

КОНГ ТУ ХУИНЬ, А. М. СКВОРЦОВ, А. А. ПЕТРОВ

ФОРМИРОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ СИСТЕМЫ SiO_2/Si ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭКСИМЕРНОГО ЛАЗЕРА

Рассмотрен процесс формирования микро- и наномасштабных периодических структур на поверхности системы SiO_2/Si под действием наносекундных лазерных импульсов. При облучении экспериментальных образцов получены волнообразные периодические структуры на поверхности. Исследована зависимость топологии поверхности системы SiO_2/Si от плотности энергии лазерного импульса.

Ключевые слова: наносекундный лазер, наноструктурирование, периодические структуры, система SiO_2/Si , оптическая микроскопия, зондовая микроскопия.

Введение. В настоящее время технологии обработки материалов ультракороткими лазерными импульсами широко используются для производства и создания сложных двух- и трехмерных микро- и наноструктур в различных материалах. Взаимодействие лазерного излучения с веществом, приводящее к образованию различных видов поверхностных структур, таких как рябь [1], волнистый рельеф [2, 3], микро- и наноструктуры [4, 5], широко представлено для полупроводников [1, 3, 5], металлов [4] и изоляторов [6]. Эти поверхностные структуры, как правило, образуются внутри области лазерного пятна и имеют шаг периодичности от сотен нанометров до нескольких микрометров.

Одной из основных структур, играющих важную роль в микроэлектронике, является тонкая пленка двуокиси кремния, выращенная методом термического окисления кремниевой подложки (система SiO_2/Si). При импульсном лазерном воздействии в условиях незначительного превышения порога абляции материала на его поверхности могут быть сформированы периодические структуры [7—10]. Для модификации поверхности используются Nd:YAG-лазеры [9], эксимерные [11] и импульсные CO_2 -лазеры [12], лазеры на Ti:сапфире [13]. Однако структурирование поверхности системы SiO_2/Si под действием импульсов лазера наносекундной длительности исследовано недостаточно.

В настоящей статье приводятся результаты экспериментов, в которых наблюдалось образование наномасштабных периодических структур на поверхности системы SiO_2/Si при однократном и многократном воздействии пучка излучения наносекундного ArF-лазера с длиной волны 193 нм.

Эксперимент. Схема воздействия на систему SiO_2/Si излучения эксимерного лазера приведена на рис. 1, а, где 1 — лазер; 2 — объектив; 3 — образец; 4 — металлическая подложка; 5 — фокальная плоскость объектива; d — расстояние между фокальной плоскостью объектива и поверхностью образца. В качестве экспериментальных образцов (системы SiO_2/Si) использовались пластины монокристаллического кремния КЭФ-4,5, ориентированные в кристаллографической плоскости (100). На пластинах методом термического окисления

во влажном кислороде был выращен слой SiO_2 толщиной 150 нм. Для обработки образцов использовался импульсный ArF-лазер с длиной волны 193 нм и длительностью импульса 17 нс. Облучение проводилось при плотностях энергии от 0,7 до 2,0 Дж/см². Частота следования импульсов составляла 3 Гц. Излучение лазера было направлено перпендикулярно поверхности, площадь облучаемой области оценивалась по следу, формируемому после одного лазерного импульса, и составляла 1×5 мм². Число импульсов, падающих на поверхность, изменялось в диапазоне от 1 до 10. Модификация поверхности образцов осуществлялась на воздухе при комнатной температуре. Полученные структуры исследовались методами атомно-силовой микроскопии (АСМ). Для АСМ-измерений использовался сканирующий зондовый микроскоп NanoEducator компании NT-MDT [14].

