

Влияние параметров слоя кремний-германиевой базы на эффект саморазогрева в структуре гетеропереходного биполярного транзистора

К.О. Петросянц^{1,2}, М.В. Кожухов¹

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

²Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (г. Москва)

Influence of SiGe Base Layer Parameters on Self-Heating Effect in Heterojunction Bipolar Transistor Structure

К.О. Petrosyants^{1,2}, M.V. Kozhukhov¹

¹National Research University of Higher School of Economics

²Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Проведено электротепловое моделирование современных структур Si и SiGe биполярных транзисторов с помощью САПР Sentaurus Synopsys. Показано, что для SiGe гетеропереходных биполярных транзисторов, работающих на высоких плотностях тока, наблюдается более высокая рабочая температура по сравнению с идентичными кремниевыми транзисторами при одинаковой рассеиваемой мощности, что приводит к сильной деградации электрофизических параметров прибора и его электрических характеристик.

Ключевые слова: электротепловое моделирование; приборно-технологическое моделирование; эффект саморазогрева; SiGe гетеропереходный биполярный транзистор; тепловое сопротивление.

An electro-thermal modeling of modern SiGe and Si bipolar transistor structures using TCAD Sentaurus Synopsys has been carried out. It has been shown that for SiGe heterojunction bipolar transistors, operating at high current density, the internal temperature is higher than for identical Si transistors. As a result a stronger degradation of the device parameters and electrical characteristics is observed.

Keywords: electro-thermal modeling; TCAD simulation; self-heating effects; SiGe HBT; thermal resistance.

Кремний-германиевые (SiGe) гетеропереходные биполярные транзисторы (ГБТ) являются перспективными компонентами мощных и высокочастотных интегральных схем для радиотехнических и телекоммуникационных применений. Однако известно, что существенным ограничивающим фактором, вызывающим деградацию характеристик SiGe ГБТ, являются эффекты саморазогрева и отвода тепла из активной рабочей области прибора. Это обусловлено двумя особенностями конструкции SiGe ГБТ (рис.1,а): наличием SiGe-базы, теплопроводность которой примерно в 20 раз меньше, чем у кремния (соответственно 0,085 и 1,5 Вт/(см·К)); наличием мелкой (STI) и глубокой (DTI) шелевой SiO₂-изоляции, теплопроводность которой равна 0,014 Вт/(см·К), что в 100 раз меньше, чем у кремния. Таким образом, для SiGe ГБТ проблема саморазогрева является более критичной, чем для традиционных кремниевых биполярных транзисторов (Si БТ).

