

В. А. Солодуха, Ю. П. Снитовский, Я. А. Соловьев

### **ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА ВНУТРЕННЕГО ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУР В БИПОЛЯРНОЙ И КМОП-ТЕХНОЛОГИЯХ**

*Показана возможность создания кремниевых биполярных мощных СВЧ-транзисторов методом ионного легирования монокремния ионами  $B^+$  через слой  $SiO_2$  и эмиттерные окна в нем с последующим введением в них ионов  $P^+$  и отжигом в атмосфере аргона. Разработанный процесс обеспечивает снижение трудоемкости изготовления и улучшение частотных и мощностных характеристик транзисторов: повышение  $f_{cp}$  ( $I_K = 1,5 A$ ) с 1,8 до 2,1 ГГц и с 1,5 до 1,9 ГГц ( $I_K = 2,8 A$ ),  $P_{вых}$  с 20 до 21,3 Вт, коэффициент усиления по мощности с 2,5 до 2,7, коэффициент полезного действия коллектора с 60 до 79,8 %. Рассмотрено формирование карманов  $n^-$ - и  $p^-$ -типа КМОП-структур с применением маски из термического  $SiO_2$  без слоя  $Si_3N_4$ . Разработанный процесс обеспечивает снижение трудоемкости изготовления на ~21,5 % и повышение выхода годных структур КМОП ИС на ~4,5 % благодаря снижению величины остаточных напряжений в монокремнии и совершенствованию методов легирования карманов.*

*Ключевые слова: биполярная технология, МОП-структура, монокремний, фотолитография, ионное легирование, самосовмещение, самоформирование.*

V. A. Solodukha, Yu. P. Snitovsky, Ya. A. Soloviev

### **PECULIARITIES OF THE METHOD IN INTERNAL FORMATION OF STRUCTURES IN BIPOLAR AND CMOS TECHNOLOGIES**

*The possibility of creating silicon bipolar high-power microwave transistors by the method of ion doping of monosilicon with  $B^+$  ions through a layer of  $SiO_2$  and emitter windows in it with the subsequent introduction of  $P^+$  ions into them and annealing in argon is shown. The developed process reduces the labor intensity of manufacturing and improves the frequency and power characteristics of transistors: increasing the cut-off frequency (collector current = 1.5 A) from 1.8 to 2.1 GHz and from 1.5 to 1.9 GHz (collector current = 2.8 A), output power from 20 to 21.3 W, power gain from 2.5 to 2.7, collector efficiency from 60 to 79.8 %. The formation of pockets of  $n^-$ - and  $p^-$ -type CMOS structures was considered using a mask of thermal  $SiO_2$  without a layer of  $Si_3N_4$ . The developed process reduces the labor intensity of manufacturing by ~ 21.5 % and increases the yield of CMOS microcircuit structures by ~ 4.5 %, thanks to a decrease in the residual stresses in monosilicon and the improvement of pocket doping methods.*

*Key words: bipolar technology, MOS structure, monosilicon, photolithography, ion doping, self-alignment, self-formation.*

---

#### **Введение**

Поиск компромиссных решений, позволяющих получить оптимальную комбинацию энергетических и частотных параметров биполярных кремниевых транзисторов, привел к тому, что сложился определенный подход к их конструированию [1–4].

В то же время дальнейшее улучшение характеристик и качества этого класса приборов на основе сложившегося подхода практически невозможно. Это связано с тем, что в настоящее время в некоторой степени реализованы предельные возможности современной технологии. Кроме того, существуют причины фундаментального характера, включая ограничение

допустимых рабочих температур полупроводниковых материалов и напряженности электрического поля в них [5], вероятность теплового (выделяемая джоулевая мощность в современных транзисторных структурах составляет  $\sim 10^7$  Вт/см<sup>3</sup>) и электрического пробоя (напряженность электрического поля в элементах транзистора достигает  $\sim 10^5$  В/см), эффектов, связанных с насыщением дрейфовой скорости носителей заряда, скин-эффекта и других факторов [6, 7]. При этом для транзисторов спад выходной мощности с ростом частоты подчиняется зависимости  $\sim 1/f^2$  [5, 6, 8].

**Целью работы** является поиск дополнительных возможностей для улучшения качества и выходных параметров биполярных транзисторов, в частности, с использованием методов внутреннего формирования структур (самосовмещение и самоформирование) [9–13] без изменения горизонтальных размеров и формы коллекторной, базовой и эмиттерных областей. В работе приведены результаты сравнительных данных по особенностям формирования структуры мощного СВЧ-транзистора по стандартной технологии и новой (методом внутреннего формирования структур).

### Обзор путей совершенствования технологии

Эволюция запоминающих устройств с произвольной выборкой (ЗУПВ) на основе КМОП-структур идет в направлении увеличения их информационной емкости и быстродействия, в результате возрастает количество элементов на кристалле и уменьшаются их размеры [14]. Основой ЗУПВ является накопитель информации, занимающий 60 % или более площади кристалла, построенный на основе запоминающих ячеек (ЗЯ), хранящих информацию. Структура отдельной ячейки памяти определяет степень интеграции всего ЗУПВ, а технологический процесс создания ЗУПВ является процессом синтеза ЗЯ и определяет уровень качества и стоимость ЗУПВ.

Изучение возможных путей повышения плотности упаковки элементов ЗЯ показывает [14, 16], что пропорциональное уменьшение (масштабирование) может быть применено не ко всем размерам элементов схемы. Одной из причин является то, что эффекты коротких и длинных каналов накладывают ограничения на длину и ширину каналов МОП-транзисторов. Второй фактор – рост «птичьих клювов» при создании изоляции элементов. Третья проблема связана с реализацией малых зазоров при создании контактов.

Решение этих проблем взаимосвязано. Подавление «клювов» также ведет к более высоким значениям плотностей дефектов и токов утечек переходов из-за значительного возрастания остаточных напряжений. К возрастанию дефектности и токов утечки приводит и увеличение концентрации примеси в каналах и канало-ограничительных (охранных) областях, требуемое для подавления эффектов узкого и короткого каналов, а также уменьшение зазоров при создании контактов. Кроме того, размер и форма «клювов» влияет на эффект узкого канала и на качество создаваемых контактов. Таким образом, более высокий процент выхода годных СБИС ЗУПВ и более низкая их трудоемкость могут быть достигнуты путем оптимизации технологических решений, включая меры по снижению плотности дефектов. Проблема повышения выхода годных и снижения трудоемкости СБИС ЗУПВ на блоке охраны в работе решается путем использования термического диоксида кремния (вместо нитрида кремния) в качестве маскирующего покрытия и совершенствованием способа легирования  $n^-$ - и  $p^-$ -карманов КМОП-структур.

### Самосовмещение в биполярной технологии СВЧ-транзисторов

Исследовались мощные СВЧ кремниевые эпитаксиально-планарные  $n-p-n$  транзисторы диапазона частот  $\geq 1$  ГГц, для изготовления которых использовали однослойные эпитаксиальные структуры 10КЭФ1,8/350ЭКЭС0,01(111).

На рис. 1 представлены два варианта конструкции транзистора. Равноудаленность эмиттерных  $p-n$ -переходов от коллекторного  $p-n$ -перехода на расстояние, равное толщине актив-

ного участка базы  $W_6$  (рис. 1б), обеспечивает увеличенную эффективную площадь эмиттера, при этом минимальная глубина пассивного участка базы  $l$  соизмерима с толщиной активного участка области базы  $W_6$ .

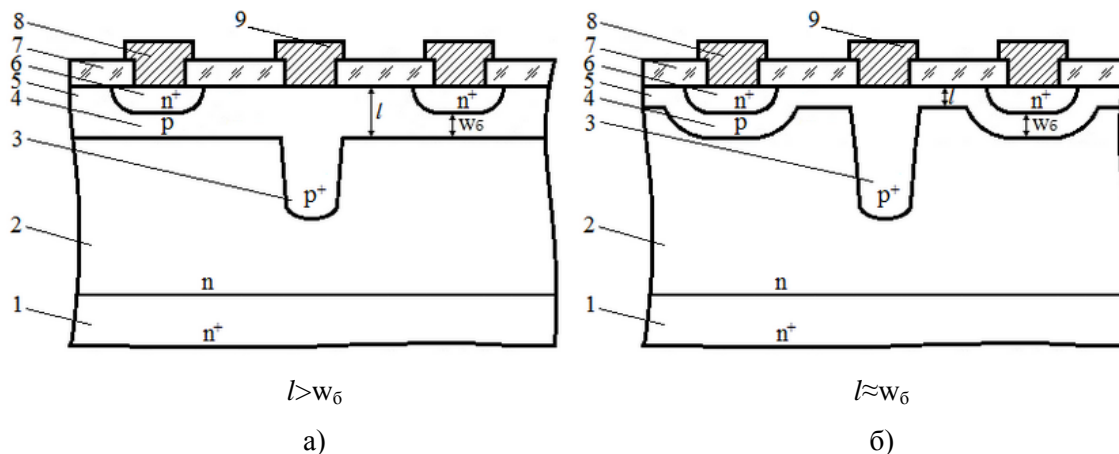


Рисунок 1 – Фрагмент транзисторной структуры с эмиттерными переходами, изготовленными по стандартной (а) и новой (б) технологиям: 1 – коллекторная область; 2 – эпитаксиальный слой; 3 –  $p^+$ -пассивный участок области базы; 4 – активный участок области базы; 5 – пассивный участок области базы; 6 – эмиттерная область; 7 – диоксид кремния; 8 – омический контакт к эмиттеру, 9 – омический контакт к базе

Основные операции, входящие в состав технологического маршрута формирования структуры мощного биполярного СВЧ-транзистора, представлены на рис. 2 (стандартная технология) и на рис. 3 (новая технология). В стандартной технологии после пирогенного выращивания толстого ( $\sim 0,65$  мкм) слоя  $\text{SiO}_2$  на однослойной эпитаксиальной структуре  $10\text{K}\Phi 1,8/350\text{Э}\text{C}0,01(111)$  при температуре  $1150^\circ\text{C}$  и длительности 1 ч (рис. 2а) формировали  $p^+$ -пассивную базу фотолитографией и травлением окон в  $\text{SiO}_2$  с последующей имплантацией ионов  $\text{B}^+$  через окна в  $\text{SiO}_2$  дозой  $8,7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  и энергией 40 кэВ (рис. 2б). После имплантационного отжига пластин монокремния, легированных ионами  $\text{B}^+$ , в сухом кислороде при температуре  $1150^\circ\text{C}$  в течение 15 мин ( $x_j \sim 1,9$  мкм,  $R_s = 40 \text{ Ом/кв}$ ) проводили формирование области базы путем вскрытия окон в пленке  $\text{SiO}_2$  фотолитографией и травлением (рис. 2в), имплантации ионами  $\text{B}^+$  вскрытой поверхности эпитаксиального слоя монокремния [15] дозой  $1,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  и энергией 40 кэВ и последующего пиролитического осаждения пленки  $\text{SiO}_2$  толщиной порядка 300 нм.

