

**DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE FOR CORRECTING IMAGES
OF ELECTRODE SPOTS OBTAINED WITH A NEWVIEW 5010 SURFACE
STRUCTURE ANALYZER**

Artem Dmitrievich Maksimov^{1a}, *Evgeniy Iosifovich Azarkevich*¹,
Igor Valentinovich Beketov^{1,2}, *Diana Sergeevna Koleukh*¹

¹ Institute of Electrophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Amundsen str. 106, Yekaterinburg, 620016, Russia

² Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Mira str. 19, Yekaterinburg, 620002, Russia

^a a.d.maksimov1415@gmail.com

ABSTRACT

Spots of single spark discharges of various energies (from 5 to 19 J) deposited on a flat polished surface of an iron electrode in an air atmosphere have been studied. The spots were studied using a NewView 5010 surface structure analyzer from Zygo Corp. (USA). However, images acquired with the analyzer have a number of artifacts such as missing data points, spikes, and background noise. The reasons for their occurrence are the steep slopes of the surface of the discharge spots, and also, apparently, the low reflectivity of individual sections. Since a complete array of height values is desirable for the analysis of the physical parameters of the discharge spots, a technique was developed for restoring images by the method of two-dimensional weighted average interpolation followed by smoothing. Based on the Mathcad software environment, a technique has been developed for determining the parameters of discharge craters, which includes measuring the area, diameter and volume of each crater, and obtaining their statistical characteristics. In addition, a window application was developed for the Windows operating system, which is capable of explicitly interpolating the original microscope data, creating a visual height map, and saving the recovered data array as a text file.

KEYWORDS

Spark discharge method; discharge spot; erosion of electrodes; interference microscopy; data recovery; interpolation.

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОРРЕКЦИИ СНИМКОВ ЭЛЕКТРОДНЫХ
ПЯТЕН, ПОЛУЧЕННЫХ АНАЛИЗАТОРОМ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ
NEWVIEW 5010**

Арте́м Дми́триевич Макси́мов^{1a}, *Евге́ний Ио́сифович Аза́ркевич*¹,
Иго́рь Вале́нтинович Беке́тов^{1,2}, *Диана Серге́евна Колеу́х*¹

¹ Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

^a a.d.maksimov1415@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Исследованы пятна одиночных искровых разрядов различной энергии (от 5 до 19 Дж), нанесенные на плоскую полированную поверхность электрода из железа в атмосфере воздуха. Пятна исследовались с помощью анализатора структуры поверхности NewView 5010 фирмы Zygo Corp. (США). Однако изображения, полученные с помощью анализатора, имеют ряд артефактов, такие как отсутствующие точки данных, резкие выбросы и фоновый шум. Причинами их возникновения являются крутые уклоны поверхности пятен разряда, а также, по-видимому, низкая отражательная способность отдельных участков. Поскольку для анализа физических параметров пятен разряда желателен полный массив значений высот, была разработана методика восстановления изображений методом двумерной средневзвешенной интерполяции с последующим сглаживанием. На базе программной среды Mathcad разработана методика определения параметров кратеров разрядов, которая включает измерение площади, диаметра и объема каждого кратера, и получения их статистических характеристик. Кроме того, было разработано оконное приложение под операционную систему Windows, способное в явном виде интерполировать исходные данные микроскопа, создать визуальную карту высот и сохранить восстановленный массив данных в виде текстового файла.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Метод искрового разряда; разрядное пятно; эрозия электродов; интерференционная микроскопия; восстановление данных; интерполяция.

