

УДК 621.315.592

Подавление радиационного упрочнения кремния, легированного германием

© 2006 С.А.Вабищевич, Н.В.Вабищевич, Д.И.Бринкевич*

*Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь
E-mail: vabser@tut.by*

** Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
E-mail: brinkevich@bsu.by*

Поступила в редакцию 5 декабря 2005 г., окончательный вариант — 28 февраля 2006 г.

Исследовано влияние нейтронного облучения на изменение микротвердости кремния, легированного германием в процессе выращивания из расплава по методу Чохральского. Установлено, что с увеличением концентрации германия микротвердость облученного монокристаллического кремния снижается. Легирование кремния изовалентной примесью германия подавляет эффект радиационного упрочнения кремния.

Effect of neutron irradiation on the microhardness of Cz-silicon doped with germanium has been investigated. Microhardness value of irradiated Si is to be found decreasing when Ge concentration increase. Alloying of Si with Ge suppresses effect of radiation strengthening of Si.

Введение

При абразивной обработке полупроводниковых материалов важно уметь прогнозировать такие характеристики, как скорость абразивного износа и глубину поврежденного слоя. Эти характеристики сложным образом зависят от комплекса механических свойств обрабатываемого материала — модуля Юнга, пластичности, твердости и трещиностойкости [1]. Как правило, эти свойства определяются различными методами в условиях напряженного состояния, далеких от условий, характерных для контактного нагружения при абразивном воздействии. Единственным методом, позволяющим моделировать контактное взаимодействие абразивных частиц с обрабатываемым материалом, является микроиндентирование [2,3].

При исследовании влияния облучения на микротвердость полупроводниковых материалов достаточно хорошо изучена область умеренных доз D от ~ 1 до $\sim 10^8$ Гр. Радиационные эффекты при $1 \text{ Гр} \gg D \gg 10^8 \text{ Гр}$ изучены недостаточно и в общем

случае не могут быть надежно предсказаны путем простой экстраполяции данных, полученных при умеренных дозах облучения [4].

В работе [5] наблюдалось резкое возрастание микротвердости GaAs при достаточно высоких флюенсах нейтронного облучения ($> 10^{17} \text{ см}^{-2}$).

Целью данной работы являлось исследование влияния нейтронного облучения флюенсами $5 \cdot 10^{16}$ - $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ на микротвердость монокристаллического кремния, легированного германием при выращивании из расплава по методу Чохральского.

Методика эксперимента

Облучение нейтронами проводилось при температуре не выше 70°C в канале реактора ВВР-Ц флюенсами $5 \cdot 10^{16}$ - $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Легирование монокристаллов германием осуществлялось путем его введения в расплав кремния. Концентрация Ge в образцах, определенная методом нейтронно-активационного анализа, варьировалась от $1 \cdot 10^{18}$ - $1,7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Концентрация междуузельного кисло-

рода N_O во всех исследованных образцах, по данным ИК поглощения, составляла $\sim 9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, удельное сопротивление монокристаллов — $\sim 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Облучению подвергались также образцы с идентичными параметрами, не легированные германием.

Измерения микротвердости H проводились на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор от 50 до 200 г. Учитывая анизотропию микротвердости кремния [6], измерения проводили вдоль направления $\langle 111 \rangle$ по стандартной методике. Так как величина H зависит от обработки поверхности кремния [7], то все образцы подвергались идентичной обработке (полировка и травление). При каждом измерении на поверхность образца наносилось не менее 50 отпечатков, обработка результатов измерений проводилась с использованием методов математической статистики. Погрешность измерений микротвердости составляла 2-3%.

Результаты и обсуждение

Типичные зависимости микротвердости H от величины нагрузки P для образцов легированного германием кремния, облученных флюенсом нейтронов $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, представлены на рис.1. Эти зависимости имеют вид, характерный для неупругих твердых кристаллов [7]: при увеличении нагрузки от 50 до 100 г микротвердость уменьшалась на 5-10%, а при дальнейшем возрастании P меняется незначительно. Следуя [7], это можно рассматривать как свидетельство существования на поверхности монокристаллического кремния упрочненного слоя, обладающего высокой твердостью и формирующегося путем димеризации химических связей на поверхности полупроводника.

С увеличением концентрации германия микротвердость как исходных, так и облученных моно-

кристаллов кремния снижалась. Так, при увеличении N_{Ge} до $1,7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ величина H снижалась на 4% в необлученных и на 12% — в облученных кристаллах. Эффект разупрочнения кремния при легировании германием ранее наблюдался в [8], и объяснялся увеличением длины ковалентной связи вследствие увеличения параметра решетки Si:Ge, что, в свою очередь, вызывает снижение энергии межатомных связей и, соответственно, уменьшение микротвердости.