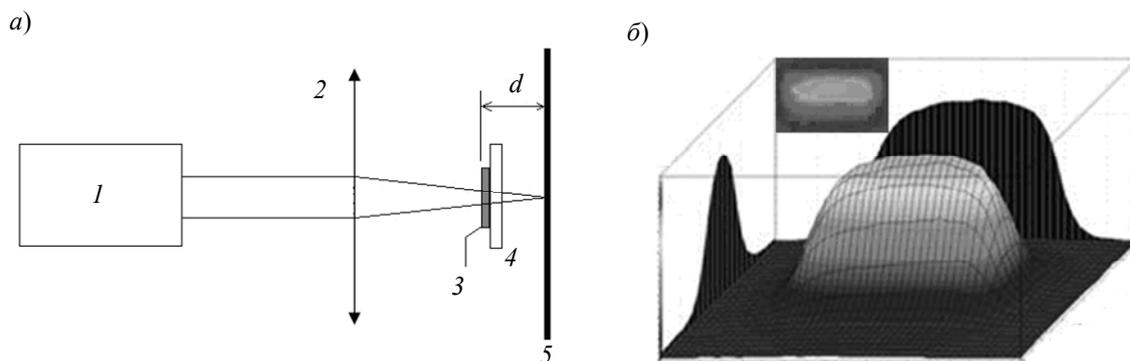


Рис. 1

В процессе облучения распределение мощности в лазерном пучке было существенно неоднородным, так как лазер обладает стандартной прямоугольной в поперечном сечении конфигурацией пучка (рис. 1, б, здесь вставка — фото лазерного пятна на поверхности образца). Как видно из рисунка, вдоль короткой оси распределение гауссово, вдоль длинной — с относительно плоской вершиной и быстрым понижением плотности энергии от вершины к краям. В данной статье показаны результаты АСМ-исследования двух экспериментальных образцов. Для первого образца использовался следующий режим облучения: плотность энергии 0,7 Дж/см², один импульс; для второго образца — плотность энергии 1,32 Дж/см², пять импульсов, частота повторения 3 Гц.

АСМ-исследования проводились в трех различных областях лазерного пятна: на рис. 2 приведена схема расположения областей 1—3 внутри пятна облучения. Плотность энергии понижалась от середины пятна к области 1 и далее — к областям 2 и 3.

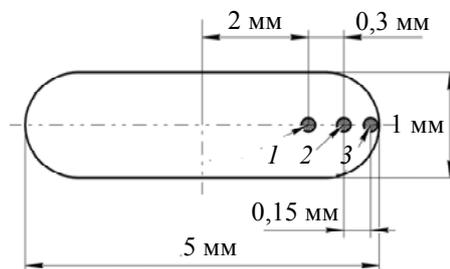


Рис. 2

Анализ результатов исследований. Результаты исследования первого образца (облучение с плотностью мощности 0,7 Дж/см², 1 импульс) приведены на рис. 3. АСМ-анализ поверхности в области 1 показал наличие нанорельефа волнообразной формы с шагом около 40 нм (рис. 3, а). Структуру нанорельефа составляют ряды вертикальных, зауженных кверху колонн высотой 120 нм и диаметром от 30 нм у основания и до 25 нм к вершине (рис. 3, б).

В областях 2 и 3 регулярность топологического рисунка теряется. Для этих областей характерны образования структур в виде „нанопиков“ с большим разбросом размеров по их основанию (от 20 до 100 нм). Следует отметить, что при перемещении кантилевера с области 2 (рис. 3, в, з) на область 3 (рис. 3, д, е) уменьшается плотность „нанопиков“ на единицу площади и уменьшается их средняя высота с 50 до 40 нм.

