

Проектирование технологических процессов изготовления кремний-германиевых гетеробиполярных транзисторов

Е.М. Савченко, Д.Г. Дроздов

ОАО «НПП «Пульсар», designcenter@pulsarnpp.ru

МГТУ МИРЭА, mirea@mirea.ru

Аннотация — В статье представлены результаты приборно-технологического моделирования технологических процессов изготовления кремний-германиевых гетеробиполярных транзисторов. Представлены результаты по исследованию моделей ионной имплантации и диффузии германия, эпитаксиального роста пленок кремний-германий. Проведено моделирование конструктивных вариантов гетеробиполярных транзисторов с областью базы, сформированной с помощью селективной и неселективной эпитаксии.

Ключевые слова — кремний-германий, гетеробиполярный транзистор, система приборно-технологического проектирования, селективная и неселективная эпитаксия.

I. ВВЕДЕНИЕ

Применение гетероструктур кремний-германий в биполярных транзисторах позволяет значительно улучшить высокочастотные характеристики в сравнении с традиционными кремниевыми приборами и открывает перед разработчиками радиоэлектронной аппаратуры широкие возможности по созданию перспективных изделий, обладающих уникальным набором характеристик. На современном этапе актуальными задачами в области исследования кремний-германиевых гетеробиполярных транзисторов являются:

- разработка технологических процессов изготовления высокочастотных ррп-транзисторов, объединенных как с комплементарными полевыми транзисторами (БиКМОП-процесс) [1], так и с высокочастотными ррп-транзисторами [2], для возможной постановки производства на территории Российской Федерации;

- оптимизация конструкции и технологии изготовления с целью повышения значений граничной частоты, максимальной частоты генерации, напряжения пробоя, снижения коэффициента шума и т.д.;

- исследование гетеробиполярных транзисторов при воздействии специальных внешних воздействующих факторов с целью создания новых или корректировки существующих компактных моделей.

Для решения представленного комплекса научно-технических задач успешно применяются системы приборно-технологического моделирования. Наибольшее распространение получили системы приборно-технологического моделирования от компаний Synopsys [3] и Silvaco [4]. Это, прежде всего, связано с широкими возможностями данных САПР в области технологического моделирования. В данной работе будет рассматриваться применение различных модулей программного продукта Sentaurus TCAD компании Synopsys.

Таким образом, целью данной работы являлось исследование различных технологических процессов, а также ряда конструктивных решений, направленных в дальнейшем на разработку технологических маршрутов изготовления гетеробиполярных транзисторов. Кроме того, разработанные модели транзисторов будут применяться для исследования особенностей функционирования данного типа транзисторов при различных внешних воздействиях.

II. ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРЕМНИЙ-ГЕРМАНИЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Как известно, основным конструктивным отличием кремний-германиевых гетеробиполярных транзисторов от традиционных кремниевых приборов является область базы. Существует два основных способа формирования области базы: ионная имплантация германия и эпитаксиальный рост пленки кремний-германий.

Возможность создания кремний-германиевых гетеробиполярных транзисторов с помощью процессов ионной имплантации германия была показана в работах [5,6]. Стоит провести сопоставление результатов моделирования и экспериментальных данных процесса имплантации германия с целью определения точности моделей, предлагаемых модулем DIOS САПР Sentaurus TCAD. Для сопоставления использовались экспериментальные данные исследования имплантации германия в монокристаллический и поликристаллический кремний, полученные с помощью метода вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) и представленные в работе [7].

