

## Исследование быстродействия SiGe ГБТ при переходе к суб-100 нм проектной норме

*В.Д.Евдокимов*

*Национальный исследовательский университет МИЭТ*

**Аннотация:** В работе рассмотрено влияние масштабирования *n-p-n* SiGe гетеропереходного биполярного транзистора (ГБТ) на его динамические характеристики. Продемонстрированы изменения максимальной и граничной частот прибора при переходе от технологии БиКМОП с проектными нормами 0,18 мкм к проектным нормам 0,09 мкм, а также их зависимость от конструктивно-технологических вариаций прибора.

**Ключевые слова:** кремний-германий, SiGe ГБТ, БиКМОП, быстродействие.

### Введение

В последние несколько десятилетий наблюдается активное развитие кремний-германиевой технологии. Приборы на основе Si/SiGe способны работать в СВЧ и миллиметровом диапазоне, в ряде применений составляя конкуренцию приборам на основе  $A^{III}B^V$  материалов по себестоимости, степени интеграции и выходу годных.

По прогнозу ITRS [1] в ближайшие 12 лет граничная и максимальная частоты вырастут до уровня  $\sim 0,5$  ТГц и  $\sim 0,9$  ТГц соответственно при увеличении плотности коллекторного тока. Поэтому актуальным направлением исследования является повышение быстродействия приборов на основе кремний-германиевых соединений.

По этой технологии изготавливают схемы беспроводной связи (GSM, CDMA, Wi-Fi), локации (GPS, радары), оптических телекоммуникационных линий (LAN), маломощную усилительную технику, смесители, фазодетекторы и многое другое [2]. Особой функциональностью отличаются схемы, произведённые по БиКМОП технологии, сочетающие компактность современных КМОП транзисторов и усилительные качества биполярных транзисторов.

По сравнению с кремниевыми биполярные транзисторы, изготовленные по кремний-германиевой технологии, обладают повышенным коэффициентом усиления, лучшими динамическими характеристиками и более низким уровнем шумов.

Разработка современных приборно-технологических решений требует комплексного анализа приборов и электрофизических эффектов в них с применением приборно-технологических САПР [3].

### Характеристики структуры ГБТ

Вне зависимости от конкретной конструкции SiGe гетеропереходного биполярного транзистора (ГБТ) в одномерном приближении по формулам (1) и (2) [4] можно оценить граничную и максимальную частоты транзистора соответственно:

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

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

где  $f_T$  – граничная частота,  $f_{max}$  – максимальная частота,  $g_m = I_c / \varphi_T$  – проходная крутизна транзистора,  $C_{eb}$  – ёмкость р-п перехода эмиттер-база,  $C_{cb}$  – ёмкость р-п перехода коллектор-база,  $w_b$  – ширина электронейтральной активной базы,  $D_b$  – коэффициент диффузии неосновных носителей заряда в базе,  $w_{cb}$  – ширина области обеднения р-п перехода коллектор-база,  $r_c$  – сопротивление коллектора,  $\tau_e$  – задержка хранения заряда в эмиттере.

За основу взята конструкция n-p-n SiGe ГБТ транзистора фирмы ИНР [5], выпускаемого по технологии 0,18 мкм [6, 7].

Исследуемая конструкция прибора (рис. 1) является полностью самосовмещённой, относится к классу «low-cost» технологии. Активная кремний-германиевая база формируется неселективной низкотемпературной эпитаксией.

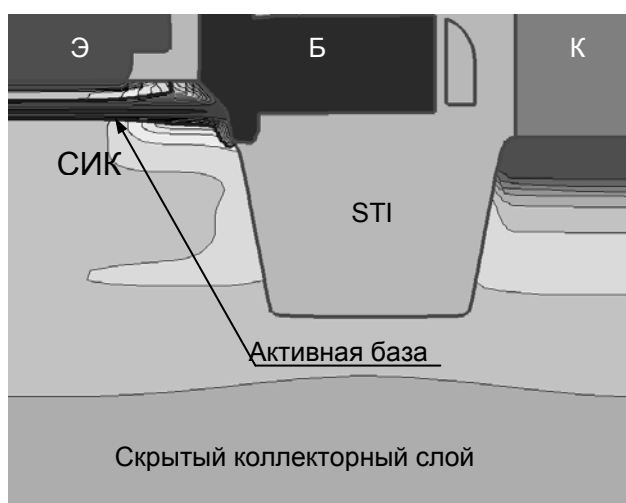


Рис. 1. – Двумерное сечение половины структуры SiGe ГБТ (Э – эмиттер, Б – база, К – коллектор, СИК – селективно имплантированный коллектор, STI – мелкая щелевая изоляция).

