

## МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОЕВ КРЕМНИЯ, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ БОРА И ФОСФОРА

С.А. Вабищевич<sup>1)</sup>, Н.В. Вабищевич<sup>1)</sup>, Д.И. Бринкевич<sup>2)</sup>, В.С. Просолович<sup>2)</sup>, Ю.Н. Янковский<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>УО «Полоцкий государственный университет»,

ул. Блохина, 29, Новополоцк-214400, Беларусь; e-mail: [vabser@tut.by](mailto:vabser@tut.by)

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, Минск-220030,

тел: 017-2095051; e-mail: [prosolovich@bsu.by](mailto:prosolovich@bsu.by)

Исследовано изменение прочностных характеристик в процессе быстрой термической обработки пластин кремния, имплантированных ионами бора и фосфора. Имплантация способствует приповерхностному упрочнению монокристаллов кремния. Показано, что быстрый термический отжиг приводит к резкому снижению микротвердости в приповерхностной области монокристалла на глубинах до 1 мкм и увеличению трещиностойкости (росту  $K_{IC}$  и  $\gamma$ ) при малых нагрузках. Полученные экспериментальные результаты объяснены с учетом генерации вакансий в процессе быстрого термического отжига. Обсуждается механизм приповерхностного радиационного упрочнения кремния.

### Введение

Ранее [1] было обнаружено приповерхностное упрочнение монокристаллов кремния при высокоэнергетичной (~1 МэВ/нуклон) ионной имплантации. Было высказано предположение [2] о том, что указанный эффект обусловлен диффузией к поверхности собственных междоузельных атомов из нарушенного ионной имплантацией слоя кремния и формированием дефектов междоузельного типа. Однако прямых экспериментальных доказательств этого предположения получено не было.

С другой стороны [3], быстрая термообработка (БТО) монокристаллического кремния приводит к генерации вакансий. Если предположение о междоузельном характере вышеупомянутого приповерхностного радиационного упрочнения верно, то БТО должна подавлять указанный эффект вследствие взаимодействия генерирующихся при БТО вакансий с дефектами междоузельного типа.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния быстрой термообработки на физико-механические свойства монокристаллического кремния, имплантированного ионами бора и фосфора, и получение экспериментальных доказательств междоузельного механизма эффекта приповерхностного радиационного упрочнения.

### Методика эксперимента

Имплантация ионами  $B^+$  (с энергией  $E = 500$  кэВ в пластины КЭФ4,5) и  $P^+$  ( $E = 1000$  кэВ в пластины КДБ12) дозой  $\Phi = 5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> осуществлялась при комнатной температуре на ускорителе ионов DTL (г. Бохум, Германия). Проецированный пробег ионов в этих материалах  $R_p$  был ~ 1 мкм. Плотность ионного тока составляла 0,3 мкА/см<sup>2</sup>.

Измерения микротвердости (H) проводились на приборе ПМТ-3. Нагрузка (P) на индентор варьировалась в пределах от 20 до 200 г. При каждом измерении на поверхность образца наносилось не менее 50 отпечатков, и проводилась обработка результатов измерений с использованием методов математической статистики [4]. Это обеспечивало погрешность измерений микротвердости менее 2,5 % (с доверительной вероятностью 0,95). Значения коэффициента вязкости разрушения  $K_{IC}$  и эффективной энергии разрушения  $\gamma$  рассчитывались по средней длине ради-

альных трещин в углах отпечатков согласно формулам [5]:

$$K_{IC} = 0,016 \left( \frac{E}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{P}{L^{\frac{3}{2}}} \quad \text{и} \quad \gamma = \frac{K_{IC}^2}{2E}$$

где  $E$  – модуль Юнга (для кремния  $1,5 \cdot 10^{11}$  Па),  $L$  – длина трещины. Погрешность измерений не превышала 8 %.

