

P14-2000-106

В.А.Буренков¹, В.С.Вариченко¹, А.Ю.Дидык,
А.Р.Челядинский¹

**РОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ
В ПОВЕДЕНИИ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ
В КРЕМНИИ ПРИ ОТЖИГЕ**

Направлено в оргкомитет конференции
«Радиационная физика твердого тела»,
Севастополь, июль 2000 г.

¹Белорусский государственный университет, Минск

1. ВВЕДЕНИЕ

При исследовании радиационных нарушений в имплантированных слоях и в облученных кристаллах кремния важной задачей является установление природы основных стоков радиационных дефектов, контролирующих процессы накопления и отжига радиационных нарушений. Одним из стоков радиационных дефектов может быть поверхность кристалла. В этой связи интерес представляет сравнение процессов отжига дефектов в слоях кремния, имплантированного ионами обычных энергий (десятки, сотни кэВ) и больших энергий (сотни МэВ). В первом случае нарушенные слои располагаются непосредственно вблизи поверхности. Во втором случае они могут быть значительно заглублены. Интересно также сравнить отжиг дефектов в кристаллах кремния, облученных реакторными нейтронами, с равномерным распределением дефектов по всему объему кристалла.

В настоящей работе исследовался отжиг радиационных дефектов в кремнии, имплантированном ионами Si^+ с энергией 200 кэВ, ионами Kr^+ с энергией 210 МэВ, а также в кремнии, облученном быстрыми реакторными нейтронами.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы кремния с ориентацией (111) облучались ионами Si^+ с энергией 200 кэВ, дозой 10^{14} см^{-2} , ионами Kr^+ с энергией 210 МэВ, дозой $4 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и быстрыми реакторными нейтронами дозой $4,3 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$.

Радиационные нарушения в облученном кремнии исследовались рентгенодифракционным методом в режиме двухкристального спектрометра на излучении $\text{CuK}_{\alpha 1}$ в четвертом порядке отражения от плоскостей (111). В качестве параметра нарушенности кристалла использовалась величина изменения его периода решетки. В кристаллах кремния, облученных реакторными нейтронами,

измерения периода решетки проводились относительно эталонного образца по модифицированной нами [1] методике [2]. Точность измерений составляла 5×10^{-7} нм. В ионно-имплантированных слоях изменение периода решетки определялось из углового расстояния между максимумами отражения от слоя и ненарушенной подложки. Точность измерений составляла $\pm 1 \times 10^{-6}$ нм.

Профили дефектов строились при последовательном удалении слоев исследованных образцов механической полировкой с использованием алмазной микронной пасты. Точность определения толщины образца составляла $\pm 0,5$ мкм. Отжиг проводился в вакуумных кварцевых ампулах с точностью поддержания температуры ± 2 °С.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате облучения кремния ионами и реакторными нейтронами период решетки кристалла увеличивается. Его восстановление в процессе изохронного (15 мин) отжига представлено на рис.1. Кривой 1 показан отжиг дефектов в слое кремния, имплантированного ионами Si^+ с энергией 200 кэВ. В этом случае нарушенный слой располагается непосредственно у поверхности. Кривая изохронного отжига включает две основные стадии: 100-280 °С и 380-600 °С. Отжиг дефектов в кремнии, облученном реакторными нейтронами, показан кривыми 2 и 3, которые соответствуют отжигу дефектов в глубине кристалла (кривая 2) и на поверхности (кривая 3). При построении кривой 2 после каждого отжига с поверхности образца снимался слой около 20 мкм. Кривая 3 строилась без удаления слоев. В кремнии, облученном нейтронами, отжиг дефектов в глубине кристалла затягивается до 740 °С, тогда как на поверхности отжиг завершается при 650 °С. Неоднородность распределения дефектов по глубине в кристалле кремния, облученном нейтронами, после отжига при двух разных температурах показана на рис.2 (кривая 1 для температуры отжига 160 °С

