



Исследование спектра поглощения поверхностно-модифицированного кремния в диапазоне длин волн от 2,5 до 25 мкм

Д. В. Горелов¹, Н. М. Сомов¹, И. В. Потапенко¹,
Д. В. Новиков^{1,2}, В. В. Амеличев¹

¹ ФГБНУ НПК «Технологический центр», г. Зеленоград,
Москва, Россия

² Национальный исследовательский университет
«МИЭТ», г. Зеленоград, Москва, Россия

Представлены результаты отработки технологии формирования модифицированных поглощающих поверхностей кремния, позволяющей улучшить спектральные характеристики приборов, создаваемых на его основе: устройств радиационного охлаждения, источников и датчиков ИК-излучения.

Ключевые слова: модификация поверхности кремния, плазмохимическое травление, оптическое поглощение, ИК-диапазон

Статья поступила: 18.09.2024

Статья принята: 04.10.2024

Поверхностно-модифицированный кремний представляет собой микроострийную структуру, одним из способов получения которой является глубокое анизотропное травление [1]. Благодаря такой морфологии поверхности достигается непрерывное изменение показателя преломления, что эффективно повышает поглощение оптического излучения [2]. Полученный поверхностно-модифицированный кремний с высотой микроострий $h \approx 10$ мкм показал высокую поглощательную способность поверхности выше 90% в диапазоне длин волн от 2,5 до 23 мкм. Оптические свойства микроструктурированного кремния позволяют использовать его в фотовольтаике, при создании

Study of the Absorption Spectrum of Surface-Modified Silicon within the Wavelength Range from 2.5 to 25 μm

D. V. Gorelov¹, N. M. Somov¹, I. V. Potapenko¹, D. V. Novikov^{1,2},
V. V. Amelichev¹

¹ Federal State Budgetary Research Institution Scientific-Manufacturing Complex “Technological Center”, Zelenograd, Moscow, Russia

² National Research University of Electronic Technology “MIET”, Zelenograd, Moscow, Russia

The optimization results of the generation technology for the modified absorption silicon surfaces are provided that allows to improve the spectral characteristics of devices obtained on its basis: radiation cooling devices, IR sources and sensors.

Key words: silicon surface modification, plasma-chemical etching, optical absorption, IR range

Article received: 18.09.2024

Article accepted: 04.10.2024

The surface-modified silicon is a micro-point structure. One of its generation methods is deep anisotropic etching [1]. Due to this surface morphology, a continuous change in the refraction index is achieved that efficiently increases the absorption of optical radiation [2]. The obtained surface-modified silicon with a micro-point height of $h \approx 10$ μm demonstrated a high surface absorption capacity of over 90% within the wavelength range from 2.5 to 23 μm . The optical properties of microstructurized silicon allow it to be used in photovoltaics, in the development of biosensors, light-emitting devices, gas-sensitive detectors and antibacterial coatings [3–5].

To obtain the surface-modified silicon, the silicon plasma-chemical etching (PCE) process in $\text{SF}_6/\text{C}_4\text{F}_8$ plasma (Bosch process) through the photoresist mask and SiO_2 with the dimensions of etching

Таблица. Режим травления кремния по Bosch-процессу**Table.** Silicon etching mode according to the Bosch process

Этап Stage	SF ₆ , sccm	O ₂ , sccm	C ₄ F ₈ , sccm	Ar, sccm	Давление, Па Pressure, Pa	ICP ¹ , Вт	RF ² , Вт	Время, с Time, s	Кол-во циклов Number of cycles, pcs.
I/II/III	30/250/0	30/20/0	0/0/160	70/10/0	9/7/4	800/800/800	50/5/1	1/6/3	100

¹ ICP – inductively coupled plasma (индуктивно-связанная плазма).

² RF – radio frequency power (радиочастотная мощность).

биосенсоров, светоизлучающих устройств, газочувствительных детекторов и антибактериальных покрытий [3–5].

Для получения поверхностно-модифицированного кремния использовался техпроцесс плазмохимического травления (ПХТ) кремния в плазме SF₆/C₄F₈ (Bosch-процесс) через маску из фоторезиста и SiO₂ с размерами областей травления 10×10 мм² и 15×15 мм². Травление осуществлялось на установке Sentech SI 500. Параметры режима травления кремния по Bosch-процессу приведены в таблице.

В качестве пластин использовались стандартные подложки монокристаллического кремния марки КЭФ-4,5 (100) с односторонней полировкой. Полученная морфология поверхности кремния, исследованная с использованием растровой электронной микроскопии (РЭМ), показана на рис. 1.

ПХТ кремния по Bosch-процессу имеет циклический характер и проходит в три этапа: этап ионного травления (зачистки) полимера на дне структуры, этап основной стадии травления и этап осаждения полимера. Для формирования поверхностно-модифицированного слоя кремния необходимо

area of 10×10 mm and 15×15 mm was used. The etching process was performed using a Sentech SI 500 unit. The parameters of the silicon etching mode according to the Bosch process are given in the table.