На рис. 1 представлен профиль распределения германия по глубине при имплантации в монокристаллический кремний с энергией $E = 200$ кэВ и дозой $Q = 1,86 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

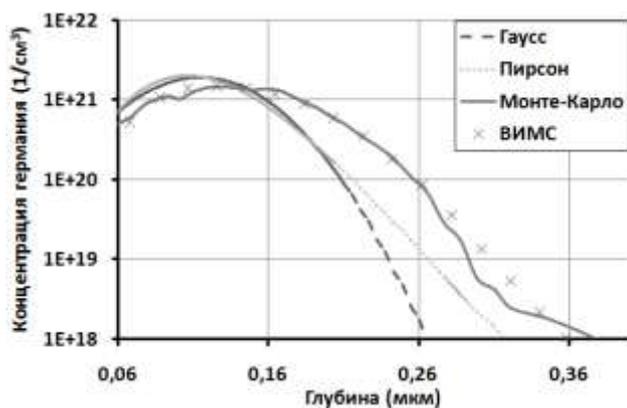


Рис. 1. Распределение концентрации германия по глубине при имплантации с энергией $E = 200$ кэВ и дозой $Q = 1,86 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ в монокристаллический кремний

Из рис. 1 видно, что метод Монте-Карло описывает профиль германия с очень высокой точностью как по глубине залегания, так и по величине концентрации. Аналогичные результаты наблюдаются и при имплантации в поликристаллический материал. Недостатком данного метода, как известно, является существенное увеличение времени расчёта, что позволяет сделать следующий вывод: применение указанного метода для инженерной оптимизации полного технологического маршрута не целесообразно; данный метод необходимо использовать на конечной стадии разработки технологического маршрута. Для инженерных расчётов стоит применять аналитическое моделирование с помощью функции распределения Пирсона. Оценка точности моделирования профилей распределения других типов примеси (бор, сурьма, мышьяк и т.д.), применяемых в современных технологических процессах, с использованием аналитических зависимостей была подробно рассмотрена в работах [8, 9].

Стоит обратить особое внимание на то, что, по умолчанию, в САПР Sentaurus TCAD диффузия германия не рассчитывается. Это связано с тем, что диффузия германия в монокристаллическом кремнии наблюдается только в результате длительных высокотемпературных отжига (например, изменение глубины на $d = 0,3$ мкм соответствует отжигу с длительностью $t = 8$ часов при температуре $T = 1100$ °C [10]). Однако для поликристаллического кремния наблюдается существенное ускорение диффузии германия (более чем в 4 раза), что может приводить к появлению значительной ошибки при анализе режимов технологических процессов с поликремниевыми эмиттерами. Для описания диффузии германия в поликремнии целесообразно применять соотношение Аррениуса с предэкспоненциальным множителем $D_0 = 0,026 \pm 0,023 \text{ см}^2/\text{с}$ и энергией активации $E = 2,59 \pm 0,36$ эВ [7].

Еще одной важной особенностью моделирования кремний-германиевых технологических процессов является то, что в присутствии германия наблюдается значительное изменение диффузии вводимой примеси. Для описания распределения примеси необходимо модифицировать коэффициенты диффузии в соответствии с соотношением:

$$D \sim D \cdot \exp\left(-\frac{-0,042 \cdot Q \cdot Ge_{Total}}{k \cdot T \cdot c^*}\right),$$

где D – коэффициент диффузии, соответствующий выбранной модели ($\text{см}^2/\text{с}$); $D \sim$ – модифицированный коэффициент диффузии ($\text{см}^2/\text{с}$); Ge_{Total} – полная концентрация германия (см^{-3}); c^* – концентрация атомов кремния (см^{-3}).

Результаты применения описанной модели на примере диффузии бора подробно описаны в работе [11].

III. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС С ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ ГЕРМАНИЯ

Применение рассмотренных моделей для анализа возможности создания кремний-германиевой базы в рамках комплементарного биполярного технологического процесса с двумя слоями поликремния показало, что изменение характеристик транзисторов наблюдается при достижении мольной доли германия не менее 0,05, что хорошо согласуется с опубликованными данными [12]. Для достижения указанной величины необходимо проводить имплантацию германия с дозой более $500 \text{ мкКл}/\text{см}^2$ и энергией более 80 кэВ. Проводился анализ характеристик комплементарных биполярных транзисторов с применением гидродинамической модели для диапазона изменения дозы $1000 - 3500 \text{ мкКл}/\text{см}^2$. Основные параметры модифицированных кремний-германиевых слоев для модуля анализа электрофизических характеристик SDevice были взяты из работы [13]. Результаты расчётов показали увеличение тока коллектора вплоть до двух раз, однако увеличение дозы более $3000 \text{ мкКл}/\text{см}^2$ приводит к значительному уменьшению напряжения Эрли.

