

# Механизмы дефектообразования и рекристаллизации в пленках кремния на сапфире при ионном облучении

© А.А. Шемухин\*<sup>¶</sup>, Ю.В. Балакшин\*<sup>+</sup>, В.С. Черныш\*<sup>+</sup>, С.А. Голубков\*, Н.Н. Егоров\*, А.И. Сидоров\*

\* Научно-исследовательский институт им. Д.В. Скобельцына  
Московского государственного института им. М.В. Ломоносова,  
119991 Москва, Россия

<sup>+</sup> Физический факультет Московского государственного института им. М.В. Ломоносова,  
119991 Москва, Россия

\* Научно-исследовательский институт материаловедения,  
124460 Москва, Зеленоград, Россия

(Получена 4 июня 2013 г. Принята к печати 19 июня 2013 г.)

Исследовано влияние параметров облучения (энергия, доза) КНС-структур ионами Si<sup>+</sup> на качество кристаллической структуры пленки кремния после проведения твердофазной эпитаксиальной рекристаллизации и отжига. Показано, что наиболее эффективным механизмом восстановления кристаллической структуры является рекристаллизация от поверхностного слоя кремния, являющегося затравкой.

## 1. Введение

Кремний на сапфире (КНС) рассматривается как один из перспективных материалов для изготовления высокочастотных интегральных схем (ИС) с повышенной плотностью элементов [1]. Структуры, изготовленные по этой технологии, более долговечны, имеют высокую радиационную стойкость и потребляют меньше энергии по сравнению со структурами, изготовленными на монокристаллическом кремнии.

Обычно КНС-структуры создаются методом газофазного осаждения кремния на монокристаллические сапфировые подложки. В настоящее время, для производства микросхем обычно выращиваются пленки кремния с толщинами около 300 нм. Однако для изготовления электронных приборов с высоким быстродействием толщина кремниевого слоя должна быть не более 100 нм. Проблема получения таких тонких слоев заключается в том, что на ранних стадиях эпитаксиального роста из-за различия параметров кристаллической решетки кремния и сапфира именно в этом слое возникает наибольшее количество структурных дефектов. Наличие таких дефектов является существенным препятствием для производства интегральных схем на основе КНС структур.

В ряде работ [2,3] была продемонстрирована возможность уменьшения плотности таких дефектов за счет эпитаксиальной рекристаллизации в твердой фазе. На первом этапе этого процесса пленка кремния аморфизуется с помощью ионной имплантации. При этом кристаллическая структура пленки кремния вблизи внешней поверхности остается монокристаллической. При последующей высокотемпературной обработке этот слой служит затравкой для рекристаллизации пленки кремния (рекристаллизация от поверхности). В указанных публикациях установлено, что после процедуры отжига кристаллическая структура пленки кремния на сапфире существенно улучшается.

В работе [4] сообщается, что улучшение кристаллической структуры возможно и при активации твердофазной рекристаллизации от границы раздела „кремний-сапфир“. Для этого с помощью ионного облучения полностью разрушали кристаллическую структуру кремниевой пленки, кроме указанной области. При этом сообщается об улучшении качества кристаллической структуры.

В работах [5,6] проводилась аморфизация кремниевой пленки с энергиями и дозами, недостаточными для аморфизации сильнодефектной области вблизи сапфировой подложки. При этом также сообщается об улучшении кристаллической структуры.

Таким образом, анализ опубликованных работ показывает, что до сих пор не ясен механизм существенного улучшения кристаллической структуры кремниевой пленки. В частности, не ясен вопрос с выбором оптимальных параметров имплантации и области рекристаллизации.

В данной работе экспериментально изучены процессы образования дефектов в пленках кремния на сапфире под действием ионного облучения и механизмы эпитаксиальной твердофазной рекристаллизации. Исследовано влияние параметров имплантации и рекристаллизационного отжига на кристалличность пленки кремния, осажденной на сапфировой подложке.

## 2. Методика эксперимента

Эксперименты проводились на КНС-структурах с ориентацией кремниевой пленки (100), толщина которой составляла 250 или 300 нм.

