

УДК 53.091:53.096

СООТНОШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЯ К НИЗКОИНТЕНСИВНОМУ БЕТА-ОБЛУЧЕНИЮ

© А.А. Дмитриевский, Н.Ю. Ефремова, А.Р. Ловцов, Д.Г. Гусева

Ключевые слова: кремний; низкоинтенсивное облучение; радиационные дефекты; микротвердость; электрическая проводимость; постоянная Холла.
Исследовано влияние низкоинтенсивного ($I \sim 3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$) бета-облучения на электрическую проводимость ρ , постоянную Холла R_H и микротвердость H монокристаллов кремния. Показано, что микротвердость является более чувствительной характеристикой (по сравнению с ρ и R_H) к бета-индуцируемой модификации дефектной подсистемы.

ВВЕДЕНИЕ

Целенаправленное модифицирование физических свойств полупроводниковых материалов с ковалентным и ионо-ковалентным типами химической связи пучками заряженных частиц является одним из наиболее перспективных и бурно развивающихся в последние годы физико-технологических методов. Для монокристаллического кремния, широко используемого в микроэлектронике, первостепенное значение имеет возможность контролируемой модификации электрических свойств. При изучении электрических характеристик полупроводников применяют различные экспериментальные методы, из которых в радиационной физике наибольшее распространение получили методы измерения электрической проводимости и постоянной Холла [1].

Распространенность, налаженность производства высококачественных монокристаллов и уникальное сочетание электрических и механических свойств делает кремний наиболее удобным материалом для изготовления микро- и наноэлектромеханических систем (МЭМС/НЭМС), для которых критически важное значение имеют механические свойства в тонких приповерхностных слоях и сечениях [2].

В связи с этим настоящая работа посвящена исследованию электрических (проводимость и постоянная Холла) и механических (микротвердость) свойств монокристаллического кремния в условиях действия низкоинтенсивного бета-облучения.

В экспериментах исследовали монокристаллические образцы кремния (КЭФ-4,5). Для облучения образцов использовали источник на основе препарата $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ со средней энергией эмиттируемых электронов 0,20 МэВ для ^{90}Sr и 0,93 МэВ для ^{90}Y . Интенсивность потока бета-частиц составляла величину $I = 3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Облучение образцов производили при комнатной температуре на воздухе. Тестирование микротвердости H по Виккерсу на плоскости (100) осуществляли на микротвердомере ПМТ-3. Для этого образцы периодически извлекали из камеры, в которой происходило бета-облучение. Время, затраченное на определение микротвердости, в дальнейшем учитывали (вычитали) при построении дозовой зависимости. Нагрузка на индентор составляла 1 Н, а время нагружения – 10 с. Каждая точка на графиках является усреднением 20 отдельных измерений H .

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

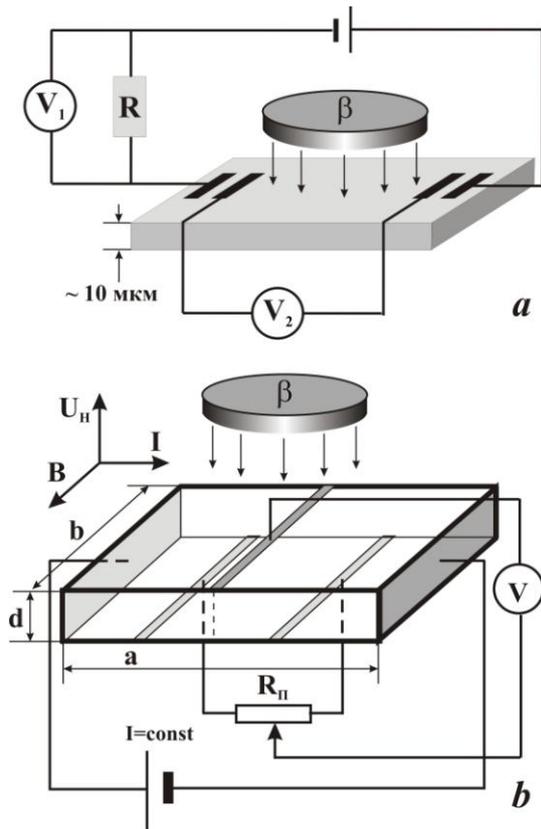


Рис. 1. Принципиальные схемы измерительной ячейки для тестирования электрической проводимости (а) и постоянной Холла (б) монокристаллов кремния

Электрическую проводимость и постоянную Холла измеряли с использованием четырехконтактного метода. Принципиальные схемы измерительных ячеек, с помощью которых производили тестирование ρ и R_H , приведены на рис. 1а и 1б соответственно.

Для получения тонких (толщиной ~ 10 мкм) образцов кремния (с исходными линейными размерами $1 \times 5 \times 15$ мм) их запрессовывали в полимерную матрицу. Затем с использованием системы подготовки проб ВЕТА-VECTOR, SIMPLIMET 1000, ISOMET 4000 (фирма Vuehler, USA) производили шлифовку (до заданной толщины) и полировку образца. После этого на образец наносили омические контакты с использованием алюминий-галлиевой пасты.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспозиция образцов (производимая на воздухе при нормальных условиях) в поле бета-частиц с интенсивностью $I = 3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ сопровождается немонотонным во времени (W -образным) изменением микротвердости (рис. 2, кривая 1). Кинетические параметры (длительности облучения $t_{\text{ит}}$, при которых наблюдаются характерные изменения H) совпадают с данными [3].

