

Численное моделирование влияния углерода в активной базе на быстродействие SiGe ГБТ

В.Д. Евдокимов^{1,2}, Ю.А. Чаплыгин¹

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

²НИПК «Технологический центр» (г. Москва)

Numerical Modeling of Carbon Effect in Active Base on RF Performance of SiGe HBT

V.D. Evdokimov^{1,2}, Yu.A. Chaplygin¹

¹National Research University of Electronic Technology, Moscow

²SMC «Technological Center», Moscow

Рассмотрен механизм влияния примесного углерода на диффузию бора базы $n-p-n$ кремний-германиевого гетеропереходного биполярного транзистора. Приведены зависимости электрофизических показателей структуры в зависимости от концентрации углерода. Показано, что при концентрации углерода выше $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ наблюдается уменьшение времени жизни носителей заряда в базе, что не приводит к уменьшению граничной и максимальной частот гетеропереходного биполярного транзистора, поскольку диффузия бора снижается в большей степени и определяет время пролета электронов через электронейтральную базу.

Ключевые слова: кремний-германиевый гетеропереходный биполярный транзистор (SiGeC ГБТ); углерод; быстродействие.

The mechanism of the impurity carbon on boron diffusion of the $n-p-n$ SiGe HBT's base has been considered. Some figures demonstrating the dependence of electrophysical characteristics of the structure on the carbon concentration have been presented. It has been shown, that at the carbon concentrations exceeding $1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ a charge carriers lifetime decline has been observed, but this does not result in the decrease of the cut-off frequency and maximum HBT oscillation frequency, because of the less intensive boron diffusion, determining the neutral base transient time.

Keywords: SiGeC HBT; carbon; RF performance.

Среди радиочастотных приборов на основе кремния один из наиболее перспективных – кремний-германиевый гетеропереходный биполярный транзистор (SiGeC ГБТ). В процессе формирования $n-p-n$ ГБТ в составе БИКМОП-схем структура прибора подвергается значительной термической обработке, в результате чего происходит нежелательная диффузия бора в области базы, снижающая усилительные свойства транзистора и его быстродействие. Один из способов снижения указанного эффекта – введение углерода в слой SiGe с долей менее 0,5 ат. %. Цель настоящей работы – исследование электрофизических характеристик ГБТ при введении более высоких концентраций углерода в слой базы. Исследование проводили методом приборно-технологического моделирования типовой структуры транзистора.

По прогнозу ITRS [1], в ближайшие 12 лет граничная и максимальная частоты SiGeC ГБТ вырастут до уровня $\sim 0,5$ и $\sim 0,9$ ТГц соответственно при увеличении плотности коллекторного тока, что становится возможным благодаря хорошей масштабируемости, позволяющей про-

порционально улучшать характеристики приборов [2]. Как показано в работе [3], ключевым вопросом масштабирования является уменьшение вертикальных размеров структуры по «технологическому» пути с ужесточающимся контролем конструктивно-технологических параметров. Один из таких параметров – примесный профиль активной базы.

Введение углерода в слой базы приводит к следующим эффектам в ГБТ [4]: снижению диффузии фосфора и бора, повышению термомеханической стойкости слоев, снижению подвижности электронов в базе, уширению запрещенной зоны базы, снижению подвижности дырок, росту рекомбинации носителей в электронейтральной базе.

Диффузия бора ускоряется в присутствии междоузельных атомов кремния и замедляется при наличии вакансий. Во время термической диффузии бор перемещается в кристалле кремния совместно с междоузельными атомами Si преимущественно в составе кластеров BI_2 : $B^m + 2I^n \Rightarrow [BI_2]^{m+n}$, где В – бор; I – атом кремния в междоузельном состоянии; $m = -1, 0, +1$; $n = 0, +1$ – зарядовые состояния атомов бора и кремния соответственно. Аналогичным образом связываются с кремниевыми междоузельными атомами углерода: $C^m + I^n \Rightarrow [CI]^{m+n}$. Соперничество углерода и бора за захват междоузелий и определяет финальный эффект подавления диффузии последнего.

При температуре выше 200 °С возможно образование нежелательных соединений углерода, бора в замещающем положении и междоузельного кремния [5]: $C_i + V_s + I \Rightarrow C_i - V_s - I$, создающих донорные уровни в запрещенной зоне, а также дефектов типа $V_i - V_s$, порождающих акцепторные энергетические уровни в запрещенной зоне (V_i – междоузельный атом бора; V_s – замещающий атом бора; C_i – междоузельный атом углерода), негативно влияющих на время жизни неосновных носителей заряда.