Бор активной базы встраивается в SiGe слой в процессе его эпитаксии. Одномерное сечение структуры ГБТ по центру эмиттера представлено на рис. 2.

Гетеропереходный биполярный транзистор встраивается в КМОП маршрут после формирования поликремниевых (Si\*) затворов КМОП транзисторов. Этот же поликристаллический кремний одновременно является пассивной базой ГБТ. Поверх Si\* осаждается нитрид кремния, по которому проводится единственная дополнительная фотолитография, формирующая вместе с последующей операцией плазменного травления окно биполярного транзистора. Эпитаксия SiGe и серия имплантаций формируют базу и коллектор ГБТ, а последовательное осаждение и травление SiO<sub>2</sub> и осаждение второго слоя поликремния формируют спейсеры и эмиттер. Исследуемая структура SiGe ГБТ встроена в КМОП маршрут с проектной нормой 0,18 мкм (X1) [6, 7]. Однако при переходе к технологии с проектной нормой 0,09 мкм (X2) динамические характеристики SiGe ГБТ оказываются недостаточными, чтобы соответствовать частоте СВЧ КМОП транзисторов.

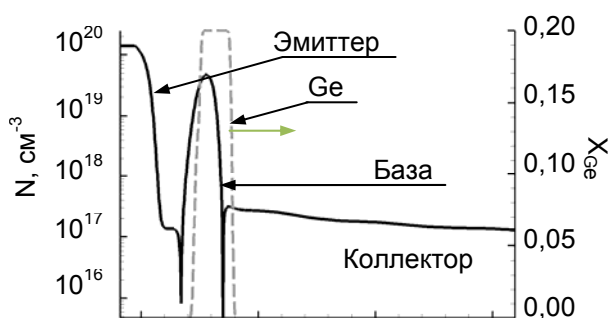


Рис. 2. – Одномерное сечение SiGe ГБТ по центру эмиттера.

В связи с этим возникает необходимость дополнительного исследования способов повышения быстродействия ГБТ.

При сравнении маршрутов X1 и X2 главными отличиями последнего является меньшая толщина поликремния, меньший термобюджет, другая конструкция спейсеров и меньшие минимальные проектные нормы.

Оценка и сравнения термобюджетов маршрутов представляется сложной задачей ввиду различных техник активации и диффузии примеси: быстрый термический отжиг (RTA) и flash-отжиг.

### Подход к масштабированию

В предыдущей работе [8] влияние масштабирования оценивалось с помощью построения геометрических моделей прибора в SSE Sentaurus TCAD. В данной работе рассматривается технологическое моделирование БиКМОП маршрута, в который встраивается SiGe ГБТ. Моделирование прибора проводилось в пакете программ Sentaurus TCAD (Synopsys).

Первоначальная конструкция транзистора маршрута 0,18 мкм встраивалась в маршрут 0,09 мкм сперва без изменений для оценки влияния термобюджета на характеристики прибора – «технологическое масштабирование».

Последующими шагами стали прямое геометрическое вертикальное и латеральное масштабирование структуры транзистора. Далее

рассматривались вариации профиля германия в базе, толщины «сар»-слоя и дозы имплантации скрытого коллекторного слоя (глубокого коллектора).

### Результаты и обсуждения

Результаты моделирования частотных характеристик вертикально промасштабированной структуры SiGe ГБТ представлены на рис. 3 –  $f_T(k)$ , рис. 4 –  $f_{max}(k)$ . Зависимости  $f_T$  и  $f_{max}$  для латерального масштабирования от ширины эмиттерного окна (масштабировалась активная часть структуры) представлены на рис. 5 и рис. 6, соответственно.