Введение

Для получения наночастиц разработан ряд методов, различающихся размерами получаемых наночастиц, скоростью синтеза, чистотой образцов и др. Одним из многообещающих методов является метод искрового разряда [1]. Это один из газофазных методов синтеза наночастиц, основанный на испарении металлических электродов под действием тока искрового разряда. Метод уже находит ряд применений в различных технологических направлениях, таких как микроэлектроника [2–4], медицина [5, 6], катализ [7–9] и т.д. Основным преимуществом метода по сравнению с другими является высокая чистота и удельная поверхность получаемых нанопорошков. Размер частиц, полученных данным методом, может достигать единиц нанометров [10–12]. Однако метод имеет невысокую производительность из-за слабого вклада накопленной энергии в испарение материала электродов [13, 14], что ограничи-

вает область его применения как способа получения конструкционных наноматериалов. Одним из подходов в возможном решении данной проблемы может стать исследование характера эрозии материала электродов под действием искрового разряда. Учитывая, что перепад высот на поверхности следа от искрового разряда может достигать десятков микрометров, одним из наиболее приемлемых подходов к исследованию является интерференционная микроскопия. Ее наиболее характерное преимущество – возможность измерять высоты и глубины рельефа с разрешением до нанометров.

В работе приведено исследование поверхности пятен от единичных искровых разрядов на поверхности железного электрода. Разряд производился на плоскополированную поверхность электрода, при этом каждое пятно получено при разных значениях напряжения разряда. Интерференционная микроскопия поверхностей электродов про-

водилась при помощи анализатора структуры поверхности NewView 5010 фирмы Zygo Corp. (США) [15]. Программное обеспечение прибора MetroPro осуществляет сбор информации и преобразование интерференционной картины в выходной файл высот рельефа исследуемой поверхности. Карта высот с разрешением 640×480 пикселей выдается на монитор микроскопа и может быть считана. Однако на участках с достаточно крутыми склонами (свыше 18°) высоты не могут быть рассчитаны и образуются пропуски данных. Встречаются и другие нефизические особенности: острые выбросы, высокочастотные шумы.

Для удобства работы и нужной точности анализа рельефа желательно иметь полный массив данных. В настоящей работе основное внимание было уделено восстановлению пропущенных данных. Для этих целей был разработан алгоритм, сочетающий интерполяцию и последующее сглаживание двумерного массива высот рельефа. Из методов интерполяции был выбран метод обратных взвешенных расстояний по нескольким точкам. Сглаживание производилось с помощью итерационного алгоритма решения двумерного уравнения Лапласа. Такой метод не только сглаживает интерполированную поверхность рельефа, но и приближает ее к поверхности минимальной площади, что обобщает метод линейной интерполяции в одномерном случае.

Реализация метода была выполнена в программном пакете Mathcad, v.14.0. Кроме того, была разработана программа на языке C++ с использованием API Win32, в общем дублирующая алгоритм, созданный в Mathcad, однако с гораздо большим быстродействием и низкими системными требованиями.

1. Методика

Исследование пятен искровых разрядов проводилось на экспериментальной установке синтеза наночастиц, подробнее описанной в [16]. В качестве исследуемого материала выступал цилиндрический электрод, изготовленный из стали Ст3. На электроде подготовлена плоская полированная поверхность с шероховатостью 11–12 класса по ГОСТ 2789-59 и 2789-73 (среднеарифметическое отклонение профиля $Ra = 0,054$ мкм). Электрод размещался в разрядной камере установки на месте катода, то есть подключен к заземленной клемме. Энергия разряда накапливалась на конденсаторе ИК-100, напряжение зарядки варьировалось от 10 до 19 кВ с шагом 3 кВ. В качестве апробации методики анализа разрядных пятен, исследованию подверглось одно разрядное пятно, полученное при напряжении разряда 10 кВ. Для лучшего визуального контроля и привязки интерференционных снимков к разрядному пятну и друг другу были получены снимки пятна разряда на оптическом микроскопе фирмы Olympus с увеличением $\times 10$ (рис. 1, а).

Интерференционная микроскопия проводилась в различных областях разрядного пятна с использованием объектива с $\times 20$ увеличением. При одном и том же объективе могло проводиться зумирование снимка в диапазоне от 0,4 до 2,0 с помощью внутренней оптики микроскопа в зависимости от рельефа сканированного участка. Один из участков разрядного пятна представлен на рис. 2, б. Разрешение на пиксель составило 0,41 мкм. Поскольку полученные данные поверхности электродов имеют дефекты в виде областей черного цвета, означающих пропуски данных (они могут занимать от 10 до 30% от общей площади снимка), то для дальнейшего анализа необходимо провести восстановление пропущенных данных.