Последующий постимплантационный отжиг пластин монокремния, имплантированных ионами  $\text{B}^+$ , осуществляли в две стадии: сначала при температуре  $940^\circ\text{C}$  в течение 360 с во влажном кислороде, а затем при температуре  $940^\circ\text{C}$  в течение 360 с в среде сухого кислорода ( $x_j \sim 300$  нм,  $R_s = 520 \text{ Ом/кв}$ ).

При создании области эмиттера (рис. 2д) имплантацию ионов  $\text{P}^+$  (доза  $3,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , энергия 40 кэВ) проводили в эмиттерные окна, вскрытые в пленке  $\text{SiO}_2$  фотолитографией и травлением. Последующий отжиг залегированных ионами  $\text{P}^+$  пластин монокремния осуществляли в среде аргона при температуре  $900^\circ\text{C}$  в течение 16 мин.

Характеристики сформированной области эмиттера: глубина залегания  $p$ - $n$ -перехода  $x_j \sim 180$  нм,  $R_s \sim 35 \text{ Ом/кв}$ . Финальной стадией изготовления активной транзисторной структуры являлось формирование многослойных контактов к кремнию на основе алюминия с барьерным слоем молибдена (рис. 2е). При этом боковые (латеральные) участки эмиттерных  $p$ - $n$ -переходов удалены от коллекторного  $p$ - $n$ -перехода на расстояние, большее толщины активного участка базы  $l > W_6$  (рис. 1а).

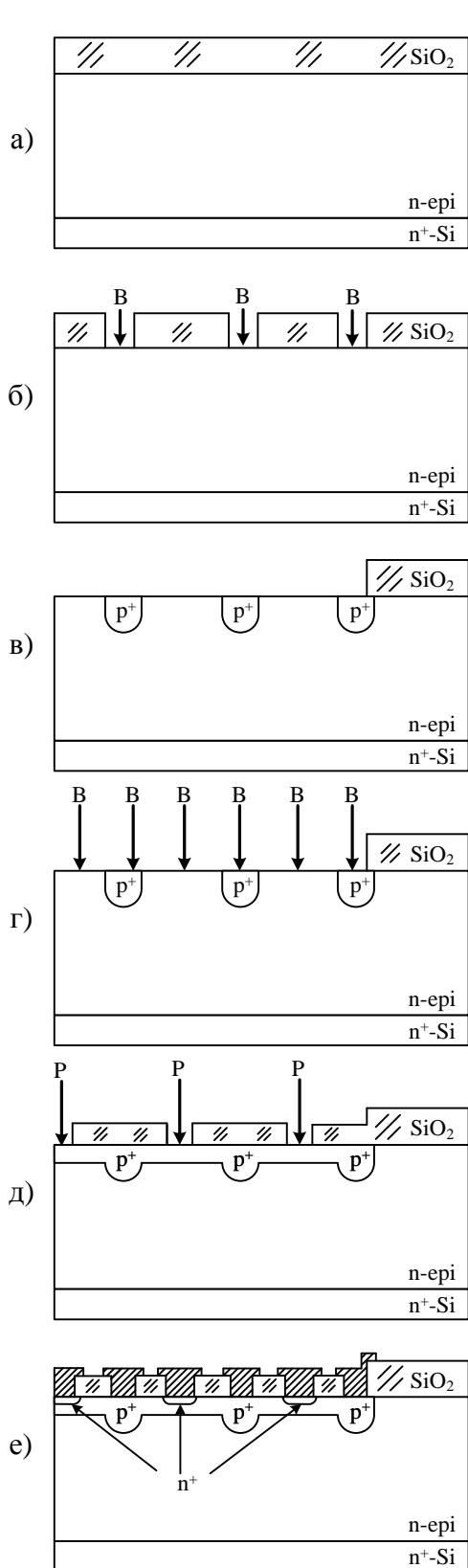


Рисунок 2 – Основные этапы формирования транзисторной структуры по стандартной технологии

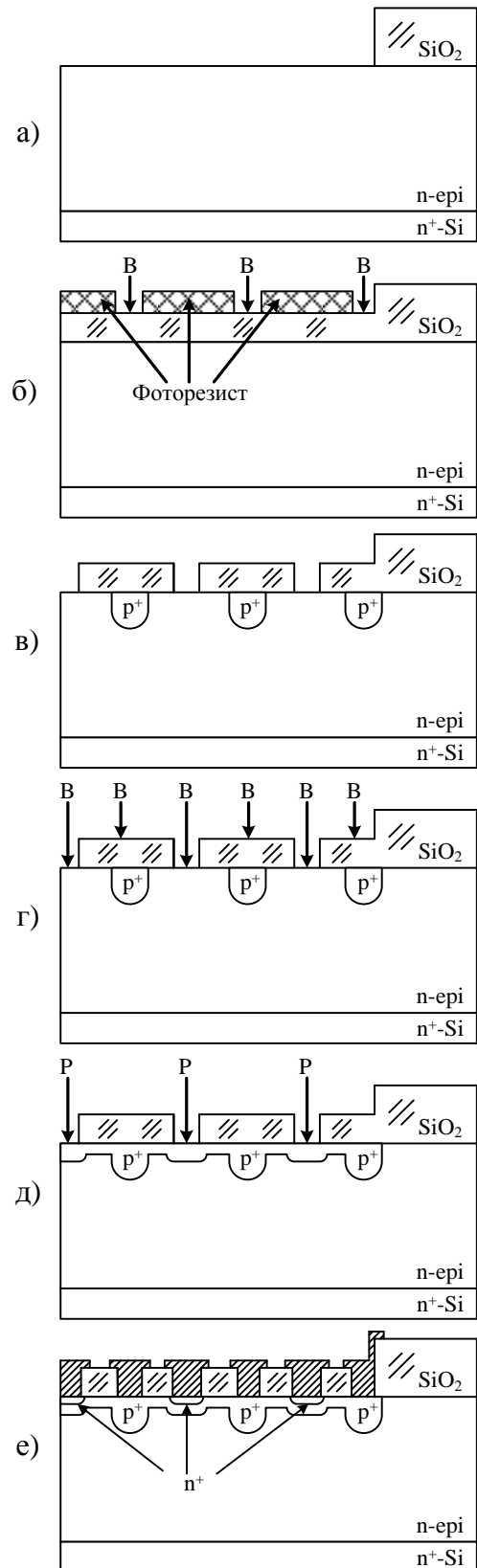


Рисунок 3 – Основные этапы формирования транзисторной структуры по новой технологии

После этого пленку пиролитического SiO<sub>2</sub> уплотняли при температуре 850°С в среде влажного кислорода. Далее фотолитографией с последующим травлением в смеси

$\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_2\text{O} = 4:10:15$  в течение 15–20 мин в двухслойной пленке  $\text{SiO}_2$  толщиной 0,9 мкм вскрывали окно под область базы и проводили окисление монокремния в среде сухого кислорода при температуре 1150°C в течение 90 мин до получения пленки  $\text{SiO}_2$  толщиной 250 нм. Затем с помощью фотолитографии формировали в резисте окна для  $p^+$ -пассивной базы (рис. 3б), выполняющей функцию охранного кольца, и проводили легирование монокремния в окна в резисте ионами  $\text{B}^+$  дозой  $2,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  и энергией 100 кэВ.

После снятия фоторезиста в плазме  $\text{O}_2$  и доснятия в смеси  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 = 3:1$  проводили постимплантационный отжиг легированных ионами  $\text{B}^+$  пластин монокремния в среде аргона при температуре 1150°C в течение 1500 с. При этом глубина залегания ( $x_j$ ) области  $p^+$ -пассивной базы составляла порядка 1,9 мкм, а ее поверхностное сопротивление ( $R_s$ ) – порядка 40 Ом/кв (рис. 3в).

После этого фотолитографией с последующим травлением в пленке термического  $\text{SiO}_2$  толщиной 250 нм вскрывали эмиттерные окна для формирования базовой области – активной и пассивной – в одном процессе путем одновременной имплантации ионов  $\text{B}^+$  [15–17] в эпитаксиальный слой монокремния через слой  $\text{SiO}_2$  и эмиттерные окна в нем (рис. 3г) дозой  $1,3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  и энергией 55 кэВ с последующим постимплантационным отжигом пластин монокремния, легированных ионами  $\text{B}^+$ . Таким образом, ионы  $\text{B}^+$ , внедрившиеся в эпитаксиальный слой монокремния через окна в слое термического  $\text{SiO}_2$ , формируют активный участок базы (4), а часть ионов, внедрившаяся через слой термического  $\text{SiO}_2$ , – пассивный участок базы (5) (рис. 1б). Одновременная имплантация ионов  $\text{B}^+$  через пленку термического  $\text{SiO}_2$  и сформированные в нем окна представляет собой процесс самоформирования структур. Постимплантационный отжиг пластин монокремния, легированных ионами  $\text{B}^+$  активной и пассивной областей базы, осуществляли в среде аргона при температуре 900°C в течение 1800 с. Характеристики сформированной активной и пассивной областей базы: глубина залегания  $p$ – $n$ -перехода  $x_j \sim 360$  нм,  $R_s \sim 600$  Ом/кв. и –  $x_j \sim 200$  нм,  $R_s \sim 1600$  Ом/кв. соответственно.

