

СВЧ-самосовмещенные структуры с прямыми и обращенными ультратонкими эмиттерными областями

В.Д. Вернер, Н.М. Луканов, А.Н. Сауров

НПК «Технологический центр» (г. Москва)

Проведена оптимизация конструкции и технологии биполярных СВЧ-самосовмещенных транзисторных структур с прямыми и обращенными ультратонкими эмиттерными областями. Показано, что граничная частота усиления и максимальная частота генерации, равные 500 ГГц, достигаются при использовании самоспряженных псевдолитографических масок и уменьшении паразитных емкостей и сопротивлений. Даны методы создания прямых и обращенных предельно узких эмиттерных областей, легированных As.

Ключевые слова: СВЧ-самосовмещенные транзисторные структуры 500 ГГц, прямые и обращенные эмиттерные области, методы создания ультратонких слоев, диффузия As в вакууме, новые псевдолитографические маски.

В настоящее время проблема создания совмещенных структур на кремнии с прямыми и обращенными эмиттерными областями, легированными мышьяком, актуальна в связи с возникшей потребностью в СВЧ ИС с рабочими частотами 10–100 ГГц с активными фазированными антенными решетками на поверхности кристалла. При верхнем расположении коллекторных областей достигается существенное уменьшение емкостей база–коллектор $C_{БК}$ и появляются новые возможности создания таких областей с малой плотностью дефектов и с высокими напряжениями пробоя. Большая протяженность областей структур приводит к избыточному накоплению неосновных носителей заряда, что уменьшает значения граничной частоты усиления f_T и максимальной частоты генерации f_{max} . Развитие методов точной локализации структур частично решает эту проблему. Разработка тонких и ультратонких прямых и обращенных транзисторных структур на кремнии проводилась с использованием отечественной эпитаксиальной технологии боковой диэлектрической изоляции (БДИ) с селективным эпитаксиальным ростом Si(As) [1] и процессов легирования мышьяка в вакууме с последующим отжигом в водороде [2–4]. Особый случай представляли трехмерные самоформируемые транзисторные структуры с плоскими и узкими эмиттерными областями и селективно осажденными вольфрамовыми контактами к ним [5–8]. В последние годы усилился интерес к трехмерным самоформируемым транзисторным структурам с нанометровыми размерами элементов [9,10]. В работе [11] исследовались СВЧ транзисторные структуры при верхнем расположении коллекторных областей и заземлении плоских обращенных эмиттерных областей снизу сплошным слоем силицида металла. Эти структуры созданы на КНИ-пластинах кремния с использованием ультратонких ($w_{a,б}=10$ нм) слоев

активной базы (SiGe:B:C) и имеют значения $f_T \approx 95$ ГГц и $f_{\max} \approx 210$ ГГц при толщине слоя кремния для активной эмиттерной области 250 нм, ширине эмиттерных окон $w_{э,0} = 500$ нм и длине $L_{э,0} = 1$ мкм. Эмиттерные области окружены слоем термического SiO₂ ($h_{ЭБ} = 100$ нм), который является боковой диэлектрической изоляцией эмиттерных переходов (БДИЭ), и слоем поликремния Si^{*}(В), легированного бором. Эти слои могут генерировать остаточные механические напряжения σ в эмиттерные области.

