

УДК 539.534.9

Влияние энергии ионов пучка Si^+ на образование дефектов и твердофазную рекристаллизацию вблизи границы раздела кремний-сапфир

А. А. Шемухин, А. В. Назаров, А. В. Кожемяко, Ю. В. Балакшин

В работе исследовано образование дефектов и последующая твердофазная рекристаллизация в пленках кремния на сапфире в процессе облучения ионами кремния с энергиями в диапазоне от 170 до 230 кэВ при различных температурах подложки. С помощью методики резерфордовского обратного рассеяния в сочетании с каналированием обнаружено, что полное разрушение сильнодефектной области зависит от энергии имплантируемых ионов. Энергия разупорядочения сильнодефектной области при температуре жидкого азота — 200 кэВ, а при комнатной температуре — 230 кэВ.

PACS: 29.27.-a

Ключевые слова: ионная имплантация, кремний на сапфире, образование дефектов, аморфизация, резерфордовское обратное рассеяние.

Введение

В результате уменьшения размеров элементов интегральных микросхем увеличилось влияние паразитных эффектов: возросли токи утечки, уменьшились напряжения пробоя. Кремний на сапфире (КНС) рассматривается как один из перспективных материалов для изготовления высокочастотных интегральных схем (ИС) с повышенной плотностью элементов. Структуры, изготовленные по этому методу, более долговечны, имеют высокую радиационную стойкость и потребляют меньше энергии по сравнению со структурами, изготовленными на массивном кремнии.

В настоящее время для производства микросхем отечественной промышленностью налажен выпуск плёнок кремния с толщинами около 300 нм, изготавливаемых методом газофазного осаждения кремния на монокристаллические сапфировые подложки. Однако для изготовления электронных приборов с высоким быстродействием толщина кремниевого слоя должна быть не более 100 нм. Проблема получения таких тонких слоев заключа-

ется в том, что на ранних стадиях эпитаксиального роста из-за различия параметров кристаллической решетки кремния и сапфира именно в этом слое возникает большое количество структурных дефектов. Эти дефекты вызывают токи утечки, когда транзистор выключен, и уменьшают подвижность носителей. Необходимо отметить при этом, что подвижность носителей определяет, как быстро заряды могут ускоряться в полупроводнике, или, косвенно, максимальную частоту транзистора. Таким образом, наличие таких дефектов является существенным препятствием для производства интегральных схем на основе КНС-структур.

Уменьшить количество структурных дефектов в приграничном слое пленки кремния можно с помощью метода ионной имплантации и последующего отжига слоя [1, 2]. На первом этапе процесса кремниевая пленка аморфизуется путем ионной имплантации в области около границы раздела с сапфиром. Энергия бомбардирующих частиц подбирается таким образом, чтобы кристаллическая структура кремниевой пленки вблизи поверхности оставалась неповрежденной. После проведения процедуры отжига кристаллическая структура кремниевой пленки у границы раздела кремний-сапфир существенно улучшается [3].

Задача данной работы состояла в изучении процесса образования дефектов в пленках кремния на сапфире под действием ионного облучения. В частности, для выявления влияния основных параметров ионного пучка (доза, энергия) и температуры КНС-структуры исследовалось образование дефектов при вариации параметров пучка при различных температурах подложки.

Шемухин Андрей Александрович, старший научный сотрудник.

Назаров Антон Викторович, младший научный сотрудник.

Кожемяко Анастасия Владимировна, магистр.

Балакшин Юрий Викторович, программист.

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1.

Тел. 8 (926) 427-56-83. E-mail: shemuhin@gmail.com

Статья поступила в редакцию 2 декабря 2015 г.

© Шемухин А. А., Назаров А. В., Кожемяко А. В., Балакшин Ю. В., 2015

Эксперимент

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

Облучение КНС-структур ионами Si^+ проводили на ускорителе HVEE-500 [4, 5]. 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. Доза имплантации варьировалась от 10^{14} до 10^{15} ион/см². Для предотвращения нагрева образца плотность тока во время эксперимента поддерживалась постоянной и составляла 1 мкА/см². Равномерность имплантации обеспечивалась сканированием ионного пучка в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Для точного определения дозы имплантации использовалась система диафрагм, позволявшая подавлять ток вторичных электронов.