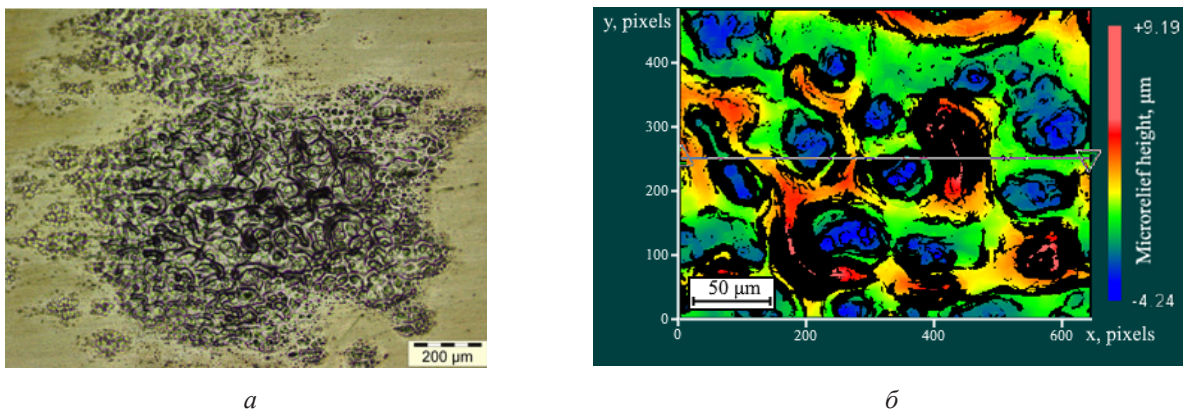


Рис. 1. Снимок пятна разряда на микроскопе Olympus (а); цветовая карта высот, полученная с помощью анализатора поверхности в программе MetroPro (б)

Fig. 1. Snapshot of the discharge spot on an Olympus microscope (a); the color map of heights obtained using the surface analyzer in the MetroPro program (b)

Основная работа, связанная с коррекцией дефектов снимка и анализом кратеров разрядного пятна, производилась в программном пакете Mathcad.

Интерполяция описана в учебниках и справочниках по математике, например, [17, 18]. Процедуры интерполяции имеются в пакетах программ типа Mathcad. И, казалось бы, здесь не должно возникнуть трудностей. Но в двумерной геометрии, из-за сложной формы областей пропущенных данных, готовые процедуры интерполяции Mathcad работали неудовлетворительно. В итоге был выбран метод обратных взвешенных состояний [19], применяющийся при интерполяции географических карт. Он основан на предположении, что отсутствующее значение может быть аппроксимировано как средневзвешенное значение в точках в пределах определенного расстояния или из заданного числа m ближайших точек. Ближайшие точки к отсутствующему значению имеют больший вес, тогда как отдаленные точки имеют относительно низкое влияние на результат.

Алгоритм интерполяции в общем виде построен следующим образом. Выбирается число направлений (4, 8, 16). Для выбранной отсутствующей точки в определенном направлении производится поиск точки с известной высотой. Запоминаются высота этой точки и расстояние до нее от исходной точки.

Так проходятся все направления. Высота исходной точки вычисляется как взвешенное среднее из высот найденных точек. Веса выбираются обратными некоторой степени расстояния p . Расстояния вычисляются по формуле Пифагора. Формула для вычисления искомой высоты имеет вид:

$$A = \frac{\sum_{i=0}^n B_i w_i}{\sum_{i=0}^n w_i}, \quad w = \frac{1}{r_i^p}, \quad (1)$$

где B_i – высоты известных точек; w_i – веса; r_i – расстояния от найденных точек до искомой; i – номер направления; p – показатель степени (мы выбирали $p = 1$ или 2). Таким образом последовательно обрабатывались все точки с пропущенными высотами.

При большой доле пропущенных данных, результат интерполяции получается неудовлетворительным: возникают «пилообразные» профили рельефа. Увеличение числа направлений поиска, например, с четырех до восьми, уменьшает число таких дефектов.