Конструктивные особенности СВЧ-структур. В настоящей работе рассматриваются единичные СВЧ-самосовмещенные транзисторные структуры (ССТС) с длиной эмиттерной области $L_{э,01} = 1$ мкм и минимальной шириной эмиттерных окон $w_{э,01} = 50$ нм, полностью самоформируемые в объеме тонких пластин кремния без применения типовых скрытых слоев. При $h_{ЭБ} = 50$ нм, ширине контактов к базе $h_{БК} = 100$ нм ССТС имеют площадь эмиттерного окна $A_{э,01} = 0,05$ мкм², площадь окна коллектор–база $A_{КБ1} = 0,455$ мкм². Толщина слаболегированных (10^{18} атом·см⁻³) эмиттерных и коллекторных областей, примыкающих к активным областям базы, соответственно $W_э = 10$ нм, $W_К = 20$ нм. Элементарные ССТС проектировались для достижения значений параметров $f_T = f_{\max} = 500$ ГГц ($r_{Б1} \cdot C_{КБ1} = 79,8$ Ом·фФ, эффективное сопротивление базы $r_{Б1} = 43,85$ Ом, внутреннее сопротивление базы $r_{Бi} = 25$ Ом при $w_{а,б} = 10$ нм, $\rho_{s \text{ а.б}} = 6000$ Ом/□, емкость $C_{КБ1} = 1,82$ фФ при $C_{КБi} = 4$ фФ·мкм⁻²). Прямые и обращенные эмиттерные области создавались на основе слоев, легированных мышьяком с отжигом в водороде. Селективно осажденные электроды из вольфрама (с подслоем титана) имели контактное сопротивление $\rho_{КЭ} \leq 2$ Ом·мкм². Эффективное сопротивление эмиттерных областей определялось поверхностным сопротивлением диффузионных слоев ρ_s , результирующей площадью эмиттера $A_э$ и было критично к плотности и типу структурных дефектов, толщине остаточного матричного окисла и величине $\rho_{КЭ}$. Для создания точно локализованных критичных коллекторных и эмиттерных областей использовался принцип самосопряжения верхних псевдолитографических масок (ПЛМВ) и нижних (ПЛМН) при последовательной трансформации структурных слоев (относительно исходного верхнего опорного контура и рельефа самоформирования), обеспечивающей оптимальную конфигурацию и параметры критичных областей. Такие ССТС должны иметь специфические профили легирования с предельно допустимыми резкими градиентами ионизированной концентрации [As⁺], характеризующиеся минимальными значениями ρ_s и минимальным уровнем структурных дефектов. Эти требования обеспечиваются при применении специальных методов контролируемой диффузии мышьяка в вакууме при использовании гомогенного источника диффузанта, полученного при проведении газотранспортных реакций с использованием исходных сверхчистых материалов (Si, As, J₂) [2, 3, 4]. На рис.1 приведены конструкции единичных ССТС с $L_{э,01} = 1$ мкм.

Локальные области коллектора, выполненные из поликремния Si^{*}, легированного фосфором, контактные пассивные области базы (Б_к), соединительные области базы (Б_с) и активные области базы (Б_а) точно локализуются за счет использования временной исходной верхней псевдолитографической маски толщиной 150 нм из Si₃N₄ [10] (см. рис.1,б). Селективное вытравливание канавок проводится с обратной стороны пластин кремния до донных частей областей БДИ и областей эмиттер–мышьяк. Создание обращенных областей эмиттера достигается за счет применения спейсерных областей (СП) из пиролитического SiO₂, Si₃N₄ или поликремния. Точно локализованные спейсерные области образуют каркас для создания нижней псевдолитографической маски толщиной 50–100 нм из фоторезиста или селективно осажденного барьерного металла (W, Ni). После травливания спейсерных областей самосовмещенная маска позволяет уменьшить ширину эмиттерных

