

05;10;11

Образование поверхностных структур на монокристаллическом кремнии при воздействии мощного ионного пучка наносекундной длительности

© В.С. Ковивчак, Т.В. Панова, О.В. Кривозубов,
Н.А. Давлеткильдеев

Омский филиал Института физики полупроводников СО РАН
E-mail: kvs@obisp.oscsbras.ru
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского

Поступило в Редакцию 19 июля 2011 г.

Исследовано образование структур на поверхности монокристаллического кремния при воздействии мощного протон-углеродного пучка наносекундной длительности. Описаны морфологические особенности возникающих структур. Рассмотрены возможные механизмы их формирования.

Плавление пористого кремния под действием мощного ионного пучка (МИП) наносекундной длительности [1] может быть использовано для формирования различных нанокompозитов на его основе [2]. Особенностью кремния является наличие на его поверхности стойкого собственного оксида, который, имея отличные от кремния термодинамические параметры, может влиять на характер модификации пористого кремния при воздействии МИП. Ранее [3] было показано, что при воздействии МИП на кремний с оксидом толщиной 200–300 nm на его поверхности образуется волнообразный рельеф. Возникновение подобной структуры было связано с действием на нагретый слой SiO₂ квазистатических напряжений, возникающих при таком облучении. Похожую волнообразную картину наблюдали и при импульсном лазерном облучении окисленного кремния. Ее появление связывали с генерацией поверхностных и капиллярных волн, возникающих в системе SiO₂/Si при плавлении поверхностного слоя кремния и их последующей фиксации при кристаллизации [4].

Поскольку в пористом кремнии скелетон может быть покрыт тонким слоем собственного оксида, то представляется важным оценить влияние небольших толщин оксида кремния на характер поверхностных изменений на монокристаллическом кремнии, происходящих при воздействии мощного ионного пучка наносекундной длительности.

Эксперименты выполнены на пластинах промышленного кремния КДБ-10 (111), КЭФ-4.5 (100). Использовались пластины двух видов — (100) с односторонней полировкой и (111) с двухсторонней полировкой (одна из сторон была шлифованная, с последующей химической полировкой). Облучение проводилось на ускорителе „Темп“ протон-углеродным пучком со средней энергией 300 keV, длительностью 60 ns, в диапазоне плотностей тока $j = 20–50 \text{ A/cm}^2$ при варьировании числа импульсов n облучения от одного до пяти. Поверхность облученного кремния исследовали с помощью растровой электронной (Philips SEM-515) и атомно-силовой микроскопии Solver RPO (NT-MDT) и рентгеновского микроанализа.

Установлено, что при однократном воздействии МИП с плотностью тока до 50 A/cm^2 (когда не наблюдается интенсивного плавления поверхностного слоя) на кремнии образуются поверхностные структуры различной формы — в виде извилистых линий либо в форме клинообразных лучей, исходящих из общего центра (рис. 1). Они представляют собой углубления с достаточно плоским дном, величина которых ($\sim 150–200 \text{ nm}$) уменьшается по мере удаления от центра структуры. В центре структуры часто имеются скопления различных дискообразных частиц. Кристаллографическая ориентация кремния, а также степень шероховатости поверхности не влияют на форму образующихся структур. Причем при небольших плотностях тока ($\sim 20 \text{ A/cm}^2$) эти структуры образуются, как правило, при многократном облучении.

Как видно из СЭМ изображения (рис. 1, а), полученного во вторичных электронах, на дне лучей наблюдаются светлые участки с характерным размером $\sim 1 \mu\text{m}$, которые соответствуют соединениям кремния с более высоким коэффициентом вторичной электронной эмиссии. К таким соединениям прежде всего следует отнести оксид кремния. В пользу такого предположения свидетельствуют и данные по поверхностному распределению кислорода вдоль и поперек лучей, полученные с использованием рентгеновского микроанализа. В этих участках обнаружено более высокое содержание кислорода.

Размер подобных участков на полированной поверхности кремния, при облучении с плотностью тока 50 A/cm^2 (рис. 1, *b*), полученный из данных по распределению кислорода, находится в диапазоне 170–280 nm. Детальное исследование морфологии лучей этой структуры с помощью АСМ показало, что они содержат достаточно плоские участки вытянутой формы с характерными размерами: длиной 110 nm, шириной 45 nm и высотой 4 nm. Средняя толщина естественного оксида кремния на исследуемых образцах, определенная эллипсометрическим методом, составила 4.5 nm. Совокупность полученных данных свидетельствует о том, что эти участки как на шлифованной, так и на полированной поверхности с большой вероятностью являются островками оксида кремния.

