

УДК 621.315.592

**МИКРОТВЕРДОСТЬ ПЛАСТИН КРЕМНИЯ,  
ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ ИОНАМИ БОРА***канд. физ.-мат. наук, доц. С.А. ВАБИЩЕВИЧ, Н.В. ВАБИЩЕВИЧ**(Полоцкий государственный университет);**канд. физ.-мат. наук Д.И. БРИНКЕВИЧ,**канд. физ.-мат. наук В.С. ПРОСОЛОВИЧ, канд. физ.-мат. наук Ю.Н. ЯНКОВСКИЙ**(Белорусский государственный университет, Минск)*

*Исследовано изменение микротвердости монокристаллического кремния при высокоэнергетичной имплантации ионов бора с энергией 5,6...13,6 МэВ и дозой от  $1 \cdot 10^{13}$  до  $1 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>. Обнаружено упрочнение приповерхностного слоя (толщиной до 1 мкм) пластин, обусловленное формированием в указанном слое дефектов предположительно междоузельного типа. Эффект приповерхностного радиационного упрочнения существенно зависит от энергии и дозы имплантируемых ионов. При имплантации ионов бора с энергией 13,6 МэВ указанный эффект достигал максимума при дозе имплантации  $\sim 5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>, а для ионов с энергией 5,6 МэВ не выходил на насыщение даже при максимальной дозе  $1 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>. Обнаружено, что высокоэнергетичная имплантация бора при дозе до  $1 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> приводит к уширению профиля распределения микротвердости при малых нагрузках.*

Применение ионного легирования с ускоряющим напряжением свыше 1 МэВ в процессе производства полупроводниковых приборов открывает широкие возможности для создания проводящих и легирующих слоев на глубинах в десятки микрон, обеспечивает сокращение числа этапов маскирования и позволяет отказаться от дорогостоящих эпитаксиальных структур [1]. Процессы радиационного дефектообразования в кремнии при высокоэнергетичной ионной имплантации бора изучены достаточно хорошо [1 – 3]. Однако прочностные свойства практически не исследовались.

В процессе изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем пластины полупроводниковых материалов подвергаются различным механическим воздействиям: резке, шлифовке, полировке и т.д. При абразивной обработке полупроводниковых материалов важно уметь прогнозировать такие характеристики, как скорость абразивного износа и глубину приповерхностных повреждений, возникающих при различного рода абразивном воздействии на обрабатываемый материал. Указанные характеристики сложным функциональным образом зависят от комплекса механических свойств обрабатываемого материала: упругих (модуль Юнга), пластических (твердость) и хрупких (трещиностойкость) [4]. Как правило, эти механические свойства определяются различными методами в условиях напряженного состояния, далеких от контактного нагружения, имеющего место при абразивном воздействии. Единственным методом, позволяющим моделировать контактное взаимодействие абразивных частиц с обрабатываемым материалом, является микроиндентирование. Условия, возникающие в локальной зоне под индентором, во многом аналогичны некоторым практически важным случаям контактного взаимодействия, например, при сухом трении, ударном и абразивном износе и т.д. Поэтому микроиндентирование может применяться для моделирования элементарных актов контактного взаимодействия в условиях, приближенных к реальным, эксплуатационным [5].

**Методика эксперимента.** Целью работы являлось исследование влияния высокоэнергетичной имплантации ионов бора на микротвердость монокристаллического кремния.

Пластины монокристаллического кремния n- и p-типов проводимости (соответственно марки КЭФ-4,5 и КДБ-20) имплантировались ионами бора с энергией 5,6...13,6 МэВ и дозой от  $1 \cdot 10^{13}$  до  $1 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> при комнатной температуре на импульсном циклотроне ИЦ-9. Плотность ионного тока варьировалась в интервале от 0,3 до 2,5 мкА/см<sup>2</sup>. Внедрение ионов бора производилось в пластины кремния толщиной  $450 \pm 20$  мкм.