Формирование области эмиттера осуществляли путем имплантации ионов  $\text{P}^+$  в эпитаксиальный слой монокремния дозой  $4,375 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  и энергией 30 кэВ в те же самые эмиттерные окна пленки термического  $\text{SiO}_2$  (рис. 3г), что и при легировании базы (процесс самосовмещения) с последующим постимплантационным отжигом пластин монокремния, легированных ионами  $\text{P}^+$ . Постимплантационный отжиг пластин монокремния, легированных ионами  $\text{P}^+$ , проводили в среде аргона при температуре 900°C в течение 600 с. Характеристики сформированной области эмиттера: глубина залегания  $p$ – $n$ -перехода  $x_j \sim 180$  нм, поверхностное сопротивление  $R_s = 35$  Ом/кв.

Заключительная операция – формирование многослойных контактов к монокремнию осуществляется так же, как и в стандартной технологии (рис. 3е). При этом боковые участки эмиттерных  $p$ – $n$ -переходов равноудалены от коллекторного  $p$ – $n$ -перехода на расстояние порядка толщины активного участка базы  $l \sim w_6$  (рис. 1б).

Транзисторы в обоих случаях имели толщину активной базы в пределах 200–240 нм. Следует отметить, что доза имплантации ионами  $\text{B}^+$  области базы (4, 5) в новой технологии (рис. 1б) ниже, чем в стандартной. После вскрытия контактных окон к базовой области транзистора наносили молибденалюминиевую металлизацию на планарную поверхность пластины для формирования омических контактов к эмиттерам и базе транзистора. Для нанесения пленки молибдена использовали метод магнетронного распыления в среде аргона, толщина барьерного слоя была 0,13 мкм. Верхний слой алюминия, легированный никелем (0,1 % никеля по массе), наносили термическим способом испарением навесок алюминиевой и никелевой проволок в соотношении по массе (алюминий + 0,5 % никеля). Фотолитографией с последующим травлением формировали разводку (рисунок 78-гребенчатой конфигурации токопроводящих дорожек). Отжиг контактов 8, 9 (рис. 1а, 1б) на основе алюминия с барьерным слоем молибдена к областям эмиттера и базы транзистора проводили в среде аргона при температуре 500°C в течение 300 с.

После проверки параметров транзисторов на пластине и проведения операции глубокого травления коллекторной области (1) (рис. 1а, 1б) пластины (утонение пластин) с целью снижения теплового сопротивления переход – окружающая среда, скрайбирования и ломки пластин на кристаллы, годные по параметрам кристаллы монтировали в корпуса КТ-16-2 (кри-

сталлы были посажены на эвтектику золото – кремний, разварены микропроволочными выводами) и загерметизированы. На собранных в корпус приборах, изготовленных по новой и стандартной технологиям, проводили измерение следующих параметров: граничная частота  $f_{гр}$  при токах коллектора  $I_K$  1,5 А и 1,8 А, выходная мощность  $P_{вых}$  при входной мощности  $P_{вх}$  8 Вт, коэффициент усиления по мощности  $K_{ур}$ , КПД коллектора  $\eta_k$ , емкость коллекторного и эмиттерного переходов  $C_k$  и  $C_3$  соответственно, пробивное напряжение эмиттер – база  $U_{ЭБО}$  проб и тепловое сопротивление переход – корпус  $R_{Т п-к}$ .

### **Самосовмещения в технологии КМОП: замена $Si_3N_4$ пленкой $SiO_2$**

Изготовление комплементарных КМОП ИС предполагает создание на пластинах монокремния, например, марки КЭФ 4,5 ориентации (100) транзисторов, противоположных типов проводимости, концентрация примесей в каналах которых одного порядка с концентрацией примеси в подложке [18–20]. В технологическом процессе изготовления карманов КМОП-структур в качестве маскирующего покрытия (маски) обычно используется пленка нитрида кремния толщиной 0,1–0,2 мкм [18]. Нижняя граница толщины пленки  $Si_3N_4$  обусловлена его устойчивостью к прокислению при выращивании локального толстого  $SiO_2$ . Верхняя – предельно допустимыми напряжениями на границе Si– $SiO_2$ . Экспериментально показано, что при больших толщинах пленки  $Si_3N_4$  значительно возрастает вероятность увеличения дефектности структуры, а при незначительных отклонениях от оптимальных режимов возможно даже образование трещин [21–25].

При нанесении пленок  $Si_3N_4$  в качестве маскирующего покрытия возникают макронапряжения, которые не зависят от вида изоляции, а определяются качеством подложки и качеством покрытия. При этом в пленке  $Si_3N_4$ , получаемой методом осаждения из парогазовой фазы при температуре 800°C, возникают внутренние напряжения порядка 100 ГПа [22], что превышает предел прочности кремния [24, с. 135].

Рентгенотопографические исследования образцов после осаждения пленок термического  $SiO_2$ , а также пленок пиролитического  $Si_3N_4$  и  $SiO_2$  показали [25], что пленки термического  $SiO_2$  создают в слое монокремния под  $SiO_2$  при нормальной температуре растягивающие напряжения, а пленки пиролитического  $Si_3N_4$  и  $SiO_2$  – напряжения сжатия. При этом была отмечена и существенная разница в величине напряжений.

В [26–28] приведены типовые результаты моделирования процесса изготовления диэлектрической изоляции приборов микроэлектроники с использованием окисления канавок в монокремнии при использовании маскирующего покрытия из пленки нитрида кремния. Показано, что высокотемпературное термическое окисление канавок в монокремнии в парах воды приводит как к изменению величины, так и знака остаточных напряжений в монокремнии. Причем величины максимальных остаточных напряжений (до 45 МПа) одного порядка со значениями остаточных напряжений (до 40 Мпа), приведенными в работе [27].

С учетом изложенного можно отметить главные особенности при использовании в качестве маскирующего покрытия пленок из нитрида кремния.

Во-первых, маскирующие покрытия из нитрида кремния создают в монокремнии напряжения сжатия порядка 100 ГПа, что превышает предел прочности монокремния и повышает его дефектность и токи утечки переходов [22].

Во-вторых, для повышения процента выхода годных КМОП ИС и снижения трудоемкости их изготовления целесообразно перейти от нитридной маски к маске из термического  $SiO_2$  с одновременным совершенствованием метода легирования карманов.

Для реализации предложенного подхода для КМОП ИС на блоке охраны использовался метод внутреннего формирования структур, предложенный в [29] и усовершенствованный применительно к КМОП-технологии [22].

Существенным в новом способе является то, что в качестве источника диффузии для создания  $n^-$ -кармана КМОП-структур используют маскирующее покрытие – пленку термического  $SiO_2$  (вместо пленки  $Si_3N_4$ ) толщиной  $h$  (0,1–0,2 мкм), легированную примесью  $n$ -типа с коэффи-

циентом сегрегации  $m > 1$  и длиной среднего проективного пробега, удовлетворяющего условию  $(R_{pn} + 5\Delta R_{pn}) \leq h$ , где  $\Delta R_{pn}$  – дисперсия пробега ионов  $n$ -типа, что обеспечивает легирование монокремния из источника ограниченной концентрации. Кроме того, легирование монокремния идет локально в процессе термообработки, что обеспечивается удалением той части пленки  $\text{SiO}_2$ , которая находится в областях  $p^-$ -кармана. Легирование областей  $p^-$ -кармана осуществляют через маскирующее покрытие пленки термического  $\text{SiO}_2$  с защитой фоторезистивной маски ионами примеси  $p$ -типа с  $R_{pp} \geq h$  с последующим удалением легированной части пленки  $\text{SiO}_2$ , что обеспечивает попадание необходимой примеси нужной концентрации в области  $p^-$ -кармана. В связи с использованием для диффузии в монокремний двух различных источников – легированной пленки  $\text{SiO}_2$  и непосредственно залегированного монокремния – отпадает необходимость в использовании в качестве маскирующего покрытия пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , что значительно снижает общее напряженное состояние пластин [22].

Экспериментальные исследования проводились на КМОП-структурах, изготовленных на пластинах монокремния марки КЭФ4,5(100), карманы которых изготавливались по новой [22] технологии (рис. 4).

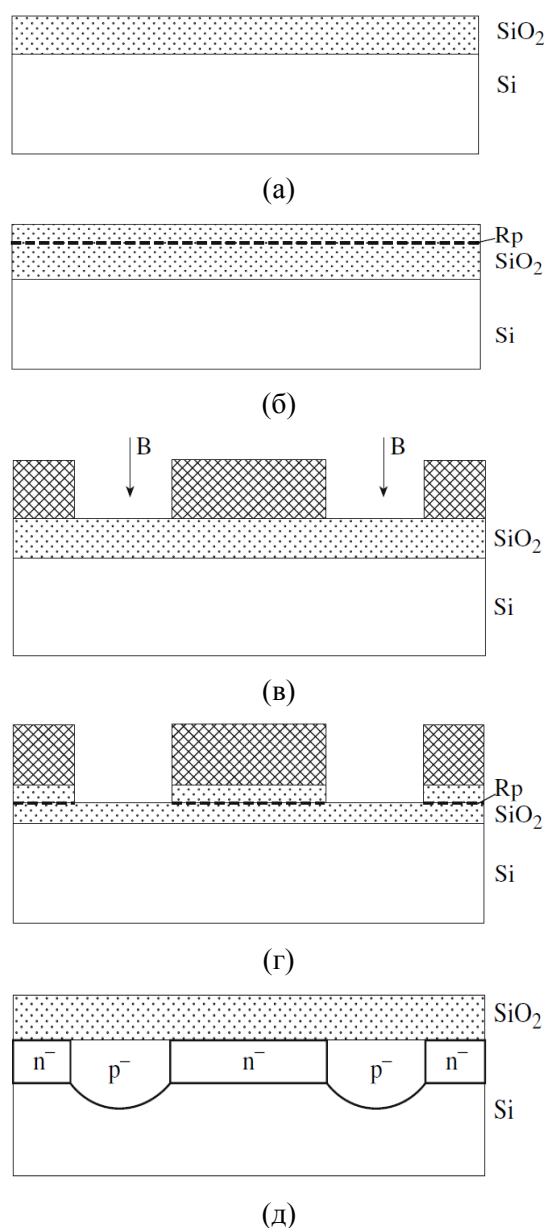


Рисунок 4 – Основные этапы изготовления двух карманов КМОП-структур по новой технологии (с использованием в качестве маски термического  $\text{SiO}_2$ )