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

Анализ границы раздела КНС-структур проводился на масс-спектрометре вторичных ионов IMS-4F. Для определения профилей концентрации кремния и алюминия в КНС-структуре использовалось послойное травление ионами O_2^+ с энергией 8,5 кэВ. Угол падения пучка ионов был равен 38° (угол отсчитывается от нормали к поверхности образца). Пучок сканировался по площади 200×200 мкм. Ток ионного пучка составлял 200 нА.

Контроль кристалличности структуры приготовленных образцов проводился с помощью метода резерфордского обратного рассеяния (РОР). Запись спектров РОР проводилась с использованием ионов He^+ с энергией 1,5 МэВ на ускорителе HVEE AN-2500. Пучок ионов падал вдоль нормали к поверхности образца, угол рассеяния составлял $\theta = 120^\circ$.

На каждом этапе записывались два спектра РОР, а именно, в направлении каналирования и в направлении, не содержащем открытые каналы. Отношение максимума сигнала обратно рассеянных ионов He^+ в направлении каналирования к сигналу в направлении, не содержащем открытых каналов, характеризует степень кристалличности образца: чем меньше это отношение, тем лучше кристаллическая структура.

Результаты и обсуждение

Первые эксперименты были проведены при температурах жидкого азота. Дозы имплантации варьировались от 10^{14} ион/см² до 10^{15} ион/см². После проведения отжига были получены спектры РОР образцов. Детальное исследование их проведено в работе [6]. Максимальное улучшение кри-

сталлической структуры достигается при облучении ионами Si^+ с дозой $6 \cdot 10^{14}$ ион/см². Из представленного спектра РОР (рис. 1) 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 кристалличности 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.

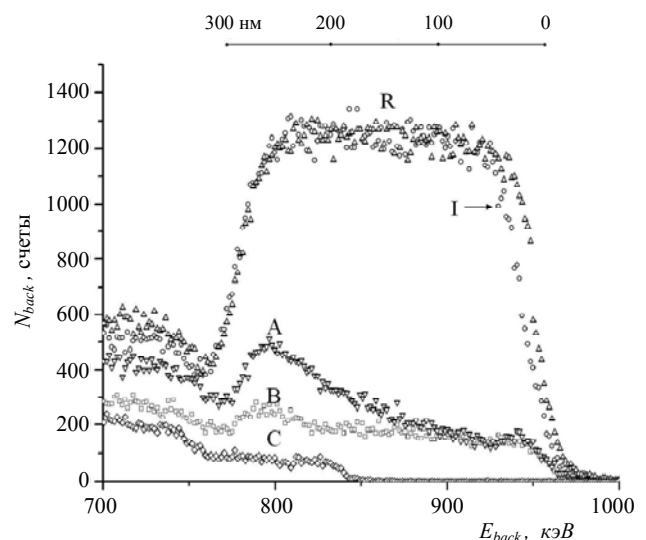


Рис. 1. Энергетический спектр обратно рассеянных ионов He^+ с энергией 1,5 МэВ для угла рассеяния 120° градусов. По горизонтали – энергия обратно рассеянных ионов E_{back} , по вертикали – доза N_{back} обратно рассеянных ионов I (канал): после имплантации 200 кэВ, 6×10^{14} $\text{Si}/\text{см}^2$; A (канал): исходная КНС-структура; B (канал): имплантирован Si^+ + высокотемпературная обработка; C (канал): после всех стадий обработки; R — направление, в котором канал отсутствует

Результаты исследования КНС-структур после проведения ионного облучения и активации твердофазной рекристаллизации с применением методики ПЭМ подтверждают данные измерений РОР. Представленная на рис. 2 зависимость показывает распределение структурных дефектов по толщине кремниевой пленки. Видно, что в области толщиной 100 нм вблизи границы раздела кремний-сапфир в исходной пленке имеется большое количество дефектов двойникования. После облу-

чения двойники практически 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. 2, вставка **a**), и их отсутствие после ионной имплантации Si^+ и последующей термической обработки (рис. 2, вставка **b**).