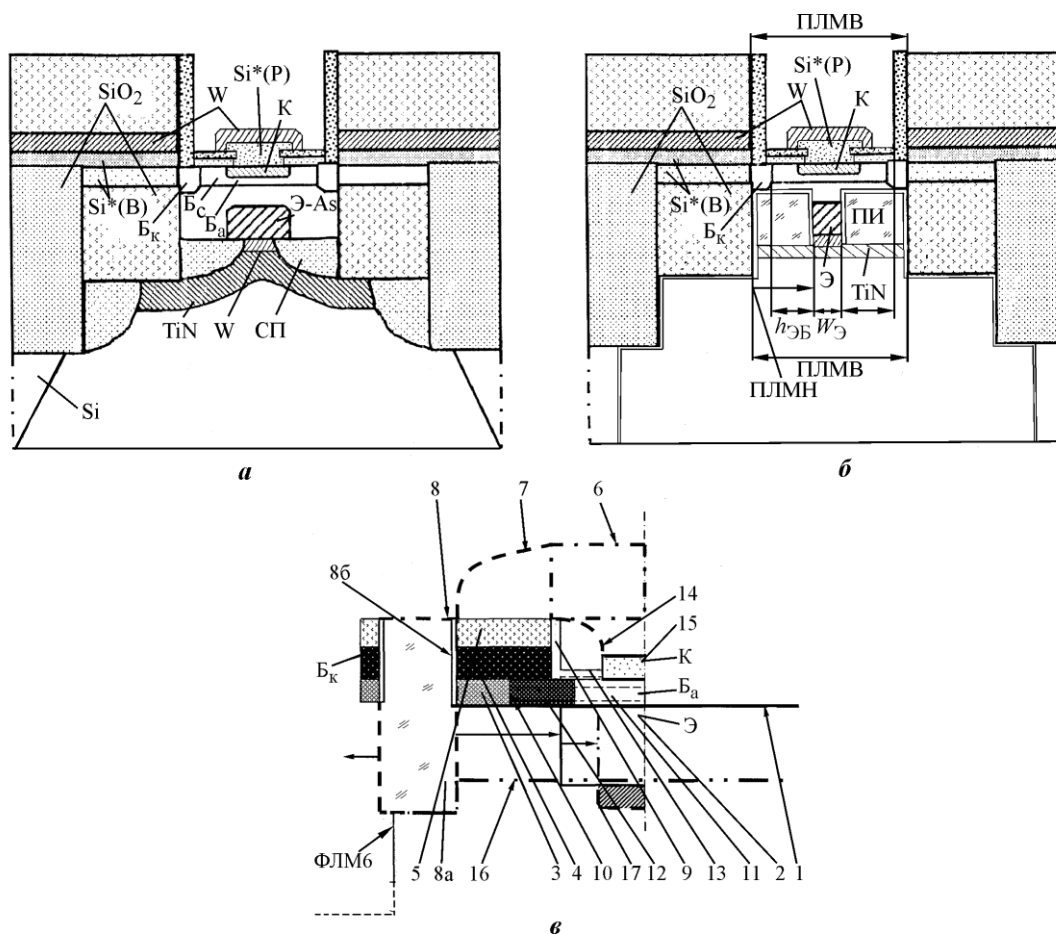


Рис.1. Конструкции ССТС с обращенными областями эмиттера: *а* – с расширенной диффузионной областью эмиттера и паразитными торцевыми участками; *б* – с узкой самосовмещенной областью эмиттера и комбинированными областями БДИЭ на основе тонких слоев термического $\text{SiO}_2 - \text{SiN}_x$ (Al_2O_3 , AlN) и пленки полиимида; *в* – с узкой эмиттерной областью и селективными составными базовыми областями

областей с помощью анизотропного реактивно-ионного травления (АРИТ) и/или химического травления. Таким образом достигается сопряжение и точная локализация ПЛМВ с ПЛМН. Их использование обеспечивает также создание трехмерных ССТС с каналами для локального принудительного охлаждения активных областей. Уменьшение теплового сопротивления ССТС достигается путем частичного удаления полиимида и мелких областей БДИ вокруг боковых участков эмиттера и расширения областей металла TiN . В каналах могут быть применены сверхпроводящие слои. В простейшем случае области каналов заполняются электрохимически осажденным слоем золота или меди.

На рис.1,в приведен схематично конструктивный вариант ССТС с применением различных псевдолитографических масок в сочетании с некритичной фотолитографической маской (ФЛМ) и процессов селективной эпитаксии базовых и коллекторных областей. Уменьшение ширины эмиттера может проводиться как сверху через вертикальные щели, так и с обратной стороны пластины кремния.

