УДК 621.315.592

Н. В. Францкевич, старший преподаватель (БНТУ);
С. И. Шеденков, старший преподаватель (БНТУ);
А. В. Францкевич, старший научный сотрудник (БНТУ)

ВОДОРОД В КРЕМНИИ: ФОРМИРОВАНИЕ КОНИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИН

На поверхности пластин CZ-Si *p*-типа формировались конусообразные структуры в результате имплантации гелия, отжига и обработки в DC-плазме водорода. Структуры изучались методом комбинационного рассеяния и в сканирующем электронном микроскопе. Результаты исследований свидетельствуют о том, что структуры образованы кристаллическим кремнием. Отсутствие напряжений в исследуемых структурах говорит о согласованности решеток.

On the surface of the plates CZ-Si *p*-type cone-shaped structure formed as a result of helium implantation, annealing and processing in DC-plasma of hydrogen. The structures were studied by Raman scattering and scanning electron microscope. Studies indicate that the structures formed by crystalline silicon. The absence of stress in these structures talks about the consistency of lattices.

Введение. В настоящее время технология Smart-Cut [1] − один из основных способов создания структур кремния на изоляторе. Одной из ключевых идей технологии является отщепление тонких слоев вещества по предварительно созданному дефектному слою. Поскольку для создания дефектного слоя применяются значительные дозы имплантации водорода или гелия ($>4 \cdot 10^{16}$ ат/см^2) [2], мы, как и ряд других авторов, изучали возможность снижения суммарной дозы имплантации. Для этого использовали метод, основанный на создании первичного глубинного дефектного слоя в кремнии имплантацией водорода или гелия дозами до $1 \cdot 10^{16}$ ат/см^2. В дальнейшем на этом слое происходит геттерирование водорода, вводимого в образцы из плазмы, в дозах, превышающих $4 \cdot 10^{16}$ ат/см^2. Проводя свои исследования, мы обнаружили, что для образцов кремния, имплантированных гелием, отожженных и обработанных в плазме водорода, кроме образования дефектов типа кратер, обусловленных эффектом блистеринга, характерно также образование структур типа нанотрубки [3] и конусы [4]. Изучению конусообразных структур, сформированных на поверхности кремниевых пластин, посвящена данная работа.

Основная часть. Стандартные пластины Cz кремния *p*-типа (10 Ом · см) имплантировались ионами гелия при комнатной температуре с энергией 100 кэВ и дозой $5 \cdot 10^{15}$ ат/см^2. Рассчитанный проективный пробег R_p имплантированных ионов при комнатной температуре эквивалентен 0,7 мкм. После внедрения ионов гелия образцы отжигались в вакууме при температуре 300−700°С в течение 1 ч. После этого водород вводился в кремний из DC-плазмы при 150°С. Энергия ионов во время плазменной обработки составляла 2 кэВ, длительность обработки − 30 мин при плотности тока 3 мкА/см^2. Спектры комбинационного рассеяния снимались при комнатной температуре на микроспектрометре с использованием Ar^+-лазера с длиной волны 488 нм и выходной мощностью 20 мВт. Лазерное излучение фокусировалось на образце с применением микроскопа (с увеличением в 100 раз). Рассеянный сигнал анализировался с использованием дифракционной решетки (1800 мм$^{-1}$) и охлаждаемой ПЗС-матрицы. Изучение поверхности проводилось при помощи сканирующего электронного микроскопа LEO 4550.

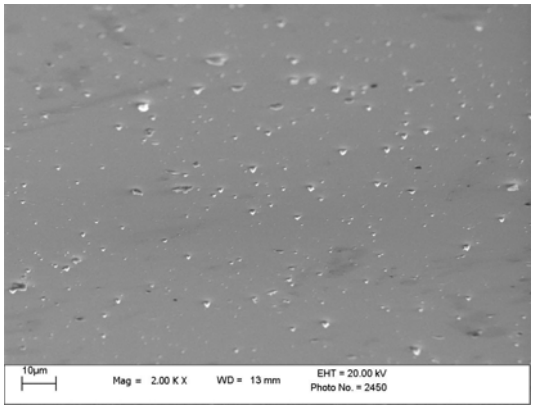
На рис. 1, *а* представлен вид поверхности кремниевой пластины, полученный в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ), свидетельствующий об образовании системы конусообразных структур на поверхности кремния. Более детальное изображение данной структуры показано на рис. 1, *б*.

На рис. 2 и 3 представлены спектры комбинационного рассеяния для спектральных диапазонов, соответствующих основной линии кремния (рис. 2) и положению водородной молекулы в решетке кремния или ее дефектах (рис. 3).

