

Исследование быстродействия SiGe ГБТ при переходе к суб-100 нм топологическим размерам

Ю.А. Чаплыгин¹, А.Г. Балашов¹, В.Д. Евдокимов¹, А.С. Ключников²

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ», v.d.evdokimov@gmail.com

²АО «НИИМЭ»

Аннотация — При переходе к более современному поколению БикМОП технологии пропорциональное уменьшение размеров *n-p-n* SiGe гетеропереходного биполярного транзистора (ГБТ) неоднозначно ведёт к увеличению его быстродействия и требует всесторонней адаптации структуры. С помощью настроенной САПР Synopsys TCAD разработан и реализован подход к масштабированию и конструктивно-технологической модификации структуры ГБТ для достижения значения граничной частоты выше 100 ГГц.

Ключевые слова — кремний-германий, SiGe ГБТ, БикМОП технология, быстродействие.

I. ВВЕДЕНИЕ

Кремний-германиевые гетеропереходные биполярные транзисторы (SiGe ГБТ) демонстрируют значения граничной и максимальной частот свыше 300 ГГц при комнатной температуре за счёт эффективной масштабируемости структур [1].

Быстродействующие ГБТ востребованы в схемах беспроводной связи, радиолокации, оптических телекоммуникационных линий, малощумящей усилительной техники, системах АФАР.

SiGe ГБТ, изготовленные по технологии с проектной нормой 0,18 мкм, показывают недостаточно высокие значения граничной и максимальной частот [2], поэтому не могут быть использованы в ряде приложений. Таким образом, задача повышения быстродействия кремний-германиевого гетеропереходного биполярного транзистора особенно актуальна для отечественной ЭКБ с суб-100 нм проектной нормой.

II. БИКМОП ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

A. Быстродействие SiGe ГБТ

Быстродействие биполярного транзистора оценивается по его граничной f_T (1) и максимальной f_{max} (2) частотам, суть экстраполированным до единичного значения модуля малосигнального коэффициента передачи базового тока в схеме с ОЭ и

коэффициента усиления мощности транзистора, соответственно [3]:

$$f_T = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{g_m} (C_{eb} + C_{cb}) + \frac{w_b^2}{2D_b} + \frac{w_{cb}}{2v_{sat}} + r_c C_{cb} + \tau_e \right]^{-1}, \quad (1)$$

$$f_{max} = \sqrt{\frac{f_T}{8R_b C_{cb}}}, \quad (2)$$

где $g_m = I_c / \varphi_T$ – проходная крутизна транзистора, C_{eb} – ёмкость *p-n* перехода эмиттер-база, C_{cb} – ёмкость *p-n* перехода коллектор-база, w_b – ширина электронеutralной активной базы, D_b – коэффициент диффузии неосновных носителей заряда в базе, w_{cb} – ширина области обеднения *p-n* перехода коллектор-база, r_c – сопротивление коллектора, τ_e – время пролёта неосновных носителей заряда через эмиттер.

Оценка быстродействия ГБТ по приведённым формулам является нетривиальной задачей, требующей экстракции электрофизических параметров полупроводниковых структур. Поэтому для решения задачи повышения быстродействия гетеропереходного биполярного транзистора использована САПР приборно-технологического моделирования Synopsys TCAD.

B. Технология SiGe ГБТ

Наиболее часто ГБТ используется в аналоговых и цифро-аналоговых РЧ-схемах совместно с КМОП приборами, поэтому ряд конструктивно-технологических параметров биполярного узла определяется КМОП блоком маршрута. Гетеропереходный биполярный транзистор может быть встроен в КМОП маршрут (как в данном случае) после формирования поликремниевых затворов КМОП транзисторов. Этот же поликристаллический кремний одновременно является пассивной базой ГБТ.

Исследуемая структура гетеропереходного биполярного транзистора (рис. 1) является самосовмещённой. К особенностям формирования ГБТ можно отнести неселективную эпитаксию SiGe

совместно с бором и углеродом для подавления нежелательной диффузии примесных атомов.

