

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ПЕРЕХОДНОГО СЛОЯ СИСТЕМЫ Mo/Si, ОБЛУЧЕННОЙ ИОНАМИ ФОСФОРА

Ю.П. Снитовский<sup>1)</sup>, Л.П. Ходарина<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>ОАО «Интеграл», ул. Казинца И.П. 121А, 220108 Минск, Беларусь, [yu.snitovsky@tut.by](mailto:yu.snitovsky@tut.by)

<sup>2)</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси,  
ул. Купревича 10, 220141 Минск, Беларусь, [lud\\_vik@bk.ru](mailto:lud_vik@bk.ru)

Рассмотрены вопросы влияния дозы легирования Si(111) ионами P<sup>+</sup>, влияния постимплантационного отжига легированного Si и отжига системы Mo/Si, а также облучения ионами P<sup>+</sup> сформированных омических контактов системы Mo/Si и низкотемпературной термообработки на структуру и фазовый состав переходного слоя.

### Введение

Ионная имплантация является основным методом создания локальных легированных областей в Si [1, 2]. Внедрение ионов приводит к образованию дефектов.

В [2] рассмотрен пошаговый метод получения ионнолегированных слоев Si. Так, доза  $1.1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  ионов P<sup>+</sup> с  $E=1 \text{ МэВ}$  набиралась в 4 шага по  $2.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . При этом дефектность легированных слоев Si снижалась с ростом числа шагов имплантации. В [3], используя протоны, предложен похожий метод. В [4] показано, что наличие естественной пленки SiO<sub>2</sub> оказывает влияние на протекающие на границе раздела Mo/Si процессы фазовых превращений и на воспроизводимость  $r_k$  контактов.

Целью работы является изучение влияния облучения ионами P<sup>+</sup> на структуру переходного слоя контактной системы Mo/Si.

### Методика проведения исследований

Легирование кремниевых эпитаксиальных однослойных структур 7КЭФ1.5/380ЭКЭС0.01 (111) ионами P<sup>+</sup> проводили при  $E_1=40 \text{ кэВ}$ , а системы Mo/Si – при  $E_2=100 \text{ кэВ}$ . Дозу изменяли от  $6 \cdot 10^{13}$  до  $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . После легирования образцы подвергали отжигу при 900–1150°C в атмосфере O<sub>2</sub> в течение 600 с. Методы и образцы для исследований структуры ионнолегированных слоев Si, фазового состава переходных слоев приведены в [5].

### Результаты исследований

Структура переходного слоя системы Mo/Si зависит от состояния поверхности Si, используемого для изготовления структур СВЧ-транзисторов перед проведением операций ионного легирования, постимплантационного отжига и нанесением пленки Mo.

Имплантация ионов P<sup>+</sup> при  $D=6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  приводит к аморфизации поверхностного слоя Si (рис. 1). Разупорядоченный слой имеет небольшую толщину и, судя по наличию рефлексов, ниже его лежат слои, сохраняющие совершенную структуру. Влияние дозы легирования Si ионами P<sup>+</sup> и  $T_{\text{отж}}$  на структуру поверхностного слоя Si показано на рис. 2, 3. В процессе отжига, необходимого для перевода P в узлы решетки, часть точечных дефектов перестраивается в крупные структурные образы – так называемые остаточные нарушения. При отжиге вакансии собираются в плоские диски.



Рис. 1. Электронограмма поверхностного слоя Si(111) после имплантации ионов P<sup>+</sup>

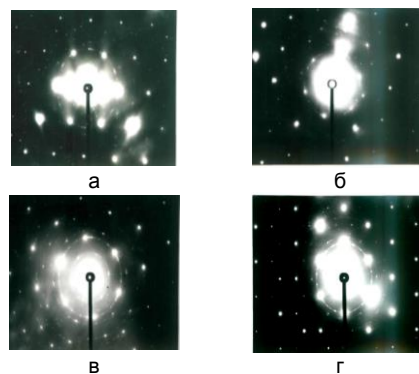


Рис. 2. Электронограммы поверхностного слоя Si(111) после имплантации ионов P<sup>+</sup>. Доза легирования Si ионами P<sup>+</sup>: а, б –  $6.25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ; в, г –  $6.25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ; отжиг: а, в – 940°C; б, г – 1150°C.

