

ВЛИЯНИЕ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО БЕТА-ОБЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ

А.А. Дмитриевский¹⁾, Н.Ю. Ефремова¹⁾, А.В. Шуклинов²⁾, В.В. Родаев²⁾,
В.В. Коренков²⁾, А.Р. Ловцов¹⁾

¹⁾ТГУ имени Г.Р. Державина, Россия, 392000, Тамбов, Интернациональная, 33,
тел. (4752) 532253, e-mail: dmitr2002@tsu.tmb.ru

²⁾УИЦ «Нанотехнологии и наноматериалы», ТГУ имени Г.Р. Державина, Россия, 392000,
Тамбов, Интернациональная, 33, тел. (4752) 532680, e-mail: tambovbtest@yahoo.com

В работе исследовано влияние низкоинтенсивного $I \sim 10^5 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ бета-облучения на механические (микро- и нанотвердость, склонность к трещинообразованию при внедрении индентора, фазовые превращения под индентором) и электрические (проводимость) свойства монокристаллов кремния. Установлено, что при низкоинтенсивном облучении кремния бета-частицами с энергией выше порога дефектообразования ($E > 170 \text{ keV}$) наблюдаются немономотное во времени изменение механических характеристик приповерхностных слоев. Показано, что микротвердость по сравнению с электрической проводимостью является более чувствительной характеристикой по отношению к модификации дефектной подсистемы кремния, индуцируемой низкоинтенсивным бета-облучением.

Введение

Хорошо известно, что физико-химические свойства материалов во многом зависят от их структуры и внешних воздействий. Уменьшение характерных размеров структуры до наномасштабных приводит к появлению так называемых «размерных» эффектов. При этом определяющим критерием специфики «нано» является не сам по себе масштабный фактор (оперирование наноразмерными величинами), а радикальное отличие свойств наноструктурных объектов от макроскопических.

Проецируя «масштабный» подход на вопрос о модификации макроскопических свойств объектов посредством внешних воздействий можно выделить область интенсивностей (мощностей, доз и т.д.), где наблюдаются качественно отличные (аномальные) изменения физических [1, 2], химических [3] и биологических [4] характеристик материалов (рис. 1).

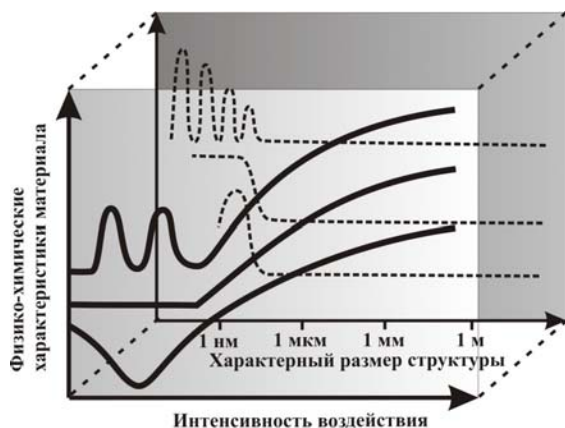


Рис. 1. Характерные зависимости физико-химических и биологических характеристик материалов от интенсивности действия внешних факторов и размера структуры.

Эффекты, индуцируемые низкоинтенсивными или малодозовыми воздействиями, представляют большой интерес, как с принципиальной, так и практической точки зрения. Они могут привести к существенному изменению характеристик функциональных материалов, входящих в состав полупроводниковых приборов, многослойных по-

крытий, фотоприемников, прецизионных механических устройств и датчиков, что необходимо учитывать при их создании и эксплуатации. С этой точки зрения несомненный интерес представляют исследования влияния низкоинтенсивного облучения на физические свойства кремния, являющегося материалом номер 1 в микроэлектронике и постепенно занимающего лидирующие позиции в области нанотехнологий, становясь конструкционным материалом для изготовления MEMS/NEMS, сенсоров и др. [5].

В связи с этим, цель настоящей работы заключалась в исследовании влияния низкоинтенсивного бета-облучения на механические и электрические свойства монокристаллов кремния.

