

Анализ влияния температуры на электрофизические характеристики комплементарной пары вертикальных биполярных транзисторов

М.О. Храпов¹, А.В. Глухов², В.А. Гридчин¹, С.В. Калинин¹

¹Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Россия

²Сибирский государственный университет информатики
и телекоммуникаций, г. Новосибирск, Россия

Analysis of Influence of Temperature on Electrophysical Characteristics of Characteristics of Complementary Pair of Vertical Bipolar Transistors

M.O. Hrapov¹, A.V. Gluhov², V.A. Gridchin¹, S.V. Kalinin¹

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

²Siberian State University of Informatics and Telecommunications,
Novosibirsk, Russia

В рамках термодинамической и диффузионно-дрейфовой моделей численным методом исследовано влияние температуры на электрофизические параметры комплементарной биполярной пары вертикальных транзисторов. Показано преимущество термодинамической модели, учитывающей при анализе мощных транзисторов эффекты, связанные с саморазогревом. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными характеристиками тестовых структур. Сравнение показало, что для таких электрофизических параметров, как коэффициент усиления по току β и напряжение Эрли V_A , отличие не превышает 15 %, а для критического параметра напряжение пробоя коллектор–эмиттер V_{CE0} не превышает 2 %. Это является достаточным для применения термодинамической модели в практических целях.

Ключевые слова: комплементарные $n-p-n$ - и $p-n-p$ -вертикальные транзисторы; TCAD Sentaugus; термодинамическая модель; напряжение пробоя коллектор – эмиттер; напряжение Эрли; коэффициент усиления по току.

The influence of temperature on the most important of the electrical parameters of the complementary bipolar pair of vertical transistors has been numerically investigated as a part of the thermodynamic and drift-diffusion models. The advantage of the thermodynamic model while analyzing the high-power transistors, as the thermodynamic model takes into account the self-heating effect, has been shown. The simulation results have been compared with the experimental characteristics of the test structures. The comparison has shown that for current amplification factor β and the voltage Earley V_A the computational error had been less than 15 % and for the critical parameter the breakdown voltage of the collector – emitter V_{CE0} had been less than 2 %, which is sufficient for using the thermodynamic model for practical purposes.

Keywords: CB-technology; silicon complementary VNPB and VPBP transistors; thermodynamic model; breakdown voltage of collector – emitter V_{CE0} ; current amplification factor β ; 2D-simulation; TCAD Sentaurus.

Введение. Аналоговые интегральные схемы – главный структурный компонент различных устройств и систем современной микроэлектроники. Для таких аналоговых схем, как операционные усилители, компараторы и т.д., элементная база содержит комплементарную пару вертикальных биполярных n - p - n - и p - n - p -транзисторов [1]. Физические процессы, которые необходимо принимать во внимание при проектировании таких транзисторов, сложны и многообразны. Особо следует выделить проблему температурной чувствительности [2–8].

Количественное описание влияния температуры является важным элементом проектирования интегральных схем, работающих в области температур от -60 до $+125$ °C [1, 2]. В настоящее время реализация этого этапа разработки осуществляется с помощью компьютерного приборно-технологического моделирования, позволяющего сократить время на отработку технологии и создания новых изделий электронной техники до 40 % [9–14]. Эффективным инструментом проектирования технологических процессов и приборов считается программный пакет TCAD Sentaurus [15]. Точность его применения зависит от выбора моделей, заложенных в пакете, параметров и характеристик материалов и особенностей анализируемых электронных структур.

В настоящей работе программный пакет TCAD Sentaurus применяется для анализа влияния температуры на важнейшие электрофизические характеристики комплементарной пары вертикальных биполярных транзисторов.

