

РАДИОФИЗИКА

УДК 537.86

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).76-94

ГРНТИ 29.35.19

Специальность ВАК 1.3.4

Научная статья

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИКАЦИИ КАРБИДА КРЕМНИЯ МЕТОДАМИ ЛУЧЕВОЙ ЭРОЗИИ В УСЛОВИЯХ ФАЗОВОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ: ОБЗОР

Евстигнеев Д. А., Корнышев Н. П.

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

Аннотация. В рамках исследования выполнен обзор существующих технологий модификации карбида кремния для последующего применения при создании устройств в радиотехнике, телекоммуникационном оборудовании. Приведены основные преимущества карбида кремния ввиду его свойств, новые методы его обработки с учетом влияния фазового состава атмосферы, приведена физико-математическая модель лазерной размерной модификации кристаллов карбида кремния, приведена новая методика проведения процесса регенерации эрозионных следов лучевой природы в кристаллах карбида кремния в жидкой среде, а также разработаны практические рекомендации по реализации метода лазерной размерной модификации кристаллов карбида, отличающиеся структурно-техническими решениями в рамках автоматизированной технологии создания меза-планарного дизайна с элементами ограничения кондуктивных связей микросистем, основанными на реализации лучевой эрозии в газовой и жидкой среде, а также управляемого процесса регенерации эрозионных следов.

Ключевые слова: *карбид кремния, лучевая эрозия, фазовый состав атмосферы, эрозионные следы, меза-планарный дизайн*

Для цитирования: Евстигнеев Д. А., Корнышев Н. П. Исследование модификации карбида кремния методами лучевой эрозии в условиях фазового состава атмосферы: обзор // Вестник НовГУ. 2024. 1(135). 76-94. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).76-94

Research Article

STUDY OF THE SILICON CARBIDE MODIFICATION BY RADIATION EROSION METHODS IN THE CONTEXT OF THE ATMOSPHERE PHASE COMPOSITION: A REVIEW

Evstigneev D. A., Kornyshev N. P.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract. As part of the study, a review of existing technologies for modifying silicon carbide for subsequent use when creating devices in radio engineering and telecommunications equipment was carried out. The main advantages of silicon carbide due to its properties, new methods of its processing taking the influence of the atmosphere phase composition into account are given, a physical and mathematical model of laser dimensional modification of silicon carbide crystals is given, a new technique for carrying out the regeneration process of erosion traces of radiation nature in silicon carbide crystals in a liquid medium is given, and also practical recommendations have been developed for the implementation of the method of laser dimensional modification of carbide crystals, distinguished by structural and technical solutions within the framework of automated technology for creating a mesa-planar design with elements of limiting the conductive connections of microsystems, based on the radiation erosion implementation in a gas and liquid environment, as well as a controlled regeneration process of erosion traces.

Keywords: *silicon carbide, radiation erosion, atmosphere phase composition, erosion traces, mesa-planar design*

For citation: Evstigneev D. A., Kornyshev N. P. Study of the silicon carbide modification by radiation erosion methods in the context of the atmosphere phase composition: a review // Vestnik NovSU. 2024. 1(135). 76-94. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).76-94

Введение

Как известно, эффективная и устойчивая работа радиоэлектронных устройств, работающих в экстремальных условиях эксплуатации (повышенные температуры, наличие радиации, воздействие химически агрессивных сред и др.) существенно зависит от быстродействия, энергосбережения и надежности используемой элементной базы в качестве основы для приборов радиоэлектроники. Без учета этих требований востребованность приборов на традиционной элементной базе может оказаться на низком уровне [1].

Одним из наиболее перспективных материалов, представляющий как научный, так и практический интерес для радиофизики является карбид кремния (SiC), в связи с его уникальными диэлектрическими, полупроводниковыми и механическими свойствами, такими как: большая ширина запрещенной зоны, радиационная стойкость, высокая термическая стабильность, химическая стойкость, явление политипизма, карбид кремния нашел применение в силовой электронике, оптических системах, в СВЧ технике, в микроэлектронике и микросенсорах в том числе, используемых в экстремальных условиях эксплуатации. Он широко используется в радиочастотной электронике, микроэлектромеханических системах (MEMS) и мощных полупроводниковых приборах. Модификация кристаллической структуры SiC методами лучевой эрозии в различных средах является важной техникой, позволяющей управлять его свойствами с точностью на наномасштабе [2].

Несмотря на обширные исследования в этой области, остаются вопросы о влиянии различных параметров процесса лучевой эрозии на свойства SiC и его применения в радиофизике. Проведение систематических исследований по модификации SiC в различных средах при помощи лучевой эрозии имеет важное значение для дальнейшего развития радиочастотной электроники и полупроводниковых приборов.

Стоит отметить, что модификация кристаллов карбида кремния достаточно сложный и трудоемкий процесс. Высокая стоимость исходного материала, большое количество отходов, плохая воспроизводимость, все это влияет на конечную стоимость продукции на основе карбида кремния. В качестве предлагаемых методов размерной обработки кристаллов карбида кремния значительный интерес представляют эрозионные методы. Лучевая эрозия имеет ряд преимуществ перед электрической, в частности управляемость процесса и независимость от наличия окружающей среды [3].

Последние исследования в области обработки кристаллов карбида кремния методом лучевой эрозии показывают эффективность создания локальных морфологических и структурных модификаций, в том числе возможность удаления нанослоев и наноструктурирования поверхности [4]. Ввиду малоизученности и недостаточной освещенности вопросов влияния процессов модификации кристаллов карбида кремния лучевой эрозией, в том числе возможность создания сложных микро и нанорельефов, формирования мезапланарного дизайна, а также влияние различных сред при модификации кристаллов возникает потребность в исследовании, нацеленном на адаптацию современных методов микро- и наноразмерной обработки кристаллов карбида кремния с повышением качества получаемых образцов или изделий.

Аналитическая тепловая модель лучевой эрозии карбида кремния

Найдем функцию распределения температуры по поверхности тонкой пластины, обладающей удельной теплоемкостью c и теплопроводностью λ в момент времени $t = t_p$, если коэффициент отражения от ее поверхности составляет $R = 0,9$, а пятно падающего на поверхность материала излучения с постоянной плотностью мощности q имеет форму круга с диаметром D [5].

Будем считать, что пластина настолько велика, что тепловой поток от источника теплоты за время $t = t_p$, не достигает ее краев. В этом случае область исследования может быть выбрана произвольной формы.

