

УДК 539.215.2

doi: 10.21685/2072-3040-2025-3-9

Модификация гранулометрического состава ультрадисперсных порошков серебра

К. Н. Нищев¹, М. И. Новопольцев², С. Г. Кострюков³,
А. А. Пыненков⁴, Е. Н. Лютова⁵, Е. В. Безрукова⁶

^{1,2,3,4,5,6}Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва, Саранск, Россия

¹nishchev@inbox.ru, ²novopol@inbox.ru, ³kostryukov_sg@mail.ru,
⁴alekspyn@yandex.ru, ⁵ekat.lyutova@yandex.ru, ⁶tadaakiyattsu@gmail.com

Аннотация. Актуальность и цели. В современном производстве приборов силовой электроники для низкотемпературного соединения их конструкционных элементов применяется технология спекания (синтеринга) с использованием специальных паст на основе ультрадисперсных порошков серебра. Ключевой проблемой при изготовлении таких паст является агломерация частиц серебра в порошке. Цель – разработка способов модификации гранулометрического состава порошков серебра, приводящих к увеличению в них доли субмикронных частиц. Материалы и методы. Проведено исследование ультрадисперсного порошка серебра отечественного производства. Гранулометрический состав порошка определялся методом лазерной дифракции с использованием гранулометра SALD-3101. Для измерений изготавливались суспензии исследуемого порошка в изопропиловом спирте с концентрациями 50 мкг/мл и 75 мг/мл. Суспензии подвергались обработке ультразвуком частотой 35 кГц в ультразвуковой ванне ПСБ-5735-05. Результаты. Установлено, что исходный порошок серебра состоял из двух фракций частиц размером от 0,5 до 2,0 мкм и от 10 до 500 мкм. В результате ультразвуковой (УЗ) обработки низкоконцентрированной суспензии порошка (50 мкг/мл) в течение 80 мин объемная доля частиц субмикронной фракции повышается с 18 до 60 %. Длительная (4 ч и более) УЗ-обработка высококонцентрированной суспензии (75 мг/мл) не приводит к появлению в ней частиц серебра размером менее 1 мкм. Такие частицы появляются в суспензии при добавлении в нее миристиновой кислоты в качестве диспергатора с последующей УЗ-обработкой. Разбавление суспензии изопропиловым спиртом до концентрации 50 мкг/мл с последующей УЗ-обработкой позволяет увеличить объемную долю частиц серебра размером менее 1 мкм до 70 %. Выводы. Разработан способ модификации гранулометрического состава ультрадисперсных порошков серебра, позволяющий увеличить объемную долю субмикронных частиц до 70 %.

Ключевые слова: ультрадисперсный порошок серебра, гранулометрический состав, агломерация, диспергатор, миристиновая кислота, ультразвуковая обработка

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код научной темы FZRS-2025-0002) в рамках государственного задания ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва».

Для цитирования: Нищев К. Н., Новопольцев М. И., Кострюков С. Г., Пыненков А. А., Лютова Е. Н., Безрукова Е. В. Модификация гранулометрического состава ультрадисперсных порошков серебра // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2025. № 3. С. 119–131. doi: 10.21685/2072-3040-2025-3-9

Modification of granulometric composition of ultrafine silver powders

K.N. Nishchev¹, M.I. Novopoltsev², S.G. Kostryukov³,
A.A. Pynenkov⁴, E.N. Lyutova⁵, E.V. Bezrukova⁶

^{1,2,3,4,5,6}Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

¹nishchev@inbox.ru, ²novopol@inbox.ru, ³kostryukov_sg@mail.ru,
⁴alekspyn@yandex.ru, ⁵ekat.lyutova@yandex.ru, ⁶tadaakiyattsu@gmail.com

Abstract. *Background.* In the modern production of power electronics devices, sintering technology is used for low-temperature connection of their structural elements using special pastes based on ultrafine silver powders. The key problem in the manufacture of such pastes is the agglomeration of silver particles in the powder. The purpose of the work was to develop methods for modifying the granulometric composition of silver powders, leading to an increase in the proportion of submicron particles in them. *Materials and methods.* The work investigated ultrafine silver powder of domestic production. The granulometric composition of the powder was determined by laser diffraction using a SALD-3101 granulometer. For measurements, suspensions of the studied powder in isopropyl alcohol with concentrations of 50 $\mu\text{g}/\text{ml}$ and 75 mg/ml were prepared. Suspensions were subjected to ultrasonic treatment at a frequency of 35 kHz in a PSB-5735-05 ultrasonic bath. *Results.* It was found that the original silver powder consisted of two fractions of particles with sizes from 0.5 to 2.0 μm and from 10 to 500 μm . As a result of ultrasonic (US) treatment of a low-concentration powder suspension (50 $\mu\text{g}/\text{ml}$) for 80 minutes, the volume fraction of submicron fraction particles increased from 18 to 60%. Long-term (4 hours or more) US treatment of a highly concentrated suspension (75 mg/ml) did not result in the appearance of silver particles smaller than 1 μm in it. Such particles appeared in the suspension upon addition of myristic acid as a dispersant, followed by US-treatment. Dilution of the suspension with isopropyl alcohol to a concentration of 50 $\mu\text{g}/\text{ml}$, followed by US-treatment, made it possible to increase the volume fraction of silver particles with sizes less than 1 μm to 70%. *Conclusions.* A method has been developed for modifying the granulometric composition of ultrafine silver powders, which makes it possible to increase the volume fraction of submicron particles to 70%.

