

УДК 621.382

**БИПОЛЯРНЫЕ *n-p-n* ТРАНЗИСТОРЫ В ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ С РАСШИРЕННЫМ ИНТЕРВАЛОМ ОБЛАСТИ МАКСИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ**

Оджаев В.Б.<sup>1</sup>, Панфиленко А.К.<sup>2</sup>, Петлицкий А.Н.<sup>2</sup>, Пилипенко В.А.<sup>2</sup>, Просолович В.С.<sup>1</sup>, Филипеня В.А.<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>ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»  
Минск, Республика Беларусь

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

Биполярный транзистор является одним из наиболее важных полупроводниковых приборов современной микроэлектроники и широко используется в качестве как дискретного активного элемента, так и в интегральных схемах. Одним из основных параметров биполярных транзисторов является статический коэффициент усиления по току ( $\beta$ ), который определяет усилительные свойства как отдельного прибора, так и схемы в целом. Численным моделированием установлено [1], что управлять величиной  $\beta$  можно изменяя геометрические и физические параметры эмиттера и базы. Однако важным с практической точки зрения является не только возможность достижения абсолютного максимального значения величины коэффициента усиления, но и величина диапазона области его максимального значения. В связи с вышесказанным актуальным является выявление основных факторов, влияющих на лабильность данного параметра в биполярных планарных *n-p-n*-транзисторах.

В работе проведены исследования биполярных *n-p-n*-транзисторов в интегральных схемах, сформированных ионным легированием (серии *A* и *B*) по аналогичным технологическим маршрутам 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) при  $T = -60-120$  °С. Легированные слои создавались в пластинах кремния (*p*-тип,  $\rho = 10$  Ом·см) ионной имплантацией  $B^+$  при формировании *p*-слоя и  $P^+$  - при формировании *n*-слоя. Содержание технологических примесей (ТП) на поверхности пластин исследовалось методом полного внешнего отражения рентгеновского излучения на установке *Rigaku TXRF 3750* [2,3]. Ширина базы в приборах серии *A* составляла  $\sim 2$  мкм, содержание ТП (таких, как Fe, Cl, Ca, Cu, Zn и др.) было ниже предела обнаружения. Ширина базы в приборах серии *B*  $\sim 1$  мкм, содержание технологических примесей было достаточно велико [4].

Результаты исследований для приборов серий *A* и *B* представлены на рис.1. Установлено, что  $\beta$  для партии *B* заметно превышает аналогичный

параметр для серии *A* вплоть до области высокого уровня инжекции.

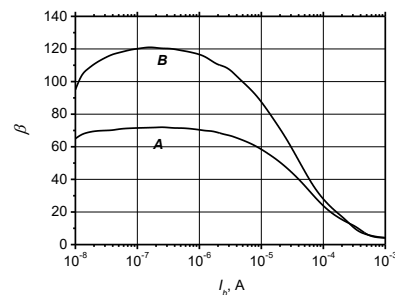


Рисунок 1 – Зависимости статического коэффициента усиления по току  $\beta$  с общим эмиттером от тока базы для приборов серий *A* и *B*.  $T_{изм.} = 20^\circ\text{C}$ ,  $V_c = 5$  В

Это, несмотря на существенно более высокую концентрацию ТП в приборах серии *B*, являющихся эффективными генерационно-рекомбинационными центрами, обусловлено в первую очередь меньшей толщиной базовой области, т.е. меньшим значением числа Гуммеля, которое определяется количеством примеси на единицу площади базы. Однако, если для серии *B* зависимость имеет «колоколообразную» форму и область максимальных значений  $\beta$  находится в достаточно узком диапазоне токов базы ( $I_b$ )  $7 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-6}$  А, то для серии *A* диапазон максимальных значений значительно шире –  $1 \cdot 10^{-8} - 3 \cdot 10^{-5}$  А.

Качественно подобный характер зависимости коэффициента усиления от тока коллектора получен и для схемы включения с общей базой (рис.2):  $\beta$  для приборов партии *B* заметно превышает значения коэффициента усиления в образцах серии *A* в области среднего и высокого уровней инжекции. Для приборов серии *B* зависимость также имеет «колоколообразную» форму - область максимальных значений  $\beta$  находится в достаточно узком диапазоне токов базы ( $I_b$ )  $1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$  А. Для серии *A* диапазон максимальных значений значительно шире –  $8 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-3}$  А. В области больших токов (высокий уровень инжекции) для обеих серий наблюдается спад коэффициента усиления вследствие действия следующих факторов: уменьшения удельного сопротивления базы, оттеснения тока эмиттера к периферии, увеличения физической толщины базы.