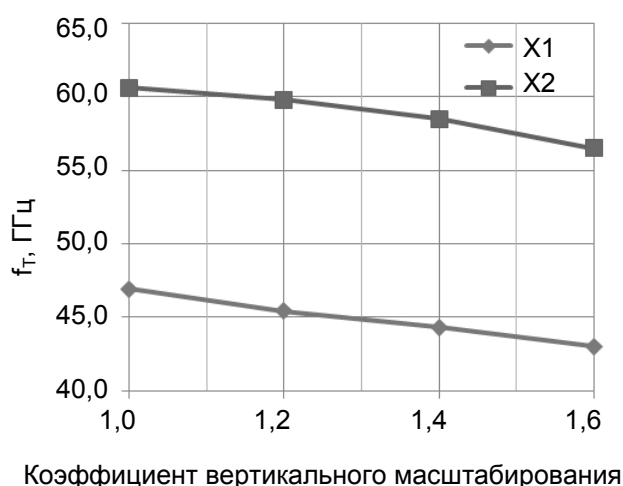


Рис. 3. – Зависимость граничной частоты SiGe ГБТ от коэффициента вертикального масштабирования для двух маршрутов.

Из рис. 3 и 4 видно, что при вертикальном масштабировании значения как  $f_T$ , так и  $f_{max}$  снижаются. В случае с маршрутом X2 максимальная частота вовсе снижается с масштабированием быстрее, чем у прибора по маршруту X1. Однако, при переходе к технологии с проектными нормами 90 нм с меньшим термобюджетом значения обоих показателей увеличиваются. Таким образом, непосредственное геометрическое масштабирование структуры SiGe ГБТ является неприемлемым подходом для повышения быстродействия

прибора, в то время как «технологическое масштабирование» даёт заметный прирост  $f_T$  и  $f_{max}$ .

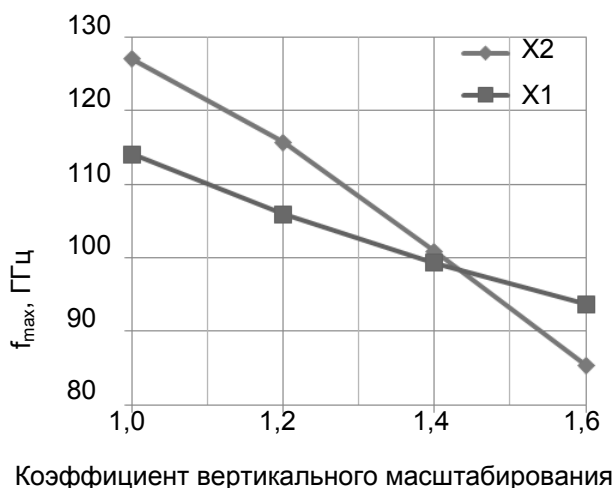


Рис. 4. – Зависимость максимальной частоты SiGe ГБТ от коэффициента вертикального масштабирования для двух маршрутов.

Основной причиной неприменимости подхода прямого геометрического масштабирования является паразитная диффузия бора. Присутствие германия снижает концентрацию междоузлий кремния, что снижает диффузию бора, как следует из [9].

Уширение активной базы ведёт к снижению значений максимальной и граничной частот прибора. Изменение ширины активной базы SiGe ГБТ при вертикальном масштабировании структуры проиллюстрировано в таблице №1.

Таблица №1

Изменение ширины активной базы ГБТ при вертикальном масштабировании структуры, изготовленной по маршруту X1 и X2

Коэффициент масштабирования		1,0	1,2	1,4	1,6
Ширина базы, нм	X1 (180 нм)	35,5	36,2	37,4	38,6
	X2 (90 нм)	24,2	23,4	22,9	22,8

Латеральное масштабирование SiGe ГБТ имеет своей целью не столько микроминиатюризацию прибора для увеличения плотности упаковки ИС, сколько адресуется увеличению максимальной частоты – малосигнального коэффициента усиления мощности транзистора, теряющейся преимущественно на сопротивлении базы и перезарядке барьерного конденсатора  $C_{bc}$ .