Keywords: ultrafine silver powder, granulometric composition, agglomeration, dispersant, myristic acid, ultrasonic treatment

Financing: this work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (scientific topic code FZRS-2025-0002) (scientific topic code FZRS-2025-0002) as part of the state assignment of the Ogarev Mordovia State University.

For citation: Nishchev K.N., Novopoltsev M.I., Kostryukov S.G., Pynenkov A.A., Lyutova E.N., Bezrukova E.V. Modification of granulometric composition of ultrafine silver powders. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences.* 2025;(3):119–131. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3040-2025-3-9

Введение

Основные параметры силовых полупроводниковых приборов (СПП) и их надежность определяются не только свойствами полупроводниковых структур, но и в значительной степени технологией соединения функциональных и конструкционных элементов СПП. В настоящее время в силовой электронике для соединения функциональных и конструкционных элементов приборов широко используется технология низкотемпературного спекания (*Low-Temperature Joint Technique – LTJT*) [1–3]. *LTJT* представляет собой технологический способ соединения электрически активной кремниевой струк-

туры с металлическим или композитным термокомпенсатором (обеспечивающим передачу тепловых потерь от кремниевой структуры к охладителю) путем их спекания (синтеринга) с использованием специальных серебросодержащих паст. При этом температура синтеринга и прилагаемое давление определяются составом пасты и условиями ее приготовления. Получаемая в результате спекания структура является основным активным полупроводниковым элементом, определяющим выходные электрические и тепловые характеристики СПП. Полупроводниковые элементы СПП должны одновременно обладать минимальными электрическими и тепловыми сопротивлениями, низкой индуктивностью, способностью эффективно отводить возникающие в кремниевых полупроводниковых структурах потери мощности без заметной разницы температур на полупроводниковом элементе и поверхности корпуса. Кроме того, межэлементные соединения должны обеспечивать механическую прочность приборам в широком диапазоне температур и циклических нагрузках мощности. Качество межэлементных соединений в конечном счете определяется свойствами серебросодержащей пасты, используемой для соединения элементов конструкции СПП методом низкотемпературного спекания. Поэтому разработка технологии получения серебросодержащих паст с заданными эксплуатационными характеристиками является актуальной задачей современной силовой электроники.

Многочисленными исследованиями, проведенными ранее, установлено, что одной из ключевых проблем при получении мелкодисперсных серебросодержащих паст является агломерация частиц порошка серебра, негативно влияющая на свойства получаемой пасты. В связи с этим целью настоящей работы являлась разработка способов модификации гранулометрического состава ультрадисперсных порошков серебра, используемых при получении серебросодержащих паст для низкотемпературного соединения элементов силовых полупроводниковых приборов.

Материалы и методы

В настоящей работе в качестве исследуемого использовался ультрадисперсный порошок серебра, полученный методом электрического взрыва проводника [4]. Согласно экспериментальным данным [5, 6], ультрадисперсные порошки, получаемые методом электрического взрыва проволоки, обладают значительной избыточной энергией. Например, порошки алюминия со средним размером частиц 500–800 нм имеют избыточную энергию 100–200 кДж/моль, а порошки серебра со средним размером частиц порядка 120 нм обладают избыточной энергией 40–80 кДж/моль, что в несколько раз превышает теплоту плавления массивного вещества.

По данным производителя, массовые доли фракций порошка составляют: 100 % с размерами частиц менее 400 нм; 90 % с размерами частиц менее 300 нм и 50 % с размерами частиц менее 120 нм. При хранении в таких порошках серебра образуются агломераты размером до сотен микрон, которые впоследствии могут препятствовать однородному смешиванию пасты, изготовленной на их основе.

Гранулометрический состав исследуемых порошков серебра определялся методом лазерной дифракции с использованием гранулометра SALD-3101. Для проведения гранулометрических измерений приготавливались суспензии исследуемого порошка в изопропиловом спирте с концентрацией

50 мкг/мл и 75 мг/мл. Приготовленные суспензии подвергались обработке ультразвуком частотой 35 кГц в ультразвуковой ванне ПСБ-5735-05м с генератором мощностью 150 Вт.

Ультразвуковые волны, воздействуя на суспензию, создают в ней кавитацию, акустические течения и другие эффекты, которые способствуют разрушению агрегатов частиц, повышению однородности смеси и ускорению различных процессов, протекающих в суспензии. Кавитация создает микроскопические пузырьки, которые при схлопывании генерируют локальные ударные волны и силы сдвига. Эти силы разрушают агломераты твердых частиц, разделяя их на более мелкие частицы и равномерно распределяя их в жидкости.

Результаты и обсуждение

На первом этапе исследований определялось влияние ультразвуковой (УЗ) обработки на гранулометрический состав исходного порошка серебра. Гранулометрический состав порошков представляют обычно в виде интегральной (кумулятивной) зависимости объемной доли частиц порошка $Q_3(D)$ от их диаметра D . Наряду с интегральной дополнительно приводят дифференциальную кривую распределения частиц по их размерам $p_3(D)$.

На рис. 1 представлены результаты измерения гранулометрического состава суспензии исходного порошка серебра в изопропиловом спирте с концентрацией 50 мкг/мл.

