

УДК 691.53
ББК 38.33

Виктор Александрович Зеленский,
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник,
Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова
Российской академии наук
(119991, Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 49)
e-mail: zelensky55@bk.ru

Сергей Фёдорович Забелин,
доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН,
Забайкальский государственный университет
(672039, Россия, г. Чита, ул.Александро-Заводская, 30)
e-mail: s.zabelin2012@yandex.ru

Совершенствование технологии синтеза нанопорошков серебра¹

Предложена новая технология синтеза высокодисперсных порошков серебра, сочетающая принципы коллоидной химии и порошковой металлургии. Представлены результаты исследований по двум методам улучшения функциональных характеристик наночастиц. Первая модификация технологии заключается в синтезе наноразмерных порошковых прекурсоров на основе серебра путём проведения химических реакций в растворах, содержащих нитрат серебра $AgNO_3$ и цитрат натрия $Na_3C_6H_5O_7$, и их последующим разложением в водном растворе при повышенной температуре (160 °С) и давлении (около 6 атмосфер) с выделением порошка чистого серебра. Вторая модификация позволяет синтезировать высокодисперсные порошки серебра композиционного состава (имеющих фракции нанопорошка с разными по размеру частицами серебра) без использования токсичных реагентов. Синтез наночастиц серебра проводили методом жидкофазного химического осаждения из растворов солей серебра, где реактивами служили соль нитрата серебра ($AgNO_3$, х. ч.), аммиак концентрированный (25 %), аскорбиновая кислота ($C_6H_8O_6$, х. ч.). Концентрация в водном растворе $AgNO_3$ составляла 0,05 моль/л, а концентрация аскорбиновой кислоты в пределах 0,025 моль/л – 0,5 моль/л. pH изменяли от 5 до 12.

Ключевые слова: наноструктурированные материалы, нанопорошки серебра, синтез прекурсоров серебра, восстановление нанопорошка серебра, метод осаждения из растворов, синтез композиционного порошка серебра, бимодальная структура материала.

Victor Aleksandrovich Zelensky,
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher,
Metallurgy and Materials Science Institute named after A. A. Baykov
the Russian Academy of Science
(49 Leninsky Ave, Moscow, Russia, 119991)
e-mail: aleksander.galakhov@yandex.ru

Sergey Fyodorovich Zabelin,
Doctor of Technical Sciences,
Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, Professor,
Transbaikal State University
(30 Aleksandro-Zavodskaya St., Chita, Russia, 672039)
e-mail: s.zabelin2012@yandex.ru

Improvement of Synthesis Technology of Silver Nanopowders²

The new synthesis technology of high-disperse silver powders, combining the principles of colloidal chemistry and powder metallurgy is offered. Results of researches on two methods of improvement of functional characteristics of nanoparticles are presented. The first modification

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-08-00124-а).

²The research is performed with the financial support of RFFR (project №12-08-00124-а).

of technology consists in synthesis of nanodimensional powder precursors on the basis of silver by carrying out chemical reactions in the solutions containing nitrate of $AgNO_3$ silver and citrate of $Na_3C_6H_5O_7$ sodium, and their subsequent decomposition in water solution at an increased temperature (160 °C) and pressure (about 6 atmospheres) with allocation of powder of pure silver. The second modification allows to synthesize high-disperse powders of silver of composite structure (having nanopowder fractions with particles of silver different in the size) without use of toxic reagents. Synthesis of nanoparticles of silver carried out a method of liquid-phase chemical sedimentation from solutions of salts of silver where as reactants served salt of nitrate of silver ($AgNO_3$, х. ч.) ammonia concentrated (25 %), ascorbic acid ($C_6H_8O_6$, х. ч.) Concentration in water $AgNO_3$ solution made 0,05 mol/l, and concentration of ascorbic acid within 0,025 mol/l – 0,5 mol/l. pH changed from 5 to 12.

Keywords: the nanostructured materials, silver nanopowders, synthesis of precursors of silver, restoration of nanopowder of silver, sedimentation method from solutions, synthesis of composite powder of silver, bimodal structure of a material.

