

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

### **УПРАВЛЯЕМЫЕ ПРОЦЕССЫ ТРАНСФОРМАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КРЕМНИЕВЫХ БИПОЛЯРНЫХ СВЧ-ТРАНЗИСТОРОВ ИОННЫМИ ПУЧКАМИ**

*В работе рассмотрены формирование переходного слоя контактов Mo – Si, а также влияние режимов нанесения пленки Mo и способов термообработки контактов. Установлено, что при формировании контактов СВЧ-транзисторов путем напыления пленки Mo на поверхность эпитаксиального слоя кремния структура последнего зависит от дозы легирования ионами фосфора и от температуры постимплантационного отжига. Приведены результаты экспериментов и двумерного физико-математического моделирования по исследованию зависимости параметров опытных образцов транзистора KT916A в зависимости от дозы подлегирования эмиттеров ионами фосфора через пленку молибдена. Показано, что с увеличением дозы легирования растет поверхностная и максимальная концентрация фосфора. При этом улучшаются как энергетические, так и частотные характеристики транзистора, повышается радиационная стойкость.*

*Ключевые слова: ионная имплантация, легирование, мощные СВЧ-транзисторы, фазовые изменения, контролируемое структурообразование.*

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

### **CONTROLLED PROCESSES OF THE PARAMETERS TRANSFORMATION BY ION BEAMS IN SILICON BIPOLAR MICROWAVE TRANSISTORS**

*The paper considers the formation of a transition layer of Mo – Si contacts, as well as the effect of Mo film deposition regimes and methods of heat treatment of contacts. It was found that when forming contacts of microwave transistors, by deposition of a Mo film on the surface of an epitaxial silicon layer, the structure of the latter depends on the dose of doping with phosphorus ions and on the temperature of post-implantation annealing. The results of experiments and two-dimensional physico-mathematical modeling to study the dependence of the parameters of test samples of the KT916A transistor depending on the dose of matching the emitters with phosphorus ions through a molybdenum film are presented. It is shown that with an increase in the doping dose, the surface and maximum concentration of phosphorus increases. At the same time, both energy and frequency characteristics of the transistor are improved, and the radiation resistance increases.*

*Key words: ion implantation, doping, powerful microwave transistors, phase changes, controlled structure formation.*

---

### **Введение**

Известно, что примеси с глубокими уровнями приводят к уменьшению времени жизни неосновных носителей заряда, тем самым повышая быстродействие приборов. Поэтому следует ожидать увеличения быстродействия приборов с омическими контактами на основе тугоплавких металлов, облученных ионами. В случае облучения контактов ионами происходит разрушение прослойки диоксида кремния и увеличивается эффективная площадь контакта. Это приводит к снижению электросопротивления контакта, более равномерному распределению тока по площади контактного окна и отсутствию перегретых точек (пятен), что, в свою очередь, повышает надежность контакта и стабильность его свойств.

Одним из основных условий создания омических контактов является высокая степень легирования полупроводника. В большинстве случаев требуется поверхностная концентрация примеси не ниже  $(2-3) \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3} \text{ см.}$ , например, [1, 2]. Однако чем ниже необходимо получить уровень контактного сопротивления, тем выше должна быть степень легирования полупроводника. При этих условиях полупроводник становится вырожденным.

**Целью работы** является экспериментальное подтверждение теоретических возможностей получения омического контакта к области, имеющей низкую степень легирования, свойства которого будут определяться, в основном, степенью легирования и структурой слоя полупроводника, лежащего непосредственно под пленкой металла. Как результат, – не происходит искажения профиля легирования и изменения глубины залегания *p-n*-перехода активной области, к которой создается омический контакт. При этом степень легирования активной области может быть достаточно низкой.

Особенность такого способа формирования омического контакта состоит в том, что он – *неинжектирующий*, поскольку тонкий слой полупроводника под металлической пленкой после термообработки содержит достаточное количество дефектов, на которых происходит рекомбинация неосновных носителей заряда. Это должно привести к повышению быстродействия прибора с такими омическими контактами.

### Физические механизмы структурообразования

В результате развала вакансионных образований, которые возникли под действием первичного потока ионов и атомов отдачи, и активации части, внедренной через пленку металла примеси, происходит образование омических контактов, которые в ряде систем [3] имеют меньшее значение удельного контактного сопротивления  $\rho_k$  по сравнению с необлученными контактами.

Нижней границей, при которой возможно получение омических контактов в облученных системах, можно считать 350 °С. Термообработка ниже 350 °С не дает желаемого результата, поскольку сохраняется большое количество дефектов структуры и мал коэффициент активации примеси. Термообработка при температуре свыше 500 °С нецелесообразна. С одной стороны, по причине быстрого роста промежуточных фаз, которыми являются силициды металлов, с другой, – по причине возникновения высоких, возможно, термомеханических напряжений, величина которых также связана и с толщиной образовавшихся промежуточных фаз. В результате чего в системах «титан – кремний», «ванадий – кремний» и «молибден – кремний» наблюдается нарушение электрического контакта из-за отслаивания пленки металла в контактном окне [3]. Исключение составляют системы «тантал – кремний» и «вольфрам – кремний», в которых сохраняется надежный, стабильный в электрическом плане контакт вплоть до температуры 800 °С.

Следует отметить [3], что зависимость удельного сопротивления контактов в облученных системах от времени отжига имеет три четко выраженных участка. В первые 600 с  $\rho_k$  значительно снижается (примерно до  $10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ ). В течение времени отжига от 600 до 900 с  $\rho_k$  снижается медленно (в среднем примерно до уровня  $(5-7) \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ ) и при дальнейшем увеличении времени отжига удельное сопротивление практически не изменяется. Время отжига меньше 600 с недостаточно для перевода максимально возможного при данной температуре количества примеси в электрически активное состояние и для восстановления структуры переходного слоя. При отжиге от 600 до 900 с практически заканчиваются все релаксационные процессы, связанные с перестройкой структуры и активации примеси, о чем свидетельствует незначительное изменение  $\rho_k$  при увеличении времени отжига.

Одним из весомых факторов, влияющих на формирование структуры переходного слоя облученных контактов и их электрические свойства, является *разрушение пленки естественного диоксида кремния* на границе раздела «металл – кремний», которая, в свою очередь, в значительной степени определяет механизмы переноса носителей заряда. Наиболее существенным в

данном процессе является то, что переходный слой контакта оказывается насыщенным как *примесью, внедренной через пленку металла*, так и *атомами отдачи металла*. При этом приповерхностный слой кремния насыщается *дополнительным количеством примеси*.

Активные области полупроводниковых приборов, в которых происходит перенос носителей заряда, имеют, как правило, на один-два порядка ниже концентрацию примеси. Например, активная база СВЧ-транзистора имеет концентрацию примеси порядка  $1 \cdot 10^{23} - 1 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ .

С одной стороны, создать омический контакт к столь низколегированной области полупроводника невозможно. С другой, – трудно получить мелкозалегающий *p-n*-переход в случае высокой степени легирования полупроводника, так как сложно контролировать и получить воспроизводимые профили легирования. Поэтому при формировании планарных полупроводниковых структур прибегают к комбинированию низколегированных активных областей, имеющих малую глубину залегания *p-n*-перехода, которые отвечают за функциональные свойства прибора, с контактирующими с ними по объему высоколегированными областями, к которым затем создают омические контакты. В ряде случаев это создает конструктивные и технологические трудности. В частности, растут габариты прибора, что затрудняет компоновку в случае их применения, например, в СБИС.