Когда их размер достигает критического, происходит схлопывание соседних с вакансионным диском атомных плоскостей с образованием дислокационной петли.

На всех электронограммах наряду с сильными точечными рефлексами от плоскостей ориентации (220), (440) и плоскостей с большими индексами зоны [111] видны рефлексы в виде коротких узких дужек от плоскостей (111) и точечные рефлексы в виде цепочек от плоскостей (220). При малых дозах легирования Si поверхностный слой в случае  $T_{\text{отж}} = 940^\circ\text{C}$  имеет блочную структуру с углами разориентации блоков до  $10^\circ$ . Изменение  $T_{\text{отж}}$  не оказывает заметного влияния на структуру поверхностного слоя Si (рис. 2а, б). Электронограммы свидетельствуют о том, что при  $D \sim 6.25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  происходит сильное разупорядочение кристаллической решетки Si, которое приводит к образованию блочной структуры. При увеличении  $D \geq 6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  наступает аморфизация Si. Рекристаллизация аморфного Si при отжиге приводит к образованию поликристаллической фазы, размер зерна которой зависит от  $T_{\text{отж}}$ . При дозе легирования  $(6.25\text{--}9.375) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  ионами P<sup>+</sup> после отжига при 900–940°C поверхностный слой

состоит из поли-Si, включающего кристаллиты произвольной ориентации (рис. 2в), а после отжига при 1150°C в результате рекристаллизации образуется слой поли-Si с большими размерами зерен (рис. 2г).

Установлено, что при ориентации длинной стороны окна шириной  $b$  в  $\text{SiO}_2$  по направлению  $\langle 110 \rangle$  образующиеся при отжиге внеконтурные дислокации распространяются за пределы окна только с одной его стороны (рис. 3а), что обусловлено особенностями расположения плоскостей скольжения дислокаций относительно плоскости (111) кристаллической решетки Si [6].

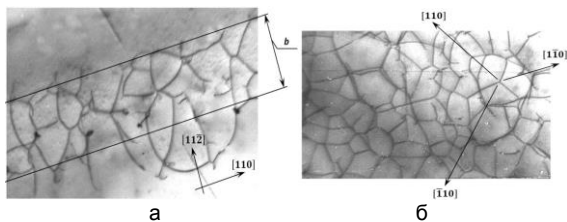


Рис. 3. Дислокационная структура в активной области Si(111): а – доза имплантации  $P^+$   $6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ,  $T_{\text{отж}} = 1150^\circ\text{C}$ ; б – доза имплантации  $P^+$   $6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , доза легирования  $3.125 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  системы Mo/Si,  $T_{\text{отж}} = 500^\circ\text{C}$

Для уменьшения влияния внеконтурных дислокаций на параметры и надежность СВЧ-транзисторов желательно ориентировать более длинную сторону окна по направлению  $\langle 110 \rangle$  [7].

Пленка Mo до отжига имеет мелкодисперсную структуру с размером зерна 0.1-0.2 мкм (рис. 4а). Микроэлектроннограмма свидетельствует, что пленка состоит из множества произвольно ориентированных кристаллитов (рис. 4б).

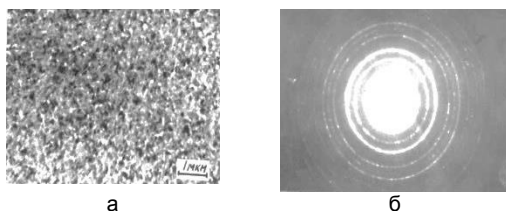


Рис. 4. Структура (а) и микроэлектроннограмма (б) пленки Mo до термообработки

Расшифровка электронограммы, приведенной на рис. 5а, показала, что переходной слой системы Mo/Si до отжига при легировании Si высокими дозами  $P^+$  ( $6.25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ) включает слои поли-Si, Mo и оксида  $\text{Mo}_4\text{O}_{11}$ , который образуется при напылении пленки Mo.

Помимо крупнокристаллического слоя в поверхностном слое образуется также мелкодисперсный слой Si, о чем свидетельствует наличие кольцевых рефлексов, объединяющих мелкие точечные рефлексы, принадлежащие крупнокристаллическому слою Si. Поверх Si в зависимости от режимов имплантации и отжига примеси формируется слой блочного Si, включающий крупнокристаллический и мелкодисперсный слои Si, на поверхности которых расположены тонкие (~1-4 нм) слои оксидов Si и Mo, контактирующие с пленкой Mo.

