

**Конструктивно-технологический базис
на основе полностью самосовмещенных структур
для терагерцовых БИС**

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

НПК «Технологический центр» (г. Москва)

**Constructive and Technological Schemes on the Basis of
Completely Self-Combined Structures for Terahertz ULIC**

V.D. Verner, N.M. Lukanov, A.N. Saurov

SMC «Technological center», Moscow

Приведены конструктивно-технологические схемы самоформирования полностью самосовмещенных вертикально интегрированных транзисторных структур с обращенными и прямыми эмиттерами для терагерцовых БИС. Точное позиционирование элементов с нанометровыми размерами на поверхности и на определенной глубине пластины кремния достигнуто за счет применения самосопряженных и составных псевдолитографических масок. Рассмотрены критичные узлы в конструкции и технологии изготовления структур с узкими и плоскими эмиттерными областями и с обращенным профилем легирования мышьяком на поверхности.

Ключевые слова: терагерцовые БИС; конструктивно-технологические схемы; вертикально интегрированные транзисторные структуры; обращенные ультратонкие и плоские эмиттерные области; обращенные профили легирования As; самосопряженные псевдолитографические и составные маски.

The constructive and technological schemes of self-formation of completely self-combined vertically integrated transistor structures for ULIC have been presented. The exact positioning of the elements with nanometer sizes on a surface and at a certain depth of a silicon plate has been achieved due to the application of the self-conjugate pseudo lithographic composite masks. The critical places in the design and manufacturing techniques of the structures with the narrow and turned ultrathin emitter areas have been considered.

Key words: a terahertz ULIC, the constructive and technological schemes, the vertically integrated transistor structures, the turned ultrathin narrow and flat emitter areas, the turned As alloying profiles on a surface, annealing in hydrogen, self-conjugate pseudo-lithographic and compound masks.

Исследования свойств полупроводниковых трехмерных самосовмещенных структур, самоформируемых на основе диффузионных или эпитаксиальных слоев с нанометровыми размерами (СНР), являются актуальными для создания ИС и специализированных устройств различного применения при освоении терагерцового диапазона частот (0,3–30 ТГц). Одно из направлений исследования – создание биполярных СВЧ самосовмещенных транзисторных структур (БССТС) на кремнии (Si) с максимальной частотой генерации $f_{\max} = 0,5 - 1,5$ ТГц [1, 2]. В работе [2] детально рассмотрены результаты математического моделирования конструкции БССТС с селективно выращенными областями базы на основе сплава SiGe-B-C при нижнем расположении областей коллектора, но с уменьшенной их геометрией и при верхнем расположении узких эмиттерных областей из поликремния Si* (P), легированного фосфором (P). Определенный интерес представляют структуры с узкими и плоскими эмиттерными областями (УПЭО), легированными мышьяком (As) или P [3]. Такие структуры не имеют паразитных горизонтальных участков ультратонких переходов эмиттер–база под маскирующим слоем диэлектрика, так как они примыкают к вертикальным областям боковой диэлектрической изоляции эмиттерных переходов. В сочетании с верхним расположением областей коллектора они позволяют существенно уменьшить паразитные емкости переходов, что принципиально важно для терагерцовых БИС.

В работе [3] обсуждаются проблемы, возникающие при легировании УПЭО As, связанные как с селективной эпитаксией базовых областей, так и с большими токами утечки переходов эмиттер–база при диффузии As с высокой концентрацией. Вторая проблема была частично решена при легировании плоских эмиттерных областей ионами P⁺. Известен отечественный вариант БССТС с УПЭО (при наличии токового зеркала для электронов из УПЭО) [4] на основе поликремния Si* (As), легированного As, в условиях управляемого введения примеси в вакууме [5]). В работе [6] предлагается использовать составные симметричные биполярные КНИ-структуры на пленке Si толщиной 20 нм с СНР. При математическом моделировании и в результате эксперимента получены значения $f_{\max} = 1,2$ ТГц и граничной частоты усиления по току $f_T = 0,6$ ТГц при ширине областей базы 25 нм. В этом проекте отсутствует информация о технологии формирования таких планарных структур при наличии «критичной» (дефектной) области в тонкой пленке Si на границе с диэлектрическим слоем.