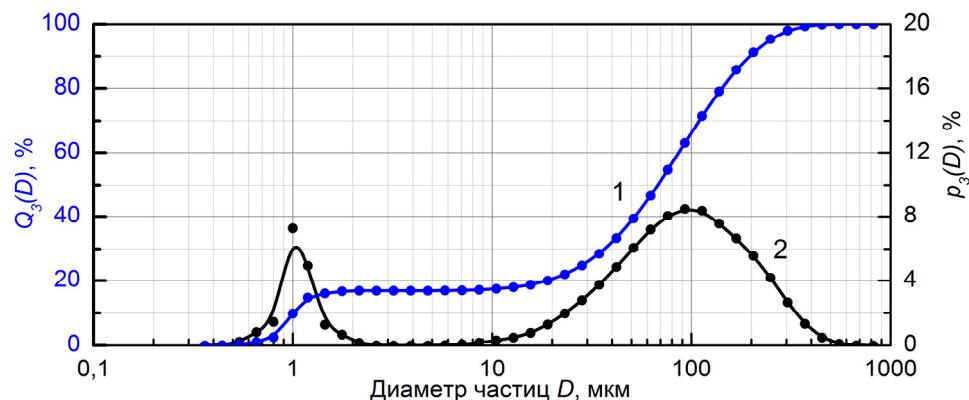


Рис. 1. Гранулометрический состав суспензии исходного порошка серебра в изопропиловом спирте. Концентрация суспензии – 50 мкг/мл; кривая 1 – $Q_3(D)$, кривая 2 – $p_3(D)$

Из рис. 1 следует, что гранулометрический состав исходного порошка включал в себя две фракции частиц. В первую (субмикронную) фракцию входили частицы размером от 0,5 до 2 мкм. Их объемная доля составляла 18 %. Другая (крупноразмерная) фракция содержала частицы размером от 10 до 500 мкм. Обе фракции представляли собой агломераты более мелких частиц серебра. На рис. 2 приведены изображения поверхности исследуемого исходного порошка, полученные с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ).

На рис. 3 приведены результаты измерений гранулометрического состава суспензии исходного порошка серебра в изопропиловом спирте после

ее УЗ-обработки в течение 80 мин. Концентрация исследуемой суспензии составляла 50 мкг/мл.

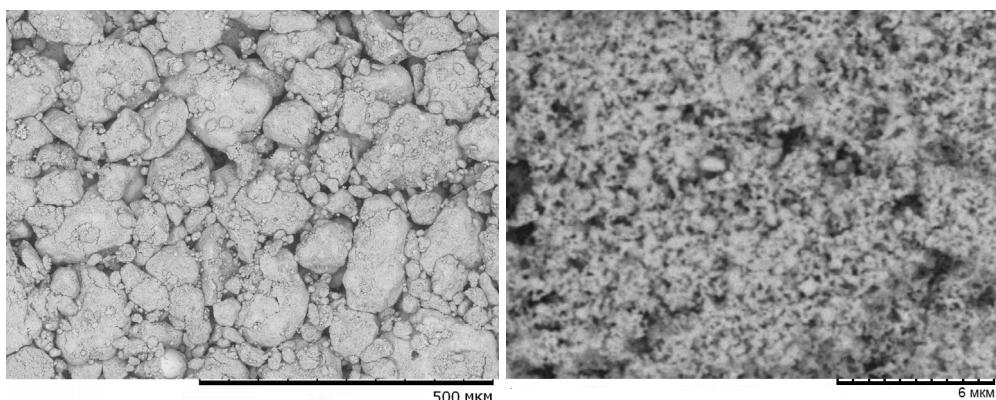


Рис. 2. РЭМ-изображения поверхности агломератов исходного порошка серебра

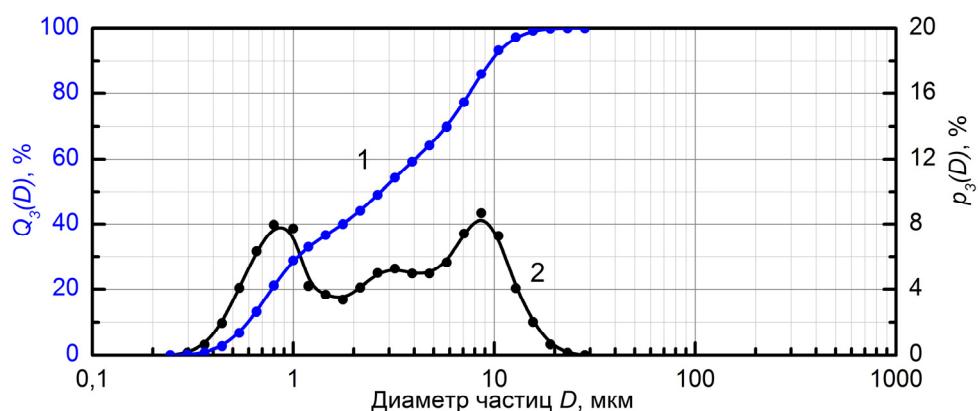


Рис. 3. Гранулометрический состав суспензии исходного порошка серебра в изопропиловом спирте после УЗ-обработки в течение 80 мин; концентрация суспензии – 50 мкг/мл; кривая 1 – $Q_3(D)$, кривая 2 – $p_3(D)$

Из рис. 3 следует, что в результате УЗ-обработки суспензии в течение 80 мин размер наиболее мелких частиц субмикронной фракции уменьшался с 500 до 300 нм. При этом доля частиц размером менее 2 мкм увеличивалась до 42 %, а ранее наблюдавшаяся крупноразмерная фракция частиц полностью исчезала и появлялась новая (микронная) фракция частиц размером от 2 до 30 мкм. Дальнейшее увеличение длительности УЗ-обработки суспензии не приводило к существенному изменению ее гранулометрического состава. РЭМ-изображения агломератов частиц серебра, образовавшихся в результате такой обработки, приведены на рис. 4.