The standard substrates of single-crystalline silicon of the KEF-4.5 (100) brand with one-side polishing were used as the plates. The obtained silicon surface morphology studied using the scanning electron microscopy (SEM), is shown in Fig. 1.

The silicon PCE according to the Bosch process is cyclical and consists of three stages: the stage of polymer ion-beam etching (cleaning) at the bottom of the structure, the stage of the main etching, and the stage of polymer deposition. Thus, to generate a surface-modified silicon layer, it is necessary to strike a balance between the stages of etching and polymer deposition, so that the polymer deposition does not interfere with etching, while forming a lot of silicon micro-points. The etching/deposition ratio was regulated by the stage duration. The height of the silicon micro-points was regulated by the number of etching/deposition cycles.

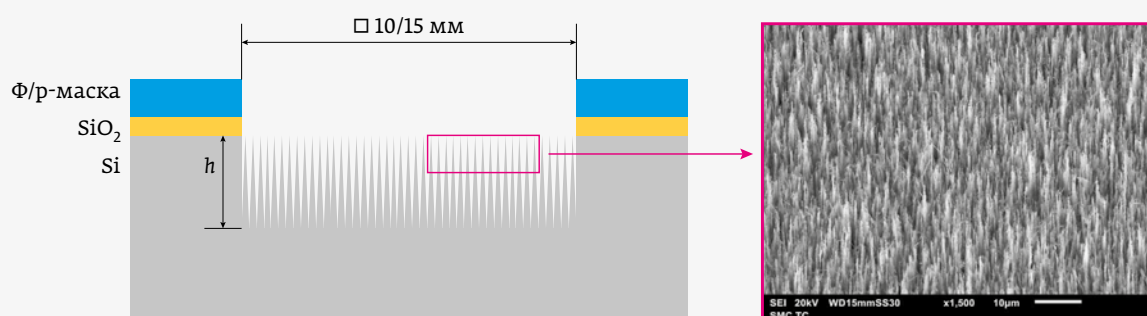


Рис. 1. Эскиз структуры и РЭМ-снимок морфологии поверхностно-модифицированного кремния, полученного методом ПХТ (Bosch-процесс)

Fig. 1. Sketch of the structure and SEM image of the surface-modified silicon morphology obtained by the PCE method (Bosch process)

соблюдения баланса между этапами травления и осаждения полимера, таким образом, чтобы высадка полимера не препятствовала травлению, при этом образуя множество микроострий кремния. Соотношение травление/осаждение регулировалось длительностью этапов. Высота микроострий кремния регулировалась количеством циклов травления/осаждения.

Исследование оптических свойств поверхностно-модифицированного кремния осуществлялось методом ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье на спектрометре ФСМ 2201/2202 в диапазоне длин волн от 2,5 до 25 мкм. Сравнение спектров поглощения до и после ПХТ кремния по Bosch-процессу приведено на рис. 2.

Из полученных зависимостей видно, что поглощение поверхностно-модифицированного кремния составляет более 90% в диапазоне от 2,5 до 23 мкм. Проведенный режим травления кремния может быть использован для получения поверхностно-модифицированного кремния с повышенной поглощательной способностью в более широком спектральном диапазоне [6]. Формирование поглощающих поверхностей позволит улучшить спектральные характеристики устройств радиационного охлаждения, источников и датчиков ИК-излучения.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения НИР FNRМ-2022-0009.

REFERENCES

1. **Nguyen V. T. H. et al.** On the formation of black silicon in SF_6 - O_2 plasma: The clear, oxidize, remove, and etch (CORE) sequence and black silicon on demand. *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 2020; 38(4).
2. **Atteia F. et al.** Morphologies and optical properties of black silicon by room temperature reactive ion etching. *Materials Research Bulletin*. 2020; 131: 110973.
3. **Chai J. Y. H., Wong B. T., Juodkazis S.** Black-silicon-assisted photovoltaic cells for better conversion efficiencies: a review on recent research and development efforts. *Materials Today Energy*. 2020; 18: 100539.
4. **Tan Q. et al.** Nano-fabrication methods and novel applications of black silicon. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019; 295: 560–573.
5. **Liu W. et al.** CMOS MEMS infrared source based on black silicon. 2016 IEEE 11th Annual International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS). IEEE. 2016: 200–204.
6. **Sarkar S. et al.** Black silicon revisited as an ultrabroadband perfect infrared absorber over 20 μm wavelength range. *Advanced Photonics Research*. 2023; 4.(2):2200223.