Даже современные SiGe ГБТ изготавливаются с шириной эмиттерного окна 200–420 нм [10]. Уменьшение ширины эмиттерного окна, а вместе с ним ширины активной базы и коллектора под ней приводит главным образом к снижению абсолютного значения ёмкости р-п перехода база-коллектор и сопротивления активной базы, отчего максимальная частота заметно возрастает (рис. 5). Граничная частота изменяется при этом незначительно (рис. 6). Из-за меньшего сопротивления базы кривая, соответствующая маршруту X1, лежит выше соответствующей маршруту X2.

В работе [11] рассматривается техника повышения подвижности электронов в слоях кремния за счёт использования эффекта напряжённого кремния, управляемого соотношением ширины активной области и ширины области мелкой щелевой изоляции (STI). Хотя при минимальной ширине эмиттерного окна наблюдается увеличение  $\mu_n$  до 18 % (X1) и до 13 % (X2) в коллекторе по сравнению со структурой максимальной ширины, плотность коллекторного тока остаётся практически неизменной, поэтому на значение граничной частоты в данной структуре ГБТ этот эффект влияние оказывает незначительное.

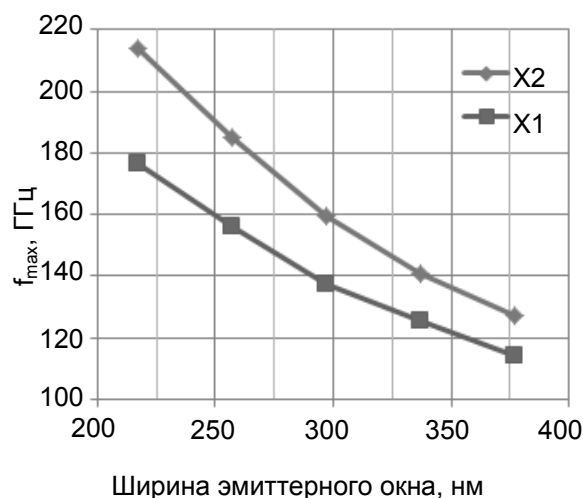


Рис. 5. – Зависимость максимальной частоты SiGe ГБТ от латерального размера прибора для двух уровней технологии.

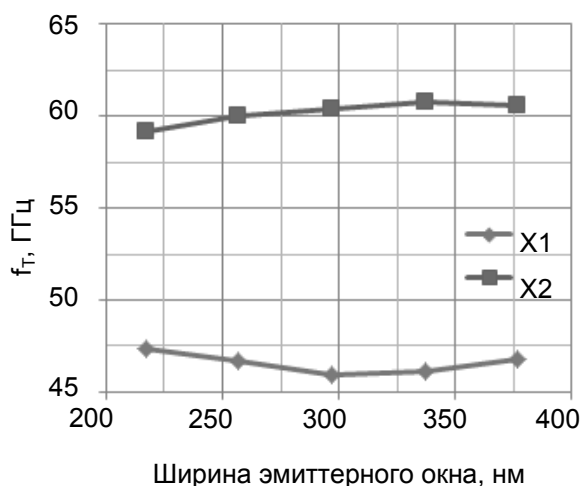


Рис. 6. – Зависимость граничной частоты SiGe ГБТ от латерального размера приборов для двух уровней технологии.

Одним из ключевых достоинств SiGe ГБТ является возможность управления высотой потенциальных барьеров на границах базы с эмиттером и коллектором для электронов без влияния на коэффициенты инжекции дырок за счёт варьирования мольной доли германия в твёрдом растворе SiGe. Градиент профиля германия в SiGe управляет т. н. «квазиэлектрическим



подем» в базе, определяющим дрейфовую составляющую механизма переноса неосновных носителей заряда.

С изначальным трапециевидным профилем Ge (трап. 1) высота потенциального барьера для электронов оказывается такой же, как и для дырок [4], поскольку ЭБ p-n переход расположен вне слоя SiGe. Технологическое моделирование показало, что можно увеличить толщину слоя SiGe, сохраняя слои структуры напряжёнными, погрузив тем самым переход ЭБ в слой кремний-германия (трап. 2). Также оказалось возможным увеличение мольной доли германия до 27 % (трап. 3). Профили «ступени» рассмотрены в работе [4]. На рис. 7 представлены значения  $f_T$  и  $f_{max}$  для каждого профиля Ge в активной базе ГБТ.

