

УДК 539.21:539.12.04

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО БЕТА-ОБЛУЧЕНИЯ НА МЕХАНИЗМЫ ПОЛЗУЧЕСТИ В КРЕМНИИ¹

© А.А. Дмитриевский, В.М. Васюков, Н.Ю. Сучкова, М.Ю. Синегубов, А.В. Шуклинов, Р.А. Столяров, Е.Ю. Исаева, К.В. Тихомирова

Ключевые слова: ползучесть, нанобъем, nanoшкала, кремний, бета-облучение, скорость ползучести, дефекты. Исследована ползучесть кремния в условиях низкоинтенсивного облучения бета-частицами. Обнаружено семикратное увеличение скорости установившейся ползучести кремния, индуцируемого пятидесятичасовым облучением бета-частицами с плотностью потока $I \sim 10,4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Увеличение скорости установившейся ползучести свидетельствует о первостепенной роли неравновесных точечных (радиационных) дефектов в изменении механических свойств кремния.

ВВЕДЕНИЕ

Являясь основным материалом микроэлектроники, кремний становится постепенно конструкционным материалом для изготовления микромашин, сенсоров, микро- и нанозлектромеханических систем (MEMS/NEMS). В связи с этим актуальным становится изучение его механических свойств (твердость, износостойкость, модуль Юнга и др.) в условиях действия внешних физических полей. Наличие неравновесности, присущей подсистеме структурных дефектов реальных кристаллов (особенно в приповерхностной области), создает предпосылки возникновения лавинных эффектов, индуцируемых низкоинтенсивными воздействиями. Так, облучение монокристаллического кремния бета-частицами приводит к немонотонному (W-образному) во времени изменению микротвердости [1, 2]. Аномальные изменения микротвердости также наблюдались при низкоинтенсивном нейтронном облучении кремния [3, 4]. Механизм подобных эффектов остается до конца не выясненным, хотя в [5] были сделаны попытки его объяснения. Дополнительную информацию, способствующую пониманию процессов преобразования дефектной подсистемы кремния в условиях низкоинтенсивного ионизирующего облучения, могут принести исследования других характеристик механических свойств. В связи с этим целью работы являлось исследование влияния низкоинтенсивного бета-облучения на скорость установившейся ползучести кремния.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах исследовались монокристаллические образцы кремния, легированные фосфором (КЭФ-4,5). Они имели форму пластин с линейными размерами $1 \times 4 \times 7$ мм. Для облучения образцов бета-частицами использовался источник на основе препарата $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ со средней

энергией эмитируемых электронов 0,20 МэВ для ^{90}Sr и 0,93 МэВ для ^{90}Y . Интенсивность потока ($I \sim 10,4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$) рассчитывалась посредством компьютерного моделирования с учетом геометрии источника и образца. Облучение и тестирование ползучести производились на воздухе при комнатной температуре. Тестирование ползучести осуществлялось на универсальном динамическом нанотестере УДНТ-07-2, разработанном в ТГУ им. Г.Р. Державина. Тестирование ползучести до облучения и на стадии облучения, соответствующей первому пику разупрочнения (время экспозиции $t = 50$ час), осуществлялось следующим образом. В течение первых 15 минут нагрузка на индентор составляла 50 мН, затем увеличивалась до 500 мН и, после двухчасовой выдержки, вновь уменьшалась до 50 мН. Выдержка при малых нагрузках позволяла учитывать тепловой дрейф установки при обработке данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены зависимости прироста глубины внедрения индентора от времени выдержки при постоянной нагрузке на индентор для образца, не подвергнувшегося облучению (прямая 1), и образца, облученного в течение $t = 50$ час с интенсивностью $I \sim 10,4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ (прямая 2). На врезке (рис. 1) представлен характерный вид зависимости глубины внедрения индентора от полного времени тестирования. Для наглядности рассматривался участок, соответствующий стадии установившейся ползучести. Полученные данные аппроксимируются линейной зависимостью с коэффициентом корреляции, превышающим 0,95. Тангенсы углов наклона прямых, или скорости установившейся ползучести образцов, не подвергнувшихся предварительному облучению (рис. 1, прямая 1) и облученных до стадии первого максимума разупрочнения (рис. 1, прямая 2), составляют $v_1 = 0,007$ мкм/мин и $v_2 = 0,051$ мкм/мин соответственно. Обращает на себя внимание тот факт, что значения v_1 и v_2 отличаются почти на порядок величины, в то время как величина микротвердости при низкоинтенсивном облучении изменяется на 10–12 % [1, 2, 5].

¹ Работа выполнена в рамках Приоритетного национального проекта «Образование» Министерства образования и науки РФ, а также при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 08-02-97512 и № 06-02-96316).