Предлагаемая (новая) технология формирования карманов включает следующие операции. Окисление монокремния проводили в среде сухого кислорода до получения толщины пленки  $\text{SiO}_2$   $h \sim 110$  нм (рис. 2а). Затем всю поверхность легировали ионами  $\text{P}^+$  дозой  $3,2 \cdot 10^{13}$   $\text{см}^{-2}$  и с энергией 35 кэВ, что удовлетворяет условию  $(R_{\text{Pn}} + 5\Delta R_{\text{Pn}}) \leq h$ . Поэтому ионы  $\text{P}^+$  легируют только пленку  $\text{SiO}_2$ , не проникая в монокремний (рис. 2б). Далее наносили фоторезистивную маску и по ней методом фотолитографии создавали рисунок  $p^-$ -кармана и проводили легирование ионами  $\text{B}^+$  дозой  $1,25 \cdot 10^{13}$   $\text{см}^{-2}$  и с энергией 100 кэВ (рис. 2в), что удовлетворяет условию  $R_{\text{Pp}} \geq h$ . Таким образом, на планарной поверхности пластины монокремния были сформированы два автономных источника диффузии примеси двух типов ( $n$  и  $p$ ). После легирования ионами  $\text{B}^+$  диоксид кремния из областей  $p$ -типа вытравливают до монокремния (рис. 2г), фоторезист удаляют. После химической обработки проводили постимплантационный отжиг пластин монокремния, легированных примесями  $n$ - и  $p$ -типа в карманах одновременно в среде азота. Фосфор благодаря коэффициенту сегрегации  $m > 1$  ( $\sim 20$ ) перераспределяется из пленки  $\text{SiO}_2$  в монокремний, легируя его до требуемой концентрации. Окончательный вид структуры показан на рис. 2д.

### Результаты и их обсуждение

В таблице 1 приведены значения измеренных параметров мощных СВЧ-транзисторов, изготовленных по стандартной и предложенной (эмиттерные  $p$ - $n$ -переходы выполнены равноудаленными от коллекторного  $p$ - $n$ -перехода на расстояние, равное толщине активного участка базовой области) технологиям. Из таблицы видно, что у транзисторов, изготовленных по предложенной технологии, значения параметров  $f_{\text{гр}}$ ,  $K_{\text{ур}}$ ,  $\eta_{\text{к}}$ ,  $U_{\text{ЭБО проб}}$  больше, а  $C_{\text{э}}$ ,  $C_{\text{к}}$  и  $R_{\text{T п-к}}$  меньше.

Таблица 1 – Влияние технологии изготовления на параметры мощного СВЧ-транзистора

Технология	Параметры								
	$f_{\text{гр}}$ , ГГц		$P_{\text{вых}}$ , Вт $P_{\text{вх}} = 8$ Вт	$K_{\text{ур}}$	$\eta_{\text{к}}$ , %	$C_{\text{к}}$ , пФ	$C_{\text{э}}$ , пФ	$U_{\text{ЭБО проб}}$ , В	$R_{\text{T п-к}}$ , °С/Вт
	$I_{\text{к}}=1,5$ А	$I_{\text{к}}=2,8$ А							
Стандартная	1,71- 1,92	1,42- 1,56	19,97- 20,06	2,51- 2,57	56,00- 60,62	15,5-16,7	180- 190	4,8- 4,9	6,1- 6,6
Новая	2,04- 2,13	1,81- 2,01	20,79- 21,73	2,65- 2,72	77,23- 82,46	14,5- 15,3	145- 167	5,2- 5,6	4,4- 4,8

С учетом результатов работы [30] была разработана физическая модель [31], объясняющая влияние рельефности области пространственного заряда (ОПЗ) коллекторного перехода транзистора в активном режиме работы с учетом растекания неосновных носителей с боковой поверхности эмиттерных переходов в базу транзистора на его параметры (рис. 5).

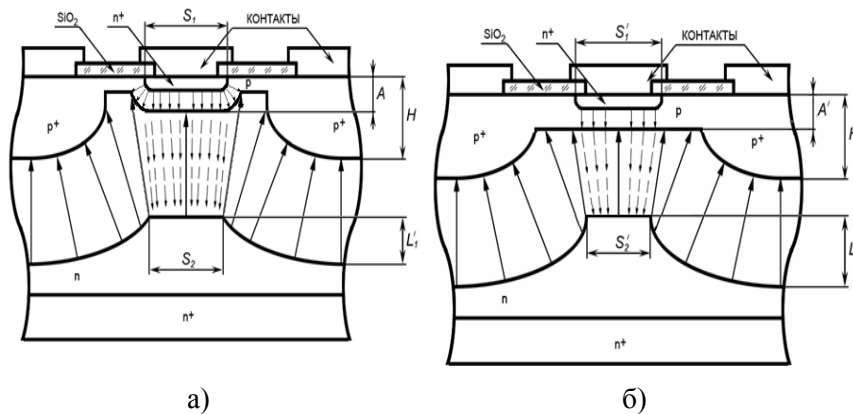


Рисунок 5 – Схематическое изображение ячейки транзистора в разрезе, изготовленного по новой (а) и по стандартной (б) технологиям



Из рисунка видно, что линии напряженности электрического поля в ОПЗ коллекторного перехода показаны сплошными стрелками, траектории пролета – подвижными носителями заряда области базы и ОПЗ коллекторного перехода – пунктирными стрелками. При этом  $A = A' \approx 0,4$  мкм,  $H = H' \approx 1,9$  мкм,  $S_2 > S_2'$ ,  $L > L_1$ .

При прохождении потока подвижных носителей заряда через ОПЗ коллекторного перехода концентрация их на выходе из этой области будет превышать концентрацию на входе. Соотношение площадей ( $S_1/S_2$ ) будет определять кратность увеличения концентрации носителей на выходе из этой области (сечение  $S_2$ ) по сравнению с концентрацией на входе (сечение  $S_1$ ) при достаточной однородности распределения носителей по сечениям  $S_1$  и  $S_2$ , так как все носители, входящие в ОПЗ коллекторного перехода через сечение  $S_1$ , выходят из нее через сечение  $S_2$  (без учета генерации и рекомбинации в ОПЗ).

Соотношение площадей  $S_1/S_2$  будет зависеть от бокового растекания неосновных носителей в базе транзистора, а также геометрии ОПЗ коллекторного перехода и значений напряжения на коллекторном переходе (для нашего случая  $U_K = 28$  В). Площадь  $S_1$  зависит от распределения носителей в базе транзистора. Минимально возможная площадь  $S_1$  будет равна площади эмиттерного перехода, а максимальная площадь будет определяться растеканием носителей в базе транзистора. Площадь  $S_2$  будет зависеть от геометрии коллекторного перехода, удельного сопротивления материала коллекторной области и напряжения на коллекторном переходе. Для приборов, изготовленных на однослойных эпитаксиальных структурах кремния 10КЭФ1,8/350ЭКЭС0,01(111) с удельным сопротивлением эпитаксиального слоя  $\rho_k = 1,8$  Ом·см, ширина ОПЗ будет равна  $\sim 3,9$  мкм при  $U_K = 28$  В. При такой ширине ОПЗ в современных СВЧ-транзисторах, обладающих большой плотностью компоновки элементов транзисторной структуры, площадь  $S_2$  может стать практически равной нулю.

Так как площадь  $S_1$  не может стать меньше площади эмиттерного перехода, то соотношение  $S_1/S_2$  стремится к бесконечности, и поток подвижных носителей заряда фокусируется на выходе из ОПЗ, то есть в малом объеме этой области под эмиттером будет резко возрастать их концентрация. Отличительной чертой СВЧ-транзисторов являются исключительно малые размеры объемов взаимодействия. При этом основное количество тепловой энергии выделяется именно в этих строго ограниченных объемах, в основном в области коллекторного перехода СВЧ-транзистора, расположенного под эмиттерными переходами. Фокусировка потока носителей в ОПЗ будет приводить к тому, что удельная плотность мощности, выделяемая в коллекторном переходе под эмиттером, будет достигать  $\sim 10^7$  Вт/см<sup>3</sup> [32]. Такая высокая плотность выделяемой в полупроводниковых приборах мощности ведет к локальным перегревам, а при неоднородностях в полупроводниковом материале – концентрации тока под отдельными эмиттерами и еще большему возрастанию локальной плотности мощности.

Продвижение вверх по частотному диапазону требует, как правило, уменьшению емкостей и пролетных промежутков. В результате объем взаимодействия уменьшается и плотность мощности растет. В свою очередь высокая концентрация мощности грозит развитием процессов теплового пробоя. Следовательно, СВЧ-транзисторы работают буквально на пределе физических возможностей.

Фокусировка потока носителей в ОПЗ будет приводить и к снижению  $f_{гр}$ , а в результате и к снижению  $P_{вых}$ ,  $K_{ур}$ ,  $\eta_k$  и увеличению  $R_{Т-к}$  транзисторов, изготовленных по стандартной технологии, по сравнению с транзисторами, изготовленными по новой технологии, так как  $S_2' < S_2$ , а  $S_1 = S_1'$  (рис. 5б). В то же время рельефность ОПЗ коллекторного перехода у транзисторов, изготовленных по стандартной технологии, больше рельефности области объемного заряда коллекторного перехода транзисторов, изготовленных по новой технологии:  $L > L_1'$  (рис. 5б). При этом уменьшение величины  $C_k$  транзисторов, изготовленных по новой технологии, обусловлено различием в вертикальной геометрии исследуемых структур, а именно планаризацией области объемного заряда коллекторного перехода и уменьшением его площади (рис. 5а, 5б). Снижение  $R_{Т-к}$  транзисторов, изготовленных по новой технологии, обусловлено тем, что  $S_2 > S_2'$ .

