

05;11

## Плавление пористого кремния при воздействии мощного ионного пучка наносекундной длительности

© В.С. Ковивчак, Н.А. Давлеткильдеев

Омский филиал Института физики полупроводников

E-mail: kvs@univer.omsk.su

Поступило в Редакцию 3 декабря 2008 г.

Исследовано плавление слоев пористого кремния при воздействии мощного протон-углеродного пучка наносекундной длительности. Приведены размеры образующихся при таком воздействии эллипсоидальных частиц. Экспериментально оценен порог плавления слоев пористого кремния с пористостью 50%.

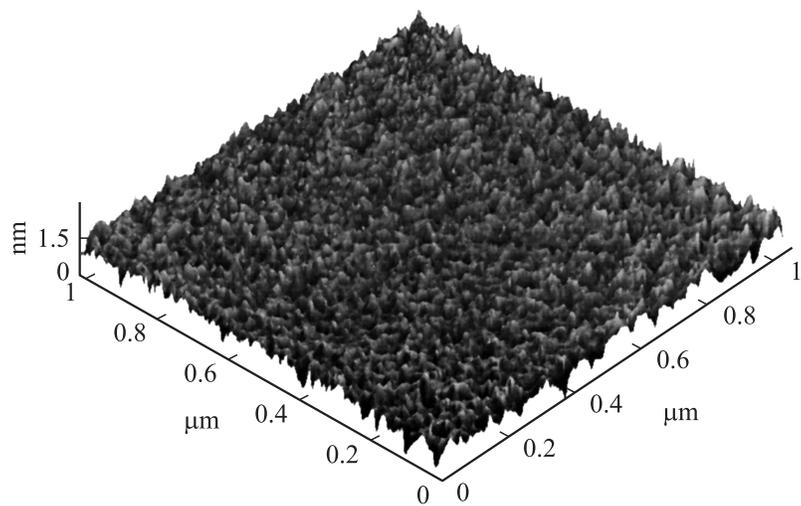
PACS: 81.05.Cy, 81.05.Rm, 81.05.Zx, 81.07.Wc

Пористый кремний является перспективным материалом для широкого класса различных устройств микро- и нанoeлектроники. Исследование взаимодействия пучков заряженных частиц и лазерного излучения с пористым кремнием представляет большой интерес как для понимания особенностей их взаимодействия с полупроводниковыми нанокристаллами, так и для создания на их основе технологий модификации свойств пористого кремния, необходимых для его широкого применения. До настоящего времени выполнено всего несколько работ, посвященных воздействию на пористый кремний электронных и ионных пучков и импульсного лазерного излучения. Причем в случае пучков заряженных частиц исследования ограничивались непрерывными пучками малой интенсивности [1,2]. В значительной степени результат воздействия импульсного лазерного излучения на пористый кремний определяется длиной волны излучения, его длительностью и интенсивностью. Такое воздействие может приводить как к модификации свойств пористого кремния [3], так и к плавлению пористого слоя при достижении пороговой плотности энергии, которая оказалась существенно меньше, чем для монокристаллического кремния [4,5]. В зависимости от длины волны лазерного излучения  $\lambda$ , его длительности  $\tau$  и плотности энергии на поверхности образца плавление пористого слоя может вызывать

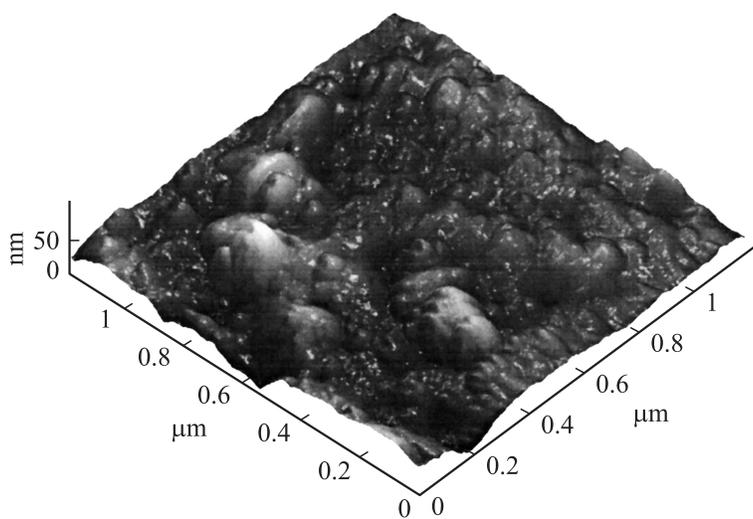
как изменение поверхностного рельефа пористого слоя вследствие его плавления (при  $\lambda = 308 \text{ nm}$ ,  $\tau = 30 \text{ ns}$ ) [5], так и образование на поверхности наноразмерных сферических частиц (при  $\lambda = 337 \text{ nm}$ ,  $\tau = 0.5 \text{ ns}$ ) [4]. Однако малая толщина слоя поглощения излучения с такими длинами волн в пористом кремнии, которая составляет  $\sim 100 \text{ nm}$ , не позволяет исследовать особенности взаимодействия концентрированных потоков энергии с более толстыми слоями пористого кремния, в частности изменение поверхностной морфологии таких слоев. В связи с этим представляет большой интерес исследование взаимодействия наносекундного ионного пучка высокой энергии с пористым кремнием, пробег ионов пучка в котором может достигать нескольких микрометров и слабо зависит от состояния поверхности пористого слоя. Подобные пучки являются перспективным инструментом для модификации свойств пористого кремния с толщинами до единиц микрометров.

