

05;10;12

## **Волнообразные микроструктуры, формируемые на границе раздела SiO<sub>2</sub>/Si при воздействии мощного ионного пучка**

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

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского  
E-mail: kvs@univer.omsk.su  
Омский филиал Института физики полупроводников СО РАН

Поступило в Редакцию 1 августа 2012 г.

Исследовано образование волнообразных 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.

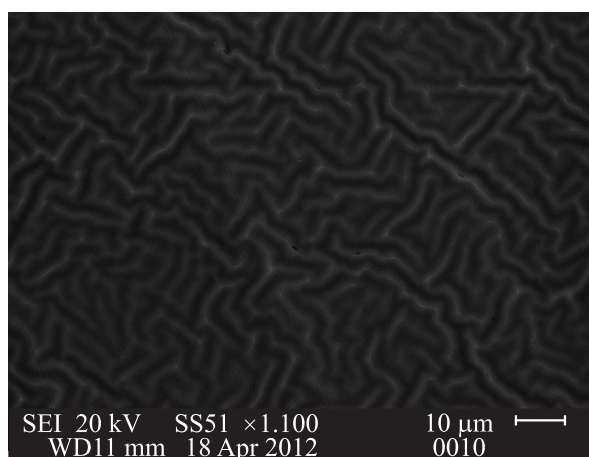
Воздействие импульсных потоков энергии на монокристаллический кремний может приводить к формированию на его поверхности микроструктур, представляющих интерес для создания на их основе солнечных элементов и фотоприемников [1,2]. Присутствие на кремнии слоя собственного оксида (SiO<sub>2</sub>) оказывает при этом существенное влияние на морфологию поверхности, формируемую при таком воздействии, в том числе при воздействии мощного ионного пучка (МИП) наносекундной длительности. С наличием тонкого слоя естественного оксида (~ 4 nm) связывают в последнем случае формирование поверхностных структур, описанных и исследованных в [3]. Воздействие МИП на слой оксида большей толщины (полученный термическим окислением) приводит к формированию на поверхности характерного волнообразного рельефа [4]. Похожие периодические структуры наблюдали при воздействии импульсного лазерного излучения ( $\lambda = 248$  nm,  $\tau = 23$  ns) на систему SiO<sub>2</sub>/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  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  при импульсном лазерном воздействии и под действием мощного ионного пучка требует детального изучения особенностей наблюдаемых волнообразных поверхностных структур и конкретизации механизмов их образования.

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 эллипсометрическим методом (АСЭБ-10М). Облучение проводилось на ускорителе „Темп“ протон-углеродным пучком со средней энергией 300 keV, длительностью 60 ns, в диапазоне плотностей тока 20–200  $\text{A}/\text{cm}^2$  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).

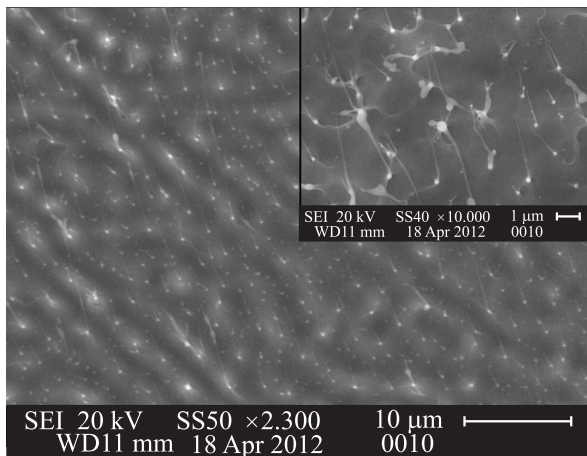
Установлено, что как однократное, так и многократное воздействие МИП с плотностью выше 30  $\text{A}/\text{cm}^2$  на исследуемые образцы кремния, покрытые слоем оксида кремния толщиной от 30 до 330 nm, приводит к образованию волнообразных поверхностных микроструктур, характерный вид которых представлен на рис. 1. При фиксированной плотности тока пучка в 100  $\text{A}/\text{cm}^2$  и увеличении толщины пленки оксида наблюдается незначительный рост пространственного периода: при 32 nm он составляет 3.8  $\mu\text{m}$ , а при 330 nm достигает 4.3  $\mu\text{m}$ . Для случая лазерного воздействия, при таких же толщинах оксидного слоя, пространственный период по данным работы [5] составляет 1.5 и 9  $\mu\text{m}$  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 облучении.

