

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУР В СИСТЕМЕ SiO_2/Si ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНОГО ИОННОГО ПУЧКА НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

В.С. Ковивчак, Т.В. Панова, О.В. Кривоzubов, Н.А. Давлеткильдеев, Е.В. Князев
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, пр. Мира, 55а, Омск,
644077, Россия, тел: (3812) 22-49-72, факс: (3812) 64-77-87, e-mail: kvs@univer.omsk.su

Исследовано образование поверхностных микроструктур на поверхности монокристаллического кремния со слоем собственного оксида различной толщины при воздействии мощного ионного пучка наносекундной длительности. Описаны морфологические особенности возникающих структур в зависимости от толщины слоя оксида и плотности тока ионного пучка. Рассмотрены возможные механизмы их формирования.

Введение

Воздействие импульсных потоков энергии на монокристаллический кремний может приводить к формированию на его поверхности микроструктур, представляющих интерес для создания на их основе солнечных элементов и фотоприемников [1,2]. Присутствие на кремнии слоя собственного оксида (SiO_2) оказывает при этом существенное влияние на морфологию поверхности, формируемую при таком воздействии, в т.ч. при воздействии мощного ионного пучка (МИП) наносекундной длительности. С наличием тонкого слоя естественного оксида (~ 4 нм) связывают в последнем случае формирование поверхностных структур описанных и исследованных в [3]. Воздействие МИП на кремний со слоем оксида большей толщины (полученный термическим окислением) приводит к формированию на поверхности характерного волнообразного рельефа [4]. Похожие периодические структуры наблюдали при воздействии импульсного лазерного излучения ($\lambda=248$ нм, $\tau=23$ нс) на систему SiO_2/Si [5]. Возникновение данных структур авторы связывают с генерацией поверхностных волн на границе раздела «оксид кремния-расплавленный кремний». Однако, существенное отличие в характере распределения поглощенной энергии в системе SiO_2/Si при импульсном лазерном воздействии и под действием мощного ионного пучка, требуют более детального изучения особенностей наблюдаемых волнообразных поверхностных структур и конкретизации механизмов их образования.

Методика и техника эксперимента

Эксперименты выполнены на пластинах промышленного кремния КДБ-10 (111), КЭФ-4,5 (100)) со слоем собственного оксида толщиной от нескольких единиц до сотен нанометров. Использовались пластины двух видов – (100) с односторонней полировкой и (111) с двухсторонней полировкой (одна из сторон была шлифованная с последующей химической полировкой). Слой оксида кремния необходимой толщины выращивали методом термического окисления. Его толщину определяли на эллипсометрическим методом (АСЭБ-10М). Облучение проводилось на ускорителе «Темп» протон-углеродным пучком со средней энергией 300 кэВ, длительностью 60 нс, в диапазоне плотностей тока 20 - 200 A/cm^2 при варьировании числа импульсов облучения (n) от

одного до пяти. Поверхность облученного кремния исследовали с помощью растровой электронной (JSM-6610LV, "JEOL" с энергодисперсионным анализатором Inca-350) и атомно-силовой микроскопии (Solver RPO (NT-MDT).

Результаты и их обсуждение

Установлено, что как однократное, так и многократное воздействие МИП с плотностью выше 30 A/cm^2 на исследуемые образцы кремния, покрытые слоем оксида кремния толщиной от 30 до 330 нм, приводит к образованию волнообразных поверхностных микроструктур, характерный вид которых представлен на рис. 1. При фиксированной плотности тока пучка в 100 A/cm^2 и увеличении толщины пленки оксида наблюдается незначительный рост пространственного периода: при 32 нм он составляет 3,8 мкм, а при 330 нм достигает 4,3 мкм. Для случая лазерного воздействия, при таких же толщинах оксидного слоя, пространственный период, по данным работы [5] составляет 1,5 и 9 мкм, соответственно. Если толщина оксидной пленки остается неизменной (во всем исследованном диапазоне толщин), а увеличивается плотность тока пучка, то пространственный период также увеличивается, что аналогично наблюдаемым изменениям при лазерном облуче-