Особенности термодинамической модели в TCAD Sentaurus. В TCAD Sentaurus для моделирования процессов переноса носителей заряда в рабочем пространстве прибора существуют три основных класса моделей: диффузионно-дрейфовая (DD), термодинамическая (TD) и гидродинамическая (HD) [13]. Данные модели теоретически могут быть получены при тех или иных физических предположениях из кинетического уравнения Больцмана [14, 15]. Модели представляют собой краевые задачи для систем уравнений в частных производных относительно различных наборов пространственно-распределенных переменных. Для DD- и TD-моделей – это электростатический потенциал ϕ , концентрации электронов n и дырок p , плотности электронного \vec{j}_n и дырочного \vec{j}_p токов и температура решетки T с учетом саморазогрева (для TD-модели), совпадающая с температурой электронного и дырочного газов. Особенности DD- и TD-моделей заключаются в способе учета механизмов формирования токов. В DD-модели токи образуются за счет действия диффузионного и дрейфового механизмов с поправками на эффекты сильного легирования, в TD-модели – еще и за счет действия механизма термодиффузии. Для HD-модели переменных значительно больше, чем для TD-модели, так как вводятся новые переменные: температура электронного T_n и дырочного T_p газов, отличающаяся в общем случае от температуры решетки T_1 , неоднородность распределения по области моделирования энергии электронов W_n , дырок W_p и решетки W_1 , а также энергетические потоки, связанные с электронами S_n , дырками S_p и решеткой S_1 .

Во всех трех моделях учитывается влияние температуры на такие кинетические параметры биполярного транзистора, как подвижность электронов и дырок, их коэффициенты диффузии, коэффициенты теплоемкости и теплопроводности решетки и т.д. Также температура влияет на скорости генерации-рекомбинации (тепловую, лавинного умножения и оже-рекомбинации) и на различные параметры материалов: ширину за-

прещенной зоны, плотности состояний у краев зон, собственную концентрацию, контактную разность потенциалов в p - n -переходах.

Для анализа воздействия температуры на электрофизические характеристики элементарной пары n - p - n - и p - n - p -транзисторов выбрана TD-модель. Такой подход позволяет одновременно учитывать два тепловых фактора: эффект разогрева транзисторов за счет повышения температуры окружающей среды и эффект саморазогрева за счет выделения внутреннего тепла в рабочем пространстве транзистора в процессе его работы, что не учитывает DD-модель. Кроме того, TD-модель представляется оптимальной для расчета мощных транзисторов с точки зрения соотношения точности расчетов и времени моделирования по сравнению с HD-моделью. С целью установления правильности выбора модели проведено сравнение результатов численного моделирования TD- и DD-моделей.

Для активизации TD-модели в подложку транзистора вводится специальный тепловой электрод, через который задается воздействие на транзистор температуры окружающей среды. Тепловые особенности корпуса учитываются с помощью специального параметра – теплового сопротивления [13].

Моделирование проводится в двумерной прямоугольной области, и стационарная краевая задача содержит следующую систему уравнений [13]:

- уравнение Пуассона

$$\nabla \cdot (\nabla \varphi) = -\frac{q}{\varepsilon_0} (p - n + N_d - N_a); \quad (1)$$

- уравнения непрерывности для электронов и дырок

$$\frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_n + G_n - R_n = 0, \quad (2)$$

$$-\frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_p + G_p - R_p = 0; \quad (3)$$

- уравнение теплопроводности, учитывающее удельную рассеиваемую мощность H

$$H(\vec{J}_n, \vec{J}_p, \varphi, T) + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = 0; \quad (4)$$

- диффузионно-дрейфовые и термодиффузионные уравнения для плотностей электронного и дырочного токов

$$\vec{J}_n = -q\mu_n n (\nabla \Phi_n + P_n \nabla T), \quad (5)$$

$$\vec{J}_p = -q\mu_p p (\nabla \Phi_p + P_p \nabla T). \quad (6)$$

Здесь q , ε , ε_0 – соответственно заряд, диэлектрическая проницаемость полупроводника и диэлектрическая постоянная; N_d и N_a – концентрация доноров и акцепторов соответственно; G_n и G_p , R_n и R_p – скорости генерации и рекомбинации электронов и дырок соответственно; λ – теплопроводность кремния; μ_n и μ_p , Φ_n и Φ_p , P_n и P_p – подвижности, квазиуровни Ферми, коэффициенты термоЭДС для электронов и дырок соответственно.