Или создают омический переход типа *p<sup>+</sup>-p-либон<sup>+</sup>-n* типа, который представляет собой вертикальную комбинацию низколегированной и высоколегированной области, к которой затем создают омический контакт. В этом случае затруднено получение мелкозалегающего *p-n*-перехода, поскольку отжиг слоя с повышенной концентрацией примеси приводит к разгону и искажению профиля распределения примеси активной части структуры.

Однако при ионном внедрении через тонкую пленку металла можно получить очень тонкий слой с повышенной концентрацией примеси, которой будет достаточно для создания омических контактов к этому слою [4–6]. Для этого энергия внедряемых ионов должна быть такой, чтобы проективный пробег ионов данного сорта и материала металлической пленки был примерно равен толщине пленки.

Как показали исследования, при ионном облучении контактных систем «тугоплавкий металл – кремний» граница раздела подвергается воздействию ионов, внедряемых через пленку металла и в значительной степени заторможенных в ней, а также воздействию атомов отдачи металла, выбитых первичным потоком ионов в кремний. Ионы, прошедшие сквозь пленку металла, обладают низкой энергией и потому, попадая в монокремний, вызывают появление большого числа радиационных дефектов. В этом случае приповерхностный слой кремния имеет сильно разупорядоченную структуру, и, как показали измерения, поверхностное сопротивление кремния возрастает от нескольких раз до нескольких порядков. В работе [7] показано, что под действием облучения ионами поверхности полупроводника происходит снижение электропроводности вследствие аморфизации приповерхностного слоя, пропорционально дозе облучения. Глубина нарушенного слоя мала и по оценкам работ [8–10] составляет порядка 10 нм. Поэтому при измерении поверхностного сопротивления кремния, подвергнутого облучению через пленку металла, регистрируется средняя слоевая проводимость, определяемая концентрацией примеси в кремнии, и с ростом проводимости приращение поверхностного сопротивления после облучения уменьшается. При этом, как показали исследования [11], при определенных соотношениях концентрации примеси в кремнии и дозы облучения происходит частичное восстановление структуры приповерхностных слоев кремния под воздействием потока ионов.

### **Процессы фазообразования на границе «металл – полупроводник»**

Формирование переходного слоя контактов Mo – Si помимо способов, режимов нанесения пленки Mo и термообработки контактов, зависит от состояния поверхности эпитаксиального слоя кремния, на которой формируют структуры эпитаксиально-планарных *n-p-n* СВЧ-транзисторов перед проведением операций ионного легирования, постимплантационного отжига и нанесением пленки Mo.

Поверхность исходных пластин кремния со средней плотностью дефектов упаковки  $4,2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-2}$  и дислокаций  $5,1 \cdot 10^6 \text{ м}^{-2}$  обладает достаточно высоким совершенством структуры, о чем свидетельствуют электронограммы, полученные методами на просвет (рисунок 1а) и на отражение (рисунок 1б). На них присутствуют точечные рефлексы, принадлежащие монокремнию и Кикучи-линии, образующиеся за счет динамического рассеяния электронов на более глубоких слоях, имеющих высокое совершенство структуры кристаллической решетки.

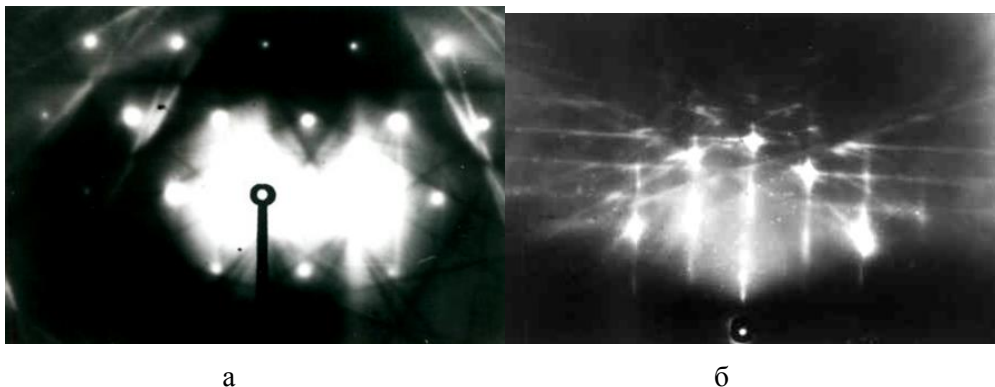


Рисунок 1 – Электронограммы поверхностного слоя пластин Si(111):  
а – на просвет, б – на отражение

Имплантация ионов  $\text{P}^+$  при дозах  $D_1 = 6,25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  приводит к аморфизации поверхностного слоя кремния (рисунок 2).



Рисунок 2 – Электронограмма поверхностного слоя Si(111) после имплантации ионов  $\text{P}^+$

Разупорядоченный слой имеет небольшую толщину и, судя по наличию рефлексов, ниже лежат слои, сохраняющие совершенную структуру.

Влияние дозы легирования кремния ионами  $\text{P}^+$  и температуры постимплантационного отжига на структуру поверхностного слоя кремния показано на рисунках 3 и 4. В процессе активирующей термообработки, необходимой для перевода атомов фосфора в узлы решетки, часть точечных дефектов перестраивается в крупные структурные образования – так называемые остаточные нарушения. При отжиге вакансии собираются в плоские диски. Когда их размер достигает критического, происходит схлопывание соседних с вакансионным диском атомных плоскостей с образованием дислокационной петли.

