

жизни неравновесных носителей заряда и их диффузионную длину и тем самым улучшить характеристики создаваемых фотодиодов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Graff, K. Metal impurities in silicon-device fabrication / K. Graff. – Springer Science & Business Media, 2000. – 269 p
2. Влияние примесей переходных элементов на темновые токи кремниевых фотодиодов / С.С. Демидов [и др.] // Прикладная физика. – 2014. – № 1. – С. 68–73.
3. Handbook of porous silicon / Ed. by L. Canham. – Springer, 2014. – 901 p.
4. Челядинский, А.Р. Дефектно-примесная инженерия в имплантированном кремнии / А.Р. Челядинский, Ф.Ф. Комаров // УФН. – 2003. – Т. 173, № 8. – С. 813-846.
5. Создание геттера в кремнии путем имплантации ионов сурьмы / П.К. Садовский [и др.] // ФТТ – Т. 55. – 2013. – № 5. – С. 1071-1073.
6. Бураков, А.В. Прибор для бесконтактного измерения времени жизни неравновесных носителей заряда / А.В. Бураков, С.Н. Якубеня, А.М. Янченко // ПТЭ. – 1986. – № 4. – С. 226.
7. Методы и средства фотостимулированной зондовой электрометрии для контроля параметров полупроводниковых пластин / А.Л. Жарин [и др.] // Приборостроение-2016 – Минск: БНТУ, 2016. – С. 12-14.
8. Bullis, W.M. Interpretation of carrier recombination lifetime and diffusion length measurements in silicon / W.M. Bullis, H.R. Huff // J. Electrochem. Soc. – 1996. – vol. 143, № 4. – P. 1399–1405.

ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ БИПОЛЯРНОГО $n-p-n$ -ТРАНЗИСТОРА ОТ ПАРАМЕТРОВ ЛЕГИРОВАННЫХ ОБЛАСТЕЙ И СОДЕРЖАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ

**В. Б. Оджаев¹, А. К. Панфиленко², А. Н. Петлицкий², В. А. Пилипенко²,
В. С. Просолович¹, В. А. Филипеня², В. Ю. Явид¹, Ю. Н. Янковский¹**

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: prosolovich@bsu.by*

²⁾ *Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга
«ИНТЕГРАЛ», ул. Казинца И.П., 121А, 220108, г. Минск, Республика Беларусь,
e-mail: petan@tut.by*

Методом измерения вольт-амперных характеристик исследована зависимость коэффициента усиления по току биполярных $n-p-n$ -транзисторов от параметров базы и содержания технологических примесей. Установлено, что уменьшение ширины базы в биполярном $n-p-n$ -транзисторе позволяет пропорционально увеличить коэффициент усиления по току. Это справедливо только для среднего и высокого уровня инжекции. При низких ($I_c \leq 10^{-6}$ А) уровнях инжекции при наличии в приборах высокой концентрации технологических примесей увеличение темпа рекомбинации носителей в эмиттерном переходе приводит к уменьшению коэффициента инжекции и, как следствие, к уменьшению коэффициента усиления по току. При низких уровнях инжекции этот процесс превалирует над эффектом, достигаемым при увеличении ширины базы.

Ключевые слова: биполярный $n-p-n$ -транзистор; коэффициент усиления по току; технологические примеси.

DEPENDENCE OF THE COEFFICIENT OF AMPLIFICATION OF A BIPOLAR $n-p-n$ -TRANSISTOR ON THE PARAMETERS OF THE DOPED REGIONS AND THE CONTENT OF TECHNOLOGICAL IMPURITIES

V. B. Odzhaev¹, A. K. Panfilenko², A. N. Pyatlitski², V. A. Pilipenko²,
V. S. Prosolovich¹, V. A. Filipenya², V. Yu. Yavid¹, Yu. N. Yankovski¹

¹⁾ *Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus*

²⁾ *JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company, 121 A, Kazintsa Str.,
220108, Minsk, Minsk, Republic of Belarus,*

Corresponding author: V. S. Prosolovich (prosolovich@bsu.by)

The dependence of bipolar $n-p-n$ -transistors current gain on base parameters and residual impurities concentration have been investigated by means of input and output current-voltage characteristics measurements. It was shown that at middle and high levels of injection the base width decrease leads to proportional increase of the current gain. At low ($I_c \leq 10^{-6}$ A) injection levels in the presence of a high concentration of process impurities in devices, an increase in the rate of carrier recombination in the emitter junction leads to a decrease in the injection coefficient and, as a consequence, to a decrease in the current gain. At low injection levels, this process prevails over the effect achieved with increasing the width of the base.

Key words: bipolar $n-p-n$ -transistor; current gain; technological impurities.

