

неспособном, эффективным и практичным как для промышленного, так и для домашнего использования.

Коллектив авторов имеет опыт и показал возможность использования MEMS технологий в оптических системах, а проведенное предварительное моделирование в среде ANSYS, с использованием пакета программ Zemax OpticStudio, показало, что реальное увеличение КПД составит от 5 до 15%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Baran, D.; Ashraf, R.S.; Hanifi, D.A.; Abdelsamie, M.; Gasparini, N.; Röhr, J.A.; Holliday, S.; Wadsworth, A.; Lockett, S.; Neophytou, M.; et al. Reducing the efficiency–stability–cost gap of organic photovoltaics with highly efficient and stable small molecule acceptor ternary solar cells. *Nat. Mater.* 2016, 16, 363.
2. Narasimhan, V.; Jiang, D.; Park, S.-Y. Design and optical analyses of an arrayed microfluidic tunable prism panel for enhancing solar energy collection. *Appl. Energy* 2016, 162, 450–459.
3. Zamfirescu, C.; Dincer, I. Assessment of a new integrated solar energy system for hydrogen production. *Sol. Energy* 2014, 107, 700–713.
4. Duarte, F. Tunable laser optics: Applications to optics and quantum optics. *Prog. Quantum Electron.* 2013, 37, 326–347.
5. Liu H.C., Zhong J.W., Lee C., Lee S.W., Lin L.W. A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications. *Appl. Phys. Rev.* 2018;5:041306. doi: 10.1063/1.5074184.
6. Du Y., Xu J., Paul B., Eklund P. Flexible thermoelectric materials and devices. *Appl. Mater. Today.* 2018;12:366–388. doi: 10.1016/j.apmt.2018.07.004.
7. Tian W.C., Ling Z.Y., Yu W.B., Shi J. A Review of MEMS Scale Piezoelectric Energy Harvester. *Appl. Sci.* 2018;8:645. doi: 10.3390/app8040645.
8. Todaro M.T., Guido F., Mastronardi V., Desmaele D., Epifani G., Algieri L., De Vittorio M. Piezoelectric MEMS vibrational energy harvesters: Advances and outlook. *Microelectron. Eng.* 2017;183:23–36. doi: 10.1016/j.mee.2017.10.005.
9. Fei C., Liu X., Zhu B., Li D., Yang X., Yang Y., Zhou Q. AlN piezoelectric thin films for energy harvesting and acoustic devices. *Nano Energy.* 2018;51:146–161. doi: 10.1016/j.nanoen.2018.06.062.

ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ БИПОЛЯРНОГО n - p - n -ТРАНЗИСТОРА

**В. Б. Оджаев¹, А. Н. Петлицкий², В. А. Пилипенко², В. С. Просолович¹,
В. А. Филипьян², Д. В. Шестовский², 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., д.121А, 220108, Минск, Беларусь, e-mail: petan@tut.by*

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 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 сло-

ем 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 обеих серий при среднем уровне тока коллектора ($1.0 \cdot 10^{-6} < I_c < 1.0 \cdot 10^{-3}$ А), величина β и его температурная зависимость определяются эффективностью эмиттера и температурным изменением ширины запрещенной зоны кремния. При низком уровне инжекции ($I_c < 1.0 \cdot 10^{-6}$ А) на величину β и его температурную зависимость для приборов серии B существенное влияние оказывает высокая концентрация 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.

INFLUENCE OF THE BAND GAP ON THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE GAIN COEFFICIENT OF A BIPOLAR n - p - n -TRANSISTOR

V. B. Odzaev¹, A. N. Pyatlitski², V. A. Pilipenko², V. S. Prosolovich¹,
V. A. Filipenia², D. V. Shestovski², V. Yu. Yavid¹, Yu. N. Yankovski¹