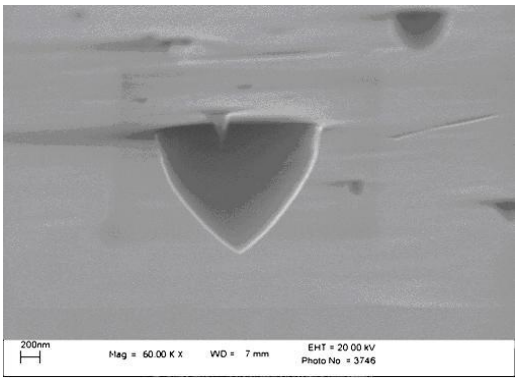
Типичные размеры конусообразных структур (рис. 1, *б*), с которых проводилось снятие спектров комбинационного рассеяния, составляли: диаметр основания – 1,5−2,0 мкм, высота − 1,5−2,0 мкм.

Как видно из представленных на рис. 2 данных, практически не наблюдается отличий в спектрах, независимо от того, на какой из областей (h1, h2, h3) проводились измерения. Данные отличия, если бы они наблюдались, могли быть обусловлены присутствием аморфной/поликристаллической фазы, или наличием напряжений сжатия/растяжения [5]. Единственное отличие имеется при сравнении спектров h1, h2, h3 со спектром h4, и состоит оно в уменьшении ширины линии, измеренной на полувысоте (на 0,5 см$^{-1}$). При сравнении данных, представленных на рис. 3, видно, что на спектре, полученном с области,

содержащей конусообразные дефекты, наблюдаются линии 3616/3621 и 3698 см$^{-1}$, отсутствующие на других спектрах. Линия 3616/3621 см$^{-1}$ очень близка к линии 3618/3627 см$^{-1}$, сопоставляемой в работе [6], по положению орто- и парамолекулярного водорода в тетрагональном междоузлии решетки кремния. Наблюдаемая нами линия 3698 см$^{-1}$ другими авторами в теоретических и экспериментальных работах не идентифицируется.



а



б

Рис. 1. Конусообразные структуры на поверхности кремниевых пластин, наблюдаемые в сканирующем электронном микроскопе. Пластины кремния имплантировались гелием дозой $5 \cdot 10^{15}$ ат/см^2, отжигались в вакууме при 300ºС в течение 1 ч и обрабатывались в плазме водорода 30 мин с плотностью тока 3 мкА/см^2. Температура во время плазменной обработки не превышала 150ºС: *а* – общий вид; *б* – увеличенный вид

По совокупности представленных данных комбинационного рассеяния и результатов СЭМ можно предположить, что исследуемая система конусообразных включений образована кристаллическим кремнием.

Дальнейшим шагом исследований было изучение микротвердости и силы сцепления конических структур с кристаллическим кремниевым основанием. Схема эксперимента представлена на рис. 4.

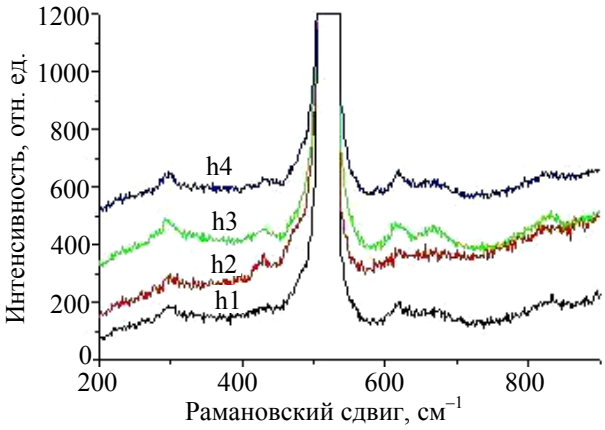


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния для спектрального диапазона, соответствующего основной линии кремния. Спектры получены на образце Si, имплантированном гелием дозой $5 \cdot 10^{15}$ ат/см^2, отожженом в вакууме при 300ºС на протяжении 1 ч и обработанном в плазме водорода. Измерения проводились на бездефектных областях (h1, h2), конических структурах (h3) и на исходном образце (h4)

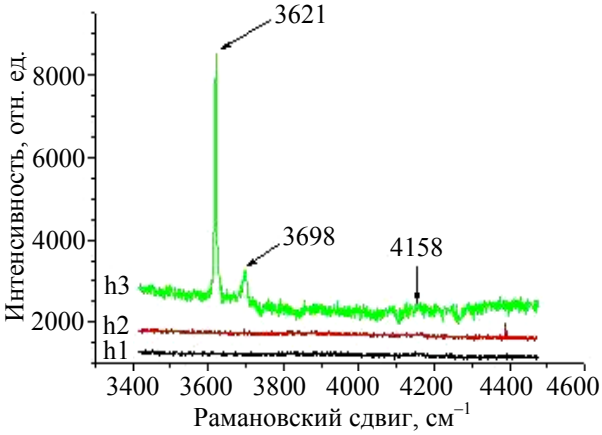


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния для спектрального диапазона, соответствующего положению молекулы водорода в решетке кремния или ее дефектах. Спектры получены на образце Si, имплантированном гелием дозой $5 \cdot 10^{15}$ ат/см^2, отожженном в вакууме при 300ºС в течение 1 ч и обработанном в плазме водорода. Измерения проводились на бездефектных областях (h1, h2) и конических структурах (h3)