Представленные экспериментальные результаты подтверждают, что крупные частицы исходного порошка серебра размером от 10 до 500 мкм представляли собой агломераты более мелких частиц.

В оптических гранулометрических измерениях обычно используют сильно разбавленные суспензии. В наших измерениях для определения гранулометрического состава исходного порошка использовались суспензии

с концентрацией 50 мкг/мл. Высоконаполненные серебросодержащие пасты, используемые для соединения функциональных элементов силовых полупроводниковых приборов, представляют собой высококонцентрированные суспензии, содержащие в своем составе более 70 масс.% частиц порошка серебра. Поэтому в настоящей работе исследовалось влияние УЗ-обработки на гранулометрический состав порошка серебра в виде его суспензии в изопропиловом спирте с концентрацией 75 мг/мл.

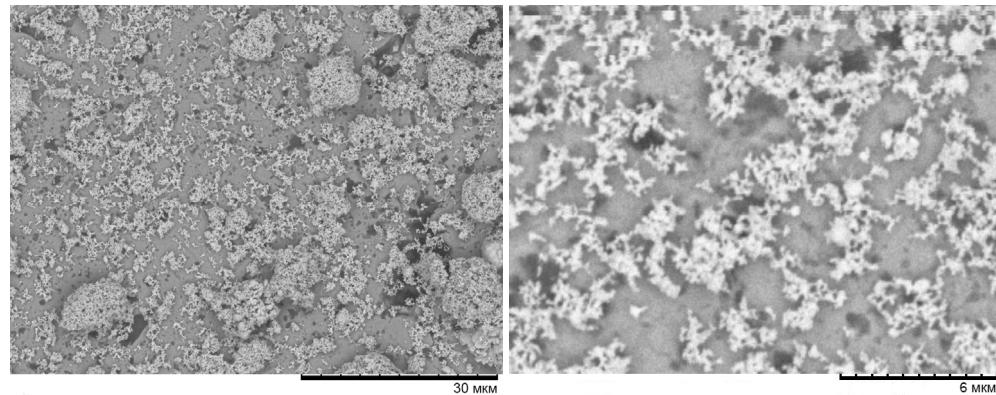


Рис. 4. РЭМ-изображения агломератов исходного порошка серебра, подвергнутого УЗ-обработке в изопропиловом спирте в течение 80 мин

В результате проведенных исследований было установлено (рис. 5), что в высоконаполненных суспензиях, даже после их длительной (в течение 4 ч и более) УЗ-обработки, фракция частиц серебра размером менее 1 мкм не возникала. В гранулометрическом составе таких суспензий были зарегистрированы лишь частицы размером от 6 до 60 мкм. Это может быть объяснено тем, что с увеличением концентрации частиц твердой фазы в суспензии снижается диспергирующая способность УЗ-обработки, так как при высокой концентрации (более 10 масс.%) кавитационные эффекты ослабевают из-за поглощения энергии частицами [7].

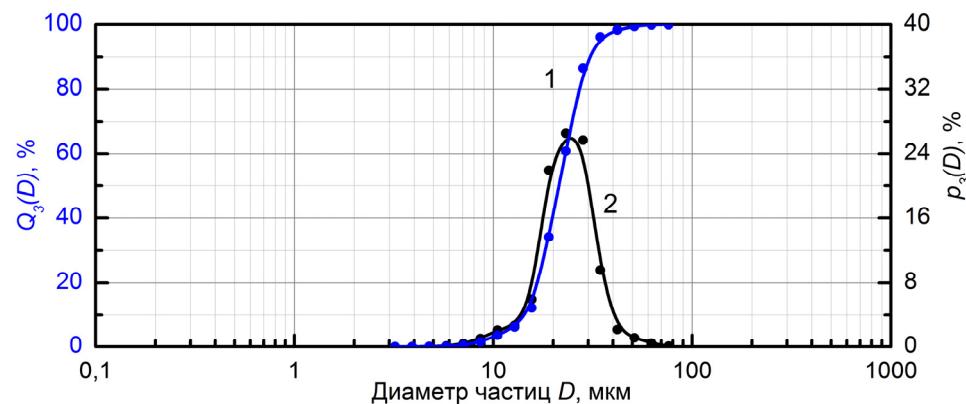


Рис. 5. Гранулометрический состав исходного порошка серебра в суспензии в изопропиловом спирте после УЗ-обработки в течение 4 ч; концентрация частиц серебра в суспензии – 75 мг/мл; кривая 1 – $Q_3(D)$, кривая 2 – $p_3(D)$

В процессе УЗ-обработки, наряду с процессом разрушения агломератов наночастиц серебра, происходит процесс образования новых агломератов. Регистрируемый гранулометрический состав суспензии является результатом данных процессов, между которыми устанавливается динамическое равновесие. Для смещения этого равновесия в сторону процессов диспергирования агломератов используются специальные химические вещества – диспергаторы, которые препятствуют агрегации наночастиц серебра [8–10]. В качестве диспергаторов могут использоваться высшие карбоновые кислоты, образующие на поверхности наночастиц серебра защитный гидрофобный слой, предотвращающий агрегацию и окисление частиц.

