

02;13

## Влияние температуры мишени на образование нанорельефа при облучении газовыми кластерными ионами

© Д.С. Киреев<sup>1</sup>, А.Е. Иешкин<sup>1</sup>, А.А. Шемухин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
E-mail: dmtr.kireeff6497@yandex.ru

Поступило в Редакцию 28 августа 2019 г.

В окончательной редакции 31 января 2020 г.

Принято к публикации 6 февраля 2020 г.

Проведено исследование нанорельефа, формирующегося на поверхности меди под действием наклонного пучка кластерных ионов при различных дозах облучения и температурах мишени. Образующийся нанорельеф с увеличением дозы развивается в упорядоченную волнообразную структуру. Обнаружено, что при увеличении температуры мишени происходит сглаживание исходной шероховатости. Указаны механизмы, ответственные за формирование топографии поверхности, и сделаны оценки их эффективности.

**Ключевые слова:** кластерные ионы, распыление, нанорельеф, самоорганизация, атомно-силовая микроскопия.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.09.49362.18021

Современные технологии, применяемые при производстве элементов и устройств электроники, оптики, сенсорики, предъявляют высокие требования к состоянию поверхности материалов, в частности к имеющемуся на поверхности рельефу. Эти требования варьируются в зависимости от типа прикладных задач. Например, быстрый рост степени интеграции в электронных схемах значительно влияет на требования к планарности поверхности полупроводниковых структур на всех этапах создания микросхем и высокому качеству кристалличности интерфейсных слоев [1]. Одним из способов достижения высокого уровня гладкости поверхности различных материалов является использование ионных пучков. В частности, хорошо зарекомендовала себя в этой области технология ускоренных газовых кластерных ионов [2–4].

Известно, что сглаживание шероховатостей кластерными ионами происходит при нормальном падении ионного пучка на поверхность. Напротив, наклонное падение пучка может приводить к развитию поверхностного нанорельефа [5]. Появление волнообразного рельефа на кремнии было продемонстрировано в [6], аналогичный рельеф на золоте исследован в [7]. Обзор имеющихся на настоящий момент данных, касающихся формирования волн при наклонном падении кластерных ионов, приведен в [8]; там обсуждаются возможности использования этого явления, например, для создания сенсорных структур на основе плазмонного резонанса.

Несмотря на то что существует большое количество работ, направленных на исследование возможности сглаживания и модификации поверхности с помощью пучков ускоренных кластерных ионов, на данный момент процессы формирования рельефа на облучаемой поверхности не изучены в достаточной степени. В частности,

неизвестна роль температуры облучаемой мишени. В настоящей работе описан нанорельеф, формирующийся на поверхности меди при облучении кластерными ионами аргона в случае наклонного падения при комнатной температуре и нагреве мишени.

Облучение проводилось на ускорителе газовых кластерных ионов МГУ им. М.В. Ломоносова. Более подробно параметры данной установки и основные механизмы формирования кластерных ионов описаны в [9]. В качестве рабочего газа, из которого формировались кластерные ионы, использовался аргон особой чистоты. Поток кластерных ионов генерировался при адиабатическом расширении рабочего газа через сверхзвуковое сопло и последующей ионизации образовавшихся нейтральных кластеров. Полученные ионы ускорялись напряжением 10 кВ. Процессы, происходящие при столкновении с мишенью атомарных и легких кластер-

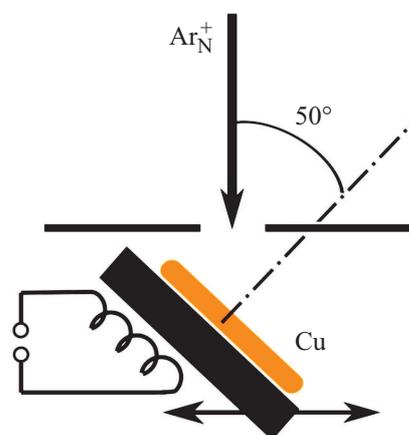
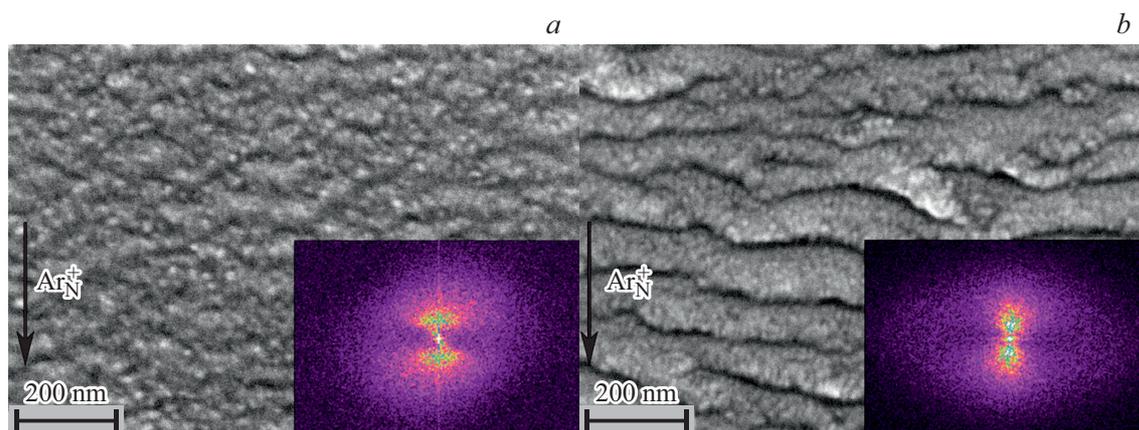