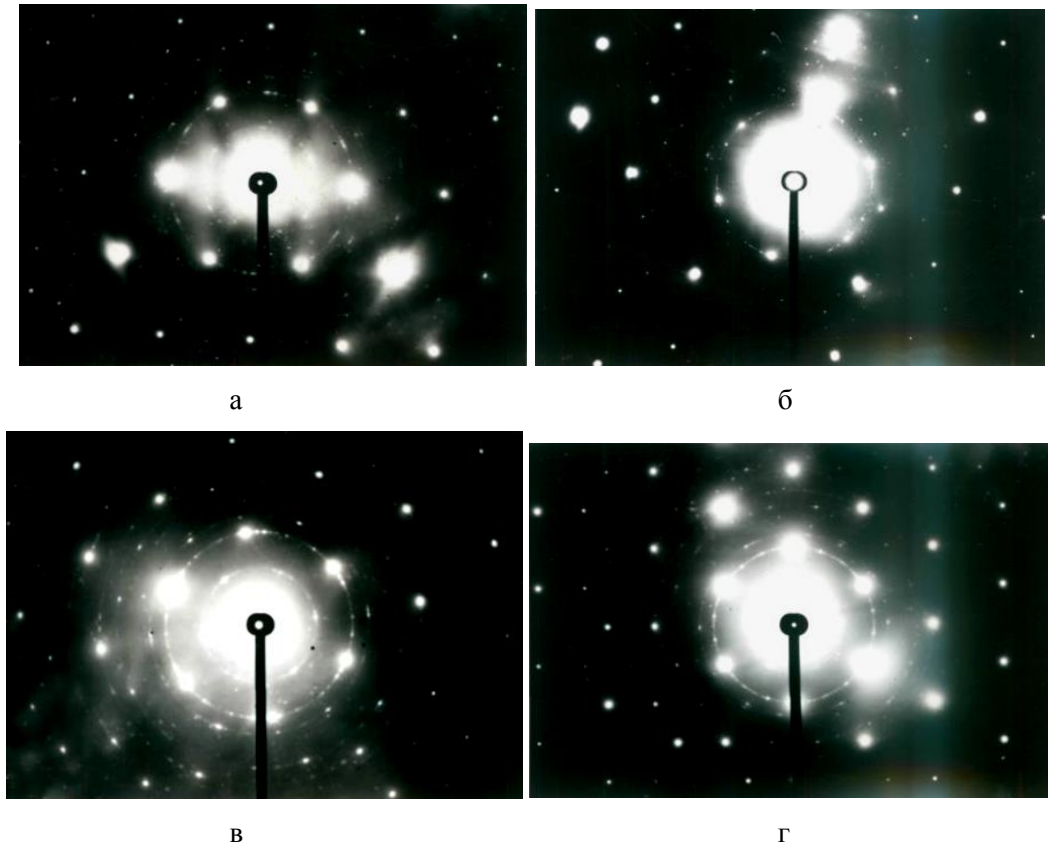


Рисунок 3 – Электронограммы поверхностного слоя Si(111) после имплантации ионов P<sup>+</sup>. Доза легирования Si ионами P<sup>+</sup>:  
 $a, б - 6,25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ;  $в, г - 6,25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ;  
активационный отжиг:  $a, в - 940 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $б, г - 1150 \text{ }^\circ\text{C}$

На всех электронограммах, наряду с сильными точечными рефлексами от плоскостей ориентации (220), (440) и плоскостей с большими индексами зоны [111], хорошо видны рефлексы в виде коротких узких дужек от плоскостей (111) и точечные рефлексы в виде цепочек от плоскостей (220). При малых дозах легирования кремния поверхностный слой в случае температуры отжига 940 °C имеет блочную структуру с углами разориентации блоков до 10°. Изменение температуры отжига не оказывает заметного влияния на структуру поверхностного слоя монокремния (рисунок 3 *а, б*). Электронограммы свидетельствуют о том, что уже при дозах легирования  $\sim 6,25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  происходит сильное разупорядочение кристаллической решетки кремния, которое приводит к образованию блочной структуры. При увеличении дозы легирования ( $\geq 6,25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) наступает аморфизация кремния. Рекристаллизация аморфного кремния при отжиге приводит к образованию поликристаллической фазы, размер зерна которой зависит от температуры отжига. Так, при дозе легирования  $(6,25-9,375) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  ионами P<sup>+</sup> после отжига при 900–940 °C поверхностный слой кремния состоит из поликремния, включающего кристаллиты произвольной ориентации (рисунок 3 *в*), а после отжига при 1150 °C в результате рекристаллизации образуется слой поликремния с большими размерами зерен (рисунок 3 *г*).

Установлено, что при ориентации длинной стороны окна шириной  $b$  в диоксиде кремния вдоль направления  $\langle 110 \rangle$  образующиеся при отжиге так называемые внеконтурные дислокации распространяются за пределы окна только с одной его стороны (рисунок 4 *а*), что обусловлено особенностями расположения плоскостей скольжения дислокаций относительно плоскости (111) кристаллической решетки кремния [12].

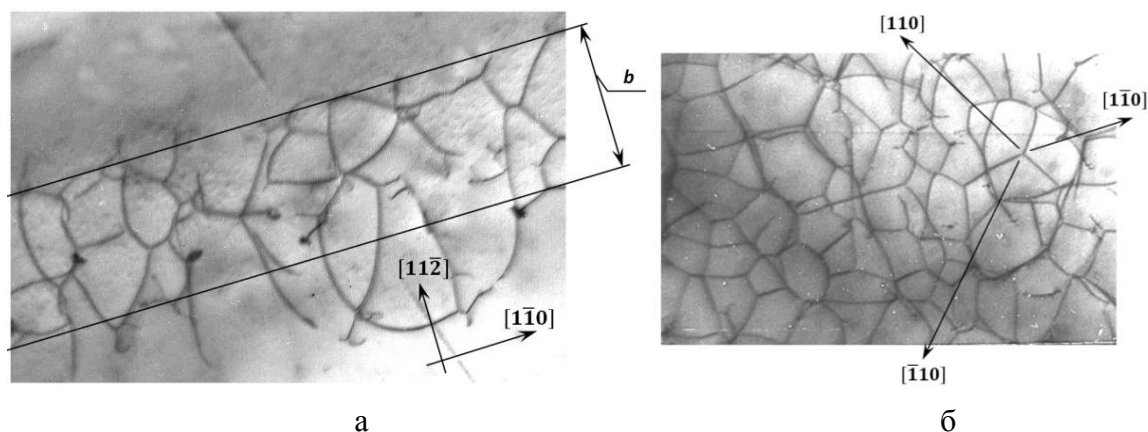


Рисунок 4 – Дислокационная структура в активной области Si(111): *a*– доза имплантации ионов P<sup>+</sup>  $6,25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , активационный отжиг при 1150 °С; *б* – доза имплантации ионов P<sup>+</sup>  $6,25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , доза легирования  $3,125 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  системы Mo – Si, отжиг при 500 °С

Следует отметить, что для уменьшения влияния внеконтурных дислокаций на параметры и надежность СВЧ-транзисторов желательно ориентировать более длинную сторону окна по направлению  $\langle 110 \rangle$  [13–15]. А. с. 683402 [13] внедрено в производство широкой гаммы ВЧ- и СВЧ-транзисторов на ОАО «Интеграл».

Полученная методом магнетронного распыления мишени пленка Mo до термообработки имеет мелкодисперсную структуру с размером зерна 0,1–0,2 мкм (рисунок 5 *a*).

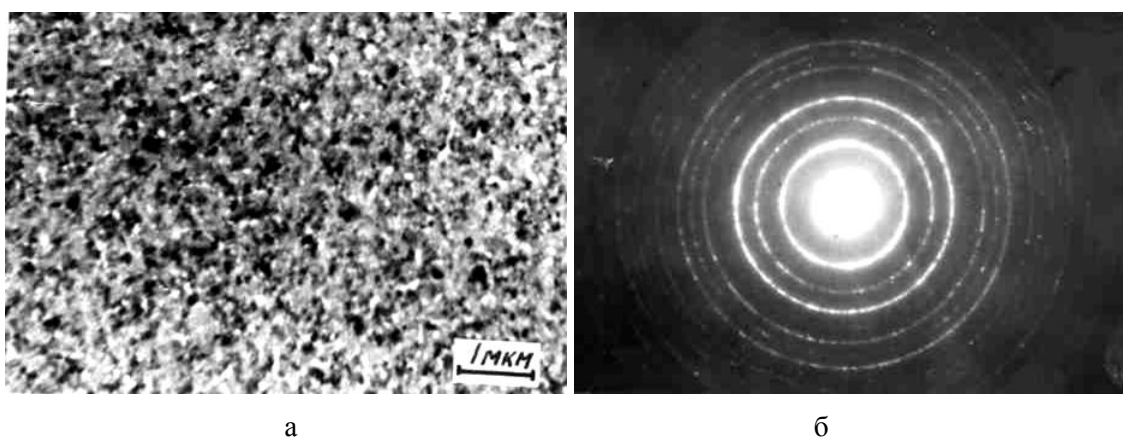


Рисунок 5 – Структура (*a*) и микроэлектронграмма (*б*) пленки Mo до термообработки

Микроэлектронграмма, полученная от выделенного участка пленки Mo, свидетельствует о том, что пленка состоит из множества произвольно ориентированных кристаллитов (рисунок 5 *б*).

Таким образом установлено, что при формировании контактов СВЧ-транзисторов напыление пленки Mo происходит на поверхность эпитаксиального слоя кремния, структура которого зависит от дозы легирования ионами P<sup>+</sup> и от температуры постимплантационного отжига.