ВВЕДЕНИЕ

Ранее было установлено [1], что электрофизические характеристики биполярных $n-p-n$ -транзисторов существенным образом зависят от содержания технологических примесей в материале подложки. Наличие высокой концентрации генерационно-рекомбинационных центров (ГРЦ), 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 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]. Очень важным параметром в практическом плане при эксплуатации биполярных транзисторов является также статический коэффициент усиления по току, который определяет усилительные свойства как отдельного прибора, так и схемы в целом. Численным моделированием установлено [3], что управлять величиной статического коэффициента усиления по току можно изменяя геометрические и физические параметры эмиттера и базы. Однако наличие в готовой структуре технологических примесей может оказывать существенное влияние на усилительные свойства биполярных транзисторов и нивелировать те изменения, которые достигаются варьированием параметров эмиттера и базы. В связи с вышесказанным актуальным является выявление причин лабильной воспроизводимости основных характеристик биполярных планарных $n-p-n$ -транзисторов с целью выявления основ-

ных факторов, определяющих надежность и стабильность эксплуатационных параметров полупроводниковых приборов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящей работе были проведены исследования биполярных $n-p-n$ -транзисторов в интегральных схемах, сформированных ионным легированием (серии А и В) по аналогичным технологическим маршрутам с использованием идентичных материалов с помощью метода измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) на измерителе параметров полупроводниковых приборов Agilent В 1500А с применением зондовой станции Cascade Summit 11000 (минимальный измеряемый ток $\sim 10^{-15}$ А) в интервале температур $-60-120$ °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 технологических примесей на поверхности пластин кремния исследовалось методом полного внешнего отражения рентгеновского излучения на установке Rigaku TXRF 3750 [4,5]. Ширина базы в приборах серии А составляла ~ 2 мкм, содержание технологических примесей (таких, как Fe, Cl, Ca, Cu, Zn и др.) было ниже предела обнаружения. Ширина базы в приборах серии В составляла ~ 1 мкм, содержание технологических примесей (таких, как Fe, Cl, Ca, Cu, Zn и др.) было достаточно велико [1].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что коллекторный ток в приборах серии В примерно в два раза превышает соответствующую величину в приборах серии А во всем исследованном диапазоне напряжений эмиттер – база (рис.1). Ток коллектора биполярного транзистора I_c связан с током эмиттера I_e и током базы I_b следующим соотношением:

$$I_c = I_e - I_b. \quad (1)$$

Следовательно, эмиттерный ток в приборах серии В имеет более высокие значения по сравнению с приборами серии А, что определяется прежде всего более высокой эффективностью эмиттера γ в приборах серии В. Для $n-p-n$ -транзистора:

$$\gamma = \partial I_{ne} / \partial I_e, \quad (2)$$

где I_{ne} – электронная составляющая тока инжекции эмиттера. Исходя из этого, для приборов серии В следует ожидать более высоких значений статического коэффициента усиления по току в схеме с общим эмиттером β , который равен:

$$\beta = \partial I_c / \partial I_b, \quad (3)$$

т.е. коэффициент усиления по току в общем случае зависит от тока коллектора.

Как видно из рис.2 это действительно имеет место для средних и высоких значений коллекторного тока в приборах серии В. 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 [6], при высоком уровне инжекции β изменяется обратно пропорционально I_c . При малых токах коллектора ($I_c \leq 10^{-6}$ А) β в приборах серии В наоборот меньше соответствующего значения для приборов серии А. Это обусловлено тем, что вклад рекомби-

национно-генерационного тока (так называемого тока Са – Нойса – Шокли [6]) в обедненной области эмиттера и поверхностных токов утечки вследствие наличия высокого содержания технологических примесей может превышать полезный диффузионный ток неосновных носителей в базе. Следовательно, эффективность эмиттера понижается.

Коэффициент усиления по току β возрастает с током коллектора по следующему закону [6]:

$$\beta = \frac{\partial I_c}{\partial I_b} \sim \frac{e^{qV_{eb}/kT}}{e^{qV_{eb}/mkT}} = \exp\left[\frac{qV_{eb}}{kT}\left(1 - \frac{1}{m}\right)\right] \sim (I_c)^{1-1/m}. \quad (4)$$

В биполярном транзисторе с шириной базы $W < 0.1 L_d$ (L_d – диффузионная длина носителей заряда), коэффициент усиления по току почти полностью определяется эффективностью эмиттера при условии, что коэффициент переноса инжектированных носителей в базе $\alpha_T \approx 1$,

$$\beta \approx \frac{\gamma}{1-\gamma} \sim \frac{N_e}{N_b W} = \frac{N_e}{Q_b}, \quad (5)$$

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):

$$Q_b = \int_0^W N_b(x) dx. \quad (6)$$

Из (5) следует, что β будет тем выше, чем сильнее легирован эмиттер. С другой стороны, коэффициент усиления по току обратно пропорционален Q_b , которое в свою очередь определяется дозой и профилем распределения легирующей примеси в базе транзистора и шириной базы.