Быстрый термический отжиг длительностью до 60 с выполнялся при температуре 1000 °С.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Установлено, что при использовавшихся в работе энергиях имплантации ионов В и Р имел место эффект приповерхностного упрочнения монокристаллов кремния. В имплантированных образцах микротвердость при малых нагрузках (20-50 г) существенно возрастала, а при нагрузках 200 г и выше – ее изменения не превышали 3–5 %, что близко к погрешности измерений (кривые 1 на рис. 1 и 2). Указанный эффект более выражен при внедрении ионов бора, чем при имплантации фосфора. Отметим, что радиационное приповерхностное упрочнение наблюдалось при более низких нагрузках, и его величина была несколько ниже (на ~ 40 %), чем в случае высокоэнергетичной имплантации ионов бора ( $E = 5,6-13,6$  МэВ) [1].

В имплантированных образцах при малых нагрузках (20-50 г) наблюдалось существенное уширение (в 3-4 раза) случайного распределения величин микротвердости. Это свидетельствует о формировании в процессе имплантации вблизи поверхности кремния скоплений дефектов с размерами, сравнимыми с размерами отпечатка при указанных нагрузках (0,5 – 1 мкм).

Быстрый термический отжиг приводил к резкому снижению микротвердости в приповерхностной области монокристалла на глубинах до 1 мкм, что соответствовало нагрузкам 20-40 г (кривые 2, 3 на рис. 1 и 2). При увеличении нагрузки микротвердость резко возрастает и при  $P = 100$  г и выше достигает значений, характерных для исходного необлученного кремния. Такие нетрадиционные зависимости микротвердости от нагруз-

ки наблюдались при БТО образцов, имплантированных как  $B^+$  (рис. 1), так и  $P^+$  (рис. 2).

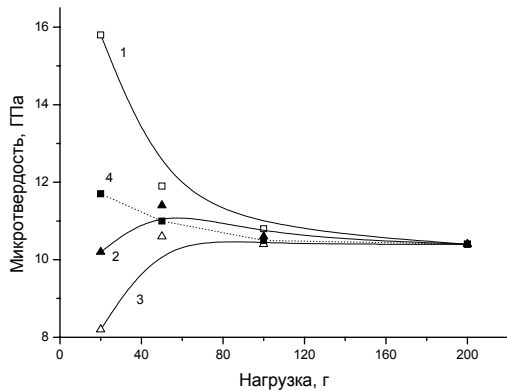


Рис. 1. Зависимость микротвердости Si от нагрузки для образцов, имплантированных ионами  $B^+$  энергией 500 кэВ и дозой  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Длительность отжига, с: 1 - 0; 2 - 15; 3 - 60. Кривая 4 - исходный необлученный КЭФ4,5

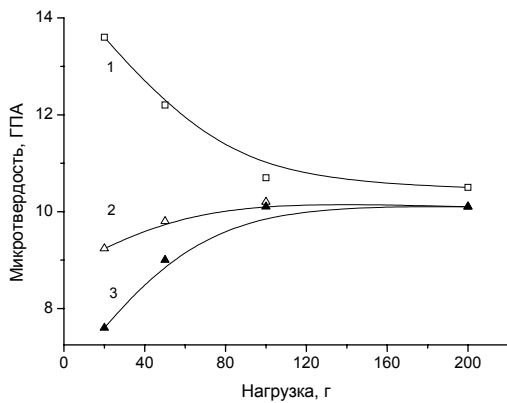


Рис. 2. Зависимость микротвердости Si от нагрузки для образцов, имплантированных ионами  $P^+$  энергией 1000 кэВ и дозой  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Длительность отжига, с: 1 - 0; 2 - 15; 3 - 60.

Следует отметить, что микрохрупкость имплантированных и подвергнутых БТО образцов была несколько ниже, чем исходных пластин кремния. Так, даже при максимальной нагрузке 200 г не наблюдалось разрушения отпечатков, в то время как в исходном неимплантированном кремнии при этой же нагрузке разрушалось около 10 % отпечатков.

