

# Наноструктурирование поверхности аморфного и кристаллического кремния фемтосекундными лазерными импульсами

## Surface nanostructuring of amorphous and crystalline silicon by femtosecond laser pulses

Авторы: Бронников К.А.<sup>1</sup>, Достовалов А.В.<sup>1</sup>, Терентьев В.С.<sup>1</sup>, Корольков В.П.<sup>1</sup>,  
Бабин С.А.<sup>1</sup>; Мицай Е.В.<sup>2</sup>, Непомнящий А.В.<sup>2</sup>, Жижченко А.Ю.<sup>2</sup>,  
Черепакхин А.Б.<sup>2</sup>, Кучмижак А.А.<sup>2</sup>; Мироненко А.Ю.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск (ИАиЭ СО РАН, Новосибирск)

<sup>2</sup>Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИАПУ ДВО РАН)

<sup>3</sup>Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИХ ДВО РАН)

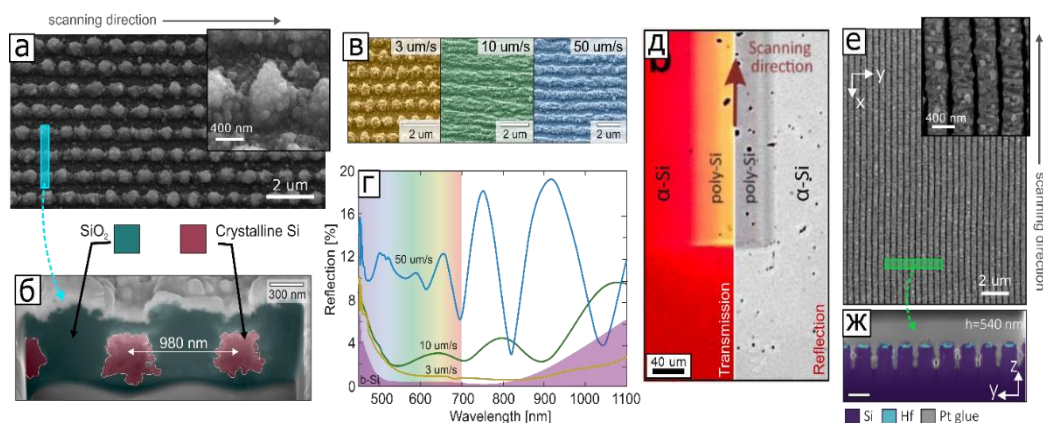
Authors: Bronnikov K.A.<sup>1</sup>, Dostovalov A.V.<sup>1</sup>, Terentyev V.S.<sup>1</sup>, Korolkov V.P.<sup>1</sup>,  
Babin S.A.<sup>1</sup>; Mitsai E.V.<sup>2</sup>, Nepomniaschiy A.V.<sup>2</sup>, Zhizhchenko A.Yu.<sup>2</sup>,  
Cherepakhin A.B.<sup>2</sup>, Kuchmizhak A.A.<sup>2</sup>; Mironenko A.Yu.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Automation and Electrometry, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Novosibirsk (IA&E SB RAS)

<sup>2</sup>Institute of Automation and Control Processes, Russian Academy of Sciences, Far Eastern Branch (IACP FEB RAS)

<sup>3</sup>Institute of Chemistry, Russian Academy of Sciences, Far Eastern Branch (IC FEB RAS)

Продемонстрировано формирование решеток с субволновым периодом на поверхности аморфного (*a*-Si) и кристаллического (*c*-Si) кремния лазерными фс импульсами с длиной волны 1026 нм при латеральном сканировании поверхности образцов. В случае пленок *a*-Si впервые получен новый тип структур – гексагональная решетка конусообразных выступов SiO<sub>2</sub> с периодом ~980 нм, чередующихся с подповерхностными включениями поликристаллической фазы Si (рис. 1, *a–e*), – что позволило существенно изменить оптические свойства пленки (снижение коэффициента отражения с ~50 % до <2 % в видимом диапазоне (рис. 1, *z*) [1]. Впервые продемонстрировано применение лазерно-индуцированных структур для повышения чувствительности метода флуоресцентной спектроскопии на два порядка по сравнению со стандартными подходами измерения концентрации аналита. Достигнут режим лазерно-индуцированной кристаллизации пленки *a*-Si без изменения исходной морфологии поверхности при скорости сканирования 1 мм/с (рис. 1, *d*) [2, 3]. Для *c*-Si разработана методика создания массива углублений с периодом 450±5 нм и аспектным соотношением, равным 8, путем использования покрывающей пленки гафния толщиной 20 нм, обеспечивающей эффективное возбуждение поверхностных плазмонов (рис. 1, *e, ж*) [4].