Стабилизация наночастиц серебра с помощью высших карбоновых кислот происходит за счет комбинации химической адсорбции и стерического отталкивания. За счет химической адсорбции карбоновые кислоты адсорбируются на поверхности частиц серебра через взаимодействие между карбоксильной группой ($-\text{COOH}$) и атомами серебра, а углеводородные «хвосты» высших карбоновых кислот создают защитный слой толщиной 1–3 нм в зависимости от длины алкильной цепи, который препятствует агрегации частиц. Наиболее эффективны карбоновые кислоты с длинными алкильными цепями от C12 до C18, причем насыщенные кислоты (миристиновая, пальмитиновая, стеариновая) дают защитный слой, имеющий упорядоченную структуру, что повышает стабильность частиц.

В настоящей работе в качестве диспергатора для модификации гранулометрического состава исследуемого нанопорошка серебра использовалась миристиновая кислота ($\text{C}_{13}\text{H}_{27}\text{COOH}$). Выбор миристиновой кислоты был обусловлен следующими ее особенностями. Во-первых, миристиновая кислота имеет достаточно длинный углеводородный «хвост» (C13), который обеспечивает эффективную стерическую стабилизацию наночастиц, предотвращая их агрегацию. Во-вторых, миристиновая кислота по сравнению со стеариновой кислотой ($\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$), обладает меньшей молекулярной массой, что способствует ее более полному удалению при термообработке. Сравнительно низкая температура кипения (326–327 °C) гарантирует полное испарение и выгорание органической добавки в процессе спекания, минимизируя риск возникновения остаточного углерода.

Стеариновая кислота обеспечивает более сильное стабилизирующее действие благодаря более длинному углеводородному «хвосту» (C17). Однако высокая температура кипения (376 °C) делает ее менее подходящей для процессов, требующих последующей термообработки ввиду неполного выгорания органики и загрязнения материала углеродными включениями. Миристиновая кислота оптимально сочетает достаточную диспергирующую способность и удобство ее удаления при нагревании.

На следующем этапе исследований определялось влияние концентрации миристиновой кислоты и длительности УЗ-обработки на гранулометрический состав суспензий порошка серебра в изопропиловом спирте.

Концентрация миристиновой кислоты (масс.%) определялась отношением ее массы к общей массе порошка серебра и миристиновой кислоты в суспензии.

На рис. 6 приведены результаты исследования влияния длительности УЗ-обработки суспензии исходного порошка серебра в изопропиловом спир-

те, содержащей 1 масс.% миристиновой кислоты на гранулометрический состав порошка. Концентрация супензии составляла 75 мг/мл.

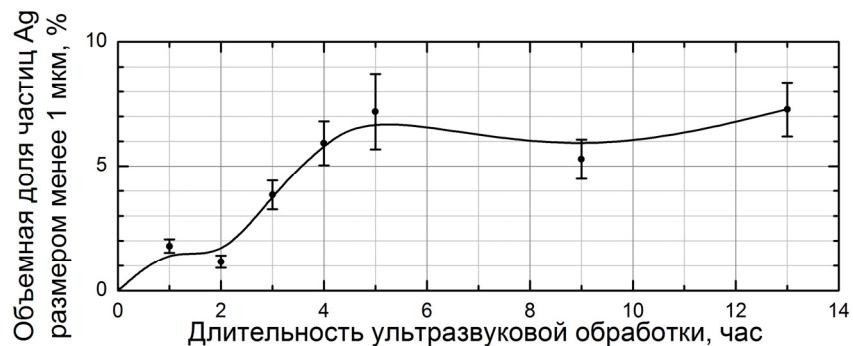


Рис. 6. Влияние длительности УЗ-обработки супензии исходного порошка серебра в изопропиловом спирте с добавлением 1 масс.% миристиновой кислоты на гранулометрический состав порошка

Как следует из рис. 6, объемная доля частиц серебра размером менее 1 мкм не превышала 7 % даже после УЗ-обработки супензии в течение 13 ч. Для достижения данного значения относительного объема частиц было достаточно УЗ-обработки супензии в течение 4 ч. В качестве примера на рис. 7 приведены результаты измерения гранулометрического состава порошка в супензии, содержащей 1 масс.% миристиновой кислоты. Длительность УЗ-обработки супензии составляла 4 ч.

