

## СЕКЦИЯ: ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

УДК 539.21:539.12.04

### ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ КРЕМНИЯ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ НИЗКОИНТЕНСИВНЫМ БЕТА-ОБЛУЧЕНИЕМ, В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ СЛАБЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

© В.М. Васюков, А.А. Дмитриевский, Н.Ю. Сучкова

Vasyukov V.M., Dmitrievskii A.A., Suchkova N. Yu. Changes of silicon microhardness, induced by low-flux beta-irradiation, in conditions of weak electric fields influence. The combined influence of low-flux beta-irradiation and weak electric fields (EF) on silicon microhardness was investigated in details. The inhibition effect of EF on silicon microhardness changes induced by low-flux ( $I = 10,4 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) beta-irradiation was revealed. Threshold character of influence of the EF was observed. At the electric field intensity  $E < 350 \text{ V/cm}$  this effect is absent.

#### ВВЕДЕНИЕ

Кремний в последние годы стал занимать лидирующие позиции в области нанотехнологий, постепенно становясь конструкционным материалом. На его основе изготавливаются микромашины, сенсоры, микро- и наноэлектромеханические системы (MEMS/NEMS) и другие гибридные продукты нанотехнологий. В связи с этим, актуальным становится изучение его механических свойств (твердость, износостойкость, модуль Юнга и др.) под действием различных, даже незначительных, внешних факторов. Ранее было обнаружено скачкообразное увеличение фотоэда при достижении порогового внешнего электрического поля (ЭП), приложенного к образцу во время облучения [1]. По аналогии можно предположить, что от напряженности ЭП может зависеть динамика наблюдаемых изменений микротвердости кремния при низкоинтенсивном бета-облучении. В связи с этим, цель настоящей работы заключалась в исследовании комбинированного действия низкоинтенсивного бета-облучения и слабых ЭП на микротвердость  $H$  монокристаллов кремния.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

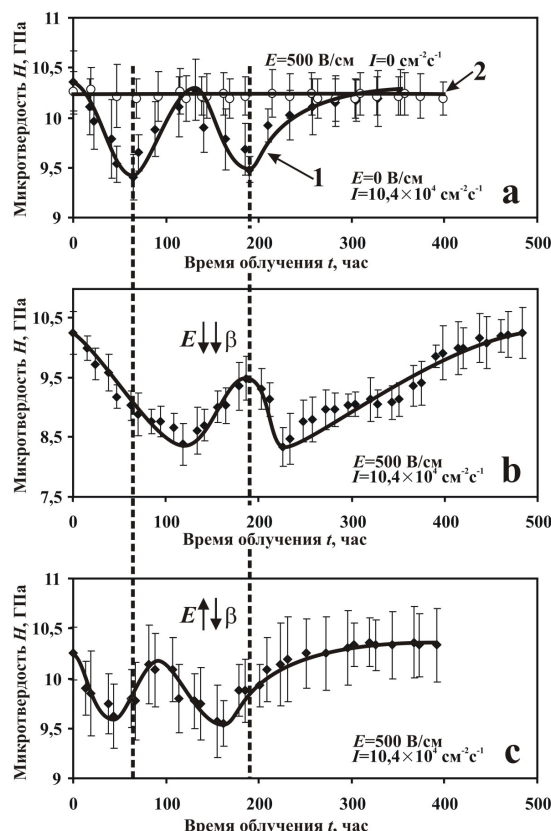
В экспериментах использовались образцы кремния, выращенные методом бестигельной зонной плавки, легированные фосфором (БИГЭ-600). Они имели форму пластин с линейными размерами  $1 \times 4 \times 5 \text{ мм}$ . В качестве источника бета-частиц использовался препарат на основе  $^{90}\text{Y}$  +  $^{90}\text{Sr}$  со средней энергией эмитируемых частиц 0,20 МэВ для  $^{90}\text{Sr}$  и 0,93 МэВ для  $^{90}\text{Y}$ . Интенсивность потока рассчитывалась посредством компьютерного моделирования с учетом геометрии источника и образца и составляла  $I = 10,4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ . Электрическое поле создавалось плоским конденсатором, одна из обкладок которого была выполнена в виде мелкой сетки (размер ячейки  $\sim 1 \text{ мм}$ , расстояние между обкладками  $d = 3 \text{ мм}$ ), через которую производилось облучение.