Проблема возникает, когда область пропусков выходит на границу матрицы данных. Чтобы ее избежать, предварительно производится восполнение данных на периметре матрицы методом линейной интерполяции. А перед этим, тоже методом линейной интерполяции, восстанавливаются высоты в угловых точках матрицы, если это нужно.

Интерполированное значение записывалось в отдельную матрицу, и по завершению интерполяции всех выбранных точек исходная матрица и матрица интерполированных значений складывались.

На рис. 1, *a* показана восстановленная матрица данных, интерполированная по четырём точкам. На ней видны упомянутые пилообразные дефекты.

Дефекты интерполяции могут быть устранены или уменьшены путем сглаживания.

Удобным способом сглаживания оказалось сглаживание гармонической функцией, т.е. решением уравнения Лапласа. При этом использовался итерационный алгоритм [20, 21]. Его основная формула следует из конечно-разностного представления двумерного оператора Лапласа и имеет вид:

$$A_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{4}(A_{i-1,j}^{n+1} + A_{i,j-1}^{n+1} + A_{i+1,j}^n + A_{i,j+1}^n); \quad (2)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots,$$

где *A* – значения высот; индексы *i* и *j* – номера строки и столбца массива соответственно; *n* – номер предыдущей итерации; *n*+1 – номер текущей итерации. Результатом 30 итераций стала сглаженная карта рельефа пятна разряда (рис. 2).

Оператор (2) не только сглаживает неровности, но и приближает интерполируемую поверхность к форме поверхности с минимальной площадью, что уменьшает

вероятность появления ненужных выступов или впадин.

После восстановления пропущенных высот следует установить уровень, от которого будут отсчитываться глубины кратеров и высоты валов. Поскольку на снимке нет следов исходной поверхности, то воспользуемся законом сохранения массы. В данном случае он утверждает, что сумма объемов кратеров равна сумме объемов валов плюс объем эродированного (испаренного) металла. Последний объем, как показывает прошлый опыт, примерно на порядок меньше объемов перемещенного металла из кратеров в валы, и им можно пренебречь. В таком случае можно построить условную базовую плоскость, которая и будет линией раздела между кратерами и валами. Базовую плоскость можно построить методом наименьших квадратов. Затем производится пересчет высот от базовой плоскости.

После восстановления недостающих данных и построения базовой плоскости создается двумерная топографическая карта кратеров (рис. 3). На карте зоны с отрицательными значениями высот (кратеры) отмечены голубым цветом, а положительные высоты (валы, возвышенности) оставлены пустыми. Линия, разделяющая окрашенную и неокрашенную области, является линией нулевого уровня и лежит в базовой плоскости α .

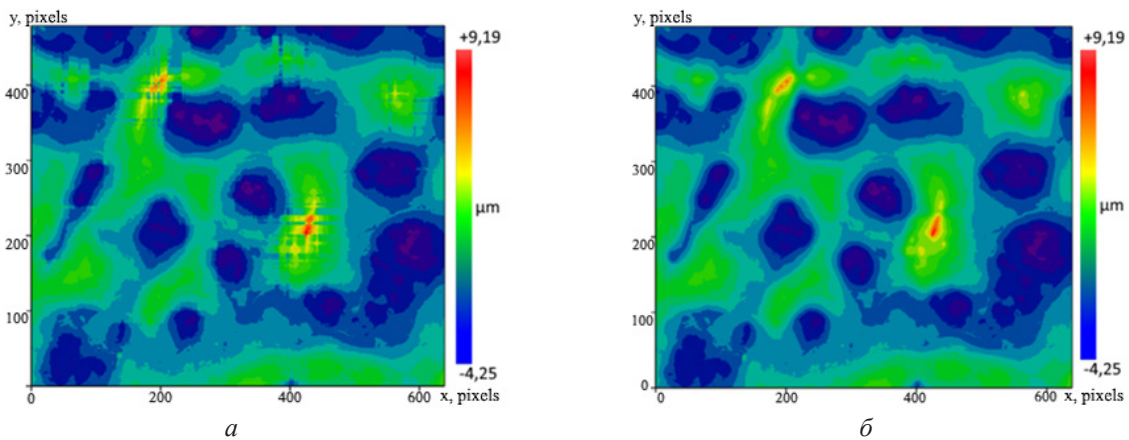


Рис. 2. Карта высот, построенная с применением интерполяции взвешенным средним по 4 точкам (*a*); сглаженная карта высот (*б*)