Таким образом, увеличение  $f_{гр}$  и снижение  $R_{Т\text{ п-к}}$ , а также улучшение энергетических параметров транзисторов, изготовленных по новой технологии, по сравнению со стандартной технологией, хорошо согласуется с предложенной моделью работы мощного СВЧ-транзистора. Меньшая фокусировка подвижных носителей заряда на выходе из области пространственного заряда коллекторного перехода у транзисторов, изготовленных по новой технологии ( $S_2 \approx S_1$ , рис. 5а), улучшает равномерность распределения носителей и в соответствии с механизмом спада граничной частоты  $f_{гр}$  при растущем токе коллектора  $I_K$ , граничная частота  $f_{гр}$  таких транзисторов выше.

Анализ профилей распределения примесей в активной области транзисторной структуры позволяет объяснить экспериментальные результаты по электрическим характеристикам рассматриваемого биполярного транзистора, изготовленного по стандартной и предложенной (новой) технологиям. Снижение концентрации бора вдоль боковых участков эмиттерного  $p$ - $n$ -перехода в новой технологии по сравнению со стандартной [30] позволяет объяснить уменьшение  $C_Э$ . В то же время более низкий уровень концентрации примесей у боковых участков эмиттерного  $p$ - $n$ -перехода в новой технологии обуславливает и повышение напряжения пробоя перехода эмиттер – база по сравнению со стандартной технологией.

Важно также подчеркнуть, что слой диэлектрика на поверхности коллектора транзисторной структуры, формируемый по новой технологии [30], имеет большую толщину, чем в стандартной технологии. Увеличение толщины слоя диэлектрика позволяет минимизировать составляющую емкости коллектора между контактной площадкой и телом коллектора, поскольку эта емкость, включенная параллельно активному прибору в эквивалентной схеме транзистора, является паразитной [33, с. 13–15; 34]. Наличие участка с постоянной концентрацией фосфора в приповерхностной области эпитаксиального слоя монокремния при малой глубине диффузии обеспечивает в новой технологии и более высокий коэффициент инжекции эмиттерного перехода, что согласуется с экспериментальными данными [35, с. 265].

Следует отметить, что транзисторы, изготовленные по новой технологии, отдают одну и ту же мощность  $P_{вых}$  при меньшем токе коллектора  $I_K$ , нежели обычные, но при одной и той же мощности на входе  $P_{вх}$ . При этом КПД у них выше за счет меньшей мощности источника питания на коллекторе. Более высокие КПД этих приборов приводят и к увеличению полезной  $P_{вых}$  и снижению доли мощности, рассеиваемой транзистором, вызывающей его избыточный разогрев [5, 27].

Результаты измерения выходных характеристик транзисторов в схеме с общим эмиттером (ОЭ)  $I_K = f(U_{КЕ})$ , представленные на рис. 6, показывают, что при работе в линейном режиме (класс А) линейность усиления на транзисторах, эмиттерные  $p$ - $n$ -переходы которых выполнены равноудаленными от коллекторного  $p$ - $n$ -перехода на расстояние, равное толщине активного участка базовой области, будет лучше, поскольку нелинейные искажения у них выражены слабее.

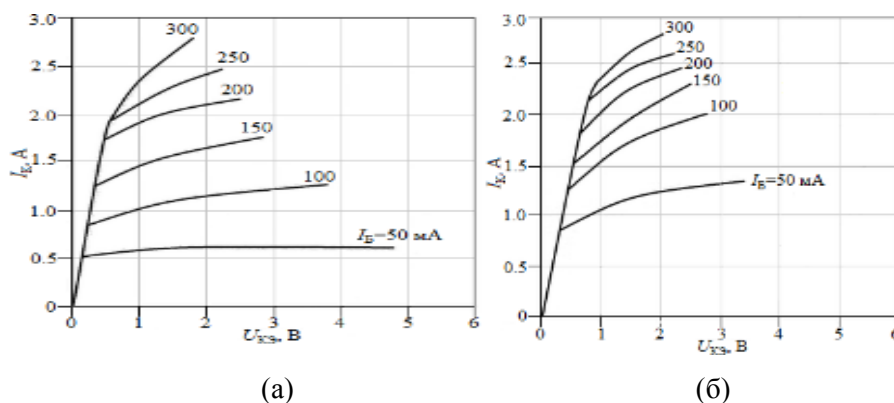


Рисунок 6 – Выходные характеристики транзисторов в схеме ОЭ, изготовленных по новой технологии (а) и по стандартной (б)

При этом входные характеристики для схемы с ОЭ  $I_B = f(U_{БЭ})$  для транзисторов двух типов идентичны.

Нужно отметить [2, с. 12], что в транзисторах для линейных устройств следует стремиться максимально уменьшать значения ряда величин, которые могут быть источниками возникновения нелинейности: на входе транзистора такую роль может играть емкость эмиттерного перехода, на выходе – коллекторного перехода. Источником нелинейности на входе является и сама входная характеристика эмиттерного перехода.

Поскольку энергетические параметры очень важны для устройств, в которых применяются мощные СВЧ-транзисторы, следует полагать, что транзисторы, имеющие лучшие энергетические параметры ( $P_{\text{вых}}$ ,  $K_{\text{ур}}$ ,  $\eta_k$ ), а также более высокие значения  $f_{\text{гр}}$ , более надежны при использовании их в режиме, когда транзисторный каскад работает в классах В или С. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в конструкции мощного СВЧ-транзистора, эмиттерные  $p$ - $n$ -переходы которых выполнены равноудаленными от коллекторного  $p$ - $n$ -перехода на расстояние, равное толщине активного участка базовой области, его параметры и характеристики  $P_{\text{вых}}$ ,  $K_{\text{ур}}$ ,  $\eta_k$ ,  $f_{\text{гр}}$ ,  $C_{\text{э}}$ ,  $C_{\text{к}}$ ,  $U_{\text{ЭБО проб}}$ ,  $I_{\text{к}} = f(U_{\text{кэ}})$  лучше, чем у транзистора стандартной конструкции. Улучшение параметров и выходных характеристик транзистора обусловлено более эффективной работой эмиттерного  $p$ - $n$ -перехода за счет возрастания числа электронов, инжектированных в базовую область через боковые участки эмиттерного  $p$ - $n$ -перехода вследствие одинаковой эффективности  $p$ - $n$ -переходов боковых и плоских участков [17, 29]. При этом увеличивается и радиационная стойкость прибора [36].

Особенности формирования структуры кремниевого эпитаксиально-планарного  $n$ - $p$ - $n$  СВЧ-транзистора по новой технологии (методом внутреннего формирования структур) следующие.

Создание слоя  $\text{SiO}_2$  толщиной 900 нм на поверхности эпитаксиального слоя монокремния, полученного сочетанием термического окисления и пиролитического наращивания диоксида кремния, обусловлено следующими соображениями. Известно, см., например, [37, с. 370–387], что наиболее важными типами дефектов, которые могут образоваться в пластинах монокремния во время окисления, являются дислокации и дефекты упаковки. Эти дефекты могут влиять на процессы деградации электрических параметров полупроводниковых приборов и ИС, в частности биполярных транзисторов.

Поэтому, во-первых, для того, чтобы минимизировать возникновение дислокаций и дефектов упаковки в эпитаксиальном слое монокремния в новой технологии [17], окисление монокремния осуществляют в смеси водорода – кислорода при температуре 1150°C в течение 35–50 мин. При этом толщина выращенной пленки  $\text{SiO}_2$  составляет ~400 нм. В то же время известно, см., например, [38, 39], что для получения пленки  $\text{SiO}_2$  толщиной 1,0–2,0 мкм время процесса окисления монокремния при той же температуре может составить ~2–16 ч, что нерентабельно в условиях серийного производства транзисторов.

Во-вторых, при наращивании пленки пиролитического  $\text{SiO}_2$  толщиной ~500 нм на  $\text{SiO}_2$ , полученный термическим окислением пластин монокремния, дислокации и дефекты упаковки в монокремнии не образуются.

В-третьих, в результате применения относительно толстой пленки  $\text{SiO}_2$  толщиной ~900 нм (в стандартной технологии выращивается только термический диоксида кремния толщиной ~600–650 нм) удалось почти в 1,5 раза снизить емкость базовых контактных площадок.

В-четвертых, новая технология, в отличие от [40], позволяет легирование базовой области осуществлять путем внедрения ионов  $\text{B}^+$  в эпитаксиальный слой монокремния через маску, формируемую из пленки термического  $\text{SiO}_2$  и в ее эмиттерные окна, с последующим имплантационным отжигом легированных ионами  $\text{B}^+$  пластин монокремния в нейтральной среде аргона. При этом за счет совмещения в одном цикле операций по имплантации ионов  $\text{B}^+$  обеспечивается создание как активного, так и пассивного участков базовой области (процесс самоформирования).

В-пятых, внедрение ионов  $\text{P}^+$  для формирования эмиттерных областей в новой технологии осуществляется в те же самые эмиттерные окна, что и для формирования активного

участка базовой области, чем достигается эффект самосовмещения и отсутствие эффекта эмиттерного оттеснения (образование углубления в области перехода база – коллектор). Последнее позволяет получать более узкую базу (более высокую  $f_{гр}$ ). С другой стороны, отсутствие углубления в области перехода база – коллектор исключает «прокол» базы, и, как следствие, допустимые рабочие напряжения транзистора не ухудшаются.