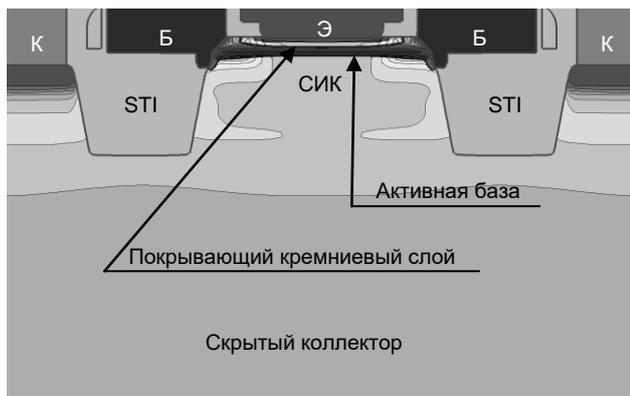


Рис. 1. Двумерное сечение структуры SiGe ГБТ (Э – эмиттер, Б – база, К – коллектор, СИК – селективно имплантированный коллектор, STI – мелкая щелевая изоляция)

Имплантации стоков и истоков МОП транзисторов используются для формирования высоколегированных областей эмиттера и базы ГБТ.

В отличие от маршрута 0,18 мкм технология с проектной нормой 0,09 мкм использует меньшую толщину поликремния, меньший термобюджет и ширину боковой диэлектрической изоляции. Причём в 0,09 маршруте используется spike-отжиг вместо типового процесса быстрого термического отжига (RTA).

III. МОДЕЛЬ SiGe ГБТ

На основе изготовленной структуры SiGe ГБТ с проектной нормой 0,18 мкм (рис. 2) создана технологическая модель транзистора в среде приборно-технологического моделирования. Затем модель была настроена в соответствии с полученными примесными профилями и измеренными электрическими характеристиками прибора. Методика включает подбор значений подгоночных коэффициентов моделей диффузии и сегрегации примесей в Si и SiGe, а также времён жизни носителей в полупроводниках.

Полученная модель использовалась для исследования масштабирования структуры гетеропереходного биполярного транзистора, профиля германия в базе, а также для определения технологических режимов формирования структуры.

Электрофизические характеристики ГБТ рассчитывались с учётом механических напряжений, эффектов модуляции ширины запрещённой зоны, принимая во внимание её многодолинное (multivalley band-gap) строение в гидродинамическом приближении переноса заряда.

В силу анизотропного характера распределения вектора поля механических напряжений в структуре SiGe подключена модель, изменяющая подвижность и

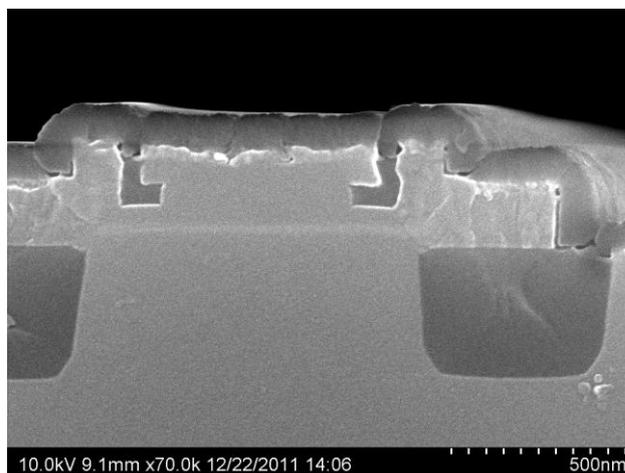


Рис. 2. РЭМ изображение структуры SiGe ГБТ

деформацию энергетических уровней структуры в зависимости от направления в кристалле.

