

## СЕКЦИЯ: ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

### НЕМОНОТОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ ИОННЫХ КРИСТАЛЛОВ, ИНДУЦИРУЕМЫЕ НИЗКОИНТЕНСИВНЫМ БЕТА-ОБЛУЧЕНИЕМ

© А.А. Дмитриевский, В.Е. Иванов

Dmitrievskii A.A., Ivanov V.E. Nonmonotonic exchanging of ionic single crystals microhardness, induced by low flux of beta-irradiation. Nonmonotonic exchanging of NaCl, LiF, KCl single crystals microhardness, induced by low flux of beta-irradiation are founded.

Физические свойства реальных кристаллов во многом определяются качественным и количественным составом структурных дефектов, среди которых значительную роль играют радиационные дефекты (РД). Более чем полувековые исследования в области взаимодействия проникающего излучения с веществом привели к построению последовательной теории радиационного дефектообразования, позволили идентифицировать большинство РД и описать возможные квазихимические реакции между ними в самых разнообразных материалах. Согласно сложившимся представлениям, величина эффекта монотонно возрастает по мере увеличения дозы облучения. Следует обратить внимание на то, что подавляющее большинство исследований были выполнены в области умеренных и больших доз. Однако в последние годы рядом независимых научно-исследовательских коллективов были обнаружены эффекты немонотонного изменения физических свойств (механических характеристик) различных объектов, индуцируемых низкоинтенсивным облучением [1–3]. Природа подобных явлений остается невыясненной. В качестве «модельных» объектов исследования удобно использовать щелочно-галлоидные кристаллы. В соответствии с этим целью настоящей работы являлось исследование изменений микротвердости кристаллов NaCl, LiF, KCl, индуцируемых низкоинтенсивным бета-облучением.

В экспериментах использовались монокристаллические образцы NaCl:Eu, LiF:Mg, KCl:CaCO<sub>3</sub> размером 7×2×5 мм. Облучение образцов производилось с помощью плоского источника типа ИСО на основе <sup>90</sup>Sr+<sup>90</sup>Y с интенсивностью  $I = 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ . Флюенс не превышал значения  $1.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Тестирование микротвердости  $H$  по Виккерсу осуществляли на стандартном микротвердометре ПМТ-3 при комнатной температуре в слабом красном свете. Нагрузка составляла 0.2 N; время нагружения 10 с. Каждая точка на графиках является усреднением 15 отдельных измерений диагоналей отпечатков.

Обнаружено немонотонное изменение микротвердости монокристаллов LiF, NaCl, KCl по мере нарастания флюенса (рис. 1). Для всех трех исследуемых типов

кристаллов характерно наличие двух максимумов изменения микротвердости с промежуточным восстановлением  $H$  до значений, близких к исходным. Качественное сходство зависимостей микротвердости металлических фольг [1], кремния [2], арсенида галлия [3], а также LiF, NaCl и KCl от времени облучения свидетельствует, по крайней мере, о частичной общности механизмов наблюдаемых явлений.

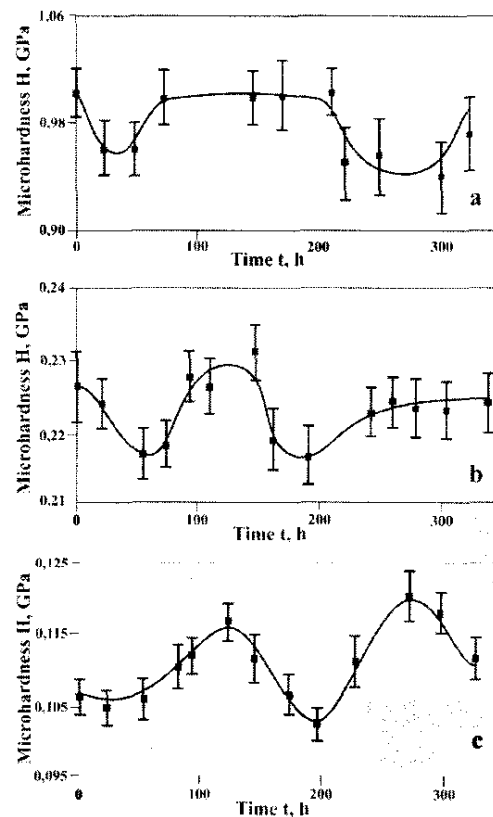


Рис. 1. Зависимость микротвердости монокристаллов LiF (а), NaCl (b) и KCl (с) от времени облучения бета-частицами с интенсивностью  $I = 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ .

При облучении в кристаллах генерируются первичные РД – пары Френкеля. Часть из них исчезает в результате взаимной аннигиляции. Разделившиеся компоненты пар Френкеля способны мигрировать в объеме кристалла и взаимодействовать с другими дефектами с образованием более сложных вторичных дефектов. Считается, что повышение концентрации точечных дефектов (препятствующих движению дислокаций) по мере нарастания флюенса должно приводить к монотонному упрочнению кристаллов. Наблюдаемое в эксперименте немонотонное изменение микротвердости (тем более немонотонное разупрочнение кристаллов LiF и NaCl) в условиях низкоинтенсивного облучения свидетельствует о более сложном процессе преобразования подсистемы структурных (собственных и радиационных) дефектов. При малодозовом облучении (в наших экспериментах  $F < 1,1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ) концентрация генерируемых дефектов меньше концентрации исходных дефектов. В этом случае наблюдаемые изменения свойств следует связывать с модификацией исходных дефектов. Тогда немонотонное изменение  $H$  в условиях

низкоинтенсивного облучения можно связать с многостадийным процессом преобразования имеющихся в кристалле дислокационных стенов.

Таким образом, обнаружено нелинейное во времени изменение микротвердости кристаллов KCl, NaCl и LiF, индуцируемое действием бета-облучения с интенсивностью  $I = 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тетельбаум Д.И., Менделеева Ю.А., Азов А.Ю. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. № 11. С. 128.
2. Головин Ю.И., Дмитриевский А.А., Пушин И.А., Сучкова Н.Ю. // ФТТ. 2004. Т. 46. № 10. С. 1790.
3. Головин Ю.И., Дмитриевский А.А., Карцев С.В., Сучкова Н.Ю., Голотаев М.Ю. // Поверхность. (В печати).

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 06-02-96321).

Поступила в редакцию 16 октября 2006 г.

### КОМБИНИРОВАННОЕ ДЕЙСТВИЕ СЛАБЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ, МАГНИТНЫХ И РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ Si

© А.А. Дмитриевский, В.Е. Иванов

Dmitrievskii A.A., Ivanov V.E. Combined influence of weak electric, magnetic and irradiative fields on Si microhardness. The influence of weak electric and magnetic fields on dynamics of the process of subsystem structural defects modification induced by low flux beta-irradiation is found.

Радиационное дефектообразование является одним из наиболее широко применяемых методов при формировании электрофизических свойств полупроводниковых материалов (в частности, кремния). При этом важную роль играют характеристики материала (тип и концентрация легирующей примеси), облучения (тип, энергия, плотность потока частиц) и внешних факторов нерадиационной природы (температура, при которой происходит облучение, наличие магнитных и электрических полей и др.).

В случае низкоинтенсивного облучения свойства могут изменяться немонотонно по мере нарастания флюенса [1, 2], что затрудняет интерпретацию наблюдаемых эффектов с позиции общепринятых представлений о взаимодействии заряженных частиц с веществом. Большинство радиационных дефектов (РД) кремния являются парамагнитными и кроме того могут находиться в различных зарядовых состояниях. Внешние электрические и магнитные поля, очевидно, способны оказывать определенное влияние на эффективность протекания квазихимических реакций между компонентами вторичных РД и, как следствие, на конечные свойства кристалла в целом.

Отсутствие информации о процессе преобразования структурных дефектов кремния в условиях индивидуального действия низкоинтенсивного ионизирующего облучения, а также действия облучения, комби-

нированного с внешними факторами нерадиационной природы, определяет цель настоящей работы.

В экспериментах использовались образцы кремния, легированные фосфором, имеющие форму пластин с линейными размерами  $1 \times 4 \times 7 \text{ мм}^3$ . Использовались два источника бета-частиц на основе  $^{90}\text{Y}$ – $^{90}\text{Sr}$  с интенсивностью потока  $I_1 = 3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и  $I_2 = 10^5 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  соответственно. Экспозиция образцов в электрическом поле (ЭП) осуществлялась с помощью плоского конденсатора, одна из обкладок которого была выполнена в виде мелкой сетки (размер ячейки 0,5 мм), через которую осуществлялось облучение. Напряженность электрического поля  $E$  варьировалась в интервале от 0 до 450 В/см. Индукция магнитного поля (МП) в зазоре между полюсами постоянного магнита (в месте, где экспонировался образец)  $B = 0,28 \text{ Тл}$ . Тестирование микротвердости  $H$  по Виккерсу на плоскости (111) осуществляли на микротвердомере ПМТ-3.

Экспозиция образцов в поле бета-частиц с  $I_1$  и  $I_2$  в отсутствие ЭП и МП сопровождается немонотонным изменением микротвердости (рис. 1а и 1с соответственно). Качественный вид зависимости микротвердости от времени облучения совпадает с данными [2]. В работе [3] показана возможность влияния внешнего ЭП на эффективность разделения компонент пар Френкеля. Большинство радиационных дефектов обладают парамагнитными свойствами. В соответствии с этим