Использование при имплантации германия высоких доз и энергий, помимо увеличения толщины активной базы, приводит к значительному росту концентрации глубоких ловушек в области базы. Согласно литературным данным [14] при имплантации германия в кремний n-типа наблюдается появление двух донорных уровней с энергиями $E = 0,27$ эВ и $E = 0,5$ эВ, а при имплантации в кремний p-типа – один акцепторный уровень $E = 0,27$ эВ. Моделирование с различными концентрациями донорных и акцепторных ловушек в области базы показало, что увеличение концентрации вплоть до величины $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ приводит к снижению значения статического коэффициента усиления и граничной частоты вплоть до 40%. Описанное ухудшение основных параметров транзисторов требует от разработчиков кремний-германиевых технологических процессов точной оптимизации режимов имплантации и отжига или

замены операции имплантации процессами эпитаксиального роста.

Стоит отметить одну специфическую область применения метода ионной имплантации германия. Данный метод можно применять для симметрирования параметров комплементарных биполярных транзисторов без ухудшения основных параметров высокочастотных pnp-транзисторов. При этом использование имплантации в технологическом процессе с последовательным легированием поликремниевых слоев [15] позволит не применять дополнительную операцию фотолитографии. По результатам моделирования имплантации германия с дозой $Q = 3,6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и энергией $E = 200 \text{ кэВ}$ только в область базы pnp-транзистора получено превышение тока коллектора pnp-транзистора над током коллектора npn-транзистора на 16%. Вольт-амперные характеристики рассматриваемых комплементарных биполярных транзисторов приведены на рис. 2.

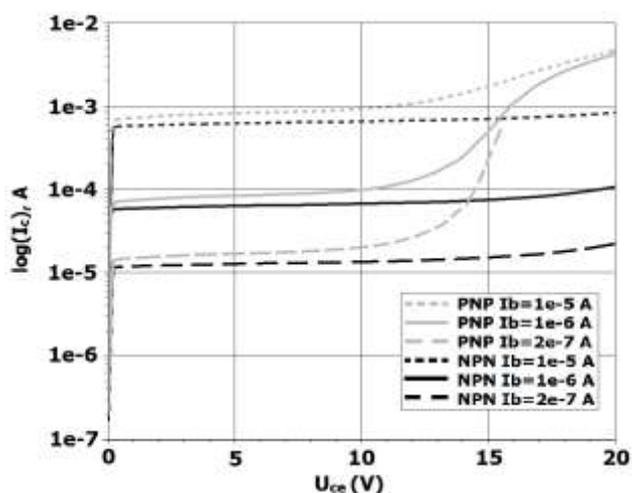


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики комплементарных биполярных транзисторов с имплантацией германия только в область базы pnp-транзистора

IV. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС С ЭПИТАКСИАЛЬНЫМ РОСТОМ ОБЛАСТИ БАЗЫ

Основным преимуществом технологии кремний-германиевых гетеробиполярных транзисторов с эпитаксиальной базой является возможность создания сверхтонкой и бездефектной области базы. Для встраивания процесса эпитаксии базы в конструкции с процессами самосовмещения существует два основных метода: селективный [16] и неселективный эпитаксиальный рост [17].

Оба метода широко применяются современными производителями кремний-германиевых транзисторов (INP, STMicroelectronics, IBM, Jazz Semiconductors и др.). Для сопоставления методов было проведено моделирование технологических процессов, обеспечивающих формирование двух типов транзисторов. Стоит отметить, что моделирование технологических процессов проводилось в модуле

SProcess САПР Sentaurus TCAD, что обусловлено отсутствием возможности в модуле DIOS моделирования эпитаксиального роста не на монокристаллическом кремнии. Модуль SProcess позволяет рассчитывать процесс низкотемпературной эпитаксии, формирующий слой поликристаллического материала на пленках оксида, нитрида кремния и др. Представленная особенность позволяет моделировать селективный процесс эпитаксии и сформировать конструкцию транзистора, наиболее близкую к реальной.