Важной особенностью моделирования приборов на основе гетероструктур является необходимость учёта термоэмиссионного тока носителей заряда через гетероинтерфейс [4] в силу скачкообразного характера изменения энергетических уровней валентной зоны и зоны проводимости, что позволяет корректно рассчитывать плотности токов носителей заряда и энергетических потоков через границу кремния и германия.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

Вертикальные размеры структуры масштабировались пропорционально коэффициенту $k_{\text{верт}}$. На рис. 3 и рис. 4 приведены зависимости граничной и максимальной частот от коэффициента вертикального масштабирования SiGe ГБТ, изготовленного по технологии 0,18 и 0,09 мкм.

Несмотря на снижение толщин слоёв прибора, его граничная и максимальная частоты заметно снижаются из-за неоптимальной конструкции «внутреннего транзистора», что вызвано, в частности, увеличением ширины активной базы – $W_{\text{аб}}$ (табл. 1) – с возникновением паразитного потенциального барьера на эмиттерно-базовом $p-n$ переходе. Это вызвано тем, что ширина активной базы определяется термобюджетом маршрута, который в результате геометрического подхода к масштабированию не изменялся.

Табл. 1

Изменение ширины активной базы ГБТ при вертикальном масштабировании структуры, изготовленной по маршруту 0,18 мкм и 0,09 мкм

Коэффициент вертикального масштабирования		1,0	1,2	1,4	1,6
$W_{\text{аб}}$, нм	0,18 мкм	35,5	36,2	37,4	38,6
	0,09 мкм	24,2	23,4	22,9	22,8

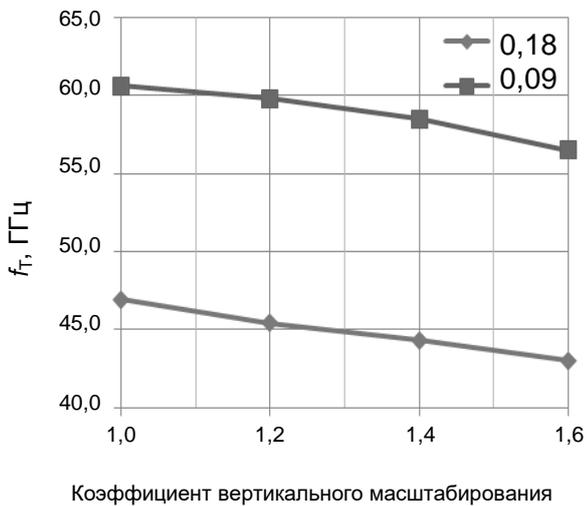


Рис. 3. Зависимость граничной частоты SiGe ГБТ от коэффициента вертикального масштабирования

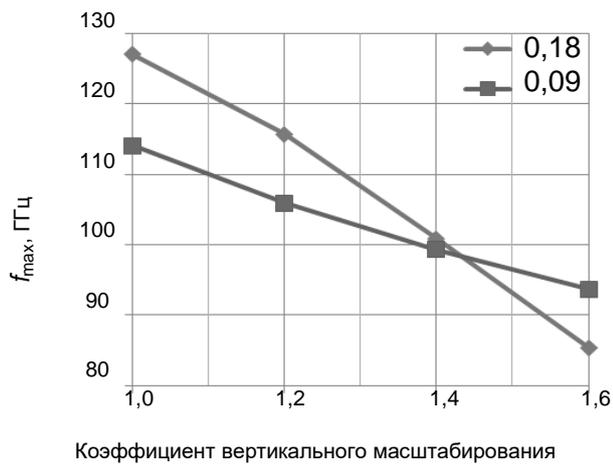


Рис. 4. Зависимость максимальной частоты SiGe ГБТ от коэффициента вертикального масштабирования

Изменение профилей германия и углерода в базе, а также их взаимного расположения с профилем бора позволило пропорционально снизить ширину базы при вертикальном масштабировании и повысить быстродействие гетеропереходного биполярного транзистора (рис. 5).

Латеральное масштабирование проводилось в привязке к ширине эмиттерного окна. На рис. 6 и рис. 7 показаны зависимости f_T и f_{max} от ширины эмиттерного окна. Максимальная частота монотонно возрастает с уменьшением латерального размера структуры, что согласуется с (2), однако граничная частота структуры изменяется не столь значительно, как f_{max} , не демонстрируя явного тренда. Таким образом, как демонстрирует приборное моделирование, латеральное масштабирование также является важным фактором повышения быстродействия SiGe ГБТ.