Расшифровка электронграммы, приведенной на рисунок 5 *a*, показала, что переходной слой системы Mo – Si до термообработки при легировании кремния высокими дозами ионов P<sup>+</sup> ( $6,25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ) включает слои поликремния, молибдена и оксида молибдена Mo<sub>4</sub>O<sub>11</sub>, который образуется при напылении пленки Mo.

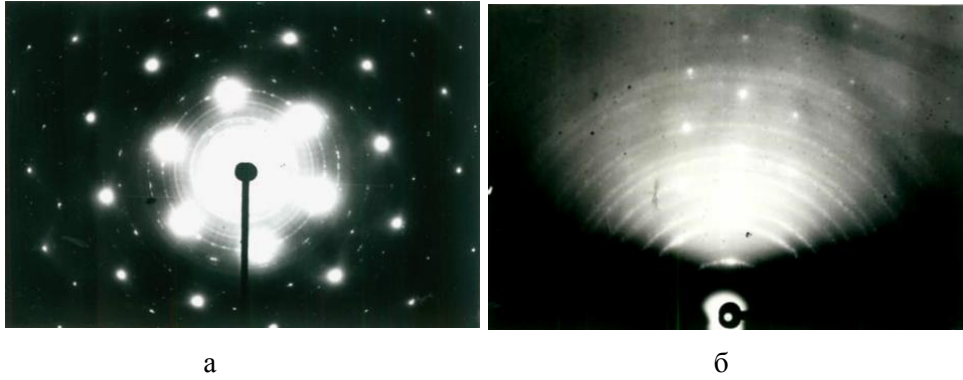


Рисунок 6 – Электронограмма переходного слоя системы Mo – Si (доза легирования ионами  $P^+ 6,25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ): *a* – до отжига; *б* – после отжига при 600 °C в вакууме

Помимо крупнокристаллического слоя в поверхностном слое образуется также мелкодисперсный слой кремния, о чем свидетельствует наличие кольцевых рефлексов, объединяющих мелкие точечные рефлексы, принадлежащие крупнокристаллическому слою кремния.

В целом после нанесения пленки Mo до отжига в системе Mo – Si наблюдается следующая последовательность чередования слоёв при переходе от монокремния до поликристаллической пленки Mo, которые определяют механизмы переноса носителей заряда в контактах.

Поверх монокремния, в зависимости от режимов имплантации и отжига примеси, формируется слой блочного кремния, включающий крупнокристаллический и мелкодисперсный слои кремния, на поверхности которых расположены тонкие (~1–4 нм) оксидные слои кремния и молибдена, контактирующие с пленкой Mo.

В результате отжига при температуре 500 °C в вакууме наблюдается рост зерна пленки Mo до 0,2 мкм. Происходит перестройка межзеренных границ. На электронограммах видны сильные кольцевые рефлексы, пересекающие цепочки точечных рефлексов, что указывает на процесс упорядочения структуры пленки молибдена по сравнению с исходной пленкой, полученной после напыления. Кроме того, имеется ряд слабых колец, принадлежащих фазам дисилицида молибдена  $\text{MoSi}_2$  с гексагональной кристаллической решеткой и низшего силицида молибдена  $\text{Mo}_3\text{Si}$ .

При низких дозах легирования кремния ( $6,25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ) на границе раздела идентифицированы фазы оксидов  $\text{MoO}_3$  и  $\text{Mo}_4\text{O}_{11}$ . Однако при отжиге при 600 °C, помимо оксидов, за счет диффузии атомов кремния в пленку Mo формируется тонкий слой фазы  $\text{Mo}_3\text{Si}$  (рисунок 6 б).

В случае отжига при температуре 600 °C в течение 720 с системы Mo – Si, у которых кремний легирован ионами  $P^+$  дозой  $4,375 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , наряду с фазами силицидов  $\text{Mo}_3\text{Si}$  и  $\text{MoSi}_2$  обнаружено присутствие оксида  $\text{MoO}_2$  (рисунок 7 а).

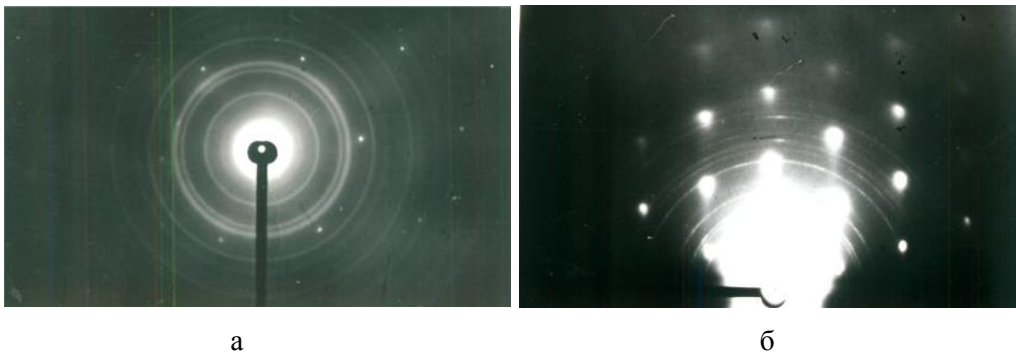


Рисунок 7 – Электронограммы переходного слоя системы Mo – Si, легированной ионами  $P^+$  после отжига: *a* – доза легирования  $4,375 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , отжиг при 600 °C в вакууме в течение 720 с; *б* – доза легирования  $6,25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , отжиг при 600 °C в вакууме в течение 600 с

Легирование кремния ионами  $P^+$  дозой  $6,25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  вызывает образование при отжиге в переходном слое контактов крупнозернистого слоя, состоящего из силицидов  $MoSi_2$  и  $Mo_3Si$ . Особенностью в этом случае является отсутствие оксидов молибдена и образование дисилицида  $MoSi_2$ , имеющего тетрагональную кристаллическую решетку (рисунок 7 б). Отсутствие оксидов, по-видимому, связано с высокой интенсивностью диффузионных процессов, обусловленных наличием большого количества дефектов в поверхностном слое Si.

Облучение системы Mo – Si ионами  $P^+$  приводит к появлению размытых рефлексов от пленки Mo и от поверхностного слоя кремния (рисунок 8), что свидетельствует о сильном разупорядочении структуры пленки Mo и поверхностного слоя кремния, в результате чего значительно возрастает сопротивление контактов [16].

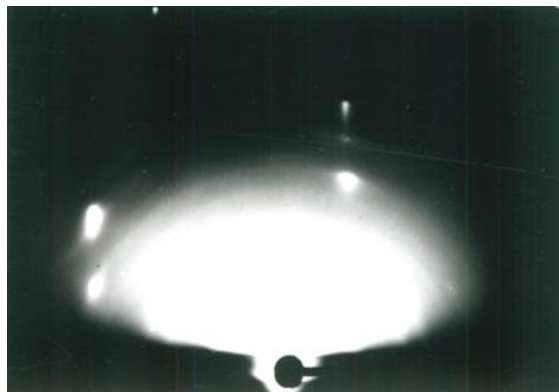


Рисунок 8 – Электронограмма поверхностного слоя Si после внедрения ионов  $P^+$  через пленку Mo

Установлено, что на границе раздела Mo – Si образуется переходная область, которая при дозе облучения  $6,25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  содержит слой со структурой, близкой к аморфной, а при более высоких дозах – поликремний. При этом толщина слоя поликремния может достигать десятков нанометров.

