

06

## Формирование ультратонких слоев кремния на сапфире

© А.А. Шемухин, Ю.В. Балакшин, В.С. Черныш, А.С. Патракеев,  
С.А. Голубков, Н.Н. Егоров, А.И. Сидоров, Б.А. Малюков,  
В.Н. Стаценко, В.Д. Чумак

Научно-исследовательский институт ядерной физики  
им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета  
им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ)  
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт материаловедения, Зеленоград  
(ЗАО НИИМВ)  
ЗАО ЭПИЭЛ  
E-mail: shemuhin@gmail.com

Поступило в Редакцию 8 июня 2012 г.

Показано влияние энергии, дозы и температуры облучения КНС-структур ионами  $\text{Si}^+$ , а также параметров рекристаллизационного отжига на кристаллическую кремниевую пленку. Определены условия проведения имплантации и рекристаллизационного отжига.

Технология кремний на сапфире (КНС) рассматривается как одна из перспективных для изготовления высокочастотных интегральных схем (ИС) с повышенной плотностью элементов. Структуры, изготовленные по этой технологии, более долговечны, имеют высокую стойкость к радиации и потребляют меньше энергии по сравнению со структурами, изготовленными на массивном кремнии.

КНС-структуры создаются обычно методом газофазного осаждения. В настоящее время для производства микросхем выращиваются кремниевые пленки с толщинами около 300 nm. Однако для изготовления современных электронных приборов желательно иметь толщину кремниевого слоя не более 100 nm. Проблема получения таких тонких слоев заключается в том, что в начале эпитаксиального роста из-за различия параметров кристаллической решетки кремния и сапфира именно в этом слое возникает большое количество структурных дефектов. Наличие таких дефектов является существенным

препятствием для производства интегральных схем на основе КНС-структур.

В ряде работ [1–3] была продемонстрирована возможность уменьшения плотности таких дефектов с помощью ионной имплантации, приводящей к аморфизации кремниевого слоя, и последующих высокотемпературных отжига. До сих пор не оптимизированы параметры процессов имплантации и отжига, не ясны пути существенного улучшения кристаллического совершенства кремниевой пленки. В частности, не ясен вопрос с выбором оптимальной энергии имплантации [4,5].

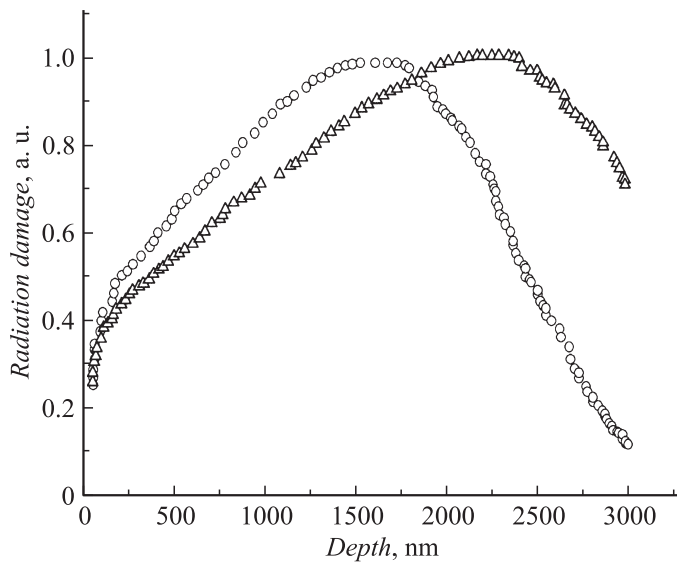
В данной работе приводится детальное исследование влияния параметров имплантации и рекристаллизационного отжига на кристалличность пленки кремния, осажденной на сапфировой подложке.

Эксперименты проводились на КНС-структурах с ориентацией кремниевой пленки (100), толщина которой составляла 300 nm. Структуры были получены по гидридно-хлоридной технологии эпитаксиального наращивания при температуре 950°C на установке PE-2061 с вертикальным реактором.