Введение. Дисперсно-упрочнённые наноструктурированные электроконтактные материалы на основе серебряных порошков востребованы современной промышленностью (их использование имеет двойное назначение – электротехника, электроника и ОПК). Но существующие технологии синтеза высокодисперсных nanopорошков серебра имеют ряд серьезных недостатков: технологические, экологические и экономические [1; 2]. Поэтому проблема совершенствования технологии синтеза nanopорошков серебра на сегодня остается актуальной.

Наиболее эффективной технологией синтеза nanopорошков можно считать двухстадийный метод синтеза: на первой стадии получают наноразмерные порошковые прекурсоры, вторая стадия заключается в восстановлении полученных прекурсоров серебра в газовых средах, в разложении прекурсоров в растворах или жидкофазного химического осаждения из растворов солей серебра [2–4].

Используемые методы синтеза, условия их осуществления в значительной степени влияют на многие свойства образующихся частиц: электронную структуру и состояние поверхности, устойчивость и характер взаимодействия со средой, и, следовательно, на их поведение при приготовлении более сложных структур. Часто для получения зародышей наноструктур применяют методы, основанные на восстановлении ионов металлов в водных растворах в присутствии высокомолекулярных соединений и ПАВ в качестве стабилизаторов [5], и приёмы испарения и конденсации металлов. Морфология образующихся продуктов в большой степени зависит от выбора восстановителя и условий проведения реакции. В связи с быстрым ростом объёмов синтеза всё более важной становится задача применения экологически безопасных реагентов.

Так, широко применяемый для получения наночастиц благородных металлов боргидрид натрия весьма токсичен [6]. Такие реагенты, как глюкоза или аскорбиновая кислота являются экологически безопасными и биологически совместимыми веществами, однако для синтеза наночастиц серебра использовались редко. В частности, в работе [7] синтезировали наночастицы серебра размером менее 10 нм при восстановлении D-глюкозой в присутствии крахмала с помощью микроволнового излучения. В работе [8] предложена методика получения сферических частиц серебра в автоклаве восстановлением глюкозой в щелочной среде с использованием ПВП при 180 °C и получены наночастицы серебра размером примерно 80 нм. В работе [9] были получены частицы размером от 25 до 450 нм при восстановлении аммиачного комплекса серебра с помощью глюкозы, галактозы, мальтозы и лактозы при комнатной температуре, для активации восстановления использовали гидроксид натрия. Во всех упомянутых способах получают коллоидные растворы наночастиц серебра, которые требуют продолжительной и тщательной отмывки от побочных продуктов реакции из-за плохой фильтруемости и применения сложного оборудования.

В нашей работе при исследовании и аттестации синтезированных nanopорошков серебра и комбинированных порошков экспериментальные данные о составе, дисперсности (удельная поверхность, средний размер частиц) и форме частиц были выявлены с применением методов рентгенофазового анализа (РФА), который проводили на рентгеновском дифрактометре типа ДРОН-3,0, растровой электронной микроскопии (РЭМ) и химического анализа.

1. Восстановление органических прекурсоров серебра в растворах. Основываясь на результатах наших предшествующих исследований [2–4] проведены исследования по модификации

двухстадийного метода синтеза нанопорошков серебра. Модифицированный метод заключается в синтезе наноразмерных порошковых прекурсоров на основе серебра путём проведения химических реакций в растворах, содержащих нитрат серебра $AgNO_3$ и цитрат натрия $Na_3C_6H_5O_7$, и их последующим разложением в водном растворе при повышенной температуре и давлении с выделением порошка чистого серебра. Таким образом, на второй стадии процесса применённое ранее восстановление прекурсоров в водородо-азотной атмосфере [3; 4] было заменено на разложение в жидкой среде. Порошковые прекурсоры серебра состава $C_6H_5Ag_3O_7$ готовили разработанным на предыдущем этапе методом [3], при этом применяли повышенные концентрации растворов. Далее прекурсоры подвергали разложению в растворе дистиллированной воды при температуре $160\text{ }^\circ\text{C}$. Для сохранения воды в жидком агрегатном состоянии восстановление проводили при повышенном давлении (около 6 атмосфер) в газоплотном подогреваемом сосуде (схема установки на рис. 1), внутри которого вода и водяной пар находились в фазовом равновесии [10].