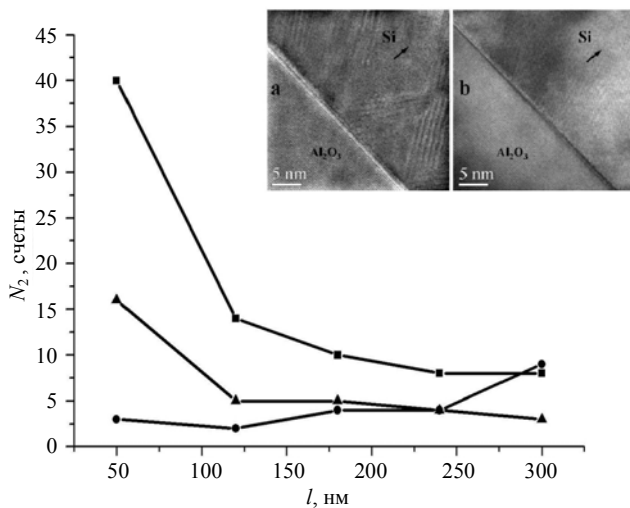


Рис. 2. Зависимость концентрации двойников N_2 от расстояния l , отсчитываемого от границы раздела «кремний-сапфир»:

■ — исходная КНС-структура; ● — после имплантации Si^+ с энергией 200 кэВ, дозой 6×10^{14} ион/см²; ▲ — после имплантации Si^+ и высокотемпературной обработки. Вверху во вставке — ПЭМ-изображение КНС-структур: **a** — до модификации; **b** — после модификации

Однако проведение облучения при температурах жидкого азота ведет к появлению внутренних напряжений. Поэтому дальнейшие эксперименты проводились при температурах вблизи 0 °С. После облучения ионами кремния с энергией 200 кэВ при температуре 0 °С и дозой 6×10^{14} Si/см² слой аморфизуется в области, прилегающей к сапфировой подложке, на половину своей толщины. Что, как показано выше, недостаточно для получения пленки кремния с высоким качеством кристалличности.

В последующих экспериментах было принято решение проводить имплантацию с дозами на уровне 10^{15} ион/см².

Следующая серия экспериментов была направлена на поиски оптимальной температуры, при которой происходит аморфизация интерфейсного слоя кремния ионами кремния с энергией 200 кэВ при температурах ниже 0 °С и дозе 10^{15} ион/см². На рис. 3 приведены РОР-спектры

для образцов, облученных ионами кремния с энергией 200 кэВ при различных температурах при одинаковой дозе (10^{15} ион/см²) облучения.

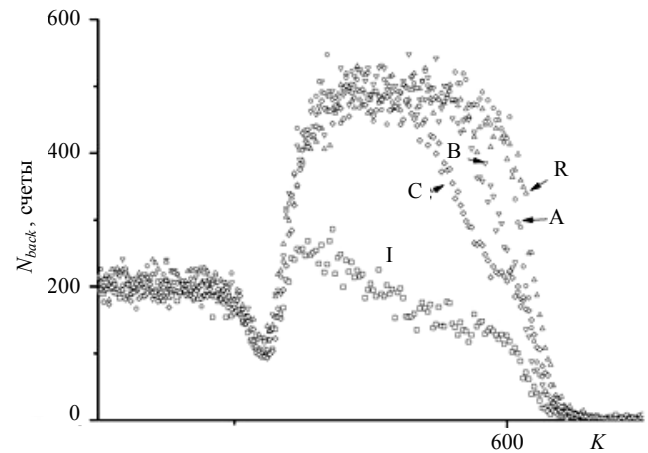


Рис. 3. РОР-спектры образцов, имплантированных при различных температурах. **R** — направление, в котором канал отсутствует; **I** (канал) — исходная КНС-структура; **A** — после облучения при -10 °С; **B** — после облучения при 0 °С; **C** — после облучения при 22,5 °С. По горизонтали — номер канала

Как было указано выше, необходимо, чтобы после имплантации в исходной структуре осталась узкая область кристаллического кремния порядка 30 нм вблизи поверхности. Такой результат был достигнут при облучении ионами Si^+ и температуре 0 °С. При указанных параметрах эксперимента толщина приповерхностной монокристаллической пленки кремния, служащей «затравкой», составляет около 40—50 нм. При уменьшении температуры образца до -10 °С происходит практически полное разрушение кристаллической структуры затравочного слоя. Имплантация при комнатных температурах приводит к созданию «затравочного» слоя большой толщины, в котором присутствуют неразрушенные облучением дефекты. В этом случае восстановление кристаллической структуры при рекристаллизационном отжиге не приведет к заметному улучшению.