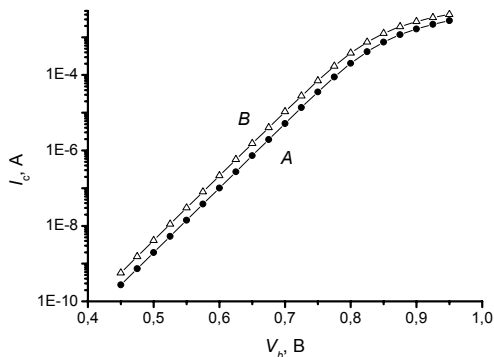


Рисунок 1. – Зависимость тока коллектора от напряжения эмиттер – база.
 $V_c = 5 \text{ В}, T = 20 \text{ }^\circ\text{С}$

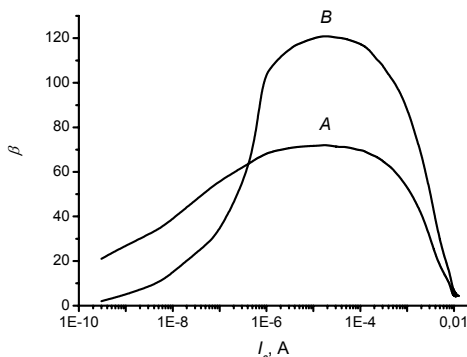


Рисунок 2. – Зависимость коэффициента усиления биполярного $n-p-n$ -транзистора от тока коллектора $V_c = 5 \text{ В}, T = 20 \text{ }^\circ\text{С}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что уменьшение ширины базы в биполярном $n-p-n$ -транзисторе позволяет пропорционально увеличить коэффициент усиления по току. Это справедливо только для среднего и высокого уровня инжекции. При низких ($I_c \leq 10^{-6}$ А) уровнях инжекции и наличии в приборах высокой концентрации 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 обеднённой 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 технологических примесей приводит к уменьшению коэффициента инжекции и, как следствие, к уменьшению коэффициента усиления по току. Этот процесс при низких ($I_c \leq 10^{-6}$ А) уровнях инжекции преобладает над эффектом, достигаемым при увеличении ширины базы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Исследование влияния технологических примесей на вольт-амперные характеристики биполярного $n-p-n$ -транзистора / В.С. Просолович [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тех. наук. –2018. –Т.63, №2, –С.244–249.
2. Челядинский А.Р. Дефектно-примесная инженерия в имплантированном кремнии/ А.Р. Челядинский, Ф.Ф. Комаров // УФН. –2003. –Т. 173. № 8. – С.813—846.
3. Проектирование интегральных микросхем с пониженным энергопотреблением/А.И. Белоус, В.А. Емельянов, В.С. Сякерский // Интегралполиграф. – Минск.: 2009. –320 с.
4. SEMI M33-0988
5. Surface analysis for Si-Wafers using total reflection X-ray fluorescence analysis / W. Berneike [et al.] // Anal. Chem. –1989. –Vol.333. – P. 524–526.
6. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х кн. —М.: Мир, 1984.— Кн. 1. – 455 с.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ БОРОМ НА ТЕРМОДЕЛОКАЛИЗАЦИЮ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКЕ - ПОЛУПРОВОДНИКЕ $TlInS_2$

А. П. Одринский¹, М. Н. Yu Seyidov^{2,3}, А. И. Наджафов³, V. B. Aliyeva³

¹) *Институт технической акустики НАН Беларуси, пр. Людникова, 13, 210723 Витебск, Беларусь, e-mail: a.odrinsky@gmail.com*

²) *Department of Physics, Gebze Technical University, 41400 Gebze, Kocaeli, Turkey, e-mail: smirhasan@gtu.edu.tr*

³) *Институт Физики НАН Азербайджана, пр. Г. Джавида, 33, AZ-1143 Баку, Азербайджан, e-mail: a.najafov@mail.ru*

Представлены результаты исследования центров локализации заряда (ЦЛ) легированного бором кристалла сегнетоэлектрика - полупроводника $TlInS_2$ методом фотоэлектрической релаксационной спектроскопии (PICTS). Обсуждаются особенности регистрации термоделокализации носителей заряда в области температуры фазовых переходов (ФП), в сравнении с нелегированным кристаллом и $TlInS_2:La$, и их связь с проявлением у $TlInS_2$:В свойств релаксора.

Ключевые слова: $TlInS_2$; сегнетоэлектрики; центры локализации заряда; PICTS.