Рассмотрим простейший случай, когда теплоемкость и теплопроводность можно принять постоянными и независимыми от температуры:

$$\lambda(T) = \lambda, c(T) = c \text{ и } t_p \ll T_f \quad (1)$$

где T_f – температура начала фазовых превращений в металле. В этом случае поверхностной теплоотдачей можно пренебречь. Тогда с учетом этих допущений дифференциальное уравнение теплопроводности можно представить в линейном виде:

$$c\gamma \frac{dT}{dt} = \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + \lambda \frac{d^2 T}{dy^2} + Q, \quad (2)$$

Рассмотрим решение краевой задачи с краевыми условиями первого рода: $T(x,y,t=0) = T_{i0}$. Для упрощения расчетов область определения искомой непрерывной функции $T(x, y)$ выбирают прямоугольной. Для решения задачи используют равномерную по направлениям осей x и y сетка с шагами h_x и h_y соответственно [5].

Пусть размеры пятна падающего на поверхность металла излучения таковы, что $D < h_x$, $D < h_y$, и оно целиком лежит внутри ячейки с номером i^* , j^* (рисунок 1) [5].

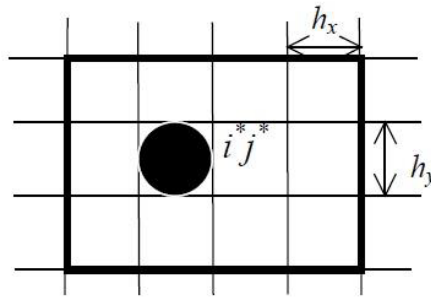


Рисунок 1. Расположение пятна излучения в исследуемой области [6]

Для произвольного внутреннего узла (x, y) вторые производные по координатам аппроксимируются с помощью пятиточечного шаблона:

$$\begin{cases} \frac{d^2 T}{dx^2} |_{t=\tau} \approx \frac{1}{h_x} \left[\frac{T(x+h_x, y) - T(x, y)}{h_x} - \frac{T(x, y) - T(x-h_x, y)}{h_x} \right] |_{t=\tau} = \\ \quad = \frac{T_{i+1,j}^\tau - 2T_{ij}^\tau - T_{i-1,j}^\tau}{h_x^2}, \\ \frac{d^2 T}{dy^2} |_{t=\tau} \approx \frac{1}{h_y} \left[\frac{T(x+h_x, y) - T(x, y)}{h_y} - \frac{T(x, y) - T(x-h_x, y)}{h_y} \right] |_{t=\tau} = \\ \quad = \frac{T_{i,j+1}^\tau - 2T_{ij}^\tau - T_{i,j-1}^\tau}{h_y^2} \end{cases}$$

Для аппроксимации производной по времени воспользуемся формулой:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_{ij}^{\tau+\Delta\tau} - T_{ij}^\tau}{\Delta\tau} \quad (3)$$

В этом случае исходное уравнение для произвольного узла ij и момента времени $t = \tau$ примет вид:

$$c_\gamma \gamma \frac{T_{ij}^{\tau+\Delta\tau} - T_{ij}^\tau}{\Delta\tau} = \lambda \left[\frac{T_{i+1,j}^\tau - 2T_{ij}^\tau - T_{i-1,j}^\tau}{h_x^2} + \frac{T_{i,j+1}^\tau - 2T_{ij}^\tau - T_{i,j-1}^\tau}{h_y^2} \right] + q_{ij}^\tau,$$

$$\text{Где } q_{ij}^\tau = \begin{cases} \frac{(1-R)\rho\Delta\tau\pi D^2}{4}, & \text{при } i, j = i^*, j^*, \\ 0 & \text{при } i, j \neq i^*, j^*. \end{cases}$$

Данное уравнение можно представить в виде:

$$\begin{aligned} T_{ij}^{\tau+\Delta\tau} = T_{ij}^\tau + \frac{\lambda\Delta\tau}{c_\gamma\gamma} \left[\frac{T_{i+1,j}^\tau - 2T_{ij}^\tau - T_{i-1,j}^\tau}{h_x^2} + \frac{T_{i,j+1}^\tau - 2T_{ij}^\tau - T_{i,j-1}^\tau}{h_y^2} \right] \\ + \frac{\Delta\tau}{c_\gamma\gamma} q_{ij}^\tau. \end{aligned}$$

Прямолинейные границы области позволяют точно аппроксимировать краевые условия:

$$T_{ij}^{\text{rp}} = T_{ij}^0 \quad (4)$$

В случае, если заданы лишь начальные условия, для решения полученной системы уравнений потребуется доопределить значения температур. В простейшем случае можно воспользоваться формулами нелинейной интерполяции. Иногда при больших градиентах температуры вместо уменьшения шага h приходится использовать формулы интерполирования более высоких порядков. Система (3), граничные условия (4) содержат все необходимое для решения поставленной задачи. Найдем зависимость изменения температуры от времени в точке на поверхности подложки карбида кремния, удаленной на расстояние $R = 24$ мм от точки действия непрерывного источника постоянной интенсивности ($q = \text{const}$).

Расчет проводится для карбида кремния со следующими параметрами:

- коэффициент теплопроводности $\lambda = 4,8$ Вт/(см*К);
- объемная теплоемкость $C_V = 27,25$ Дж/(см³ · град);
- коэффициент температуропроводности $a = 0,1934$ см²/с.

Для ведения расчета численным методом выберем шаг квантования по времени $\tau = 4$ нс, а шаги дискретизации по пространству: $h_x = h_y = 20$ мкм.

Процесс изменения температуры в точке, удаленной от точечного источника интенсивности q на расстояние R можно описать следующим аналитическим выражением:

$$T(R, t) = \frac{q}{2\pi\lambda R} \left[1 - \Phi \left(\frac{R}{\sqrt{4at}} \right) \right] \quad (5)$$

где Φ – функция интеграла вероятности [5].

Примем $q = 0,1$ мДж. Полученные аналитические значения температуры приведены в таблице 1.

Таблица 1. Расчетные данные при расчете температурных полей

t, с	1	2	3	4	5
T, С	2438	2511	2547	2572	2593

Обзор существующих методов модификации карбида кремния

Физико-технологические основы модификации кристаллов карбида кремния.

Проведены экспериментальные исследования физических свойств дискретных эрозионных следов в кристаллах карбида кремния. Приведена методика исследования лазерной стойкости карбида кремния через газовую среду.

Воздействие на образцы из карбида кремния осуществляли в импульсно-периодическом режиме на технологической установке LPKF ProtoLaserU3

оснащенной: ИАГ- лазером с длиной волны излучения 355нм. Основные технические характеристики установки LPKF ProtoLaserU3 указаны в таблице 2 [6-7].

Таблица 2. Технические характеристики установки LPKF ProtoLaserU3

Мощность лазера	6Вт
Диаметр луча в фокусе	15μм
Разрешение в поле сканирования	2 μм ± 0,08мкм
Воспроизводимость	±2 μм ± 0,08мкм
Частота лазерных импульсов	25-200кГц

Проведены исследования пороговых значений плотности энергии лазерного излучения производились экспериментально на установке LPKF ProtoLaserU3 на монокристаллах карбида кремния с естественными (ростовыми) гранями (0001) политипов 6Н, 15R. Модификация осуществлялась точечным излучением с частотой 100кГц мощность и скорость реза подбирались экспериментально. Топологический рисунок на поверхности кристалла представлял собой несколько трасс, прорезанных по кристаллографическим направлениям $[11\bar{2}0]$ и $[\bar{1}0\bar{1}0]$ горизонтально и под углом 45°.