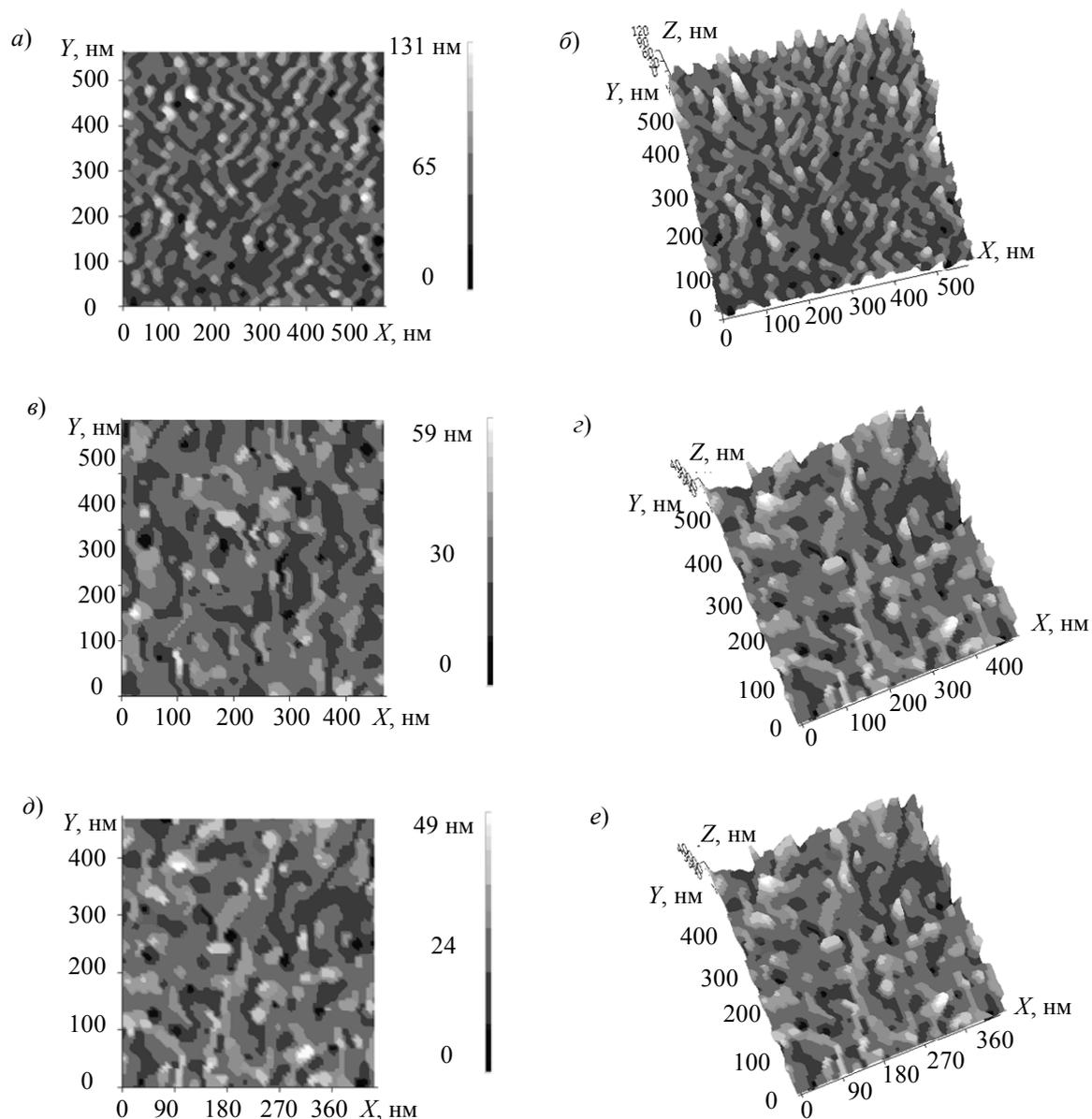


Рис. 3

На рис. 4 приведены результаты исследования второго образца (облучение с плотностью мощности $1,32 \text{ Дж/см}^2$, 5 импульсов, частота следования импульсов 3 Гц). АСМ-анализ поверхности в области 1 показал наличие волнообразных микроструктур, которые имеют шаг периодичности около 3 мкм, высоту 280—300 нм (рис. 4, а, б). Для области 2 характерны образования регулярных периодических структур с шагом около 2 мкм (рис. 4, в, з). Можно отметить, что наряду с уменьшением шага снизилась и высота рельефа до 120—150 нм по сравнению со структурами в области 1. Ближе к внешнему краю пятна облучения (область 3) наблюдаются образования микроструктур в виде „сталагмитов“ (рис. 4, д, е). Размер структур типа „сталагмитов“ неоднороден и колеблется от 0,08 до 2,5 мкм по основанию, а высота рельефа изменяется в пределах 60—90 нм.

