

УДК 621.315.592

# МИКРОСПЕКТРАЛЬНОЕ РАМАНОВСКОЕ РАССЕЙАНИЕ НА УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЯХ БАЛКИ КАНТИЛЕВЕРА

© 2013 г. А. П. Кузьменко, Д. И. Тимаков  
Региональный центр нанотехнологий, Курск, Россия

Изучены изгибные упругие деформации монокристаллического кремния с помощью микроспектрального рамановского рассеяния. Представлены результаты исследований наноразмерных знакопеременных сдвигов основного пика микроспектрального рамановского рассеяния в балке кантилевера из монокристаллического кремния при воздействии на нее изгибных напряжений. Определена максимальная величина рамановского сдвига, характерного для пика кремния ( $518 \text{ см}^{-1}$ ), при которой еще сохраняется упругость. Она составила  $8 \text{ см}^{-1}$ , что соответствовало приложенной деформации 4 ГПа. Приведены трехмерные карты распределения внутренних напряжений при разных уровнях деформирования, вплоть до необратимых изменений и хрупкого разрушения исследуемых образцов, на которых наглядно показаны области сжатия, растяжения и недеформированная. Представлено качественное обоснование возрастания прочности микроразмерной балки кантилевера за счет размерного эффекта (малой ее толщины — 2 мкм), которое согласуется с расчетами реальных физических параметров, выполненными в программной среде SolidWorks с помощью модуля SimulationXpress. Установлено значение относительной деформации поверхности балки, которое составило 2 %, и получено подтверждение изменения периода кристаллической решетки кремния с 0,54307 до 0,53195 нм численными методами по алгоритму Бройдена—Флетчера—Гольдфарба—Шанно.

**Ключевые слова:** спектроскопия рамановского рассеяния, монокристаллический кремний, изгибные напряжения, картирование распределений рамановских сдвигов.

## Введение

Рамановская спектроскопия (RS) полупроводниковых материалов и изделий из них позволяет получать данные о фоновых частотах, энергиях электронных состояний и электрон-фононных взаимодействиях, концентрации носителей, содержании примесей, кристаллической структуре, ориентации кристалла, температуре, механических напряжениях. Возможности RS становятся все более востребованными, что объясняется значительным усложнением технологических решений (легирование методами лучевой и ионной имплантации и т. д.) при создании электронной элементной базы новых поколений, особенно в нанoeлектронике, нано- и микроэлектромеханических устройствах, так называемых NEMS и MEMS соответственно. В процессе уменьшения рабочих размеров отмечается возникновение упругих напряжений, оказывающих существенное влияние на эксплуатационные и функциональные характеристики вновь создаваемых микро- и наноэлементов.

С помощью микрорамановской спектроскопии (MRS) исследуют узлолокализованные механические напряжения в многослойных элементах интегральных микросхем. Например, в интегральной схеме, содержащей полоски нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) размером  $240 \times 50 \text{ нм}$ , которые отделены от

кремниевой подложки нанослоями  $\text{SiO}_2$  и поликристаллического кремния толщиной 10 нм и шириной 9,4 мкм, обнаруженное рамановское смещение достигало порядка  $\pm 4 \text{ см}^{-1}$  [1]. Это подтверждает практическую ценность такого контроля и диагностики. В высокоинтегрированных фотопреобразователях на основе моно- или поликремния, легированных атомами В или Al, с помощью MRS и микрофотолуминесценции с разрешением до 500 нм, исследовано взаимодействие оптических фононов с дефектами, вызванными напряжениями сжатия или растяжения, которые не были обнаружены другими методами [2].

Влияние на рамановский сдвиг одноосных сжимающих напряжений в монокристаллическом кремнии исследовали в работе [3]. Напряжения в пленке размером ~3 дюйма (1 дюйм = 2,54 см) и толщиной 600 нм создавали прижатием к поверхности цилиндров большого радиуса (от 0,5 до 1 м). Для цилиндра радиусом 0,5 м сдвиг при возбуждении излучением лазера на длине волны  $\lambda = 325 \text{ нм}$  с глубиной проникновения в кремнии ~9 нм составил  $0,4 \text{ см}^{-1}$ . Распределение рамановского сдвига обладает наглядностью и информативностью, в отличие от используемых в этих целях методов инфракрасной и электронной микроскопии, рентгеновского анализа. В работе [3] с помощью MRS исследована поверхность

**Кузьменко Александр Павлович** — доктор физ.-мат. наук, директор, Региональный центр нанотехнологий, 305040, Россия, Курск, ул. 50 лет Октября, e-mail: ark3527@mail.ru,  
**Тимаков Д. И.** — кандидат физ.-мат. наук, научный сотрудник, аспирант, Региональный центр нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, 305040, Россия, Курск, ул. 50 лет Октября, e-mail: Timakov.dmitry@gmail.com.