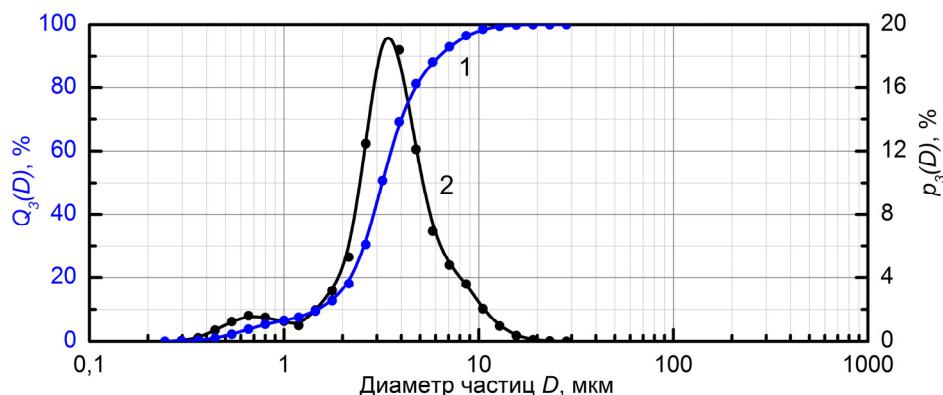


Рис. 7. Гранулометрический состав порошка в супензии, содержащей 1 масс.% миристиновой кислоты; Концентрация супензии – 75 мг/мл; кривая 1 – $Q_3(D)$, кривая 2 – $p_3(D)$

Сравнение результатов измерений, приведенных на рис. 5 и 7, показало, что добавление в супензию миристиновой кислоты существенно влияло на гранулометрический состав порошка. При добавлении 1 масс.% миристиновой кислоты в супензию и ее последующей УЗ-обработке в течение 4 ч в порошке возникали две фракции частиц, одна из них с частицами размером менее 1 мкм (6 %), а другая – от 1 до 15 мкм (94 %).

На рис. 8 (кривая 1) представлены результаты исследования влияния концентрации миристиновой кислоты в суспензии частиц порошка серебра в изопропиловом спирте на гранулометрический состав порошка. Длительность УЗ-обработки – 4 ч.

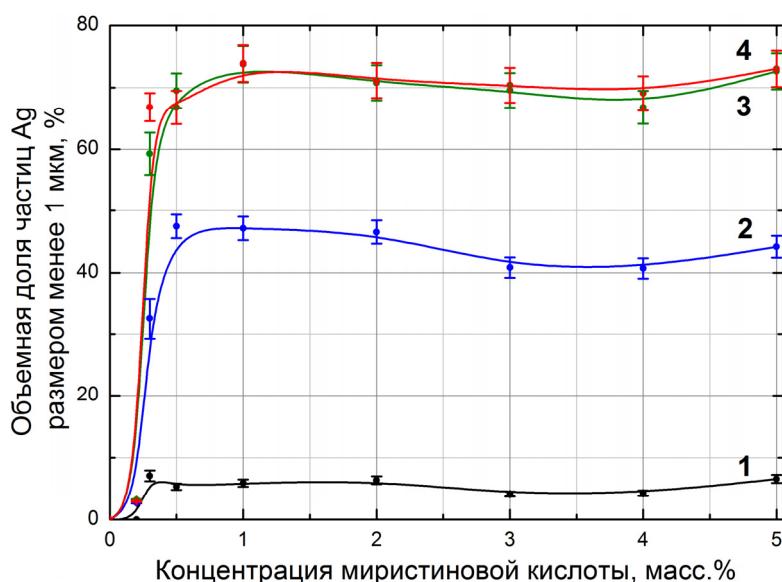


Рис. 8. Влияние концентрации миристиновой кислоты и длительности дополнительной УЗ-обработки суспензии порошка серебра в изопропиловом спирте на гранулометрический состав порошка; длительность дополнительной УЗ-обработки: кривая 1 – 0 мин; кривая 2 – 0,5 мин; кривая 3 – 2 мин; кривая 4 – 20 мин

Из рис. 8 (кривая 1) следует, что в интервале концентраций миристиновой кислоты от нуля до 5 масс.% объемная доля частиц серебра размером менее 1 мкм в суспензии не превышала 7 %. Минимальная концентрация диспергатора, необходимая для достижения данного значения, составляла 0,5 масс.%.

Поскольку с уменьшением концентрации частиц твердой фазы в суспензии диспергирующая способность УЗ-обработки возрастает, то возможным способом увеличения доли субмикронной фракции частиц серебра в порошке может быть дополнительная УЗ-обработка разбавленной до концентрации 50 мкг/мл суспензии. Результаты исследования влияния концентрации миристиновой кислоты и длительности дополнительной УЗ-обработки на гранулометрический состав порошка приведены на рис. 8 (кривые 2–4).

Из рис. 8 следует, что дополнительная УЗ-обработка сильноразбавленной суспензии с добавлением 0,5 масс.% миристиновой кислоты в течение уже 2 мин позволяло увеличить объемную долю частиц серебра размером менее 1 мкм до 70 %. Дальнейшее увеличение длительности дополнительной УЗ-обработки суспензии не приводило к росту объемной концентрации частиц серебра субмикронного размера.

Результаты измерения гранулометрического состава суспензии, содержащей 0,5 масс.% миристиновой кислоты и подвергнутой дополнительной УЗ-обработке длительностью 2 мин, приведены на рис. 9.