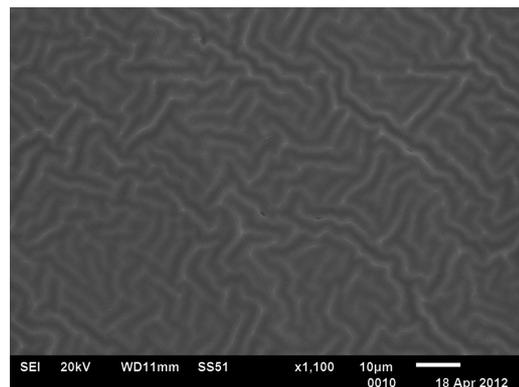


Рис. 1. Микроструктура поверхности кремния с слоем собственного оксида толщиной 330 нм после воздействия МИП с $j=100 \text{ A}/\text{cm}^2$ и $n=1$

Удаление слоя оксида кремния с облученного образца в растворе плавиковой кислоты показывает, что волнообразная структура присутствует

и на поверхности самого кремния. Для образцов с оксидным слоем толщиной 330 нм и плотности тока пучка 100 A/cm^2 по данным атомно-силовой микроскопии среднее значение пространственного периода волнообразного рельефа как на поверхности оксида, так и самом кремнии близко и составляет 5,0 и 4,8 мкм, соответственно. При этом высота рельефа составляет 200 нм и 300 нм, соответственно для поверхности SiO_2/Si и Si . Увеличение плотности тока пучка до 150 A/cm^2 приводит к существенному изменению морфологии поверхности - образованию волнообразного рельефа покрытого каплями расплавленного оксида кремния (рис.2).

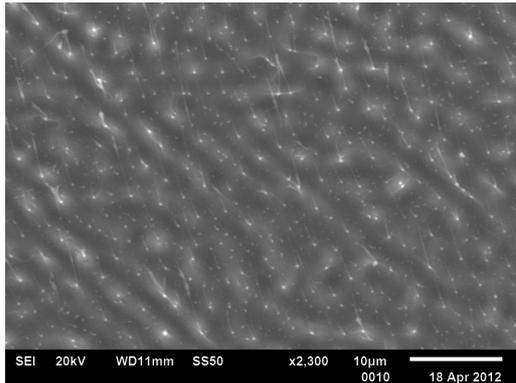


Рис. 2. Поверхность кремния с слоем собственного оксида толщиной 330 нм после воздействия МИП с $j=150 \text{ A/cm}^2$ и $n=1$

Средняя плотность этих капель составляет $4,6 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$, причем на гребне волны она в $\sim 1,2$ раза больше, чем во впадине. Наиболее вероятный размер капель составляет 250 нм. Как правило, капли соединены с гребнем волны перемычками с характерными размерами: ширина $\sim 90 \text{ нм}$, длина 3,4 мкм (рис. 3). Облучение кремния покрытого слоем оксида толщиной 500 нм не приводит к образованию на его поверхности волнообразной структуры, хотя для случая лазерного воздействия при близкой толщине слоя оксида ($\sim 450 \text{ нм}$) наблюдаются такие структуры с периодом $\sim 13 \text{ мкм}$. Увеличение плотности тока пучка до 200 A/cm^2 вызывает в этом случае образование в слое оксида пор с наиболее вероятным диаметром 0,57 мкм (рис. 4).

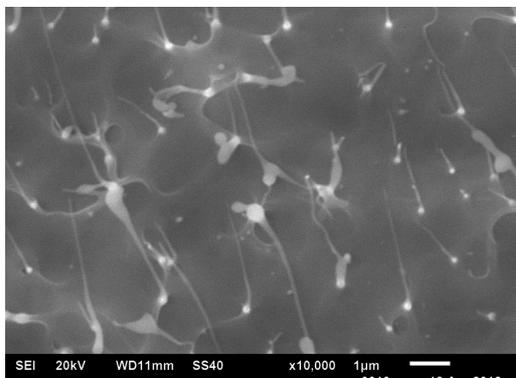


Рис. 3. Увеличенное изображение фрагмента поверхности рис. 2

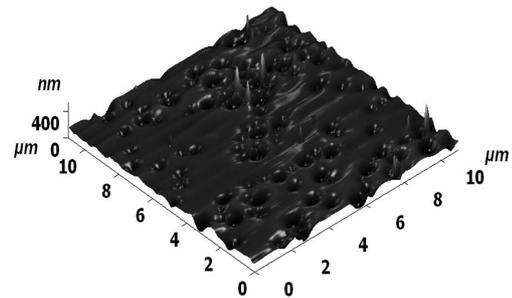


Рис. 4. АСМ изображение поверхности кремния с слоем собственного оксида толщиной 500 нм после воздействия МИП с $j=200 \text{ A/cm}^2$ и $n=1$