Рис. 1. Схема эксперимента.



**Рис. 2.** РЭМ-изображения поверхности меди при облучении дозами  $1.2 \cdot 10^{16}$  (a) и  $4.2 \cdot 10^{16}$   $\text{ion}/\text{cm}^2$  (b) при комнатной температуре. На вставках приведены двумерные фурье-образы изображений, полученные методом БПФ. Стрелкой показано направление падения пучка кластерных ионов.

ных ионов, имеющих сравнительно высокую энергию на составляющий атом, коренным образом отличаются от случая тяжелых кластерных ионов [10]. Поэтому ускоренный ионный пучок проходил через область постоянного магнитного поля, и на мишень попадали кластерные ионы, состоящие более чем из 70 атомов аргона. Средний размер кластерных ионов, попадающих на мишень, контролировался времяпролетной системой и составлял 1200 атомов аргона на элементарный заряд.

Образцы были вырезаны из чистой поликристаллической меди в виде прямоугольных пластин размером  $20 \times 10 \times 1.5$  мм. Поверхность полировалась свободным абразивом и очищалась в органических растворителях в ультразвуковой ванне. Среднеквадратичная остаточная шероховатость составляла 3–5 нм. При облучении кластерными ионами образец закреплялся на поверхности нагревателя, нормаль к поверхности которого составляла угол  $50^\circ$  к линии падения ионного пучка. Выбор угла обусловлен тем, что, согласно [7], наиболее эффективно рельеф развивается при углах падения кластеров в диапазоне  $40$ – $65^\circ$ . Перед мишенью располагалась диафрагма диаметром 3 мм, изготовленная из титановой фольги (рис. 1). При проведении эксперимента каждый из образцов нагревался до температуры  $400^\circ\text{C}$ , затем при этой температуре осуществлялось его облучение с выбранной дозой, после чего образец остужался до комнатной температуры, смещался относительно диафрагмы и облучался с той же дозой при комнатной температуре. Температура мишени контролировалась термопарой. Облучение проводилось в вакууме, уровень которого составлял  $2 \cdot 10^{-3}$  Па при нагреве мишени и  $4 \cdot 10^{-4}$  Па в отсутствие нагрева. Дозы облучения измерялись интегратором тока и в приближении однозарядных ионов равнялись  $1.2 \cdot 10^{16}$  и  $4.2 \cdot 10^{16}$   $\text{cm}^{-2}$ .