В работе [7] приведена конструкция БССТС с применением диффузионных СНР

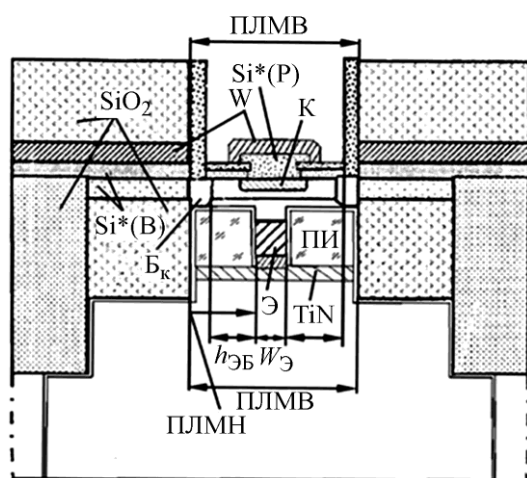


Рис. 1. Конструктивные особенности БССТС на Si [7]

(30–50 нм), легированных As. Использовались структуры с обращенными эмиттерными областями на основе УПЭО. Вертикальная интеграция достигалась в объеме монокристаллического Si (рис.1). Рассмотрен частный случай при $f_T = f_{\max} = 0,5$ ТГц. Точное самосовмещение элементов структуры обеспечивалось при самосопряжении (самосогласовании) верхних и нижних псевдолитографических масок (ПЛМВ, ПЛМН) путем последовательной самотрансформации структурных слоев относительно исходного верхнего опорного контура и одной вертикальной плоскости самоформирования [8, 9].

При реализации таких БССТС возникает ряд проблем. Первая проблема связана с вы-

бором метода высокоточного и быстрого легирования As УПЭО с диффузионными СНР. Вторая проблема – выбор оптимального соотношения доли активированных и неактивированных атомов мышьяка, обеспечивающего максимально возможный градиент концентрации примеси в области ультратонких эмиттерных n^+ - p -переходов и допустимые уровни дефектности структур и токов утечки переходов. Третья проблема – особенность анизотропного реактивно-ионного травления (АРИТ) узких канавок различной глубины [10, 11] и АРИТ областей УПЭО, сильно и неоднородно легированных As. Четвертая проблема обусловлена выбором результирующей конструкции БССТС, сводящей к минимуму влияние перечисленных факторов.

В настоящей работе проведено исследование критичных узлов в конструкции и технологии самоформирования терагерцевых БССТС с расчетными параметрами $f_T = 1,2$ ТГц и $f_{max} = 1,5$ ТГц. В качестве исходного рабочего варианта выбрана структура, показанная на рис.1. Для ее оптимизации введены новые конструктивные решения. Так, ПЛМВ выполнена в виде вертикальной составной структуры, самоформируемой относительно центральной части (из пиролитического диоксида кремния SiO_2), задающей положение и параметры БССТС. Наружная часть, выполненная из нитрида кремния, использовалась для точной локализации узких контактных областей (B_K) к пассивным участкам базы. Для формирования сквозных отверстий в подложке и фигур совмещения на ее нижней стороне, а также областей боковой диэлектрической изоляции использовались вертикальные щели различной глубины. Области боковой диэлектрической изоляции, имеющие меньшую глубину, создавались вокруг областей ПЛМВ при самоформировании вокруг них пленки термического диоксида кремния SiO_2 , необходимой для эффективного уменьшения скорости АРИТ. Расположенные снизу и точно локализованные относительно ПЛМН эмиттерные области, шириной $W_3 = 25...50$ нм, самоформируются с обратной стороны пластины. Они имеют обращенный профиль легирования As, параметры которого могут варьироваться путем быстрого отжига As в атмосфере H_2 . Кроме того, эффективность таких эмиттерных областей можно менять, изменяя параметры пассивирующих, маскирующих и защитных слоев. Последние сделаны на основе полиимида. Эта структура позволяет повысить эффективность принудительного охлаждения узких эмиттерных областей путем локального вытравливания защитных слоев полиимида, что позволит повысить уровень легирования коллекторных областей и плотность тока коллектора при одновременном уменьшении емкости и коллекторного сопротивления.