В-шестых, исключаются операции по удалению пленки  $\text{SiO}_2$  в эмиттерных окнах (в частности, боросиликатного стекла), поскольку постимплантационный отжиг залегированных ионами  $\text{B}^+$  пластин монокремния осуществляется в нейтральной среде аргона, что исключает рост пленки  $\text{SiO}_2$  в эмиттерных окнах и обеспечивает не только их чистоту, но также исключает возможность увеличения их ширины. Последнее исключает возможность ухудшения параметров  $P_{\text{вых}}$ ,  $f_{гр}$  и других и, следовательно, улучшает качество изготовления транзисторных структур. Исключается удаление пленки  $\text{SiO}_2$  (фосфорносиликатного стекла) в эмиттерных окнах, так как постимплантационный отжиг легированных ионами  $\text{P}^+$  пластин монокремния при создании эмиттерной области также осуществляется в нейтральной среде аргона, что исключает рост пленки  $\text{SiO}_2$  в эмиттерных окнах. Это обеспечивает не только их чистоту, но также исключает возможность обнажения эмиттерного перехода (особенно важно для мелких эмиттерных переходов  $\sim 100\text{--}200$  нм) и возникновения его короткого замыкания материалом разводки. Таким образом, в новой технологии отсутствует необходимость в травлении окон после постимплантационного отжига легированных ионами  $\text{P}^+$  пластин монокремния. Это также улучшает качество изготовления транзисторных структур. Кроме этого улучшается и качество металл-кремниевых контактов, так как известно, см., например [41, 42], что наличие тонкой пленки  $\text{SiO}_2$  в окнах приводит к деградации контактов, таких как, например, омический контакт в сторону увеличения переходного сопротивления контактов транзистора.

В-седьмых, окислению монокремния, как правило, сопутствует перераспределение легирующих примесей, в частности бора, в растущий  $\text{SiO}_2$ , в результате снижается его поверхностная концентрация. При проведении постимплантационного отжига залегированных ионами  $\text{B}^+$  пластин монокремния в среде аргона перераспределение примеси отсутствует и пленка  $\text{SiO}_2$  не растет, что не противоречит результатам, полученным в работе [43].

В-восьмых, изготовление транзисторов по новой технологии обеспечивает создание вертикальной конфигурации базовой и эмиттерных областей, обеспечивающей более эффективную работу эмиттерного  $p\text{--}n$ -перехода за счет возрастания числа электронов, инжектируемых в базовую область через боковые участки эмиттерного  $p\text{--}n$ -перехода вследствие одинаковой эффективности  $p\text{--}n$ -переходов боковых и плоских участков.

Кроме того, был разработан специальный технологический процесс [11], позволяющий формировать эмиттерную область транзистора посредством имплантации ионов  $\text{P}^+$  в эпитаксиальный слой монокремния через эмиттерные окна в пленке  $\text{SiO}_2$ . При этом удалось пересмотреть технологический маршрут изготовления транзисторов с использованием метода самосовмещения таким образом, чтобы использовать возможность формирования структуры транзисторов в едином цикле отжига базовой и эмиттерной примеси. Это позволило минимизировать влияние эффекта каналирования на профиль легирования в области базы, уменьшить дисперсию значений параметров приборов и получить более крутой диффузионный профиль в области базы.

Таким образом, в работе на примере экспериментальных образцов мощных СВЧ-транзисторов показано, что за счет повышения эффективности эмиттерных областей можно получить качественно новое сочетание параметров: как увеличение значений энергетических параметров  $P_{\text{вых}}$ ,  $K_{ур}$ ,  $\eta_k$ , так и частоты  $f_{гр}$  в схеме с ОЭ.

Поскольку для транзисторов спад выходной мощности  $P_{\text{вых}}$  с ростом частоты подчиняется зависимости  $\sim 1/f^2$  [5, 6] и при этом произведение  $P_{\text{вых}} f^2 = \text{const}$ , то, следовательно, это позволяет до некоторой степени преодолеть фундаментальные ограничения, связанные со спадом выходной мощности с ростом частоты. Результаты исследований позволили разработать новую конструкцию мощного планарного СВЧ-транзистора с гребенчатой configura-

цией эмиттерной области [44]. Отметим, что в данной работе в биполярной технологии мощных СВЧ-кремниевых эпитаксиально-планарных  $n-p-n$  транзисторов, в которой выполнен описанный выше эксперимент, уровень технологии соответствует 3 мкм.

Результаты экспериментов по исследованию влияния маскирующего покрытия, сформированного из термического  $\text{SiO}_2$  толщиной  $h$  и среднего проективного пробега ионов  $\text{B}^+$  и  $\text{P}^+$  в  $\text{SiO}_2$ , при формировании карманов КМОП ИС, изготовленных по новой технологии (рис. 4), на выход годных на блоке охраны, представлены в таблице 2. При этом параметры длины пробега ионов  $\text{P}^+$  и  $\text{B}^+$  в пленке  $\text{SiO}_2$ , представленные в таблице, взяты из работы [45, с. 329].

Из таблицы видно, что если длины пробега ионов примеси  $n$ - и  $p$ -типа в  $\text{SiO}_2$  связаны с толщиной маски эмпирическим соотношением  $(R_{Pn} + 5\Delta R_{Pn}) \leq h$  и  $R_{Pp} \geq h$  соответственно, то процент выхода годных высокий. Невыполнение этих соотношений приводит или к резкому снижению процента выхода годных или даже к нулевому результату.

Физико-математическое моделирование распределения напряжений в структуре  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}$ , полученной по стандартной технологии [46], представлено на рис. 7, 8, а распределение напряжений в структуре  $\text{SiO}_2\text{-Si}$ , полученной по новой технологии [46], представлено на рис. 9. Сравнение рис. 7, 8, 9 подтверждает более высокую степень остаточных напряжений, вносимых пленкой  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в монокремний (~100 раз), по сравнению с остаточными напряжениями, вносимыми пленкой термического  $\text{SiO}_2$ . Отметим, что при изготовлении двух карманов с использованием в качестве маскирующего покрытия пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  остаточные напряжения в монокремнии носят характер растягивающих, а с использованием в качестве маскирующего покрытия пленки термического  $\text{SiO}_2$  – сжимающих.

Сравнение процессов формирования карманов  $n^-$  и  $p^-$ -типа показало, что новый процесс позволяет сократить количество операций при изготовлении двух карманов КМОП-структур, а также уменьшить дефектность и токи утечки переходов. В результате выход годных на блоке охраны увеличился на ~4,5 %, а расчет трудоемкости изготовления пластин на этом блоке показал, что она уменьшилась на ~21,5 % [22]. Измерение функционирования изделия показало, что съем годных кристаллов на пластине и их параметры не изменились. Таким образом, результаты физико-математического моделирования подтверждают значительное снижение остаточных напряжений в монокремнии (~100 раз) при использовании пленки термического  $\text{SiO}_2$  в качестве маскирующего покрытия.

Следствием этого и является снижение дефектности в монокремнии, токов утечки переходов и, как следствие, повышение выхода годных КМОП ИС, а также снижение трудоемкости их изготовления. Однако следует отметить, что новая технология требует прецизионного оборудования ионной имплантации (особенно в части задания величины энергии примеси), а также проведения прецизионного термического окисления монокремния, особенно на начальной его стадии [47].

Таблица 2 – Влияние толщины маски на процент выхода годных на блоке охраны КМОП ИС в зависимости от величины среднего проективного пробега ионов по отношению к толщине маски

Толщина маски $\text{SiO}_2$ $h$ , мкм	Параметры длины пробега ионов $\text{P}$ в $\text{SiO}_2$ [45, с. 329]			$(R_{Pn} + 5\Delta R_{Pn})$ по отношению к $h$	Параметры длины пробега ионов $\text{B}$ в $\text{SiO}_2$ [45, с. 329]		$R_{Pp}$ по отношению к $h$	Выход годных, %	Примечание
	$E$ , эВ	$R_{Pn}$ , мкм	$\Delta R_{Pn}$ , мкм		$E$ , кэВ	$R_{Pp}$ , мкм			
0,1	20	0,0284	0,0093	<0,1	100	0,4024	>0,1	97,1	
0,2	60	0,0796	0,0236	≈0,2	100	0,4024	>0,2	96,9	
0,05	10	0,0155	0,0053	<0,05	100	0,4024	>0,05	95,0	
0,23	70	0,0925	0,0268	<0,23	100	0,4024	>0,23	90,0	

0,1	50	0,0667	0,0202	>0,1	100	0,4024	>0,1	10,0	Из-за большой глубины легирования ионами Р залегируются $p$ -области, что привело к падению $U_{\text{проб}}$
0,2	10	0,0155	0,0053	<<0,2	100	0,4024	>0,2	20,0	Из-за малого легирования $\text{SiO}_2$ ионами Р последний при разгонке кармана слабо залегирует $n$ -карман, так что $U_T$ оказалось гораздо ниже нормы
0,1	60	0,0796	0,0236	>0,1	100	0,4024	>0,1	0	Из-за большой глубины легирования ионами Р залегируются $p$ -области, что привело к падению $U_{\text{проб}}$
0,2	60	0,0796	0,0236	$\approx 0,2$	30	0,1439	<0,1	0	Из-за малого пробега ионов В карман $p$ -типа оказался практически не залегирует, в результате все пластины ушли в брак

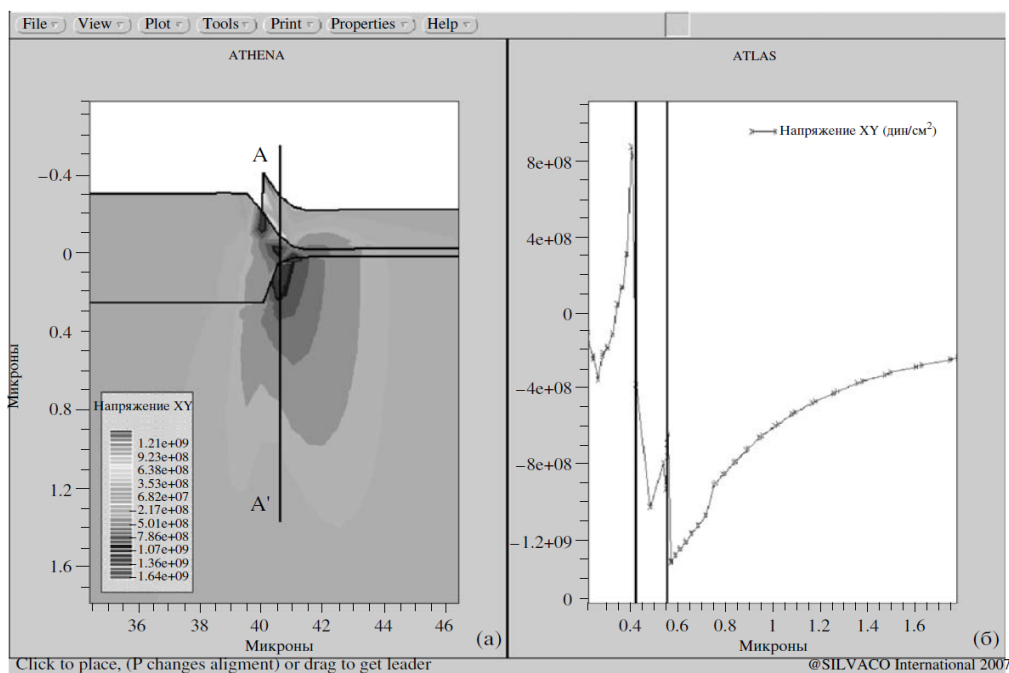


Рисунок 7 – Распределение остаточных напряжений в структуре Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>-Si: (а) – часть структуры вблизи края Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; (б) – распределение напряжений в слоях Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub> и Si [46].