Приведем последовательность процесса переноса рисунка верхней псевдолитографической маски.

1. На исходной поверхности 1 тонких пластин p -Si диффузией мышьяка в вакууме формируют тонкий слой 2 эмиттера и осаждают конструктивные слои 3 термического SiO_2 толщиной 40 нм, слои 4 $\text{Si}^*(\text{B})$ толщиной 100 нм и 5 пиролитического SiO_2 толщиной 150 нм для последующего создания локальных областей базы.

2. По технологии, описанной в [10], формируют опорный временный слой пироли- тического SiO_2 (на рисунке не показан) с вертикальными стенками и спейсерный слой 6 из Si_3N_4 с вертикальными стенками для создания исходной ПЛМ1, на стенках которой самоформируются составные области 7 ПЛМ2 с нижним подслоем металла (на рисунке не показан) и временным защитным спейсерным слоем 7 из Si^* .

3. Проводят АРИТ канавок 8 и заполняют их германо-силикатным стеклом 8а.

4. После селективного удаления ПЛМ1 вытравливают с помощью АРИТ слои 5 и 4 до пленки 3, самоформируют вертикальные области 9 (Si_3N_4), селективно вытравливают горизонтальные щели в слое 3 до уровня 10 и проводят селективный эпитаксиаль- ный рост составных базовых областей 11 на основе ($n\text{-Si}$) – (SiGe:B:C) – ($n\text{-Si}$).

5. При быстром отжиге ССТС самоформируют из слоя 4 Si^* (В) диффузией бора со- единительные области 12 p^+ -базы.

6. Для изготовления коллекторных областей создают пассивирующий слой терми- ческого SiO_2 , маскирующий слой 13 Si_3N_4 и ПЛМ3 на основе спейсерного слоя 14 из Si^* и проводят вскрытие коллекторных окон.

7. Коллекторные области 15 самоформируют методом селективной эпитаксии.

8. Используя ФЛМ, с обратной стороны ССТС вытравливают в кремнии с помо- щью АРИТ полости 16 и маскируют их пленкой Si_3N_4 .

9. Области 15 защищают фоторезистом, проводят частичное вытравливание стекла 8а и формируют вертикальную маску ПЛМ4 на основе пленки 8б Si_3N_4 для защиты торцевых участков областей базы 3–5.

10. Вытравливают стекло 8а, утоняют (показано стрелками) горизонтальные обла- сти эмиттера, заполняют полости стеклом и формируют области 17 металлизации.

Элементарные транзисторные структуры могут быть соединены в параллельные секции, образуя силовые ключи с различной шириной эмиттерных областей, подве- шенные на металлические (или металлоуглеродные) балки.

Результаты моделирования эмиттерных областей структур. Результаты чис- ленного решения краевой задачи по расчету распределений нормированных к поверх- ности значений общей концентрации мышьяка показаны на рис. 2. В уточненной моде- ли диффузии мышьяка учитывали не только влияние внутреннего электрического поля, изменения равновесной концентрации вакансий и механизма комплексообразования нейтральных вакансий с двумя нейтральными атомами мышьяка [3], но и эксперимен- тальные зависимости $[\text{As}^+] = f_1[\text{As}]$ и квадрата собственной концентрации носителей