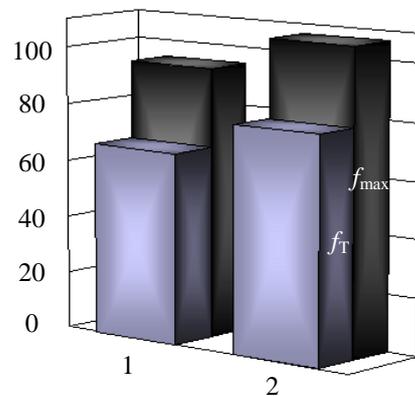


Рис. 5. Граничная и максимальная частоты SiGe ГБТ, изготовленного по технологии с проектной нормой 0,09 мкм, до (1) и после (2) модификации профиля германия

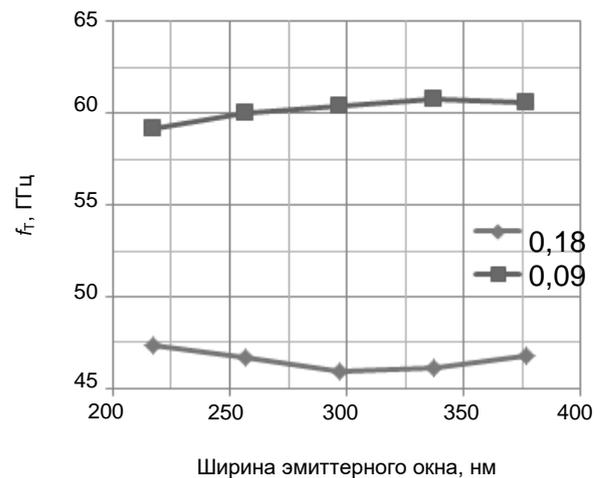


Рис. 6. Зависимость граничной частоты SiGe ГБТ от ширины эмиттерного окна

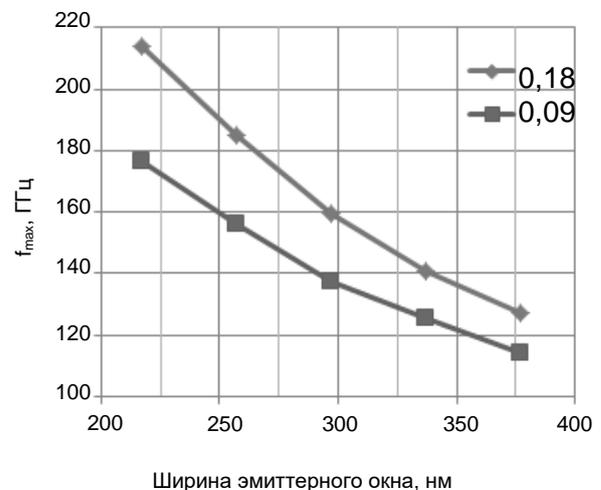


Рис. 7. Зависимость максимальной частоты SiGe ГБТ от ширины эмиттерного окна

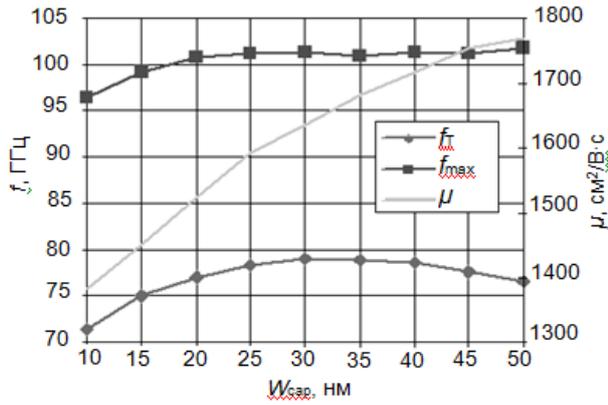


Рис. 8. Зависимость граничной и максимальной частот, а также подвижности электронов в активной базе SiGe ГБТ