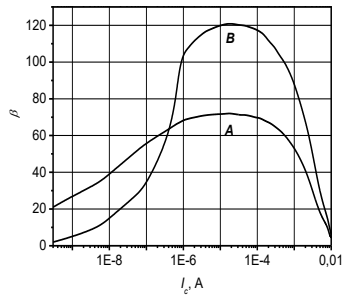


Рисунок 2 – Зависимость  $\beta$  транзистора по току с общей базой от  $I_c$  для приборов серий A и B.  $T_{изм.} = 20^\circ\text{C}$

Уменьшение  $\beta$  при возрастании  $I_c$  известно под названием эффекта Вебстера [5], при высоком уровне инжекции  $\beta$  изменяется обратно пропорционально  $I_c$ .

$$\beta = \frac{\partial I_c}{\partial I_b} \frac{e^{qV_{eb}/kT}}{e^{qV_{eb}/m kT}} = \exp\left[\frac{qV_{eb}}{kT}\left(1 - \frac{1}{m}\right)\right] (I_c)^{1-1/m} \quad (1)$$

При малых токах ( $I_c \leq 10^{-6}$  А) коэффициент усиления по току (серия B) наоборот существенно меньше соответствующего значения для серии A. Это обусловлено большим вкладом рекомбинационно-генерационного тока (так называемого тока Са – Нойса – Шокли [6]) в обедненной области эмиттера и поверхностных токов утечки (серия B) вследствие наличия высокого содержания ТП, который может превышать полезный диффузионный ток неосновных носителей в базе. В области низких токов ( $10^{-6}$ – $10^{-3}$  А/см<sup>2</sup>) поведение тока может быть описано классической теорией Шокли–Нойса–Саа [6]. Согласно этой теории, протекание тока обусловлено рекомбинацией носителей в слое объемного заряда через рекомбинационный уровень, лежащий вблизи середины запрещенной зоны. Именно такими центрами в приборах, сформированных на основе Si, являются технологические быстродиффундирующие примеси Fe, Cl, Ca, Cu, Zn и др., имеющиеся, как установлено методом полного внешнего отражения рентгеновского излучения, в достаточно высокой концентрации в приборах серии B.

Таким образом, при низких ( $I_c \leq 10^{-6}$  А) уровнях инжекции при наличии высокой концентрации ТП (серия B) весьма существенным становится вклад рекомбинационно-генерационного тока вследствие большого количества поверхностных состояний в обедненной области эмиттера на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> по сравнению с полезным диффузионным током в базе. Полный  $I_R$  для резкого *n-p*-перехода можно приблизительно представить суммой диффузионного тока в нейтральной области и генерационного тока в обедненной области [5]:

$$I_R = q \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n} \frac{n_i^2}{N_A} + \frac{qWn_i}{\tau_e}} \quad (2)$$

где  $D_n$  – коэффициент диффузии электронов,  $N_A$  – концентрация акцепторов,  $\tau_n$  – время жизни дырок,  $\tau_e$  – эффективное время жизни носителей заряда, определяемое скоростью генерации электронно-дырочных пар в обедненной области *p-n*-перехода толщиной  $W$ . Увеличение темпа рекомбинации носителей в эмиттерном переходе с высоким содержанием ТП (серия B) приводит к уменьшению коэффициента инжекции эмиттера и, как следствие, к уменьшению  $\beta$ , эффективность эмиттера понижается. Этот процесс при низких ( $I_c \leq 10^{-6}$  А) уровнях инжекции превалирует над эффектом, достигаемым при уменьшении ширины базы. Подавление эффективности генерационно-рекомбинационных процессов в приборах серии A с низким содержанием ТП при низких ( $I_c \leq 10^{-6}$  А) уровнях инжекции приводит к увеличению  $\beta$  и, как следствие, к расширению области максимальных значений коэффициента усиления по току.

Установлено, что для расширения области максимальных значений коэффициента усиления по току в биполярных планарных *n-p-n*-транзисторах необходимо максимально соблюдать чистоту технологических процессов и используемых материалов, предотвращая попадание в рабочие области приборов технологических быстродиффундирующих примесей, вносящих глубокие генерационно-рекомбинационные уровни в запрещенную зону кремния.

#### Литература

1. Белоус, А.И. Проектирование интегральных микросхем с пониженным энергопотреблением./ А.И. Белоус В.А. Емельянов, В.С. Сякерский – Минск.: Интегралполиграф. 2009. – 320 с.
2. SEMI M33-0988.
3. Berneike, W. Surface analysis for Si-Wafers using total reflection X-ray fluorescence analysis / W. Berneike, J. Knoth, H. Schwenke, U. Weisbrod, Z. Fresenius // Anal. Chem. – 1989. – Vol. 333. – P. 524–526.
4. Оджаев, В.Б. Исследование влияния технологических примесей на вольт-амперные характеристики биполярного *n-p-n*-транзистора / В.Б. Оджаев, А.К. Панфиленко, А.Н. Петлицкий, В.С. Просолович, С.В. Шведов, В.А. Филиппеня, В.Ю. Явид, Ю.Н. Янковский // Вестн НАН Беларуси. Сер. физ.-тех. наук. – 2018. – Т. 63, № 2. – С. 244–249.
5. 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.
6. Sah, C.T. Carrier generation and recombination in *p-n* junctions and *p-n* junctions characteristics / C.T. Sah, R.N. Noyce, W. Shockley // Proc. of the IRE. – 1957. – P. 1228–1243.