**Рис. 1:** *a* – микрофотографии гексагональной решетки микроконусов, записанной на пленке *a*-Si толщиной 370 нм, и *б* – поперечного среза данной структуры; *в* – микрофотографии структур, записанных на пленке *a*-Si при различных скоростях сканирования, *г* – спектры отражения соответствующих структур; *д* – оптические снимки в проходящем и отраженном свете области лазерно-индуцированного поликристаллического кремния; *е* – микрофотографии решетки, записанной на пластине *c*-Si, покрытой 20 нм слоем Hf и *ж* – поперечного среза данной решетки

**Fig. 1:** (a) Scanning electron microscopy (SEM) images of the hexagonal lattice of microcones fabricated on the *a*-Si film with a thickness of 370 nm, and (b) cross-sectional cut of this structure; (c) SEM image of structures formed on the *a*-Si film at different scanning rates, (d) reflection spectra of the corresponding structures; (e) optical images in transmission and reflection modes of laser-induced polycrystalline silicon; (f) SEM images of the grating fabricated on the *c*-Si wafer covered by a 20-nm thick Hf layer and (g) cross-sectional cut of this structure

The formation of gratings with a subwavelength period on the surface of amorphous (*a*-Si) and crystalline (*c*-Si) silicon by fs laser pulses with a wavelength of 1026 nm during lateral scanning of the sample surface was demonstrated. In the case of *a*-Si films, a new type of structures was obtained for the first time – a hexagonal lattice of SiO<sub>2</sub> cone-shaped protrusions with a period of ~980 nm alternating with subsurface inclusions of the polycrystalline Si phase (Fig. 1, *a-c*), which allowed the optical properties of the film to be significantly changed (reduction of the reflection coefficient from ~50 % to <2 % in the visible range (Fig. 1, *d*) [1]. For the first time, the use of laser-induced structures for increasing the sensitivity of the fluorescence spectroscopy method by two orders of magnitude, compared to standard approaches to measuring the analyte concentration, was demonstrated. The regime of laser-induced crystallization of the *a*-Si film was achieved without changing the initial surface morphology at a scanning speed of 1 mm/s (Fig. 1, *e*) [2, 3]. For *c*-Si, a technique was developed for creating an array of trenches with a period of 450±5 nm and an aspect ratio of 8 by using a hafnium coating film with a thickness of 20 nm, which ensures effective excitation of surface plasmons (Fig. 1, *f, g*) [4].

## Публикации/References:

1. Dostovalov A., Bronnikov K., Korolkov V., Babin S., Mitsai E., Mironenko A., Tutov M., Zhang D., Sugioka K., Maksimovic J., Katkus T., Juodkasis S., Zhizhchenko A., and Kuchmizhak A. Hierarchical anti-reflective laser-induced periodic surface structures (LIPSSs) on amorphous Si films for sensing applications // *Nanoscale*. – 2020. – Vol. 12, is. 25. – P. 13431–13441. – DOI 10.1039/D0NR02182B.
2. Bronnikov K.A., Dostovalov A.V., Cherepakhin A., Mitsai E., Nepomniaschiy A., Kulinich S.A., Zhizhchenko A., Kuchmizhak A. Large-scale and localized laser crystallization of optically thick amorphous silicon films by near-IR femtosecond pulses // *Materials*. – 2020. – Vol. 13, is. 22. – P. 5296 (P. 1–10). – DOI 10.3390/ma13225296.
3. Mitsai E., Dostovalov A.V., Bronnikov K.A., Nepomniaschiy A.V., Zhizhchenko A.Yu., Kuchmizhak A. Crystallization of optically thick amorphous silicon films by near-Ir femtosecond laser processing // *Solid state phenomena*. – 2020. – Vol. 312. – P. 134–139 – DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.312.134.
4. Bronnikov K.A., Dostovalov A.V., Terentyev V.S., Babin S.A., Kozlov A., Pustovalov E., Gurevich E.L., Zhizhchenko A., Kuchmizhak A. Uniform subwavelength high-aspect ratio nanogratings on metal-protected bulk silicon produced by laser-induced periodic surface structuring // *Applied physics letters*. – 2021. – Vol. 119, is. 21. – P. 211106 (7 p.). – DOI 10.1063/5.0075045.