Облучение КНС-структур ионами Si<sup>+</sup> проводили на ускорителе HVEE-500. Для предотвращения эффекта каналирования пучок ионов был разориентирован на угол  $\alpha = 7^\circ$  от нормали к поверхности образца. Остаточное давление в камере не превышало  $2 \cdot 10^{-4}$  Па. Облучение производили ионами Si<sup>+</sup> с энергиями от 120

<sup>¶</sup> E-mail: shemuhin@gmail.com

до 200 кэВ. Доза имплантации варьировалась от  $10^{14}$  до  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>. Для предотвращения нагрева образца плотность тока во время эксперимента поддерживалась постоянной и составляла 1 мкА/см<sup>2</sup>. Равномерность имплантации обеспечивалась сканированием ионного пучка в двух взаимноперпендикулярных направлениях. Для точного определения дозы имплантации использовалась система диафрагм, позволявшая подавить ток вторичных электронов.

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

Контроль кристалличности структуры приготовленных образцов проводился с помощью метода резерфордского обратного рассеяния (РОР). Запись спектров РОР проводилась с использованием ионов He<sup>+</sup> с энергией 1–1.5 МэВ на ускорителе HVEE AN-2500. Пучок ионов падал вдоль нормали к поверхности образца, угол рассеяния составлял  $\theta = 120^\circ$ .

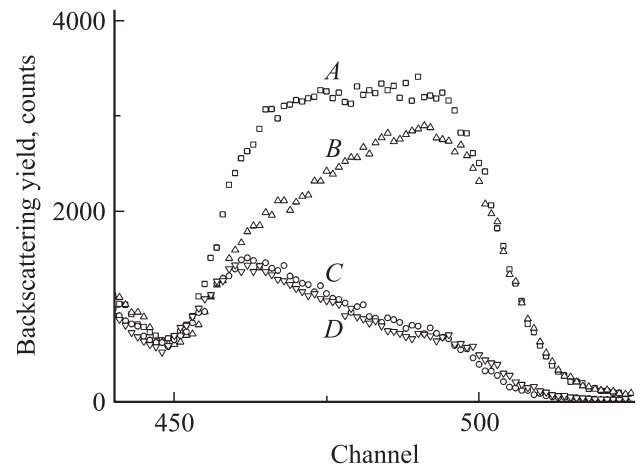
### 3. Результаты и обсуждение

На первом этапе работ изучалась рекристаллизация с использованием затравочного слоя, примыкающего к границе раздела кремний-сапфир. Известно, что полупроводниковые материалы аморфизуются при малых дозах ( $5 \cdot 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>) [7]. В случае разупорядочения пленок кремния, в которых уже присутствуют дефектные области, критические дозы аморфизации требуются еще меньше. При облучении КНС-структур использовались дозы, превышающие  $5 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>. При этом энергия облучения была недостаточной для проникновения внедренных ионов в сильнодефектный интерфейсный слой.

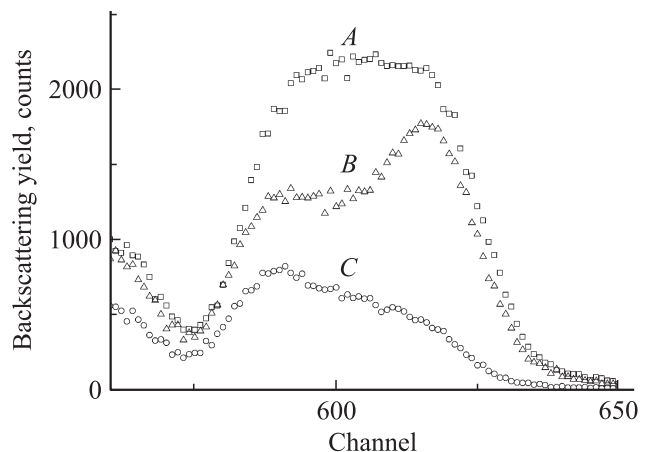
Результаты исследования КНС-структур с помощью методики РОР представлены на рис. 1. Видно, что выход обратнорассеянных ионов He<sup>+</sup> вблизи границы раздела меньше, чем вблизи поверхности. Это говорит о том, что восстановление кристаллической структуры идет от сапфировой подложки. Однако после твердофазной эпитаксиальной рекристаллизации качество кристалличности кремниевой пленки заметно не улучшилось. После проведения повторного отжига при  $T = 1100^\circ\text{C}$  наблюдается некоторое улучшение, по-видимому, связанное с тем, что часть дефектов все же отжигается. При этом для восстановления кристаллической структуры требуется большее время.