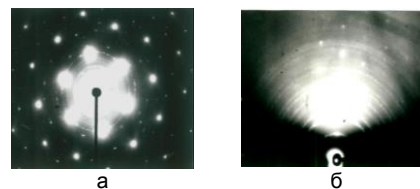


Рис. 5. Электронограмма переходного слоя системы Mo-Si (доза легирования ионами  $P^+$   $6.25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ): а – до отжига; б – после отжига при 600°C в вакууме

Отжиг при 500°C в вакууме приводит к росту 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 Mo по сравнению с исходной пленкой Mo. Кроме того, имеется ряд слабых колец, принадлежащих фазам  $\text{MoSi}_2$  с гексагональной кристаллической решеткой и  $\text{Mo}_3\text{Si}$ .

При низких дозах легирования ( $6.25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ) Si на границе раздела идентифицированы оксиды  $\text{MoO}_3$  и  $\text{Mo}_4\text{O}_{11}$ . Однако при  $T_{\text{отж}} = 600^\circ\text{C}$  помимо оксидов за счет диффузии атомов Si в пленку Mo формируется тонкий слой фазы  $\text{Mo}_3\text{Si}$  (рис. 5б). При  $T_{\text{отж}} = 600^\circ\text{C}$  в течение 720 с системы Mo/Si, у которых Si легирован  $P^+$   $D = 4.375 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , наряду с фазами  $\text{Mo}_3\text{Si}$  и  $\text{MoSi}_2$  обнаружено присутствие фазы  $\text{MoO}_2$  (рис. 6а).

Легирование Si ионами  $P^+$  с  $D = 6.25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  вызывает образование при отжиге в переходном слое контактов крупнозернистого слоя, состоящего из  $\text{MoSi}_2$  и  $\text{Mo}_3\text{Si}$ . Особенностью в этом случае является отсутствие оксидов Mo и образование дисилицида  $\text{MoSi}_2$  с тетрагональной кристаллической решеткой (рис. 6б).

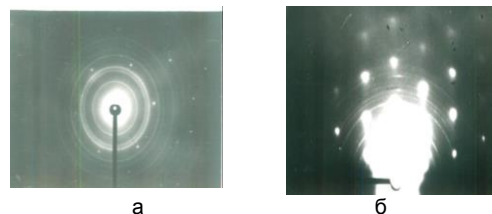


Рис. 6. Электронограммы переходного слоя системы Mo/Si, легированной ионами  $P^+$  после отжига: а – доза  $4.375 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ,  $T_{\text{отж}} = 600^\circ\text{C}$  в вакууме в течение 720 с; б – доза  $6.25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ,  $T_{\text{отж}} = 600^\circ\text{C}$  в вакууме в течение 600 с

Облучение системы Mo/Si ионами  $P^+$  приводит к появлению размытых рефлексов от пленки Mo и от поверхностного слоя Si (рис. 7), что свидетельствует о сильном разупорядочении структуры пленки Mo и поверхностного слоя Si, в результате чего значительно возрастает  $\rho_k$  контактов [8]. Установлено, что на границе раздела Mo/Si образуется переходная область, которая при  $D = 6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  содержит слой со структурой, близкой к аморфной, а при более высоких дозах – поли-Si. При этом толщина поли-Si может достигать десятков нанометров.

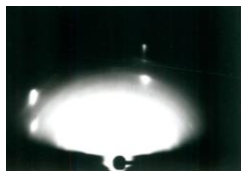


Рис. 7. Электронограмма поверхностного слоя Si после внедрения ионов  $P^+$  через пленку Mo

В процессе последующего отжига происходит упорядочение структуры и формирование в переходном слое системы новых фаз (силицидов и фосфидов молибдена). Так, при облучении системы Mo/Si ионами  $P^+$  с  $D = 6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  и отжиге при  $300^\circ\text{C}$  в переходном слое образуется  $\text{Si}_3\text{Mo}_5$  с гексагональной кристаллической решеткой, сверхструктура  $\text{Mo}_3\text{Si}$  [9] и  $\text{MoP}_{0.75}$  (рис. 8а, б).