Трещины в углах отпечатков появлялись только при нагрузке 50 г и выше. В табл. 1 и 2 приведены рассчитанные по средней длине радиальной трещины для разных нагрузок (от 50 до 200 г) значения коэффициента вязкости разрушения  $K_{1C}$  и эффективной энергии разрушения  $\gamma$ . При увеличении нагрузки указанные параметры снижаются, т.е. трещиностойкость материала падает. Такое поведение  $K_{1C}$  и  $\gamma$  наблюдается и в исходных необлученных образцах. Быстрый термический

отжиг приводил к увеличению трещиностойкости (росту  $K_{1C}$  и  $\gamma$ ) при малых нагрузках (табл. 1 и 2), при которых наблюдалось снижение микротвердости. Указанный эффект более выражен при имплантации ионов фосфора (табл. 2).

Таблица 1. Параметры трещиностойкости кремния марки КЭФ4,5 ориентацией (100), имплантированного ионами бора и подвергнутого быстрому термическому отжигу

Длительность ТО, с	$K_{1C}, 10^6 \text{ Па} \cdot \text{м}^{\frac{1}{2}}$ при нагрузке, г				$\gamma, \text{ Па} \cdot \text{м}$ при нагрузке, г			
	50	100	150	200	50	100	150	200
-	1,65	1,36	1,31	1,29	9,1	6,12	5,72	5,53
60	2,66	1,68	1,35	1,31	23,6	9,36	6,01	5,72

Таблица 2. Параметры трещиностойкости кремния марки КДБ12 ориентацией (100), имплантированного ионами фосфора и подвергнутого быстрому термическому отжигу

Длительность ТО, с	$K_{1C}, 10^6 \text{ Па} \cdot \text{м}^{\frac{1}{2}}$ при нагрузке, г				$\gamma, \text{ Па} \cdot \text{м}$ при нагрузке, г			
	50	100	150	200	50	100	150	200
-	1,47	1,40	1,40	1,38	7,2	6,7	6,5	6,3
15	1,83	1,54	1,35	1,30	11,1	7,12	6,05	5,7
60	3,00	1,52	1,40	1,38	29,9	7,7	6,5	6,34

Полученные экспериментальные результаты могут быть объяснены с учетом следующих обстоятельств.

Известно, что в процессе БТО по всему объему монокристалла кремния имеет место генерация вакансий [3, 6-9]. С другой стороны, предполагается [2], что радиационное приповерхностное упрочнение, наблюдающееся при имплантации кремния, обусловлено диффузией к поверхности собственных междоузельных атомов из нарушенного ионной имплантацией слоя кремния и формированием дефектов междоузельного типа. Генерируемые при БТО вакансии эффективно взаимодействуют с дефектами междоузельного типа, что должно приводить к подавлению эффекта приповерхностного радиационного упрочнения имплантированного кремния, которое и наблюдалось экспериментально.

Кроме того, в работе [10] отмечалось, что вакансионные дефекты могут приводить к раз-

прочности кремния. Это легко объяснить, если учесть, что сжатие (индентирование) бездислокационных полупроводников сопровождается генерацией избыточных собственных междоузельных атомов [11]. Резкое снижение (ниже значений, характерных для необлученного кремния) микротвердости в приповерхностной области после проведения БТО имплантированных образцов обусловлено, вероятнее всего, указанным разупрочняющим воздействием вакансионных дефектов, формирующихся в результате ионной имплантации и последующего быстрого термического отжига.

Увеличение трещиностойкости кремния при малых нагрузках после быстрого термического отжига обусловлено увеличением пластичности материала и хорошо коррелирует с поведением микротвердости.

Таким образом, приведенные выше данные являются экспериментальным подтверждением высказанного в работе [2] вывода о том, что дефекты, ответственные за приповерхностное радиационное упрочнение кремния, являются электрически неактивными дефектами междоузельного типа и формируются в процессе диффузии к поверхности кремния собственных междоузельных атомов из нарушенного ионной имплантацией слоя.