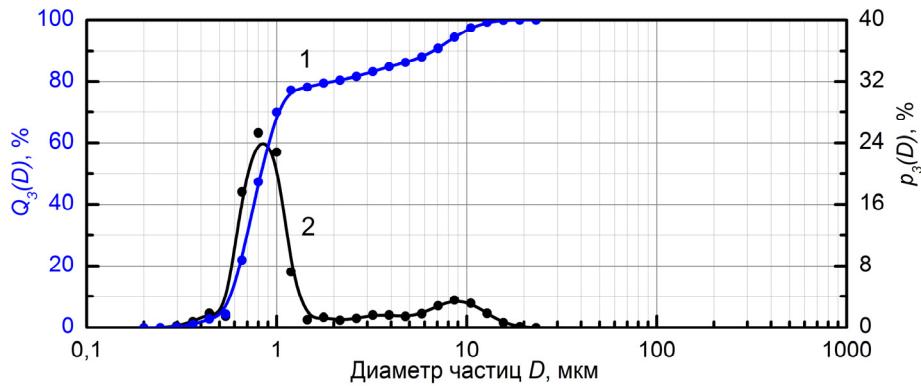


Рис. 9. Гранулометрический состав супензии порошка серебра в изопропиловом спирте, содержащей 0,5 масс.-% миристиновой кислоты и подвергнутой дополнительной УЗ-обработке длительностью 2 мин; концентрация супензии – 50 мкг/мл; кривая 1 – $Q_3(D)$, кривая 2 – $p_3(D)$

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что гранулометрический состав коммерческих ультрадисперсных порошков серебра может быть модифицирован путем ультразвуковой обработки супензий этих порошков в изопропиловом спирте с добавлением миристиновой кислоты в качестве диспергатора. Гранулометрический состав исследуемого порошка серебра включал в себя две фракции: с частицами размером от 0,5 до 2 мкм и от 10 до 500 мкм. Объемная доля частиц мелкой фракции в порошке составляла 18 %. Ультразвуковая обработка супензии исходного порошка в изопропиловом спирте с концентрацией 50 мкг/мл в течение 80 мин приводит к увеличению объемной доли частиц размером менее 2 мкм до 60 %. В высококонцентрированной (75 мг/мл) супензии порошка серебра даже после длительной УЗ-обработки частицы размером менее 1 мкм не наблюдались. Добавление в супензию перед УЗ-обработкой миристиновой кислоты (0,5 масс.-%) в качестве диспергатора позволяет увеличить объемную долю частиц серебра размером менее 1 мкм до 6 %. Разбавление высококонцентрированной супензии порошка серебра, содержащей миристиновую кислоту, до концентрации 50 мкг/мл и ее последующая УЗ-обработка в течение 2 мин приводит к возрастанию объемной доли частиц серебра размером менее 1 мкм до 70 %.

Список литературы

1. Gobl C., Beckedahl P., Braml H. Low Temperature Sinter Technology Die Attachment for Automotive Power Electronic Applications // Proc. Automotive Power Electronics. Paris, 2006. C. 1–5.
2. Матюхин С. И., Сурма А. М., Ставцев А. В., Титушкин Д. А., Писарев А. А. Применение технологии низкотемпературного спекания (синтеринга) для улучшения динамических характеристик мощных быстродействующих диодов и тиристоров // Наноинженерия. 2015. № 12. С. 11–16.
3. Grishanin A., Martynenko V., Khapugin A., Malygin M., Frolov O., Nishchev K., Novopoltsev M. Reliability Improving of Power Semiconductor Discharge Switch by Means of LTJT Technology // PCIM Europe 2017, 16–18 May. Nuremberg, Germany, 2017. P. 756–760.

4. Бирюков Ю. А., Бузник В. М., Дунаевский Г. Е. [и др.]. Ультрадисперсные и наноразмерные порошки: создание, строение, производство и применение / под ред. В. М. Бузника. Томск : Изд-во науч.-техн. литературы. 2009. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000471544>
5. Ильин А. П. Об избыточной энергии ультрадисперсных порошков, полученных методом взрыва проволок // Физика и химия обработки материалов. 1994. № 3. С. 94–97.
6. Tepper F., Lerner M., Ginley D. Metallic Nanopowders // Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology. Marcel Dekker, Inc., New York 2004. P. 1921–1933.
7. Utomo A., Alderman N. J., Padron G. A., Özcan-Taşkin N. G. Effects of particle concentration and dispersion rheology on the breakup of nanoparticle clusters through ultrasonication // Chemical Engineering Research and Design. 2023. Vol. 191. P. 301–312. doi: 10.1016/j.cherd.2023.01.041
8. Abbas R., Luo J., Qi X., Naz A., Khan I. A., Liu H., Yu S., Wei J. Silver Nanoparticles: Synthesis, Structure, Properties and Applications // Nanomaterials. 2024. Vol. 14 (17). P. 1425. doi: 10.3390/nano14171425
9. Le A. T., Tam L. T., Tam P. D., Huy P. T., Huy T. Q., Hieu N. V., Kudrinskiy A. A., Krutakov Yu. A. Synthesis of oleic acid-stabilized silver nanoparticles and analysis of their antibacterial activity // Materials Science and Engineering. 2010. Vol. 30 (6). P. 910–916. doi: 10.1016/j.msec.2010.04.009
10. Dong C., Zhang X., Cai H., Cao C., Zhou K., Wang X., Xiao X. Synthesis of stearic acid-stabilized silver nanoparticles in aqueous solution // Advanced Powder Technology. 2016. Vol. 27 (6). P. 2416–2423. doi: 10.1016/j.apt.2016.08.018