В соответствии с представлениями, развитыми в работе [17], наблюдаемые изменения структуры объясняются образованием при бомбардировке атомов отдачи Mo, которые, попадая в кремний под различными углами, вызывают при сравнительно невысоких дозах сильное разупорядочение, а затем и аморфизацию поверхностного слоя кремния. С повышением дозы имплантации через пленку Mo происходит разогрев узкой области, прилегающей к границе раздела до температур в несколько сот градусов, что приводит к интенсивной диффузии, ранее имплантированной в поверхностный слой легирующей примеси к границе раздела, способствует установлению новых связей между атомами и образованию соединений.

В процессе последующего отжига происходит упорядочение структуры и формирование в переходном слое системы новых фаз – силицидов и фосфидов молибдена, при этом сопротивление контактов уменьшается. Так, при облучении контактной системы Mo – Si ионами  $P^+$  дозой  $6,25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  и термообработке при  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  в переходном слое образуется силицид молибдена  $Si_3Mo_5$  с гексагональной кристаллической решеткой, сверхструктура  $Mo_3Si$  [11] и фосфид молибдена  $-MoP_{0,75}$  (рисунок 9 а, б).

Увеличение дозы легирования ионами  $P^+$  до  $3,125 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  и температуры отжига до  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  приводит к образованию дисилицида  $MoSi_2$  с тетрагональной кристаллической решеткой, а также  $Si_3Mo_5$  и  $MoP_{0,75}$ . Образование при термообработке силицида  $Si_3Mo_5$  обусловлено тем, что ионы  $P^+$  с энергией 100 кэВ вызывают при облучении большое количество атомов отдачи молибдена. Кроме того, при дозе облучения ионами  $P^+$   $3,125 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  образование слоя  $MoSi_2$  происходит ещё до термообработки системы. А при термообработке происходит увеличение толщины слоя  $MoSi_2$ , о чем свидетельствует увеличение относительной интенсивности рефлексов, принадлежащих этой фазе. Характерной особенностью, облученной ионами  $P^+$  системы Mo – Si является отсутствие оксидных слоев, которые разрушаются



потоками, как первичных ионов  $P^+$ , так и атомами отдачи молибдена при внедрении ионов  $P^+$  через пленку Mo.

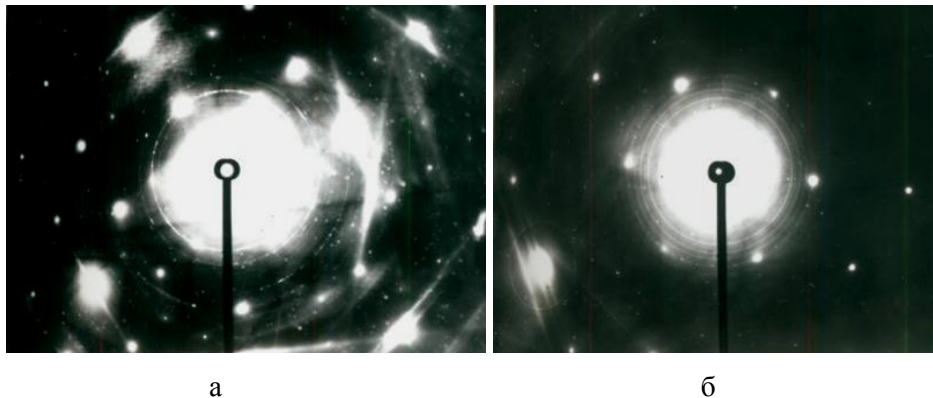


Рисунок 9 – Электронограммы переходного слоя системы Mo – Si после облучения ионами  $P^+$  и отжига:  
а – доза облучения  $6,25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ; отжиг при  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ; б – доза облучения  $3,125 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ; отжиг при  $500 \text{ }^\circ\text{C}$

Определенную роль выполняют и атомы отдачи тугоплавких металлов (Ti, V, Mo, Ta, W), создающие в запрещенной зоне кремния как донорные, так и акцепторные уровни. В работах [18, 19] показано, что такими уровнями обладают все вышеприведенные тугоплавкие металлы. Титан обладает в кремнии одним уровнем, расположенном в запрещенной зоне. Отстоящем от дна зоны проводимости на 0,2 эВ (характер уровня не указан). Ванадий имеет два уровня: один расположен на 0,49 эВ от дна зоны проводимости, второй – на 0,4 эВ от валентной зоны (характер уровня не указан). Молибден имеет три донорных глубоких уровня: один – отстоящий от дна зоны проводимости на 0,33 эВ, два – на 0,3 и 0,34 эВ от валентной зоны соответственно. Тантал имеет два уровня 0,14 и 0,43 эВ, расположенных у дна зоны проводимости (характер уровней не указан). У вольфрама пять глубоких уровней, из которых три – акцепторных, расположенных от дна зоны проводимости на 0,22, 0,3 и 0,37 эВ соответственно, а также два донорных уровня, отстоящих от валентной зоны на 0,34 и 0,31 эВ.

При использовании тантала и вольфрама [3] удается получить более низкое электросопротивление контактов как после облучения, так и в обычном процессе. Это связано, вероятно, с низкими скоростями твердофазных реакций, в результате которых образуется достаточно тонкий переходный слой, обладающий стабильными свойствами вплоть до высоких температур термообработки. Отсутствуют также (или очень малы) термомеханические напряжения.

В работе [18] отмечено, что глубокие уровни, создаваемые примесями, могут быть связаны как с комплексами «примесь – вакансия», так и с ассоциациями примесей. При этом примесь может находиться в междоузлиях кристаллической решетки кремния. Это характерно для переходного слоя контактов «тугоплавкий металл – кремний», подвергнутых облучению ионами.

Таким образом, анализ влияния дозы легирования эпитаксиального слоя кремния ориентации (111) ионами фосфора и температуры постимплантационного отжига на структуру поверхностного слоя кремния ориентации (111) показал, что в процессе активирующей термообработки часть точечных дефектов (вакансии) перестраивается в крупные структурные образования с образованием дислокаций. При ориентации длинной стороны окна в активной структуре шириной  $b$  в  $\text{SiO}_2$  вдоль направления  $\langle 110 \rangle$  образующиеся при отжиге внеконтурные дислокации распространяются за пределы окна только с одной его стороны. Дислокационная сетка, формирующаяся в этом случае в активной области структур, имеет в 3 раза меньший размер ячеек, границы которых в большинстве случаев близки к направлениям  $\langle 110 \rangle$  кристаллической решетки кремния (рисунок 7 б). Учет полученных результатов при изготовлении кремниевых биполярных СВЧ-транзисторов с глубиной залегания  $p$ - $n$ -переходов менее 1 мкм позволит повысить их надежность и улучшить электрические характеристики.

### Результаты и их обсуждение

Исследования проводились на образцах двух типов. Первые представляли собой тестовые образцы, технология изготовления которых была максимально приближена к технологии изготовления кремниевых эпитаксиально-планарных  $n-p-n$  генераторных СВЧ-транзисторов.

*Результаты моделирования.* Анализ распределения фосфора в приповерхностной области эпитаксиального слоя кремния транзисторной структуры прибора КТ916А показывает (рисунок 10. а, б), что профиль распределения фосфора по глубине в транзисторной структуре прибора, изготовленного как по новой, так и стандартной технологии, незначительно изменился после облучения контактов по сравнению с необлученными контактами. Следует отметить, что в приповерхностной области кремния концентрация фосфора возросла в обоих случаях при облучении контактов.