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

²⁾ JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company,

121A Kazintsa Street, 220108 Minsk, Belarus

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

The temperature dependences of the static current gain (β) of bipolar n - p - n -transistors formed by similar process flow (series A and B) in the temperature range of 20–125° C have been investigated. The content of technological impurities in the A series devices was below the detection limit by the TXRF method (for Fe $< 4.0 \cdot 10^9$ ат/см²). In series B devices, the entire surface of the wafers was covered with an Fe layer with an average concentration of $3.4 \cdot 10^{11}$ ат/см²; Cl, K, Ca, Ti, Cr, Cu, and Zn spots were also observed. It was found that in devices of both series, at an average collector current ($1.0 \cdot 10^{-6} < I_c < 1.0 \cdot 10^{-3}$ А), the value of β and its temperature dependence are determined by the emitter efficiency and the temperature change in the silicon band gap. At a low injection level ($I_c < 1.0 \cdot 10^{-6}$ А), the value of β and its temperature dependence for B series devices is significantly influenced by a high concentration of technological impurities. For series A devices at $I_c < 10^{-6}$ А, the temperature dependence of β practically does not differ from the analogous dependence for the middle injection level.

Key words: bipolar n - p - n -transistor; static current gain; recombination-generation current; temperature change in the band gap.

ВВЕДЕНИЕ

В практическом плане при эксплуатации биполярных транзисторов важным параметром является статический коэффициент усиления по току (β), который определяет усилительные свойства, как отдельного прибора, так и схемы в целом. Численным моделированием установлено [1], что управлять величиной β можно изменяя геометрические и физические параметры эмиттера и базы. Однако наличие в готовой структуре технологических примесей может оказывать существенное влияние на усили-

тельные свойства биполярных транзисторов и нивелировать те изменения, которые достигаются варьированием параметров эмиттера и базы. Авторами [2] показано, что влияние генерационно-рекомбинационных центров (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 технологических примесей. В связи с вышесказанным актуальным является выявление причин лабильной воспроизводимости основных характеристик биполярных планарных $n-p-n$ -транзисторов с целью выявления факторов, определяющих надежность и стабильность эксплуатационных параметров полупроводниковых приборов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследованы температурные зависимости статического коэффициента усиления по току биполярных $n-p-n$ -транзисторов, сформированных по аналогичным технологическим маршрутам (серии А и В) 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 технологических примесей на поверхности пластин кремния исследовалось методом полного внешнего отражения рентгеновского излучения на установке Rigaku TXRF 3750 [3, 4]. Содержание технологических примесей (таких, как Fe, Cl, Ca, Cu, Zn и др.) в приборах серии А было ниже предела обнаружения (по Fe $< 4.0 \cdot 10^9$ ат/см²). В приборах серии В 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.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из рис. 1 ($a, б$) видно, что для средних и высоких значений коллекторного тока в приборах серии В имеют место более высокие значения статического коэффициента усиления по току в схеме с общим эмиттером, чем в приборах серии А. В области больших токов для приборов обеих серий наблюдается спад коэффициента усиления вследствие уменьшения удельного сопротивления базы, оттеснения тока эмиттера к периферии, увеличения физической толщины базы. При малых токах коллектора ($I_c < 10^{-6}$ А) величина β в приборах серии В наоборот меньше соответствующего значения для приборов серии А. Это обусловлено тем, что вклад рекомбинационно-генерационного тока (так называемого тока Са-Нойса-Шокли [5]) в обедненной области эмиттера и поверхностных токов утечки вследствие наличия высокого содержания технологических примесей может превышать полезный диффузионный ток неосновных носителей в базе, что приводит к снижению эффективности эмиттера γ . С увеличением температуры для приборов обеих серий β в интервале значений тока коллектора $10^{-6} < I_c < 10^{-3}$ А заметно увеличивается. Рост β главным образом, связывают с улучшением эффективности эмиттера γ и коэффициента переноса носителей в базе α_T [5, 6]. Величину γ определяет непосредственно степень легирования эмиттера.

При очень высокой концентрации примеси в эмиттере начинает сказываться эффект сужения ширины запрещенной зоны, который играет ключевую роль в зависи-

мости β от температуры [5,7]. Сужение ширины запрещенной зоны в сильнолегированном кремнии, как показали исследования [5,8], связано с повышением энергии электростатического взаимодействия основных и неосновных носителей заряда. Согласно [5] в биполярном транзисторе с шириной базы $W < 0.1 L_B$ при условии, что коэффициент переноса инжектированных носителей в базе $\alpha_T \approx 1$, коэффициент усиления по току практически полностью определяется эффективностью эмиттера:

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

где N_B и N_E – концентрация легирующей примеси в базе и эмиттере соответственно, Q_b – число Гуммеля, количество примеси на единицу площади базы (доза при имплантации):

$$Q_b = \int_0^W N_B(x) dx . \quad (2)$$

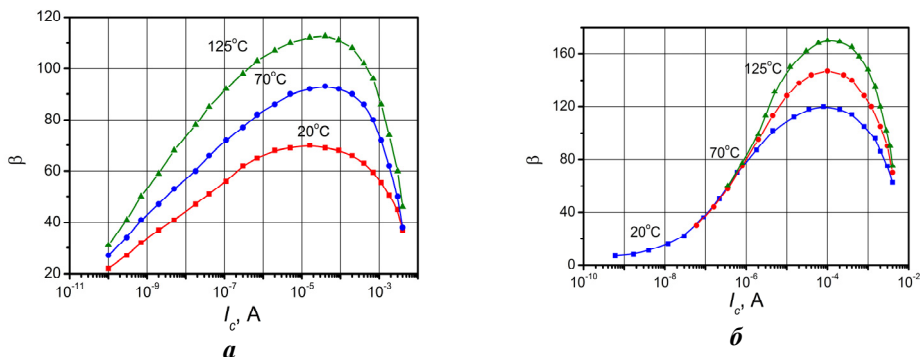


Рисунок 1. – Зависимость статического коэффициента усиления по току β биполярного $n-p-n$ -транзистора от тока коллектора I_c при разных температурах в приборах серии А (а) и приборах серии В (б)

Из (1) следует, что β будет тем выше, чем сильнее легирован эмиттер, а также иметь такую же температурную зависимость, как и γ . Поэтому коэффициент усиления транзистора по току β также будет пропорционален $\exp(-\Delta E_g/kT)$, следовательно, γ зависит от температуры практически экспоненциально. Для умеренно и слаболегированных эмиттеров (концентрация ниже $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) величина ΔE_g достаточно мала и так же пренебрежимо мало влияние температуры на значение коэффициента усиления. Действительно, из рис. 2 видно, что если для приборов серии В при токе коллектора температурное изменение коэффициента усиления по току ($\delta \beta / \delta T$) составляет $0.49 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, то для приборов серии А – $0.39 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. При уменьшении токов инжекции менее $1.0 \cdot 10^{-6} \text{ А}$ коэффициент усиления по току для приборов серии В становится существенно меньше соответствующих значений для приборов серии А. В данной области β для приборов серии В практически перестает зависеть от температуры. Проведенные оценки показали, что $\delta \beta / \delta T$ при изменении коллекторного тока от $1.0 \cdot 10^{-4} \text{ А}$ до $1.0 \cdot 10^{-7} \text{ А}$ для приборов серии А уменьшается от $0.39 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ до $0.34 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, а приборах серии В от $0.49 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ до $0.02 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Это обусловлено существенным влиянием

вклада 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 при низких ($I_c < 10^{-6}$ А) уровнях инжекции при наличии в приборах серии *B* высокой концентрации технологических примесей (таких, как Fe, Cl, Ca, Cu, Zn и др.).

Проведенные расчеты показали, что сужение ширины запрещенной зоны кремния при 20 °С в эмиттере *n-p-n*-транзистора, 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 транзисторов из партии *A* приблизительно равна $1.2 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Для транзисторов из партии *B* – $N_E \approx 4.5 \cdot 10^{18}$ см⁻³, что примерно в 3.5 раза больше, чем для приборов из партии *A*. Таким образом, при $I_c = 1.0 \cdot 10^{-4}$ А, большее значение β для приборов серии *B*, несмотря на большее содержание в них технологических примесей, обусловлено в первую очередь более высокой N_E . Это связано и с более сильной температурной зависимостью β в данной области. Высокий вклад рекомбинационно-генерационных процессов в приборах серии *B* превалирует над эффектом температурного изменения ширины запрещенной зоны. Для приборов серии *A* с низким содержанием технологических фоновых примесей при $I_c < 10^{-6}$ А температурная зависимость β практически не отличается от аналогичной зависимости для среднего уровня инжекции. Таким образом, при малых токах коллектора из-за существенного вклада рекомбинационно-генерационных в обедненной области эмиттера и поверхностных токов утечки в транзисторах из партии *B* эффект влияния температуры на величину β существенно выше, чем в транзисторах из партии *A*.