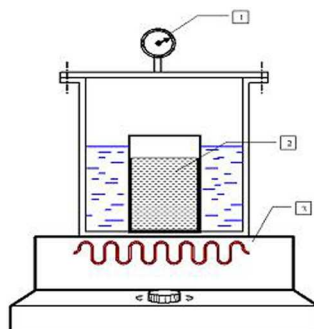


Рис. 1. Установка для термической обработки прекурсора в условиях повышенного давления:
1 – манометр; 2 – раствор прекурсора; 3 – нагреватель

Время обработки прекурсоров в восстановительном сосуде варьировалось от 5 до 60 мин. Рентгеновские исследования показали, что восстановление происходит уже при 10-минутной обработке. Внешний вид полученного порошка на рис. 2. Увеличение времени обработки приводит к слипанию частиц и образованию крупных агломератов (рис. 3).

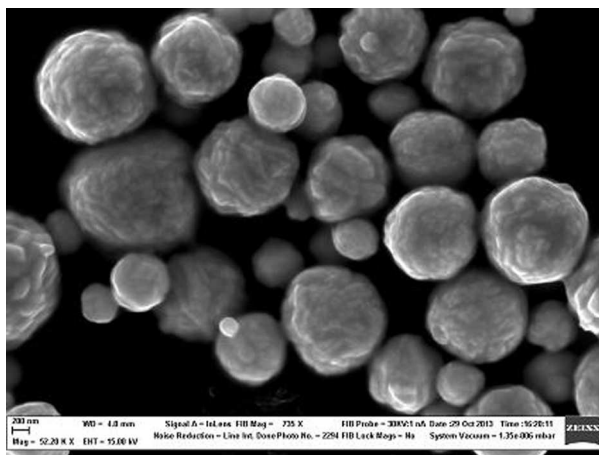


Рис. 2. Порошок, полученный разложением при $160\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 10 минут

Вакуумное восстановление порошков оксида серебра. Была предпринята попытка вакуумного восстановления нанопорошка Ag_2O при комнатной температуре. Выбор такого варианта основывался на анализе диаграммы термостабильности серебра и оксидов серебра (рис. 4) [11; 12]. При нагреве оксида серебра Ag_2O при атмосферном давлении выше температуры $462,8\text{ K}$ происходит

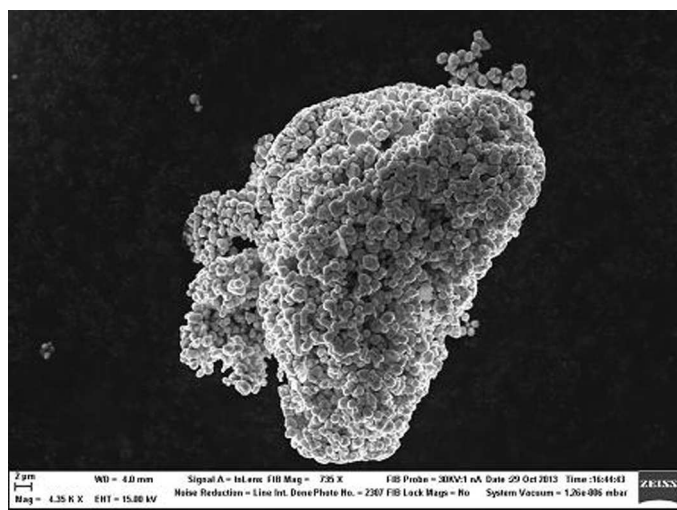


Рис. 3. Агломерат, полученный разложением при 160 °С в течение 60 минут

восстановление до металла, что, как известно, используется в производственных процессах. При понижении давления в соответствии с диаграммой снижается и температура разложения оксида серебра. Ожидалось, что оксид серебра в вакуумной атмосфере может разложиться с выделением порошка серебра в высокодисперсном состоянии даже при комнатной температуре.