При тестировании электрических характеристик необходимо учитывать, что при бета-облучении со средней энергией частиц $E \sim 0,5$ МэВ дефекты генерируются в приповерхностном слое толщиной менее 500 мкм. В связи с этим можно предположить, что в

условиях подобного облучения наиболее модифицированным оказывается слой толщиной в единицы-десятки микрометров. В связи с этим при тестировании электрических характеристик кремния, подверженного действию низкоинтенсивного бета-облучения, принципиально важным условием может оказаться соотношение толщин модифицируемого слоя и самого образца.

Характерные зависимости относительной электрической проводимости $(\rho_t - \rho_0)/\rho_0$ от времени бета-облучения для образцов толщиной $d_1 = 1$ мм и $d_2 = 10$ мкм приведены на рис. 2, кривые 2 и 3 соответственно. Видно, что разброс точек на зависимости относительной электрической проводимости образцов толщиной $d_1 = 1$ мм от времени низкоинтенсивного бета-облучения не позволяет выявить каких-либо характерных

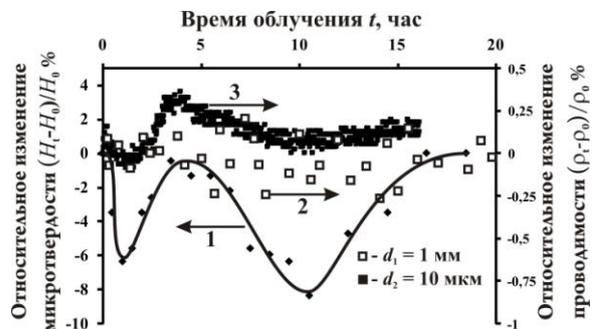


Рис. 2. Зависимости относительных изменений микротвердости (1) и электрической проводимости (при толщине образца $d_1 = 1$ мм – (2) и $d_2 = 10$ мкм – (3) от времени облучения бета-частицами с интенсивностью $I = 3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

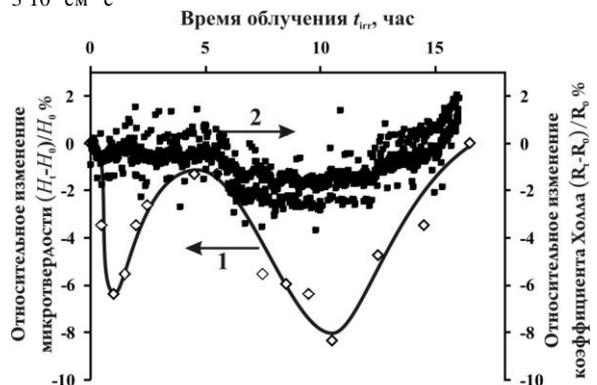


Рис. 3. Зависимости относительных изменений микротвердости (1) и коэффициента Холла (2) от времени облучения бета-частицами с интенсивностью $I = 3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

особенностей. То есть можно констатировать полное отсутствие влияния облучения на проводимость «толстых» образцов кремния.

Уменьшение толщины облучаемого образца до значений $d_2 = 10$ мкм приводит к уменьшению разброса экспериментальных данных и позволяет выявить незначительные отклонения значений $(\rho_t - \rho_0)/\rho_0$ от

нулевой величины (рис. 2). Необходимо обратить внимание на синфазность изменений микротвердости и электрической проводимости. Это свидетельствует о накоплении электрически-активных радиационных дефектов в тонком приповерхностном слое, исследованных ранее в [4–5]. Увеличение толщины образца приводит к «экранированию» бета-индуцированных изменений в приповерхностном слое.

Соотношение относительных изменений микротвердости и постоянной Холла, индуцируемых в кремнии низкоинтенсивным бета-облучением, представлено на рис. 3.

Как следует из данных, представленных на рис. 2 и 3, относительное изменение микротвердости при интенсивности бета-облучения $I = 3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ достигает 9 %, в то время как относительные изменения проводимости и коэффициента Холла не превышают 0,3 и 2 % соответственно. По-видимому, это связано с тем, что микротвердость чувствительна к более широкому классу точечных (вторичных радиационных) дефектов, чем электрические характеристики (проводимость). Таким образом, показано, что величина микротвердости является более чувствительной характеристикой по отношению к бета-индуцированной модификации подсистемы структурных дефектов приповерхностных слоев, чем электрическая проводимость и коэффициента Холла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вавилов В.С., Кекелидзе Н.П., Смирнов Л.С. Действие излучений на полупроводники. М.: Наука, 1998. С. 192.
2. Springer Handbook of Nanotechnology / ed. Bharat Bhushan. Springer, 2007. 1917 p.
3. Головин Ю.И., Дмитриевский А.А., Сучкова Н.Ю. // ФТТ. 2006. Т. 48. № 2. С. 262-265.
4. Головин Ю.И., Дмитриевский А.А., Сучкова Н.Ю., Бадыевич М.В. // ФТТ. 2005. Т. 47. № 7. С. 1237-1240.
5. Бадыевич М.В., Блохин И.В., Головин Ю.И., Дмитриевский А.А., Карцев С.В., Сучкова Н.Ю., Толтаев М.Ю. // ФТП. 2006. Т. 40. № 12. С. 1409-1411.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., проект № П892.

Поступила в редакцию 21 ноября 2012 г.

Dmitriyevskiy A.A., Efremova N.Yu., Lovtsov A.R., Guseva D.G. CORRELATION OF SENSITIVENESS OF SILICON ELECTRIC AND MECHANICAL PROPERTYS TO LOW-FLUX BETA-IRRADIATION

Influence of low-flux ($I \sim 3 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) beta-irradiation on electric conductivity ρ , constant Hall R_H and microhardness H of silicon single-crystals was investigated. It was shown that the microhardness is more sensible property (as compared to ρ and R_H) to the beta-induced modification of defect subsystem.

Key words: silicon; low-flux irradiation; radiation defects; microhardness; electric conductivity; constant Hall.