

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, Беларусь²Открытое 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 < $4,0 \cdot 10^9$ 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. 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 Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 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, Uladislau S. Prosolovich¹,
Viktar A. Filipenia², Dmitry V. Shestovski², Valentin Yu. Yavid¹, Yuri N. Yankovski¹

¹Belarusian State University, Minsk, Belarus²JSC “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 < $4,0 \cdot 10^9$ at/cm²). In series *B* devices, the entire surface of the wafers was covered with a layer of Fe with an average concentration of $3,4 \cdot 10^{11}$ 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