Слои пористого кремния были получены путем анодного травления пластины монокристаллического кремния (КДБ-0.005) *p*-типа ориентации (111) в растворе  $\text{HF}(40\%):\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  (1:1) при плотности тока  $60 \text{ mA/cm}^2$ . Толщина пористого слоя, задаваемая временем анодного травления, варьировалась в пределах  $2.8\text{--}6 \mu\text{m}$  и определялась с помощью исследования поперечного скола образца в атомно-силовом микроскопе. Величина пористости слоев составляла 50%. Облучение слоев пористого кремния проводилось на ускорителе „Темп“ протон-углеродным пучком (30%  $\text{H}^+$  и 70%  $\text{C}^+$ ) со средней энергией  $300 \text{ keV}$ , длительностью пучка  $50 \text{ ns}$ , в диапазоне плотностей тока  $5\text{--}50 \text{ A/cm}^2$ . В экспериментах наряду со средней плотностью тока пучка варьировалось число импульсов облучения. Все исследованные образцы имели толщину пористого слоя, превышающую пробег ионов используемого пучка. Исследование морфологии поверхности пористых слоев кремния до и после облучения мощным ионным пучком (МИП) проводилось методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на сканирующем зондовом микроскопе Solver RPO (NT-MDT) в полуконтактном режиме на воздухе с использованием зонда марки NSG10.

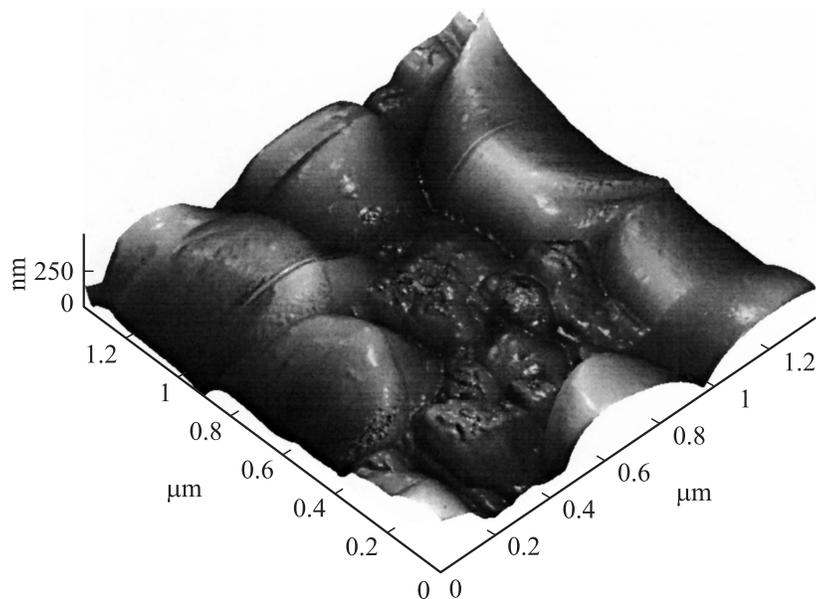
На рис. 1 показано типичное АСМ-изображение исходной поверхности пористого кремния, имеющего наиболее вероятный диаметр пор  $20 \text{ nm}$  и высоту неоднородностей до  $1.5 \text{ nm}$ . Однократное воздействие МИП с плотностью  $j = 10 \text{ A/cm}^2$  на этот слой пористого кремния вызывает образование на его поверхности эллипсоидальных частиц



**Рис. 1.** АСМ-изображение исходной поверхности пористого кремния.



**Рис. 2.** АСМ-изображение поверхности пористого кремния после однократного воздействия МИП с плотностью тока 10 А/см<sup>2</sup>.



**Рис. 3.** АСМ-изображение поверхности пористого кремния после однократного воздействия МИП с плотностью тока  $50 \text{ A/cm}^2$ .