Измерения микротвердости (Н) проводились на приборе ПМТ-3 по стандартной методике вдоль направления  $\langle 100 \rangle$ . Поверхность пластин дополнительной обработке (шлифовка, полировка, травление и т.д.) не подвергалась. В качестве индентора использовался алмазный наконечник в форме четырехгранной пирамиды с квадратным основанием и углом ( $\alpha$ ) при вершине, равном  $136^\circ$ . Нагрузка на индентор варьировалась в диапазоне 50...400 г. При каждом измерении на поверхность пластины наносилось не менее 50 отпечатков и проводилась обработка результатов измерений с использованием методов математической статистики [6]. Погрешность измерений микротвердости составляла менее 3 % (с доверительной вероятностью 0,95).

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** Кривые зависимости микротвердости  $H$  от величины нагрузки  $P$  для всех исследовавшихся образцов представлены на рисунке 1. Они имели вид, характерный для непластичных (твердых) кристаллов. Микротвердость существенно уменьшалась при увеличении нагрузки от 50 до 200 г, а при дальнейшем возрастании  $P$  она изменялась незначительно. Такое приповерхностное упрочнение монокристаллов кремния наблюдалось ранее [4, 7] и, по мнению авторов [7], обусловлено димеризацией химических связей на поверхности полупроводника и формированием микрорельефа поверхности.

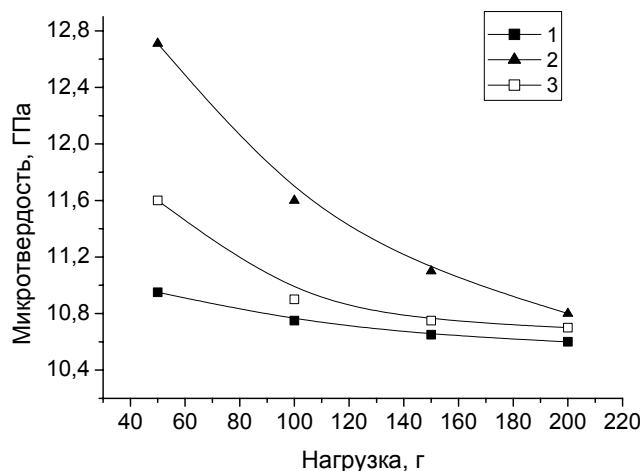


Рис. 1. Зависимость микротвердости кремния от нагрузки на индентор. Энергия ионов 13,6 МэВ. Доза облучения ионами бора,  $10^{14} \text{ см}^{-2}$ : 1 – исходный; 2 – 3; 3 – 100

Имплантация ионов  $\text{B}^+$  приводила к увеличению эффекта приповерхностного упрочнения – микротвердость при малых нагрузках (50 г) существенно возрастала, а при нагрузках 200 г и выше ее изменения не превышали 3...5 %, что близко к погрешности измерений (рис. 2).

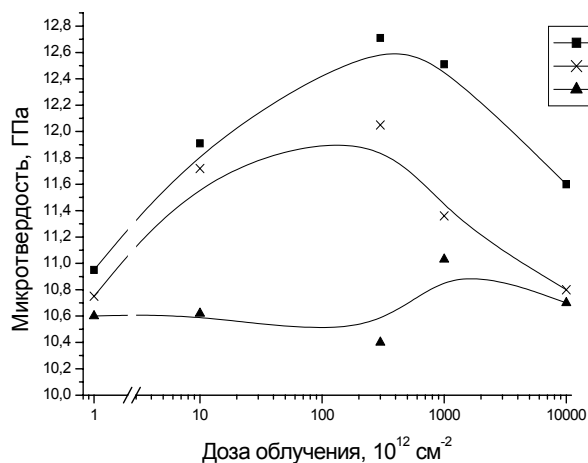


Рис. 2. Зависимость микротвердости кремния от дозы имплантированных ионов бора (нагрузка, г: 1 – 50; 2 – 100; 3 – 200; энергия ионов – 13,6 МэВ)

Эффект приповерхностного радиационного упрочнения существенно зависел от энергии и дозы имплантируемых ионов. Так, при имплантации ионов бора с энергией 13,6 МэВ указанный эффект достигал максимума при дозе имплантации примерно  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , а для ионов с энергией 5,6 МэВ не выходил на насыщение даже при максимальной дозе  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  (рис. 3).