Для сопоставления были выбраны структуры со следующими основными конструктивно-технологическими параметрами: мольная доля германия в базе $x = 0,15$; ширина эмиттерного окна $W_e = 0,24 \text{ мкм}$; ширина коллекторного окна $W_c = 0,5 \text{ мкм}$; технологический режим формирования профиля распределения примеси в области активной базы выбран с целью обеспечения максимально близких значений глубин залегания эмиттерного и коллекторного переходов: $X_{Je} \approx 25 \text{ нм}$ и $X_{Jc} \approx 80 \text{ нм}$, соответственно. Для конструкции с неселективной эпитаксиальной базой применялась как глубокая, так мелкая диэлектрическая изоляция, что соответствует конструкции транзистора компании STMicroelectronics [18]. Моделирование характеристик транзисторов, как и ранее, проводилось с применением гидродинамической модели. Основные результаты расчётов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сопоставление параметров транзисторов с селективной и неселективной областью базы

Параметр	Селективная область базы	Неселективная область базы
h_{21}	104	170
f_T , ГГц	19,9	27
f_{max} , ГГц	214	88
NF_{min} , дБ ($f = 10 \text{ ГГц}$)	0,5	0,65
$U_{КЭ0}$, В	7,5	5
$U_{КБ0}$, В	12	16
$I_{кр}$, мкА/мкм	135	175

По результатам расчетов и сопоставления рассматриваемых конструкций гетеробиполярных транзисторов можно отметить следующие особенности:

- использование глубокой щелевой изоляции позволяет варьировать глубину залегания области коллектора и, соответственно, концентрацию примеси на границе с областью базы в большем диапазоне;

- уменьшение граничной частоты, коэффициента усиления для транзисторов с селективной базой связано с ускорением диффузии примеси бора, что практически отсутствует для конструкции с не селективно выращенной областью базы;

- использование конструкции с селективно выращенной областью базы позволяет сократить сопротивление базы по сравнению с конструкцией с неселективной базой более чем в 2,5 раза. При этом емкость коллекторного перехода для сравниваемых конструкций отличалась незначительно. Таким образом, разница в сопротивлении базы обуславливает разницу в значениях максимальной частоты генерации и минимального коэффициента шума.

Полученные результаты проектирования двух конструктивных вариантов гетеробиполярных транзисторов позволяют сделать простой вывод: выбор технологического маршрута должен быть обусловлен типом изготавливаемых интегральных схем.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении стоит отметить следующие основные полученные результаты:

- для моделирования и оптимизации технологических процессов с применением гетероструктур кремний-германий был представлен ряд моделей, позволяющих добиться точности, достаточной для инженерных расчётов;

- применимость ионной имплантации германия для формирования сверхвысокочастотных транзисторов ограничена, что обусловлено влиянием на толщину области активной базы. Однако такой метод может быть использован для симметрирования параметров комплементарных биполярных транзисторов. Высокая стоимость эпитаксиальных установок сдерживает освоение технологических процессов на территории Российской Федерации, что является несомненным преимуществом технологии ионной имплантации германия;

- технологический процесс изготовления биполярных транзисторов с селективной базой более простой в сравнении с процессом изготовления транзисторов с неселективной областью базы, что упрощает процесс интеграции в БИКМОП технологический процесс. Тем не менее, построение комплементарного биполярного pnp-транзистора существенно затрудняется;

- использование транзисторов с селективно выращенной областью базы предполагает области применения, где важно малое сопротивление базы, в частности, малошумящие усилители;