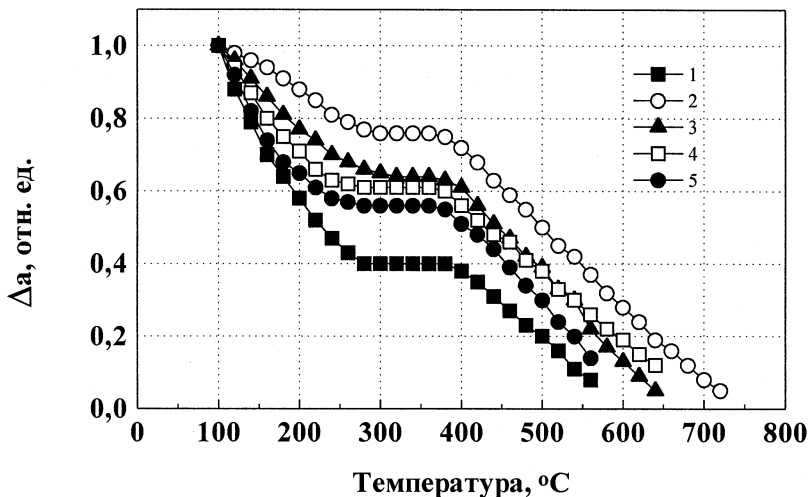


Рис.1. Восстановление периода решетки Δa в процессе изохронного отжига в кремнии, облученном: 1 - ионами Si с энергией 200 кэВ и дозой 10^{14} см^{-2} ; 2, 3 - быстрыми реакторными нейтронами; 4, 5 - ионами Kг с энергией 210 МэВ и дозой $4 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$

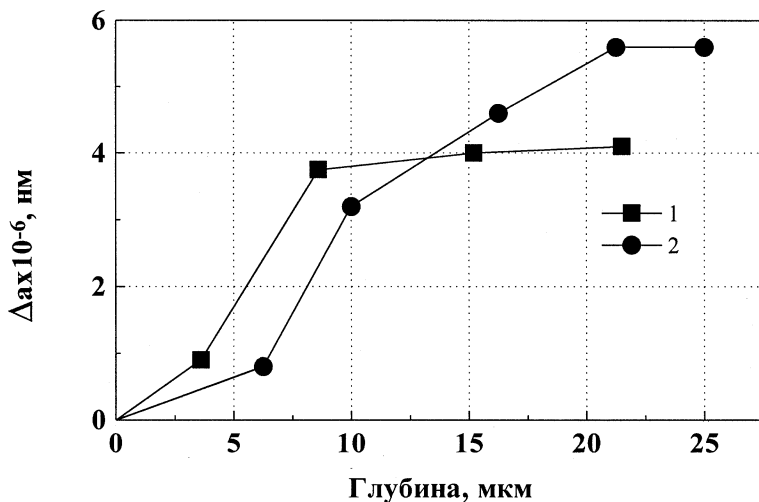


Рис.2. Неоднородность периода решетки Δa по глубине облученного нейтронами кремния: 1 - 160 °C; 2 - 620 °C

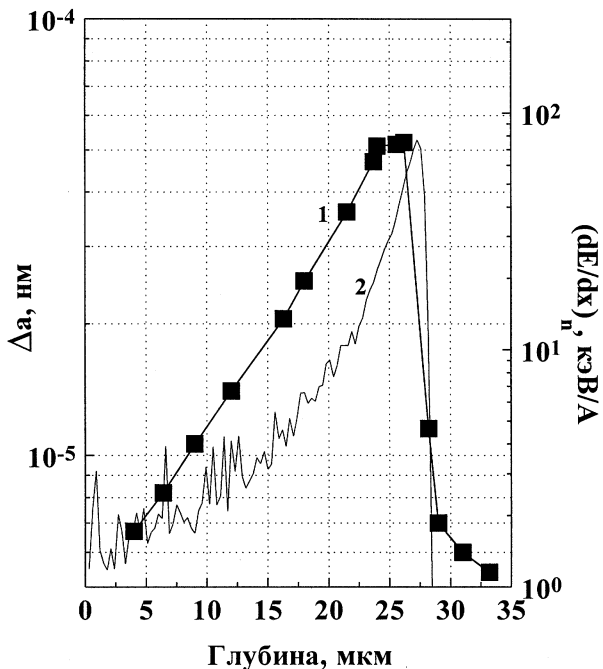


Рис.3. Изменение периода решетки Δa по глубине в кремнии, облученном ионами Кг с энергией 210 МэВ и дозой $4 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (1), и пространственное распределение потерь энергии на упругие соударения $(dE/dx)_n$ (2).

и кривая 2 для 620 °С). Изменение периода решетки по глубине слоя отсчитывается от поверхности, где полагается равным нулю.