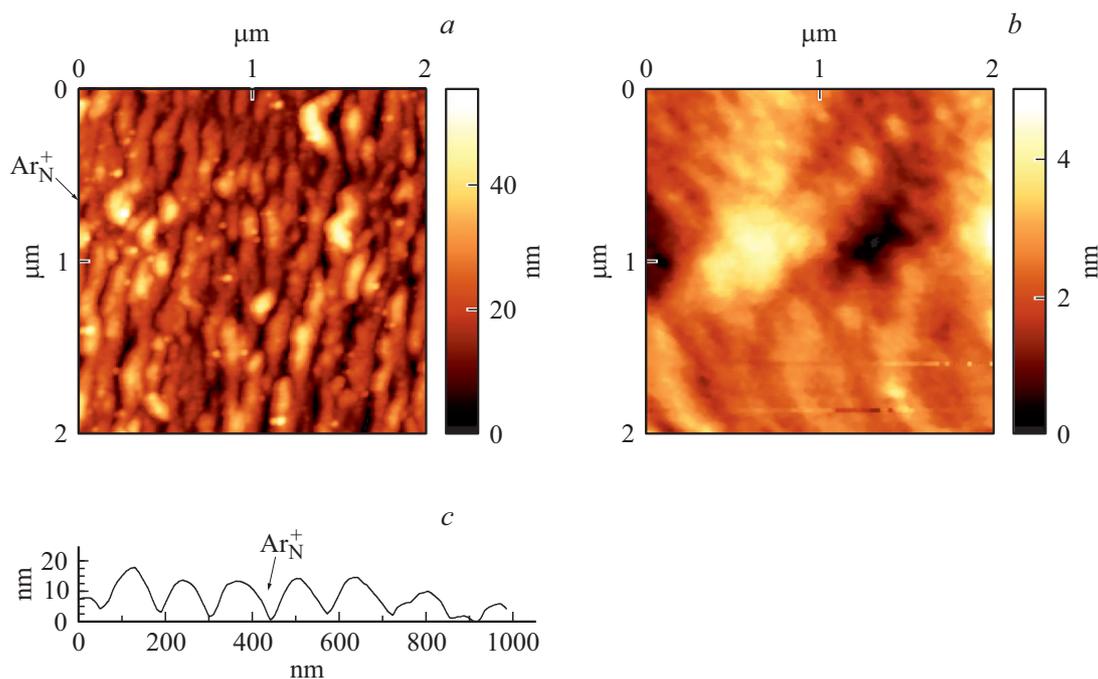
Рельеф поверхности перед облучением и после него контролировался с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) ZEISS Ultra 55 и атомно-силового

микроскопа (АСМ) NT-MDT Solver Pro в полуконтактном режиме.

РЭМ-изображения области, облученной при комнатной температуре, приведены на рис. 2. На вставках представлены двумерные фурье-образы аналогичных изображений при меньшем увеличении, полученные методом быстрого преобразования Фурье (БПФ). При дозе облучения  $1.2 \cdot 10^{16}$   $\text{cm}^{-2}$  на поверхности наблюдается слабо развитый рельеф, образованный зернами с характерным размером 15–20 нм. БПФ демонстрирует некоторую степень его упорядоченности в плоскости падения пучка. С увеличением дозы облучения развивается хорошо выраженный волнообразный рельеф с волновым вектором, лежащим в плоскости падения пучка. Длина волны составляет 145 нм и соответствует максимуму фурье-преобразования. Заметно, что, как и в случае меньшей дозы облучения, рельеф имеет зернистую структуру. Области образцов, облученные при температуре  $400^\circ\text{C}$ , на РЭМ-изображениях выглядят гладкими вне зависимости от дозы, и эти изображения мы не приводим.

На рис. 3 представлены результаты исследования с помощью АСМ поверхности образца, облученного дозой  $4.2 \cdot 10^{16}$   $\text{cm}^{-2}$ . Среднеквадратичные значения шероховатости, определенные по области размером  $2 \times 2$   $\mu\text{m}$ , составляют 7.3 нм для комнатной температуры облучения и 0.7 нм для повышенной температуры. Последнее значение существенно ниже исходной величины шероховатости. Таким образом, ионная бомбардировка в таких условиях не только не приводит к развитию волнообразного рельефа, но и обеспечивает сглаживание поверхности.

Определенная по профилю АСМ-изображения характерная высота волнообразного рельефа от впадины до выступа равняется 15–20 нм, длина волны соответствует приведенному ранее значению 145 нм. Отметим, что длина волны наблюдаемого нами рельефа точно укладывается в закономерность, полученную в [6] для золота, облученного кластерами со средним размером



**Рис. 3.** АСМ-изображения поверхности меди при облучении дозой  $4.2 \cdot 10^{16}$   $\text{ion}/\text{cm}^2$ : *a* — при комнатной температуре, *b* — при температуре  $400^\circ\text{C}$ . *c* — профиль волнообразного рельефа, образованного при комнатной температуре. Стрелками показано направление падения пучка кластерных ионов.

3000 атомов аргона и энергией 30 keV, т.е. со средней энергией в расчете на один атом кластера, близкой к нашей; среднеквадратичная шероховатость также близка к значению, указанному в этой работе.

Оценка эффективной толщины удаленного кластерами слоя вещества [11] с учетом зависимости коэффициента распыления от угла падения [12] дает значения 30–50 nm. Это незначительно превосходит глубину волнообразного рельефа. Таким образом, только зависимость коэффициента распыления от локального угла падения и кривизны поверхности не может привести к формированию такого рельефа. Его формирование обеспечивается также за счет перераспределения вещества вдоль поверхности при диффузии и переосаждении распыленных атомов [13].