Напряженность ЭП варьировалась в интервале значений  $E = 0 \div 500 \text{ В/см}$ . Облучение и экспозиция образцов в ЭП производились на воздухе при комнатной температуре. Тестирование микротвердости  $H$  по Виккерсу на плоскости (111) осуществляли на микротвердомере ПМТ-3. Время, затраченное на определение микротвердости, в дальнейшем учитывалось (вычиталось) при построении дозовой зависимости. Нагрузка на индентор составляла 1 Н. Время нагружения – 10 с. Каждая точка на графиках является усреднением 15 отдельных измерений  $H$ .

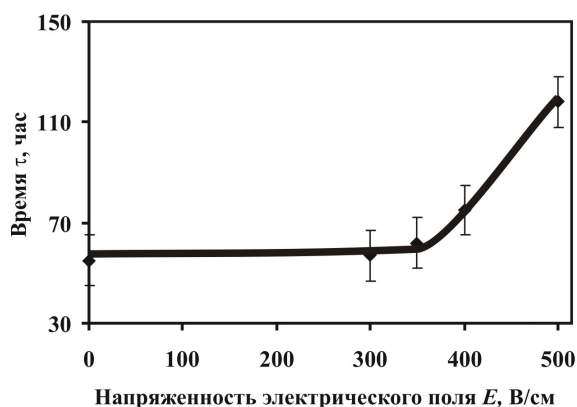
#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспозиция образцов кремния в низкоинтенсивном ( $I = 10,4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ) потоке бета-частиц сопровождается немонотонным изменением микротвердости (рис. 1а, кривая 1). В [2] было показано, что W-образная зависимость микротвердости от времени облучения бета-частицами обусловлена многостадийным процессом преобразования подсистемы структурных (собственных и радиационных) дефектов. Данная зависимость микротвердости характеризуется двумя максимумами разупрочнения с промежуточным восстановлением  $H$  к исходному значению. За первый пик разупрочнения ответственны комплексы  $V_2\text{-O-C}$ , за второй – комплексы  $V\text{-O}$  и/или  $C_T\text{-O}_i$ , а за промежуточное восстановление –  $V_2$ , где О и С – атомы кислорода и углерода соответственно, V – вакансии, а индекс «i» указывает на междоузельное положение атома [2].

В контрольной серии экспериментов было установлено, что экспозиция образцов кремния в течение времени, необходимого для снятия дозовой зависимости (400 часов) в ЭП с напряженностью  $E = 500 \text{ В/см}$ , не приводит к заметным, с учетом погрешностей, изменениям микротвердости (рис. 1а, кривая 2). При меньших значениях напряженности ЭП заметных изменений  $H$  также не наблюдалось.



**Рис. 1.** Зависимость микротвердости монокристаллов кремния от времени: а) индивидуального действия бета-облучения (кривая 1), горизонтальная прямая 2 характеризует величину микротвердости в отсутствие бета-облучения; б) комбинированного действия бета-облучения и ЭП в условиях, когда вектор напряженности ЭП сонаправлен потоку бета-частиц; в) комбинированного действия бета-облучения и ЭП в условиях противоположной ориентации вектора напряженности ЭП и направления потока бета-частиц



**Рис. 2.** Зависимость характерного времени облучения  $\tau$  от напряженности электрического поля  $E$

Комбинированное действие ЭП ( $E = 500$  В/см) и облучения ( $I = 10,4 \cdot 10^4$  см $^{-2}$ с $^{-1}$ ) не приводит к качественным изменениям зависимости  $H(t)$ , однако времена, при которых наблюдаются характерные стадии изменения микротвердости, значительно увеличиваются (~50 %) (рис. 1б). Уменьшение напряженности ЭП до

значений  $E = 350$  В/см приводит к снижению времени  $\tau$  (при котором наблюдается первый максимум разупрочнения) до значений, характерных условию индивидуального действия бета-облучения.

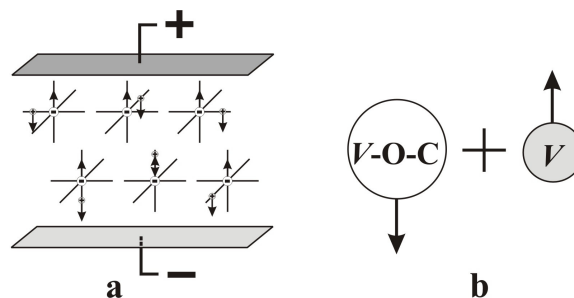
Комбинированное действие облучения и ЭП в интервале напряженностей  $0 < E < 350$  В/см ни качественно, ни количественно не отличается от случая индивидуального облучения. Таким образом, установлено пороговое значение напряженности ЭП ( $E \approx 350$  В/см), выше которого наблюдается увеличение характерных времен облучения  $\tau$  (рис. 2).