На рис.3 кривой 1 показан профиль нарушений в кремнии, облученном ионами Kr^+ с энергией 210 МэВ. Максимум в распределении дефектов лежит на глубине 25,5 мкм, что хорошо соответствует максимуму распределения потерь энергии ионов на упругие взаимодействия (кривая 2), построенного по программе TRIM-90. Для этих структур дифракционная кривая содержит максимум отражения рентгеновских лучей от приповерхностного слоя, и это позволяет построить профиль дефектов по глубине, снимая последовательно слои толщиной 1-2 мкм. Вследствие проникновения излучения глубже нарушенного слоя наблюдается максимум отражения от ненарушенной подложки. Кривая дифракции содержит также отражение от сильно нарушенного слоя на глубине 25,5 мкм. Это позволяет исследовать отжиг дефектов в максимуме их распределения без удаления приповерхностного слоя. В этом случае мы получаем кривую изохронного отжига 4 на рис.1. Кривая 5 соответствует отжигу дефектов в этом же сильно нарушенном слое, но в этом случае предварительно удален слой толщиной 23,5 мкм, так что сильно нарушенный слой лежит непосредственно у поверхности.

Из полученных экспериментальных результатов следует отметить два факта. Во-первых, для радиационных дефектов, расположенных вблизи поверхности, их отжиг заканчивается при более низких температурах, чем для дефектов, находящихся в глубине кристалла. Во-вторых, доля дефектов, отжигающихся на высокотемпературной стадии, существенно выше в глубине кристалла, чем у поверхности. Это характерно как для кремния, облученного нейтронами (кривые 2 и 3 на рис.1), так и для ионно-имплантированного кремния (кривые 4 и 5).

Первая стадия (100-280 °С) восстановления периода решетки совпадает по температурному интервалу с отжигом дивакансий в кремнии, облученном тяжелыми частицами. Дивакансии являются основными устойчивыми при

комнатной температуре дефектами вакансионного типа в кремнии, облученном реакторными нейтронами и ионами [3, 4]. Это позволяет отнести первую стадию восстановления периода решетки к отжигу преимущественно дивакансий. Подтверждением этому являются результаты исследования кремния, облученного ионами лития, который может образовывать комплексы с дивакансиями с присущими им температурами отжига, тем самым, соответственно, определяя температуру восстановления периода решетки [5].

Вторая стадия восстановления периода решетки на основании имеющихся данных по изучению радиационных дефектов в кремнии методом ЭПР [6] может быть связана с отжигом многовакансионных комплексов (Si-P1, Si-P4, Si-P5). Эти сложные комплексы образуются не при облучении непосредственно, а при последующей термообработке.

В температурном интервале первой стадии восстановления периода решетки отжигаются также междоузельные комплексы, известные в положительном зарядовом состоянии как Si-P6 центры [7] с температурой отжига 120 °С (центр стадии изохронного отжига). В интервале второй стадии при 480 °С отжигаются междоузельные дефекты, известные в положительном зарядовом состоянии как Si-B3 [8]. Если по данным ЭПР [7, 8] концентрации парамагнитных центров Si-P6 и Si-B3 на 2-3 порядка ниже концентраций дивакансий, то согласно результатам исследований [5, 9] концентрации обоих типов междоузельных комплексов сравнимы с концентрациями дивакансий. В работе [9] установлено, что, переведенные в нейтральное зарядовое состояние, эти комплексы отжигаются соответственно при температурах 160 и 560 °С.

Наблюдаемое различие в температурах отжига дефектов в зависимости от глубины залегания (рис.1) и неоднородность их распределения по глубине после термообработки (рис.3) могут быть объяснены следующим образом. При термообработке радиационные дефекты частично отжигаются, диффундируя на стоки, частично перестраиваются в более сложные комплексы, отжигающиеся затем на второй стадии. Например, известно, что дивакансии могут

диффундировать в решетке кремния как целое с энергией активации 1,25 эВ [3]. Наблюдаемая неоднородность по глубине образцов как раз и свидетельствует о том, что поверхность является основным стоком радиационных дефектов либо продуктов их распада. Выход на стоки дефектов и, с другой стороны, перестройка в более сложные комплексы являются конкурирующими процессами. В глубине кристалла преобладает перестройка дефектов, тогда как вблизи поверхности они преимущественно выходят на этот сток. Именно в результате этого доля сложных комплексов, отжигающихся на второй стадии, заметно больше в объеме кристалла по сравнению с приповерхностной областью (можно сравнить пары кривых 2 и 3, а также 4 и 5 на рис.1).