### Заключение

В настоящей работе показано, что быстрый термический отжиг приводит к разупрочнению приповерхностной области монокристалла кремния на глубине до 1 мкм и увеличению трещиностойкости (росту  $K_{IC}$  и  $\gamma$ ) при малых нагрузках. Получено экспериментальное подтверждение высказанного в работе [1] вывода о том, что де-

фекты, ответственные за приповерхностное радиационное упрочнение кремния, являются электрически неактивными дефектами междоузельного типа и формируются в процессе диффузии к поверхности кремния собственных междоузельных атомов из нарушенного ионной имплантацией слоя. Полученные экспериментальные результаты объяснены с учетом генерации вакансий в процессе быстрого термического отжига.

### Список литературы

1. Вабищевич С.А., Вабищевич Н.В., Бринкевич Д.И., Просолович В.С., Янковский Ю.Н. // Поверхность. Рентген-, синхротронные и нейтронные исследования. – 2010. – 1. – С. 78-81.
2. Vabishchevich S.A., Vabishchevich N.V., Brinkevich D.I., Prosolovich V.S., Yankovskii Yu.N. // Inorganic materials. – 2010. – V. 46. - 12. – P. 1281-1284
3. Voronkov V.V., Falster R. // Materials science in semiconductor processing. – 2003. – 5. – P. 387-390.
4. Капоша В.К., Лобко С.И., Чикова Т.С. Математическая обработка результатов эксперимента. – Минск: Высшая школа, 1991. – 164 с.
5. Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. – М.: Наука, 1989. – 220 с.
6. Fu Liming, Yang Deren, Ma Xiangyang, Jiang Hanqin, Que Duanlin // Semicond. Sci. Technol. – 2007. – 22. – P. 1302-1306.
7. Jacob M. // Semiconductor process and device performance modeling. Symposium. Boston, MA, USA. 2-3.12.1997. – Boston, 1997. – P. 129-134.
8. Frewen T.A., Sinno T. // Appl. Phys. Lett. – 2006. – 89. – P. 191903/1-3
9. US patent 6686620, primary class 438/473, publication 3.02.2004 / R.J.Falster, M.J.Binns, H.W.Korb
10. Головин Ю.И., Дмитриевский А.А., Сучкова Н.Ю. // Физика твердого тела. – 2006. – Т. 48. - 2. – С. 262-265.
11. Головин Ю.И., Тюрин А.И. // Физика твердого тела. – 2000. – Т. 42. - 10. – С. 1818-1820.

## MICROMECHANICAL PROPERTIES OF THE SILICON LAYERS IMPLANTED BY BORON AND PHOSPHORUS IONS

S.A. Vabishchevch<sup>1</sup>, N.V. Vabishchevch<sup>1</sup>, D.I. Brinkevich<sup>2</sup>, V.S. Prosolovich<sup>2</sup>, Yu.N. Yankovskii<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Polotski State University, Blohina str.29, 211440 Novopolotsk, Belarus, e-mail: [vabser@tut.by](mailto:vabser@tut.by)

<sup>2</sup>Belarusian State University, Nezavisimosty ave., 4, 220030, Minsk, Belarus  
tel: 017-2095051, e-mail: [prosolovich@bsu.by](mailto:prosolovich@bsu.by)

Change of strength characteristics during fast thermal treatment of the silicon plates implanted by boron and phosphorus ions was investigated. Implantation promotes to surface hardening of silicon single crystals. It is shown, that fast thermal treatment leads to sharp decrease of microhardness at monocrystal surface on depths up to 1 micron and to increase  $K_{IC}$  and  $\gamma$  at small loadings. The received experimental results are explained in view of generation of vacancies during fast thermal treatment. The mechanism of surface radiating hardening of silicon single crystal was discussed.