Результаты исследования дефектообразования и рекристаллизации при различных энергиях облучения представлены на рис. 4. Доза имплантации составляла 10^{15} ион/см². Облучение происходило при 0 °С. При облучении ионами с энергией 200 кэВ и проведения температурной обработки наблюдается небольшое улучшение кристалличности. Из спектра видно, что в случае имплантации с энергией 215 кэВ количество структурных дефектов на глубинах соответствующих каналам 400—425 заметно уменьшилось. А при энергии 230 кэВ качество кристалличности сильнодефектной области улучшается в еще большей степени. Таким образом для получения пленок кремния на

сапфире при 0 °С, в отличие от облучения при азотных температурах, необходимо увеличить энергию облучения. Объяснить это можно следующим образом: необходимо разупорядочить кристаллическую структуру сапфира вблизи границы кремний-сапфир для того чтобы исключить возможные центры кристаллизации вблизи границы раздела. Разрушение происходит «хвостами» профиля распределения внедренных ионов. При более высоких температурах происходит «самоотжиг» образовавшихся дефектов. Поэтому и необходимо увеличение энергии имплантации.

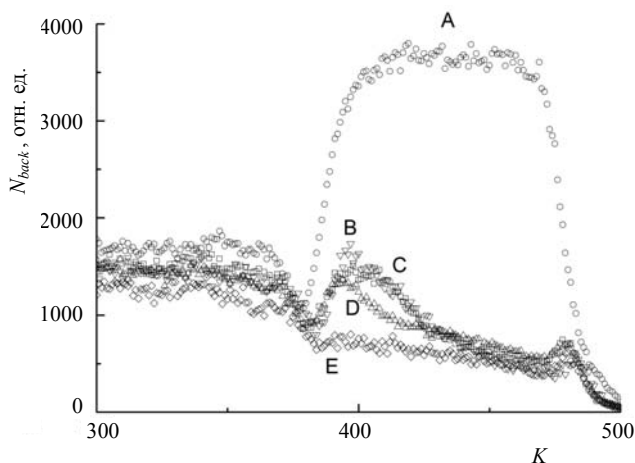


Рис. 4. Энергетический спектр обратнорассеянных ионов He^+ с энергией 1,5 МэВ для угла рассеяния 120 градусов. I (канал): после имплантации 200 кэВ, 10^{15} ион/см²; B (канал): исходная КНС-структура; C (канал): имплантирован Si^+ , 200 кэВ высокотемпературная обработка; D (канал): Si^+ 215кэВ; (E) (канал): Si^+ , 230кэВ; A — направление, в котором канал отсутствует. По горизонтали — номер канала

Анализ границы раздела кремний-сапфир проведен с помощью вторичной ионной масс-спектрометрии. Измерение высоты пиков вторичных ионов основных элементов изучаемой структуры ($^{27}Al^+$, $^{28}Si^+$) проводилось с интервалом ~5 сек, что соответствует распылению слоя кремния толщиной ~1,2 нм. Результаты измерения профилей концентрации кремния и алюминия по глубине представлены на рис. 5. Из рисунка видно, что граница раздела кремний-сапфир достаточно резкая. Область раздела кремний-сапфир соответствует 300 нм. Алюминий проникает в кремний на глубину около 15 нм. Такое поведение зависимости концентрации Al с глубиной связано с так называемым перемешиванием, которое определяется размером каскада атомных столкновений, возникающего в приповерхностном слое за счет бомбардировки ионами O_2^+ . Оценки размера каскада, выполненные с помощью программы SRIM, подтверждают это предположение. Действительно, средний проективный пробег ионов O^+ с энергией 4 кэВ составляет, согласно SRIM, 12,2 нм.

Таким образом, при угле падения первичного пучка $\alpha = 38^\circ$ глубина, на которой происходит перемешивание, составляет 19,2 нм.