пластины Si(111), наноструктурированной и аморфизированной сверхкороткими импульсами эксимерного лазера. Возникшие напряжения представлены в виде микрораспределений рамановского сдвига, что указывает на локализацию гексагонального Si ( $510 \text{ см}^{-1}$ ) и  $\alpha$ -Si ( $490 \text{ см}^{-1}$ ).

Влияние упругих деформаций на фоновый спектр, характерный для поваренной соли, было изучено в работе [4] методами компьютерного моделирования. Модельные расчеты выполняли методом молекулярной динамики. В расчетах учитывали две моды деформации кристалла: всестороннего растяжения–сжатия и чистого сдвига. Показано, что они вызывают трансформацию плотности фоновых состояний, однако локализованные колебательные моды, так называемые дискретные бризеры, оказываются зависимыми только от деформации первого типа — всестороннего растяжения–сжатия, тогда как сдвиговая деформация на них не влияет. Авторы работы [4] отмечают, что в процессе определения механических свойств монокристаллов методами индентирования под нагрузкой  $0,1 \leq P \leq 1 \text{ Н}$  при формировании отпечатка следа индентора проявляется действие именно упругой деформации.

Ниже рассмотрены результаты исследования закономерностей знакопеременных сдвигов основного пика комбинационного рассеяния ( $518 \text{ см}^{-1}$ ) в монокристаллическом кремнии, а также топология распределения упругих напряжений при локализованных деформациях до 4 ГПа по данным наноразмерных микроспектральных исследований.

### Экспериментальная часть

Проводили наномасштабные исследования знакопеременных сдвигов типичного для Si пика комбинационного рассеяния света  $518 \text{ см}^{-1}$ , возникающих в кремниевой балке кантилевера, подвергнутой воздействию изгибных деформаций.

Для изучения распределений микро- и наноупругих в балке кантилевера использовали конфокальный микроскоп и рамановский микроспектрометр OmegaScore, интегрированный с атомно-силовым микроскопом (АСМ) AIST-NT (г. Зеленоград). Конфокальный микроскоп позволял выбирать область для точного позиционирования возбуждающего излучения полупроводникового лазера на деформированной балке кантилевера.

Исследования методом MRS выполняли на длине волны  $\lambda = 473 \text{ нм}$ , при мощности 25 мВт и с пространственным разрешением 425 нм. Микроспектрометр обеспечивал спектральное разрешение до  $0,8 \text{ см}^{-1}$ .

Изгибные деформации регистрировали с помощью конфокального микроскопа. Область измерений на балке кантилевера выбирали с помощью конфокального микроскопа объективом  $10\times$  с числовой апертурой 0,28. Оптическое разрешение позволяло прецизионно визуализировать и выбирать область

для построения карт гиперспектральных распределений рамановского сдвига при разных уровнях изгиба балки кантилевера.

В качестве модельного материала для изучения методом MRS распределений напряжений при упругом деформировании был выбран монокристаллический Si(100), обладающий в рамановском спектре одной четкой линией  $518 \text{ см}^{-1}$ . Объектом исследования являлась консольная балка кантилевера с микроскопическими размерами, характерными для кантилеверов:  $135 \times 35 \times 2 \text{ мкм}^3$ .

Для изучения изгибных деформаций монокристаллического кремния использовали два однотипных кантилевера — полуконтактные fpN11 с жесткостью 5,3 Н/м. Первый (испытываемый) кантилевер устанавливали в держателе АСМ AIST-NT SmartSPM. Второй кантилевер выступал в роли упора. С этой целью его жестко закрепляли на сканаторе (рис. 1, а). Второй кантилевер микрометрически перемещали в заданном направлении, вызывая изгибные деформации консольной балки неподвижного кантилевера. Величину перемещений сканатора задавали программно. Шаг перемещения устанавливали с учетом минимального уровня измерения линий рамановского спектра и аппаратного спектрального разрешения ( $0,8 \text{ см}^{-1}$ ). Его значение составляло 20 мкм. Реальный изгиб балки кантилевера отображает его конфокальное изображение (рис. 1, б).