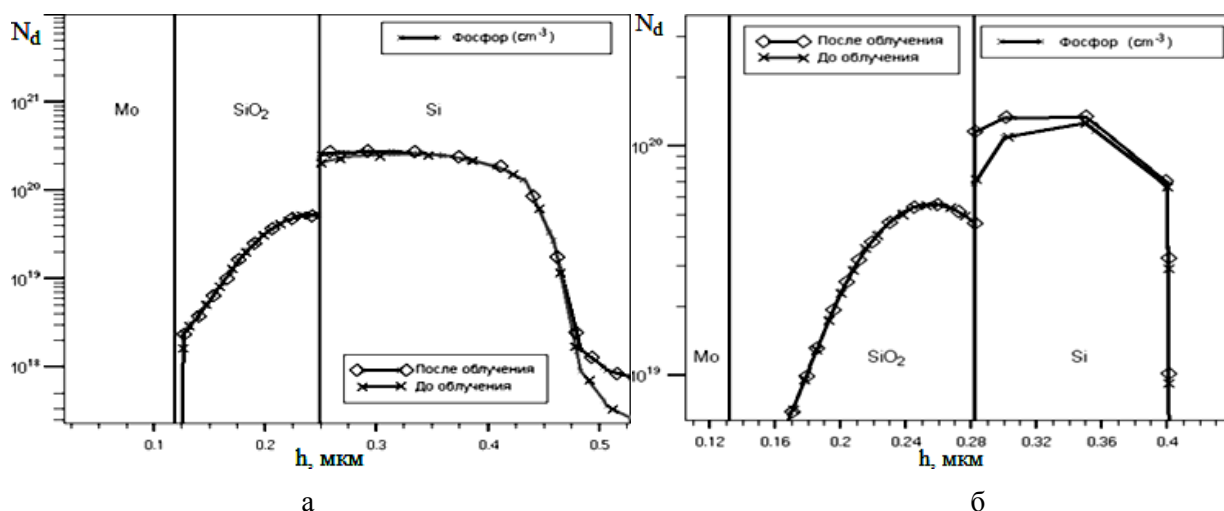


Рисунок 10 – Распределение фосфора по глубине  $h$  транзисторной структуры прибора КТ916А до и после облучения ионами фосфора омических контактов Мо –  $n+Si$  с энергией 100 кэВ и дозой  $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  для стандартной (а) и предложенной (б) технологии

Профили распределения фосфора в транзисторной структуре прибора КТ916А, изготовленного по предложенной технологии, для различных доз облучения контактов ионами фосфора для толщин диоксида кремния 0,01 и 0,04 мкм свидетельствуют (рисунок 11 а, б), что поверхностная и максимальная концентрация фосфора растет с повышением дозы бомбардирующих ионов. Наличие участка с постоянной концентрацией фосфора в приповерхностной области кремния при малой глубине диффузии обеспечивает получение эмиттерных переходов с высоким коэффициентом инжекции [20]. При этом прирост концентрации фосфора в приповерхностной области кремния к эмиттерам транзисторной структуры прибора КТ916А больше в случае изготовления приборов по предложенной технологии, нежели по стандартной.

Разрушение оксидных пленок на границе раздела «тугоплавкий металл–кремний» полезно в случае применения контактных окон субмикронных размеров, в которых трудно удалить остатки диоксида кремния при проведении фотолитографии. Более того, существование естественного диоксида кремния в значительной степени изменяет качество контактов «металл – кремний», таких как омический контакт или контакт Шоттки [21].

Как показано в работе [22], при напылении металла в контактном окне, вскрытом в масочном диоксиде кремния, контакт с полупроводником устанавливается всего в нескольких точках. Электросопротивление таких контактных «пятен» по сравнению с соседними участками будет наименьшим, что приводит к шунтированию всего контакта, стягиванию тока к этим «пятнам», шунтованию тока, и при больших плотностях тока ведет к локальному перегреву.

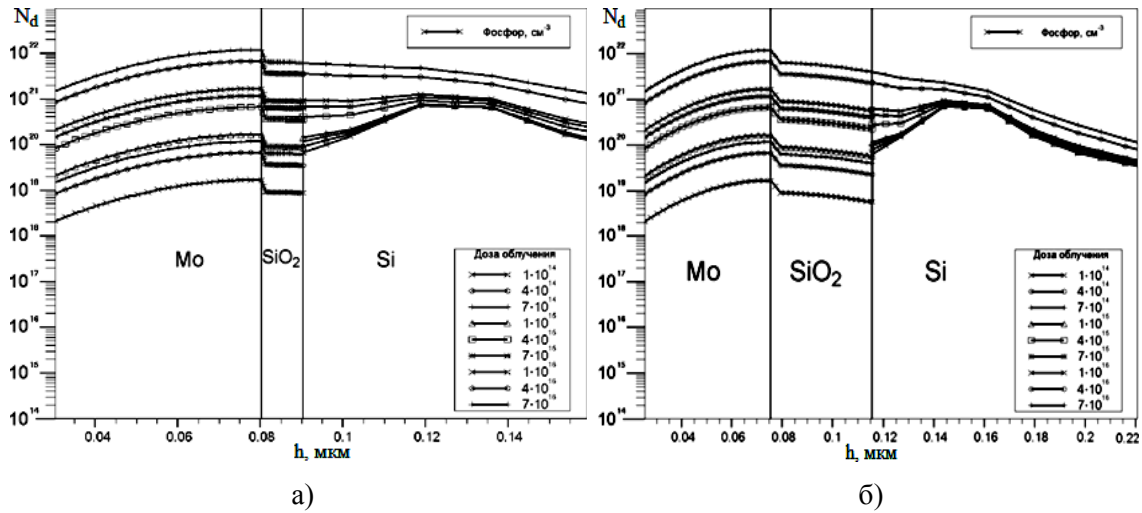


Рисунок 11 – Распределение фосфора по глубине  $h$  транзисторной структуры прибора КТ916А после облучения омических контактов Мо –  $n^+Si$  ионами фосфора с энергией 100 кэВ и дозой в диапазоне  $1 \cdot 10^{14} - 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  для толщины  $SiO_2$  0,01 мкм (а) и 0,04 мкм (б) (предложенная технология)

Однако моделирование не позволяет оценить электрофизические параметры контактов Мо –  $n^+Si$  при облучении их ионами фосфора, а также их влияние на основные параметры транзистора КТ916А. Поэтому целесообразно измерить основные параметры транзистора КТ916А и электрофизические характеристики контактов Мо –  $n^+Si$ , чтобы установить, как влияют характеристики контактов на параметры транзистора КТ916А.

*Результаты измерения параметров транзисторов.* Для корректного сравнения результатов измерения параметров транзисторов, у которых часть контактов к эмиттеру подвергалась воздействию ионов фосфора, кремниевая пластина была наполовину экранирована алюминиевой фольгой.

Измерения на пластине показали, что в результате облучения омических контактов Мо –  $n^+Si$  ионами фосфора величина статического коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером  $h_{21Э}$  снижается в 3–5 раз по сравнению с необлученными контактами. Типовое значение параметра  $h_{21Э}$  составляет по пластине 6–8 единиц.

Результаты замера параметров  $f_{гр}$ ,  $P_{вых}$ ,  $K_{ур}$ ,  $\eta_k$  транзисторов КТ916А в корпусах КТ-16-2 представлены в таблице 1 (стандартная технология).

