

# МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ Nd:YAG ЛАЗЕРА

Д.А. Зуев<sup>1</sup>, В.В. Рочева<sup>1</sup>, Е.В. Хайдуков<sup>1</sup>, О.Д. Храмова<sup>1</sup>, О.А. Новодворский<sup>1</sup>,  
А.Ю. Поройков<sup>2</sup>, В.В. Дворкин<sup>2</sup>, В.Я. Панченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Учреждение Российской академии наук Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН; <sup>2</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова  
E-mail: [onov@mail.ru](mailto:onov@mail.ru)

Creation of laser-induced morphology features in a different ambient, particularly air and vacuum, by a 532 nm nanosecond Nd:YAG laser on crystalline silicon is reported. There are four types of features laser-induced periodic surface structures (LIPS), micro-pin, micro-pyramids and concentric frozen waves were found.

В настоящее время одним из перспективных направлений в фундаментальной и прикладной науке является изучение модификации поверхности полупроводников, в частности кремния, под действием лазерного излучения. Благодаря своим термодинамическим, физико-химическим и полупроводниковым свойствам, кремний получил широкое применение в микроэлектронике, сенсорной технологии, биомедицине и т.д. Причем интерес к воздействию на кремний лазерного излучения непрерывно растет. В частности, в настоящее время активно изучается возможность использования текстур, получаемых на поверхности полупроводникового материала под действием лазерного излучения, для создания перспективных конструкций солнечных элементов. Для модификации поверхности используются Nd:YAG [1–3], эксимерные [4,5], импульсные CO<sub>2</sub> [6], лазеры на Ti: сапфире [7]. Однако структурирование поверхности кремния под действием импульсов лазера наносекундной длительности исследовано недостаточно. В данной работе приводятся результаты модификации поверхности кремния под действием импульсов наносекундной длительности Nd:YAG лазера на длине волны 532 нм в атмосфере воздуха и в вакууме при разной плотности мощности и дозе облучения.

Для облучения использовались полированные пластины кристаллического кремния (100) марки КЭФ-4,5. Шероховатость облучаемой поверхности предварительно измерялась при помощи атомно-силового микроскопа и составляла не более 2 нм. До облучения лазером образцы промывались в ацетоне и дистиллированной воде в ультразвуковой мойке. Облучение образцов кремния проводилось как в вакуумной камере, откачиваемой с помощью турбомолекулярного насоса до давления 10<sup>-6</sup> Торр, так и на воздухе. В работе использовалась вторая гармоника Nd:YAG лазера с длительностью импульса по полувысоте 10 нс, частота повторения импульсов составляла 10 Гц. Излучение лазера фокусировалось перпендикулярно поверхности образца линзой с фокусным расстоянием 60 см. Образцы кремния облучались при плотности энергии на мишени от 0,5 до 4 Дж/см<sup>2</sup>. Размер

облучаемой области оценивался по следу на мишени после одного лазерного импульса. Измеренный диаметр пятна составил 3 мм. Количество облучающих импульсов изменялось от 10 до 10000. Модифицированная поверхность образцов исследовалась при помощи АСМ, оптической и электронной микроскопии.

Индукцированные лазером изменения поверхности кремния показали зависимость от плотности энергии излучения и количества облучающих импульсов. Были получены и зарегистрированы четыре типа периодических структур: периодические поверхностные структуры (LIPSS), концентрические волны, микропирамиды и микроиглы. Пример модифицированной поверхности представлен на рис. 1.