Две пластины кремния, исследуемая и контрольная, сжимались с нагрузкой 10 кг/см^2. После этого пластины плоскопараллельно перемещались друг относительно друга. В зависимости от микротвердости конусных образований и силы их сцепления с основанием на поверхности пластин наблюдались соответствующие изменения. Вид поверхности исследуемой кремниевой пластины, полученный в сканирующем микроскопе, до и после испытания представлен на рис. 5.

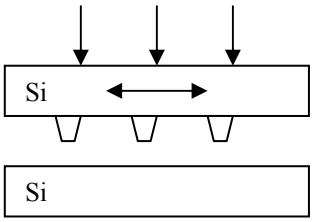
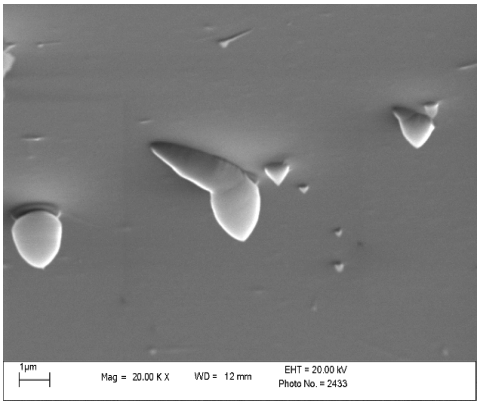
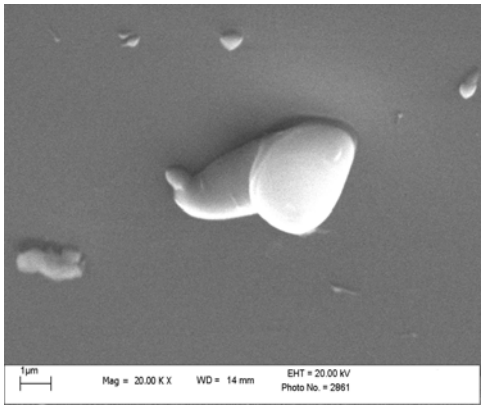


Рис. 4. Схема эксперимента по исследованию микротвердости конусообразных структур



а



б

Рис. 5. Вид поверхности кремниевой пластины, полученный методом СЭМ, до (*а*) и после (*б*) проведения испытаний. Образец Si имплантировался гелием дозой $5 \cdot 10^{15}$ ат/см^2, отжигался в вакууме при 700ºС в течение 1 ч, далее обрабатывался в плазме водорода 1 ч при плотности тока 3 мкА/см^2 и температуре 300ºС

Как видно из представленных на рис. 5 данных, после проведения испытаний не происходит обламывания конусообразных структур. Но при этом наблюдается увеличение радиуса закругления острия, что говорит о его частичном истирании. Полученный результат свидетельствует о том, что микротвердость полученных образований сопоставима с исходным кремнием.

Заключение. Полученные данные подтверждают, что поверхностные конические структуры образованы кристаллическим кремнием. Данные комбинационного рассеяния свидетельствуют об отсутствии напряжений в исследуемых структурах, что говорит о согласованности решеток кремниевой пластины и конических образований. Их микротвердость сопоставима с исходным кремнием.

Литература

1. Bruel, M. Silicon on insulator material technology / M. Bruel // Electron. Lett. – 1995. – Vol. 31. – P. 1201.

2. Terreault, B. Hydrogen blistering of silicon: Progress in fundamental understanding / B. Terreault // Phys. Stat. Sol. (a). – 2007. – Vol. 204, № 7. – P. 2129.

3. Study of nanopipes formed in silicon wafers using helium implantation by SEM, RBS and SIMS methods / A. V. Frantskevich [et al.] // J. Mater Sci: Mater Electron. – 2008. – Vol. 19. – P. 239.

4. Formation of Cone-Shaped Inclusions and Line Defects on the Cz-Si Wafer Surface by the Helium Implantation and DC Nitrogen Plasma Treatment / N. V. Frantskevich [et al.] // Acta Physica Polonica A. – 2011. – Vol. 120. – P. 105.

5. De Wolf, I. Micro-Raman spectroscopy to study local mechanical stress in silicon integrated circuits / I. de Wolf // Semicond. Sci. Technol. – 1996. – Vol. 11. – P. 139.

6. Leitch, A. W. R. H_2 molecules in c-Si after plasma treatment / A. W. R. Leitch, J. Weber, V. Alex // Materials Science and Engineering. – 1999. – Vol. B58. – P. 6.

Поступила 01.03.2012