С помощью программы SRIM проводились расчеты распределения концентрации по глубине внедренных ионов  $\text{Si}^+$  и образовавшихся радиационных дефектов при различных энергиях имплантации. На рис. 1 показана рассчитанная концентрация радиационных дефектов, возникающих в КНС при имплантации ионов кремния с энергиями 150 и 200 keV. Кривые нормированы на максимум. Из рисунка видно, что при увеличении энергии имплантации концентрация радиационных дефектов в кремнии на границе раздела увеличивается примерно в 7 раз.

Облучение КНС-структур проводили на ускорителе HVEE-500. Для предотвращения эффекта каналирования пучок ионов падал на образец под углом  $\alpha = 7^\circ$  от нормали к поверхности. Остаточное давление в камере не превышало  $2 \cdot 10^{-4}$  Pa. Доза имплантации варьировалась от  $10^{14}$  до  $10^{15}$  ion/cm<sup>2</sup>. Для предотвращения нагрева образца плотность тока во время эксперимента поддерживалась постоянной и составляла 1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Равномерность имплантации обеспечивалась сканированием ионного пучка в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для точного определения дозы имплантации использовалась система диафрагм, позволявшая подавить ток вторичных электронов. Образцы крепились к держателю, охлаждаемому до температуры жидкого азота.

После имплантации проводился двухстадийный отжиг образцов в атмосфере азота при температурах 600–950°C. Некоторые из образцов



**Рис. 1.** Приведенная рассчитанная концентрация радиационных дефектов в КНС при имплантации Si с энергией  $\Delta$  — 200 keV и  $\circ$  — 150 keV, с учетом каскадного механизма дефектообразования.

подвергались затем термическому окислению. Образовавшийся оксид удалялся химическим травлением. Это позволило получить пленку кремния на сапфировой подложке толщиной 100 nm.

Контроль кристалличности структуры приготовленных образцов проводился с помощью метода рентгеноструктурного анализа (измерения ширины кривой качания (ШКК)), а также методом резерфордовского обратного рассеяния (РОР). Измерения спектров РОР проводились с применением ионов  $\text{He}^+$  с энергией 1.5 MeV [6] на ускорителе HVЕЕ AN-2500. Пучок ионов падал вдоль нормали к поверхности образца, угол рассеяния составлял  $\theta = 120^\circ$ .

С помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) был проведен анализ границы раздела кремниевая пленка–сапфировая подложка. Исследование проводилось на микроскопе Теснаі G220.

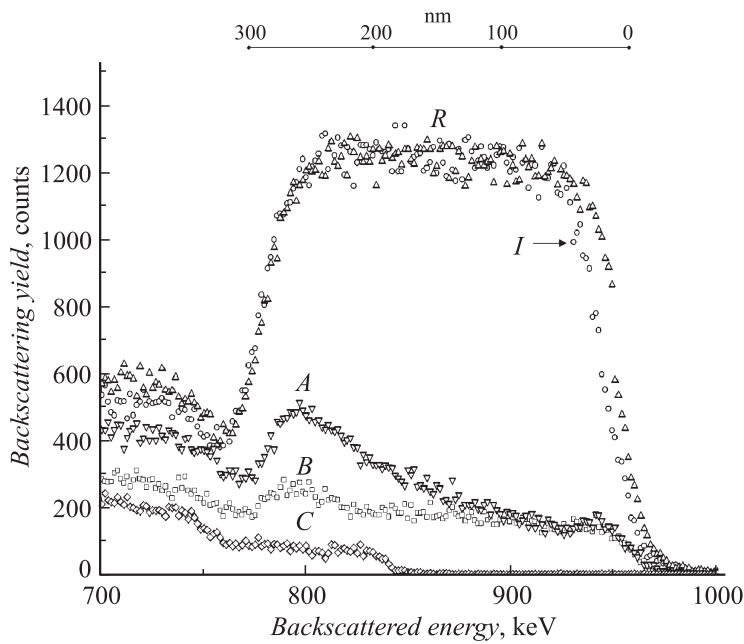
В таблице представлены результаты изучения кристаллической структуры кремниевой пленки с помощью РОР и ШКК после имплан-