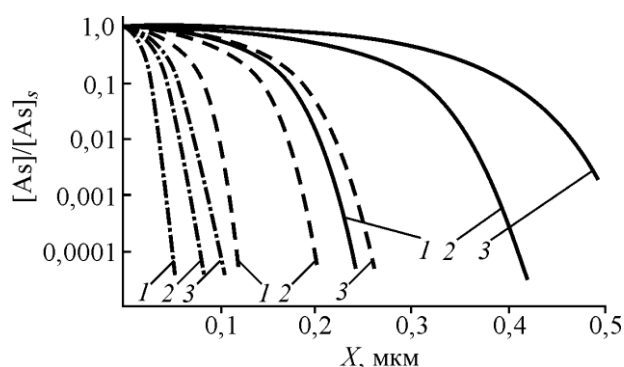


Рис.2. Расчетные распределения нормированных к поверхности значений общей концентрации мышьяка $[\text{As}]/[\text{As}]_s$ по глубине диффузионных слоев для разного времени диффузии и температуры: 1 – 12 мин; 2 – 36 мин; 3 – 60 мин; \cdots 900 °C, $D_i = 5,39 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2/\text{с}$; $\cdots\cdots$ 950 °C, $D_i = 2,6 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2/\text{с}$; — 1000 °C, $D_i = 1,17 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с}$

заряда $n_i^{*2} = f_2[\text{As}^+]$. Минимальная толщина эмиттерных областей составила 50 нм ($\rho_s = 360 \text{ Ом}/\square$). При создании реальных ССТС могут быть использованы более толстые слои с меньшими значениями ρ_s и с последующим их утонением с помощью АРИТ.

В таблице приведены расчетные и экспериментальные зависимости ρ_s диффузионных слоев от времени диффузии t при различных температурах диффузии T . Видно, что при $T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдается очень хорошее соответствие между расчетными и экспериментальными данными.

Расчетные и экспериментальные зависимости ρ_s (Ом/□) диффузионных слоев от времени диффузии при различных температурах

Время диффузии, мин	Температура диффузии, °C			
	900	950	1000	1000
	Расчет			Эксперимент
10	360	110,75	49,4	50
20	250	82,6	35,4	36
30	200	66,6	27,4	29,5
40	175	57,3	24,	25,5
50	150	50,6	21,7	22,3
60	140	46,6	20,0	21,0

Формирование ультратонких транзисторных структур с плоским эмиттером. Анализ и оптимизация ССТС проводились по совокупности электрических параметров, измеряемых на специальных тестовых «меза»-структурах с внутренним скрытым контактом к активным областям базы, с учетом выявленных специфических структурных дефектов в приповерхностном слое Si [5]. Последние оказывают сильное влияние на токи утечки ультратонких плоских «меза»-переходов и величину $r_{кэ}$. Коэффициент передачи эмиттерного тока $h_{21Э}$ в таких структурах определяется эффективностью эмиттера и прямо зависит от характеристик легирования, токов утечки и значений σ в областях БДИЭ. При концентрации $[\text{As}]_s \approx 10^{21} \text{ см}^{-3}$ наблюдается эрозия поверхности. При концентрации $[\text{As}]_s \approx 8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ наблюдаются отдельные преципитаты. При $[\text{As}]_s \approx 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ можно получить поверхность Si практически без дефектов.

С уменьшением ширины эмиттерных областей все большее влияние на ВАХ транзисторных структур начинают оказывать дефекты в эмиттерной области, внутренние напряжения σ и заряд Q , вносимые областями БДИЭ. Токи утечки переходов эмиттер–база $I_{ЭБ}$ более 10^{-12} А ($U_{ЭБ} \leq 0,4 \text{ В}$) наблюдались при термическом окислении эмиттерных областей. При толщине SiO_2 равной 20 нм и толщине SiN_x равной 30 нм ток утечки $I_{ЭБ}$ прямо зависит от $[\text{As}]_s$ и плотности структурных дефектов. При оптимальном легировании и при контролируемом химическом дотравливании эмиттерных областей с торцевых участков ток утечки $I_{ЭБ}$ был меньше 10^{-12} А при пассивации поверхности эмиттерных областей тонким слоем $\text{SiO}_{2Т}$ в сочетании с пленками SiN_x (Al_2O_3 , AlN) и слоем полиимида (ПИ). При создании канавок для БДИЭ в качестве индикатора окончания процесса выступают легированные бором области контактной базы.