Методика эксперимента

В экспериментах исследовали бездислокационные монокристаллические образцы кремния КЭФ-4.5. Для облучения образцов использовали источник на основе препарата $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$. Интенсивность потока бета-частиц составляла величину $I = 10^5 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Индентирование плоскости (100) осуществляли на ПМТ-3 и наноиндентометре NanoIndenter G200. Изображения отпечатков индентора получали с использованием сканирующего электронного микроскопа NEON40 и металлографического микроскопа Axio Observer. Спектры рамановского смещения регистрировали с помощью зондовой нанолaborатории NTEGRA SPECTRA.

Основная часть

Экспозиция образцов в поле бета-частиц с плотностью потока $I = 10^5 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ сопровождается немонотонным разупрочнением (рис. 2). Исследование зависимости числа твердости от глубины внедрения индентора методом CSM на характерных стадиях бета-индуцированного изменения твердости показало, что эффект проявляется в приповерхностном слое толщиной $\sim 1,5 \text{ мкм}$, на глубине $\sim 2,5 \text{ мкм}$ (рис. 3).

В общем случае величина микротвердости определяется подвижностью дислокаций и точечных дефектов, а также фазовыми превращениями под индентором. Одним из возможных объяснений

наблюдаемого разупрочнения монокристаллов кремния под действием низкоинтенсивного бета-облучения могло бы служить бета-индуцированное увеличение эффективности образования под индентором более плотноупакованных фаз Si-II, Si-XII и Si-III [6], приводящее к увеличению объема формируемого отпечатка при неизменной нагрузке.

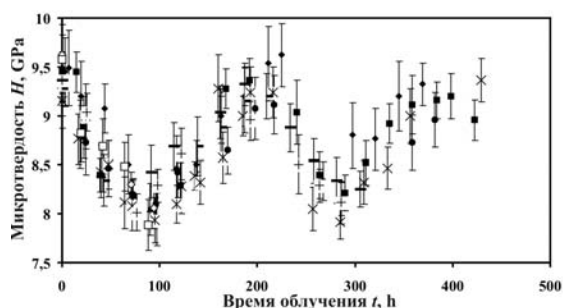


Рис. 2. Зависимость микротвердости монокристаллов кремния от времени облучения бета-частицами с плотностью потока $I = 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

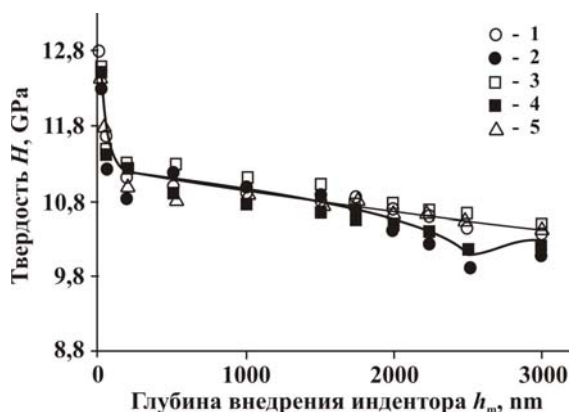


Рис. 3. Зависимости твердости H от конечной глубины внедрения индентора h_m для исходных – 1 и облученных в течение времени $t_{\text{irr}} = 100 \text{ h}$ – 2, $t_{\text{irr}} = 200 \text{ h}$ – 3, $t_{\text{irr}} = 300 \text{ h}$ – 4 и $t_{\text{irr}} = 400 \text{ h}$ – 5 образцов кремния.

В работе развита методика *in situ* исследования фазовых превращений Si-I $\rightarrow$ Si-II посредством измерения электрического сопротивления при внедрении индентора в узкую щель между тонкими медными пленками (пленки одновременно служат омическими контактами), напыленными на поверхность кремния, предложенная в [7]. Обнаружено подавление эффективности фазовых превращений Si-I $\rightarrow$ Si-II при облучении образцов в течение 100 h.

С использованием метода микрорамановской спектроскопии исследовано распределение фазового состава кремния внутри отпечатка индентора с пространственным разрешением $\sim 200 \text{ nm}$ (Рис. 4, а, б). Обнаружено подавление эффективности образования фаз Si-XII, Si-III и a-Si (аморфный кремний), индуцируемое облучением бета-частицами (Рис. 4).

Исследование влияния низкоинтенсивного бета-облучения на проводимость образцов кремния

различной толщины ($10 \text{ }\mu\text{m} - 1 \text{ mm}$) показало, что величина микротвердости является более чувствительной характеристикой по отношению к бета-индуцированному изменению состояния подсистемы структурных дефектов в приповерхностных слоях кремния, чем электрическая проводимость.