кремния с наиболее вероятным диаметром  $190 \text{ nm}$  и высотой  $45 \text{ nm}$  (рис. 2), поверхностная плотность которых составляет  $4 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ . Следует отметить, что воздействие мощного ионного пучка с указанной плотностью тока непосредственно на монокристаллическую кремниевую подложку не приводит к возникновению каких-либо повреждений на ее поверхности. Увеличение числа импульсов облучения до 3 при сохранении плотности тока пучка ( $j = 10 \text{ A/cm}^2$ ) приводит к увеличению наиболее вероятного диаметра образующихся на поверхности частиц до  $980 \text{ nm}$  и их высоты до  $460 \text{ nm}$ . При этом поверхностная плотность образующихся частиц уменьшается до  $2 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$ . При увеличении плотности тока до  $50 \text{ A/cm}^2$  наблюдается практически полное преобразование пористого слоя в эллипсоидальные частицы различного диаметра (рис. 3). В этом режиме облучения наиболее вероятные диаметр частиц и высота составляют  $610$  и  $300 \text{ nm}$  соответственно. Поверхностная плотность частиц увеличивается до  $2.6 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ . При

плотности тока пучка  $\sim 40 \text{ A/cm}^2$  на монокристаллической подложке могут наблюдаться единичные поверхностные микротрещины, концентрация которых увеличивается с ростом плотности тока. Следует отметить, что для исследованных режимов облучения на поверхности пористого кремния ниже слоя частиц большего диаметра находятся частицы, имеющие в 2–3 раза меньший диаметр. Поверхностная плотность этих частиц не менее чем на порядок величины больше плотности частиц большего диаметра.

Снижение толщины пористого слоя при сохранении плотности тока пучка приводит к уменьшению диаметра образующихся частиц, что качественно согласуется с данными по импульсному лазерному облучению пористого кремния [4]. Оценка порога плавления полученных слоев пористого кремния мощным ионным пучком наносекундной длительности дает значение плотности энергии  $\sim 40 \text{ mJ/cm}^2$ , что сравнимо с данными, полученными для импульсного лазерного плавления пористого кремния ( $35 \text{ mJ/cm}^2$  при 45% пористости).

Наблюдаемые закономерности образования эллипсоидальных частиц при облучении пористого кремния мощным протон-углеродным пучком наносекундной длительности можно интерпретировать с точки зрения особенностей пространственного энерговыделения такого ионного пучка в пористых средах. Приведенные в работе [6] расчетные данные свидетельствуют о том, что при используемой энергии величина пробега ионов в пористом кремнии может примерно в 3 раза превышать величину их пробега в монокристаллическом кремнии. При проникновении высокоэнергетичного иона в решетку мишени наблюдаются локальный нагрев и плавление вещества в треке иона, что приводит к большим температурным градиентам, к градиентам в поверхностном натяжении и локальном давлении, вызывая этим поток массы [7]. Размер расплавленной зоны, образующейся в области трека иона используемого пучка в кремнии, составляет величину порядка единиц нанометров, что способствует эффективному плавлению кремниевого скелетона. Увеличение размеров и уменьшение концентрации образующихся эллипсоидальных частиц на поверхности пористого кремния при многократном облучении происходит прежде всего за счет объединения ранее образовавшихся близлежащих частиц при последующих импульсах облучения.

При увеличении плотности тока ионного пучка происходит увеличение размеров области пористого слоя, температура которой превышает температуру плавления пористого кремния. Это приводит к

росту размера эллипсоидальных частиц большего диаметра, которые формируются из материала вышеуказанной области. При этом отвод тепла от нижней границы этой области в близлежащие слои пористого кремния или приповерхностные слои монокристаллической подложки ограничивает объединение расплавленных элементов скелетона из-за их быстрого затвердевания и приводит к формированию второго слоя частиц, имеющих меньший диаметр.

Таким образом, воздействие мощного ионного пучка на слои пористого кремния с плотностью энергии больше  $40 \text{ mJ/cm}^2$  ( $\sim 5 \text{ A/cm}^2$ ) приводит к плавлению пористого слоя и образованию эллипсоидальных кремниевых частиц, диаметр и высота которых зависит от плотности тока пучка, числа импульсов облучения и толщины пористого слоя. Модификация свойств пористого кремния может проводиться при значениях плотности энергии ниже порога плавления.

## Список литературы

- [1] *Borini S., Amato G., Rocchia M., Boarino L.* et al. // J. Appl. Phys. 2003. V. 93. N 8. P. 1–3.
- [2] *Paszti F.* et al. // Phys. Stat. Sol (a). 2000. V. 182. P. 272–278.
- [3] *Сорокин Л.М., Соколов В.И., Бурицев А.П.* и др. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 24. С. 69–75.
- [4] *Dittrich Th., Sieber I., Henrion W.* et al. // Appl. Phys. A. 1996. V. 63. P. 467–470.
- [5] *Timoshenko V.Yu., Dittrich Th., Sieber I.* et al. // Phys. Stat. Sol (a). 2000. V. 182. P. 322–330.
- [6] *Ушаков В.В., Дравин В.А., Мельник Н.Н.* и др. // ФТП. 1997. Т. 31. В. 9. С. 1126–1129.
- [7] *Hu X., Cahill D.G., Averback R.S.* // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. N 12. P. 7777–7783.