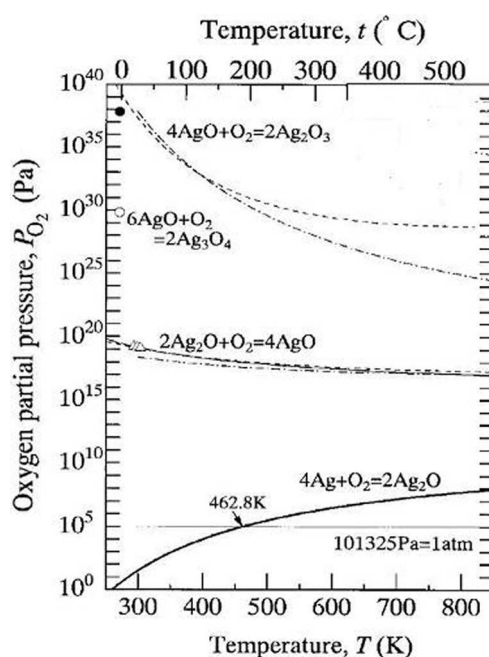


Рис. 4. Диаграмма термостабильности серебра и оксидов серебра

Однако проведённые исследования показали, что при продолжительности нахождения порошка оксида серебра в вакууме до 20 часов при комнатной температуре не наблюдается масштабного выделения металлического серебра. Не происходило этого и при повышении температуры до 373 К. Рентгеновский анализ не выявил присутствия металлического серебра. Однако исследования порошков с применением оптической микроскопии показали, что по сравнению с исходным порошком оксида Ag_2O в порошках, подвергнутых вакуумной обработке, наблюдаются металлические блестки. Это свидетельствует о принципиальной возможности применения метода вакуумного разложения для получения порошков серебра из порошков оксидов. В наших экспериментах с ограниченным

временем вакуумной обработки, по-видимому, серебро синтезировалось в столь малых количествах, что оказалось ниже порога чувствительности рентгенофазового метода (принято считать, что фаза обнаруживается РФА анализом, если она присутствует в количестве 3 %).

2. Синтез высокодисперсных порошков серебра композиционного состава. Уникальные свойства наночастиц возникают в результате размерного эффекта, который выступает в качестве главного структурного фактора для частицы. При этом происходит изменение базовых физических свойств, сопровождающее суперминиатюризацию. Эффективность выполнения различных функций, к примеру, активность катализаторов, также возрастает благодаря наноразмерному эффекту. Однако с повышением поверхностной энергии наночастиц в силу размерного эффекта заметно повышается и когезия наночастиц, а сильное когезионное сцепление ухудшает характеристики наночастиц при их использовании. Одним из методов, улучшающих эксплуатационные характеристики наночастиц, является применение комбинированных структур, таких как модифицированные композиции с использованием наночастиц разного размера. Создание композитных структур снижает когезию наночастиц, обеспечивая их беспрепятственное применение. Кроме того, композитные структуры, создаваемые из нескольких видов наночастиц, могут сочетать в себе несколько функций, приобретать новые функции в результате комбинирования функций наночастиц.

В настоящей работе предлагается простой способ синтеза высокодисперсных осадков серебра композиционного состава без использования токсичных реагентов. Синтез наночастиц серебра проводили методом жидкофазного химического осаждения из растворов солей серебра. Реактивами служили соль нитрата серебра ($AgNO_3$, х. ч.), аммиак концентрированный (25 %), аскорбиновая кислота ($C_6H_8O_6$, х. ч.) Концентрация в водном растворе $AgNO_3$ составляла 0,05 моль/л, а концентрация аскорбиновой кислоты варьировалась в пределах 0,025 моль/л – 0,5 моль/л, pH изменяли от 5 до 12.

В химических стаканчиках готовили водные растворы нитрата серебра (R1) и аскорбиновой кислоты (R2) заданных концентраций. Объём растворов был одинаковый – 10 мл. В реакционный сосуд при комнатной температуре вводился раствор R1, затем при непрерывном перемешивании со скоростью 1,3 мл/мин вводился раствор R2, pH растворов доводили до заданных значений с помощью раствора аммиака. Полученные растворы обрабатывали в микроволновой печи в течение 10 мин при мощности 600 Вт. Микроволновое излучение обеспечивает быстрый и равномерный нагрев всего объёма реакционного раствора, что приводит к получению наночастиц наименьшего размера и одинаковой формы. Далее осадок отделяли от надосадочной жидкости и промывали на воронке Бюхнера дистиллированной водой до pH=7. Сушка порошков проводилась на воздухе. После синтеза образцы порошков подвергались электронно-микроскопическому и химическому анализам.

