

Влияние слабых магнитных полей на динамику изменений микротвердости кремния, индуцируемых малоинтенсивным бета-облучением

© Ю.И. Головин, А.А. Дмитриевский, В.Е. Иванов, Н.Ю. Сучкова, М.Ю. Толотаев

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина,
392622 Тамбов, Россия

E-mail: dmitr2002@tsu.tmb.ru

(Поступила в Редакцию 18 августа 2006 г.)

Обнаружено влияние слабых магнитных полей (индукция $B = 0.28$ Т) на процесс преобразования подсистем структурных (собственных и радиационных) дефектов кремния, индуцируемый облучением бета-частицами (интенсивность $I = 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$). Воздействие слабого магнитного поля приводит к увеличению флюенсов, при которых наблюдаются максимумы разупорядочения.

PACS: 62.20.Qp, 75.80.+q

Варьирование параметров ионизирующего облучения (тип, энергия, флюенс, плотность заряженных частиц) и соответственно качественного и количественного состава генерируемых радиационных дефектов (РД) позволяет в широких пределах изменять физические свойства полупроводников [1,2]. В последнее время особый интерес вызывает возможность модификации свойств полупроводника посредством малодозовых (флюенс $F < 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$) воздействий [3–5]. В [6] было обнаружено немонотонное изменение микротвердости H монокристаллов кремния, индуцируемое бета-облучением с плотностью потока $I = 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Дальнейшие исследования [7,8] показали, что наблюдаемые изменения H обусловлены сложным многостадийным процессом преобразования подсистемы структурных (собственных и радиационных) дефектов (ПСД). Состояние ПСД помимо указанных выше параметров облучения в значительной мере зависит от внешних условий (температура, при которой осуществляется облучение или последующий отжиг, наличие электрических и магнитных полей и т.п.). Поскольку большинство РД кремния являются парамагнитными дефектами, комбинирование облучения даже со слабым магнитным полем (МП) ($g\mu_B V \ll kT$, где $g\mu_B V$ — магнитная энергия, сообщаемая парамагнитной частице в МП с индукцией B ; $g \approx 2$ — фактор спектроскопического расщепления парамагнитной частицы; μ_B — магнетон Бора) может заметно отразиться на процессе преобразования ПСД. В связи с этим цель настоящей работы заключается в обнаружении и исследовании влияния слабых МП на динамику изменений микротвердости кремния, индуцируемых малоинтенсивным бета-облучением.

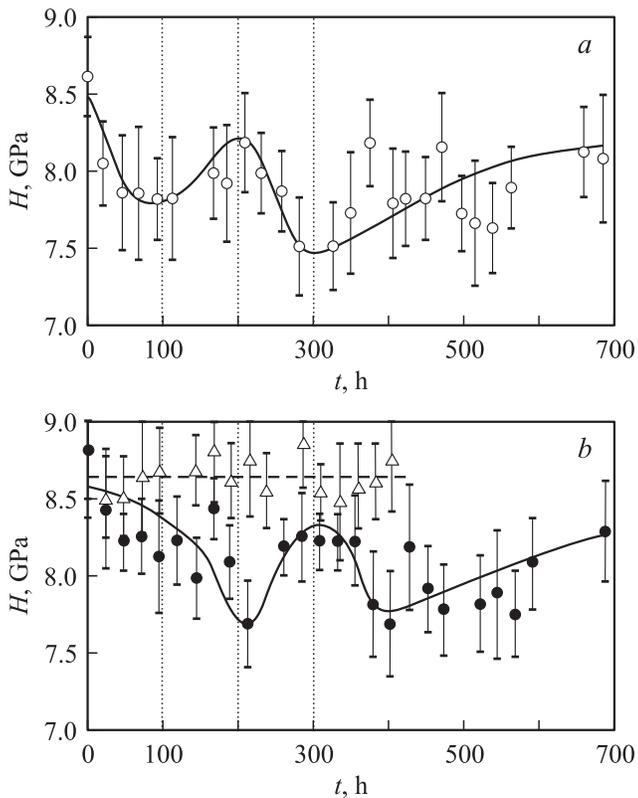
В качестве источника бета-частиц использовался препарат на основе $^{90}\text{Y}-^{90}\text{Sr}$ со средней энергией эмитируемых частиц 0.20 MeV для ^{90}Sr и 0.93 MeV для ^{90}Y . Интенсивность потока рассчитывалась посредством компьютерного моделирования с учетом геометрии источника и образца и составляла $I = 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Флюенс при максимальной экспозиции образцов в поле

бета-частиц не превышал $F = 2.6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Величина индукции МП, измеренная в зазоре между полюсами постоянного магнита, имела значение $B = 0.28$ Т. Облучение и экспозиция образцов в МП производились на воздухе при комнатной температуре. Образцы Cz-Si, выращенные методом Чохральского, были легированы фосфором (КЭФ-0.01) и имели форму пластин с линейными размерами $1 \times 4 \times 7$ мм. Поверхность с максимальной площадью совпадала с плоскостью (111).

Тестирование микротвердости H по Виккерсу на плоскости (111) осуществлялось на микротвердомере ПМТ-3. Для этого образцы периодически извлекались из камеры, в которой они подвергались комбинированному (в контрольных сериях измерений индивидуально) воздействию облучения и МП. Время, затраченное на тестирование микротвердости, в дальнейшем учитывалось (вычиталось) при построении временной зависимости. Нагрузка на индентор составляла 1 N, а время нагружения — 10 с. Каждая точка на графиках является результатом усреднения десяти отдельных измерений H .