Для сравнительного анализа структур использовалась система параметров, приведенных в работе [2]. Минимальная толщина и ширина УПЭО с обращенным профилем легирования As составляет 25 нм, длина УПЭО – 300 нм, его минимальное контактное сопротивление – $0,2 \text{ Ом} \cdot \text{мкм}^2$, толщина области активной базы – 10 нм, поверхностное сопротивление активной базы $\rho_s = 3000...6000 \text{ Ом}/\square$). Максимальное значение концентрации бора в активной области базы составляет $2 \cdot 10^{20} \text{ атом}/\text{см}^3$.

Оборудование и методика проведения эксперимента. Малый разброс по толщине (не более $\pm 3\%$) выбранных конструктивных структурных слоев пиролитического SiO_2 и Si_3N_4 для ПЛМВ достигался при их осаждении в вакуумированном объеме реактора с контролируемым малым натеканием реагентов. При этом обеспечивалась хорошая согласованность и по внутренним механическим напряжениям $\sigma_{x,y,z}$. ДСНР для УПЭО, использованные в работе, должны иметь специфические профили легирования с максимально резкими градиентами концентрации ионизированной примеси N^+_{As} по глубине при минимальном значении поверхностного сопротивления ρ_{s_0} , минимальных уровнях структурных дефектов и токов утечки переходов. Оптимальное соотношение

этих параметров достигается при выборе определенного соотношения доли общей концентрации атомов N_{As} и концентрации ионизированной N_{As}^+ в ДСНР. Это соотношение существенно зависит от общей концентрации примеси $[As]$ в объеме реактора. Величина N_{As} оценивалась по ВИМС-профилям, величина N_{As}^+ – по изменению проводимости диффузионных СНР при анодном утонении слоев по методике [5]. При этом воспроизводимое изменение обращенного профиля легирования с сохранением резкого градиента N_{As}^+ в приповерхностной области кремниевой подложки обеспечивалось при быстрым высокотемпературном (1000–1100 °С) отжиге в водороде.

Воспроизводимые результаты по ρ_{s3} получают при применении способа диффузии As в вакууме из гомогенного источника поликремния $Si^*(As)$, легированного мышьяком, предварительно осажденного методом газотранспортных реакций в двухзонной печи с использованием сверхчистых реагентов Si–As–J₂. Известно, что величина эффективного коэффициента диффузии мышьяка D_{As} в Si определяет профиль легирования и его параметры. Последние зависят не только от $[As]$, но и от других факторов, например плотности равновесных и неравновесных структурных дефектов в Si, толщины остаточного матричного окисла на поверхности, скорости нагрева и охлаждения пластин Si, состава среды отжига и др. В рассматриваемом случае ДСНР, отвечающие перечисленным требованиям для УПЭО, получаются при обеспечении определенной (не очень высокой) концентрации $[As]$, когда в процессе диффузии преобладает механизм комплексообразования нейтральной вакансии с двумя нейтральными атомами As. В этом случае максимальная величина нормированного значения коэффициента диффузии мышьяка $(D_{As}/D_i) = M = 38$ достигается при нормированном значении общей концентрации мышьяка $([As]/n_i) = K = 35$. Здесь D_i – собственный коэффициент диффузии As при собственной концентрации примеси n_i при температуре диффузии.