Максимальный ход свободного конца балки достигал более 100 мкм. Во всех измерениях деформация балки оставалась упругой, что подтверждалось ее возвратом в исходное состояние после разгрузки. Наибольший изгиб балки был достигнут при давлении 4,5 ГПа.

Картирование микрорамановских спектров осуществляли с помощью шагового двигателя АСМ [5]. Гиперспектральные данные на характерной для кремния линии  $518 \text{ см}^{-1}$  получены с использованием объектива  $100\times$  с числовой апертурой 0,7. Следует отметить, что область сканирования кантилевера в АСМ ( $100 \times 100 \text{ мкм}^2$ ) существенно превышает поперечные размеры балки кантилевера. Это позволило с помощью систем перемещения пьезопроводов позиционера и ввода–вывода излучения с шагом 0,6 мкм в поле  $30 \times 30 \text{ мкм}^2$  сформировать массив из 900 микрорамановских спектров (рис. 2, 3, а и 4). По этим данным строили карту распределения упругих напряжений в изогнутой части балки кантилевера вдоль ее боковых сторон размером 35 и 2 мкм соответственно.

На первом этапе было изучено распределение микрорамановского сдвига вдоль большей стороны балки кантилевера (135 мкм), что позволило установить область ее наибольшего деформирования, которая не превышала ее третьей части (см. рис. 2). В дальнейшем детальное изучение гиперспектральных распределений проводили именно в этой области.

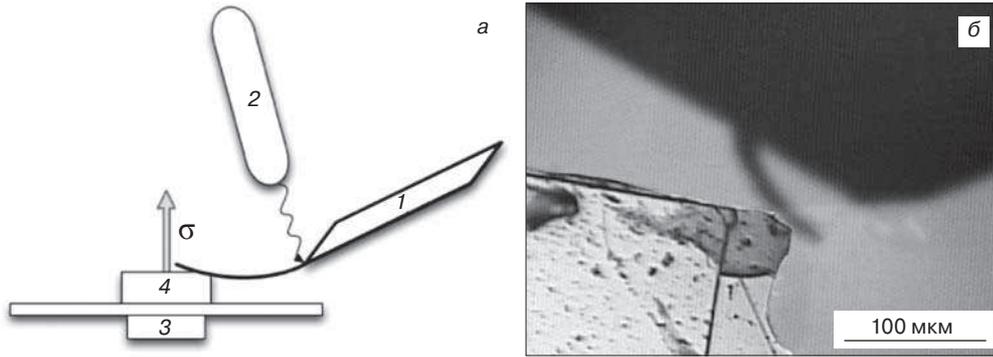


Рис. 1. Схематическое изображение изгибного деформирования балки кантилевера (а) и ее оптическое изображение в конфокальном микроскопе (б): а: 1 — балка кантилевера (первый); 2 — источник и возбуждающее лазерное излучение; 3 — сканатор со столиком для образца; 4 — упор из кантилевера (второй)

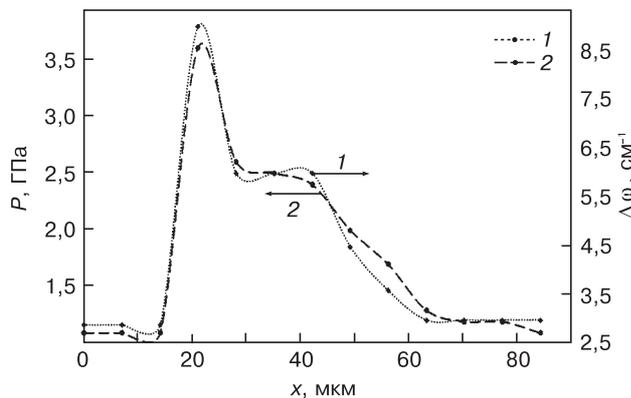


Рис. 2. Распределение рамановских сдвигов  $\Delta\omega$  (1) и давлений  $P$  (2) по оси вдоль продольной плоскости балки кантилевера