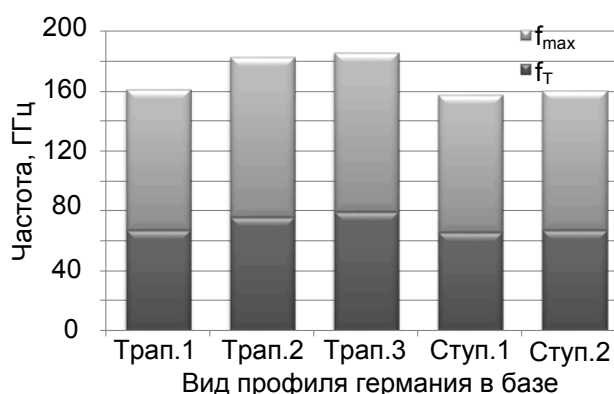


Рис. 7. – Граничная и максимальная частоты SiGe ГБТ в зависимости от профиля германия.

При переходе к маршруту X2, имеющему меньший термобюджет по сравнению с X1, снижается диффузия примесей. В том числе диффузия мышьяка из эмиттерного поликремния – на 47 %, размытие профиля базы – на 32 %, следствием чего является более высокая диффузионная ёмкость. Приборно-технологическое моделирование продемонстрировало возможность снижения толщины кремниевого сар-слоя ( $t_{cap}$ ) без ущерба для термомеханической стойкости структуры. При этом у зависимости граничной частоты (рис. 8) наблюдается максимум.

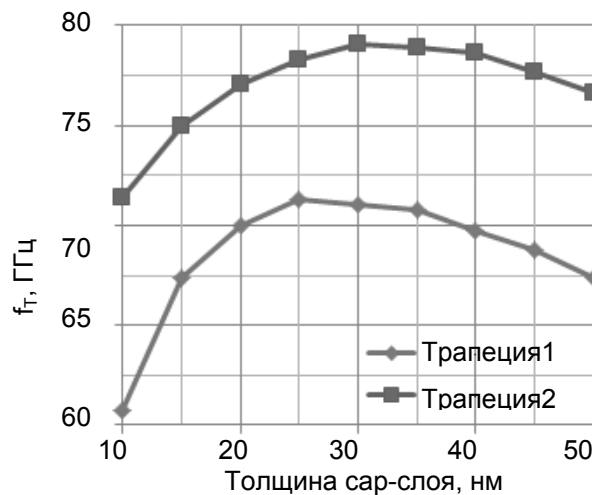


Рис. 8. – Граничная частота с изменением толщины сар-слоя для двух профилей германия.

Как упоминалось выше, для повышения быстродействия SiGe ГБТ необходимо увеличивать плотность коллекторного тока.

На рис. 9 приведены кривые  $f_T$  и  $f_{max}$  возрастающие с ростом дозы имплантации фосфора в коллектор ( $D_p$ ), что связано с увеличением плотности коллекторного тока (рис. 10). Однако одновременно возрастает значение ёмкости база-коллектор, что сказывается на снижении максимальной частоты, начиная с определённого значения  $D_p$ .

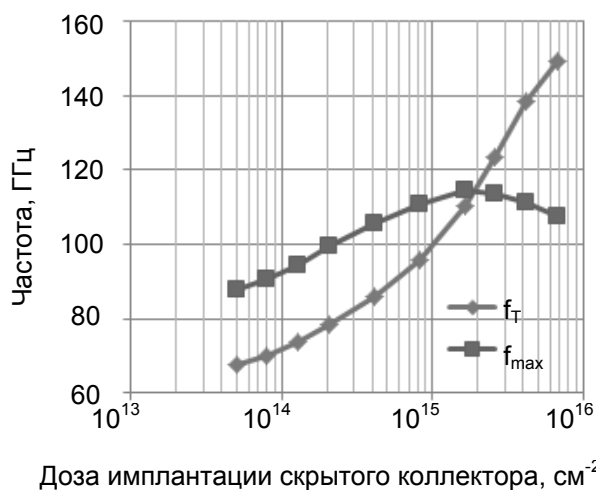


Рис. 9. – Поведение граничной и максимальной частот SiGe ГБТ с изменением дозы имплантации глубокого коллектора.