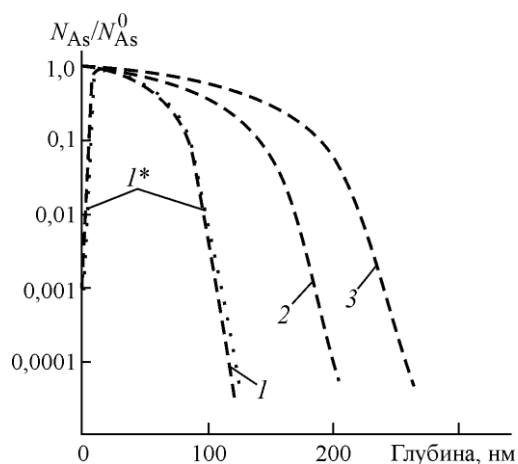


Рис.2. Расчетные (1–3) и экспериментальные (I^*) значения распределений общей концентрации $[N_{As}]$, приведенные к концентрации $[N_{As}^0]$ на поверхности, по глубине диффузионных слоев

На результирующий профиль легирования УПЭО определенное влияние оказывают режимы отжига в атмосфере H_2 (рис.2). При температуре $T = 950$ °С профиль 1 соответствует времени диффузии $t = 12$ мин, 2 – 36 мин, 3 – 60 мин. Экспериментальный профиль I^* с обращенным профилем легирования получен для профиля 1, но при дополнительном быстром (1000 °С, 15 с) отжиге в водороде.

На рис.3 даны диффузионные СНР, полученные при быстрой диффузии (120, 30 и 9 с) и условиях формирования специфических профилей легирования с максимально резкими градиентами концентрации ионизированной примеси N_{As}^+ по глубине при минимальном значении поверхностного сопротивления ρ_{s3} , минимальных уровнях структурных дефектов и токов утечки переходов.

Как видно из рис.3, высокие значения концентрации ионизированных атомов As на поверхности $N_{As0}^+ = 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ достигаются при общей концентрации примеси в объеме реактора $[As] = (3-4) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. При этом на поверхности Si практически отсутствуют локальные области эрозии, преципитаты и кластеры.

УПЭО могут быть сформированы в виде совокупности двух областей. Слаболегированные нижние области (с поверхностной концентрацией фосфора 10^{17} атом/см³) позволяют фиксировать окончание процесса электрохимического травления подложки.

Для создания идеальных профилей целесообразно использовать метод диффузии As из легко растворимых пленок на основе легированных As силикатных или германо-силикатных окислов [12, 13].

На рис.4–6 приведены принципиальные схемы поэтапного самоформирования полностью самосовмещенных структур с УПЭО и обращенным профилем легирования.

На рис.4 показаны исходные конструктивные сплошные слои 2 – 5, созданные на подложке 1 (*p*-Si). Эмиттерные *n*⁺-слои 2 в верхних участках имеют резкие и бездефектные сверхтонкие области с обращенным профилем легирования. Базовые слои 4 (10 нм), сильно легированные В, заключены между слоями 3 (5 нм) и 5 (10 нм) слаболегированного *n*-Si. Локальные слои 6 из пиролитического SiO₂, осажденного при низком давлении реагентов, и слои 7 (Si₃N₄) образуют верхние составные псевдолитографические маски ПЛМВ. Центральные части 6 маски формируют по технологии, описанной в [8], или по наноимпринт технологии. В дальнейшем после вытравливания вертикальных слоев 7 самоформируются точно локализованные контактные области к пассивной базе. В этом конструктивном варианте могут быть применены различные способы их самоформирования, включая способ выращивания селективных наноуглеродных трубок или способ заполнения щелей жидкими сплавами (Ga_x-In_y-Sn_z).

Дополнительные маски ПЛМВ служат для создания различных пассивных элементов микро- и нанoeлектромеханических систем, в том числе фильтров на объемных осцилляторах. На рис.5,а приведены конструктивно-технологические схемы самоформирования областей боковой диэлектрической изоляции при использовании АРИТ канавок 8 с последующим их заполнением материалом 9 (SiO₂ (30 нм) + Si₃N₄ (50 нм) + пиролитический SiO₂ или стекло сложного состава [12, 14, 15].