Краевая задача для системы уравнений (1) – (6) в области моделирования доопределяется граничными условиями: на контактах – условиями Дирихле, а на остальных

границах – условиями Неймана. При расчете поля температур рассматривается случай, когда конвективный и радиационный теплообмен с внешней поверхности транзистора отсутствует, а отвод тепла осуществляется только через подложку.

Пространственная дискретизация задачи (1) – (6) автоматически выполняется на основе метода конечных объемов (box method) [16] по алгоритмам, включенным в приложение SDevice.

Приборно-технологическое моделирование и экспериментальная проверка термодинамической модели. Двумерная пространственная структура транзисторов рассчитывается путем моделирования технологического маршрута в приложении SProcess из TCAD Sentaurus по методике, подробно описанной в работе [17]. При этом области моделирования транзисторов различны из-за специфики их топологии. Так, топологическая ширина $n-p-n$ -транзистора составляет 45 мкм, а $p-n-p$ -транзистора – 128 мкм.

Электрофизический расчет параметров и выходных характеристик $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторов выполняется с помощью приложения SDevice для TD-модели. В процессе численного моделирования информация о расчетной сетке экспортируется из приложения SProcess в SDevice, после чего сетка перестраивается автоматически в соответствии с алгоритмом Делоне [13].

Вычислительный эксперимент характеризуется следующими особенностями. При расчете вольт-амперных характеристик (ВАХ) принимается, что нагрев транзисторов происходит до температур 25, 60, 80, 100 °С. В расчете кроме влияния температуры учитываются концентрационные и полевые зависимости подвижностей электронов и дырок [18–21] и аналогичные зависимости для коэффициентов ударной ионизации [13]. Тепловые процессы генерации-рекомбинации носителей заряда моделируются с помощью классической модели Шокли – Рида – Холла [2, 14, 15]. Для процессов лавинного умножения используются эмпирические модели Okuto – Crowell для $n-p-n$ -транзистора [22] и Overstraeten – de Man для $p-n-p$ -транзистора [21, 23].

Полученные электрофизические данные проверены на реальных тестовых структурах, которые содержат $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторы с профилями, близкими к расчетным моделям. Измерения выходных ВАХ транзисторов проводятся на зондовой станции серии Summit фирмы Cascade Microtech [24]. Данное оборудование позволяет проводить все виды параметрических измерений на полупроводниковой пластине, в том числе токи утечки и емкостные характеристики в широком температурном диапазоне. Пластины с тестовыми структурами транзисторов помещаются на столик с подогревом, который задает необходимую температуру структур, после чего проводится замер ВАХ.

Оцифровка снятых характеристик и определение электрических параметров для транзисторов проводятся с помощью измерительного прибора Agilent 4155 С [25]. Поскольку в настоящее время большой практический интерес представляют высоковольтные транзисторы, при измерении выходной характеристики $n-p-n$ -транзистора ток базы I_B задается на уровне 1 мкА, напряжение коллектора равно 40 В, а для $p-n-p$ -транзистора ток базы составляет –10 мкА, напряжение коллектора –65 В.

Результаты моделирования и их обсуждение. В рамках TD-модели исследованы влияния температуры окружающей среды и эффекта саморазогрева на электрофизические характеристики и параметры комплементарной пары вертикальных $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторов. Поскольку величина саморазогревов транзисторов заранее не известна, для сравнения ВАХ определены и в рамках DD-модели.

При сопоставлении TD-модели и результатов эксперимента учитывается тепловое поверхностное сопротивление R_{th} , которое в TCAD Sentaurus определяется командой *SurfaceResistance* в секции *Thermode* [13]. Наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных данных достигается при $R_{th} = 1 \cdot 10^{-6}$ см²·К/Вт для *n-p-n*-транзистора и при $R_{th} = 1 \cdot 10^{-7}$ см²·К/Вт для *p-n-p*-транзистора. Для DD-модели $R_{th} = 0$ по умолчанию.