При облучении наблюдался эффект упрочнения монокристаллов кремния (рис.2) микротвердость которых возрастала на 3-12%. Наибольшие изменения микротвердости наблюдались в нелегированных германием кристаллах. В облученных образцах распределение микротвердости, особенно при малых нагрузках, не всегда можно было описать нормальным гауссовым распределением, что свидетельствует о появлении в облученном нейтронами кремнии областей разупорядочения, размер которых ($\sim 1-5 \text{ мкм}$) сравним с размерами отпечатка, образующегося при малых нагрузках. При увеличении флюенса облучения свыше $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ распределение микротвердости становилось близким к гауссову, что указывает на перекрытие областей разупорядочения при увеличении их размеров и концентрации.

Следует отметить, что существенного роста микротвердости при флюенсах нейтронного облучения $10^{17}-10^{18} \text{ см}^{-2}$, аналогичного наблюдавшемуся в GaAs и объясняемому перекрытием областей радиационного разупорядочения [5], в наших экспериментах обнаружено не было. Наоборот, в интервале флюенсов $1 \cdot 10^{17}-5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ происходило незначительное (в пределах погрешности измерений) уменьшение величины H (рис.2), хотя перекрытие областей разупорядочения также должно было происходить.

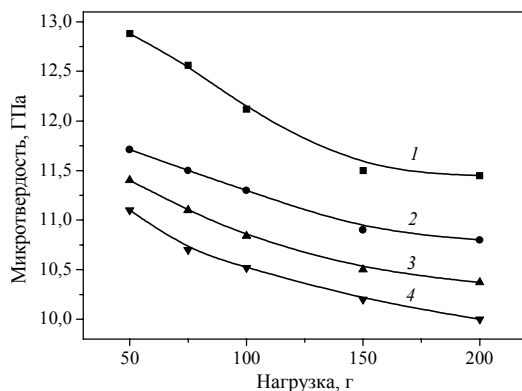


Рис.1. Зависимость микротвердости монокристаллов Si:Ge, облученных нейтронами флюенсом $\Phi=5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, от нагрузки. Содержание Ge (см^{-3}): 1 — 0; 2 — 10^{18} ; 3 — 10^{19} ; 4 — $1,7 \cdot 10^{20}$.

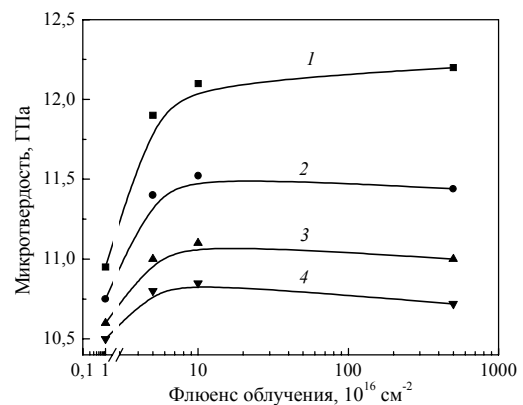


Рис.2. Зависимость микротвердости монокристаллов Si:Ge при нагрузке 100 г от флюенса облучения нейтронами. Содержание Ge (см^{-3}): 1 — 0; 2 — 10^{18} ; 3 — 10^{19} ; 4 — $1,7 \cdot 10^{20}$.

Механизм радиационного упрочнения обычно связывается с торможением дислокаций скоплениями радиационных дефектов [5,9], хотя, например, в работе [10] отмечалось, что кластеры радиационных дефектов не проявляют себя как “жесткие” неразрушающиеся препятствия и не являются сильной помехой для движения дислокаций. Дефектами, ответственными за радиационное упрочнение, могут быть точечные дефекты, абсорбирующиеся на дислокациях, предположительно междоузельные атомы.

Объяснить полученные экспериментальные результаты можно в предположении, что образующиеся при облучении области разупорядочения не являются эффективными стопорами для дислокаций, поэтому увеличение их концентрации с ростом флюенса облучения не должно приводить к повышению микротвердости монокристаллического кремния, что и наблюдалось.