В настоящей работе рассматривается эффект влияния углерода на диффузию бора в ГБТ с концентрациями в диапазоне $1 \cdot 10^{20} - 1,6 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ с помощью приборно-технологического моделирования в САПР Sentaurus TCAD. Исследование проводили на low-cost структуре SiGeC ГБТ (рис.1,а), сформированной в результате технологического моделирования. Создание структуры осуществлялось с учетом моделей совместной диффузии бора и междоузельных атомов кремния (BIC-модель), а также зависимости коэффициентов диффузии примесей от механических напряжений в слоях (модель Pressure-Dependent Dopant Diffusion). Приборные характеристики рассчитывали в гидродинамическом приближении переноса заряда с учетом механических напряжений, эффектов модуляции ширины запрещенной зоны и многодолинного (multivalley band-gap) строения энергетической структуры.

На рис.1,б приведены зависимости металлургической ширины активной базы и времени жизни электронов в базе от концентрации углерода в слое SiGeC.

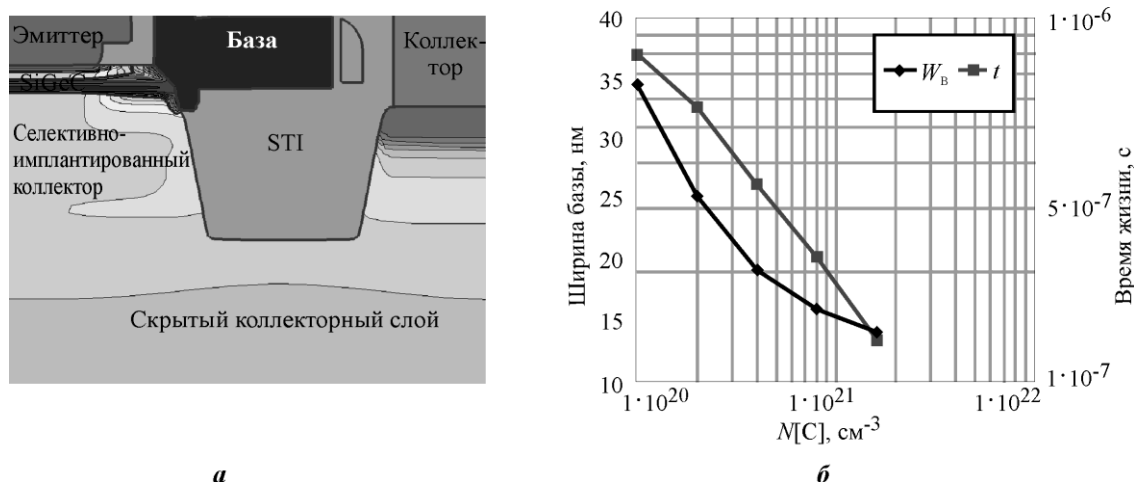


Рис.1. Двумерное сечение моделируемого SiGeC ГБТ (а) и зависимости ширины активной базы и времени жизни электронов в базе от концентрации углерода (б)

На рис.2,а,б представлены зависимости граничной и максимальной частот соответственно от концентрации атомов углерода.

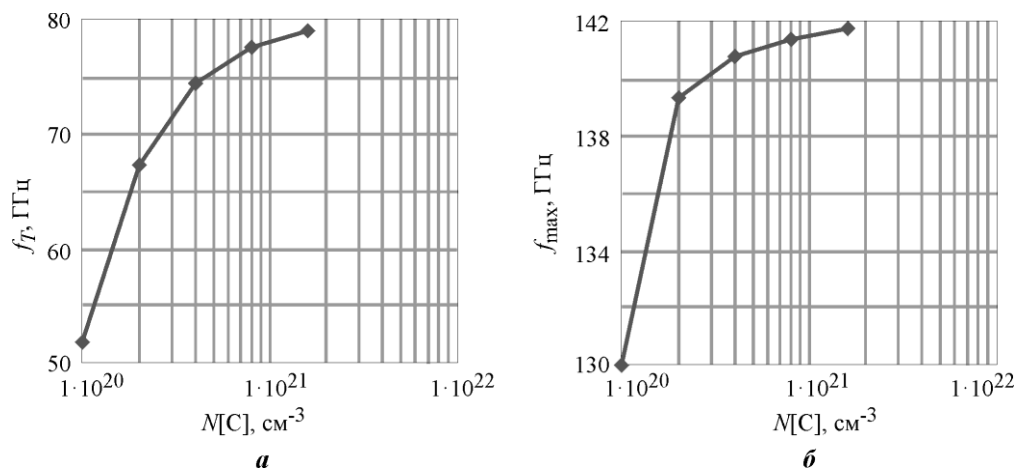


Рис.2. Зависимость граничной f_T (а) и максимальной f_{\max} (б) частот ГБТ от концентрации углерода

