



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

97-216

P14-97-216

В.Ф.Реутов, А.С.Сохацкий

ПЭМ-ИЗУЧЕНИЕ  
В ГЕОМЕТРИИ «CROSS-SECTION»  
СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В КРЕМНИИ  
В РЕЗУЛЬТАТЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО  
ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ  $N^+ + He^+$  И  $Ar^{8+} + He^+$

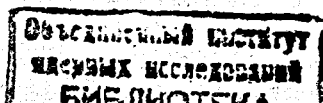
Направлено в «Journal of Applied Physics»

1997

## Введение

Современная полупроводниковая технология характеризуется постоянным стремлением к уменьшению размеров приборов твердотельной электроники. В связи с этим, при применении ионной имплантации требуется все более аккуратное предсказание характера глубинного распределения дефектов и имплантированной примеси. Аккумуляция дефектов и сопутствующие им качественные структурные изменения, например аморфизация, влияют на имплантационный профиль радиационного повреждения. Эти эффекты становятся важными для средних и высоких имплантационных доз, когда свойства границы, образующейся между аморфным и кристаллическим кремнием, могут влиять на характер поведения радиационных дефектов и имплантированной примеси вблизи нее.

В настоящей работе методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в геометрии "cross-section" изучены особенности поведения в кристаллическом кремнии радиационных дефектов, образующихся при облучении ионами He, вблизи границы аморфного слоя, сформированного бомбардировкой ионами химически активного (N) и инертного (Ag) элементов.



## Результаты

В качестве объекта для исследования была взята пластина кремния (100) толщиной 0,4 мм, из которой были вырезаны образцы размером 4x4 мм. После химического утончения по специальной методике из них получались тонкие (толщиной 0,1-0,3 мкм) пластинки с размером, удобным для манипуляций в процессе облучения и ПЭМ-анализа. Толщина тонких пластин была приемлемой для их анализа в просвечивающем электронном микроскопе при ускоряющем напряжении 100 кВ. Один из торцов каждой пластинки формировался сколом по плоскости (110) и являлся бомбардируемой поверхностью. Образцы зажимались между двумя металлическими пластинами, служащими одновременно коллиматором для бомбардирующих частиц. Сборка ориентировалась таким образом, чтобы бомбардируемая поверхность торца тонкой пластинки Si была перпендикулярна пучку ионов.

Первоначальное облучение одной сборки проводилось ионами  $N^+$  с энергией 40 кэВ до дозы  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , другой - ионами  $Ag^{8+}$  с энергией 16,9 кэВ/заряд до дозы  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . После соответствующего ПЭМ-анализа данные образцы вновь облучались (совместно с контрольными одразцами) ионами  $He^+$  с энергией 16,9 кэВ до дозы  $1,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ .

Энергетические профили концентрации радиационных дефектов и имплантированных примесей рассчитывались по специальной программе [1], учитывающей реальную толщину образца. Результаты расчетов приводятся совместно с ПЭМ-снимками.

На рис.1 приведен характерный электронно-микроскопический снимок структурных изменений в кремнии вдоль направления движения ионов  $He^+$  с энергией 16,9 кэВ (а), сопряженный с

расчетными (с учетом толщины образца, равной 140 нм) профилями радиационных дефектов и имплантированного гелия (б). Как видно из рисунка, дефектная область распространяется на глубину до 450 нм и состоит из трех областей: А, В и С.

Область А включает в себя аморфный слой, распространяющийся на глубину 230 нм и включающий зону "а" шириной 130 нм со структурными особенностями, напоминающими гелиевые поры. Концентрация гелиевых пор уменьшается по направлению к бомбардируемой поверхности. Отметим, что граница аморфного слоя приходится на максимальную концентрацию гелия (около 1,6 ат.%) и уровень повреждения, соответствующий 2,3 сна.

Область В - это слой шириной около 140 нм, содержащий высокую плотность скоплений радиационных дефектов. Несмотря на то, что этот слой пространственно совпадает с областью уменьшения концентрации дефектов и имплантированных атомов, плотность скоплений дефектов в слое В не изменяется. По-видимому, она не зависит от уровня повреждения, а контролируется отношением сна/ат.%He, величина которого практически сохраняется в данном интервале длины пробега  $\alpha$ -частиц. Присутствия гелиевых пор в данной области не обнаружено. Это может быть связано либо с их отсутствием, либо с трудностью их наблюдения на фоне высокой плотности скоплений дефектов.