Экспериментально разработан метод модификации кристаллов карбида кремния позволяющий в рамках имеющихся технологий создавать эрозионные следы различных конфигураций.

Подавляющее большинство лазерных технологий, используемых в приборостроении, основано на быстром нагреве обрабатываемого материала сфокусированным излучением до высоких температур и его дальнейшем плавлении или испарении. Несмотря на локальность воздействия, при обработке хрупких материалов это зачастую влечет за собой реструктуризацию обрабатываемого материала и возникновение в окрестностях зоны обработки оплавленных участков или микротрещин. При переходе к более коротким импульсам излучения (10–8—10–14 с) и сверхвысокой интенсивности (10¹⁰–10¹⁴ Вт/см²) физическая картина взаимодействия излучения с обрабатываемым материалом значительно изменяется. Влияние температуры перестает быть определяющим, и основную роль в механизме разрушения вещества начинают играть процессы непосредственного перехода энергии из возбужденных состояний. В основе взаимодействия излучения с веществом лежит механизм так называемого кулоновского взрыва, сопровождающегося образованием поверхностного облака плазмы.

В работе [1] керамика карбида кремния (SiC) полировалась с помощью высокочастотного фемтосекундного лазера (fs-лазера). Влияние различных углов падения лазера на обрабатываемую поверхность было подробно исследовано, а морфология обработки для различных параметров лазерной обработки была проанализирована и оптимизирована. Теоретическое моделирование

и экспериментальные результаты показали, что исходные поверхностные дефекты ямок до обработки поверхности SiC заметно влияют на эффект абляции. При полировке fs-лазером при вертикальном падении в ямках возникал эффект захвата света за счет многократных отражений, что усиливало поглощение лазерной энергии и увеличивало размер ямок. Небольшой угол падения позволяет устранить эффекты захвата света в ямках и получить гладкую поверхность материала. Кроме того, степень окисления и графитизации существенно уменьшаются с уменьшением угла падения. Получено оптимальное сочетание параметров обработки при угле падения 10° , частоте лазера 100 кГц, скорости сканирования 200 мм/с, энергии одиночного импульса 60 мкДж. Полированная SiC-керамика имела гладкую, плоскую поверхность без ямок со средним значением Sa 0,187 мкм и Sz 2,313 мкм. Наконец, было подробно объяснено образование типичных особенностей, таких как ямки, отложения частиц и мусора. Работа предоставляет новые исследовательские идеи для понимания механизмов полировки, связанных с удалением поверхностных дефектов и отложений из керамики SiC.

Известны способы обработки ультрафиолетовым лазерным излучением поверхности карбида кремния в воде, прошедшей этап очистки в системе обратного осмоса, в этаноле [3, 8]. Наноструктурирование карбида кремния с помощью лазерной абляции, например, в этаноле с использованием метода двойной экспозиции позволит изменить его оптические свойства. Вид поверхности 3H-SiC после первой экспозиции с помощью фемтосекундных лазерных импульсов в этаноле представлен на рисунке 2.

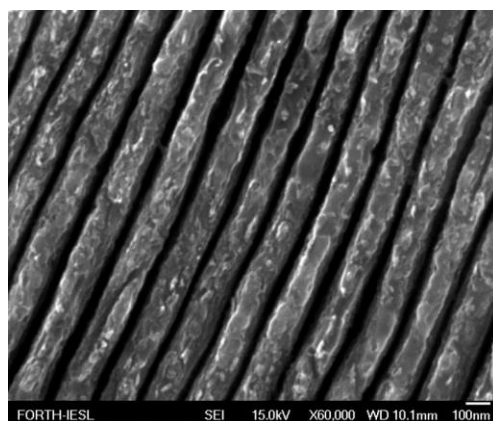


Рисунок 2. Морфология поверхности кремния после воздействия излучения Ti:sapphire лазера с длиной волны 800 нм и длительностью импульса 210 фс в этаноле (первая экспозиция). Плотность энергии лазерного излучения на поверхности мишени 1,4 Дж/см². Масштабная метка 1 мкм

Анализ морфологии показывает, что образование однородных поверхностно-периодических структур с периодом около 150 нм, это результат воздействия фемтосекундных лазерных импульсов. Заметно и формирование самоорганизующихся наноструктур со средним поперечным размером 10-30 нм,

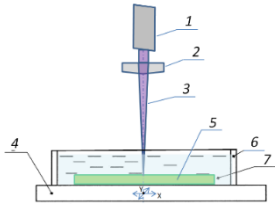
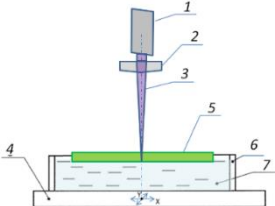
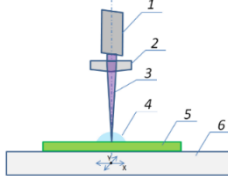
но они нерегулярны и плотность их мала. Плоскость поляризации лазерного излучения перпендикулярна ориентации структур. Формирование такого рельефа на карбиде кремния при его абляции фемтосекундными лазерными импульсами с длиной волны излучения 800 нм в жидкости может быть обусловлено двухфотонным возбуждением лазерным излучением электронов карбида кремния. Ширина запрещенной зоны 3H-SiC равна 3,2 эВ, при этом энергия кванта лазерного излучения соответствует 1,55 эВ. При комнатной температуре концентрация электронов в зоне проводимости SiC мала, поэтому карбид кремния является диэлектриком. Из-за этого поверхностная электромагнитная волна не может распространяться по поверхности исходного материала. Однако, при воздействии фемтосекундного лазерного импульса на поверхность мишени может происходить двухфотонное возбуждение электронов валентной зоны карбида кремния. Электроны переходят в зону проводимости, поверхность карбида кремния металлизирована. Вследствие этого поверхностная электромагнитная волна распространится по поверхности, в результате различных термических процессов (испарение, плавление, сублимация и. т. д.), на образце образуются наноструктуры. Их профиль носит несинусоидальный характер. Края (в поперечном направлении) имеют резкую границу, а не сглаженную. Это может быть связано с нелинейностью двухфотонного поглощения. Можно предположить, что сублимация поверхности происходит только на тех участках образца, где достигнут порог двухфотонного поглощения [9].

Данный способ является низкоуниверсальным, заключающимся в получении морфологии поверхности только определенного диапазона, а также присутствуют сложности технологического процесса очистки рабочей жидкости, исключающего использования других жидких сред.