Полученные данные позволяют заключить, что ЭП оказывает существенное влияние на процесс бета-стимулированного преобразования подсистемы структурных (собственных и радиационных) дефектов на всех стадиях изменения микротвердости. Переходя к обсуждению полученных результатов, можно предложить три возможных механизма действия ЭП на процесс формирования радиационных дефектов, ответственных за изменения микротвердости (на примере наиболее сложного комплекса  $V_2$ -O-C).

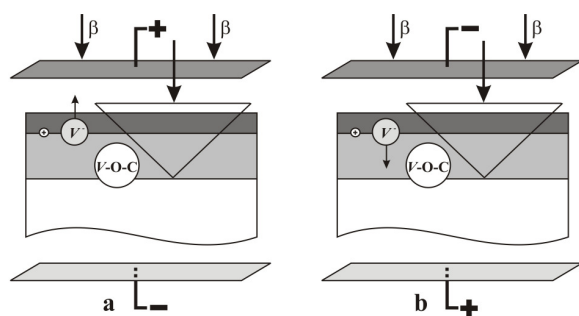
Первый механизм может быть связан с увеличением эффективности разделения компонент пар Френкеля (рис. 3а). Результатом этого должно являться увеличение скорости генерации свободных вакансий при неизменной интенсивности облучения и, следовательно, ускорение процесса формирования комплекса  $V_2$ -O-C. При этом первый максимум разупрочнения должен наступать раньше. Поскольку мы наблюдаем обратную картину, т.е. замедление, то предложенный механизм действия ЭП противоречив.

Второй из возможных механизмов действия ЭП на динамику бета-индуцированных изменений микротвердости кремния заключается в уменьшении эффективности протекания реакций между разноименно заряженными вакансиями и комплексом V-O-C за счет электростатического «растягивания» компонент (рис. 3б).

Если предложенный механизм справедлив, то изменение полярности приложенного ЭП не должно привести к изменению наблюдаемого «замедления». Для проверки этого предположения была проведена серия измерений, в которой полярность была изменена. Это привело к исчезновению эффекта «замедления» (рис. 1с). В конфигурации, когда вектор напряженности ЭП противоположен направлению потока бета-частиц, наблюдается незначительное «ускорение» процесса бета-стимулированного изменения микротвердости. Следовательно, и второй из обсуждаемых механизмов также не верен.



**Рис. 3.** а) Увеличение эффективности разделения компонент пар Френкеля; б) уменьшение эффективности образования комплексов  $V_2$ -O-C



**Рис. 4.** Зависимость преимущественного направления диффузии отрицательно заряженных вакансий от полярности ЭП

Последний из обсуждаемых механизмов связан с изменением эффективности стока отрицательно заряженных вакансий к поверхности (рис. 4).

При совпадении конфигурации радиационного и электрического полей в тестируемой области кристалла концентрация свободных вакансий уменьшается, что приводит к пропорциональному уменьшению скорости накопления дефектов, ответственных за наблюдаемое разупрочнение (рис. 1b). Изменение полярности (когда облучаемая поверхность образца находится вблизи от сетки, на которую подается отрицательный потенциал) способствует диффузии отрицательно заряженных вакансий (интенсивно генерируемых в области границы раздела кремний – оксид кремния) в объем материала (рис. 4b). Следствием этого является увеличение скорости накопления комплексов  $V_2-O-C$  и, соответственно, несколько ускоренное изменение микротвердости. Тем самым последний из предложенных механизмов

наиболее адекватно объясняет влияние ЭП на динамику бета-индуцированного изменения микротвердости.

## ВЫВОДЫ

1. Обнаружено влияние электрического поля на динамику преобразований подсистемы структурных (собственных и радиационных) дефектов кремния, индуцированных низкоинтенсивным бета-облучением.
2. Выявлен пороговый характер зависимости характерного времени облучения (при котором наблюдается максимум разупрочнения) от напряженности электрического поля.
3. Показано, что «наложением» электрического поля можно повышать радиационную стойкость кремния по отношению к низкоинтенсивному бета-облучению.
4. Предложен механизм влияния электрического поля на процесс формирования и накопления комплексов, ответственных за наблюдаемые изменения микротвердости кремния.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Милевский Л.С., Гарнык В.С. // ФТП. 1979. Т. 13. № 7. С. 1369.
2. Головин Ю.И., Дмитриевский А.А., Сучкова Н.Ю. // ФТТ. 2006. Т. 48. № 2. С. 262.

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Работа выполнена в рамках Приоритетного национального проекта «Образование» Министерства образования и науки РФ, а также при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-02-97512-Р\_центр\_а).

Поступила в редакцию 25 декабря 2007 г.