Fig. 2. Height map made using weighted average interpolation on 4 points (*a*); smoothed height map (*b*)

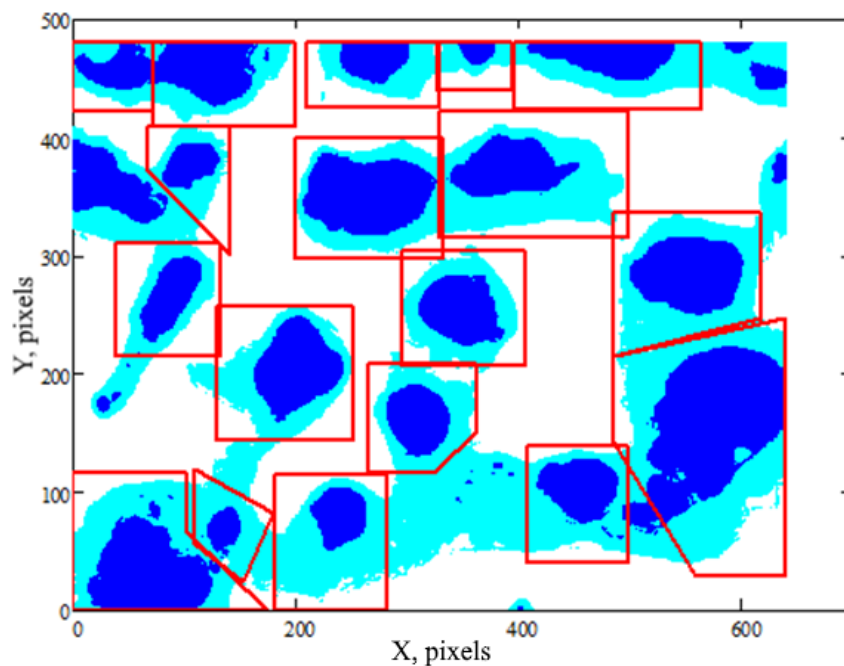


Рис. 3. Карта кратеров с рамками, содержащими единственный кратер

Fig. 3. Map of craters with frames containing a single crater

На нулевом уровне кратеры могут сливаться. Поэтому проводится еще одна плоскость β на уровне, скажем, $-1,5$ мкм (при необходимости уровень можно регулировать) в целях упрощения идентификации кратеров. Области ниже этого второго уровня залиты синим цветом. Наличие этого дополнительного контура помогает различить отдельные кратеры.

Далее кратеры вручную, в интерактивном режиме, заключаются в рамки из прямоугольников или многоугольников (до 6 углов). Проще всего заключить кратеры в прямоугольные области со сторонами, параллельными координатным осям. Координаты вершин записываются в специальные матрицы.

Далее каждая рамка с кратером обрабатывается отдельно. Отрицательные высоты считаются принадлежащими кратерам, остальные точки игнорируются. Число пикселей с отрицательными высотами пропорционально площади кратера, а сумма их вы-

сот – объему кратера. Также определяются максимальная глубина кратера, средняя глубина, условный диаметр кратера как диаметр круга с площадью, равной площади кратера. Определяется условный центр кратера как центр тяжести его объема. Вычисляются наименьшие расстояния между центрами кратеров.

2. Результаты и обсуждения

Все найденные в предыдущем пункте характеристики кратеров являются случайными величинами. Поэтому с параметрами разряда могут быть связаны только параметры распределений этих характеристик, а не индивидуальные характеристики. По опыту прошлой работы [22] можно ожидать, что диаметры, площади и объемы имеют нормально-логарифмическое распределение (НЛР), а глубины и высоты – нормальное (НР). Все рассчитанные значения сведены в единую табл. 1.

