*) и серии *B* (*б*)
 I_c , А: 1 – 10^{-4} ; 2 – 10^{-5} ; 3 – 10^{-6} ; 4 – 10^{-7}

базе $\alpha_T \approx 1$, β практически полностью определяется эффективностью эмиттера γ

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

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

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

Для умеренно и слаболегированных эмиттеров (концентрация ниже 10^{18} см^{-3}) величина ΔE_g достаточно мала и так же минимально влияние температуры на значение β . Расчеты показали, что ΔE_g при 20°C в эмиттере, ответственное за рост β , равно 36 и 48 мэВ в приборах из партий *A* и *B*, соответственно. Сопоставив расчетные значения ΔE_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 β для серии *B* обусловлено более высокой N_E , несмотря на повышенное содержание ТП. Это связано и с более сильной температурной зависимостью β в данной области. Для серии *A* с низким содержанием фоновых ТП при $I_c < 10^{-6} \text{ А}$ температурная зависимость β 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 β существенно выше, чем в партии *A*.

Наиболее чувствительными величинами к загрязнению ГРЦ, оказывающими влияние на β , 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 β 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 β от величины отношения N_B/N_E для *n-p-n* транзистора. Расчет проводился для 20°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 β , является отношение толщины базы к диффузионной длине неосновных носителей в базе W/L_B .

На рисунке 3 показана расчетная зависимость β от величины отношения W/L_B для *n-p-n* транзистора. Расчет проводился для 20°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 τ_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 β 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 β вследствие значительного вклада в его величину температурного изменения ширины запрещенной зоны в сильнолегированном кремнии.

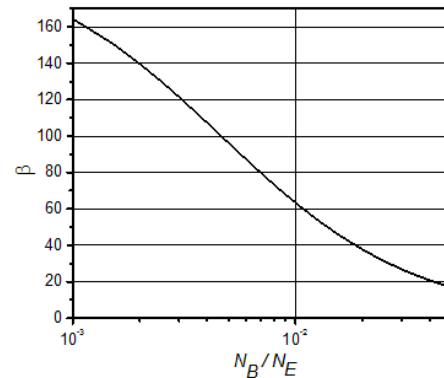


Рисунок 2 – Зависимость β от величины отношения N_B/N_E для *n-p-n* транзистора

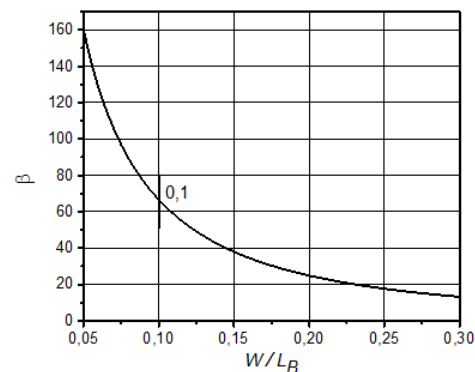


Рисунок 3 – Зависимость β от величины отношения W/L_B для *n-p-n* транзистора

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.