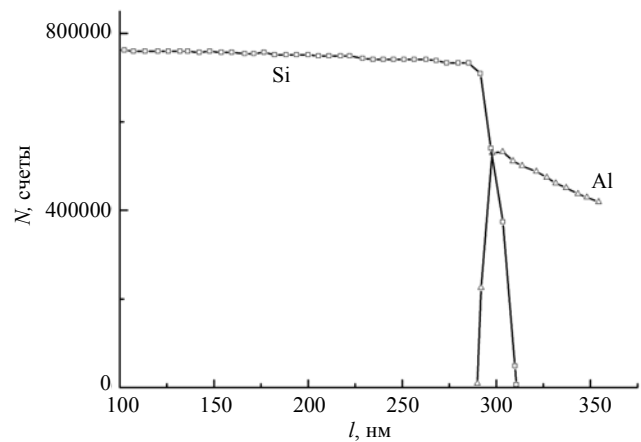


Рис. 5. Профиль концентрации кремния и алюминия

Заключение

Исследование процессов образования дефектов в пленках кремния на сапфире при облучении ионами Si^+ с энергиями от 170 до 230 кэВ в зависимости от дозы облучения позволило установить, что для получения пленок кремния с высоким качеством кристаллическости необходимо разупорядочить кристаллическую структуру сапфира вблизи границы кремний-сапфир. Кроме того, экспериментально показано, что полное разрушение сильнодефектной области зависит от энергии имплантируемых ионов. Оптимальная энергия разупорядочения сильнодефектной области при температуре жидкого азота — 200 кэВ, а при комнатной температуре — 230 кэВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № НК 15-07-99656/15 от 28 января 2015 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шемухин А. А., Балакишин Ю. В., Черныш В. С. и др. // ФТП. 2014. Т. 48. № 4. С. 535.
2. Шемухин А. А., Балакишин Ю. В., Назаров А. В. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 3. С. 56.
3. Shemukhin A. A., Nazarov A. V., Balakshin Yu. V., et al. // Nucl. Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2015. V. 354. P. 274.
4. Шемухин А. А., Балакишин Ю. В., Черных П. Н. и др. // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 59.
5. Шемухин А. А., Балакишин Ю. В., Черных П. Н. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013. № 4. С. 25.
6. Шемухин А. А., Балакишин Ю. В., Черныш В. С. и др. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 19. С. 83.

The influence of the ion energy for the Si^+ beam on the defect formation and solid-phase recrystallization near the silicon-sapphire interface

A. A. Shemukhin, A. V. Nazarov, A. V. Kozhemyako, and Yu. V. Balakshin

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
E-mail: shemuhin@gmail.com

Received December 2, 2015

It has been researched the defect formation and subsequent solid phase recrystallization in silicon films on sapphire during irradiation with silicon ions at energies in the range from 170 to 230 keV at different temperatures of the substrate. Using the Rutherford back-scattering technique in combination with channeling it has been discovered that the total damage of the strongly defected region depends on the energy of implanted ions. The energy of disordering of the strongly defected region at the temperature of liquid nitrogen is 200 keV and at the room temperature is 230 keV.

PACS: 29.27.-a

Keywords: ion implantation, Rutherford back-scattering, Medium Energy Ion Spectrometry, modification and surface analysis.

REFERENCES

1. A. A. Shemukhin, Yu. V. Balakshin, V. S. Chernysh, S. A. Golubkov, N. N. Egorov, and A. I. Sidorov, *Semiconductors* **48**, 517 (2014).
2. A. A. Shemukhin, A. V. Nazarov, Yu. V. Balakshin, and V. S. Chernysh, *Surface Investigation X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques* **8**, 251 (2014).
3. A. A. Shemukhin, A. V. Nazarov, Yu. V. Balakshin, et al., *Nucl. Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **354**, 274 (2015).
4. A. A. Shemukhin, P. N. Chernykh, V. S. Chernysh, Yu. V. Balakshin, and A. V. Nazarov, *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 59 (2013).
5. A. A. Shemukhin, Yu. V. Balakshin, P. N. Chernykh, and V. S. Chernysh, *Surface Investigation X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques* **7**, 318 (2013).
6. A. A. Shemukhin, Yu. V. Balakshin, V. S. Chernysh, et al., *Tech. Phys. Lett.* **38**, 907 (2012).

* * *