Доза имплантации, ion/cm <sup>2</sup>	Параметр кристалличности по ШКК, deg	Параметр кристалличности по POP
1 · 10 <sup>14</sup>	0.43	0.46
2 · 10 <sup>14</sup>	0.42	0.46
4 · 10 <sup>14</sup>	0.37	0.41
6 · 10 <sup>14</sup>	0.36	0.31
8 · 10 <sup>14</sup>	0.38	0.45
10 · 10 <sup>14</sup>	0.67	0.48
Исходная	0.40	0.46

тации ионов кремния с энергией 200 keV различными дозами и последующего высокотемпературного отжига. В столбце 2 представлены параметры кристалличности образцов, полученные методом измерения ширины кривой качания рентгеновской дифракции. В столбце 3 указаны параметры кристалличности, полученные с помощью методики POP. Величины рассчитаны как отношение максимума сигнала обратно-рассеянных ионов He<sup>+</sup> в направлении каналирования к сигналу в направлении, не содержащем открытых каналов. Из представленных данных в таблице видно, что точность определения оптимальной дозы облучения выше при использовании метода POP.

Кроме того, наибольшее улучшение кристаллической структуры достигнуто при облучении ионами Si<sup>+</sup> с дозой 6 · 10<sup>14</sup> ion/cm<sup>2</sup>. При указанных параметрах эксперимента толщина приповерхностной монокристаллической пленки кремния, служащей „затравкой“, составляет около 30 nm. При уменьшении толщины этой области (т.е. при увеличении дозы имплантированных ионов) качество кристалличности структуры падает. Имплантация с меньшими дозами не приводит к разрушению сильнодефектного слоя вблизи границы раздела. В этом случае центрами кристаллизации кроме верхнего „затравочного“ слоя являются и недостаточно разрушенные облучением области. При имплантации с дозами выше 6 · 10<sup>14</sup> ion/cm<sup>2</sup> происходит полное разрушение кристаллической структуры затравочного слоя. Восстановление кристаллической структуры при отжиге, по всей видимости, идет в этом случае от кристаллического слоя, оставшегося у границы раздела кремний–сапфир, не до конца разрушенного ионной имплантацией.

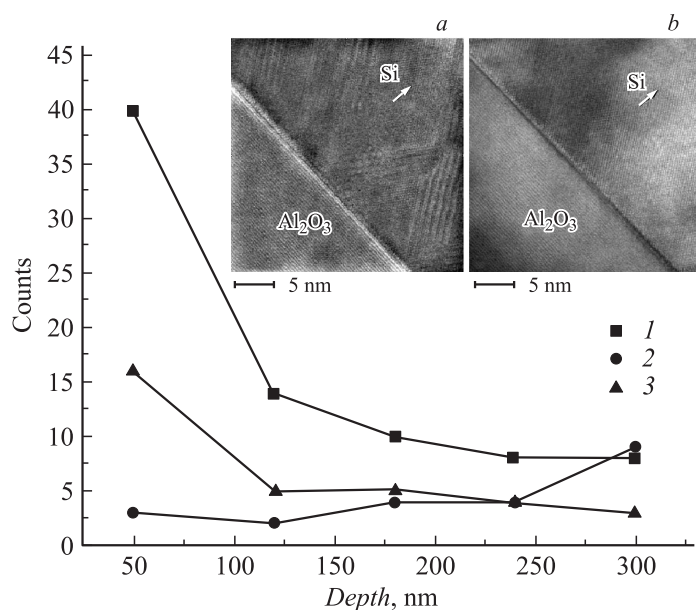
Результаты детального исследования КНС-структуры на всех стадиях обработки представлены на рис. 2. Для удобства представления



**Рис. 2.** Энергетический спектр обратнорассеянных ионов  $\text{He}^+$  с энергией 1.5 MeV для угла рассеяния  $120^\circ$ . *I* (канал): после имплантации 200 keV,  $6 \cdot 10^{14} \text{ Si/cm}^2$ ; *A* (канал): исходная КНС-структура; *B* (канал): имплантирован  $\text{Si}^+$  и высокотемпературная обработка; *C* (канал): после всех стадий обработки; *R* — направление, в котором канал отсутствует.