Для выяснения влияния толщины оксидного слоя на образование поверхностных структур проводилось дополнительное окисление исследуемых образцов кремния при температуре 900°C . Для плотности тока пучка 100 A/cm^2 увеличение толщины оксидного слоя до 30 nm приводит к подавлению образования исследуемых структур, при этом на поверхности образуется волнообразный рельеф с пространственным периодом $\sim 5 \mu\text{m}$. По-видимому, оксидная пленка такой толщины, достигая при нагреве стадии размягчения, не теряет своей сплошности, несмотря на имеющиеся в ней растягивающие напряжения. При дальнейшем увеличении плотности тока возможно образование трещин в кремнии при сохранении целостности волнообразного оксидного слоя. Рост плотности тока пучка до 150 A/cm^2 приводит к полному удалению данного оксидного слоя, при этом наблюдаются повреждения поверхностного слоя в виде кратеров и трещин. Для каждой плотности тока пучка есть пороговая толщина оксида кремния, при которой поверхностные структуры не образуются, а возникает волнообразный рельеф.

Образование поверхностных структур в виде пятиугольных и гексагональных ячеек наблюдали на поверхности Si (100) [5] и Si (111) [6] после воздействия импульсного лазерного излучения. Возникновение этих структур было связано с наличием естественного оксида на поверхности кремния. Большее значение коэффициента термического расширения кремния ($2.62 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) по отношению к оксиду ($0.55 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) приводит при импульсном нагреве и плавлении кремния к растрескиванию пленки оксида. При достижении температуры плавления SiO_2 ($\sim 1700^\circ\text{C}$), большей в сравнении с Si (1415°C),

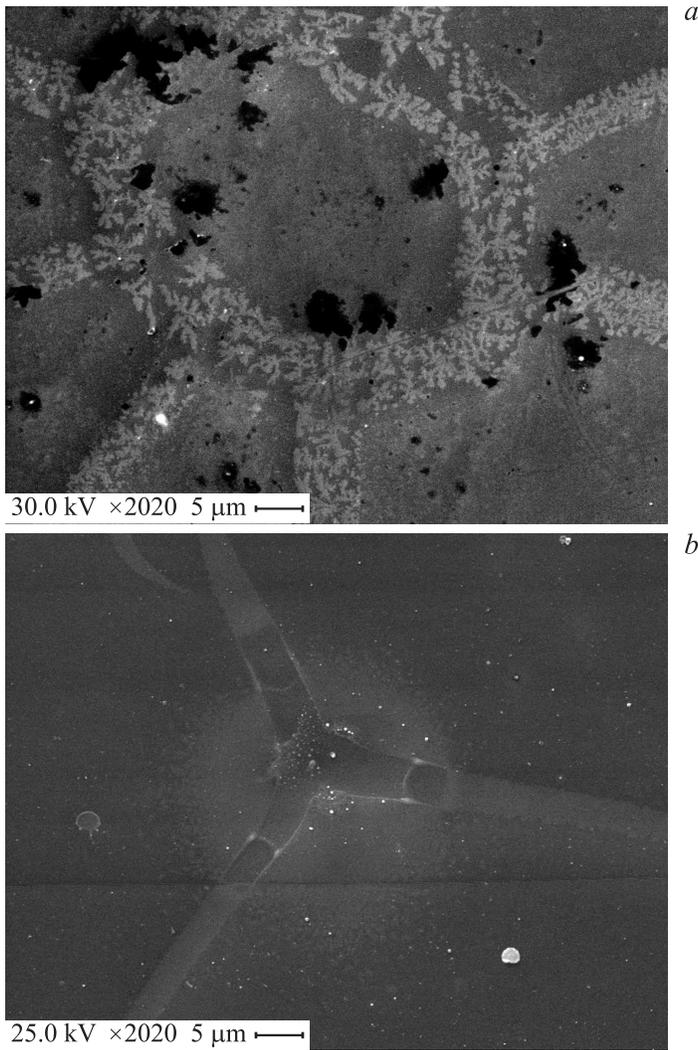


Рис. 1. Поверхностная структура на шлифованном Si (111) после воздействия МИП с $j = 20 \text{ A/cm}^2$ и $n = 3$ (a), $j = 50 \text{ A/cm}^2$ и $n = 1$ (b).