Другим возможным вариантом активации рекристаллизации от сапфировой подложки является имплантация в две стадии с разными энергиями. При этом разрушение структуры происходит на разной глубине. Таким образом, варьируя энергию и дозу облучения, можно разупорядочить необходимую толщину кремниевой пленки.

Из представленных на рис. 2 РОР-спектров видно, что и в этом случае высокотемпературный отжиг не приводит к заметному улучшению кристаллической структуры кремниевой пленки. Ступеньки на кривой говорят о том,



**Рис. 1.** Энергетический спектр обратнорассеянных ионов He<sup>+</sup> с энергией 1.5 МэВ для угла рассеяния  $120^\circ$ . *B* (каналирование): после имплантации с  $E = 160$  кэВ, дозой  $5 \cdot 10^{15}$  Si/см<sup>2</sup> и высокотемпературной обработке; *C* (каналирование): исходная КНС-структура; *D* (каналирование): после термообработки при  $T = 1100^\circ\text{C}$ ; *A* — направление, в котором канал отсутствует. Пленка 300 нм.



**Рис. 2.** Энергетический спектр обратнорассеянных ионов He<sup>+</sup> с энергией 1.5 МэВ для угла рассеяния  $120^\circ$ . *B* (каналирование) — после двойной имплантации:  $5 \cdot 10^{14}$  Si/см<sup>2</sup> (130 кэВ) +  $5 \cdot 10^{14}$  Si/см<sup>2</sup> (65 кэВ) и термообработки при  $T = 1100^\circ\text{C}$ ; *C* (каналирование) — исходная КНС-структура; *A* — направление, в котором канал отсутствует. Пленка 250 нм.

что при использовании двойной имплантации разупорядочение в пленке кремния происходило неравномерно. Между профилями распределения внедренных ионов есть буферный слой, в котором структура не полностью разупорядочена. Таким образом, при проведении двойной имплантации в пленке кремния, на „стыке“ профилей распределения внедренных ионов могут оставаться неразрушенные облучением области, по которым может происходить восстановление структурных дефектов. Дальнейшее увеличение температуры и времени

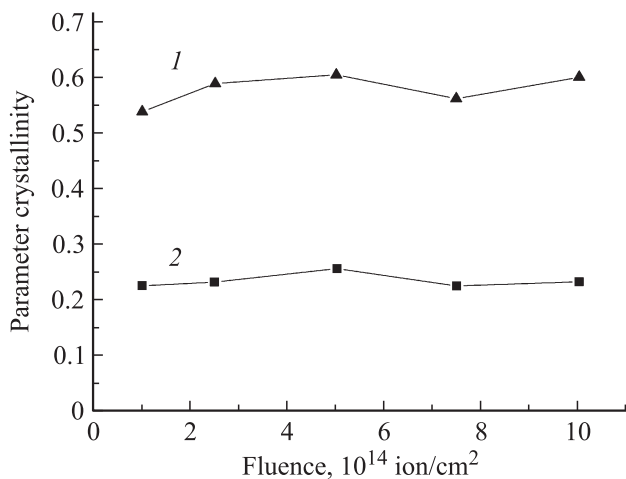


Рис. 3. Зависимость качества кристалличности кремниевой пленки от энергии облучения.

отжига приводит к внедрению алюминия в кремниевую подложку.