Результаты моделирования и экспериментальные данные для выбранных уровней напряжений коллекторов показывают, что все параметры транзисторов находятся в допустимом рабочем диапазоне. Сравнение значений параметров транзисторов приведены в табл.1, где β – коэффициент усиления по току, V_A – напряжение Эрли, V_{CE0} – пробивное напряжение коллектор – эмиттер. Значения температурной чувствительности S основных электрофизических параметров *n-p-n*- и *p-n-p*-транзисторов, рассчитанных по DD- и TD-моделям, а также результаты измерений на тестовых структурах представлены в табл.2. Для вычисления температурной чувствительности используется следующая формула:

$$S_P = \frac{\Delta P}{\Delta T},$$

где P – вычисляемый электрофизический параметр.

Таблица 1

Рассчитанные и экспериментальные значения электрофизических параметров *n-p-n*- и *p-n-p*-транзисторов при различных температурах

Метод	25 °C			60 °C			80 °C			100 °C		
	β	V_A , В	V_{CE0} , В	β	V_A , В	V_{CE0} , В	β	V_A , В	V_{CE0} , В	β	V_A , В	V_{CE0} , В
<i>n-p-n</i>-транзистор												
TCAD	84	353	30,3	92,3	301	30,7	96	283	31	99	271	31,3
Измерение	88	308	30,5	101	268	31	115	251	31,2	121	223	31,5
<i>p-n-p</i>-транзистор												
TCAD	82,6	140	60,6	96,8	115	60,7	104	94	60,8	110	86	62
Измерение	85	126	59	102	118	59,2	110	113	59,5	118	97	60

Таблица 2

Температурная чувствительность электрофизических характеристик биполярных *n-p-n*- и *p-n-p*-транзисторов

Метод	<i>n-p-n</i> -транзистор			<i>p-n-p</i> -транзистор		
	S_β , 1/°C	S_{V_A} , В/°C	$S_{V_{CE0}}$, В/°C	S_β , 1/°C	S_{V_A} , В/°C	$S_{V_{CE0}}$, В/°C
TCAD - TD	0,218	-1,273	0,012	0,387	-0,757	0,015
TCAD - DD	0,197	-0,906	0,011	0,361	-0,669	0,013
Измерение	0,371	-1,104	0,013	0,443	-0,457	0,017

Из приведенных в табл.1 данных следует, что термодинамическая модель позволяет определить параметры транзистора с приемлемой для практики точностью. Так, различие между численным экспериментом и реальными данными по β для *n-p-n*- и *p-n-p*-транзисторов составляет 15 и 7 % соответственно, а V_{CE0} – менее 2 %.

На рис.1 и 2 представлены результаты моделирования ВАХ и экспериментальные данные при разных температурах для DD- и TD-моделей. Результаты моделирования по обеим моделям оказались близки друг к другу, особенно при комнатной температуре. Увеличение рабочей температуры до 100 °С делает различие между моделями более заметным, хотя и для этого случая разница оказалась незначительной.

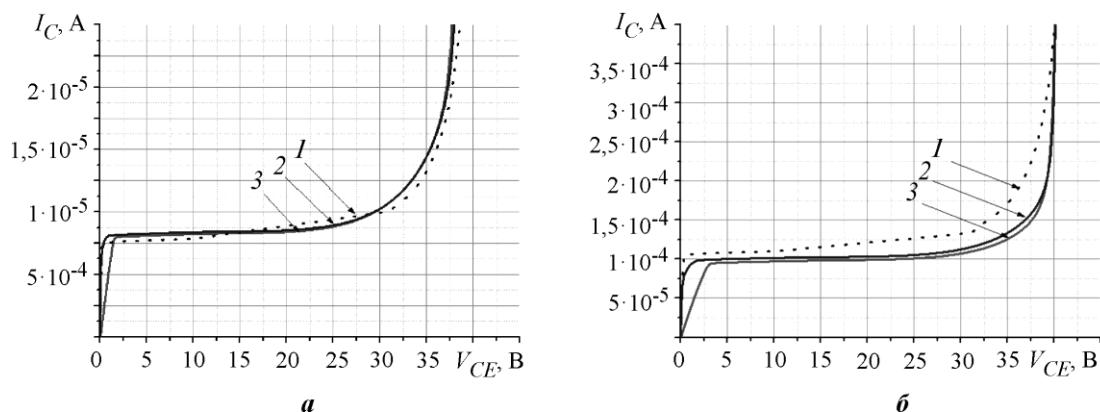


Рис.1. Выходная ВАХ *n-p-n*-транзистора: 1 – реальный прибор; 2 – TD-модель; 3 – DD-модель; а – при $I_B = 10^{-6}$ А; $T = 25$ °С; б – при $I_B = 10^{-6}$ А; $T = 100$ °С