В работе, посвященной исследованию воздействия лазерного излучения на обработку карбида кремния в кювете с рабочей жидкостью, исследуемые образцы карбида кремния частично погружались в рабочую жидкость, в качестве которой использовался раствор КОН. Обработка тыльной поверхности карбида кремния, соприкасающейся с рабочей жидкостью, осуществлялась через слой карбида кремния лазерным излучением 600 нм, длительностью импульса 100 нс, с частотой 50 кГц и мощностью 4 Вт. Локальный нагрев кристалла, одновременным действием парных источников теплового потока на фронтальной и тыльной поверхностях карбида кремния в условиях прямого контакта тыльной поверхности кристалла с химически активной по отношению к карбиду кремния рабочей жидкостью, порождает процесс химической эрозии поверхности кристалла и формирует новый тип морфологии с наноразмерными структурами. При этом продукты эрозии удалялись при взаимодействии с химически активной рабочей жидкостью. Полученная морфология поверхности использовалась для получения светодиодов на карбиде кремния [4, 10].

В таблице 3 описаны разработанные и запатентованные методы локальной лучевой эрозии карбида кремния тремя способами [11].

Таблица 3. Базовые варианты метода

№	Структурная схема	Название
1		Метод полного погружения кристалла в жидкость 1 – лазер; 2 – фокусирующая линза; 3 – пучок лазерного излучения; 4 – позиционер; 5 – кристалл SiC; 6 – кювета; 7 – рабочая жидкость.
2		Метод флотации кристалла 1 – лазер; 2 – фокусирующая линза; 3 – пучок лазерного излучения; 4 – позиционер; 5 – кристалл SiC; 6 – кювета; 7 – рабочая жидкость.
3		Метод жидкой линзы 1 – лазер; 2 – фокусирующая линза; 3 – пучок лазерного излучения; 4 – жидкая линза; 5 – кристалл SiC; 6 – позиционер.

В таблице 4 представлены рабочие жидкости для экспериментальных исследований. Использовали как деионизованную воду, так и более вязкие жидкости, в том числе кислоты, щелочи и криожидкости. Результаты показали различную морфологию поверхности, отличающуюся как шероховатостью, так и трещинообразованием.

Различные методы размерной модификации, исследованные в работе, показали практическое применение для получения модифицированных поверхностей с минимизацией профиля шероховатости. Взаимодействие лазера с веществом представляет собой сложный процесс в небольших масштабах. В зоне воздействия лазера появляются различные особенности аблированной поверхности, на которые влияют такие параметры процесса, как длительность импульса, длина волны лазера и плотность энергии. Эти особенности отражают ряд основных механизмов взаимодействия, включая аморфизацию, плавление, термический/нетепловой фазовый переход, кулоновский взрыв, испарение и т. д.

Таблица 4. Рабочие жидкости

№	Вид	Особенности
Нейтральные		
1	Деионизованная вода	Химически инертна, оптически прозрачна, текучесть, высокая теплоемкость
2	Вакуумное масло	Химически инертна, оптически полупрозрачна, вязкая жидкость, стойкость к излучению высокая теплоемкость
3	Силиконовые жидкости	Химически инертна, оптически прозрачна, вязкая жидкость, низкая теплоемкость
Хим. активные		
4	Щелочи	Химически активна, текучесть, оптически не прозрачна, сильное взаимодействие при нагреве до температуры 500-600 °C
5	Кислоты	Химически активна, текучесть, оптически прозрачна, сильное взаимодействие при нагреве до температуры 500-600 °C
Криогенные		
6	Азот	Оптически прозрачен, крайне текуч, постоянно испаряется при комнатной температуре, химически инертен, применяется для охлаждения кристаллов

Было проведено множество работ для исследования этих фундаментальных проблем как с экспериментальной, так и с теоретической точек зрения. Например, методы атомно-силовой микроскопии, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии были использованы [12] для изучения влияния лазерного облучения на морфологию поверхности и химический состав SiC в условиях воздуха. На поверхности был обнаружен наноструктурированный столбчатый слой на основе кремнезема, а между объемным и оксидным слоем обнаружен слой графита толщиной в несколько нанометров.

Исследование эрозионной стойкости кристаллов SiC методом дискретных трасс

В данном исследовании оценивается эрозионная стойкость кристаллов карбида кремния путём анализа дискретных трасс эрозии. Через экспериментальное моделирование воздействия абразивных частиц исследуются топографические и химические изменения на поверхности SiC. Результаты могут пролить свет на фундаментальные процессы, определяющие устойчивость материала к эрозии, что имеет важное значение для его применения в условиях экстремальных нагрузок. На рисунке 3 представлены экспериментальные эрозионные следы по определенным кристаллографическим направлениям.

В рамках исследования проведена серия экспериментов с целью выявления корреляции между мощностью лазерного излучения и шириной обработанной трассы на кристаллах SiC (рисунки 4–6). Методика включает в себя пошаговое увеличение мощности лазера и измерение получаемых трасс при каждом шаге.

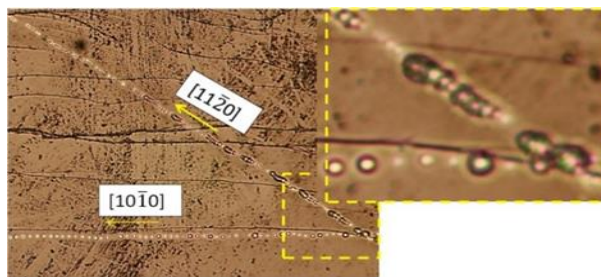


Рисунок 3. К методике оценки эрозионной стойкости. Эксперимент. Пластинчатый монокристалл с естественными гранями 15R-SiC<N>, грань (0001) C

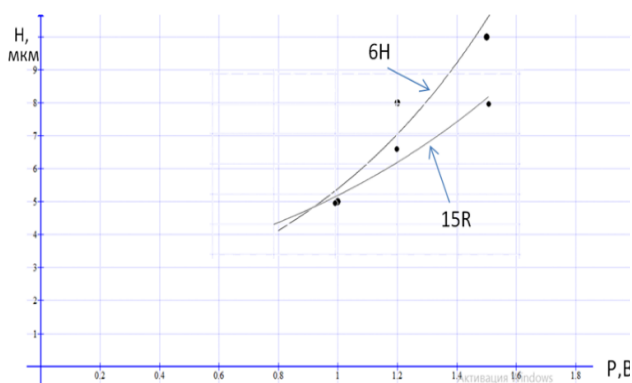


Рисунок 4. Зависимость ширины трассы от мощности лазерного излучения. Эксперимент. Пластинчатый монокристалл с естественными гранями SiC<N>, грань (0001) C

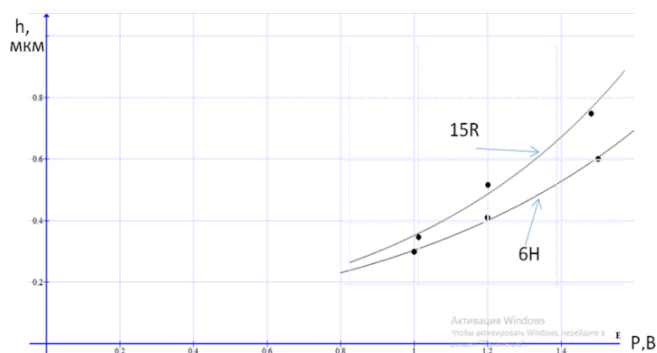


Рисунок 5. Зависимость глубины трассы от мощности лазерного излучения. Эксперимент. Пластинчатый монокристалл с естественными гранями SiC<N>, грань (0001) C

Данные позволяют определить энергетические пороги для начала фазовых превращений в SiC и перехода от поверхностного воздействия к объемной модификации. Это исследование существенно влияет на разработку процессов лазерной обработки для прецизионного микро- и наноструктурирования карбида кремния.