Карты распределений напряжений по гиперспектральным данным MRS в балке кантилевера строили, как вдоль большей плоскости размером 35 мкм на (см. рис. 3, а, третья стр. обложки), так и в поперечной плоскости размером 2 мкм (см. рис. 4, третья стр. обложки). На рис. 3, б (см. третья стр. обложки) представлено изображение расчетного распределения изгибных деформаций вдоль балки в области, прилегающей непосредственно к основанию чипа кантилевера в масштабе  $32 \times 12 \text{ мкм}^2$ . Упругие напряжения достигают максимума непосредственно в зоне закрепления консоли балки к кантилеверу.

Модельное распределение упругих напряжений и нагрузки выполнено в соответствии с подходом фон Мизеса без учета знака их изменений. Рассматривают результирующие напряжения для произвольно направленных упругих воздействий на объекты с заданными геометрическими размерами и соответствующими характеристиками. Воздействия вдоль каждой их шести степеней свободы, характеризующих любое твердое тело, в одноосном приближении заменяют одним эквивалентным напряжением.

Вычислительный эксперимент выполняли в среде SolidWorks. Расчеты проводили для реальных физических параметров, размеров и с учетом влияния области закрепления балки кантилевера. Создаваемые напряжения анализировали с помощью модуля SimulationXpress. В результате были уста-

новлены как критические области напряжений, так и уровни прочности. Как видно из сравнения представленных на рис. 3 и 4 (см. третья стр. обложки) модельных расчетов распределений упругих напряжений в балке кантилевера хорошо согласуется с опытными данными, полученными по гиперспектральным данным MRS.

По данным MRS, в распределении изгибных напряжений поперек балки кантилевера изменяется знак деформаций (см. рис. 4, а, третья стр. обложки), что наиболее наглядно демонстрирует объемное изображение распределений. Результаты анализа массива рассчитанных величин и направлений векторов упругих напряжений, полученных для основания балки кантилевера, наглядно демонстрируют характер их изменений. Даже незначительные упругие напряжения в основании балки в чипе имеют знакопеременный характер. В самой балке кантилевера упругие напряжения приобретают явно выраженное противофазное распределение. Характерно, что вдоль средней линии в балке кантилевера напряжения существенно уменьшаются, вплоть до нуля.

### Результаты и их обсуждение

Для объяснения данных об изгибных упругих микронапряжениях в балке кантилевера, полученных с помощью MRS, примем во внимание, что в самом общем рассмотрении интенсивность сигнала MRS определяется амплитудой падающей ( $E_i$ ) и рассеянной ( $E_s$ ) световой волны, а также рамановским тензором  $R_j$ :

$$I = C \sum |E_i R_j E_s|^2, \quad (1)$$

где  $C$  — размерный множитель. Для исследованного монокристалла кремния со стандартной для полупроводниковых элементов ориентацией (100) с учетом геометрии прикладываемых упругих изгибных напряжений рамановский тензор, имеющий 9 компонент, существенно упрощается, что сопровождается возникновением в микрорамановском спектре только одной линии  $518 \text{ см}^{-1}$ . В нашем случае все исследования проводили относительно основной линии, что позволило применить выводы, сделанные в работе [1, 2]:

$$\Delta\omega = \left[ p S_{12} + q (S_{11} + S_{12}) \right] \frac{\sigma}{2\omega_0}, \quad (2)$$

где  $\omega_0 = 518 \text{ см}^{-1}$  — рамановский сдвиг, характерный для недеформированного состояния кремния. С уче-

том известных для кремния значений упругих констант  $S_{11} = 7,68 \cdot 10^{-2} \text{ Па}^{-1}$ ,  $S_{12} = -2,14 \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$ ,  $p = 1,43\omega_0^2$  и  $q = -1,889\omega_0^2$  для полученного максимального значения рамановского сдвига, составившего  $\Delta\omega = 8 \text{ см}^{-1}$ , на основании уравнения (2) можно рассчитать соответствующую величину приложенного изгибного напряжения  $\sigma = (\Delta\omega/2) \cdot 10^9 \text{ Па} = 4 \text{ ГПа}$ . Таким образом, измеренные данные по упругим напряжениям балки кантилевера, используемого в качестве зонда АСМ, хорошо согласуются с выводами, основанными на теоретических представлениях.