Растворы аскорбиновой кислоты по отношению к раствору нитрата серебра брались в эквимольных и избыточных количествах. При восстановлении эквимольными количествами аскорбиновой кислоты в случае 0,02; 0,03; 0,2; 0,1 М растворов образуется золь без осадка. Для оптимизации процесса стадию образования золя необходимо исключить, что возможно когда количество восстановителя значительно превышает количество главного реагента [13]. При осаждении избытком аскорбиновой кислоты осадок образуется практически в любом случае, исключая растворы с концентрацией 0,02 и 0,03 М. В этом случае осадок, образовавшийся при слиянии компонентов, через некоторое время растворяется и переходит в коллоидный раствор. В результате экспериментально установлено, что при 10-кратном избытке восстановителя образуются осадки серого цвета, достаточно легко отделяемые от маточного раствора. По данным РФА полученные порошки являются металлическим серебром. Рентгенограмма представлена на рис. 5, а микрофотография порошка показана на рис. 6.

При данном способе получения нанопорошков серебра весьма выражены процессы агломерации, но они в значительной степени управляемы. Заметное влияние на них оказывают соотношение концентраций исходных компонентов и условий проведения процесса восстановления.

С целью оценки влияния концентраций восстановителя аскорбиновой кислоты на морфологию и размер частиц серебра проведён ряд экспериментов. Анализ микрофотографий частиц серебра, полученных при различных значениях концентраций восстановителя (рис. 7 и рис. 8), показал, что при концентрациях более 0,4М наблюдается увеличение размера частиц серебра за счёт их агрегации.

При исследовании влияния pH в интервале 5–12, установлено, что увеличение pH раствора до 8–9,5 приводит к увеличению и агрегированию частиц серебра, а при $pH \geq 9,5$ появляются частицы

с огранкой. Это видно на рис. 9 и рис. 10. Поэтому оптимальное, на наш взгляд, значение $pH=7,5$.

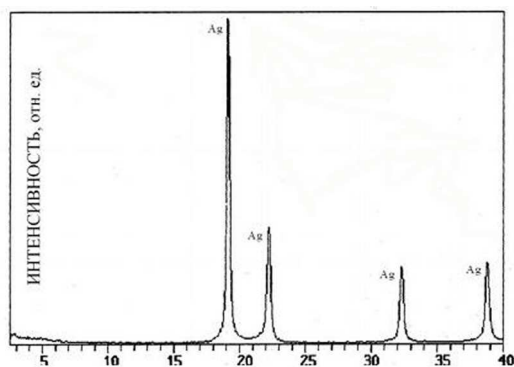


Рис. 5. Рентгенограмма полученного порошка серебра

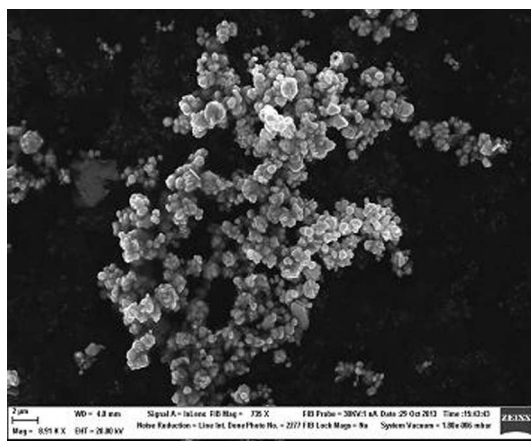


Рис. 6. Микрофотография наночастиц серебра в растровом электронном микроскопе

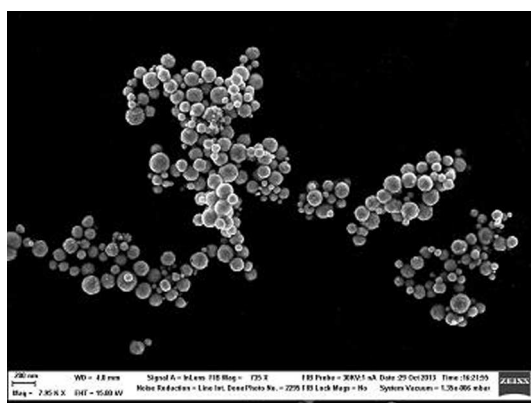


Рис. 7. Микрофотография наночастиц серебра, полученных при концентрации 0,2 моль/л раствора восстановителя