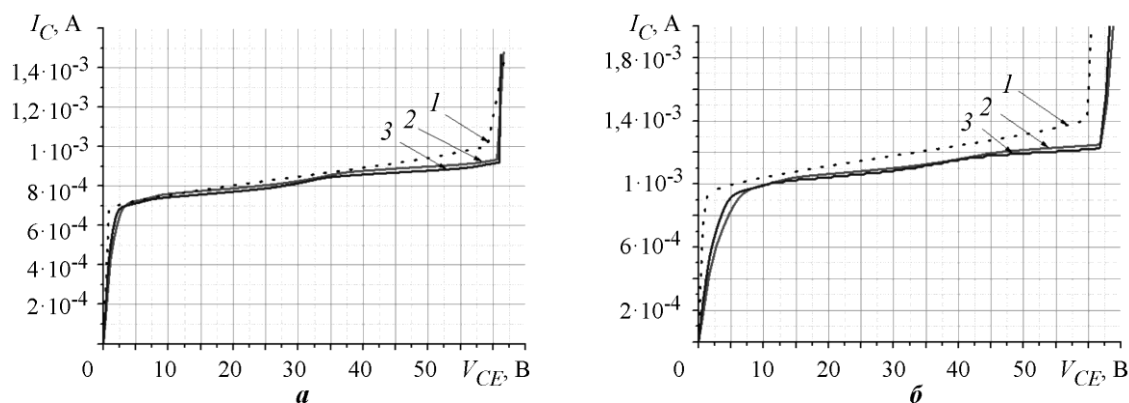


Рис.2. Выходная ВАХ *p-n-p*-транзистора: 1 – реальный прибор; 2 – TD-модель; 3 – DD-модель; а – при $I_B = 10^{-5}$ А; $T = 25$ °С; б – при $I_B = 10^{-5}$ А; $T = 100$ °С

Степень отличия между DD- и TD-моделями хорошо видна из табл.2. Это отличие невелико, но в пяти из шести параметров для обоих транзисторов результаты для TD-модели лучше согласуются с экспериментальными данными. Причиной слабого отличия между моделями является небольшая величина саморазогрева транзисторов при выбранном диапазоне их рабочих напряжений.

На рис.3 и 4 представлены расчетные температурные профили сравниваемых транзисторов, полученные в рамках TD-модели. Поскольку максимальный разогрев структуры происходит в областях эмиттера, на этом контакте рассчитана максимальная выделяемая мощность $I_E V_{CE}$ и определено тепловое сопротивление согласно формуле

$$R_t = \frac{T_{\max} - T_0}{I_E V_{CE}},$$

где T_{\max} – максимальное значение температуры по структуре; $T_0 = 300$ К; I_E – ток эмиттера; V_{CE} – напряжение коллектор – эмиттер.