РОР спектр утоненного до 100 nm образца сдвинут до границы раздела кремний–сапфир.

Из представленного графика видно, что после имплантации в исходной структуре осталась узкая область кристаллического кремния порядка 30 nm вблизи поверхности. Остальная часть пленки кремния полностью аморфизована. Тонкая монокристаллическая область вблизи поверхности кремния является центром кристаллизации для аморфной части. Остальные возможные центры рекристаллизации, находящиеся в сильнодефектной области у границы раздела „кремний–сапфир“, здесь не участвуют в рекристаллизации, по-видимому, из-за резкого уменьшения ее скорости. После проведения высокотемпературной обра-



**Рис. 3.** Зависимость концентрации двойников от расстояния, отсчитываемого от границы раздела кремний–сапфир: 1 — исходная КНС-структура; 2 — после имплантации  $\text{Si}^+$  с энергией 200 keV, дозой  $6 \cdot 10^{14} \text{ Si/cm}^2$ ; 3 — после имплантации  $\text{Si}^+$  и высокотемпературной обработки. На вставке ПЭМ-изображение КНС-структур: *a* — до модификации; *b* — после модификации. Ускоряющее напряжение микроскопа — 200 kV.

ботки качество кристаллической структуры улучшилось более чем в два раза, а после утонения с последующим отжигом остаточных дефектов оно улучшилось в четыре раза по сравнению с исходной структурой. Методика POP в режиме канализования позволяет определить степень дефектности по глубине.

Результаты исследования полученных структур с применением методики ПЭМ (рис. 3) подтверждают полученные данные. Представленный график показывает количество структурных дефектов кремниевой пленки по всей толщине. Видно, что в области толщиной 100 nm вблизи границы раздела кремний–сапфир в исходной пленке имеется большое количество дефектов двойникования. После облучения двойники прак-

тически исчезают, что говорит о рекристаллизации кремниевой пленки также и вблизи границы раздела. Сравнение кристалличности образца после имплантации и термической обработки с исходным состоянием показывает, что концентрация двойников значительно падает. Это хорошо согласуется с данными РОР в режиме каналирования. Отчетливо видно наличие высокой концентрации двойников в исходной структуре (рис. 3, вставка *a*) и их отсутствие после ионной имплантации  $\text{Si}^+$  и последующей термической обработки (рис. 3, вставка *b*).

В результате проведенных исследований получены КНС-структуры с толщиной кремниевой пленки 100 nm высокого качества кристалличности.

Данная работа выполнена в рамках контракта № 10411.1006800.11.055, заключенного с Министерством промышленности и торговли РФ.

## Список литературы

- [1] Nakamura T., Matsushashi H., Nagatomo Y. // Oki Technical Rev. 2004. V. 71 (4). P. 66.
- [2] Golecki I., Madox R.L., Slica K.M. // J. Electron. Mater. 1984. V. 13. P. 373.
- [3] Wang Q., Zan Y., Wang J., Yu Y. // Materials Science and Engineering. B. 1995. V. 29. P. 43–46.
- [4] Александров П.А., Демаков К.Д., Шемардов С.Г., Кузнецов Ю.Ю. // ФТП. 2010. Т. 44 (10). С. 1433.
- [5] Воротынец В.М., Шолобов Е.Л., Герасимов В.А. // ФТП. 2011. Т. 45 (12). С. 1662.
- [6] Тулинов А.Ф., Чеченин Н.Г., Бедняков А.А., Бурдель К.К. и др. Оборудование и методы, используемые в НИИЯФ МГУ для модификации и контроля свойств полупроводниковых и других материалов: Препринт НИИЯФ МГУ 88-57/76. М., 1988. 24 с.