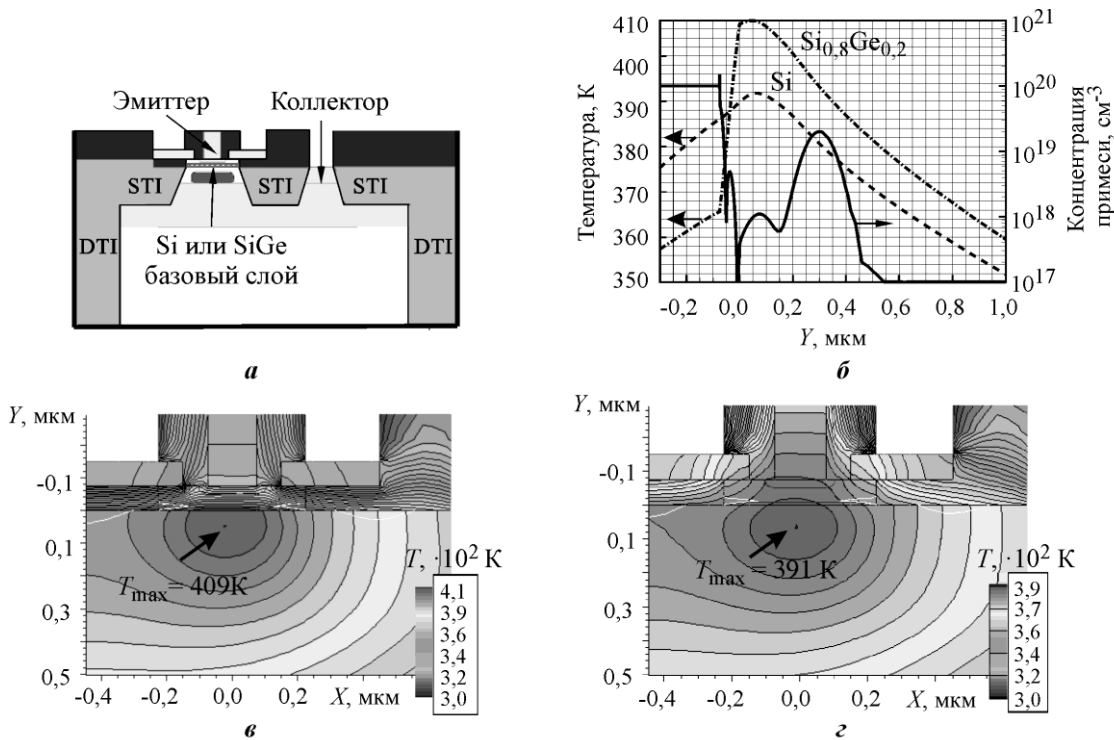


Рис.1. Структура SiGe ГБТ с мелкой и глубокой щелевой изоляцией (а); 1D-распределение примеси и температуры в вертикальном сечении структуры SiGe ГБТ и Si БТ (б); 2D-распределение температуры в активной области структур SiGe ГБТ (в) и Si БТ (г) без учета областей STI и DTI ($I_K = 1$ мА и $U_{KЭ} = 4$ В)

Создание оптимальной структуры SiGe ГБТ, обеспечивающей необходимые электротепловые режимы работы, – сложная конструкторско-технологическая задача. Для ее решения используется TCAD-моделирование, позволяющее спрогнозировать распределение температуры в 2D/3D-структуре прибора, максимальную температуру в активной области прибора $T_{\max}$ и его тепловое сопротивление R_{th} , а также предсказать изменения электрических характеристик и параметров транзистора.

В публикациях по электротепловому моделированию SiGe ГБТ структур средствами TCAD [1–5] рассматривается исключительно влияние щелевой изоляции на электротепловые характеристики прибора. Вклад SiGe-базы, образующей в самом центре активной структуры SiGe ГБТ «островок» материала с низкой теплопроводностью, препятствующий теплоотводу, ранее детально не исследовался.

В настоящей работе проведено моделирование электротепловых режимов только для активной области структуры современного SiGe ГБТ (без учета STI и DTI) (рис.1.в,г). Рассмотрены особенности распределения температуры в вертикальном сечении прибора на участке от эмиттера до коллектора (рис.1.б), а также влияние эффекта саморазогрева на коэффициент усиления по току β , напряжение Эрли V_A , граничную f_T и максимальную $f_{\max}$ частоты. Проведено сравнение полученных характеристик и параметров для структур SiGe ГБТ и обычного Si БТ (рис.2).

В программе Sentaurus Synopsys [6] для описания физических процессов в полупроводниковой структуре SiGe ГБТ использовалась термодинамическая модель, которая помимо трех фундаментальных уравнений физики полупроводников дополнительно включает в себя уравнение теплопроводности, учитывающее эффект саморазогрева за счет высокой удельной рассеиваемой мощности H :

$$\nabla(\lambda \nabla T) - H(j_n, j_p, \varphi, T) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t},$$