References

1. Gobl C., Beckedahl P., Braml H. Low Temperature Sinter Technology Die Attachment for Automotive Power Electronic Applications. *Proc. Automotive Power Electronics*. Paris, 2006:1–5.
2. Matyukhin S.I., Surma A.M., Stavtsev A.V., Titushkin D.A., Pisarev A.A. Application of low-temperature sintering technology to improve the dynamic characteristics of high-power fast-acting diodes and thyristors. *Nanoizheneriya*. 2015;(12):11–16. (In Russ.)
3. Grishanin A., Martynenko V., Khapugin A., Malygin M., Frolov O., Nishchev K., Novopoltsev M. Reliability Improving of Power Semiconductor Discharge Switch by Means of LTJT Technology. *PCIM Europe 2017, 16–18 May*. Nuremberg, Germany, 2017:756–760.
4. Biryukov Yu.A., Buznik V.M., Dunayevskiy G.E. et al. *Ultradispersnye i nanorazmernyye poroshki: sozdaniye, stroyeniye, proizvodstvo i primeneniye = Ultrafine and nanoscale powders: creation, structure, production and application*. Tomsk: Izd-vo nauch.-tekhn. literature. 2009. (In Russ.). Available at: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000471544>
5. Ilin A.P. On the excess energy of ultrafine powders obtained by wire explosion method. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and chemistry of materials processing*. 1994;(3):94–97. (In Russ.)
6. Tepper F., Lerner M., Ginley D. Metallic Nanopowders. *Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology*. Marcel Dekker, Inc., New York, 2004:1921–1933.
7. Utomo A., Alderman N.J., Padron G.A., Özcan-Taşkin N.G. Effects of particle concentration and dispersion rheology on the breakup of nanoparticle clusters through ultrasonication. *Chemical Engineering Research and Design*. 2023;191:301–312. doi: 10.1016/j.cherd.2023.01.041
8. Abbas R., Luo J., Qi X., Naz A., Khan I.A., Liu H., Yu S., Wei J. Silver Nanoparticles: Synthesis, Structure, Properties and Applications. *Nanomaterials*. 2024;14(17):1425. doi: 10.3390/nano14171425

9. Le A.T., Tam L.T., Tam P.D., Huy P.T., Huy T.Q., Hieu N.V., Kudrinskiy A.A., Krutyakov Yu.A. Synthesis of oleic acid-stabilized silver nanoparticles and analysis of their antibacterial activity. *Materials Science and Engineering*. 2010;30(6):910–916. doi: 10.1016/j.msec.2010.04.009
10. Dong C., Zhang X., Cai H., Cao C., Zhou K., Wang X., Xiao X. Synthesis of stearic acid-stabilized silver nanoparticles in aqueous solution. *Advanced Powder Technology*. 2016;27(6):2416–2423. doi: 10.1016/j.apt.2016.08.018

Информация об авторах / Information about the authors

Константин Николаевич Нищев

кандидат физико-математических наук, доцент, директор Института научно-исследовательских технологий и новых материалов, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва (Россия, г. Саранск, ул. Большевистская, 68)

E-mail: nishchev@inbox.ru

Konstantin N. Nishchev

Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, director of the Institute of High Technologies and New Materials, Ogarev Mordovia State University (68 Bolshevikskaia street, Saransk, Russia)

Михаил Ильич Новопольцев

кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры физического материаловедения, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва (Россия, г. Саранск, ул. Большевистская, 68)

E-mail: novopol@inbox.ru

Mikhail I. Novopol'tsev

Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, leading researcher of the sub-department of physical materials science, Ogarev Mordovia State University (68 Bolshevikskaia street, Saransk, Russia)

Сергей Геннадьевич Кострюков

кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры фундаментальной химии и химической технологии, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва (Россия, г. Саранск, ул. Большевистская, 68)

E-mail: kostryukov_sg@mail.ru

Sergey G. Kostryukov

Candidate of chemical sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of fundamental chemistry and chemical technology, Ogarev Mordovia State University (68 Bolshevikskaia street, Saransk, Russia)

Александр Алексеевич Пыненков

младший научный сотрудник кафедры физического материаловедения, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва (Россия, г. Саранск, ул. Большевистская, 68)

E-mail: alekspyn@yandex.ru

Aleksandr A. Pynenkov

Junior researcher of the sub-department of physical materials science, Ogarev Mordovia State University (68 Bolshevikskaia street, Saransk, Russia)

Екатерина Николаевна Лютова

младший научный сотрудник кафедры
физического материаловедения,
Национальный исследовательский
Мордовский государственный
университет имени Н. П. Огарёва
(Россия, г. Саранск,
ул. Большевистская, 68)

E-mail: ekat.lyutova@yandex.ru

Ekaterina N. Lyutova

Junior researcher of the sub-department
of physical materials science,
Ogarev Mordovia State University
(68 Bolshevikskaia street, Saransk, Russia)

Елена Валерьевна Безрукова

кандидат химических наук, доцент
кафедры фундаментальной химии
и химической технологии,
Национальный исследовательский
Мордовский государственный
университет имени Н. П. Огарёва
(Россия, г. Саранск,
ул. Большевистская, 68)

E-mail: tadaakiyattsu@gmail.com

Elena V. Bezrukova

Candidate of chemical sciences, associate
professor of the sub-department
of fundamental chemistry and chemical
technology, Ogarev Mordovia State
University (68 Bolshevikskaia street,
Saransk, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 20.07.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 21.08.2025

Принята к публикации / Accepted 07.09.2025