Таким образом, наши исследования не подтверждают вывода работы [4] о том, что при рекристаллизации от затравки на границе раздела может быть получен малодефектный рекристаллизованный слой. Отметим, что в указанной работе для исследования кристалличности КНС-структур применялась методика ШКК, которая дает информацию, усредненную по толщине пленки. Авторы установили, что степень кристалличности улучшается в 1.5 раза. Это улучшение кристалличности связано, на наш взгляд, с тем, что после имплантации и высокотемпературного отжига происходит отжиг дефектов в верхней части пленки, тогда как кристаллическая структура сильно нарушенного слоя вблизи границы раздела кремний-сапфир меняется слабо.

На втором этапе работы изучалась возможность реализации рекристаллизации с обеих сторон кремниевое слоя. В этих экспериментах имплантация производилась с энергией, недостаточной для аморфизации сильнодефектной области, а доза подбиралась таким образом, чтобы вблизи внешней поверхности сохранялся монокристаллический слой.

Энергия имплантируемых ионов варьировалась в диапазоне 150–180 кэВ при толщине кремниевой пленки 300 нм. Доза имплантации на всех образцах составляла  $5 \cdot 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>. После проведения отжига были получены спектры РОР образцов. На рис. 3 показаны параметры кристалличности, полученные с помощью методики РОР. Величины рассчитаны как отношение максимума сигнала обратнорассеянных ионов He<sup>+</sup> в направлении каналирования к сигналу, не содержащем открытых каналов. Заметного улучшения структуры в исследуемом диапазоне не происходит. Вероятнее всего, восстановление кристаллической структуры идет по неразрушенным ионной имплантацией центрам в сильнодефектной области.

Для изучения влияния дозы облучения при определенной энергии на процесс рекристаллизации была проведена следующая серия экспериментов. В образцы с толщиной пленки кремния 250 нм была проведена имплантация при энергии 140 кэВ. Набранные дозы варьировались от  $2.5 \cdot 10^{14}$  до  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>. После проведения отжига были получены спектры РОР образцов. Как видно из рис. 4, с увеличением дозы облучения заметного изменения кристаллической структуры не происходит. Наилучшая кристалличность в этом случае была достигнута при дозе облучения  $7.5 \cdot 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>.

Наконец, исследовалась возможность рекристаллизации от внешней поверхности кремниевой пленки. Дозы имплантации варьировались от  $10^{14}$  до  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>.

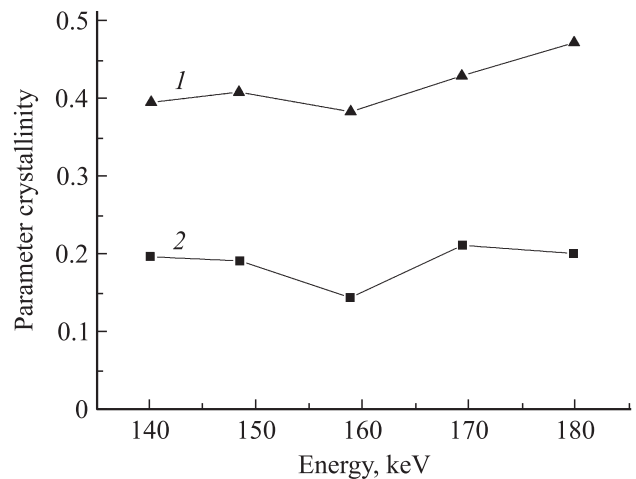


Рис. 4. Влияние дозы на процессы твердофазной эпитаксиальной рекристаллизации с обеих сторон кремниевое слоя.