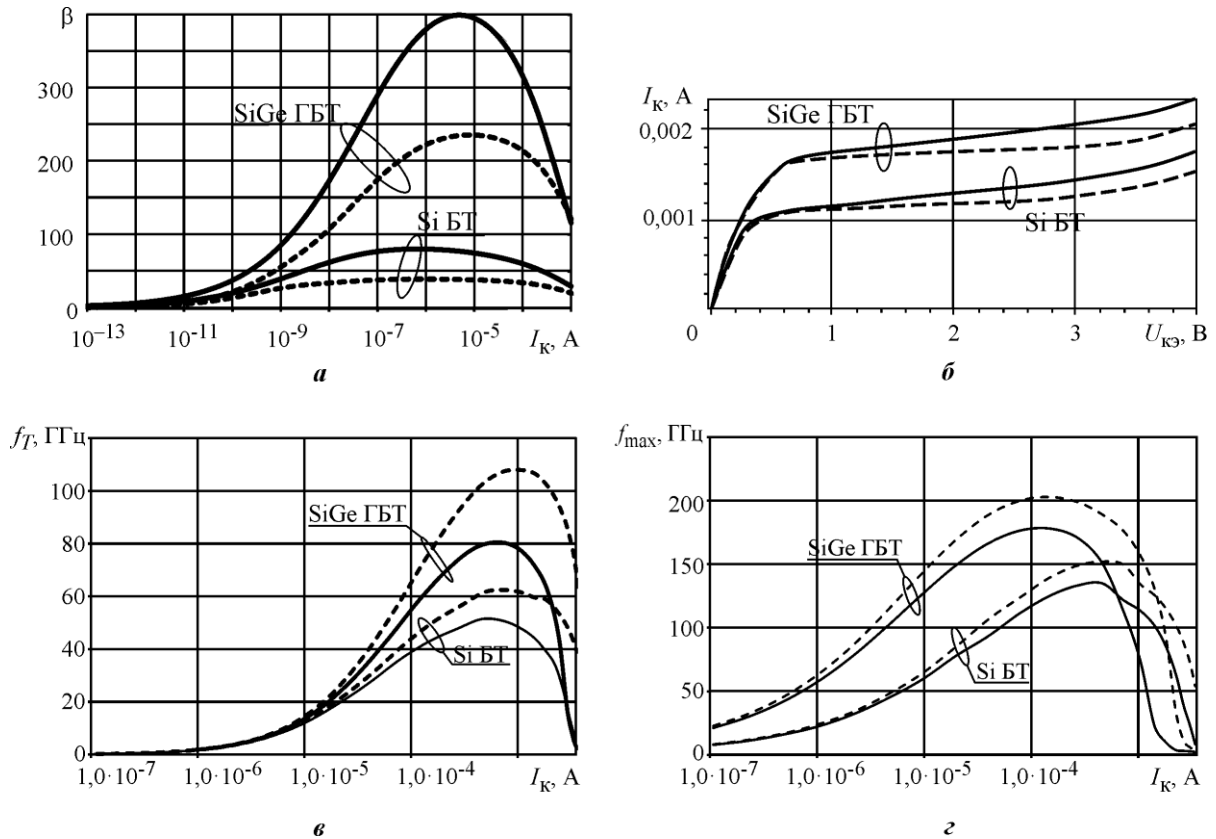


Рис.2. Коэффициент усиления по току β (а), выходные ВАХ (б), граничная частота f_T (в) и максимальная частота f_{max} (г), рассчитанные без учета (пунктирные линии) и с учетом (сплошные линии) эффекта саморазогрева

где $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j}$; λ , ρ , C – теплопроводность, плотность и теплоемкость полупроводника соответственно; $T(x, y)$, $j_n(x, y)$, $j_p(x, y)$ – распределения температуры, плотностей токов электронов и дырок в структуре прибора.

При выборе моделей легирования и электрофизических параметров, определяющих процессы переноса тока, рекомбинации-генерации носителей заряда и др., в программе Sentaurus учтены все особенности, характерные для SiGe-структур.

Исследовалась высокочастотная структура $\text{Si}_{0,8}\text{Ge}_{0,2}$ ГБТ с размерами эмиттера $0,2 \times 1,0$ мкм [7] со следующими электрическими параметрами: $\beta_{max} = 413$, $f_T = 93$ ГГц, $f_{max} = 160$ ГГц, $BV_{CEO} = 5,7$ В. Температура на нижней поверхности полупроводникового кристалла принималась равной температуре корпуса $T_{кор} = 300$ К. Теплоотвод с верхней поверхности структуры прибора (металлизации контактов) учитывался путем подключения теплового сопротивления $R_{th} = 1500$ В/(см²·К) [1].

Для сравнения параллельно проводилось моделирование 2D-структуры гипотетического БТ с кремниевой базой, обладающей таким же профилем распределения примеси (см. рис.1,б).

Результаты TCAD-моделирования приведены на рис.1 и 2. На рис.1,б видно, что в n -области коллектора в структуре SiGe ГБТ наблюдается резкий скачок температуры. Температура в структуре Si БТ распределяется более равномерно. Очевидно, что SiGe-база с низкой теплопроводностью играет роль барьера, препятствующего отводу тепла вверх в направлении эмиттера, что приводит к большему нагреву активной области коллектора, где выделяется основная мощность $I_K V_{KЭ}$, и меньшему нагреву эмиттерной области. При этом максимальная точка нагрева области коллектора смещается в глубь структуры. Все эти факторы обуславливают

более высокую температуру внутренней активной зоны в структуре SiGe ГБТ, чем в аналогичной структуре Si БТ.