Коэффициент усиления транзистора в схеме с общим эмиттером при повышении температуре, начиная с некоторых значений тока коллектора для обеих серий приборов, становится ниже, чем низкотемпературный (20 °С) коэффициент усиления. Данный эффект более выражен для приборов серии *A*, имеющих низкую концентрацию технологических примесей. Это может свидетельствовать о резком спаде с ростом температуры коэффициента диффузии электронов в базе вследствие рассеяния носителей заряда на носителях [7, 8].

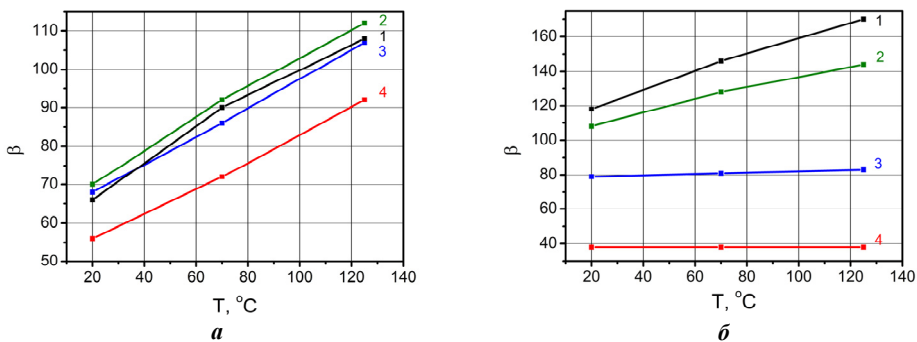


Рисунок 2. – Температурные зависимости статического коэффициента усиления по току биполярного *n-p-n*-транзистора приборов серии *A* (*a*) и серии *B* (*б*).
 I_c : 1 – $1.0 \cdot 10^{-4}$ А, 2 – $1.0 \cdot 10^{-5}$ А, 3 – $1.0 \cdot 10^{-6}$ А, 4 – $1.0 \cdot 10^{-7}$ А

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что в биполярном $n-p-n$ -транзисторе с высоким содержанием технологических фоновых примесей для увеличения β необходима более высокая N_E по сравнению с приборами с низким содержанием технологических фоновых примесей. Данное обстоятельство обуславливает и более сильную температурную зависимость β вследствие значительного вклада в его величину ΔE_g в сильнолегированном Si. При низких токах инжекции ($I_c < 1.0 \cdot 10^{-6}$ А) статический коэффициент усиления по току для приборов серии В становится существенно меньше соответствующих значений для приборов серии А и практически перестает зависеть от температуры. Это вызвано существенным вкладом рекомбинационно-генерационного тока в приборах серии В по сравнению с полезным диффузионным током неосновных носителей в базе вследствие наличия высокой концентрации технологических примесей и, соответственно, большим количеством поверхностных состояний в обеднённой области эмиттера на границе раздела кремний-окисел.

Для приборов серии А с низким содержанием технологических фоновых примесей при $I_c < 10^{-6}$ А температурная зависимость β слабо отличается от аналогичной зависимости для среднего уровня инжекции. Для $I_c > 10^{-3}$ А β при повышенной температуре для обеих серий приборов, становится ниже, чем низкотемпературный (20 °С) коэффициент усиления. Данный эффект более выражен для приборов серии А, имеющих низкую концентрацию технологических примесей. Это может свидетельствовать о резком спаде с ростом температуры коэффициента диффузии электронов в базе вследствие рассеяния носителей заряда на носителях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

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. 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.
3. SEMI M33-0988.
4. 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.
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. Блихер А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов. Пер. с англ. В. М. Волле, Л. С. Костиной; Под ред. И. В. Грехова. - Л. : Энергоатомиздат : Ленингр. отд-ние, 1986. – 248 С.
7. D. Buhanan Investigation of current-gain temperature dependence in silicon transistors // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1969. - Vol. 16. - No. 1. - P. 117–124.
8. Фистуль В. И. Сильнолегированные полупроводники/ В. И. Фистуль. - М.: Наука, - 1967. – 416 с.