Таблица 1. Статистические характеристики параметров кратеров

Table 1. Statistical characteristics of crater parameters

	Объем, мкм ³ / Volume, μm ³	Площ., мкм ² / Area, μm ²	Диаметр, мкм/ Diameter, μm	Глубина, мкм/ Depth, μm	Ср. глуб., мкм/ Avg. depth, μm	Расст., мкм/ Dist., μm
Распределение/ Distribution	НЛР LND	НЛР LND	НЛР, НР LND, ND	НР ND	НР ND	НР ND
Минимум/ Minimum	562	493	25,0	2,68	1,03	30,6
Максимум/ Maximum	6093	3734	68,9	4,66	2,00	53,9
Среднее/ Average	2097	1401	40,8	3,60	1,45	41,9
Медиана/ Median	1793	1251	39,9	3,53	1,46	40,8
Станд. отклон./ Std. deviation	–	–	11,0	0,51	0,23	7,8
Средн. геометр./ Geometric mean.	1751	1225	39,5	–	–	–
Геом. ст. откл./ Geom. std. deviation	1,88	1,71	1,31	–	–	–

Для теста на нормальность создается квантильный, или вероятностный, график по методике, описанной, например, в [23]. По оси абсцисс отложены значения вектора интересующей нас случайной величины, упорядоченные по возрастанию. По оси ординат отложены квантили стандартного нормального распределения $N(0, 1)$ от величин $(2k-1)/2n$; $k = 1 \dots n$; n – число элементов вектора (выборки). Нормальное распределение в этих координатах изображается прямой линией, угловой коэффициент которой равен $1/\sigma$,

где σ – среднеквадратичное отклонение. Эта прямая пересекает ось абсцисс в точке, равной среднему значению. Два примера таких тестовых графиков представлены на рис. 4. На левом графике представлено распределение глубин кратеров. Видно, что наблюдаемые глубины очень хорошо располагаются вдоль прямой линии. На правом графике показано распределение ближайших расстояний между центрами кратеров. Здесь согласие с нормальным распределением не столь хорошее, но все же удовлетворительное.

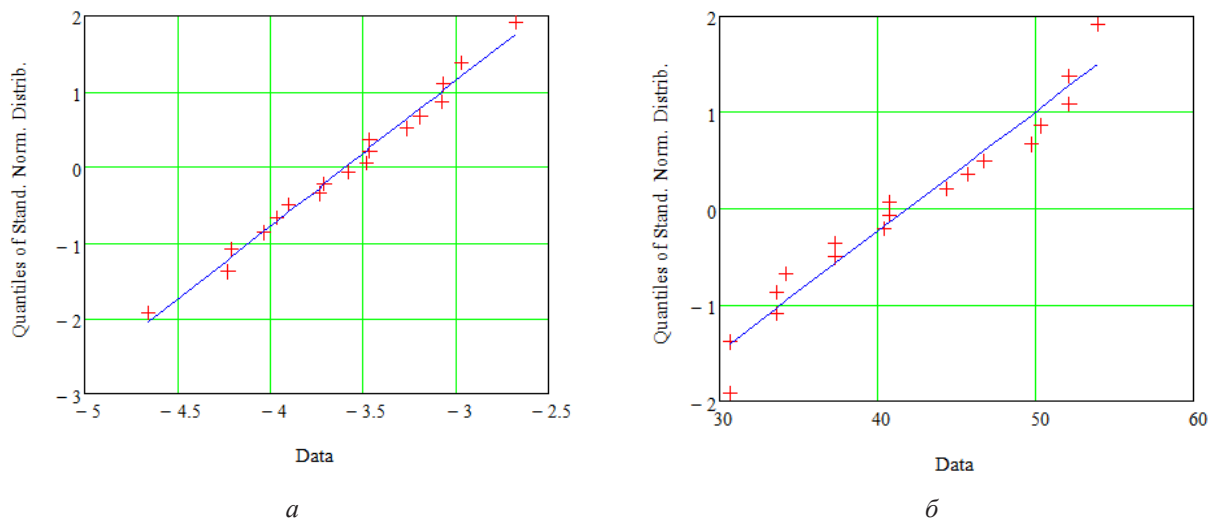


Рис. 4. Тест на нормальность распределений:

а – распределение глубин кратеров (среднее $-3,33$ мкм; станд. откл. $0,69$ мкм); *б* – ближайшие расстояния между центрами кратеров (среднее $41,9$ мкм; станд. откл. $7,8$ мкм)

Fig. 4. Test for the normality of distributions:

a – distribution of crater depths (average -3.33 μm ; std. devi. 0.69 μm); *b* – nearest distances between crater centers (average 41.9 μm ; std. devi. 7.8 μm)

Выводы

Работа демонстрирует, что анализатор поверхности NewView 5010 является эффективным и информативным методом исследования разрядных пятен на поверхности электродов. В частности, этот метод позволяет измерять глубины и объемы кратеров и другие геометрические характеристики.

Помимо этого, предложен и разработан новый подход к компьютеризированной обработке значений высот поверхности с использованием программного пакета Mathcad. Сюда входят методы обнаружения кратеров, образовавшихся в результате разряда на электродах, и измерения основных характеристик, таких как площадь, объем, диаметр, глубина, расстояние между центрами кратеров и локальные деформации поверхности.

Полученный способ обработки данных позволяет строить модели для уменьшения шумов сигнала и определять статистические свойства особенностей кратеров.

Дополнительные исследования могут выявить экспериментальные корреляции

с предсказаниями существующих теорий и дополнить представления о механизмах развития эрозии вследствие искровых разрядов.

Таким образом, в работе предлагается новая вычислительная методология для анализа поверхности пятен разрядов с использованием данных интерференционных картин поверхности, в перспективе позволяющая, в частности, пролить свет в вопросе о повышении эрозионной способности метода искрового разряда.

Благодарности / Acknowledgments

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 21-79-10394.

The research was carried out with financial support of Russian Science Foundation (RSF) grant No. 21-79-10394.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pfeiffer T. V., Feng J., Schmidt-Ott A. New developments in spark production of nanoparticles // Advanced Powder Technology. 2014. V. 25. P. 56–70. DOI: 10.1016/j.ap.2013.12.005.