Получены графики зависимостей (рисунок 7) сопротивления от проводимости дискретных трасс, сформированных на изоляторе карбида кремния с объемным сопротивлением $R = 1\sim 2$ ГОм.

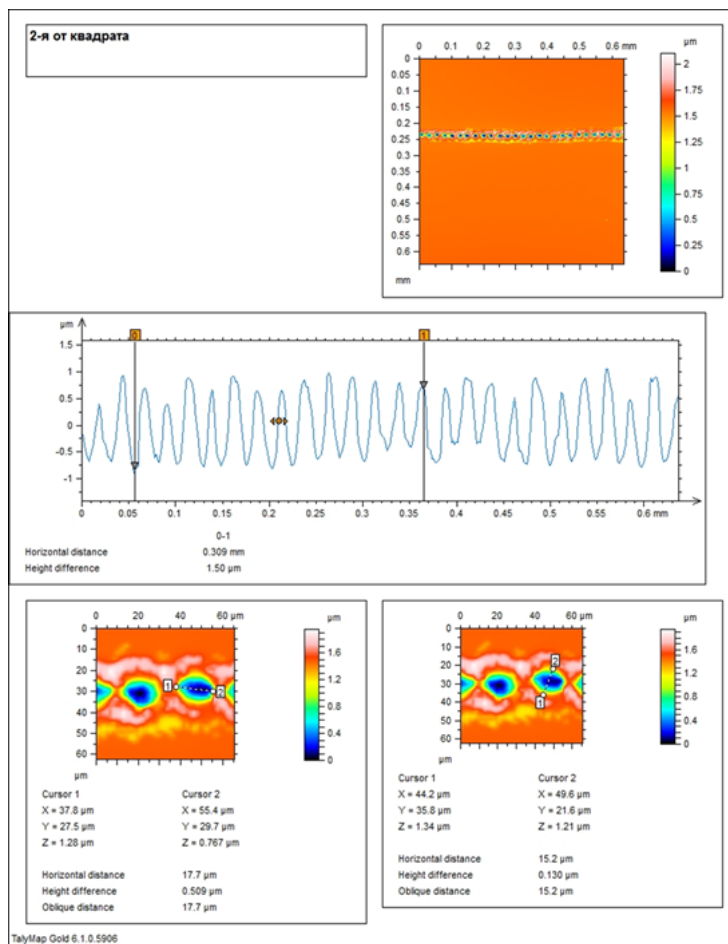


Рисунок 6. Измерение геометрических характеристик трассы. Пример. Эксперимент. Пластиновый монокристалл с естественными гранями 6Н- SiC<N>, грань (0001) С

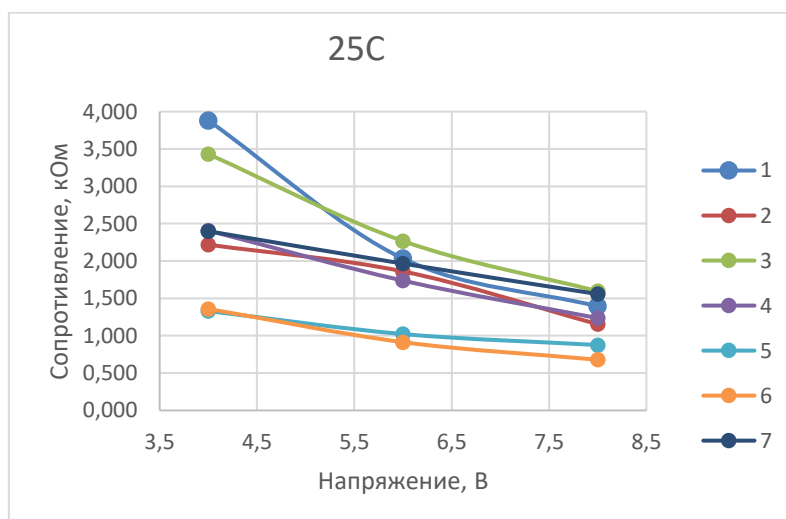


Рисунок 7. Графики зависимостей сопротивления дискретных трасс, выполненных на подложке карбида кремния с объемным сопротивлением $R = 1\sim 2$ ГОм

Показано, что трассы имеют сопротивление меньшее, чем сама подложка. В зависимости от интервала лунок на каждой трассе при коэффициенте связности от $C = 0,2$, соответствующий трассе номер 1 до $C = 1,8$, соответствующий трассе номер 7, при комнатной температуре значение сопротивления варьируется от 600 Ом при интервале внахлест до единиц кОм в интервале 10-20 мкм. Данный эффект наблюдается вследствие выплескивания кремниевой фазы в виде наноструктурированных частиц.

Локальная лучевая эрозия карбида кремния через воду

В экспериментах по лазерной абляции через воду исследуется влияние водной среды на процесс абляции карбида кремния. Модификации поверхности SiC при воздействии лазера через слой воды может снизить тепловое повреждение и повысить точность обработки. При этом возникают локальные эффекты испарения жидкости, быстрое охлаждение карбида кремния и образование наноструктур, связанных с лункой, состоящих преимущественно из кремниевой фазы (рисунки 8-10).