Отметим также, что высокоэнергетичная имплантация бора приводила к увеличению дисперсии ( $D$ ) случайного распределения значений диагонали отпечатка при индентировании, особенно при малых нагрузках (рис. 4), причем указанный эффект с ростом дозы (в диапазоне доз  $10^{13} \dots 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) существенно снижался. При нагрузке свыше 200 г (глубина проникновения индентора  $\sim 3 \text{ мкм}$ ) увеличения диспер-

сии не наблюдалось, ее величина во всем исследованном диапазоне доз была близка к значениям, характерным для исходного (не имплантированного) кремния. Это свидетельствует об образовании у поверхности пластин (на глубине до 1 мкм, соответствующей глубине внедрения индентора при нагрузке 50 г) дефектных областей с размерами, близкими к размерам отпечатков индентора при указанной нагрузке (~ 5 мкм). Эти области при увеличении дозы облучения перекрываются, что приводит к уменьшению величины  $D$  (см. рис. 4).

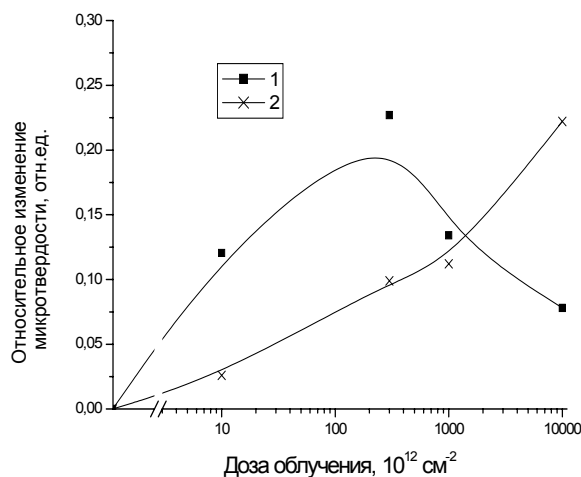


Рис. 3. Зависимость относительного изменения микротвердости  $(H_{50} - H_{200})/H_{200}$  при увеличении нагрузки от 50 до 200 г от дозы облучения ионами  $B$  с энергиями, МэВ: 1 – 13,6; 2 – 5,6

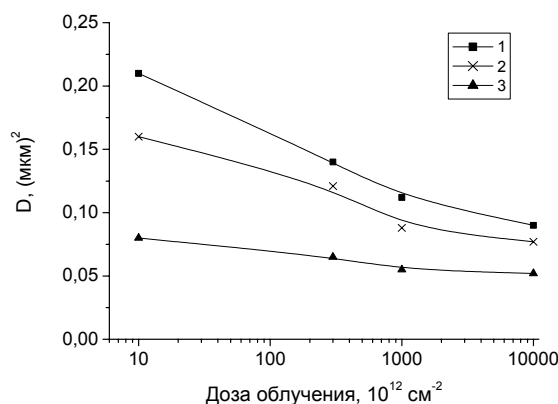


Рис. 4. Зависимость дисперсии величины диагонали отпечатка от дозы имплантированных ионов бора (нагрузка, г: 1 – 50; 2 – 100; 3 – 200; энергия ионов – 13,6 МэВ)

Отметим, что в работе [8], изменения слоевого сопротивления в приповерхностном слое монокристалла при высокоэнергетичной имплантации бора обнаружено не было. Это указывает на то, что в приповерхностной области формируются электрически неактивные дефекты.

Обнаруженные в работе [8] вакансионные дефекты, формирующиеся на глубине ~ 5 мкм, соответствующей нагрузке ~ 400 г, значительного влияния на величину микротвердости кремния не оказывают.

Ранее показано, что дефекты междуузельного типа способствуют упрочнению кремния [9], а введение вакансионных дефектов сопровождается разупрочнением монокристаллов Si [10].

Исходя из приведенных выше экспериментальных результатов, можно предположить, что дефекты, ответственные за приповерхностное радиационное упрочнение кремния, являются электрически неактивными дефектами междуузельного типа. Поскольку дозовая зависимость с максимумом является типичной для случая, когда наблюдаемый эффект обусловлен диффузией компонентов пар Френкеля из нарушенного слоя [11], можно предположить, что указанные дефекты формируются в процессе диффузии к поверхности кремния собственных междуузельных атомов из нарушенного ионной имплантацией слоя.