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 nm и плотности тока пучка 100  $\text{A}/\text{cm}^2$  по данным



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

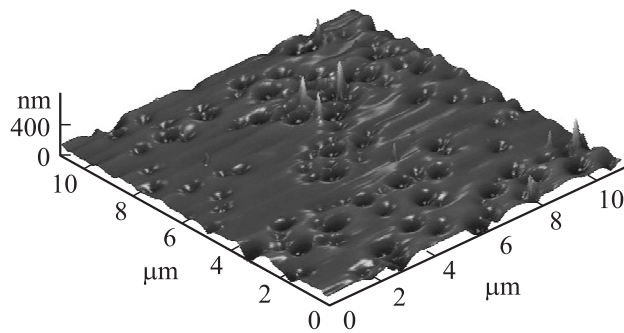
атомно-силовой микроскопии среднее значение пространственного периода волнообразного рельефа как на поверхности оксида, так и на самом кремнии близко и составляет 5.0 и 4.8  $\mu\text{m}$  соответственно. При этом высота рельефа составляет 200 и 300 nm соответственно для поверхности  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  и  $\text{Si}$ . Увеличение плотности тока пучка до 150  $\text{A/cm}^2$  приводит к существенному изменению морфологии поверхности — образованию волнообразного рельефа, покрытого каплями расплавленного оксида кремния (рис. 2). Средняя плотность этих капель составляет  $4.6 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$ , причем на гребне волны она в  $\sim 1.2$  раза больше, чем во впадине. Наиболее вероятный размер капель составляет 250 nm. Как правило, капли соединены с гребнем волны перемычками (рис. 2, вставка) с характерными размерами: ширина  $\sim 90 \text{ nm}$ , длина 3.4  $\mu\text{m}$ . Облучение кремния, покрытого слоем оксида толщиной 500 nm, не приводит к образованию на его поверхности волнообразной структуры, хотя для случая лазерного воздействия при близкой толщине слоя оксида ( $\sim 450 \text{ nm}$ ) наблюдаются такие структуры с периодом  $\sim 13 \mu\text{m}$ . Увеличение плотности тока пучка до 200  $\text{A/cm}^2$  вызывает в этом случае образование в слое оксида пор с наиболее вероятным диаметром 0.57  $\mu\text{m}$  (рис. 3). Средняя глубина пор, измеренная с помо-



**Рис. 2.** Поверхность кремния со слоем собственного оксида толщиной 330 нм после воздействия МИП с  $j = 150 \text{ A/cm}^2$  и  $n=1$ . На вставке — увеличенное изображение участка поверхности микроструктуры с каплями расплавленного оксида.

шью атомно-силовой микроскопии, достигает 120 нм. Поверхностная плотность пор составляет  $9.6 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$ . Поверхностная структура, полученная при облучении МИП окисленного кремния (шлифованная с последующей химической полировкой сторона пластины КДБ-10 (111)) с малой плотностью тока (до  $50 \text{ A/cm}^2$ ) 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  $\text{SiO}_2$  прозрачен для лазерного излучения с  $\lambda = 248 \text{ nm}$ , 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



**Рис. 3.** АСМ-изображение поверхности кремния со слоем собственного оксида толщиной 500 nm после воздействия МИП с  $j = 200 \text{ A/cm}^2$  и  $n = 1$ .

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  $\text{SiO}_2$  линейно увеличивается и пространственный период поверхностной волны для системы  $\text{SiO}_2/\text{Al}$ . При высоких плотностях поглощенной энергии лазерного излучения происходят 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  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , 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 поверхностных волн. Вследствие нагрева пленки оксида ее упругие свойства могут существенно меняться, так как температура плавления кремния  $1415^\circ\text{C}$ , 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  $200 \text{ A/cm}^2$  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 либо плавления поверхностного слоя кремния не происходит, либо глубина расплава недостаточна для возбуждения поверхностной волны и, как следствие, образования волнообразных структур не наблюдается. Образование пор в слое диоксида кремния толщиной  $500 \text{ nm}$  может быть вызвано его локальным радиационно-термическим разложением (температура разложения —  $1997^\circ\text{C}$ ) 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 (температура плавления —  $1610^\circ\text{C}$ ) может локально выбрасываться парами кремния, величина давления которых при этой температуре достигает  $100 \text{ Pa}$  [8].

Таким образом, полученные результаты показывают, что волнообразная структура, возникающая при воздействии МИП на  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , 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 определяются переходом пленки оксида в жидкое состояние. Для толщин слоя оксида кремния, превышающих проективный пробег ионов, возникновение волнообразной микроструктуры не наблюдается, а происходит формирование пор в оксиде.

## Список литературы

- [1] *Yaddaden C., Djema 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. V. 40. N 3. P. 449–451.
- [3] *Ковивчак В.С., Панова Т.В., Кривоzubов О.В., Давлеткильдеев Н.А.* // *Письма в ЖТФ*. 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. V. 72. N 1. P. 35–39.
- [6] *Lu Y.F., Yu J.J., Choi W.K.* // *Appl. Phys. Lett.* 1997. V. 71. N 23. P. 3439–3440.
- [7] *Ковивчак В.С., Панова Т.В., Михайлов К.А.* // *Письма в ЖТФ*. 2010. Т. 36. В. 23. С. 55–61.
- [8] *Таблицы физических величин / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.*