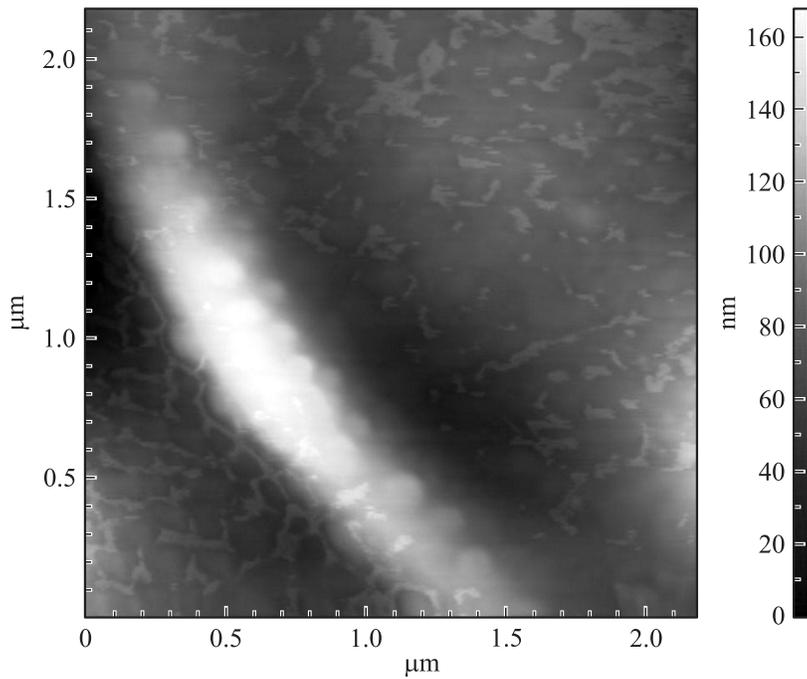


Рис. 2. АСМ-изображение поверхности луча вблизи валика структуры, представленной на рис. 1, *b*.

фрагменты разрушенного оксидного слоя могут частично или полностью растворяться в жидком кремнии [5]. При этом наблюдаемые сложные поверхностные структуры интерпретировались как замороженное состояние конвективного течения, вызванного неустойчивостью в расплаве кремния. Следует отметить, что при исследовании этих структур в вышеупомянутых работах ограничивались только методами оптической микроскопии, что не позволило установить особенности их формирования.

Возникающие на поверхности кремния при воздействии МИП поверхностные повреждения имеют более сложный характер и значительно отличаются от тех, которые появляются при импульсном лазерном воздействии. Это связано, в первую очередь, как с объемным

характером выделения энергии в приповерхностном слое, так и с внедрением примеси при ионном облучении. Однако слой оксида, по-видимому, и в этом случае играет определяющую роль. Можно предположить, что образование подобных поверхностных структур под действием ионного пучка происходит следующим образом.

На стадии нагрева, связанного с торможением ионов пучка в кремнии, и из-за разницы в коэффициентах термического расширения кремния и его оксида вдоль поверхности в тонкой оксидной пленке возникают растягивающие напряжения, которые при превышении предела прочности этой пленки приводят к ее разрыву. В зависимости от пространственного характера возникающих напряжений разрыв может быть реализован в виде одиночных криволинейных структур (при квазиодноосном растяжении) или различных звездообразных структур (при радиальном растяжении). Разрыв пленки оксида и наступление стадии плавления кремния сопровождаются увлечением расплава и его вязким течением. Это приводит к образованию характерных выступа и углубления в центре структуры и лучей, равноудаленных друг от друга. Как видно из рис. 1 *b*, в пределах выступа структуры каждый луч содержит ярко выраженный валик, выгнутый в сторону центра. Подобная форма валика свидетельствует о движении расплава в луче к центру структуры и его торможению краями луча. В силу ограниченности времени существования расплава из-за быстрого охлаждения вся эта структура фиксируется при наступлении стадии кристаллизации. Более детальное исследование луча с помощью АСМ (рис. 2) показало, что валик имеет ширину $0.5 \mu\text{m}$ и высоту $\sim 80 \text{ nm}$. На поверхности хорошо заметны плоские фрагменты оксида кремния различных размеров и формы, которые зафиксировались при кристаллизации как на самом валике, так и в областях луча возле него. Для шлифованного и затем химически полированного кремния, в силу большей развитости поверхности, при растрескивании оксида образуются фрагменты несколько больших размеров. При малых значениях плотности тока пучка они не успевают значительно раствориться в расплаве кремния и образуют дендритоподобную структуру (рис. 1, *b*). На формирование под действием МИП сложного рельефа наблюдаемых структур возможно влияние ползучести, а также пластического течения кремния [5], которое наступает при генерации механических напряжений и достижении температуры поверхностного слоя выше 800°C .

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют об определяющей роли естественного оксида кремния в формировании наблюда-

емых поверхностных структур на монокристаллическом кремнии при воздействии мощного ионного пучка.

Список литературы

- [1] Ковивчак В.С., Даветкильдеев Н.А. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 10. С. 12–15.
- [2] Болотов В.В., Ковивчак В.С., Корепанов А.А. и др. // Поверхность. 2011. № 9. С. 1–3.
- [3] Ковивчак В.С., Панова Т.В., Бурлаков Р.Б. // Поверхность. 2006. № 3. С. 70–71.
- [4] Lu Y.F., Choi W.K., Aoyagi Y. et al. // J. Appl. Phys. 1996. V. 80. P. 7052–7056.
- [5] Larciprete R., Borsella E., Cinti P. // Appl. Phys. A. 1996. V. 62. P. 103–114.
- [6] Muller O., De Unamuno S., Prevot B. et al. // Phys. Stat. Sol. (a). 1996. V. 158. P. 385–396.