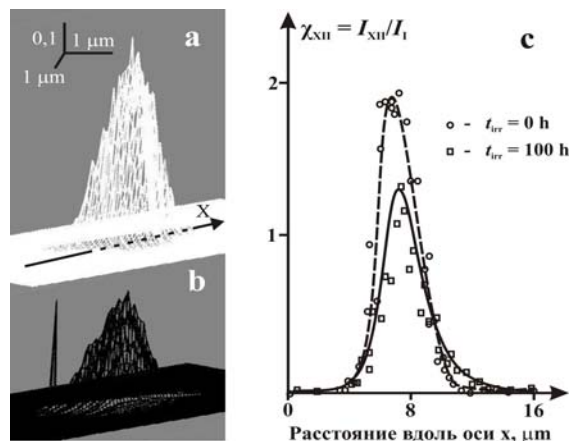


Рис. 4. Распределение относительной доли фазы Si-XII по объему отпечатков, сформированных до (а) и после (б) бета-облучения в течение времени $t_{\text{irr}} = 100 \text{ h}$ с интенсивностью $I = 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, а также профили представленных фигур, построенные вдоль направления x (до облучения – пунктирная линия, после облучения – сплошная линия) – (с).

Заключение

Показано, что низкоинтенсивное облучение кремния сопровождается, по крайней мере, двумя конкурирующими процессами: препятствующим и облегчающим локальную деформацию. Исключив из рассмотрения дислокационный механизм массопереноса при формировании отпечатка (при комнатной температуре дислокации в кремнии практически неподвижны), можно заключить, что в разупрочнении кремния, индуцируемом низкоинтенсивным бета-облучением, доминирующую роль играют точечные радиационные дефекты.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы (Государственный контракт: П892).

Список литературы

- Golan G., Rabinovich E., Inberg A., Oksman M., Rancita P.G., Rattaggi M., Gartsman K., Seidman A., Croitoru N. // *Microelectronics Journal*. – 2000. – 31. – P.937.
- Головин Ю.И., Дмитриевский А.А., Сучкова Н.Ю. // *Физика твердого тела*. – 2006. – 48. – 2. – С.262.
- Grissom Ch. // *Chem. Rev.* – 1995. – 95. – 1. P.3.
- Бурлакова Е.Б., Конрадов А.А., Мальцева Е.Л. // *Химическая физика*. – 2003. – 22. – 2. – С.21.
- Bhushan Ed. B., *Springer Handbook of Nanotechnology*, New York, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2004. – 1222 p.
- Dominich V., Gogotsi Y. // *Rev. Adv. Mater. Sci.* – 2002. – 3. – P.1.
- Gridneva I.V., Milman Yu.V., Trefilov V.I. // *Phys. Stat. sol. (a)*. – 1972. – 14. – P.177.

INFLUENCE OF LOW-FLUX BETA IRRADIATION ON PROPERTIES OF SILICON BLANKETS

A.A. Dmitrievskiy¹⁾, N.Yu. Efremova¹⁾, A.V. Shuklinov¹⁾, V.V. Rodaev²⁾, V.V. Korenkov²⁾, A.R. Lovtsov²⁾

¹⁾TSU named after G.R. Derzhavin, Russia, 392000, Tambov, Internacionalnaja, 33,
phone: (4752) 532253, e-mail: dmitr2002@tsu.tmb.ru.

²⁾«Nanotechnologies and nanomaterials», Russia, 392000, Tambov, Internacionalnaja, 33,
phone: (4752) 532680, e-mail: tambovbest@yahoo.com

The influence of low-flux ($I \sim 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) beta-irradiations on mechanical (micro- and nanohardness, propensity to formation of cracks at indentation, phase transformations under indenter) and electric (conductivity) property of silicon single crystals was investigated in work. It was established that at low-flux of irradiation by beta particles with energy $E > 170 \text{ keV}$ of silicon was observed nonmonotonic change of mechanical properties at the blankets. It was shown that micro-hardness in comparison with electric conductivity is more sensitive characteristic in relation to the modification of the silicon defective subsystem induced by low-flux of beta-irradiation.