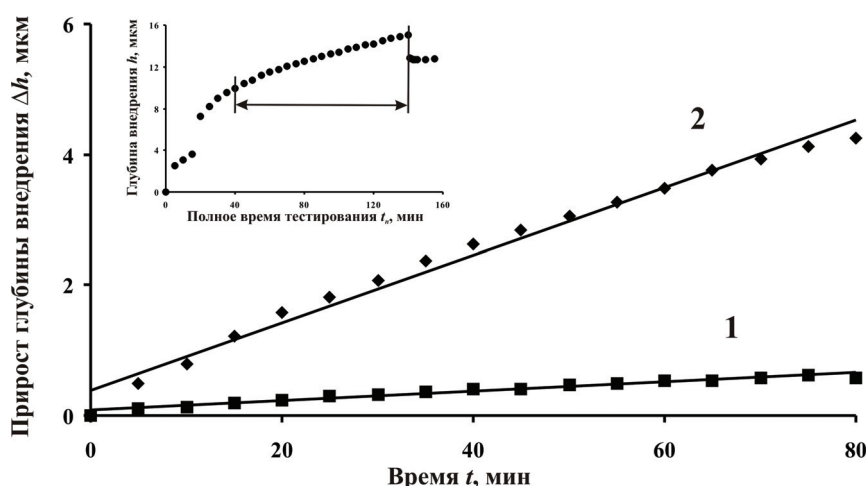


Рис. 1. Зависимость прироста глубины внедрения индентора в кремний от времени выдержки при постоянной нагрузке 50 мН: 1 – образец, не подвергавшийся предварительному облучению; 2 – образец, облученный в течение $t = 50$ час с интенсивностью $I \sim 10,4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

Следует заметить, что формирование отпечатка при внедрении индентора в общем случае может осуществляться за счет подвижности дислокаций, фазовых превращений под индентором, а также подвижности неравновесных точечных дефектов. При комнатной температуре дислокации в кремнии можно считать неподвижными, что дает основание минимизировать роль дислокационного механизма формирования отпечатка. Ранее в [2] были получены косвенные свидетельства о незначительности роли фазовых превращений под индентором в изменении микротвердости кремния, индуцированном низкоинтенсивным бета-облучением. В [2] так же было выдвинуто предположение, что первостепенную роль в изменении механических свойств кремния играют неравновесные точечные (радиационные) дефекты. Увеличение скорости установившейся ползучести на характерной стадии облучения подтверждает это предположение.

ВЫВОДЫ

1. Обнаружено семикратное увеличение скорости установившейся ползучести кремния, индуцируемого пятидесятичасовым облучением бета-частицами с плотностью потока $I \sim 10,4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.
2. Подтверждено предположение, что первостепенную роль в изменении механических свойств кремния играют неравновесные точечные дефекты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Головин Ю.И., Дмитриевский А.А., Сучкова Н.Ю., Бадыевич М.В. // ФТТ. 2005. Т. 47. Вып. 7. С. 1237–1240.
2. Головин Ю.И., Дмитриевский А.А., Сучкова Н.Ю., Толотаев М.Ю. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2007. Вып. 4. С. 34–36.

3. Golan G., Rabinovich E., Inberg A., Axelevitch A., Oksman M., Rosenwaks Y., Kozlovsky A., Rancoita P.G., Rattaggi M., Seidman A., Croitoru N. // Microelectronics Reliability. 1999. V. 39. P. 1497–1504.
4. Golan G., Rabinovich E., Inberg A., Oksman M., Rancoita P.G., Rattaggi M., Gartsman K., Seidman A., Croitoru N. // Microelectronics Journal. 2000. V. 31. P. 937–944.
5. Головин Ю.И., Дмитриевский А.А., Сучкова Н.Ю. // ФТТ. 2006. Т. 48. Вып. 2. С. 262.

Поступила в редакцию 15 ноября 2008 г.

Dmitrievskii A.A., Vasyukov V.M., Suchkova N.Yu., Sinegubov M.Yu., Shuklinov A.B., Stolyarov R.A., Isaeva E.Yu., Tikhomirova K.V. Investigation of low-intensity beta-irradiation influence on the mechanisms of silicon creep. Creep of silicon studied under conditions of low-flux irradiation by beta-particles. It's shown in the article that beta-irradiation causes the increase of steady creep rate in seven times. The creep rate increase is the evidence of point defects significant role in the change of silicon mechanical properties.

Key words: creep, nanovolume, nanoscale, silicon, beta irradiation, creep rate, defects.

LITERATURE

1. Golovin Yu.I., Dmitrievskii A.A., Suchkova N.Yu., Badylevich M.V. // FTT. 2005. V. 47. Issue. 7. P. 1237–1240.
2. Golovin Yu.I., Dmitrievskii A.A., Suchkova N.Yu., Tolotayev M.Yu. // Surface. X-ray, synchrotron and neutron researches. 2007. Issue 4. P. 34–36.
3. Golan G., Rabinovich E., Inberg A., Axelevitch A., Oksman M., Rosenwaks Y., Kozlovsky A., Rancoita P.G., Rattaggi M., Seidman A., Croitoru N. // Microelectronics Reliability. 1999. V. 39. P. 1497–1504.
4. Golan G., Rabinovich E., Inberg A., Oksman M., Rancoita P.G., Rattaggi M., Gartsman K., Seidman A., Croitoru N. // Microelectronics Journal. 2000. V. 31. P. 937–944.
5. Golovin Yu.I., Dmitrievskii A.A., Suchkova N.Yu. // FTT. 2006. V. 48. Issue 2. P. 262.