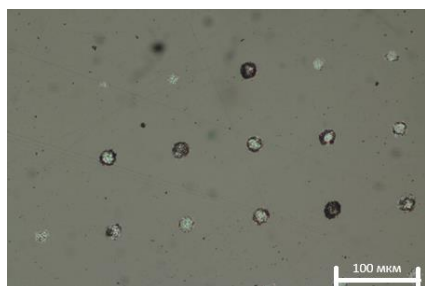


Рисунок 8. Структура решетки. Фото. Эксперимент, монокристалл 4H-SiC<N> грань (0001) Si, деионизованная вода, мощность ЛИ Р=3,5 Вт

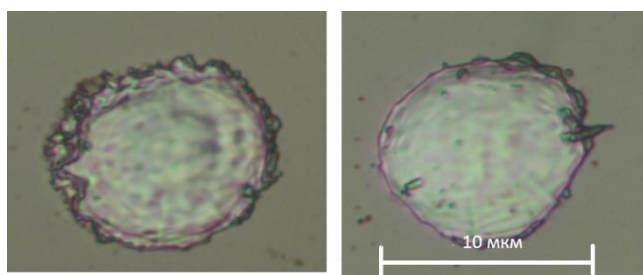


Рисунок 9. Примеры следов. Фото. Эксперимент, монокристалл 4H-SiC<N> грань (0001) Si, деионизованная вода, мощность ЛИ Р =3,5Вт

Применение лазерной абляции твёрдых материалов в жидкой среде открывает возможности для генерации наноструктур, лишённых примесей и ионных загрязнений. В контрасте с абляцией, проводимой в газовой атмосфере, которая зачастую сопровождается окислением поверхности и формированием нестехиометричного состава, процесс в жидкости сохраняет исходный химический состав обрабатываемого материала. Данный эффект достигается благодаря созданию высокого давления пара вокруг зоны лазерного воздействия в жидкости, что обеспечивает эффективное удаление различных агентов с поверхности исследуемого образца.

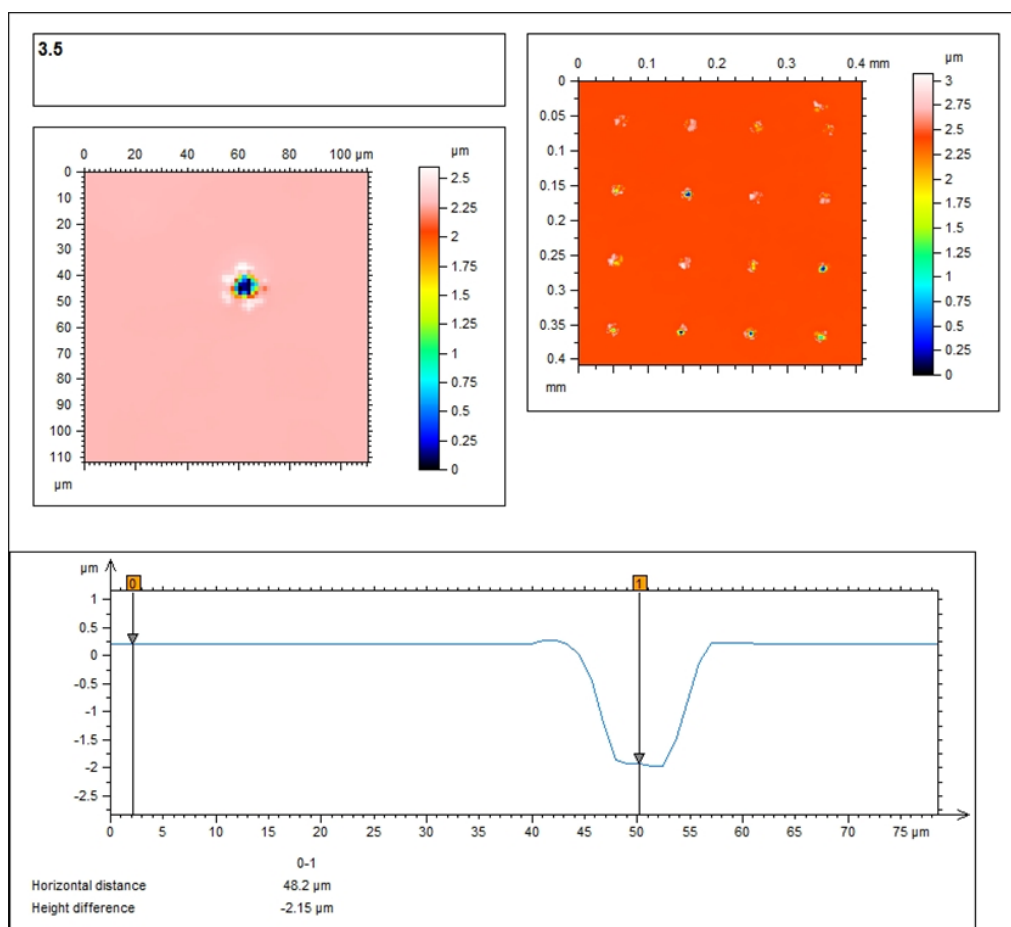


Рисунок 10. Исследование структуры решетки методом профилометрии. Фото. Эксперимент, монокристалл 4H-SiC<N> грань (0001) Si, деионизованная вода, мощность ЛИ Р = 3,5 Вт

Локальная лучевая эрозия карбида кремния через вакуумное масло

Отличительной особенностью лазерной абляции карбида кремния через вакуумное масло является более высокая теплопроводность и вязкость масла, что способствует более равномерному рассеиванию тепла и снижению теплового воздействия на окружающие участки материала. Вакуумное масло обладает уникальными свойствами, позволяющими контролировать процесс абляции с большей точностью, минимизируя риск термического повреждения и предотвращая быстрое испарение жидкости в момент лазерного воздействия (рисунки 11-13).

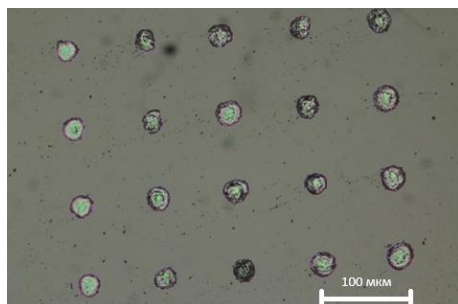


Рисунок 11. Структура решетки. Фото. Эксперимент, монокристалл 4Н-SiC<N> грань (0001) Si, вакуумное масло, мощность ЛИ P=6 Вт

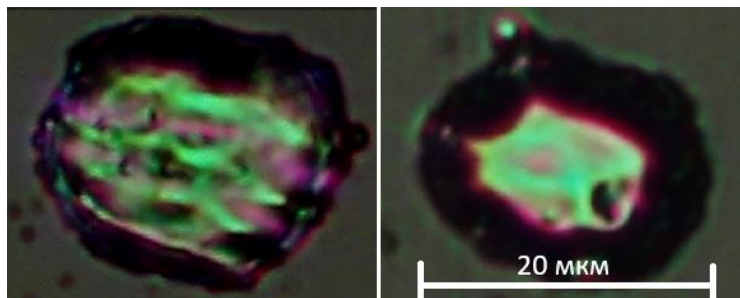


Рисунок 12. Примеры следов. Фото. Эксперимент, монокристалл 4Н-SiC<N> грань (0001) Si, вакуумное масло, мощность ЛИ P=6 Вт, мощность ЛИ P =6 Вт