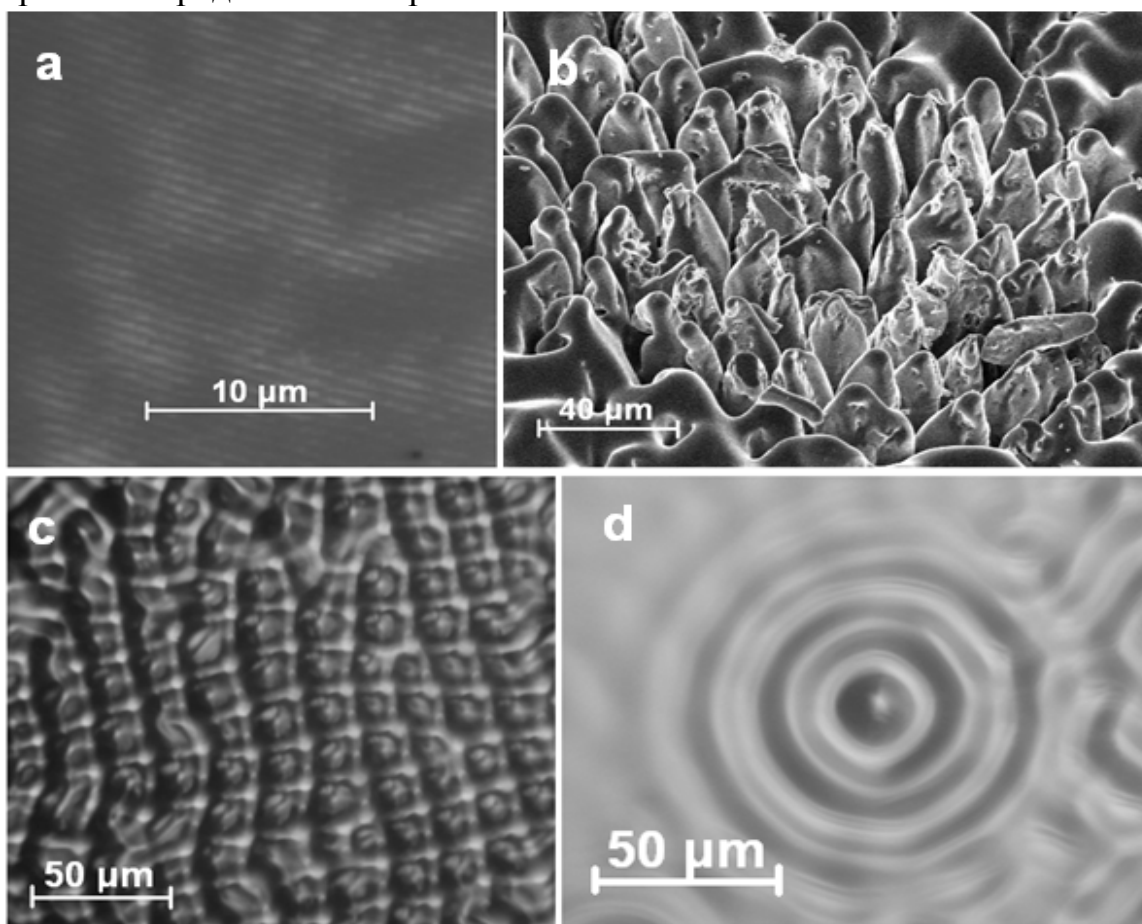


Рис. 1. Четыре типа модифицированной поверхности: а - периодические поверхностные структуры (LIPSS) с шагом 530 нм (0,5 Дж/см<sup>2</sup>, воздух, 3000 импульсов), б - микроиглы (3 Дж/см<sup>2</sup>, вакуум, 10000 импульсов), в - микропирамиды (1 Дж/см<sup>2</sup>, вакуум, 10000 импульсов) и д - концентрические волны (0,7 Дж/см<sup>2</sup>, вакуум, 3000 импульсов).

Прямые параллельные линии на всей облученной области (рис. 1а) с шагом 530 нм и высотой 20 нм были получены при облучении 3000 импульсами на воздухе при плотности энергии 0,5 Дж/см<sup>2</sup>, соответствующей достижению поверхностью температуры плавления. Структура в виде параллельных линий является следствием интерференции между падающей и отраженной от нижней границы расплавленного слоя поверхности образца волнами [8]. Концентрические волны (рис. 1д) зарегистрированы при

облучении образца в вакууме 3000 импульсов при плотности энергии 0,7 Дж/см<sup>2</sup>. Можно предположить, что они являются следствием «заморозки» капиллярных волн расплавленного кремния.

Образование микропирамид (рис. 1с) зависит от соотношения между плотностью энергии и числом импульсов. Получение данных структур возможно как в вакууме, так и в воздухе. В вакууме такая структура была получена под действием 10000 импульсов при плотности энергии 1 Дж/см<sup>2</sup>. Причем, уменьшая число импульсов до 3000 и увеличивая плотность энергии до 3 Дж/см<sup>2</sup>, удается сформировать близкие по форме структуры. Установлено, что при плотности энергии 3 Дж/см<sup>2</sup> микропирамиды предшествуют формированию структуры, представленной на рис. 1b, т.е. при увеличении числа импульсов до 10000 образуются микроиглы.

Таким образом, в данной работе представлено возникновение лазерно-индуцированных особенностей морфологии кристаллического кремния под действием наносекундного Nd:YAG лазера на длине волны 532 nm. Были зарегистрированы четыре типа модификаций поверхности кремния: периодические поверхностные структуры (LIPSS), микроиглы, микропирамиды и концентрические волны. Порог образования периодических структур составил 0,5 Дж/см<sup>2</sup>, верхняя граница 4 Дж/см<sup>2</sup>. Дальнейшее увеличение плотности энергии приводит к формированию кратеров.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (гос. контракт № 02.740.11.0055), РФФИ (грант № 09-08-01053-а) и ведущей научной школы НШ-133.2008.2.

1. V. Craciun, D. Craciun, Appl. Surf. Sci. 138–139 (1999) 218.
2. J.H. Yoo, S.H. Jeong, R. Greif, R.E. Russo, J. Appl. Phys. 88 (2000) 1638.
3. V. Craciun, N. Bassim, R.K. Singh, D. Craciun, J. Hermann, C. Boulmer- Leborgne, Appl. Surf. Sci. 186 (2002) 288.
4. K.L. Choo, Y. Ogawa, G. Kanbargi, V. Otra, L.M. Raff, R. Komanduri, Mater. Sci. Eng. A 372 (2004) 145.
5. D. Klinger, E. Lusakowska, D. Zymierska, Mater. Sci. Semicon. Process. 9 (2006) 323.
6. M.S. Trtica, B.M. Gakovic, Appl. Surf. Sci. 205 (2003) 336.
7. J. Bonse, M. Lenzner, J. Kruger, Recent Res. Devel. Appl. Phys. 5 (2002) 437.
8. A.J. Pedraza, J.D. Fowlkes, Y.F. Guan, Appl. Phys. A 77, 277–284 (2003).