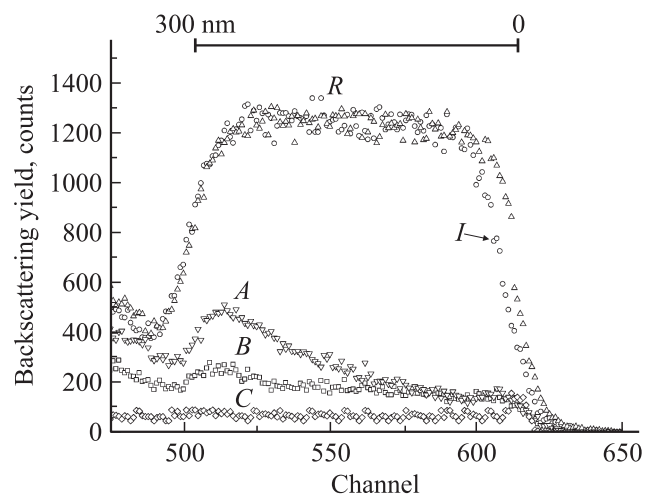


Рис. 5. Энергетический спектр обратнорассеянных ионов He<sup>+</sup> с энергией 1.5 МэВ для угла рассеяния 120°. I (в направлении каналирования): после имплантации 200 кэВ,  $6 \cdot 10^{14}$  Si/см<sup>2</sup>; A (каналирование): исходная КНС-структура; B (каналирование): имплантация + высокотемпературная обработка; C (каналирование): массивный монокристалл кремния; R — направление, в котором канал отсутствует.

После проведения отжига были получены спектры РОР образцов. Детальное исследование было приведено в работе [3]. Максимальное улучшение кристаллической структуры достигается при облучении ионами  $\text{Si}^+$  с дозой  $6 \cdot 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>. Из представленного спектра РОР (рис. 5) видно, что после имплантации в исходной структуре вблизи поверхности сохранилась узкая область монокристаллического кремния толщиной около 30 нм. Остальная часть пленки кремния полностью разупорядочена. Эта тонкая монокристаллическая область является затравочной для кристаллизации всей остальной аморфной части, включая и сильнодефектную область у границы раздела „кремний-сапфир“. При уменьшении толщины этой области (т.е. при увеличении дозы имплантированных ионов) качество кристаллической структуры после твердофазной эпитаксиальной рекристаллизации 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. Для сравнения приведен нормированный РОР спектр массивного кремния, снятый в направлении каналирования (кривая С).

#### 4. Заключение

Таким образом, проведено исследование процессов образования дефектов в пленках кремния на сапфире при облучении ионами  $\text{Si}^+$  с энергиями от 120 до 200 кэВ и в зависимости от дозы облучения. Установлено, что наиболее эффективным механизмом восстановления кристаллической структуры является рекристаллизация от поверхностного слоя кремния, являющегося затравкой. Оптимальная толщина такого слоя 30 нм.

#### Список литературы

- [1] T. Nakamura, H. Matsuhashi, Y. Nagatomo. *Oki Techn. Rev.*, **71** (4), 66 (2004).
- [2] Golecki, R.L. Maddox, K.M. Stika. *J. Electron. Mater.*, **13** (2), 373 (1984).
- [3] 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. Чулак. *ПЖТФ*, **38** (19), 83 (2012).
- [4] П.А. Александров, К.Д. Демаков, С.Г. Шемардов, Ю.Ю. Кузнецов. Патент № 2427941 (2010).
- [5] Qi-Yuan Wang, Ji-Ping Nie, Fang Yu, Zhong-Li Liu, Yuan-Huan Yu. *Mater. Sci. Eng. B*, **72**, 189 (2000).
- [6] В.М. Воротынецов, Е.Л. Шолобов, В.А. Герасимов. *ФТП*, **45** (12), 1662 (2011).
- [7] А.А. Шемухин, Ю.В. Балакшин, П.Н. Черных, В.С. Черныш. *Поверхность* **4**, 25 (2013).

Редактор Т.А. Полянская

#### Defect formation and recrystallization mechanisms in silicon-on-sapphire films under ion irradiation

A.A. Shemukhin\*, Y.V. Balakshin\*\*+, V.S. Chernysh\*\*+, S.A. Golyubkov•, N.N. Egorov•, A.I. Sidorov•

\* Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics  
Lomonosov Moscow State University,  
119991 Moscow, Russia

+ Faculty of Physics Lomonosov  
Moscow State University,  
119991 Moscow, Russia

• Research Institute of Material  
Science and Technology,  
124460 Moscow, Zelenograd, Russia

**Abstract** Silicon-on-sapphire (SOS) structures were implanted with  $\text{Si}^+$  ions with subsequent annealing. The irradiation parameters (such as incident energy and fluence) influence on silicon film crystallinity was investigated. It is shown that most effective crystal structure improvement mechanism is recrystallization with silicon near-surface layer as a primer.