Область С - это напряженный слой кристаллического кремния шириной до 50 нм, в котором наблюдается небольшая плотность скоплений радиационных дефектов.

В зоне необлученного состояния образца (область D) каких-либо дальнедействующих эффектов в изменении структуры не наблюдалось.

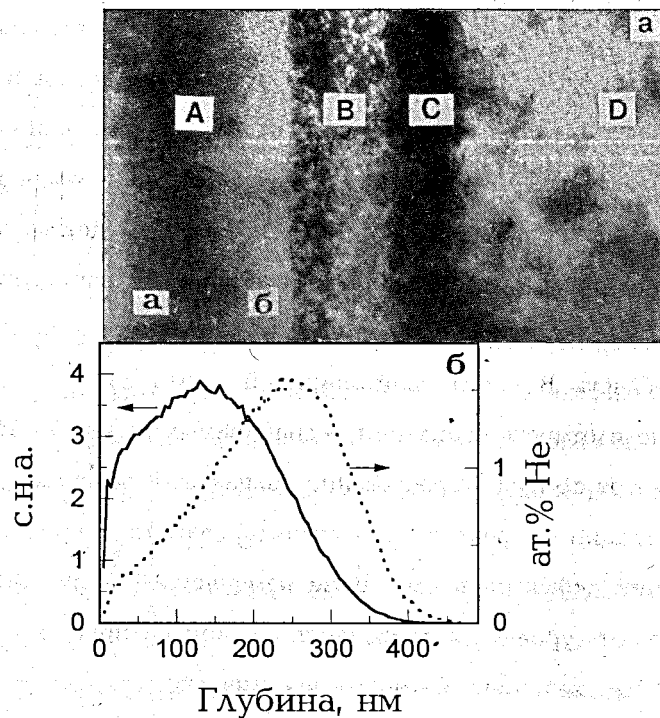


Рис.1. ПЭМ-фотография в геометрии "cross-section", показывающая структурные изменения в кремнии, облученном ионами He с энергией 16,9 кэВ до дозы  $1,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  (а). Расчетные профили радиационных дефектов и имплантированного гелия, вычисленные с учетом толщины образца, равной 140 нм (б).

Рисунок 2 иллюстрирует структурные изменения вдоль пути движения ионов в образце, облученном ионами  $N^+$  (40 кэВ) (рис.2а) и образце, облученном последовательно ионами  $N^+$  и  $He^+$  (16,9 кэВ) (рис.2б). На рис.2в приведены расчетные (с учетом толщины образца, равной 140 нм) концентрационные профили радиационных дефектов и атомов азота.

Как видно на рис.2а, в образце кремния, облученном только ионами  $N^+$ , дефектная область распространяется на глубину до 220 нм (рассчитанная по TRIM величина  $R_p = 92$  нм) и состоит из аморфного слоя (А) шириной около 140 нм и слоя (В) шириной около 80 нм, содержащего скопления радиационных дефектов, плотность которых уменьшается с глубиной. При этом аморфный слой включает две резко очерченных области: приповерхностную область (а), имеющую более светлый контраст, шириной около 50 нм, и более темную область (б), шириной около 90 нм. Размер области (б) достаточно хорошо вписывается в размер профиля легирования азотом при условии его концентрации более 1 ат.%. Достаточно резкая передняя граница области (б) указывает на иное ее структурное состояние по сравнению с областью (а). Это различие либо в степени аморфизации этих областей, либо в фазово-структурном состоянии, в частности, из-за содержащихся в области (б) выделений нитридов кремния.