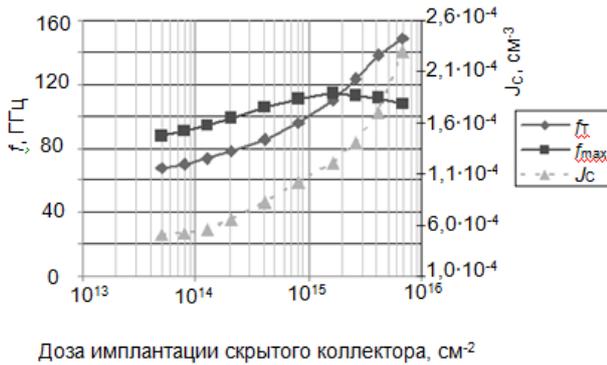


Рис. 9. Зависимость граничной и максимальной частот, плотности коллекторного тока от дозы имплантации скрытого коллектора SiGe ГБТ

Использование покрывающего кремниевого слоя при формировании эпитаксиальной базы повышает термомеханическую стойкость гетероструктуры, определяемую отношением толщин слоёв SiGe и вышележащего покрывающего Si (W_{cap}) [5]. Однако при значении толщины покрывающего слоя 30 нм f_T достигает максимального значения, а затем снижается (рис. 8). При малых значениях W_{cap} граничная частота падает из-за снижения подвижности, определяемой уменьшением механических напряжений в слое SiGe и возрастающим значением ёмкости C_{cb} . При больших значениях W_{cap} возрастает сопротивление покрывающего Si слоя.

Исследование показало возможность увеличения дозы легирующей примеси в скрытом коллекторе, в результате которого наблюдается монотонный рост граничной частоты по причине увеличения плотности коллекторного тока (рис. 9). При увеличении значения дозы имплантации до $1,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ максимальная частота достигает своего экстремума, и её дальнейшему увеличению препятствует возрастающее значение ёмкости C_{bc} . Возможным путём дальнейшего увеличения максимальной частоты без ущерба для уровня граничной частоты является модификация узла селективно-имплантированного коллектора.

Проведенные с использованием средств и методов приборно-технологического моделирования исследования позволили выбрать необходимые значения конструктивно-технологических параметров, обеспечивающие заданный уровень быстродействия при изготовлении отечественной ЭКБ с суб-100 нм проектными нормами.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых исследований разработана технологическая модель SiGe ГБТ в САПР TCAD Synopsys, позволяющая учитывать влияние конструктивно-технологических параметров функциональных слоев, формирующих биполярный транзистор в БикМОП процессе с суб-100 нм топологической нормой, на его электрические характеристики и быстродействие.

Ряд установленных приборно-технологических зависимостей позволил разработать методику масштабирования структуры SiGe ГБТ для её использования при переходе к БикМОП технологии с проектной нормой 0,09 мкм без принципиальных модификаций. Показано, что уменьшение ширины эмиттерного окна до 220 нм ведёт, наряду с возрастанием f_{max} , к снижению f_T , ограничивая степень латерального масштабирования.

Подобраны наиболее подходящие режимы формирования базового (взаимное расположение профиля Ge с профилем В) и коллекторного (доза имплантации скрытого коллектора) узлов ГБТ, также толщина покрывающего кремниевого слоя снижена с 50 нм до 30 нм.