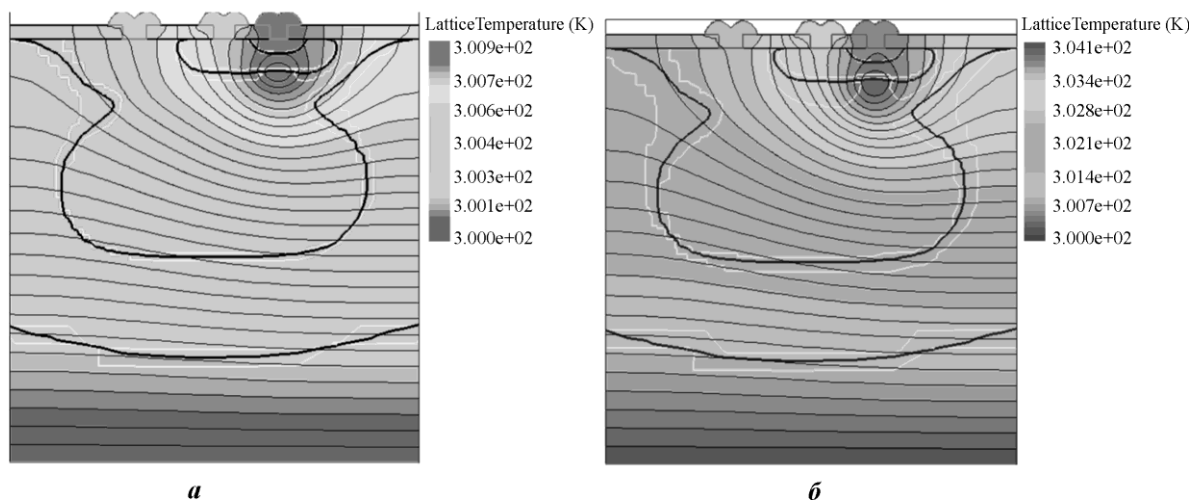


Рис.3. 2D-профиль температуры *n-p-n*-транзистора: *a* – при $V_{CE0} = 5$ В; *б* – при $V_{CE0} = 20$ В