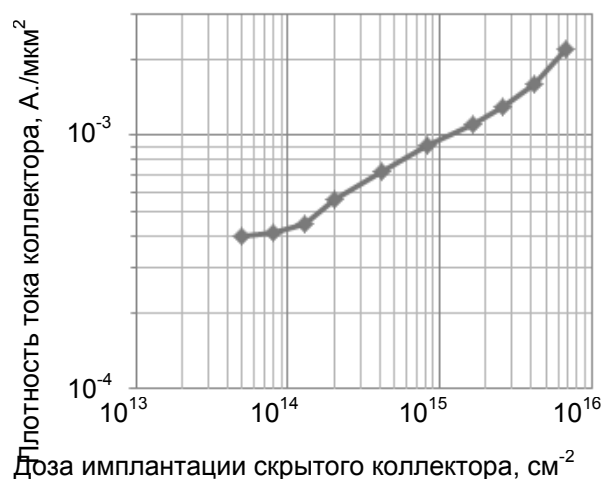


Рис. 10. – Зависимость плотности коллекторного тока от дозы имплантации скрытого коллектора.

### Выводы

Как следует из проведённой работы, непосредственное геометрическое масштабирование SiGe ГБТ не ведёт к увеличению быстродействия прибора и требует системного анализа каждого узла структуры с разработкой уникального подхода к масштабированию каждого. Принципиальным моментом масштабирования является снижение термобюджета маршрута.

В итоговой структуре SiGe ГБТ достигнуты следующие значения его электрофизических параметров:  $f_T$  – 134,8 ГГц (187 % от первоначального значения),  $f_{max}$  – 138,7 ГГц (прирост 9 %),  $V_{cbo}$  – 10,5 В,  $V_{ceo}$  – 2,1 В,  $\beta$  – 479,6.

Рассматриваемая структура SiGe ГБТ оказывается пригодной для встраивания в БикМОП маршрут с проектными нормами 90 нм без принципиальных изменений.

### Литература

1. ITRS 2012 Update RF and Analog/Mixed-signal Technologies (FRAMS), URL: [itrs.net/Links/2012ITRS/Home2012.htm](http://itrs.net/Links/2012ITRS/Home2012.htm). Date of circulation January 9, 2014.

2. Тимошенко В.П., Шалимов А.С., Тимошенко А.С. Восстановление импульсных сигналов в кабельных линиях связи // Инженерный вестник Дона, 2012, №4. Ч. 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1330](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1330).

3. Адамов Ю.Г., Гулякович Г.Н., Северцев В.Н. Учёт влияния подложки на высокочастотные характеристики кремниевых транзисторов // Инженерный вестник Дона, 2012, №2. Ч. 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/791](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/791).

4. Cressler J.D. Silicon Heterostructure Handbook. – New York: CRC Press, 2006. – pp. 141–153.

5. BiCMOS structure, method for producing the same and bipolar transistor for a BiCMOS structure: Appl. No 10/497827 US: Int. Cl. H01L 27/102 / Ehwald K-E [et al.] (Germany) ; Assignee IHP GmbH ; PCT Pub. Date June 12, 2003; Date of Pat. Dec. 11, 2007; Pat. No US 7307336 B2; PCT Filed Dec. 06, 2002.

6. Шелепин Н.А., Селецкий В.К., Дмитриев В.А. Исследование параметров элементной базы 0,18 мкм радиочастотной БиКМОП технологии / Сборник научных трудов 14-ой Российской научно-технической конференции «Электроника, микро- и нанoeлектроника»: Тезисы докладов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – с.111.