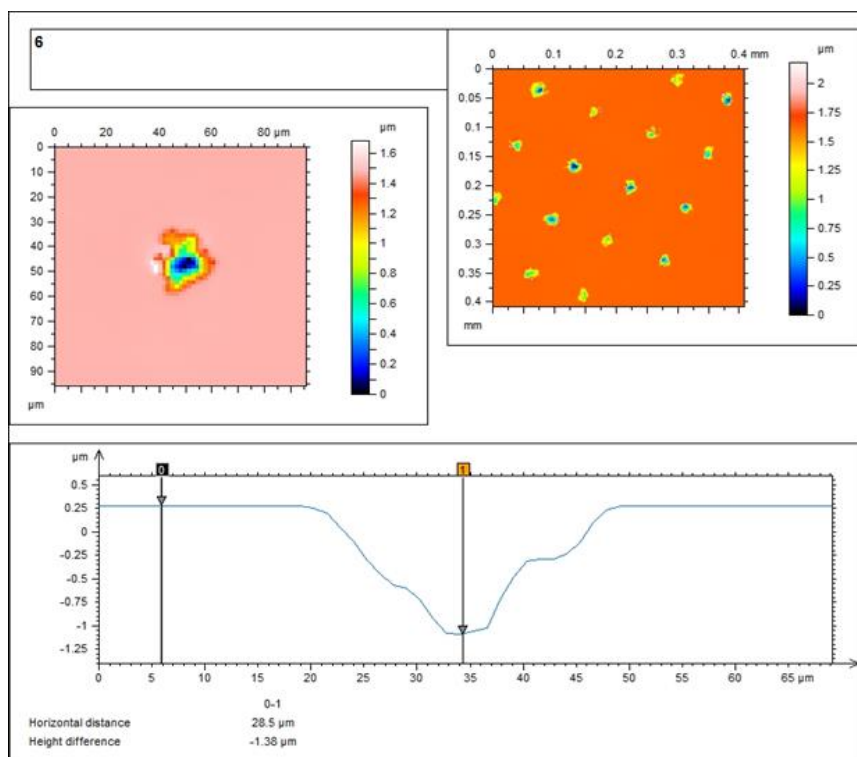


Рисунок 13. Исследование структуры решетки методом профилометрии. Фото. Эксперимент, монокристалл 4Н-SiC<N> грань (0001) Si, вакуумное масло, мощность ЛИ P=6Вт, мощность ЛИ P =6 Вт

Из экспериментальных данных видно, что рассеяние тепла происходит в большем масштабе, чем при экспериментах с водой. Это говорит о том, что воздействие лазерной абляции происходит более щадяще для карбида кремния, однако получать контролируемые структуры заданного размера становиться сложнее,

так как рассеяние тепловой энергии, наличие примесей частиц не позволяет его применять для микро- и наноструктурирования в масштабе трасс.

Локальная лучевая эрозия карбида кремния через силиконовое масло

Эксперименты, связанные с лазерной эрозией через силиконовое масло, прежде всего отличаются своей структурой в наномасштабе (рисунки 14-16). При воздействии лазерного излучения через силиконовое масло возникают оптимальные условия для лазерной обработки, минимизируя тепловое повреждение обрабатываемого материала и предотвращая его окисление или загрязнение. благодаря своим высоким теплопроводным и диэлектрическим характеристикам, а также химической инертности.

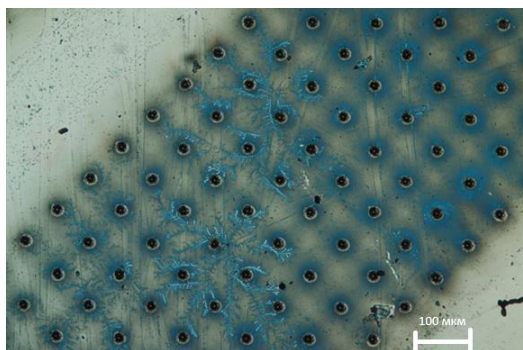


Рисунок 14. Структура решетки. Фото. Эксперимент, монокристалл 4H-SiC<N> грань (0001)Si, силиконовое масло, мощность ЛИ P=3,5 Вт



Рисунок 15. Примеры следов с выпуклым фронтом. Фото, 50X. Эксперимент, монокристалл 4H-SiC<N> грань (0001)Si, силиконовое масло, мощность ЛИ P=3,5 Вт

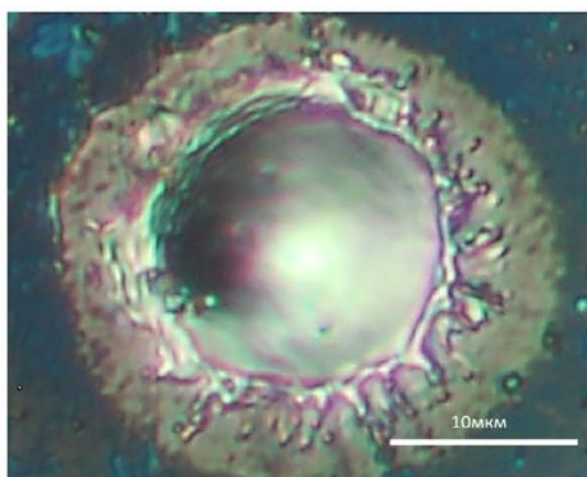


Рисунок 16. Морфология одиночного следа с выпуклым фронтом. Фото. Эксперимент, монокристалл 4H-SiC<N> грань (0001)Si, силиконовое масло, мощность ЛИ P=3,5 Вт

Основные результаты и выводы

Был разработан новый метод размерной модификации кристаллов карбида кремния с использованием лазера, который основывается на анализе ряда ключевых параметров. Эти параметры включают спектральный коэффициент поглощения материала, анизотропию устойчивости к эрозии, пространственную структуру обрабатываемой области, морфологические характеристики поверхности, а также способность к восстановлению после эрозионных процессов. Кроме того, учитывается воздействие состава окружающей атмосферы на процесс абляции, при этом метод адаптирован к условиям ограниченных ресурсов и времени. Метод включает:

- физико-математическую модель лазерной размерной модификации кристаллов карбида кремния, учитывающую особенности поглощения лазерного излучения и обеспечивающую возможность моделирования возникающих температурных полей;
- новую методику лучевой эрозии кристаллов карбида кремния в газовой (воздушной) среде, отличающуюся учетом скорости позиционирования и позволяющую воспроизводимо формировать как одномерную систему эрозионных лунок (трассу) различной связности, так и двумерную в виде решетки;
- новую методику лучевой эрозии кристаллов карбида кремния в жидкой среде, отличающуюся применением частичного погружения кристалла и позволяющую воспроизводимо формировать заполненные расплавом эрозионные лунки, в том числе с выпуклым фронтом;
- новую методику проведения процесса регенерации эрозионных следов лучевой природы в кристаллах карбида кремния в жидкой среде, отличающуюся применением коэффициента формы и позволяющую количественно описывать стадии процесса.