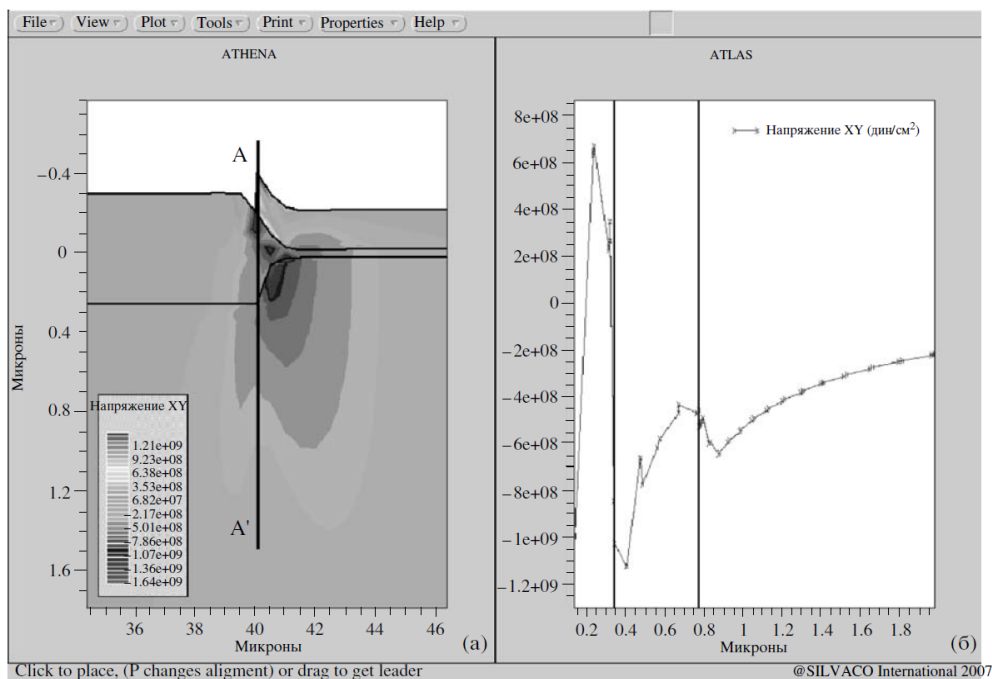


Рисунок 8 – Распределение остаточных напряжений в структуре Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>–SiO<sub>2</sub>–Si: (а) – часть структуры на краю Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; (б) – распределение напряжений в слоях Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub> и Si [46].

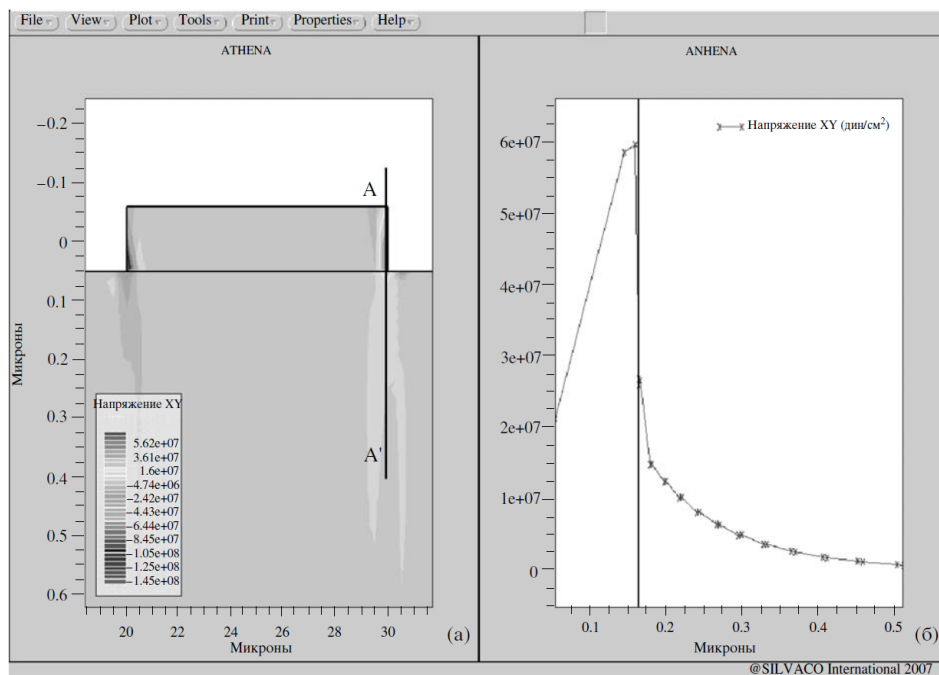


Рисунок 9 – Распределение остаточных напряжений в структуре SiO<sub>2</sub>–Si: (а) – часть структуры на краю SiO<sub>2</sub>; (б) – распределение напряжений в слоях SiO<sub>2</sub>–Si.

### Выводы

Проведенные исследования показали, что возможно формировать области базы и эмиттера мощных СВЧ-транзисторов путем ионного легирования ионами В<sup>+</sup> эпитаксиального слоя монокремния через пленку термического SiO<sub>2</sub> и эмиттерные окна в ней (самоформирование) с последующим введением в них ионов Р<sup>+</sup> (самосовмещение) и имплантационным отжигом пластин в атмосфере аргона, что обеспечивает формирование равноудаленных эмиттерных *p-n*-переходов от коллекторного *p-n*-перехода на расстояние, равное толщине активного участка базовой области, а это обеспечивает увеличенную эффективную площадь эмиттера.

Установлено, что новый процесс позволяет снизить трудоемкость изготовления, а за счет повышения эффективности (коэффициента инжекции) эмиттерных областей можно получить качественно новое сочетание параметров: как увеличение значений энергетических параметров  $P_{\text{вых}}$ ,  $K_{\text{ур}}$ ,  $\eta_k$ , так и частоты  $f_{\text{гр}}$  в схеме с ОЭ и улучшенные выходные характеристики ( $I_k = f(U_{\text{кэ}})$ ) транзисторов. Это позволяет до некоторой степени преодолеть фундаментальные ограничения, связанные со спадом выходной мощности с ростом частоты.

Исследование КМОП-структур на блоке охраны показало, что благодаря упрощению конструкции маски и технологического процесса ее формирования снизилась трудоемкость изготовления КМОП ИС с двумя карманами. А вследствие применения маски, состоящей только из пленки термического  $\text{SiO}_2$ , без пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , величина остаточных напряжений в поверхностных слоях эпитаксиального слоя монокремния уменьшилась, что в свою очередь обеспечивает снижение дефектности и повышение выхода годных. Установлено, что длины пробега ионов  $n$ -типа и  $p$ -типа связаны с толщиной маски  $h$  пленки термического  $\text{SiO}_2$  эмпирическим соотношением  $(R_{\text{pn}} + 5\Delta R_{\text{pn}}) \leq h$  и  $R_{\text{pp}} \geq h$  соответственно.

### Литература

1. Кремниевые планарные транзисторы / под ред. Я. А. Федотова. – Москва : Сов. радио, 1973. – 335 с. – Текст : непосредственный.
2. Мощные высокочастотные транзисторы / Ю. В. Завражнов, И. И. Каганова, Е. З. Мазель, А. И. Миркин. – Москва : Радио и связь, 1985. – 177 с. – Текст : непосредственный.
3. Проектирование и технология производства мощных СВЧ-транзисторов / В. И. Никишин, Б. К. Петров, В. Ф. Сыноров, [и др.]. – Москва : Радио и связь, 1989. – 145 с. – Текст : непосредственный.
4. Патент № 683402 Мощный СВЧ-транзистор : а. с. SU 683402 : заявл. 24.03.1978 : опубл. 20.03.2012 / Снитовский Ю. П., Портнов Л. Я. – 1 с. – Текст : непосредственный.
5. Тагер, А. С. Перспективные направления полупроводниковой электроники СВЧ / А. С. Тагер. – Текст : непосредственный // Литовский физический сборник. – 1981. – № 4. – С. 23–44.
6. Любченко, В. Е. Фундаментальные ограничения и перспективы применения полупроводниковых приборов в радиосистемах миллиметрового диапазона волн / В. Е. Любченко. – Текст : непосредственный // Радиотехника. – 2002. – № 2. – С. 16–27.
7. Vashchenko, V. A. Physical limitations of semiconductor devices / V. A. Vashchenko, V. F. Sinkevitch. – New York : Springer, 2008. – 337 p. – Text : direct.
8. Johnson, O. E. Physical limitations on frequency and power parameters of transistors / O. E. Johnson. – Text : direct. // RCA Review. – 1965. – Vol. 26, № 2. – P. 163–177.
9. Янушонис, С. Самоформирование в полупроводниковой технологии / С. Янушонис, В. Янушонене. – Вильнюс : Мокслас. – 1985. – 192 с. – Текст : непосредственный.
10. Снитовский, Ю. П. Особенности изготовления полупроводниковых приборов с самосовмещением / Ю. П. Снитковский. – Текст : непосредственный // Тезисы докладов III Республиканского семинара «Самоформирование. Теория и применение». – Вильнюс, 1987. – С. 38.
11. Снитовский, Ю. П. Изготовление полупроводниковых приборов в едином цикле отжига примесей / Ю. П. Снитковский, А. Ф. Матюшевский. – Текст : непосредственный // Тезисы докладов IV Республиканского семинара «Самоформирование. Теория и применение в полупроводниковой технологии». – Вильнюс, 1989. – С. 24.
12. Гуляев, П. Ю. Физические принципы диагностики в технологиях плазменного напыления / П. Ю. Гуляев, А. В. Долматов. – Текст : непосредственный // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – Т. 11. – № 5-2. – С. 382–385.
13. Снитовский, Ю. П. Изготовление полупроводниковых приборов методом самосовмещения / Ю. П. Снитковский. – Текст : непосредственный // Тезисы докладов I Всесоюзной научно-технической конференции «Автоматизация, интенсификация, интеграция процессов технологии микроэлектроники» : в 2 ч. – Ленинград, 1989. – Ч. 2. – С. 89–90.
14. Воронин, А. Д. Разработка конструкции и технологии изготовления сверхбольших интегральных схем оперативных запоминающих устройств на КМОП структурах : автореферат



диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. Д. Воронин ; Институтт электроники АН БССР. – Минск, 1989. – 24 с. – Текст : непосредственный.