7. D. Knoll, V. Dmitriev, T. Egorova, V. Seletskij, N. Shelepin, R. Barth, G. G. Fisher, T. Grabolla, W. Mehr and B. Tillack Low-Cost, High Voltage SiGe:C HBTs for a 0.18  $\mu\text{m}$  BiCMOS Process // Proceedings of the 2012 Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. IEEE Catalog Number: CFP12VIP-PRT . – p. 153.

8. Евдокимов В.Д. Исследование влияния вертикального масштабирования SiGe гетеропереходного биполярного транзистора на его частотные характеристики методами приборно-технологического моделирования / Сборник трудов 19-ой Всероссийской межвузовской



научно-технической конференции «Микроэлектроника и информатика-2012»: Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2012. – с. 64.

9. Феклистов К.В. Преципитация бора в кремнии при имплантации и отжиге: расслоение на стадии освальдовского созревания / Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. – Новосибирск: ИФПП им. А.В. Ржанова, Сибирское отделение РАН, 2011. – с. 73–76.

10. A 55-nm BiCMOS platform for optical and millimeter-wave systems-on-chip (BCTM2013\_RF2THZ\_OBIP\_CHEVALIER), URL: [iee.et.tu-dresden.de/iee/eb/res/dot7/](http://iee.et.tu-dresden.de/iee/eb/res/dot7/). Date of circulation January 9, 2014.

11. Kahng A. B., Puneet Sharma, Topaloglu R. O. Exploiting STI Stress for Performance // Proceedings of IEEE/ACM international conference on Computer-aided design. – 2007. – pp. 83–90.

### References

1. ITRS 2012 Update RF and Analog/Mixed-signal Technologies (FRAMS), URL: [itrs.net/Links/2012ITRS/Home2012.htm](http://itrs.net/Links/2012ITRS/Home2012.htm). Date of circulation January 9, 2014.

2. Timoshenkov V.P., Shalimov A.S., Timoshenkov A.S. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4. part 2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1330](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1330).

3. Adamov Ju.G., Guljakovich G.N., Severcev V.N. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №2. part 2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive)

4. Cressler J.D. Silicon Heterostructure Handbook. New York: CRC Press, 2006, pp. 141–153.

5. BiCMOS structure, method for producing the same and bipolar transistor for a BiCMOS structure: Appl. No 10/497827 US: Int. Cl. H01L 27/102 / Ehwald K-E [et al.] (Germany) ; Assignee IHP GmbH ; PCT Pub. Date June 12, 2003; Date of Pat. Dec. 11, 2007; Pat. No US 7307336 B2; PCT Filed Dec. 06, 2002.

6. Shelepin N.A., Seleckij V.K., Dmitriev V.A. Sbornik nauchnyh trudov 14-oj Rossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Jelektronika, mikro- i nanojelektronika»: Tezisy dokladov. M.: NIJaU MIFI, 2012. p.111.

7. D. Knoll, V. Dmitriev, T. Egorova [i dr.] Proceedings of the 2012 Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. IEEE Catalog Number: CFP12BIP-PRT . p. 153.

8. Evdokimov V.D. Sbornik trudov 19-oj Vserossijskoj mezhvuzovskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Mikrojelektronika i informatika-2012»: Tezisy dokladov. M.: MIJeT, 2012. p. 64.

9. Feklistov K.V. Precipitacija bora v kremnii pri implantacii i otzhige: rassloenie na stadii osval'dovskogo sozrevanija [Precipitation of boron in silicon during implantation and annealing: bundle on the stage of Osvald's maturation]. Dissertacija na soiskanie uchjonoj stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk. Novosibirsk: IFPP im. A.V. Rzhanova, Sibirskoe otdelenie RAN, 2011, pp. 73–76.

10. A 55-nm BiCMOS platform for optical and millimeter-wave systems-on-chip (BCTM2013\_RF2THZ\_OBIP\_CHEVALIER), URL: [iee.et.tu-dresden.de/iee/eb/res/dot7/](http://iee.et.tu-dresden.de/iee/eb/res/dot7/). Date of circulation January 9, 2014.

11. Kahng A. B., Puneet Sharma, Topaloglu R. O. Exploiting STI Stress for Performance. Proceedings of IEEE/ACM international conference on Computer-aided design. 2007. pp. 83–90.