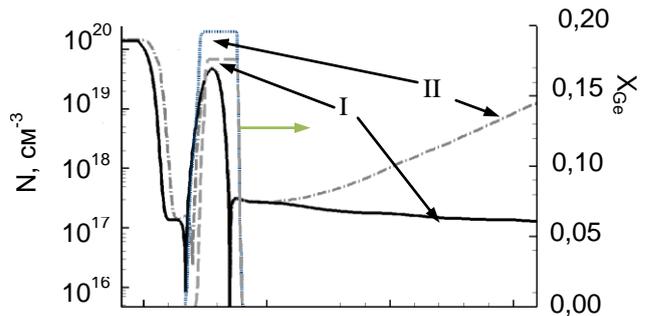


Рис. 10. Одномерные сечения примесных профилей двух конструктивно-технологических решений ГБТ: I – профиль германия и примесные атомы исходной конструкции, II – изменённой конструкции

Сравнительное изображение сечений примесных профилей исходной и модифицированной структур SiGe ГБТ приведено на рис. 10. В результате указанных изменений значение граничной частоты возросло в 3 раза, превысив 100 ГГц, максимальная частота SiGe ГБТ при этом оказывается не ниже граничной.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] E. Julian, R.Wahjudi Scaling Model For Silicon Germanium Heterojunction Bipolar Transistors // *Telkomnika*. – Vol. 14. – No. 1. – Apr. 2015. – P. 103–109.
- [2] Low-Cost, High Voltage SiGe:C HBTs for a 0.18 μm BiCMOS Process / D. Knoll, V. Dmitriev, T. Egorova et al. // *Proceedings of the 2012 Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting*. IEEE Catalog Number: CFP12BIP-PRT. – p. 153.
- [3] Тимошенко В.П., Адамов Ю.Ф., Тимошенко П.В. Оптимизация статического режима гетероструктурных биполярных транзисторов в усилительных устройствах СВЧ-диапазона // *Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника*. – №3(159). – М.: АО «НИИМЭ», 2015. – С. 19–24.
- [4] Sentaurus Device User Guide // Synopsys TCAD J-2014.09. – P. 715–716.
- [5] Partha Sarathi Chakraborty, K. A. Moen, J. D. Cressler An investigation on Optimization and Scaling of Complementary SiGe HBTs // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2013. – vol. 1. – pp. 34 – 41.

Research on the RF performance of SiGe HBT while transition towards sub-100 nm technology limits

U.A. Chaplygin¹, A.G. Balashov¹, V.D. Evdokimov¹, A.S. Klyuchnikov²

¹National Research University of Electronic Technology, v.d.evdokimov@gmail.com

²JSC ‘MERI’

Keywords — silicon-germanium, SiGe HBT, BiCMOS technology, RF performance.

ABSTRACT

Decreasing topological dimensions in the contemporary generation of BiCMOS technologies and the proportional shrinking of the *n-p-n* silicon-germanium heterojunction bipolar transistor (SiGe HBT) uncertainly leads to its RF performance magnification that means that the comprehensive adaptation of its structure is needed. An approach to scaling and constructive-technological modification of the SiGe HBT structure by means of tuned Synopsys Technological CAD was designed and implemented, that allows the cut-off frequency to exceed 100 GHz threshold.

REFERENCES

- [1] E. Julian, R.Wahjudi Scaling Model For Silicon Germanium Heterojunction Bipolar Transistors // *Telkomnika*. Vol. 14. No. 1. Apr. 2015. PP. 103–109.
- [2] Low-Cost, High Voltage SiGe:C HBTs for a 0.18 μm BiCMOS Process / D. Knoll, V. Dmitriev, T. Egorova et al. // *Proceedings of the 2012 Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting*. IEEE, 2012. Catalog Number: CFP12BIP-PRT. P. 153.
- [3] Timoshenkov V.P., Adamov Ju.F., Timoshenkov P.V. Optimizacija staticheskogo rezhima geterostrukturnyh bipoljarnyh tranzistorov v usilitel'nyh ustrojstvah SVCh-diapazona // *Jelektronnaja tehnika. Serija 3. Mikrojelektronika*. No. 3(159). Moscow, AO «NIIMJe», 2015. PP. 19–24. (In Russian)
- [4] Sentaurus Device User Guide // Synopsys TCAD J-2014.09. PP. 715–716.
- [5] P. Chakraborty, K. A. Moen, J. D. Cressler An investigation on Optimization and Scaling of Complementary SiGe HBTs // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2013. Vol. 1. PP. 34 – 41.