Средняя глубина пор, измеренная с помощью атомно-силовой микроскопии, достигает 120 нм. Поверхностная плотность пор составляет $9,6 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$. Поверхностная структура, полученная при облучении МИП окисленного кремния (шлифованная с последующей химической полировкой сторона пластины КДБ-10 (111)) с малой плотностью тока (до 50 A/cm^2) представляла собой волнообразный рельеф, фронт которого ориентирован параллельно остаточным следам шлифовки пластины.

Для интерпретации полученных результатов по формированию под действием МИП поверхностных волнообразных структур в кремнии, покрытом слоем оксида и их корректного сравнения с данными по импульсному лазерному воздействию, как уже отмечалось выше, необходимо учитывать различия в профилях энерговыделения при таких воздействиях. Поскольку SiO_2 прозрачен для лазерного излучения с $\lambda=248 \text{ нм}$, то поглощение энергии происходит в поверхностном слое кремния, вызывая его плавление, при этом оксид находится в твердом состоянии [5]. Образующаяся волнообразная структура объясняется «замораживанием» поверхностных волн, возникающих на расплавленной поверхности кремния с находящейся на ней тонкой упруго деформированной пленкой оксида [4]. Очевидно, что толщина слоя оксида будет влиять на частотный спектр возбуждаемых поверхностных волн и как следствие на наблюдаемый пространственный период формирующейся структуры. В [6] было теоретически показано и экспериментально подтверждено, что с увеличением толщины пленки SiO_2 , линейно увеличивается и пространственный период поверхностной волны для системы SiO_2/Al . При высоких плотностях поглощенной энергии лазерного излучения происходит нагрев и плавление слоя оксида из-за подвода тепла от расплавленного слоя кремния [5]. За время нахождения в расплавленном состоянии слой оксида, остывая, будет принимать форму застывшего к этому времени нижележащего слоя кремния.

При воздействии МИП на систему SiO_2/Si , когда толщина собственного оксида меньше проективного пробега ионов пучка, энерговыделение происходит как в оксиде кремния, так и в поверхностном слое монокристаллического кремния,

обеспечивая нагрев обоих слоев. Для режимов облучения, при которых под слоем оксида возникает расплавленный слой кремния, необходимой толщины, происходит возбуждение на границе раздела поверхности волн. Вследствие нагрева пленки оксида ее упругие свойства могут существенно меняться т.к. температура плавления кремния 1415°C , а температура размягчения оксида $\sim 1300^\circ\text{C}$, приводя к формированию волнообразных структур с иными пространственными периодами нежели при лазерном облучении. На пространственную ориентацию формирующихся микроструктур может влиять шероховатость поверхности оксида кремния, находящегося в твердом состоянии и контактирующего с расплавом кремния.

При увеличении плотности тока пучка до 200 A/cm^2 вязкость расплавленного оксида уменьшается, а амплитуда поверхностной волны увеличивается, что может привести к выбросу небольших объемов расплава оксида с вершины волны с образованием капель, как это наблюдается, например для магния [7]. В силу того, что вязкость расплава оксида кремния быстро увеличивается при понижении температуры, капли, как правило, соединены с гребнем волны протяженной перемычкой в виде ленты или нити.