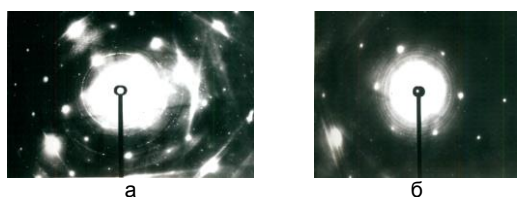


Рис. 8. Электронограммы переходного слоя системы Mo/Si после облучения ионами  $P^+$  и отжига: а – доза  $6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ,  $T_{\text{отж}} = 300^\circ\text{C}$ ; б – доза  $3.125 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ,  $T_{\text{отж}} = 500^\circ\text{C}$

Увеличение дозы легирования ионами  $P^+$  до  $3.125 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  и температуры до  $500^\circ\text{C}$  приводит к образованию  $\text{MoSi}_2$  с тетрагональной кристаллической решеткой, а также  $\text{Si}_3\text{Mo}_5$  и  $\text{MoP}_{0.75}$ . Образование при отжиге  $\text{Si}_3\text{Mo}_5$  вызвано тем, что ионы  $P^+$  с  $E_2 = 100 \text{ кэВ}$  вызывают при облучении большое количество атомов отдачи Mo.

К тому же, при  $D_2 = 3.125 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  облучение ионами  $P^+$  приводит к появлению слоя  $\text{MoSi}_2$  ещё до отжига системы. А при отжиге происходит увеличение толщины  $\text{MoSi}_2$ , о чем свидетельствует увеличение относительной интенсивности рефлексов, принадлежащих этой фазе. Особенно-

стью облученной ионами  $P^+$  системы Mo/Si является отсутствие слоев оксида, которые разрушаются потоками как первичных ионов  $P^+$ , так и атомами отдачи Mo. 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 Si (рис. 3б).

### Заключение

Облучение ионами  $P^+$  системы Mo/Si приводит к сложным структурным и фазовым изменениям переходного слоя. При ориентации длинной стороны окна в активной структуре шириной  $b$  в  $\text{SiO}_2$  по направлению  $\langle 110 \rangle$  образующиеся при отжиге внеконтурные дислокации распространяются за пределы окна только с одной его стороны. Дислокационная сетка, формирующаяся при облучении ионами  $P^+$  системы Mo/Si с последующим 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 Si.

### Список литературы

1. Технология ионного легирования. / Пер. с япон.; под ред. П.В. Павлова. М. 1974.
2. Челядинский А.Р., Комаров Ф.Ф. // УФН. 2003. Т. 173. № 8. С. 813–846.
3. Данилов В.Ф., Снитовский Ю.П., Рассадин А.А., Калиновченко В.П. // А. с. 897048 СССР с пр. 09.09.1980.
4. Снитовский Ю.П. // Электрон. промышленность 1992. № 1. С. 59–60.
5. Снитовский Ю.П., Ходарина Л.П. // Докл. БГУИР. 2017. № 1. С. 5–12.
6. Ходарина Л.П., Зеленин В.А., Гурский Л.И. // Докл. БГУИР. 2009. № 3. С. 73–78.
7. Снитовский Ю.П., Портнов Л.Я. // А. с. 683402 СССР с пр. 24.03.1978.
8. Солодуха В.А., Снитовский Ю.П. // Докл. НАН Беларуси. 2015. Т. 59. № 1. С. 112–117.
9. Гурский Л.И., Зеленин В.А., Бобченко Ю.Л. // Физика и химия обработки материалов. 1984. № 5. С. 72–75.

### PECULIARITIES OF TRANSITIONAL LAYER STRUCTURE OF THE Mo/Si SYSTEM, IRRADIATED BY PHOSPHORUS IONS

Yu. P. Snitovsky, L.P. Khodarina

ОАО «Integral», 121A Kazinka I.P., 220108, Minsk, Belarus, yu.snitovsky@tut.by  
Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus,  
10 Kuprevich str., 220141 Minsk, Belarus, lud\_vik@bk.ru

Questions of the implantation fluency of Si(111) by of phosphorus ions influence, the effect of post-implant annealing of Si implantation and an annealing of Mo–Si system and of irradiation by phosphorus ions of generated ohmic contact of system Mo/Si and an annealing at low temperatures on the structure and phase composition of transitional layer have been considered.