Таблица 1 – Параметры транзисторов КТ916А, изготовленных по стандартной технологии, при облучении ионами фосфора омических контактов Мо –  $n^+Si$  к эмиттеру

Условия эксперимента	$f_{гр}, ГГц$		$P_{вых}, Вт$ ( $P_{вх} = 8 Вт$ )	$K_{ур}$	$\eta_k, \%$
	при $I_K = 1,5 А$	при $I_K = 2,8 А$			
Контакты не облучались	1,59–1,77	1,47–1,56	20–21	2,5–2,6	64–70
Контакты облучались	2,07–2,19	1,86–2,04	20–21	2,5–2,6	67–79

Результаты замера параметров  $f_{гр}$ ,  $P_{вых}$ ,  $K_{ур}$ ,  $\eta_k$  транзисторов КТ916А, представленные в таблице 1 свидетельствуют, что транзисторы, контакты которых подвергались облучению ионами фосфора с последующим низкотемпературным отжигом, имеют более высокие значения граничной частоты коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером  $f_{гр}$  и коэффициента полезного действия коллектора  $\eta_k$ . Причем повышение  $\eta_k$  обусловлено тем, что транзисторы, контакты которых подвергались воздействию ионов фосфора, отдают одну и ту же мощность  $P_{вых}$  при меньшем токе коллектора, чем транзисторы, контакты которых не подвергались воздействию ионов фосфора.

В таблице 2 приведены результаты экспериментов и моделирования по исследованию зависимости параметров транзисторов КТ916А, изготовленных по предложенной технологии, в зависимости от дозы подлегирования области эмиттера через пленку молибдена. Из таблицы видно, что с повышением дозы облучения ионами фосфора омических контактов

транзистора к эмиттеру растут значения граничной частоты коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером  $f_{гр}$  и КПД коллектора ( $\eta_k$ ). А также снижается удельное сопротивление контактной системы  $\rho_k$ .

Таблица 2 – Доза облучения ионами фосфора омических контактов Мо – n+Si к эмиттеру и параметры транзистора (предложенная технология)

Доза, см <sup>-2</sup>	Концентрация фосфора, см <sup>-3</sup>		Параметры транзистора		Контактная система Al-Mo-n <sup>+</sup> Si $\rho_k$ , Ом·см <sup>2</sup>
	$C_s \times 10^{19}$ , см <sup>-3</sup>	$C_{max} \times 10^{20}$ , см <sup>-3</sup>	$\eta_k$ %	$f_{гр1}(I_K=1,5 \text{ A}) / f_{гр2}(I_K=2,8 \text{ A})$ , ГГц	
$0,5 \cdot 10^{14}$	6,2	7,13	80,8	2,6 / 2,4	$2,6 \cdot 10^{-5}$
$0,9 \cdot 10^{14}$	6,5	7,14	82,2	3,6 / 3,2	$2,4 \cdot 10^{-5}$
$1,5 \cdot 10^{14}$	7,0	7,16	84,2	4,0 / 3,85	$2,2 \cdot 10^{-5}$
$2,5 \cdot 10^{14}$	7,9	7,19	86,7	4,4 / 4,25	$2,1 \cdot 10^{-5}$
$4,0 \cdot 10^{14}$	9,0	7,26	88,3	4,8 / 4,65	$2,0 \cdot 10^{-5}$
$6,2 \cdot 10^{14}$	10,8	7,35	93,0	5,3 / 5,16	$1,0 \cdot 10^{-5}$

Повышение  $\eta_k$ , как и в стандартной технологии, обусловлено тем, что транзисторы, контакты которых облучались ионами фосфора с последующим низкотемпературным отжигом контактов, отдают одну и ту же выходную мощность при меньшем токе коллектора  $I_K$ , чем транзисторы, контакты которых не облучались. Это свидетельствует о том, что снижаются омические потери в пассивных слоях и омических контактах Мо – n<sup>+</sup>Si. Поскольку вклад этих потерь в выходные параметры приборов мал [23], увеличение КПД транзисторов, контакты которого к эмиттеру облучались ионами фосфора, можно объяснить снижением  $\rho_k$  контактов Мо – n+Si после отжига [24].

Следует отметить, что ионная имплантация в структуру «метал – кремний», используя ионы инертных газов, позволяет сформировать слой силицида, но также ведет к образованию пузырьков газа и потому является вредным для применений в приборах [25]. Более подробную информацию по пузырькам газа можно найти в работах [26–27].

Увеличение  $f_{гр}$  обусловлено повышением скорости рекомбинации неосновных носителей в зоне контакта за счет создания атомами отдачи молибдена примесных центров с глубокими уровнями, что в совокупности с остаточной дефектностью приповерхностных слоев кремния позволяет повысить радиационную стойкость биполярных СВЧ-транзисторов [24, 28]. Результаты исследований позволили разработать новый способ изготовления транзистора [29].

Полученные нами результаты по электрофизическим свойствам омических контактов «молибден – кремний», обработкой ионными пучками, а также по влиянию облучения контактов на параметры кремниевых мощных СВЧ-транзисторов не противоречат результатам работы [30]. Поэтому уместно говорить не только об управляемой трансформации электрофизических свойств омических контактов, облученных ионными пучками, но и управляемой трансформации электрических параметров кремниевых мощных СВЧ-транзисторов при облучении их омических контактов ионными пучками [16].

## Выводы

1. После воздействия на разупорядоченный слой относительно невысокой температуры порядка 400–500 °С происходит его кристаллизация и рекристаллизация, сопровождающаяся образованием *промежуточных фаз*, которые насыщены внедренной примесью. При этом, как правило, поверхностное сопротивление кремния снижается до исходного значения. Кроме того, в результате низкотемпературной термообработки в переходном слое отжигаются только сложные дефекты и остается большое количество точечных дефектов, и насыщенный ими переходный слой будет являться стоком дефектов и диффузионным барьером. Поэтому можно ожидать повышенную стабильность контактов, прошедших обработку ионами, по-

сколькx диффузионные процессы будут сконцентрированы в этом слое до тех пор, пока не произойдет его полная перестройка.

2. Имплантация ионов фосфора через пленку молибдена приводит к сложным структурным и фазовым изменениям переходного слоя, формирующегося в контактной системе  $Mo-n^+Si$ . Анализ влияния дозы легирования эпитаксиального слоя кремния (111) ионами фосфора и температуры постимплантационного отжига на структуру поверхностного слоя кремния показал, что в процессе активирующей термообработки часть точечных дефектов (вакансии) перестраивается в крупные структурные образования с образованием дислокаций. При ориентации длинной стороны окна в активной структуре шириной  $b$  в  $SiO_2$  вдоль направления  $\langle 110 \rangle$  образующиеся при отжиге внеконтурные дислокации распространяются за пределы окна только с одной его стороны. Дислокационная сетка, формирующаяся при облучении ионами фосфора системы  $Mo-n^+Si$  с последующим постимплантационным отжигом в активной области структур, имеет в 3 раза меньший размер ячеек, границы которых в большинстве случаев близки к направлениям  $\langle 110 \rangle$  кристаллической решетки кремния. Учет полученных результатов при изготовлении кремниевых биполярных СВЧ-транзисторов с глубиной залегания  $p-n$ -переходов менее 1 мкм позволит повысить их надежность и улучшить их электрические характеристики.

3. Результаты экспериментов и двумерного физико-математического моделирования по исследованию зависимости параметров опытных образцов транзистора КТ916А в зависимости от дозы подлегирования эмиттеров ионами фосфора через пленку молибдена продемонстрировали, что с увеличением дозы легирования растет поверхностная и максимальная концентрация фосфора. При этом улучшаются как энергетические, так и частотные характеристики транзистора, повышается радиационная стойкость.