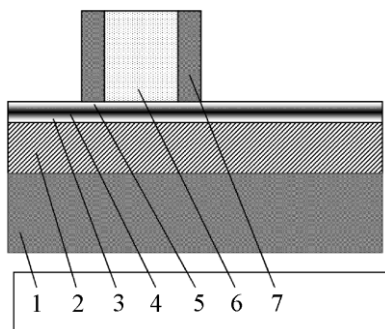


Рис.4. Исходные конструктивные слои для БССТС

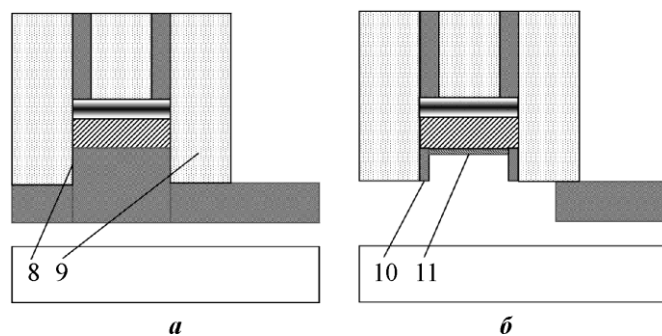


Рис.5. Конструктивно-технологические схемы самоформирования: а – области боковой диэлектрической изоляции; б – самосопряженные ПЛМН

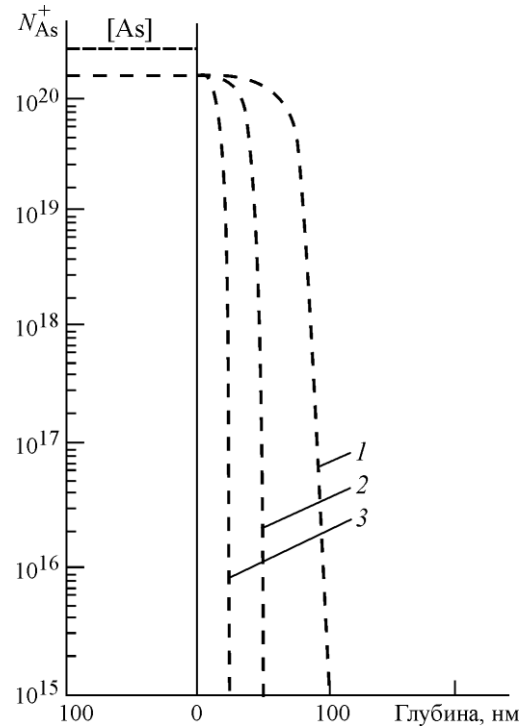


Рис.3. Зависимость концентрации As от глубины: 1 – 120 с; 2 – 30 с; 3 – 9 с ($T_{1,2} = 1050$ °С, N₂; $T_3 = 1000$ °С, N₂)

На рис.5,б дана схема самоформирования нижних самосопряженных масок ПЛМН. Для этого проводят АРИТ подложки 1 (p -Si) до эмиттерной области 2, самоформируют спейсерные временные маски 10 пиролитического SiO_2 , создают самосовмещенные резистивные маски боковой диэлектрической изоляции эмиттерных переходов, заполняя канавки фоторезистом с последующим его утонением АРИТ. При этом самоформируются точно локализованные самосопряженные маски 11 на дне канавок.