Балка кантилевера с характерным поперечным размером (2 мкм) может быть отнесена к объектам, занимающим промежуточное положение между моно- и микрокристаллическими структурами. Для объектов подобного типа отмечали существенные изменения механических свойств, обусловленные размерными эффектами [4]. Для анализа обнаруженного повышения прочности балки кантилевера к изгибным деформациям будем учитывать как возможность ее размерного упрочнения за счет дислокационно-кинетического механизма, так и изменения параметров кристаллической решетки. В обоих случаях при увеличении прочности моно- и нанокристаллических материалов за счет размерного эффекта отмечали их охрупчивание [6, 7].

Наличие знакопеременных изгибных напряжений в балке кантилевера (см. рис. 4, а), когда одновременно на размере в  $d = 2 \text{ мкм}$  реализуются как напряжения сжатия, так и растяжения, само по себе представляет уникальное сочетание, важное для теоретического анализа. Область критического изгиба балки кантилевера  $L$  по ее длине локализуется (см. рис. 1, б) на расстоянии порядка нескольких десятков микрометров, начиная от его корпуса. В этом случае значение аспектного отношения  $R = L/D$  может уменьшиться почти на порядок. Со-

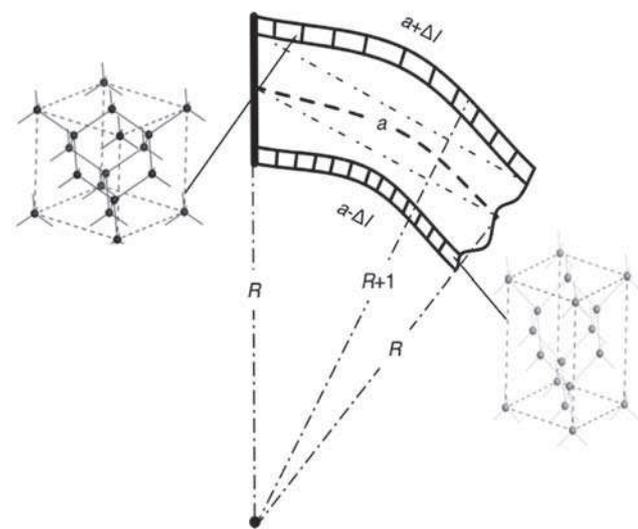


Рис. 5. Изменения размеров в поперечной плоскости балки кантилевера со схематическими изображениями ячеек решетки кремния при изгибном напряжении 4,5 ГПа в области сжатия и растяжения

гласно работе [4], в микро- и нанокристаллах это вызывает размерный эффект увеличения прочности ( $\sigma \sim D^{-0.6+1.0}$ ), препятствующий пластической деформации. На границе с малым  $R$  включается механизм деформационного упрочнения за счет диссипации возрастающей упругой энергии на накапливаемых в этой области дислокациях, как это следует из дислокационно-кинетического подхода. Величина наибольшего сдвига в микрорамановском спектре, когда балка кантилевера еще сохраняет упругие свойства (см. рис. 2), составила 2 %, что может быть принято за ее предел текучести для данного  $R$ , при котором, согласно работе [6],  $\sigma = D^{-0.75}$ . Из этого вытекает практическая рекомендация производителям кантилеверов: для увеличения значения  $\sigma$  следует уменьшать ширину плоскости балки кантилевера с существующих 35 мкм на порядок, что будет способствовать как повышению чувствительности методов атомно-силовой микроскопии, так и долговечности их работы.

Для дальнейшего анализа данных полученных по распределению микрорамановских сдвигов рассмотрим фрагмент балки кантилевера, в наибольшей степени подвергнутый изгибной деформации. Из рис. 4 следует, что по оси балки кантилевера под действием изгибного напряжения отсутствуют деформации: тогда как ее верхняя поверхность растягивается, нижняя, наоборот, — сжимается на величину  $\Delta l$ . Если принять, что ширина деформированной области вдоль балки кантилевера составляет  $a$ , то относительное удлинение  $\Delta l$  может быть определено из рис. 5. С учетом подобия треугольников, образованных радиусами  $R$  и  $(R + 1)$  и хордами дуг  $a$  и  $(a + \Delta l)$  запишем их отношения:  $R/(R + 1) = a/(a + \Delta l)$ . На этой основе деформация, полученная при подстановке реальных размеров балки кантилевера, составляет порядка 2,2 %. Отметим, что изучаемая изгибная деформация балки кантилевера является упругой. При таких условиях наибольшая величина сдвига линии (для пика, соответствующего Si, —  $518 \text{ см}^{-1}$ ) в микрорамановском спектре, очевидно, позволяет оценить значение предела прочности  $\sigma$  и  $u$  деформации, которая также составила порядка 2 %.