В результате переоблучения данного образца ионами  $He^+$  с энергией 16,9 кэВ до дозы  $1,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  в образце наблюдаются следующие структурные изменения (рис.2б). Во-первых, несмотря на то, что размер ранее сформированного аморфного слоя при облучении ионами  $N^+$  (см. рис.2а) не изменился, исчезли различия в контрасте между областями (а) и (б). Это обстоятельство, по-

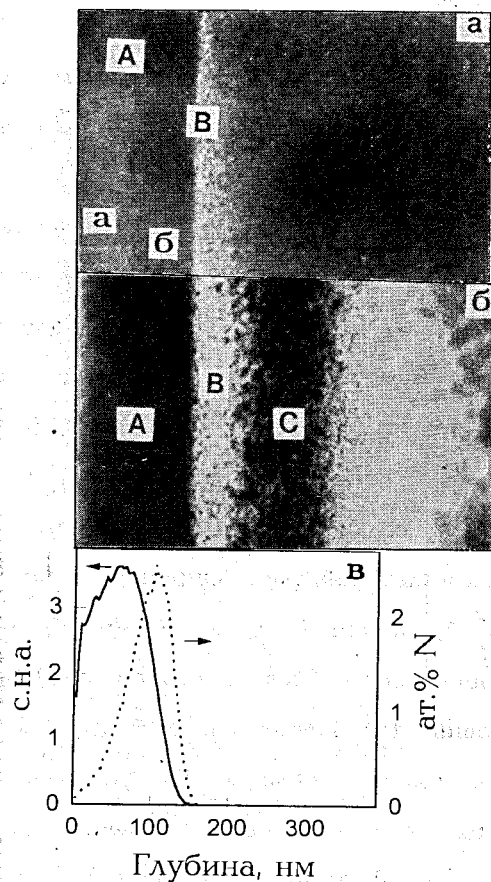


Рис.2. Структурные изменения вдоль пути движения ионов в образце кремния, облученном ионами  $N^+$  с энергией 40 кэВ с дозой  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  (а) и облученном последовательно ионами  $N^+$  и ионами  $He^+$  (16,9 кэВ) (б). Расчетные профили радиационных дефектов и атомов азота для образца толщиной 140 нм (в).

видимому, обусловлено полной аморфизацией области А после дополнительного облучения ее ионами  $He^+$ . Во-вторых, между аморфным слоем (А) от ионов  $N^+$  и областью С (см.рис.2б) с повышенной плотностью дефектов от ионов  $He^+$  имеется область В, в которой не наблюдается не только аморфизации, но и образования гелиевых пор и скоплений радиационных дефектов. При этом размеры области С (рис.2в) и характер распределения скоплений радиационных дефектов в ней сохранились, как и в случае облучения только ионами  $He^+$  (см. рис.1а, область В).

Таким образом, можно заключить, что степень остаточного радиационного повреждения в области В (рис.2б) значительно уменьшилась в условиях облучения ионами  $He^+$  через аморфный слой, предварительно сформированный облучением ионами  $N^+$ . Это обстоятельство, по-видимому, связано: - либо с наличием напряженного состояния в области кристаллического Si, сопряженной с аморфным слоем, и его ролью в перераспределении атомов гелия и радиационных дефектов в процессе облучения; - либо с ролью т.н. "дефектов конца пробега" в рекомбинации дефектов от ионов  $He^+$  в слое В (рис.2а).

Проверка данных гипотез требует дальнейших специальных экспериментов.

Рис.3 иллюстрирует характерные структурные изменения в кремнии вдоль пути движения многозарядного иона  $Ag^{8+}$ , ускоренного до энергии 135,2 кэВ, (т.е.16,9 кэВ/заряд) (рис.3а), а также после дополнительного облучения ионами  $He^+$  с энергией 16,9 кэВ (рис.3б). На рис.3в приведены рассчитанные профили концентрации радиационных дефектов и атомов аргона с учетом толщины образца, равной 140 нм.