2D-распределения температуры для обеих транзисторных структур, рассчитанные при одинаковой рассеиваемой мощности 4 мВт, приведены на рис.1,б,г. Максимальная температура $T_{\max}$ в коллекторной области структуры SiGe ГБТ составила 409 К, что на 18 К выше, чем у Si БТ структуры (см. рис.1,б,г).

Отмечено, что вследствие эффекта саморазогрева пиковое значение коэффициента усиления по току β у SiGe ГБТ увеличивается примерно в 2 раза, а у Si БТ – в 1,6 раза (см. рис.2,а). Напряжение Эрли V_A у SiGe ГБТ вследствие саморазогрева снижается с 34 до 11 В, т.е. в 3 раза, а у Si БТ – с 13 до 8 В, т.е. в 1,6 раза (см. рис.2,б). Пиковое значение граничной частоты единичного усиления f_T для SiGe ГБТ снижается в 1,4 раза, а для Si БТ – в 1,2 раза (см. рис.2,в). Пиковые значения максимальной частоты усиления $f_{\max}$ уменьшаются примерно одинаково в 1,17 и 1,15 раза соответственно для SiGe ГБТ и Si БТ (см. рис.2,г).

Таким образом, в структуре ГБТ SiGe-база с низкой теплопроводностью ухудшает теплоотвод из активной области прибора, в результате чего эффект саморазогрева проявляется гораздо сильнее, чем в структуре обычного БТ с кремниевой базой. Это приводит к повышению температуры внутри структуры и более сильной деградации основных параметров SiGe ГБТ. В наибольшей степени деградируют статические параметры β и V_A и граничная частота f_T , что следует учитывать при использовании SiGe ГБТ в аналоговой схемотехнике.

Работа выполнена в рамках программы «Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)» (проект №15-01-0165) в 2015 г. и при финансовой поддержке гранта РФФИ (№14-29-09145).

Литература

1. **Mukherjee C., Maiti C.K.** Simulation and modeling of self-heating effects in heterojunction bipolar transistors // J. of Basic and Applied Physics. – 2014. – Vol. 3. – N. 1. – P. 16–25.
2. **Sahoo A.K.** A scalable electrothermal model for transient self-heating effects in trench-isolated SiGe HBTs // IEEE Trans. on Electron Devices. – 2012. – Vol. 59. – N. 10. – P. 2619–2625.
3. **Weiß M.** Characterization of intra device mutual thermal coupling in multi finger SiGe: C HBTs // Proc. of IEEE International Conf. of Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC). – 2013. – P. 1–2.
4. **Петросянц К.О., Торговников Р.А.** Моделирование структуры SiGe гетеропереходного транзистора с учетом эффекта саморазогрева // Электроника, микро- и наноэлектроника / Под. ред. В.Я. Стенина. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – С. 267–273.
5. **Petrostyants K.O., Torgovnikov R.A.** Electro-thermal modeling of trench-isolated SiGe HBTs using TCAD // Proc. of Thermal Measurement, Modeling & Management Symposium (SEMI-THERM). – 2015. – P. 172–175.
6. Synopsys Sentaurus TCAD, ver. J-2014.09. – URL: www.synopsys.com (дата обращения: 18.08.2015).
7. 230 GHz self-aligned SiGeC HBT for optical and millimeter-wave applications / **P. Chevalier, C. Fellous, Z. Rubaldo et al.** // IEEE J. of Solid-State Circuits. – 2005. – Vol. 40. – N. 10. – P. 2025–2034.

Поступило
3 сентября 2015 г.

Петросянц Константин Орестович – доктор технических наук, профессор департамента электронной инженерии МИЭМ НИУ ВШЭ, главный специалист ИППИМ РАН (г. Москва). *Область научных интересов:* моделирование полупроводниковых приборов и элементов БИС, САПР элементной базы ЭВА и РЭА. **E-mail:** kpetrosyants@hse.ru

Кожухов Максим Владимирович – аспирант департамента электронной инженерии МИЭМ НИУ ВШЭ. *Область научных интересов:* моделирование полупроводниковых приборов и элементов БИС при воздействии проникающей радиации. **E-mail:** includmax@gmail.com