С учетом того, что известная величина энергии связи Si—Si в монокристалле кремния сравнительно мала (176 кДж/моль), по аналогии с работой [8] в области упругости сжатие и растяжение должны сопровождаться соответствующими изменениями параметров его кристаллической решетки. Проведем анализ деформационных изменений кристаллической решетки кремния с характерным периодом 0,54307 нм с помощью математического пакета Material Studio, используя алгоритм Бройдена—Флетчера—Гольдфарба—Шанно для опытно определенного значения изгибного напряжения 4,5 ГПа. Рассчитанный таким образом период решетки уменьшился до 0,53195 нм, т. е. на 2 %, что

фактически совпало с относительным удлинением  $\Delta l$  (см. рис. 5) и обнаруженным сдвигом указанной линии в микроРамановском спектре.

### Заключение

Показано, что использование методов MRS для изучения микро- и нанообъектов открывает дополнительные возможности для их исследования при интенсивных деформационных воздействиях и позволяет разрабатывать новые методы неразрушающей диагностики механических свойств в твердых телах.

По результатам наноразмерных микроспектральных исследований комбинационного (рамановского) рассеяния с максимальной амплитудой сдвига до  $8 \text{ см}^{-1}$  на основной линии монокристаллического кремния ( $518 \text{ см}^{-1}$ ) визуализированы локализованные упругие деформации (до 4 ГПа), имеющие знакопеременный характер. Получены трехмерные карты распределения внутренних напряжений при разных уровнях деформирования в продольной и поперечной плоскостях балки. Представлено качественное обоснование возрастания прочности микроразмерной балки кантилевера за счет размерного эффекта. Установлено значение относительной деформации поверхности балки, которое составило 2% и получено подтверждение соответствующего изменения периода кристаллической решетки кремния численными методами.

Полученные при этом данные могут быть успешно применены для моделирования процессов деформирования различных твердотельных материалов.

### Библиографический список

1. De Wolf, I. Micro-Raman spectroscopy to study local mechanical stress in silicon integrated circuits / I. De Wolf // *Semicond. Sci. Technol.* – 1996. – V. 11. – P. 139–154.
2. Gundel, P. Micro-spectroscopy on silicon wafers and solar cells / P. Gundel, M. C. Schubert, F. D. Heinz, R. Woehl, J. Benick, J. A. Giesecke, D. Suwito, W. Warta // *Nanoscale Res. Lett.* – 2011. – V. 6.
3. Amara, M. S. Induced stresses and structural changes in silicon wafers as a result of laser micro-machining / M. S. Amara, L. Dosserb, S. LeClaire, J. F. Maguire // *Appl. Surf. Sci.* – 2002. – V. 187. – P. 291–296.
4. Dmitriev, S. V. Effect of elastic deformation on phonon spectrum and characteristics of gap discrete breathers in crystal with NaCl-type structure / S. V. Dmitriev, Yu. A. Baimova // *Techn. Phys. Lett.* – 2011. – V. 37, Iss. 5. – P. 451–454.
5. Kuzmenko, A. P. Domain wall structure of weak ferromagnets according to Raman / A. P. Kuzmenko, P. V. Abakumov, M. B. Dobromyslov // *J. Magnetism and Magnetic Mater.* – 2012. – V. 324. – P. 1262–1264.
6. Malygin, G. A. Influence of the transverse size of samples with micro- and nano-grained structures on the yield and flow stresses / G. A. Malygin // *Phys. solid state.* – 2012. – V. 54, N 3. – P. 559–567.
7. Chaojun, Ouyang. Combined influences of micro-pillar geometry and substrate constraint on microplastic behavior of compressed single-crystal micro-pillar: Two-dimensional discrete dislocation dynamics modeling. / Chaojun Ouyang, Zhenhuan Li, Minsheng Huang, Lili Hu, Chuantao Hou // *Mater. Sci. and Eng. A.* – 2009. – V. 526. – P. 235–243.
8. Omel'chenko, S. Reversible changes in the structure of zinc sulfide crystals during elastic deformation / S. Omel'chenko, M. Bulanyi // *Phys. solid state.* – 1997. – V. 39, N 7. – P. 1091–1093.