2. Efimov A. A., Arsenov P. V., Borisov V. I., Buchnev A. I., Lizunova A. A., Korniyushin D. V., Tikhonov S. S., Musaev A. G., Urazov M. N., Shcherbakov M. I., Spirin D. V., Ivanov V. V. Synthesis of nanoparticles by spark discharge as a facile and versatile technique of preparing highly conductive Pt nano-ink for printed electronics // *Nanomaterials*. 2021. V. 11, Iss. 1. Article number 234. DOI: 10.3390/nano11010234.
3. Efimov A. A., Korniyushin D. V., Buchnev A. I., Kameneva E. I., Lizunova A. A., Arsenov P. V., Varfolomeev A. E., Pavzderin N. B., Nikonov A. V., Ivanov V. V. Fabrication of conductive and gas-sensing microstructures using focused deposition of copper nanoparticles synthesized by spark discharge // *Applied Sciences*. 2021. V. 11, Iss. 13. Article number 5791. DOI: 10.3390/app11135791.
4. Bishwakarma H., & Das A. K. Synthesis of zinc oxide nanoparticles through hybrid machining process and their application in supercapacitors // *Journal of Electronic Materials*. 2020. V. 49. P. 1541–1549. DOI: 10.1007/s11664-019-07835-x.
5. Vasiliev A. A., Varfolomeev A. E., Volkov I. A., Simonenko N. P., Arsenov P. V., Vlasov I. S., Ivanov V. V., Pisyakov A. V., Lagutin A. S., Jahatspanian I. E., Maeder Th. Reducing humidity response of gas sensors for medical applications: Use of spark discharge synthesis of metal oxide nanoparticles // *Sensors*. 2018. V. 18, Iss. 8. Article number 2600. DOI: 10.3390/s18082600.
6. Tien D. C., Tseng K. H., Liao C. Y., Tsung T. T. Colloidal silver fabrication using the spark discharge system and its antimicrobial effect on *Staphylococcus aureus* // *Medical engineering & physics*. 2008. V. 30, Iss. 8. P. 948–952. DOI: 10.1016/j.medengphy.2007.10.007.
7. Messing M. E., Westerstrom R., Mueller B. O., Blomberg S., Gustafson J., Andersen J. N., Lundgren E., Rijn R., Balmes O., Bluhm H., Deppert K. Generation of Pd model catalyst nanoparticles by spark discharge // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2010. V. 114 (20). P. 9257–9263. DOI: 10.1021/jp101390a.
8. Ahmad S., Laiho P., Zhang Q., Jiang H., Hussain A., Liao Y., Kauppinen E. I. Gas phase synthesis of metallic and bimetallic catalyst nanoparticles by rod-to-tube type spark discharge generator // *Journal of Aerosol Science*. 2018. V. 123. P. 208–218. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2018.05.011.
9. Villy L. P., Kohut A., Kéri A., Béltéki Á., Radnóczy G., Fogarassy Z., Geretovszky Z. Continuous spark plasma synthesis of Au/Co binary nanoparticles with tunable properties // *Scientific Reports*. 2022. V. 12, Iss. 1. Article number 18560. DOI: 10.1038/s41598-022-22928-0.
10. Rhee C. K., Maksimov A. D., Beketov I. V., Medvedev A. I., Murzakaev A. M. Features of nickel nanoparticles structure synthesized by the spark discharge method // *J. Korean Powder Metall. Inst.* 2020. V. 27, No. 6. P. 464–467. DOI: 10.4150/KPMI.2020.27.6.464.
11. Korniyushin D., Musaev A., Patarashvili A., Buchnev A., Arsenov P., Ivanov M. Ivanov V. Effect of the Gas Temperature on Agglomeration of Au Nanoparticles Synthesized by Spark Discharge and Their Application in Surface-Enhanced Raman Spectroscopy // *Metals*. 2023. V. 13, No. 2. Article number 301. DOI: 10.3390/met13020301.
12. Максимов А. Д., Бекетов И. В., Медведев А. И., Мурзакаев А. М., Фаренбрух, С. А. Получение нанопорошка оксида олова методом искрового разряда с управляемым средним размером частиц // *Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects*. 2022. С. 485–488. DOI: 10.56761/EFRE2022.S4-P-050101.
13. Mylnikov D., Efimov A., Ivanov V. Measuring and optimization of energy transfer to the interelectrode gaps during the synthesis of nanoparticles in a spark discharge // *Aerosol Science and Technology*. 2019. V. 53, No. 12. P. 1393–1403. DOI: 10.1080/02786826.2019.1665165.
14. Maksimov A. D., Beketov I. V., Bazeev A. V., Azarkevich E. I., Medvedev A. I., Choloh S. O., Rasmetyeva A. V. Measuring the discharge energy in the installation of nanoparticles synthesis by the spark discharge method // *AIP Conference Proceedings*. 2020. V. 2313, No. 1. Article number 040002. DOI: 10.1063/5.0032582.
15. Zygo. URL: <https://www.zygo.com>.
16. Maksimov A. D., Beketov I. V., Bagazeev A. V., Azarkevich E. I., Medvedev A. I., Choloh S. O., Murzakaev A. M. Preparation of metal oxide nanopowders by the spark discharge method // *AIP Conference Proceedings*. 2019. V. 2174, Iss. 1. DOI: 10.1063/1.5134188.
17. Березин И. С., Жидков Н. П. Методы вычислений. 2-е изд. М.: Физматлит, 1962. Т. I. 620 с.
18. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1978. 832 с.
19. Мальцев Д. П. Выбор метода для функции интерполяции. URL: <https://files.scienceforum.ru/pdf/2020/5ee1f4f775cba.pdf>.
20. Potter D. *Computational Physics*. London: John Wiley & Sons, 1973. P. 304.
21. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1977. 408 с.
22. Бекетов И. В., Багазеев А. В., Азаркевич Е. И., Колеух Д. С. Исследование электродных пятен от искрового разряда с помощью интерференционного микроскопа // *Известия вузов. Физика*. 2018. Т. 61, № 9/2. С. 161–165.
23. Тюрин Ю. Н., Макаров А. А. Анализ данных на компьютере. М.: ИНФРА-М, 2002. 528 с.