На рис.6,а приведена конструктивно-технологическая схема самоформирования узких обращенных областей эмиттера, точно локализованных относительно ПЛМН и ПЛМВ. Для этого удаляют слои 10, проводят АРИТ и селективное боковое химическое травление областей 2 при использовании маски 11, а затем после ее удаления создают составные области 12 боковой диэлектрической изоляции на основе пассивирующего слоя (30 нм) стабильного термического SiO_2 , маскирующих пленок (30 нм) SiN_x (или AlN , Al_2O_3) и самосовмещенных масок полиимида (см. рис.1). Избирательно подтравливают полиимид и составные пленки в верхних участках плоских эмиттерных областей, дополнительно легируют эти области фосфором и/или германием для уменьшения сопротивления эмиттера и плотности тока неосновных носителей заряда – дырок. Затем формируют низкоомные контакты к УПЭО путем селективного осаждения W с подслоем TiW. Слои 12 показаны условно только на боковых участках областей УПЭО. (При этом возможна подгонка ВАХ переходов, например при электронном или ионном облучении.) После вытравливания материала 7 селективной эпитаксией самоформируются узкие низкоомные контактные области 13 (p^+ -Si) к пассивной базе, создают диффузионные области базы 14. Области коллектора, не показанные на рис.6,а, могут быть сформированы по схеме на рис.1.

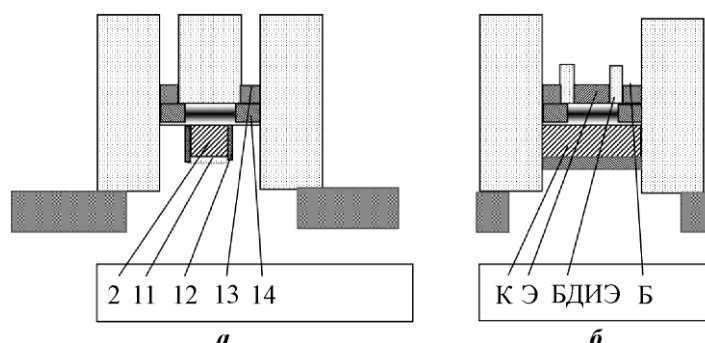


Рис.6. Конструктивно-технологические схемы самоформирования: а – обращенные области эмиттера; б – БССТС с верхним расположением эмиттера

На рис.6,б показан вариант самоформирования областей 14 (p^+ -Si) при диффузии В из пленки аморфного кремния p^+ - $\alpha\text{Si(B)}$, сильно легированного В, и показаны области эмиттера (Э), коллектора (К) и базы (Б) для БССТС с областями коллектора, созданными снизу между областями боковой диэлектрической изоляции. В этом случае эмиттерные области формируют по типовому варианту, используя защитные композиционные слои из нитрида или оксинитрида кремния с подслоем пассивирующей сверхтонкой пленки термического SiO_2 [2].

Локальные шины металлизации в БССТС формируют в местах расположения областей 9 боковой диэлектрической изоляции (не показаны на рис.6). Контактная металлизация для областей базы на основе SiBNi_2 или SiBPd (дает меньшие значения эффективного сопротивления базы) позволяет использовать варианты применения селективно выращенных нанотрубок.

На рис.7 приведена конструкция БССТС, коллекторные и эмиттерные области которой самосопряжены и самоформируются с применением методов селективной эпитаксии Si и селективного осаждения W. При этом узкие эмиттерные окна точно локализируются при использовании временных спейсерных областей (Сп). Путем локального вытравливания участков полиимида эта структура позволяет повысить эффективность принудительного охлаждения обращенных областей эмиттера, тем самым существенно увеличить уровень легирования областей коллектора и, соответственно, допустимую плотность тока коллектора. Кроме того, эта структура по сравнению с прототипом, приведенным в [2], имеет меньшие значения паразитных емкостей между пассивными областями эмиттера и базы. Наличие близко расположенных БССТС, двух поверхностей и объема кристалла Si, а также областей боковой диэлектрической изоляции и сквозных отверстий между поверхностями позволяет создавать трехмерные волноводно-микророскопические линии и переходы для СВЧ-трактов.