При индентировании пластин Si с обратной (не имплантированной) стороны дозовой зависимости микротвердости обнаружено не было. При всех исследованных дозах имплантации значения  $H$  (при нагрузке 100 г) варьировались в пределах 11,4...11,6 ГПа, т.е. изменялись в пределах погрешности измерений. Не было замечено и эффекта приповерхностного упрочнения – зависимости микротвердости от нагрузки при всех дозах имплантации были идентичны аналогичным зависимостям, характерным для исходного (не имплантированного) материала. Повышенные по сравнению с рабочей стороной значения микротвердости обусловлены различиями условий обработки: полировка рабочей (имплантированной) стороны и травление обратной стороны. Приведенные экспериментальные данные свидетельствуют об отсутствии эффекта дальнего действия, наблюдавшегося авторами [12] при низкоэнергетичной ионной имплантации.

**Выводы.** Облучение высокоэнергетичными ионами бора приводит к приповерхностному упрочнению монокристаллов кремния. Величина приповерхностного радиационного упрочнения существенно зависит от энергии имплантируемых ионов. При имплантации ионов бора с энергией 13,6 МэВ указанный эффект достигал максимума при дозе имплантации  $\sim 5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>, а для ионов с энергией 5,6 МэВ не выходил на насыщение даже при максимальной дозе ( $1 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>). Эффекта дальнего действия, наблюдавшегося при низкоэнергетичной имплантации авторами [12], не обнаружено. Экспериментальные результаты указывают на наличие в приповерхностном слое толщиной менее 1 мкм дефектов, предположительно, междоузельного типа, которые не являются электрически активными и, соответственно, не приводят к росту удельного сопротивления монокристаллов кремния.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Буренков, А.Ф. Высокоэнергетичная ионная имплантация / А.Ф. Буренков, Ф.Ф. Комаров // Журнал технической физики. – 1988. – Т. 58, № 3. – С. 559 – 566.
2. Особенности дефектообразования в кремнии при высокоэнергетичной ионной имплантации бора / Ф. Аль-Баккур [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 1991. – Т. 25, № 10. – С. 1841 – 1844.
3. Дефекты структуры в ионноимплантированном кремнии / Ф.Ф. Комаров [и др.]. – Минск: Университетское, 1990. – 320 с.
4. Литвинов, Ю.М. Методология определения механических свойств полупроводниковых материалов с помощью метода непрерывного вдавливания индентора / Ю.М. Литвинов, М.Ю. Литвинов // Изв. вузов. Материалы электронной техники. – 2004. – № 4. – С. 11 – 16.
5. Определение комплекса механических свойств материалов в нанобъемах методами наноиндентирования / Ю.И. Головин [и др.] // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2001. – Т. 3, № 2. – С. 122 – 135.
6. Калоша, В.К. Математическая обработка результатов эксперимента / В.К. Калоша, С.И. Лобко, Т.С. Чикова. – Минск: Высш. шк., 1991. – 164 с.
7. Физическая природа изменения микротвердости по глубине образца / А.Б. Герасимов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2004. – № 3. – С. 71 – 74.
8. Formation of radiation defects in silicon at high-energy implantation / D.I. Brinkevich [et al.] // VACUUM. – 2005. – Vol. 78. – P. 251 – 254.
9. Вабищевич, С.А. Микротвердость пластин кремния, прошедшего геттерирующую термообработку / С.А. Вабищевич, Н.В. Вабищевич, Д.И. Бринкевич // Перспективные материалы. – 2005. – № 2. – С. 20 – 22.
10. Головин, Ю.И. Структура комплексов, ответственных за радиационно-стимулированное разупрочнение монокристаллов кремния / Ю.И. Головин, А.А. Дмитриевский, Н.Ю. Сучкова // Физика твердого тела. – 2006. – Т. 48, № 2. – С. 262 – 265.
11. Смирнов, Л.С. Модификация дефектно-примесной подсистемы полупроводниковых кристаллов ионной имплантацией / Л.С. Смирнов, И.В. Антонова, В.Ф. Стась // Вестн. Нижегородск. ун-та. Сер. Физика твердого тела. – 2003. – № 1. – С. 183 – 186.
12. Тетельбаум, Д.И. О применении метода микротвердости для исследования эффекта дальнего действия в твердых телах / Д.И. Тетельбаум, А.Ю. Азов // Вестн. Нижегородск. ун-та. Сер. Физика твердого тела. – 2001. – № 2. – С. 120 – 130.

Поступила 04.12.2007