На рис.3 приведены расчетные зависимости равновесной концентрации дырок p_0 и квадрата собственной концентрации носителей заряда $n_i^{*2} = p_0 n_0$ в функции от активной концентрации донорной примеси $N_D^+ = [\text{As}^+] = n_0$ для различных подгоночных зависимостей эффективной плотности состояний N_C^* (N_D^+). При уровне легирования активной области базы $N_{a.6} \approx 10^{18} \text{ атом}/\text{см}^3$ наилучшее совпадение измеренного значения коэф-

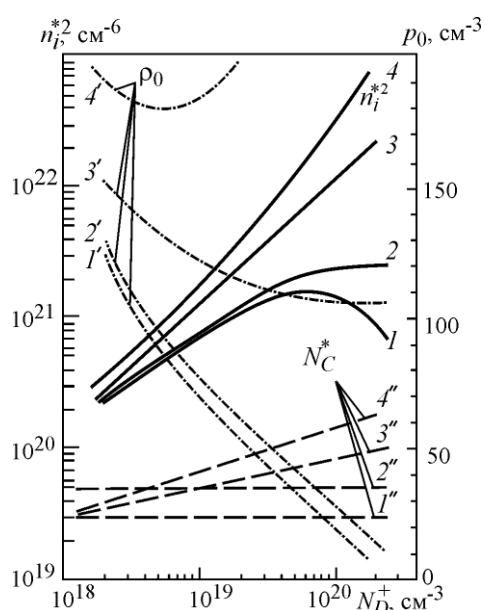


Рис.3. Расчетные зависимости физических параметров эмиттера от уровня легирования: $n_i^{*2}(N_D^+)$ – кривые 1–4; $\rho_0(N_D^+)$ – кривые 1'–4'; $N_C^*(N_D^+)$ – кривые 1''–4''

фициента усиления потоку $h_{21Э}$ транзисторной структуры с расчетным значением наблюдалось для зависимости n_i^{*2} (см. рис.3 кривая 3), которая соответствует зависимости для $N_C^*(N_D^+)$ (см. рис.3 кривая 3'').

Таким образом, показана принципиальная возможность создания полностью самоформируемых СВЧ-транзисторных структур на тонких пластинах чистого кремния с расчетными значениями $f_T = f_{max} = 500$ ГГц для прямых и обращенных узких и точно локализованных плоских эмиттерных областей ($L_{э,01}=1$ мкм, $w_{э,01}=50$ нм) с селективно осажденными вольфрамовыми электродами. Для реализации коллекторных и эмиттерных областей элементарных структур использовался принцип самоспряжения верхних и обращенных (нижних) псевдолитографических масок при последовательной трансформации структурных слоев (относительно исходного верхнего

опорного контура и рельефа самоформирования), обеспечивающей оптимальную конфигурацию и параметры критических областей. Элементарные транзисторные структуры могут быть соединены в параллельные секции, образуя силовые ключи, подвешенные на металлические (или металлоуглеродные) балки. При создании в вакууме ультратонких низкоомных эмиттерных областей, легированных мышьяком, выявлены условия генерации специфических структурных дефектов и их влияние на ВАХ структур с плоским «меза»-эмиттером.

Полученные результаты могут быть полезны при разработке новых методов легирования и селективного роста материалов для создания СВЧ-ультратонких самоформируемых транзисторных структур. В частности, перспективным является процесс формирования коллекторных селективных областей с высоким напряжением пробоя на основе GaP [12] на установках ультравысокого вакуума и молекулярно-лучевой эпитаксии в вакууме при газофазном осаждении слоев.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007 – 2013 годы» с использованием оборудования ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база Национального исследовательского университета «МИЭТ» (ГК № 16.552.11.7061).

Литература

1. Способ изготовления активных элементов ИС / Н.М. Луканов, В.В. Лебедев, Е.Н. Любушкин и др. // А.с. № 439863 СССР, МКИ Н 01L19/00. – Опубл. 1974.
2. Метод улучшения параметров совмещенных структур / Н.М. Луканов, О.Н. Лапинов, В.А. Марсанов и др. // Полупроводниковые приборы и ИС: сб. науч. тр. по проблемам микроэлектроники. – М.: МИЭТ, 1976. – Вып. 27. – С. 33–39.