АВТОРЫ

Д. В. Горелов. ORCID: 0000-0002-0887-9406
Н. М. Сомов. ORCID: 0009-0009-9093-3018
И. В. Потепенко. ORCID: 0009-0007-4500-1022
Д. В. Новиков. ORCID: 0000-0002-9518-1208
В. В. Амеличев. ORCID: 0000-0002-4204-2626

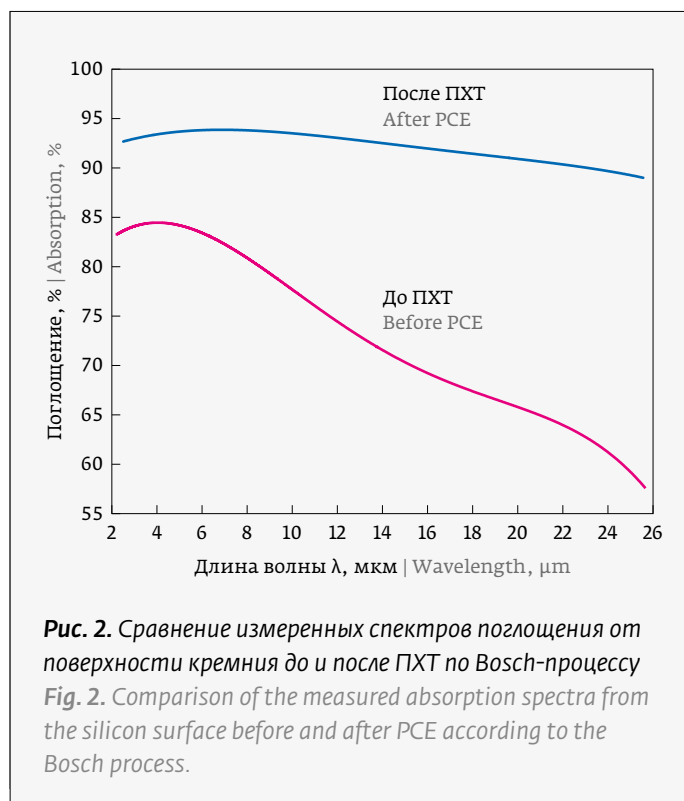


Рис. 2. Сравнение измеренных спектров поглощения от поверхности кремния до и после ПХТ по Bosch-процессу
Fig. 2. Comparison of the measured absorption spectra from the silicon surface before and after PCE according to the Bosch process.

The optical properties of surface-modified silicon are studied using the IR spectroscopy with a Fourier transformation on an FSM 2201/2202 spectrometer within the wavelength range from 2.5 to 25 μm . A comparison of the absorption spectra before and after silicon PCE according to the Bosch process is shown in Fig. 2.

The obtained dependences demonstrate that the absorption of surface-modified silicon is more than 90% within the range from 2.5 to 23 μm . The completed silicon etching mode can be used to obtain the surface-modified silicon with the increased absorption capacity in a wider spectral range [6]. The generation of absorption surfaces will improve spectral characteristics of the radiation cooling devices, IR sources and sensors.

ACKNOWLEDGEMENT

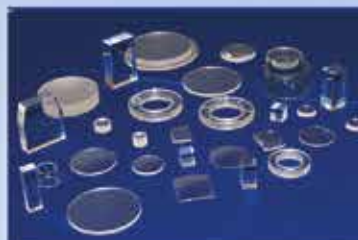
This article was prepared with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as a part of the implementation of research project FNRМ-2022-0009.

AUTHORS

D. V. Gorelov. ORCID: 0000-0002-0887-9406
N. M. Somov. ORCID: 0009-0009-9093-3018
I. V. Potapenko. ORCID: 0009-0007-4500-1022
D. V. Novikov. ORCID: 0000-0002-9518-1208
V. V. Amelichev. ORCID: 0000-0002-4204-2626

Синтетический САПФИР

Производство кристаллов и оборудования



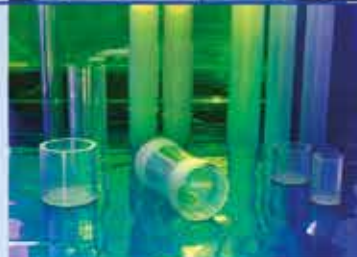
Пластины, окна, подложки:

смотровые, защитные, сканерные окна, часовые стекла, экраны для смартфонов и мобильных телефонов, оптические компоненты



Трубы и тигли

трубки и тигли различной длины и сечения для ламп высокого давления, термореакторов, химических установок, крекинга нефти, чехлы для W-WRe термопар



Стержни круглого и прямоугольного сечения:

световоды для пирометров, плунжеры для хроматографических насосов и сиквенаторов, электрические изоляторы



Изделия

по индивидуальному заказу:

термореакторы, подшипники, компоненты для научной и медицинской техники, брекеты, сувенирная и рекламная продукция



Оборудование для выращивания кристаллов:

Методом Киропулоса. Nika-M60
Методом Степанова (EFG). Nika-PROFILE
Методом Чохральского. Nika-3



ЗАО «РОСТОКС-Н»

Since 1993

142432 Россия, Московская обл., г. Черноголовка, Проспект Академика Семенова, д. 9, ЗАО «Ростокс-Н»

Тел.: +7 496 527 35 91, +7 496 527 35 96, +7 496 527 35 95 • Факс: +7 496 52 7 36 03

E-mail: rostox-n@yandex.ru, info@rostox-n.ru • <http://www.rostox-n.ru>