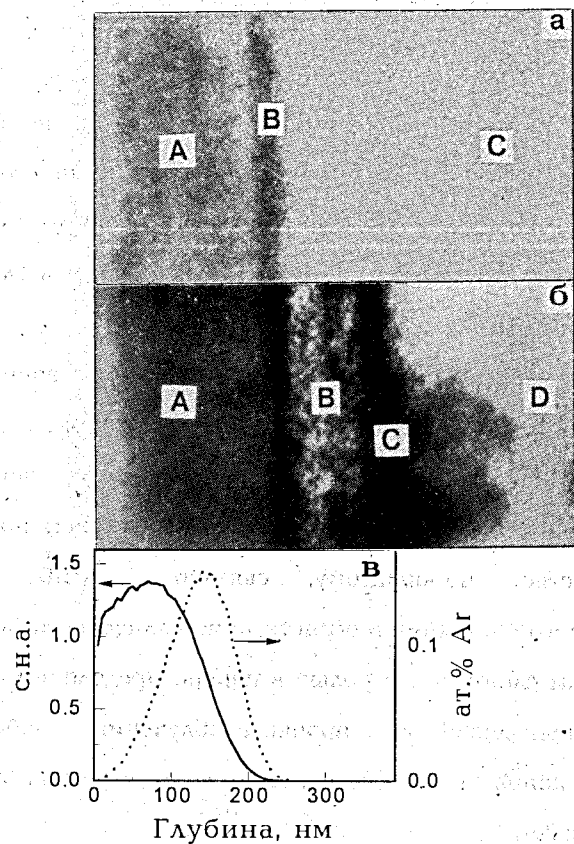


Рис.3. Структурные изменения в кремнии вдоль пути движения ионов  $Ag^{8+}$  с энергией 135,2 кэВ до дозы  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  (а), а также после дополнительного облучения ионами  $He^+$  с энергией 16,9 кэВ (б). Расчетные профили концентрации радиационных дефектов и атомов аргона (с учетом толщины образца, равной 140 нм).

Как видно на рис.3а, после облучения ионами  $Ag^{8+}$  появляются две области повреждения: область А полностью аморфизированного кремния шириной 220 нм и область В размером около 50 нм, расположенная в кристаллическом Si, в которой наблюдаются скопления радиационных дефектов. За пределами этих областей, в необлученной части образца (С), каких-либо структурных изменений не наблюдалось.

После дополнительного облучения данного образца ионами  $He^+$  (рис.3б) отмечаются следующие структурные изменения: во-первых, при сохранении размера аморфного слоя в нем на глубине около 100 нм наблюдается зона шириной 120 нм со структурными особенностями, напоминающими гелиевые поры. Отметим, что подобной газовой пористости не отмечалась в образце, облученном только ионами  $Ag^{8+}$ , т.е. также ионами инертного газа. Этот факт, по-видимому, связан либо с малой концентрацией аргона (в максимуме - около 0,2 ат.%), либо с его меньшей подвижностью по сравнению с атомами гелия.

Во-вторых, непосредственно за аморфным слоем наблюдается зона В шириной около 140 нм с высокой плотностью скоплений радиационных дефектов, достаточно равномерно распределенных в ней. За данной областью располагается напряженная зона С шириной до 100 нм, переходящая в неповрежденную область D.

Итак, в отличие от образца Si, облученного ионами  $N^+ + He^+$ , в образце, облученном  $Ag^{8+} + He^+$ , не наблюдается каких-либо особенностей в изменении профиля повреждения от  $He^+$  вблизи границы аморфного слоя с кристаллическим кремнием. Данное обстоятельство, на наш взгляд, обусловлено:

- либо иным напряженным состоянием аморфного слоя от ионов  $Ag^{8+}$  по сравнению с облучением  $N^+$ , определяющим характер перераспределения дефектов (например, напряжение от газовой фазы (аргоновые поры) меньше напряжения от твердой фазы (нитриды кремния));

- либо с иной природой "дефектов конца пробега", играющих роль в рекомбинации дефектов. В частности, при облучении ионами  $Ag^+$  накапливаются в основном вакансии (из-за их взаимодействия с атомами  $Ag$ ) по сравнению с большей долей сохранившихся междоузлий в случае облучения ионами  $N^+$  (из-за более эффективных взаимодействий атомов химически активного азота с атомами кремния).

Таким образом, можно заключить, что аморфный слой в кремнии, сформированный ионами инертного газа, по-видимому, не обладает т.н. геттерной способностью по отношению к радиационным дефектам, как это имеет место для аморфного слоя, сформированного химически активным ионом азота.

Это неожиданное обстоятельство требует дополнительных экспериментов, направленных как на подтверждение данного факта, так и на выяснение природы и механизма его проявления.

## Литература

1. Реутов В.Ф., Сохацкий А.С. Экспрессный метод ПЭМ-изучения структурных изменений в полупроводниках вдоль пути движения заряженных частиц. Препринт ОИЯИ Р14-97-199, Дубна, 1997.

Рукопись поступила в издательский отдел  
10 июля 1997 года.