3. Агафонцев В.Ф., Лапишинов О.Н., Луканов Н.М. Расчет диффузионного профиля мышьяка в кремнии // Полупроводниковые приборы и ИС: сб. науч. тр. по проблемам микроэлектроники. – М.: МИЭТ, 1976. – Вып. 27. – С. 15–22.
4. Лапишинов О.Н., Луканов Н.М. Мышьяковистый эмиттер // Полупроводниковые приборы и ИС: сб. науч. тр. по проблемам микроэлектроники. – М.: МИЭТ, 1976. – Вып. 27. – С. 23–32.
5. Луканов Н.М. Методика измерения и расчета коэффициента передачи эмиттерного тока, ограниченного эффективностью эмиттера // Проектирование и применение полупроводниковых интегральных схем и полупроводниковых запоминающих устройств: сб. науч. тр. по проблемам микроэлектроники. – М.: МИЭТ, 1978. – Вып. 40. – С. 141–161.
6. Луканов Н.М. Способ изготовления транзисторных структур // А.с. № 749287 СССР. – Оpubл. 1980.
7. Луканова Н.Н., Луканов Н.М. Конструктивно-топологическое проектирование самосовмещающихся субмикронных сверхтонкослойных транзисторных структур с улучшенными параметрами // Физика, технология и схемотехника СБИС: сб. науч. тр. - М.: МИЭТ, 1989. – С. 80–93.
8. Lukanov N.M. Bipolar VLSI based on self-aligned transistor structures // Electronic Engineering. Ser. Microelectronics. – 1991. – Is. 1 (1). News from Soviet «Silicon Valley». – 1991. – P. 54–55.
9. Вернер В.Д., Луканов Н.М., Сауров А.Н., Метельков П.В. Оптимизация СВЧ самосовмещенных транзисторных структур на чистом кремнии и малошумящего широкополосного усилителя для радиопередающих ИС с элементами МЭМС // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2011. – Ч. 1. – № 1. – С. 78–84; Ч. 2. – № 2. – С. 20–27; Ч. 3. – № 3. – С. 11–20.
10. Вернер В.Д., Луканов Н.М., Сауров А.Н. Принципы конструирования биполярных СВЧ структур с предельно узкими эмиттерными областями // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – 12(137). – С. 13–16.
11. Joodaki M., Hillmer H. A collector-up SiGe-HBT for high frequency application // German Microwave Conference – GeMIC 2006. (Universität Karlsruhe (TH), March 28–30. – 2006 / Session 11a). – 2006.
12. GaP collector development for SiGe heterojunction bipolar transistor performance increase: A heterostructure growth study / O. Skibitzki, F. Hatami, Y. Yamamoto et al. // J. of Applied Physics. – 2012. – Vol. 111. – P. 1–9.

Статья поступила
11 ноября 2012 г.

Вернер Виталий Дмитриевич – доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, председатель научно-технического совета НПК «Технологический центр» (г. Москва). *Область научных интересов:* физика и технология полупроводниковых приборов и интегральных схем, процессы ионного легирования в полупроводниках, микросистемная техника.

Луканов Николай Михайлович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник НПК «Технологический центр» (г. Москва). *Область научных интересов:* физика и технология полупроводниковых приборов и ИС, СВЧ-структуры, методы самосовмещения, самоформирования и точной локализации элементов, псевдолитографические маски, принципы целенаправленного формо- и структурообразования. **E-mail:** N.Loukanov@tcen.ru

Сауров Александр Николаевич – член-корреспондент РАН, директор НПК «Технологический центр» (г. Москва). *Область научных интересов:* проектирование и технология интегральных микросхем и интегральной микросистемной техники, разработка методов самосовмещения и самоформирования, материалы и технологии наноэлектроники, МЭМС и НЭМС.