Статья поступила в редакцию 25 июля 2012 г.

ISSN 1609–3577 *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki* = *Materials of Electronic Technics.* 2014, vol. 17, no. 1, pp. 53–57.

### Stress Topology within Silicon Single-Crystal Cantilever Beam

**Kuzmenko Alexander Pavlovich\*** — Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Director, e-mail: apk3527@mail.ru; **Timakov D. I.\*** — Candidate of Physics and Mathematics, Research Associate, e-mail: Timakov.dmitry@gmail.com

\*Regional Center for Nanotechnology, 305040, Russia, Kursk, 50 let Oktyabrya, 94.

**Abstracts.** Flexural elastic deformations of single-crystal silicon have been studied using microspectral Raman scattering. Results are reported on nano-scaled sign-changing shifts of the main peak of the microspectral Raman scattering within the single-crystal silicon cantilever beam during exposure to flexural stress. The maximum value of Raman shift characteristic of the silicon peak  $518 \text{ cm}^{-1}$  at which elasticity still remains, has been found to be  $8 \text{ cm}^{-1}$  which corresponds to an applied deformation of 4 GPa. We report three-dimensional maps of the distribution of internal stresses at different levels of deformation up to irreversible changes and brittle fracture of the samples that clearly show compression and tension areas and an undeformed area. A qualitative explanation of the increase in the strength of the cantilever beam due to its small thickness ( $2 \mu\text{m}$ ) has been provided that agrees with the predictions of real-world physical parameters obtained in SolidWorks software environment with the SimulationXpress module. We have defined the relative strain of the beam surface which was 2% and received a confirmation of changes in the silicon lattice parameter from  $5.4307\text{E}$  to  $5.3195\text{E}$  by the BFGS algorithm.

**Key words:** Raman scattering spectroscopy, silicon single-crystal, flexural stresses, mapping of Raman shift distributions.

### References

1. De Wolf I. Micro-Raman spectroscopy to study local mechanical stress in silicon integrated circuits. *Semicond. Sci. Technol.* 1996, vol. 11, pp. 139–154.
2. Gundel P., Schubert M. C., Heinz F. D., Woehl R., Benick J., Giesecke J. A., Suwito D., Warta W. Micro-spectroscopy on silicon wafers and solar cells. *Nanoscale Res. Lett.* 2011, vol. 6.
3. Amara M. S., Dosserb L., LeClaire S., Maguire J. F. Induced stresses and structural changes in silicon wafers as a result of laser micro-machining. *Appl. Surf. Sci.* 2002, vol. 187, pp. 291–296.
4. Dmitriev S. V., Baimova Yu. A. Effect of elastic deformation on phonon spectrum and characteristics of gap discrete breathers in crystal with NaCl-type structure. *Techn. Phys. Lett.* 2011, vol. 37, iss. 5, pp. 451–454.
5. Kuzmenko A. P., Abakumov P. V., Dobromyslov M. B. Domain wall structure of weak ferromagnets according to Raman. *J. Magnetism and Magnetic Mater.* 2012, vol. 324, pp. 1262–1264.
6. Malygin G. A. Influence of the transverse size of samples with micro- and nano-grained structures on the yield and flow stresses. *Phys. solid state.* 2012, vol. 54, no. 3, pp. 559–567.
7. Chaojun Ouyang, Zhenhuan Li, Minsheng Huang, Lili Hu, Chuantao Hou. Combined influences of micro-pillar geometry and substrate constraint on microplastic behavior of compressed single-crystal micro-pillar: Two-dimensional discrete dislocation dynamics modeling. *Mater. Sci. and Eng. A.* 2009, vol. 526, pp. 235–243.
8. Omel'chenko S., Bulanyi M. Reversible changes in the structure of zinc sulfide crystals during elastic deformation. *Phys. solid state.* 1997, vol. 39, no. 7, pp. 1091–1093.

Received July 25, 2012