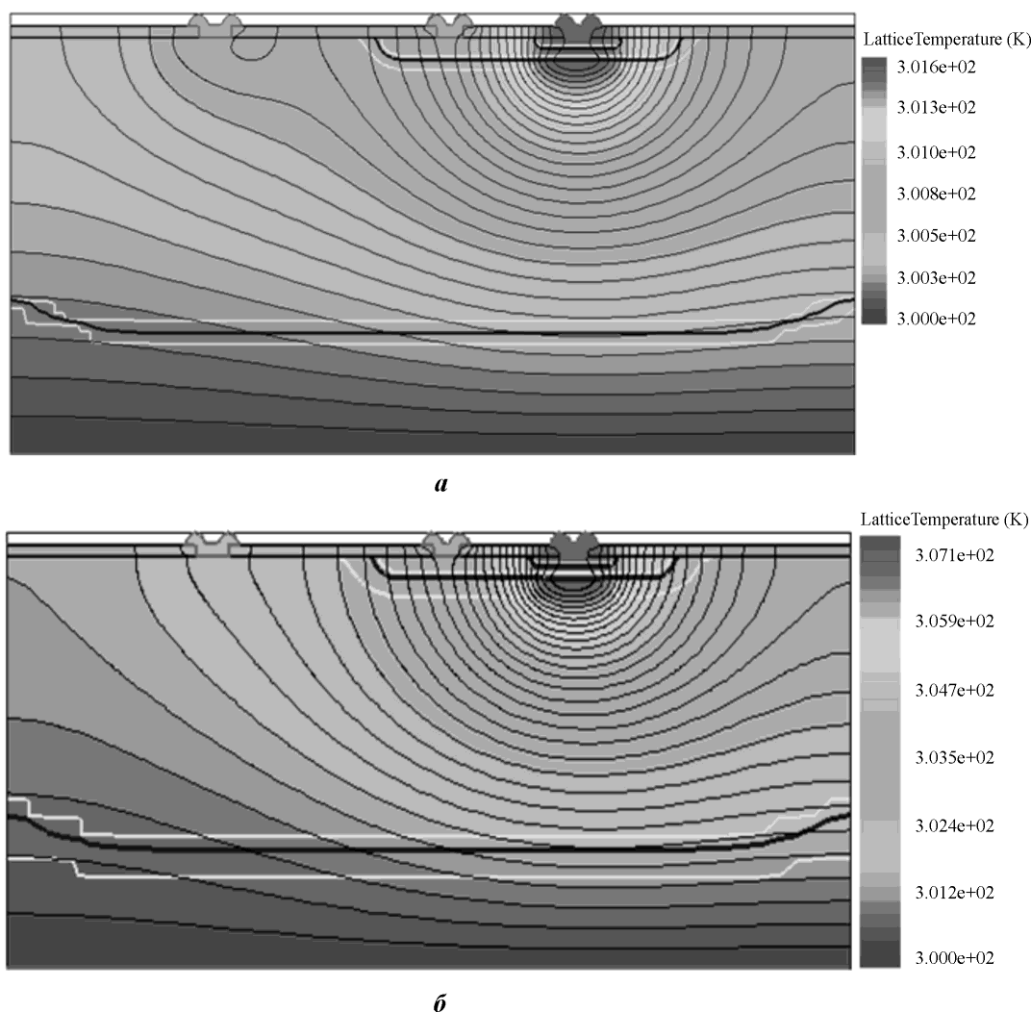


Рис.4. 2D-профиль температуры *p-n-p*-транзистора: *a* – при $V_{CE0} = -7$ В; *б* – при $V_{CE0} = -25$ В

Данные расчетов приведены в табл.3.

Таблица 3

**Изменение параметров комплементарной биполярной пары
в процессе саморазогрева структур**

Параметр	<i>n-p-n</i> -транзистор		<i>p-n-p</i> -транзистор	
	$V_{CE0} = 5$ В	$V_{CE0} = 20$ В	$V_{CE0} = -7$ В	$V_{CE0} = -25$ В
Изменение температуры, К	0,89	4,13	1,57	7,062
Мощность, мВт	0,236	1,11	1,9	7,92
Тепловое сопротивление, К/Вт	3771	3883	826	891

Разница в значениях теплового сопротивления транзисторов связана с отличием их геометрических размеров, при которых площадь теплового контакта *p-n-p*-транзистора в 2,8 раза больше, чем *n-p-n*-транзистора.

Заключение. В ходе проведенных исследований показана эффективность TD-модели при описании температурных эффектов в комплементарной паре планарно-эпитаксиальных вертикальных биполярных транзисторов.

Сравнение экспериментальных результатов с рассчитанными электрофизическими параметрами в термодинамическом приближении показывает, что погрешности моделирования коэффициента усиления по току β и напряжения Эрли V_A находятся в интервале от 4 до 12 % при комнатной температуре и не превышают 15 % при температуре 100 °С. Для приоритетного параметра напряжение пробоя коллектор – эмиттер V_{CE0} отличие экспериментальных и расчетных данных не превосходит 2 %. Это свидетельствует о приемлемой точности моделирования для решения практических задач.

При моделировании мощных комплементарных транзисторов предпочтительней использовать TD-модель, поскольку она учитывает эффект саморазогрева и с ее помощью можно определить верхнюю границу применимости диффузионно-дрейфовой модели. Сравнение DD- и TD-моделей при выбранных в данной работе рабочих напряжениях транзисторов показало их близкое соответствие, что связано с малой величиной саморазогрева транзисторов.

Литература

1. Савченко Е.М. Высокоскоростные операционные усилители с токовой обратной связью и высоким уровнем динамической точности: Автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 2011. – 27 с.
2. Gray P.R. Hurst P.J., Lewis S.H., Meyer R.G. Analysis and design of analog integrated circuits. – 5nd ed. – JohnWiley & Sons, 2009. – 881 p.
3. Monticelli D.M. The Future of Complementary Bipolar // Proc. of the IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology, 2004. – P. 21–25.
4. Бубенников А.Н., Бубенников А.А. Тенденции развития конкурентоспособных кремниевых КМОП-биполярных и БиКМОП-СБИС // Зарубежная радиоэлектроника. – 1994. – №2/3. – С. 7–33.
5. Temperature interaction of Early voltage, current gain and breakdown characteristics of npn and pnp SiGe HBTs on SOI / J.A. Babcock, L.J. Choi, A. Sadovnikov et. al. // IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (Austin, TX, USA, 2010). – 2010. – P. 145–148.
6. Forward and inverse mode Early voltage dependence on current and temperature for advanced SiGe-pnp on SOI / J.A. Babcock, L.J. Choi, A. Sadovnikov et. al. // IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM). – 2011. – P. 9–12.
7. Bashir R., Hebert F., De Santis J. A Complementary Bipolar Technology Family With a Vertically Integrated PNP for High-Frequency Analog Applications// IEEE Tran. On Electron Dev. – 2001. – Vol. ED-48. – N. 11. – P. 2525–2534.