Установлено, что дозовая зависимость $H = f(It)$ при $B = 0$, так же как и для Cz-Si, КЭФ-10 [6], характеризуется двумя максимумами разупорядочения с тенденцией промежуточного восстановления H до исходного значения (см. рисунок, а). Следовательно, увеличение концентрации фосфора от $N_P \sim 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (КЭФ-10) до $\sim 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (КЭФ-0.01) качественно не меняет характер влияния малоинтенсивного бета-облучения на микротвердость Cz-Si.

Прежде чем исследовать влияние МП на динамику бета-стимулированного изменения микротвердости кремния, необходимо убедиться в отсутствии влияния самого по себе МП с используемой в данном эксперименте индукцией на микротвердость Cz-Si. Этот шаг необходим, поскольку слабые МП способны оказывать значительное влияние на пластические свойства самых разнообразных диамагнитных материалов, в том числе и полупроводниковых [9–11].



Зависимость микротвердости H монокристаллов $Cz-Si$ от времени бета-облучения с интенсивностью $I = 10^5 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (a) и от времени экспозиции в МП с индукцией $B = 0.28 \text{ Т}$ (штриховая линия) и комбинированного воздействия облучения и магнитного поля (сплошная линия) (b).

В контрольной серии экспериментов было установлено, что экспозиция $Cz-Si$ в течение времени, необходимого для бета-стимулированного разупорядочения, в МП с индукцией $B = 0.28 \text{ Т}$ не приводит к изменениям микротвердости в пределах погрешности (штриховая линия на рисунке, b).

Следовательно, используемое в условиях эксперимента МП само по себе не оказывает заметного влияния на микротвердость $Cz-Si$.

Зависимость микротвердости $Cz-Si$ от времени выдержки образцов в условиях совместного воздействия облучения и МП представлена на рисунке, b (сплошная линия). Из сравнения зависимостей $H(t)$, показанных на частях a и b рисунка, видно, что приложение МП приводит к заметному „замедлению“ процесса разупорядочения $Cz-Si$, индуцируемого бета-облучением. Обращает на себя внимание тот факт, что „задержка“ всех стадий (первое разупорядочение, промежуточное восстановление микротвердости до исходного значения и повторное разупорядочение) бета-стимулированного изменения H в условиях приложения МП составляет одну и ту же величину ($\Delta t \approx 100 \text{ h}$). Из этого следует, что МП повышает радиационную стойкость к бета-стимулированному преобразованию ПСД в основном при флюенсах $F \leq 3 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$.

При облучении кремния электронами с энергией выше порога дефектообразования ($W > 170 \text{ keV}$) первичными РД являются пары Френкеля (вакансия V и межузельный атом кремния Si_i) [1,2]. Часть из них исчезает в результате аннигиляции. Разделившиеся компоненты пар Френкеля, мигрируя по кристаллу, вступают в реакции с примесными и собственными дефектами с образованием так называемых вторичных РД. При этом уменьшение скорости относительного изменения H в условиях комбинированного воздействия бета-частиц и МП, по-видимому, связано с влиянием МП на эффективность протекания конкурирующих квазихимических реакций. Так, предположительно эффективность образования комплексов типа V_2-O_2 и/или V_2-O-C (ответственных за первое разупорядочение [12]) уменьшается за счет увеличения эффективности взаимодействия вакансий с другими возможными стоками.

Таким образом, обнаружено влияние слабых МП на процесс бета-стимулированного преобразования ПСД кремния, сопровождающийся немонотонными изменениями микротвердости. Показана возможность управления динамикой радиационно-пластического эффекта в кремнии с помощью МП.

Список литературы

- [1] В.С. Вавилов, В.Ф. Киселев, Б.Н. Мукашев. Дефекты в кремнии и на его поверхности. Наука, М. (1990). 212 с.
- [2] Н.В. Кузнецов, Г.Г. Соловьев. Радиационная стойкость кремния. Энергоатомиздат, М. (1989). 96 с.
- [3] D. Aberg, A. Hallen, B.G. Svensson. *Physica B* **273–274**, 672 (1999).
- [4] C. Jagadish, B.G. Svensson, N. Hauser. *Semicond. Sci. Technol.* **8**, 481 (1993).
- [5] P. Leveque, A. Hallen, P. Pellegrino, B.G. Svensson, V. Privitera. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **186**, 375 (2002).
- [6] Ю.И. Головин, А.А. Дмитриевский, И.А. Пушкин, Н.Ю. Сучкова. *ФТТ* **46**, 1790 (2004).
- [7] Ю.И. Головин, А.А. Дмитриевский, Н.Ю. Сучкова. *Деформация и разрушение материалов* **1**, 23 (2005).
- [8] Ю.И. Головин, А.А. Дмитриевский, Н.Ю. Сучкова, М.В. Бадылевич. *ФТТ* **47**, 1237 (2005).
- [9] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, М.В. Колдаева, Е.А. Петрижик. *Кристаллография* **48**, 826 (2003).
- [10] Ю.И. Головин. *ФТТ* **46**, 769 (2004).
- [11] Р.Б. Моргунов. *УФН* **174**, 131 (2004).
- [12] Ю.И. Головин, А.А. Дмитриевский, Н.Ю. Сучкова. *ФТТ* **48**, 262 (2006).