- для транзисторов с неселективной эпитаксией возможно более точно контролировать толщину активной базы за счёт снижения влияния дефектов на скорость диффузии, что позволяет варьировать произведение $f_T \times U_{KЭ0}$ в большем диапазоне.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] G. Avenier et al. 0.13 um SiGe BiCMOS Technology Fully Dedicated to mm-Wave Applications // IEEE Journal of solid-state circuits. 2009. Vol. 44. № 9. P. 2312–2321.
- [2] B. Heinemann et al. A Complementary BiCMOS Technology with High Speed npn and pnp SiGe:C HBTs // IEDM '03 Technical Digest. IEEE International. 2003. P. 5.2.1-5.2.4.
- [3] Sentaurus TCAD, Version H-2013.03. April 2013.
- [4] Silvaco International, ATLAS User's Manual. 2008.
- [5] S. Lombardo et al. Si/GexSil-x Heterojunction Bipolar Transistors with the GexSil-x Base Formed by Ge Ion Implantation in Si // IEEE Electron Device Letters. 1996. Vol. 17. № 10. P. 485-487.
- [6] K.C. Liu et al. A Deep Submicron Si1-xGex/Si Vertical PMOSFET Fabricated by Ge Ion Implantation // IEEE Electron Device Letters. 1998. Vol. 19. № 1. P. 13–15.
- [7] Mitchell M.J., Ashburn P., Hemment P.L.F. Germanium diffusion in polysilicon emitters of SiGe heterojunction bipolar transistors fabricated by germanium implantation // Journal of Applied Physics. 2002. V. 92. № 11. P. 6924–6926.
- [8] Виноградов Р.Н., Дроздов Д.Г., Корнеев С.В., Савченко Е.М. Выбор оптимального маршрута моделирования диффузионных процессов с использованием САПР TCAD // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы. 2009. № 1. С. 65–72.
- [9] Дроздов Д.Г., Савченко Е.М., Сиомко В.О. Особенности расчёта приборов на основе гетероструктур AlGaIn/GaN в САПР приборно-технологического моделирования // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем - 2012. Сб. трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2012. С. 213-216.
- [10] M. Ogino et al. The Diffusion Coefficient of Germanium in Silicon // Physica status solidi (a). 1982. V. 72. P. 535-541.
- [11] R. Kinder, F. Schwierz, P. Beno, J. Gebner. Simulation of boron diffusion in Si and strained SiGe layers // Microelectronics Journal. 2007. Vol. 38. P. 576-582.
- [12] J.D. Cressler and G. Niu. Silicon-Germanium Heterojunction Bipolar Transistors // Boston, MA: Artech House. 2003.
- [13] A. Quiroga, F. Aniel, C. Tavernier, N. Zerounian, H. Jaouen. TCAD Simulation for Advanced Terahertz SiGeC HBTs. // 2012 International Conference on Solid-State and Integrated Circuit (ICSIC 2012). 2012. Vol. 32. P. 7-12.
- [14] Schulz M. Deep trap levels of ion-implanted germanium in silicon measured by Schottky contact techniques // Appl. Phys. Lett. 1973. Vol. 23. № 1.
- [15] Дроздов Д.Г., Зубков А.М., Савченко Е.М. Результаты приборно-технологического моделирования комплементарной биполярной технологии с граничной частотой 10 ГГц и более // Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем – 2010. Сб. трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2010. С. 66-69.
- [16] Harame D.L., Comfort J.H., Cressler J.D., Crabb'e E.F., Sun J.Y.-C., Meyerson B.S., Tice T. Si/SiGe epitaxial base transistors- part II: process integration and analog applications // IEEE Trans. Electron. Devices. 1995. Vol. 42. P. 469.
- [17] F. Sato, T. Hashimoto, T. Tatsumi, T. Tashiro. Sub-20 ps ECL circuits with high performance super self-aligned selectively grown SiGe base bipolar transistors // IEEE Trans. Electron. Devices. 1995. Vol. 42. P. 483.
- [18] A. Monroy, M. Laurens, M. Marty, D. Dutartre, D. Gloria, J.L. Carbonero, A. Perrotin, M. Roche, A. Chantre. BiCMOS6G: a high performance 0.35 um SiGe BiCMOS technology for wireless applications // Proceedings IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. Minneapolis. 1999. P. 121-124.