8. Дроздов Д.Г., Савченко Е.М., Зубков А.М. Результаты приборно-технологического моделирования комплементарной биполярной технологии с граничной частотой 10 ГГц и более // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2010: сб. тр. – М.: ИППМ РАН, 2010. – С. 66–69.
9. TCAD for reliability / P. Pffüfli, P. Tikhomirov, X. Xu et al. // Microelectronics Reliability. – 2012. – Vol. 52. – P. 1761–1768.
10. TCAD Sentaurus. Synopsys. – URL: <http://www.synopsys.com/Tools/TCAD> (дата обращения 01.06.2016).
11. Петросяц К.О., Торговников Р.А. Влияние щелевой диэлектрической изоляции на тепловой режим SiGe гетеропереходного биполярного транзистора // Изв. вузов. Электроника. – 2011. – №5(91). – С. 106–108.
12. <http://www.itrs.net> (дата обращения 01.06.2016).
13. Sentaurus Device User Guide G-2012.06
14. Vasileska D., Goodnik S. Computational electronics // Materials Science and Engineering R. – 2002. – Vol. 38. – P. 181–236.
15. Selberherr S. Analysis and simulation of semiconductor devices. – Wien: Springer, 1984. – 294 p.
16. Bank R.E., Rose D.J., Fichtner W. Numerical Methods for Semiconductor Device Simulation // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1983. – Vol. ED-30. – N. 9. – P. 1031–1041.
17. Храпов М. О., Гридчин В.А., Калинин С.В. Анализ и моделирование кремниевых вертикальных комплементарных биполярных транзисторов // Изв. вузов. Электроника. – 2016. – Т. 21. – № 5. – С. 413–420.
18. Green M.A. Intrinsic concentration, effective densities of states, and effective mass in silicon // J. of Appl. Phys. – 1990. – Vol. 67. – N. 6. – P. 2944–2954.
19. Arora N.D., Hauser J.R., Roulston D.J. Electron and Hole Mobilities in Silicon as a Function of Concentration and Temperature // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1982. – Vol. ED-29. – N. 2. – P. 292–295.
20. Canali C., Majni G., Minder R. Electron and Hole Drift Velocity Measurements in Silicon and Their Empirical Relation to Electric Field and Temperature // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1975. – Vol. ED-22. – N. 11. – P. 1045–1047.
21. Tyagi M.S., Van Overstraeten R. Minority Carrier Recombination in Heavily-Doped Silicon // Solid-State Electronics. – 1983. – Vol. 26. – N. 6. – P. 577–597.
22. Okuto Y., Crowell C.R. Threshold Energy Effect on Avalanche Breakdown Voltage in Semiconductor Junctions // Solid-State Electronics. – 1975. – Vol. 18. – N. 2. – P. 161–168.
23. Van Overstraeten R., de Man H. Measurement of the Ionization Rates in Diffused Silicon p-n Junctions // Solid-State Electronics. – 1970. – Vol. 13. – N. 1. – P. 583–608.
24. http://www.eltm.ru/cascade_microtech.html (дата обращения 01.06.2016).
25. http://www.eltm.ru/editor/upload-files/agilent_4155c.pdf (дата обращения 01.06.2016).

Статья поступила 6 июля 2016 г.

Храпов Михаил Олегович – аспирант кафедры полупроводников и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), г. Новосибирск, Россия. *Область научных интересов:* математическое моделирование полупроводниковых устройств, TCAD-моделирование. **E-mail:** hrapov.mihail@gmail.com

Глухов Александр Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования Сибирского государственного университета информатики и коммуникаций, г. Новосибирск, Россия. *Область научных интересов:* исследование и проектирование интегральных схем.

Гридчин Виктор Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры полупроводников и микроэлектроники НГТУ, г. Новосибирск, Россия. *Область научных интересов:* микросистемная техника, микроэлектроника, исследование тепловых сенсоров.

Калинин Сергей Васильевич – доцент кафедры полупроводников и микроэлектроники НГТУ, г. Новосибирск, Россия. *Область научных интересов:* математическое моделирование полупроводниковых устройств, TCAD-моделирование.