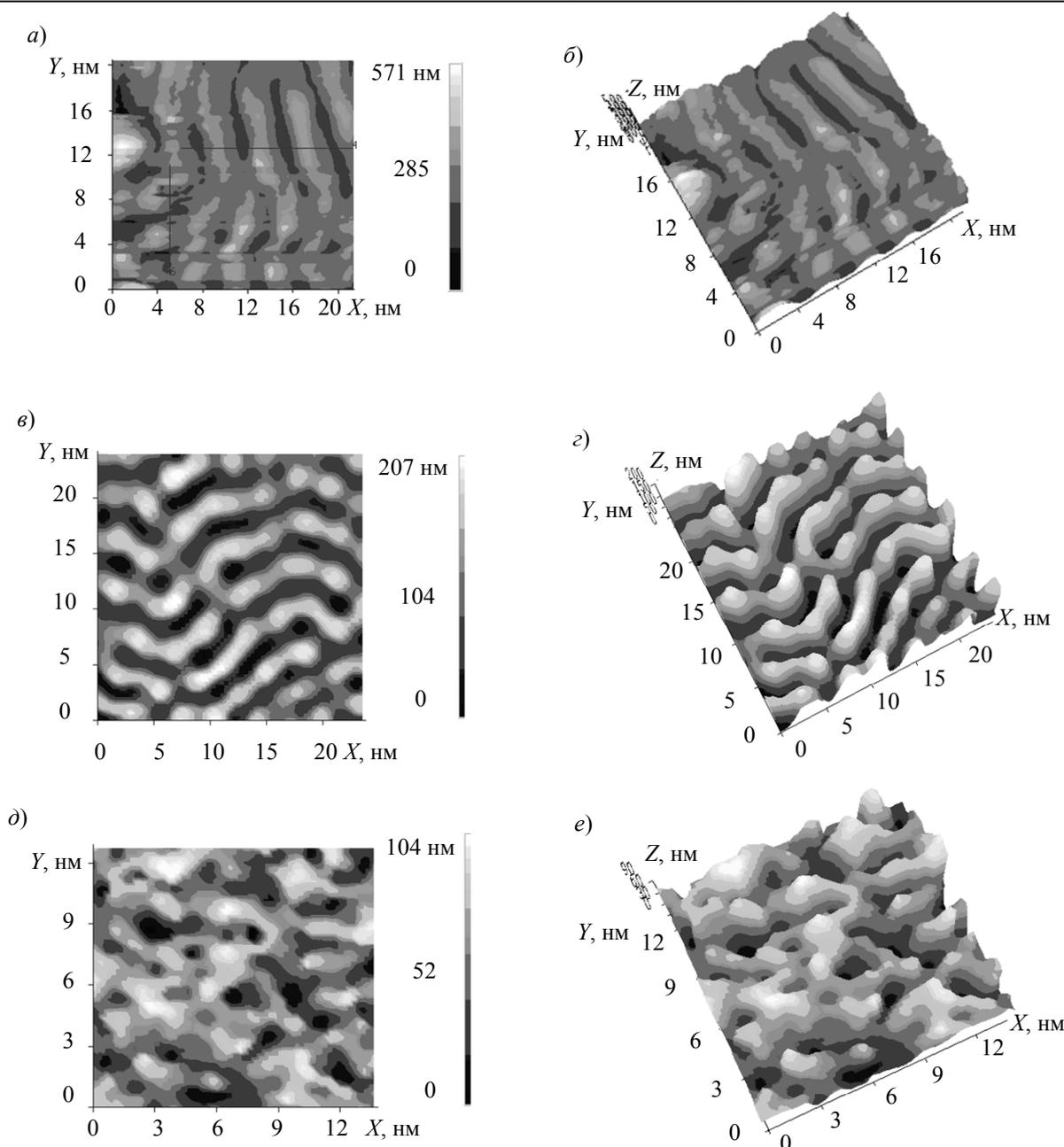


Рис. 4

Заключение. Таким образом, с помощью АСМ исследованы периодические и непериодические наноструктуры на поверхности системы SiO_2/Si , полученные при воздействии АгF-лазерного излучения (193 нм) при числе импульсов $N = 1 \dots 10$. В результате экспериментов получены зависимости топологии микро- и наноструктур от плотности энергии и числа импульсов лазерного излучения. Показано, что, меняя число импульсов и варьируя плотность энергии излучения эксимерного лазера, можно в широких пределах управлять морфологией системы SiO_2/Si .

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 13-02-00033.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Borowiec A., Haugen H. K. Subwavelength ripple formation on the surfaces of compound semiconductors irradiated with femtosecond laser pulses // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 82. P. 4462—4464.