В то же время поверхностная диффузия обеспечивает механизм сглаживания рельефа. Оценим изменение коэффициента поверхностной диффузии  $D_s$  при нагреве мишени. Считая, что коэффициент  $D_s$  равен произведению концентрации адатомов  $n_a$  на коэффициент их диффузии  $D_a$  [14], получаем

$$D_s = n_a D_a = n_a D_0 \exp\left(-\frac{E_m^a}{kT}\right),$$

где  $E_m^a$  — энергия миграции адатома. В условиях ионного облучения в приведенной выше формуле предэкспоненциальный множитель определяется в основном темпом генерации дефектов на поверхности и остается неизменным в условиях эксперимента. Подстановка значений энергии миграции [14] показывает, что изменение

температуры от комнатной до  $400^\circ\text{C}$  приводит к увеличению коэффициента поверхностной диффузии на два порядка, что и обеспечивает сглаживание поверхности мишени при нагреве.

Таким образом, в работе проведено исследование нанорельефа, формирующегося при наклонном облучении мишени кластерными ионами, в зависимости от дозы облучения и температуры мишени. Показано, что при комнатной температуре на поверхности развивается рельеф, с увеличением дозы переходящий в упорядоченный волнообразный. Обнаружено, что с увеличением температуры мишени развития рельефа не происходит. Более того, происходит сглаживание исходной шероховатости. Усиление эффекта сглаживания поверхности при повышенной температуре можно использовать для более эффективной планаризации материалов кластерными ионами.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность А.А. Татаринцеву и А.С. Трифонову за помощь при микроскопическом исследовании образцов.

## Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-32-20193).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Шемухин А.А., Балакишин Ю.В., Черныш В.С., Голубков С.А., Егоров Н.Н., Сидоров А.И. // ФТП. 2014. Т. 48. В. 4. С. 535–538. DOI: 10.1134/S1063782614040265
- [2] Yamada I., Matsuo J., Toyoda N., Kirkpatrick A. // Mater. Sci. Eng. R. 2001. V. 34. P. 231–295.  
DOI: 10.1016/S0927-796X(01)00034-1
- [3] Ieshkin A.E., Kireev D.S., Ermakov Yu.A., Trifonov A.S., Presnov D.E., Garshev A.V., Anufriev Yu.V., Prokhorova I.G., Krupenin V.A., Chernysh V.S. // Nucl. Instr. Meth. B. 2018. V. 421. P. 27–31. DOI: 10.1016/j.nimb.2018.02.019
- [4] Коробейщиков Н.Г., Николаев И.В., Роечко М.А. // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. В. 6. С. 30–32.  
DOI: 10.21883/PJTF.2019.06.47496.17646
- [5] Sumie K., Toyoda N., Yamada I. // Nucl. Instr. Meth. B. 2013. V. 307. P. 290–293. DOI: 10.1016/j.nimb.2013.01.087
- [6] Lozano O., Chen Q.Y., Tilakaratne B.P., Seo H.W., Wang X.M., Wadekar P.V., Chinta P.V., Tu L.W., Ho N.J., Wijesundera D., Chu W.K. // AIP Adv. 2013. V. 3. P. 062107.  
DOI: 10.1063/1.4811171
- [7] Tilakaratne B.P., Chen Q.Y., Chu W.K. // Materials. 2017. V. 10. P. 1056. DOI: 10.3390/ma10091056
- [8] Toyoda N., Tilakaratne B., Saleem I., Chu W.-K. // Appl. Phys. Rev. 2019. V. 6. P. 020901. DOI: 10.1063/1.5030500
- [9] Киреев Д.С., Данилов А.В., Иешкин А.Е., Черныш В.С. // Вестн. РГРТУ. 2018. № 66. С. 40–48.  
DOI: 10.21667/1995-4565-2018-66-4-2-40-48
- [10] Popok V.N. // Rev. Adv. Mater. Sci. 2014. V. 38. P. 7–16.
- [11] Seah M.P. // J. Phys. Chem. C. 2013. V. 117. P. 12622–12632.  
DOI: 10.1021/jp402684c
- [12] Kitani H., Toyoda N., Matsuo J., Yamada I. // Nucl. Instr. Meth. B. 1997. V. 121. P. 489–492.  
DOI: 10.1016/S0168-583X(96)00556-3
- [13] Ieshkin A.E., Kireev D.S., Tatarintsev A.A., Chernysh V.S. // Nucl. Instr. Meth. B. 2019. V. 460. P. 165–168.  
DOI: 10.1016/j.nimb.2019.03.054
- [14] Елманов Г.Н., Залужный А.Г., Скрытный В.И., Смирнов Е.А., Яльцев В.Н. Физическое материаловедение. Т. 1. Физика твердого тела. М.: МИФИ. 2007. 636 с.