15. Снитовский, Ю. П. Ионная имплантация через слой SiO<sub>2</sub> и возможность ее применения при изготовлении полупроводниковых приборов / Ю. П. Снитовский. – Текст : непосредственный // Материалы 12-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, Беларусь, 19-22 сент. 2017 г.). – Минск : Изд. центр БГУ, 2017. – С. 476–478.

16. Гуляев, П. Ю. Оптико-электронная система диагностики двухфазных потоков динамическим методом счета частиц / П. Ю. Гуляев, В. И. Иордан. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2008. – Т. 51, № 9-3. – С. 79–87.

17. Патент № 4756314. Способ изготовления транзисторов: а. с. SU 1828333 : заявл. 04.11.1989 : опубл. 20.03.2012 / Ю. П. Снитовский, А. П. Матюшевский. – 1 с. – Текст : непосредственный.

18. Plummer J. D. Silicon VLSI technology. Fundamentals, practice and modeling / J. D. Plummer, M. D. Deal, P. B. Griffin. – Beijing : Publishing House of Electronics Industry, 2003. – 10 p. – Text : direct.

19. Process and Device Performance of 1  $\mu$ m-Channel n-Well CMOS Technology / T. Yamaguchi, S. Morimoto, H. Kawamoto, J. C. De Lacy. – Text : direct // IEEE Trans. Electron Devices. – 1984. – Vol. ED-31, №. 2. – P. 205–214.

20. Rung, R. D. A Retrograde p-Well for Higher Density CMOS / R. D. Rung, C. J. Dell'oca, L. G. Walker. – Text : direct // IEEE Trans. Electron Devices. – 1981. – Vol. 28. – P. 1115–1119.

21. Маскирующие покрытия для изопланарной технологии / Б. Г. Анохин, В. П. Болдырев, И. В. Некарюкин, А. А. Ковалевский // Электронная промышленность. – 1974. – № 10. – С. 60–63.

22. Патент № 1669333, а. с. SU. Способ изготовления КМДП интегральных схем : заявл. 05.06.1989 : опубл. 20.03.2012 / Ю. П. Снитовский, В. Л. Круковский, Г. С. Чертов [и др.]. – 1 с. – Текст : непосредственный.

23. Гуляев, П. Ю. Виновский критерий выбора параметров редукции температурного распределения частиц по их суммарному тепловому спектру / П. Ю. Гуляев, В. И. Иордан, И. П. Гуляев. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2008. – Т. 51, № 9-3. – С. 69–76.

24. Концевой, Ю. А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур / Ю. А. Концевой, Ю. М. Литвинов, Э. А. Фаттахов. – Москва : Радио и связь, 1982. – 239 с. – Текст : непосредственный.

25. Клейнфельд, Ю. С. Образование и движение внеконтурных дислокаций при диффузии фосфора в кремнии / Ю. С. Клейнфельд, Ю. А. Концевой, Ю. М. Литвинов. – Текст : непосредственный // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1981. – Вып. 3(146). – С. 3–11.

26. Snitovsky, Yu. P. A New Technology for Manufacturing the Dielectric Isolation of Elements of Microelectronic Devices by Oxidizing Grooves in Single-Crystal Silicon / Yu. P. Snitovsky, M. G. Krasikov. – Text : direct // Russian Microelectronics. – 2010. – Vol. 39. – P. 12–18.

27. Орликовский, А. А. Плазменные процессы в микро- и нанoeлектронике. Часть 1. Реактивное ионное травление / А. А. Орликовский. – Текст : непосредственный // Микроэлектроника. – 1999. – Т. 28, № 5. – С. 344–362.

28. Гуляев, П. Ю. Моделирование технологических процессов плазменного напыления покрытий наноразмерной толщины / П. Ю. Гуляев, И. П. Гуляев. – Текст : непосредственный // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – Т. 35, № 1.1. – С. 144–148.

29. Snitovsky, Yu. P. Lateral injection utilized for improving the performance of microwave bipolar transistors / Yu. P. Snitovsky. – Text : direct // Russian Microelectronics. – 2002. – Vol. 31, №. 4. – P. 248–253.

30. Snitovsky, Yu. P. New Approach to the Manufacturing of Power Microwave Bipolar Transistors: A Computer Simulation / Yu. P. Snitovsky, V. V. Nelayev, V. A. Efremov. – Text : direct // Russian Microelectronics. – 2007. – Vol. 36, № 6. – P. 409–414.

31. Солодуха, В. А. Особенности изготовления мощных СВЧ-транзисторов методом внутреннего формирования структур / В. А. Солодуха, Ю. П. Снитовский, Я. А. Соловьев. – Текст : непосредственный // Современные проблемы радиоэлектроники : сборник научных трудов. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. – С. 521–525.
32. Интегральная электроника сверхвысоких частот / А. Ф. Трутко, Я. А. Федотов, Ю. А. Каменецкий, Д. И. Сметанина // Микроэлектроника и полупроводниковые приборы. – Москва : Советское радио, 1976. – Вып. 1. – С. 179–210.
33. Зайцев, А. А. Генераторные СВЧ транзисторы / А. А. Зайцев, Ю. Н. Савельев. – Москва : Радио и связь, 1985. – 47 с. – Текст : непосредственный.
34. Krasikov, M. Computer simulation of the dielectric isolation technology in the semiconductor devices / M. Krasikov, V. Nelayev, Yu. Snitovsky. – Text : direct // Proc. VIII<sup>th</sup> Int. Conf. "The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics" (CADSM 2005). – Ukraine : Lviv-Polyana. – 2005. – P. 29–32.
35. Кремниевые планарные транзисторы / Под ред. Я. А. Федотова. – М.: Сов. радио, 1973.
36. Снитовский, Ю. П. Некоторые пути повышения радиационной стойкости биполярных СВЧ-транзисторов / Ю. П. Снитовский. – Текст : непосредственный // Труды XIV Международного совещания «Радиационная физика твердого тела». – Севастополь, 2004. – С. 445–449.
37. Рейви, К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии / К. Рейви. – Москва : Мир, 1984. – 472 с. – Текст : непосредственный.
38. Патент № 814175, а. с. SU Способ создания диэлектрической изоляции элементов полупроводниковых приборов : заявл. 30.11.1979 : опубл. 20.03.2012 / В. Ф. Данилов, Ю. П. Снитовский, А. А. Рассадин, С. Д. Владыченко. – 1 с. – Текст : непосредственный.
39. Microstructure and evolution of (TiB<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/NiAl composites prepared by self-propagation high-temperature synthesis / X. J. Song, H. Z. Cui, L. L. Cao [et al.]. – Text : direct // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2016. – Т. 26. – № 7. – С. 1878–1884.
40. Диффузия через слой SiO<sub>2</sub> и возможность ее применения при изготовлении монокристаллических схем / И. М. Алиев, Н. Д. Гаджиев, Т. К. Исмаилов, В. К. Меджидова. – Текст : непосредственный // Электронная техника. Сер 3. Микроэлектроника. – 1984. – Вып. 4. – С. 76–79.
41. Солоненко, О. П. Плазменная обработка и напыление порошков оксидов металлов, состоящих из полых сфер / О. П. Солоненко, И. П. Гуляев, А. В. Смирнов. – Текст : непосредственный // Письма в Журнал технической физики. – 2008. – Т. 34. – № 24. – С. 22–27.
42. Ohmi, T. Ultraclean processing / T. Ohmi. – Text : direct // Microelectronic Engineering. – 1991. – Vol. 10 – № 3–4. – P. 163–176.
43. Влияние среды отжига на перераспределение бора, имплантированного в кремний / А. Ф. Буренков, Ф. Ф. Комаров, В. Д. Курьязов, М. М. Темкин. – Текст : непосредственный // Микроэлектроника. – 1988. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 256–260.
44. Патент ВУ 22055. Мощный планарный СВЧ-транзистор с гребенчатой конфигурацией эмиттерной области : опубл. 30.08.2018 / Ю. П. Снитовский, А. С. Турцевич, Н. Л. Лагунович [и др.]. – 1 с. – Текст : непосредственный.
45. Рассел, Х. Ионная имплантация / Х. Рассел, Т. Руге. – Москва : Наука, 1983. – 360 с. – Текст : непосредственный.
46. Snitovsky Yu. P. New CMOS Process Using a Thermal-Oxide Mask for Making n<sup>-</sup> and p<sup>-</sup>-Wells / Yu. P. Snitovsky, M. G. Krasikov. – Text : direct // Russian Microelectronics. – 2008. – Vol. 37. – № 3. – P. 166–174.
47. Красников Г. Я. Начальный этап термического окисления кремния и формирование пограничного слоя в системе Si–SiO<sub>2</sub> / Г. Я. Красников, Н. Я. Зайцев, Н. В. Матюшкин. – Текст : непосредственный // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2003. – № 2. – С. 98–104.