

Особенности физико-механических свойств облученного Si:Ge

© 2010 г. В.С. Просолович¹, Н.В. Вабищевич², Д.И. Бринкевич¹

¹ Белорусский госуниверситет, Минск

² Полоцкий госуниверситет, Новополоцк

Облучение кардинальным образом изменяет состояние подсистемы структурных дефектов и, соответственно, влияет на физико-механические свойства монокристаллического кремния. Воздействие облучения на микротвердость полупроводниковых материалов исследовано достаточно подробно. Однако поведение других прочностных характеристик (трещиностойкость, микрохрупкость и т.д.), а также влияние изовалентных примесей на изменение прочностных характеристик в процессе облучения практически не изучено.

В настоящей работе исследовалось влияние облучения электронами (4 МэВ, $\Phi = 5 \cdot 10^{12} - 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) и нейтронами ($\Phi = 5 \cdot 10^{16} - 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$) на физико-механические свойства монокристаллического кремния, легированного германием при выращивании из расплава по методу Чохральского. Облучение образцов нейтронами проводилось при температуре не выше 70 °С в канале реактора ВВР-ц. Концентрация Ge в образцах, определенная методом нейтронно-активационного анализа, варьировалась в диапазоне $3 \cdot 10^{18} - 1,7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Концентрация междоузельного кислорода, измеренная по спектрам ИК поглощения, во всех исследованных образцах была $9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Монокристаллы имели удельное сопротивление образцов $\sim 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Облучению подвергались также нелегированные германием образцы с идентичными параметрами. Измерения микротвердости (Н) проводились на приборе ПМТ-3 по стандартной методике. Обработка результатов измерений проводилась с использованием методов математической статистики. Это позволило установить, что имеет место нормальный (гауссов) закон случайного распределения величин микротвердости. Микрохрупкость определялась по стандартной методике с погрешностью 5–7%. Рассчитывались также коэффициент вязкости разрушения (трещиностойкость) K_{IC} и эффективная энергия разрушения γ , оцениваемые по длине радиальной трещины около углов отпечатка.

Установлено, что с ростом концентрации германия микротвердость как исходных, так и облученных монокристаллов кремния снижалась, причем наиболее сильно данный эффект выражался в нейтронно-облученных образцах. Эффект разупрочнения при легировании кремния германием обусловливается, вероятнее всего, увеличением длины ковалентной связи вследствие возрастания параметра решетки в Si:Ge, что приводит к снижению энергии межатомных связей и, соответственно, к уменьшению микротвердости. Легирование Ge подавляет эффект радиационного упрочнения в кремнии. Эффект радиационного упрочнения наблюдался только в нелегированных германием образцах. При $N_{Ge} = 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ и выше облучение электронами не изменяло величину микротвердости. В данных образцах Si:Ge имеет место нормальный (гауссов) закон случайного распределения величин микротвердости с шириной $\Delta N \sim 3 \%$, что совпадает со значениями ΔN , характерными для исходных (необлученных) монокристаллов кремния. В облученных нейтронами образцах полуширина случайного распределения значений микротвердости возрастала, и его не всегда возможно было описать гауссовым распределением (особенно при малых нагрузках), что свидетельствует о неоднородности материала и наличии в кремнии областей разупорядочения с размерами $\sim 1-5 \text{ мкм}$, сравнимыми с размером отпечатка при малых нагрузках.

Обнаружено, что изовалентная примесь германия снижает трещиностойкость монокристаллов кремния и приводит к увеличению микрохрупкости Si:Ge. Экспериментальные результаты объяснены с учетом влияния полей упругих напряжений, создаваемых атомами Ge в монокристаллах кремния. Показано, что формирующиеся при облучении нейтронами области пространственного заряда увеличивают микрохрупкость монокристаллов кремния. Изовалентная примесь Ge подавляет указанный эффект.