Легирование германием подавляет эффект радиационного упрочнения кремния, при этом относительные изменения микротвердости $\Delta H/H$ при облучении кристаллов Si:Ge с концентрацией германия $1,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ лишь незначительно превышают погрешность эксперимента (Таблица). Ранее подавление эффекта радиационного упрочнения, вызываемого γ -квантами, наблюдалось при легировании кремния редкоземельным элементом Gd [11]. В нашем случае легирование германием приводит, по-видимому, к уменьшению концентрации дефектов междоузельного типа, формирующихся в процессе нейтронного облучения [12,13], что может быть связано с тем, что изовалентные примеси в кремнии, такие как германий, являются центрами аннигиляции дефектов междоузельного и вакансионного типа [14].

Таблица

Изменение микротвердости монокристаллов Si:Ge при облучении. Нагрузка на индентор 100 г				
$N_{\text{Ge}} \text{ см}^{-3}$	—	$9 \cdot 10^{18}$	$6 \cdot 10^{19}$	$1,5 \cdot 10^{20}$
$H, \text{ ГПа}$	10,9	10,7	10,6	10,5
$\Delta H/H, \%$	12	7	4	3

Выводы

Показано, что при облучении быстрыми нейтронами флюенсом $5 \cdot 10^{16} - 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ микротвердость монокристаллического кремния, легированного германием, постоянна и снижается с ростом концентрации германия в материале, то есть легирование изовалентной примесью подавляет эффект радиационного упрочнения монокристаллов кремния.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке БРФФИ (грант Ф05К-071).

Литература

1. Литвинов Ю.М., Литвинов М.Ю. Методология определения механических свойств полупроводниковых материалов с помощью метода непрерывного вдавливания индентора. Изв. ВУЗов, Материалы электронной техники, 2004, №4, с.11-16.
2. Головин Ю.И., Иволгин В.И., Коренков И.И., Коренкова Н.В., Рябко Р.И. Определение комплекса механических свойств материалов в нанобъемах методом наноиндентирования. Конденсированные среды и межфазные границы, 2001, т.3, №2, с.122-135.
3. Бульчев С.И., Алехин В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. М.: Машиностроение, 1990, 224 с.
4. Головин Ю.И., Дмитриевский А.А., Николаев Р.К., Пушнин И.А. Обратимое разупрочнение монокристаллического фуллерита C_{60} под действием ультраслабого ионизирующего облучения. ДАН, 2002, т.385, №1, с.41-43.
5. Джибути З.В., Долидзе Н.Д., Сихуашвили Н., Эристави Г.Л. Влияние нейтронного облучения на микротвердость арсенида галлия. Письма в ЖТФ, 2004, т.30, №17, с.45-47.
6. Сандулова А.В., Рыбак В.М. Анизотропия микротвердости кремния. ФТТ, 1963, т.5, №9, с.2587-2590.
7. Герасимов А.Б., Чирадзе Г.Д., Казаров Р.Э., Ломидзе И.Д., Ратиани Т.К. Физическая природа изменения микротвердости по глубине образца. ФХОМ, 2004, №3, с.71-74.
8. Бринкевич Д.И., Вабищевич С.А., Петров В.В. Влияние примесей IIIВ и IV групп периодической системы на микротвердость монокристаллического кремния. Микроэлектроника, 1997, т.26, №4, с.297-300.
9. Сирота Н.Н., Курилович Н.Ф., Березина Г.М. Микротвердость и фотомеханический эффект монокристаллического арсенида галлия, облученных быстрыми нейтронами. Докл. АН БССР, 1975, т.19, №10, с.880-882.
10. Реутов В.Ф. О вкладе нанокластеров в радиационное упрочнение металлов. ФММ, 2003, т.96, №6, с.92-99.
11. Дранчук С.Н., Карпов Ю.А., Шаховцов В.И., Шиндич В.Л. Особенности структуры кремния, легированного гадолинием. Неорганические материалы, 1981, т.17, №3, с.757-761.
12. Борщенский В.В., Бринкевич Д.И., Петров В.В. ИК поглощение в нейтронно-облученном кремнии, легированном германием. Журнал прикл. Спектроскопии, 1990, т.53, №3, с.499-502.
13. Борщенский В.В., Бринкевич Д.И., Петров В.В., Стук А.А. Электрофизические свойства кремния, легированного германием и гафнием, облученного нейтронами. Неорганические материалы, 1991, т.27, №3, с.437-440.
14. Khirunenko L.I., Pomozov Yu.V., Sosnin M.G., Shinkarenko V.K. Oxygen in silicon doped with isovalent impurities. Physica B: Condensed Matter, 1999, v.273-274, p.317-321.