Список литературы

1. Zheng Q., Mei X., Jiang G., Yan Z., Fan Z., Wang W., Pan A., Cui J. Influence of surface morphology and processing parameters on polishing of silicon carbide ceramics using femtosecond laser pulses // *Surfaces and Interface*. 2022. 36(1).102528. DOI: 10.1016/j.surf.2022.102528
2. Карачинов В. А. Получение профилированных монокристаллов карбида кремния методом сублимации и электрической эрозии: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Санкт-Петербург, 2005. 32 с.
3. Шафеев Г. А., Серков А. А., Бармина Е. В. Патент № 2563324 Российская Федерация, МПК В82У 40/00 (2011.01), Н01L 33/34 (2010.01). Способ обработки поверхности карбида кремния с помощью ультрафиолетового лазерного излучения: № 2013148882/28: заявл. 01.11.2013: опубл. 20.09.2015 / заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Энергомаштехника» (ООО «ЭТМ»).
4. Karachinov V. A., Evstigneev D. A., Karachinov D. A. Multifunctional anemometric microsystem based on silicon carbide // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. 1047. 12054. DOI: 10.1088/1757-899X/1047/1/012054

5. Агеев А. О., Беляев Е. А., Болтовец Н. С., Киселев В. С., Кондакова Р. В., Лебедева А. А., Миленин В. В., Охрименко О. Б., Поляков В. В., Светличный А. М., Черениченко Д. И. Карбид кремния: технология, свойства, применение / под общей редакцией А. Е. Беляева, Р. В. Конаковой. Харьков: ИСМА, 2010. 532 с.
6. Астапчик С. А., Голубев В. С., Маклаков А. Г. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке. Минск: Белорусская наука, 2008. 251 с.
7. Башта П. Лазерная резка методом LaserMicroJet // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2010. 3(101). 32-35.
8. Ромашевский С. А. Особенности наноструктурирования поверхности кремния в результате ее сверхбыстрого нагрева фемтосекндным лазерным импульсом в воде // Письма в журнал технической физики. 2018. 44(14). 58-64. DOI: 10.21883/PJTF.2018.14.46345.17271
9. Карачинов В. А. Микроострийная шероховатость нарушенных слоев эрозионной природы в кристаллах карбида кремния // Кристаллография. 2004. 49(5). 899-904.
10. Евстигнеев Д. А., Карачинов В. А., Бондарев Д. А., Карачинов Д. В. Патент № 2648306 Российская Федерация, МПК G01P 5/10 (2006.01), G01K 13/02 (2006.01). Тепловая микросистема на полупроводниковой основе: № 2016145722: заявл. 22.11.2016: опубл. 23.03.2018 / заявители Федеральное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», ОАО «ОКБ-Планета».
11. Карачинов В. А., Евстигнеев Д. А., Петров А. В., Ионов А. С., Желаннов А. В. Патент № 2 724 142 Российская Федерация, МПК H01L 21/302 (2006.01), B82Y 40/00 (2011.01). Способ модификации поверхности кристаллов карбида кремния: № 2020113237: заявл. 26.03.2020: опубл. 31.03.2021 / заявитель АО «ОКБ-Планета».
12. Evstigneev D. A., Karachinov V. A., Varshavskiy A. S., Manykhin V. A. Modeling the distribution of temperature field within the micro heat - loss anemometer based on silicon carbide // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 441. 012016. DOI: 10.1088/1757-899X/441/1/012016

References

1. Zheng Q., Mei X., Jiang G., Yan Z., Fan Z., Wang W., Pan A., Cui J. Influence of surface morphology and processing parameters on polishing of silicon carbide ceramics using femtosecond laser pulses // Surfaces and Interface. 2022. 36(1). 102528. DOI: 10.1016/j.surfin.2022.102528
2. Karachinov V. A. Preparation of profiled silicon carbide single crystals by sublimation and electrical erosion: abstract of a dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. St. Petersburg, 2005. 32 p.
3. Shafeev G. A., Serkov A. A., Barmina E. V. Patent No. 2563324 Russian Federation, IPC B82Y 40/00 (2011.01), H01L 33/34 (2010.01). Method for treating the surface of silicon carbide using ultraviolet laser radiation: No. 2013148882/28: application. 11.01.2013: publ. 09.20.2015 / applicant Limited Liability Company "Energomashtekhnika" (LLC "ETM").
4. Karachinov V. A., Evstigneev D. A., Karachinov D. A. Multifunctional anemometric microsystem based on silicon carbide // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. 1047. 12054. DOI: 10.1088/1757-899X/1047/1/012054

5. Ageev A. O., Belyaev E. A., Boltovets N. S., Kiselev V. S., Kondakova R. V., Lebedeva A. A., Milenin V. V., Okhrimenko O. B., Polyakov V.V., Svetlichny A. M., Cherenichenko D. I. Silicon carbide: technology, properties, application / edited by A. E. Belyaev, R. V. Konakova. Kharkov: ISMA, 2010. 532 p.
6. Astapchik S. A., Golubev V. S., Maklakov A. G. Laser technologies in mechanical engineering and metalworking. Minsk: Belarusian Science, 2008. 251 p.
7. Bashta P. Laser cutting using the LaserMicroJet method // Electronics: Science, technology, business. 2010. 3(101). 32-35.
8. Romashevsky S. A. Features of nanostructuring of the silicon surface as a result of its ultrafast heating with a femtosecond laser pulse in water // Letters to the Journal of Technical Physics. 2018. 44(14). 58-64. DOI: 10.21883/PJTF.2018.14.46345.17271
9. Karachinov V. A. Micropoint roughness of disturbed layers of erosive nature in silicon carbide crystals // Crystallography. 2004. 49(5). 899-904.
10. Evstigneev D. A., Karachinov V. A., Bondarev D. A., Karachinov D. V. Patent No. 2648306 Russian Federation, IPC G01P 5/10 (2006.01), G01K 13/02 (2006.01). Thermal microsystem based on semiconductor: No. 2016145722: application. 11/22/2016: publ. 03.23.2018 / applicants Federal budgetary educational institution of higher professional education "Yaroslav-the-Wise Novgorod State University", JSC "OKB-Planeta".
11. Karachinov V. A., Evstigneev D. A., Petrov A. V., Ionov A. S., Zhelannov A. V. Patent No. 2 724 142 Russian Federation, IPC H01L 21/302 (2006.01), B82Y 40/00 (2011.01). Method for modifying the surface of silicon carbide crystals: No. 2020113237: application. 03.26.2020: publ. 03/31/2021 / applicant JSC "OKB-Planeta".
12. Evstigneev D. A., Karachinov V. A., Varshavskiy A. S., Manykhin V. A. Modeling the distribution of temperature field within the micro heat - loss anemometer based on silicon carbide // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 441. 012016. DOI: 10.1088/1757-899X/441/1/012016

Информация об авторах

Евстигнеев Даниил Алексеевич – преподаватель, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0003-0670-8205, Daniil.Evstigneev@novsu.ru

Корнышев Николай Петрович – доктор технических наук, доцент, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0005-3177-2040, Nikolai.Kornishev@novsu.ru