Увеличение толщины слоя собственного оксида кремния до значений сравнимых с величиной проективного пробега ионов углерода пучка в оксиде (которые обеспечивают основную долю энерговыделения МИП) приводит преимущественно к нагреву только этого слоя. В этом случае плавление поверхностного слоя кремния либо не происходит, либо глубина расплава не достаточна для возбуждения поверхностной волны, и как следствие, образования волнообразных структур не наблюдается. Образование пор в слое диоксида кремния толщиной 500 нм, может быть вызвано его локальным радиационно-термическим разложением ($t_{\text{разл}}=1997^\circ\text{C}$) и выбросом газообразных продуктов и расплава с формированием пор. Высокая локальная плотность поглощенной энергии, приводящая к достижению температуры разложения оксида может быть вызвана, например, филаментацией мощного ионного пучка. Кроме того, при толщинах оксида меньших проективного пробега ионов пучка на процесс формирования поверхностного рельефа (в том числе пор) при воздействии МИП может влиять локальное давление паров, создаваемое

на границе раздела «оксид кремния - кремний», за счет интенсивного испарения кремния. Расплавленный оксид ($t_{\text{пл}}=1610^\circ\text{C}$) может локально выбрасываться парами кремния, величина давления которых при этой температуре достигает 100 Па [8].

Закключение

Таким образом, полученные результаты показывают, что волнообразная структура, возникающая при воздействии МИП на SiO_2/Si может быть объяснена «замораживанием» поверхностных волн, возникающих в расплаве на границе раздела оксид кремния - расплав кремния. В отличие от импульсного лазерного воздействия, в исследованных условиях облучения, пленка оксида кремния находится в размягченном состоянии, что обусловлено объемным характером энерговыделения МИП в рассматриваемой системе. Изменение упругих свойств пленки оксида влияет на параметры формирующейся волнообразной структуры. При больших плотностях тока пучка ($> 150\text{ A/cm}^2$) волнообразный рельеф и появление капель оксида определяется переходом пленки оксида в жидкое состояние. Для толщин слоя оксида кремния превышающих проективный пробег ионов возникновения волнообразной микроструктуры не наблюдается, а происходит формирование пор в оксиде.

Список литературы

1. Yaddaden C., Djemaa A., Belaroussi Y, Kerdja T., Gabouze N., Keffous A, Guerbous L. // Optics Communications. - 2011. - Т. 284. - N. 13. - P. 3308–3310.
2. Medvid A., Dmitruk I., Onufrijevs P., Pundyk I. // Microelectronics Journal. - 2009. - Vol. 40. - N. 3. - P. 449.
3. Ковивчак В.С., Панова Т.В., Кривокубов О.В., Давлеткильдеев Н.А. // ПЖТФ. - 2011. - Т. 37. - В. 24. - С. 88-94.
4. Ковивчак В.С., Панова Т.В., Бурлаков Р.Б. // Поверхность. - 2006. - № 3. - С. 70-71.
5. Yu J. J., Zhang J. Y., Boyd I. W., Lu Y. F. // Appl. Phys. A. - 2001. - Vol. 72. - N. 1. - P. 35–39.
6. Lu Y. F., Yu J. J. and Choi W. K. // Appl. Phys. Lett. - 1997. - Vol. 71. - N. 23. - P. 3439-3440.
7. Ковивчак В.С., Панова Т.В., Михайлов К.А. // ПЖТФ. - 2010. - Т. 36. - В. 23. - С. 55-61.
8. Таблицы физических величин. Под ред. И.К. Кикоина. - М. Атомиздат, 1976.

FORMATION OF MICROSTRUCTURES IN SiO_2/Si SYSTEM UNDER THE ACTION OF HIGH POWER ION BEAM NANOSECOND DURATION

V.S. Kovivchak, T.V. Panova, O.V. Krivozubov, N.A. Davletkil'deev, E.V. Knyazev
Omsk State University, pr. Mira, 55a, Omsk, Russia, 644077
Tel: (3812) 22-49-72, fax: (3812) 64-77-87, e-mail: kvs@univer.omsk.su

The formation of periodic microstructures under the action of a nanosecond pulsed high power ion beam on the surface of single-crystalline silicon covered with intrinsic oxide layers of various thickness has been studied. Morphological features of the observed structures depend on the oxide layer thickness and ion beam current density. At high current density ($> 150\text{ A/cm}^2$) silica drops formed on the surface of microstructures. The formation of microstructures is not observed and the pores in the silica formed when the thickness of the silicon oxide layer above the projected range of the ion. Possible mechanisms of formation of these microstructures are considered.