2. Nayak B. K., Gupta M. C. Ultrafast laser-induced selforganized conical micro/nano surface structures and their origin // *Optic. Lasers Eng.* 2010. Vol. 48. P. 966—973.
3. Sava V., Mitran T. L., Socol G., Antohe S. Silicon surface structuring by XeCl excimer laser irradiation in atmospheric conditions // *Digest J. of Nanomaterials and Biostructures.* 2013. Vol. 8, N 1. P. 61—68.
4. Nayak B. K., Gupta M. C., Kolasinski K. W. Formation of nano-textured conical microstructures in titanium metal surface by femtosecond laser irradiation // *Appl. Phys. A.* 2008. Vol. 90. P. 399—402.
5. Головань Л. А., Джунь И. О., Докукина А. Е., Заботнов С. В., Ежов А. А., Кашикаргов П. К., Маслова Н. Е., Остапенко И. О., Панов В. И., Тимошенко В. Ю. АСМ-исследования наночастиц, формирующихся при модифицировании поверхности кремния фемтосекундными лазерными импульсами // *Изв. РАН. Сер. физическая.* 2009. Т. 73, № 1. С. 43—45.
6. Bolle M., Lazare S. Characterization of submicrometer periodic structures produced on polymer surfaces with low fluence ultraviolet laser radiation // *J. Appl. Phys.* 1993. Vol. 73. P. 3516—3524.
7. Ursu I., Mihailescu I. N., Popa Al., Prohorov A. M., Ageev V. P., Gorbunov A. A., Konov V. I. Studies of the change of a metallic surface microrelief as a result of multiple-pulse action of powerful UV laser pulses // *J. Appl. Phys.* 1985. Vol. 58. P. 3909.
8. Воронов В. В., Долгаев С. И., Лаврищев С. В., Лялин А. А., Смакин А. В., Шафеев Г. А. Формирование конических микроструктур при импульсном лазерном испарении твердых тел // *Квантовая электроника.* 2000. Т. 30, № 8. С. 710—714.
9. Nishioka K., Horita S. Periodic arrays of submicron Si and Ni dots on SiO₂ fabricated using linearly polarized Nd:YAG pulsed laser // *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.* 2008. Vol. 91. P. 235—240.
10. Khratova O. D., Khaydukov E. V., Zuev D. A., Rocheva V. V., Novodvorsky O. A., Poroykov A. Yu., Dvorkin V. V., Panchenko V. Ya., Akhmanov A. S. Surface modification of crystalline silicon created by the 532 nm nanosecond Nd:YAG laser pulses // *Proc. of the X Intern. Conf. "Laser and Laser-Information Technologies: Fundamental Problems and Applications"*. Plovdiv, Bulgaria, 2010. P. 75—77.
11. Лапшин К. Э., Обидин А. З., Токарев В. Н., Хомич В. Ю., Шмаков В. А., Ямицков В. А. Прямое лазерное наноструктурирование поверхности алмазных пленок и керамики нитрида кремния наносекундными импульсами излучения F2-лазера // *Рос. нанотехнологии.* 2007. Т. 2, № 11. С. 50—58.
12. Trtica M. S., Gakovic B. M. Pulsed TEA CO₂ laser surface modifications of silicon // *Appl. Surf. Sci.* 2003. Vol. 205, N 1—4. P. 336—342.
13. Jing-Tao Zhu, Yi-Feng Shen, Wen Li, Xiao Chen et al. Effect of polarization on femtosecond laser pulses structuring silicon surface // *Appl. Surf. Sci.* 2006. Vol. 252, N 8. P. 2752—2756.
14. NanoEducator модель СЗМУ-Л5. Руководство пользователя [Электронный ресурс]: <http://phys.unn.ru/docs/spm/NE_R.pdf>.

Сведения об авторах

Конг Ту Хуинь

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем; E-mail: Picochip912@yahoo.com

Альберт Матвеевич Скворцов

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем; E-mail: a-skvortsov@yandex.ru

Андрей Анатольевич Петров

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; E-mail: petrovandrey79@inbox.ru

Рекомендована кафедрой проектирования и безопасности компьютерных систем

Поступила в редакцию 18.04.13 г.