Из приведенных зависимостей видно, что повышение концентрации углерода в слое кремний-германия ГБТ более чем на порядок ведет к уменьшению времени жизни носителей заряда более чем в 6 раз, что не препятствует росту пиковых значений граничной и максимальной частот с ростом доли углерода в SiGe в 1,5 раза и на 10% соответственно. Полученные результаты во многом обусловлены резким уменьшением ширины активной базы от концентрации углерода, чем уменьшением времени жизни электронов в базе.

Из известного соотношения Эйнштейна для электронов в полупроводниках при низком уровне инжекции $D_e = \mu_e k_B T$ и выражения $\mu_e = \frac{q \tau_e}{m_e^*}$, где D_e – коэффициент диффузии электронов; μ_e – подвижность электронов в полупроводнике; k_B – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; q – элементарный заряд; τ_e – время жизни электронов в базе; m_e^* – эффективная масса электронов, получаем тождество $D_e = \tau_e \frac{q k_B T}{m_e^*}$. Диффузионная длина

электронов в базе $L_e = \sqrt{D_e \tau_e} \propto \tau_e$ входит в выражение для малосигнального коэффициента усиления базового тока ГБТ [6]: $h_{21} = g(L_e) = b(\tau_e)$. Таким образом, граничная частота – экстраполированный до единичного значения коэффициент $|h_{21}|$ – пропорционально снижается с уменьшением времени жизни электронов в базе $n-p-n$ SiGeC ГБТ. Однако сильная зависимость граничной частоты от ширины активной базы $f_T = p(1/W_B^2)$ перекрывает эффект от уменьшения времени жизни электронов и обуславливает значительный рост f_T с повышением концентрации углерода в базе. Механические напряжения в структуре снизились несущественно, также не оказав значительного влияния на быстродействие ГБТ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №16-07-01175/16).

Литература

1. ITRS 2012 Update RF and Analog/Mixed-signal Technologies (FRAMS). – URL: <http://www.itrs.net/Links/2012ITRS/Home2012.htm> (дата обращения: 09.01.2014).
2. Julian E., Wahjudi R. Scaling model for silicon germanium heterojunction bipolar transistors // *Telkommika*. – 2015. – Vol. 14. – N. 1. – P. 103–109.
3. Евдокимов В.Д. Исследование влияния вертикального масштабирования SiGe гетеропереходного биполярного транзистора на его частотные характеристики методами приборно-технологического моделирования //

Сб. тр. 19-й всерос. межвуз. научно-техн. конф. «Микроэлектроника и информатика-2012»: тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2012. – С. 64.

4. Carbon effect on neutral base recombination in high-speed SiGeC HBTs / **B. Barbalat, T. Schwartzmann, P. Chevalier et al.** // Third International SiGe Technology And Device Meeting (ISTDM). – 2006. – P. 1–2.

5. **Fang T.T., Fang W.T.C., Griffin P.B., Plummer J.D.** Calculation of the fractional interstitial component of boron diffusion and segregation coefficient of boron in $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$ // Applied Physics Letters. – 1996. – Vol. 68. – P. 91.

6. **Тимошенко В.П., Адамов Ю.Ф., Тимошенко П.В.** Оптимизация статического режима гетероструктурных биполярных транзисторов в усилительных устройствах СВЧ-диапазона // Электронная техника. Сер. 3: Микроэлектроника. – 2015. – №3(159). – С. 19–24.

Поступило
21 марта 2016 г.

Евдокимов Виталий Дмитриевич – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем (ИЭМС) МИЭТ, инженер опытного производства НПК «Технологический центр» (г. Москва). *Область научных интересов:* технологии полупроводниковой интегральной электроники, приборы на основе гетеропереходов, СВЧ-техника, кремний-германиевые гетеропереходные биполярные транзисторы. **E-mail: v.d.evdokimov@gmail.com**

Чаплыгин Юрий Александрович – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ИЭМС, президент МИЭТ. *Область научных интересов:* микро- и наноэлектроника, микро- и наносистемная техника, нанотехнологии, фундаментальные и прикладные проблемы создания интегрированных устройств приема и обработки информации на основе технологии микро- и наноэлектроники.