Обращает на себя внимание факт, что доля простых дефектов, отжигающихся на первой стадии (100-280 °С), в общем изменение периода решетки вносит максимальный вклад для кремния, имплантированного ионами Si^+ с энергией 200 кэВ (рис.1, кривая 1). Минимальный вклад простых дефектов в изменение периода решетки наблюдается для нейтронов (кривые 2, 3). Это, видимо, не связано с формированием каскада смещений. Первичные атомы отдачи в решетке кремния, облучаемого реакторными нейтронами и ионами Si^+ с энергией 200 кэВ, практически одинаковы. Все дело, видимо, в достаточно высокой температуре канала реактора (70 °С) и большой длительности процесса облучения нейтронами (несколько месяцев). За это время при температуре 70 °С идет процесс отжига дефектов, и прежде всего простых. При облучении ионами Kr^+ с энергией 210 МэВ также доля простых дефектов в общем изменении периода решетки меньше, чем в случае ионов Si^+ с энергией 200 кэВ. В этом случае также, видимо, идет отжиг простых дефектов в процессе облучения за счет больших ионизационных потерь высокоэнергетичных ионов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, из полученных результатов следует, что основным стоком для радиационных дефектов и продуктов их распада является поверхность облученного кремния. При термообработке простые дефекты помимо выхода на стоки перестраиваются в более сложные комплексы.

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке фонда INTAS, проект № 94-1982.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Р.Челядинский. Автореферат канд. дисс. Минск, БГУ, 1979.
2. В.Г.Фомин, А.Г.Новиков. Зав. лаб. 1972, т.38, с.303.
3. R.C.Newman, D.H.Totterdell. J. Phys. C: Solid State Phys. 1975, v.8, p.3944.
4. K.L.Brower. in: Proc. 5th Intern. Conf. Ion Implant. (Boulder, Colorado, 1976).
5. N.I.Berezhnov, V.F.Stelmakh, A.R.Chelyadinskii. Phys. Stat. Sol. A, 1983, v.78, p.K121.
6. W.Jung, G.S.Newell. Phys. Rev. 1963, v.132, p.648.
7. Y.H.Lee, N.N.Gerasimenko, J.W.Corbett. Phys. Rev. 1976, v.B14, p.4506.
8. K.L.Brower. Phys. Rev. 1976, v.B14, p.872.
9. M.Jadan, N.I.Berezhnov, A.R.Chelyadinskii. Phys. Stat. Sol. B, 1995, v.189, p.K1.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 мая 2000 года.

Буренков В.А. и др.

P14-2000-106

Роль поверхности в поведении радиационных дефектов в кремнии при отжиге

Представлены результаты исследования методом рентгеновской дифракции отжига радиационных дефектов в образцах кремния, облученных ионами Si^+ (200 кэВ, 10^{14} см^{-2}), ионами Kr^+ (210 МэВ, $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$) и быстрыми реакторными нейтронами ($4,3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$). Сравнительный анализ поведения при отжиге радиационных дефектов, расположенных в приповерхностных и в заглубленных слоях, показал, что основным стоком для радиационных дефектов и продуктов их распада является поверхность. При термообработке простые дефекты помимо выхода на стоки перестраиваются в более сложные комплексы.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2000

Перевод авторов

Burenkov V.A. et al.

P14-2000-106

A Role of Surface in Behavior of Radiation Defects in Silicon During Annealing

The results of investigation by X-ray diffraction method of annealing of radiation defects in silicon irradiated with Si^+ (200 keV, 10^{14} cm^{-2}), Kr^+ (210 MeV, $4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) and fast neutrons ($4.3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$) are presented. Comparative analysis of behavior of radiation defects located in subsurface and buried layers, during annealing has demonstrated that the main sink of radiation defects and products of their decay is a surface. During annealing point defects are also transformed into complexes besides their moving to the sink.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2000

Редактор Е.В.Калинникова. Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 13.06.2000

Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. листов 0,99

Тираж 290. Заказ 52071. Цена 1 р. 19 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области