### Литература

1. Стриха, В. И. Теоретические основы работы контакта металл–полупроводник [Текст] / В. И. Стриха. – Киев : Наукова думка, 1974. – 263 с.
2. Баранцева, О. Д. Изготовление контактов «металл – полупроводник» с заданными параметрами [Текст] / О. Д. Баранцева // Электронная промышленность. – 1982. – Вып. 4(110). – С. 29–35.
3. Бобченко, Ю. Л. Формирование омических контактов «тугоплавкий металл – кремний» при ионной имплантации в область границы раздела [Текст] : автореф. ... дис. канд. техн. наук ; Ин-т электроники АН БССР. – Минск, 1987. – 16 с.
4. Recoil implantation of antimony into silicon [Text] / A. Grob, J. J. Grob, N. Mesli [et al.] // Nuclear Instruments and Methods. – 1981. – V. 182/183. – P. 85–92.
5. Increasing accuracy of high temperature and speed processes micropyrometry [Text] / A. G. Bebiya, M. P. Boronenko, A. E. Seregin [et al.] // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. Tomsk, Russia. – Tomsk, 2015. – V. 93, № 1. – P. 012021.
6. Migration of Mo atoms across Mo – Si interface induced by  $Ar^+$  ion bombardment [Text] / H. Nishi, T. Sakurai, T. Akamatsu [et al.] // Applied Physics Letters. – 1974. – V. 25, № 6. – P. 337–339.
7. Изменение электропроводности приповерхностных слоев кремния при травлении ионами [Текст] / И. А. Аброян, В. В. Дубро, И. А. Ильин [и др.] // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1981. – Вып. 4(147). – С. 36–40.
8. Tokuyama, T. Nature and Annealing Behavior of Disorders in Ion Implanted Silicon [Text] / T. Tokuyama, M. Miyao, N. Yoshihiro // Japanese Journal of Applied Physics 1978. – V. 17, № 8. – P. 1301–1315.
9. Microstructure and evolution of composites prepared by self-propagation high-temperature synthesis [Text] / X.-J. Song, H.-Z. Cui, L.-L. Cao [et al.] // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2016. – V. 26, № 7. – P. 1878–1884.

10. Профили распределения структурных нарушений в кремнии, облученном ионами [Текст] / И. А. Аброян [и др.] // Известия АН СССР. Серия физическая. – 1976. – Т. 40, № 8. – С. 1749–1752.
11. Гурский, Л. И. Особенности фазовых превращений в системе молибден – кремний, подвергнутой ионной бомбардировке [Текст] / Л. И. Гурский, В. А. Зеленин, Ю. Л. Бобченко // Физика и химия обработки материалов. – 1984. – № 5. – С. 72–75.
12. Ходарина, Л. П. Формирование ямок на поверхности Si (111) при термообработке структур Si/Al [Текст] / Л. П. Ходарина, В. А. Зеленин, Л. И. Гурский // Доклады БГУИР. – 2009. – № 3. – С. 73–78.
13. Мощный СВЧ-транзистор: а. с. 683402 СССР, МКИ Н 01 L 29/70 [Текст] / Ю. П. Снитовский, Л. Я. Портнов. – № 2594745 ; заявл. 24.03.78 ; опубл. 20.03.12. – № 8. – С. 484.
14. Снитовский, Ю. П. Использование ориентации эмиттерных областей при изготовлении мощных СВЧ-транзисторов [Текст] / Ю. П. Снитовский, В. А. Зеленин // Твердотельная электроника сверхвысоких частот : межведомственный тематический научный сборник материалов Всесоюзного семинара, Таганрог, 1983. – Таганрог, 1986. – Вып. 2. – С. 38–41.
15. Снитовский, Ю. П. Особенности структуры переходного слоя системы Mo/Si, облученных ионами фосфора [Текст] / Ю. П. Снитовский, Л. П. Ходарина // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 12-й Международной научной конференции, Минск, Беларусь, 19–22 сент. 2017 г. – Минск, 2017. – С. 289–291.
16. Солодуха, В. А. Управляемая трансформация параметров кремниевых биполярных мощных СВЧ-транзисторов [Текст] / В. А. Солодуха, Ю. П. Снитовский // Доклады НАН Беларуси. – 2015. – Т. 59, № 1. – С. 112–117.
17. Физические процессы в облученных полупроводниках [Текст] / под ред. Л. С. Смирнова. – Новосибирск, 1977. – 256 с.
18. Милнс, А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках [Текст] / А. Милнс. – Москва : Мир, 1977. – 562 с.
19. Еремеев, А. В. Новая технология получения кремния для СВЧ-устройств [Текст] / А. В. Еремеев // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2005. – № 1. – С. 12–17.
20. Snitovsky Y. P. New approach to the manufacturing of power microwave bipolar transistors at an irradiation of ohmic contacts: a computer simulation [Text] / Y. P. Snitovsky, V. A. Efremov // Proceedings of SPIE. – 2009. V. 7377. – P. 737718-1–737718-5.
21. Ohmi, T. Ultra clean processing [Text] / T. Ohmi // Microelectronic Engineering. – 1991 – V. 10, № 3–4. – P. 163–176.
22. Effects of a thin SiO<sub>2</sub> layer on the formation of metal – silicon contacts [Текст] / S. M. Goodnick [et al.] // Journal of Vacuum Science and Technology. – 1981. – V. 18, № 3. – P. 949–954.
23. Тагер, А. С. Перспективные направления полупроводниковой электроники СВЧ [Текст] / А. С. Тагер // Литовский физический сборник. – 1981. – Т. 21, № 4. – С. 23–44.
24. Снитовский, Ю. П. Влияние облучения ионами фосфора омических контактов на параметры транзисторов [Текст] / Ю. П. Снитовский // Электронная промышленность. – 1992. – № 1. – С. 59–60.
25. The effect of phosphorus ion implantation on molybdenum/silicon contacts [Text] / S. W. Chiang, T. P. Chow, R. F. Reihl [et al.] // Journal of Applied Physics. – 1981. – V. 52. – № 6. – P. 4027–4032.
26. Kharlamov, M. Y. Arc-Plasma Wire Spraying: An Optical Study of Process Phenomenology [Text] / M. Y. Kharlamov, I. V. Krivtsov, V. M. Korzhyk // Journal of Thermal Spray Technology. – 2015. – Vol. 24. – № 8. – P. 1566–1573.
27. Беграмбеков, Л. Б. Процессы в твердом теле под действием ионного и плазменного облучения [Текст] : учебное пособие / Л. Б. Беграмбеков. – Москва : МИФИ, 2008. – 196 с.
28. Снитовский, Ю. П. Некоторые пути повышения радиационной стойкости биполярных СВЧ-транзисторов [Текст] / Ю. П. Снитовский // Радиационная физика твердого тела :

труды XIV Международного совещания, Севастополь, 5–10 июня 2004 г. – Москва, 2004. – С. 445–449.

29. Способ изготовления транзистора [Текст] : пат. 15265 Респ. Беларусь, МПК7 Н 01L 21/331 / Ю. П. Снитовский, В. В. Нелаев, В. А. Ефремов ; заявитель Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – № а 20090596 ; заявл. 22.04.09 ; опубл. 30.12.11. – Афіцыйны бюл. – 2011. – № 6. – С. 174.

30. Управляемая трансформация электрических, магнитных и оптических свойств материалов ионными пучками [Текст] / Б. А. Гурович [и др.] // УФН. – 2001. – Т. 171, № 1. – С. 105–117.