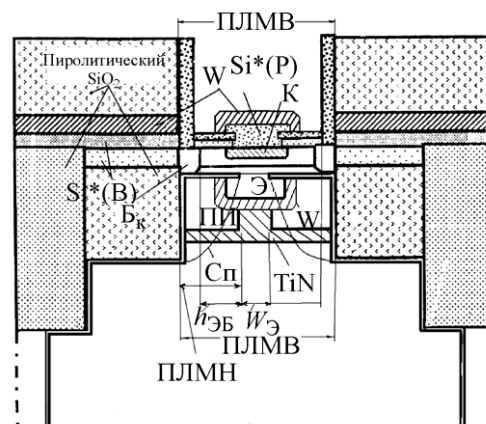


Рис. 7. Конструкция БССТС с точно локализованными областями

Таким образом, рассмотрены критичные узлы в конструкции и технология изготовления полностью самосовмещенных биполярных транзисторных структур для терагерцевых БИС. Комплементарные СВЧ-структуры, самоформируемые с применением самосопряженных и составных верхних и нижних псевдолитографических масок, имеют обращенные ультратонкие бездефектные узкие и плоские эмиттерные области с резкими переходами и точно локализованные узкие контактные области металлизации. Верхняя псевдолитографическая маска выполнена в виде вертикальной составной структуры, наружная часть которой точно локализована путем самоформирования относительно центральной части. Биполярная технология совместима с комплементарными КМОП и полевыми структурами с затворами на основе *p-n*-переходов, а также полевыми вертикальными структурами с индуцированным каналом.

Литература

1. Shi Y., Niu G. Vertical profile design and transit time analysis of nano-scale SiGe HBTs for terahertz f_T // Proc. of the 2004 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits Technology Meeting. – 2004. – P.213 – 216.
2. Physical and electrical performance limits of high-speed SiGeC HBTs. Part I : Vertical scaling / M. Schroter, G. Wedel, B. Heinemann et al. // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2011. –Vol. 58, N.11. – P. 3687–3696.
3. Joodaki M., Hillmer H. A collector-up SiGe-HBT for high frequency application // German Microwave Conference (TH) (March 28–30, 2006). – Universität Karlsruhe, 2006.
4. Луканов Н.М. Способ изготовления транзисторных структур // А.с. №749287 СССР. – 1980.
5. 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.
6. Ning Tak H., Cai J. On the performance and scaling of symmetric lateral bipolar transistors on SOI // IEEE J. of the Electron Devices Society. – 2013 –Vol. 1, N.1. – P. 21–27.
7. Вернер В.Д., Луканов Н.М., Сауров А.Н. СВЧ самосовмещенные структуры с прямыми и обращенными ультратонкими эмиттерными областями // Изв. вузов. Электроника. – 2013. – № 3(101). – С.21–27.

8. 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.

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. Ч. 1–3 // 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. Галперин В.А. Использование методов экспериментального и численного моделирования для исследования процесса сухого травления канавок в кремнии // Изв. вузов. Электроника. – 2011.– № 3(89). – С. 26–34.

11. Голишников А.А., Костюков Д.А., Путря М.Г. Исследование процесса глубокого анизотропного плазменного травления кремния в парогазовой смеси с пониженной полимеризационной способностью // Изв. вузов. Электроника. – 2011. – №3(89). – С.14 – 19.

12. Луканов Н.М. Способ изготовления самосовмещающихся транзисторных структур с диэлектрической изоляцией // А.с. №1132734 СССР. – 1984.

13. Способ изготовления интегральных структур / Н.М. Луканов, В.Н. Виздорович, А.В. Заводян и др. // А.с. №730203 СССР. – 1979.

14. Стекло для изоляции полупроводниковых приборов / В.З. Петрова, Т.Д. Чиликина, Н.М. Луканов и др. // А.с. №617398 СССР. – 1978.

15. Способ изготовления интегральных структур с боковой диэлектрической изоляцией / Н.М. Луканов, В.З. Петрова, Т.Д. Чиликина и др. // А.с. №708885 СССР. – 1979.

Статья поступила
10 апреля 2014 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.