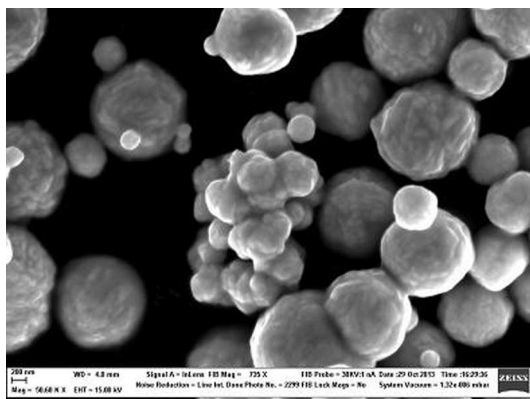


Рис. 8. Микрофотография наночастиц серебра, полученных при концентрации 0,5 моль/л раствора восстановителя

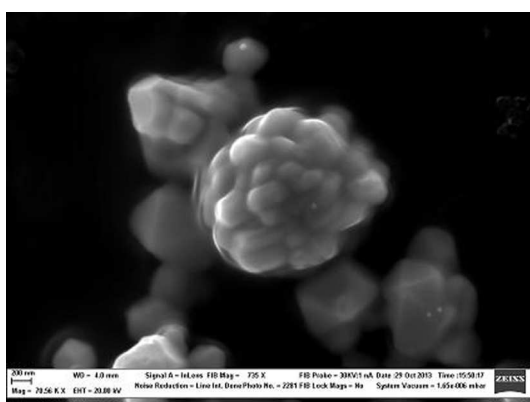


Рис. 9. Микрофотография наночастиц серебра, полученных при концентрации 0,4 моль/л раствора восстановителя и $\text{pH} = 8,5$

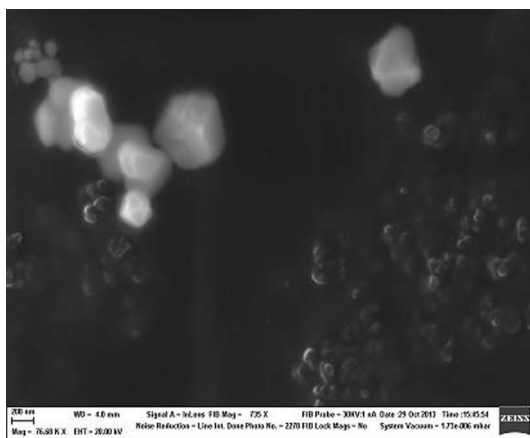


Рис. 10. Микрофотография наночастиц серебра, полученных при концентрации 0,4 моль/л раствора восстановителя и $\text{pH} = 9,5$

В определённых нами оптимальных условиях синтеза были получены порошки композиционного материала, состоящего из разных по размеру частиц серебра. Для этого были приготовлены растворы нитрата серебра и аскорбиновой кислоты заданных концентраций: (AgNO_3) – 0,05 моль/л; ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) – 0,4 моль/л. Раствор аскорбиновой кислоты разделили на 2 части и разлили по разным стаканчикам. В одном стаканчике часть раствора, а в другом – 3/4 части раствора. Далее в раствор азотнокислого серебра при одновременном его перемешивании, капельно, через трубочки подавался

раствор аскорбиновой кислоты из обоих стаканчиков. Внутренний диаметр трубочек имеет разное сечение, благодаря чему удается получать капли раствора разного размера, pH поддерживали на уровне 7,5, а затем была проведена обработка при микроволновом излучении в течение 10 мин при мощности 600 Вт. Охлаждали раствор при комнатной температуре и промывали дистиллированной водой до pH = 7. Сушили на воздухе. Полученные порошки серебра исследовались методами РФА, РЭМ и химического анализа. Результаты РЭМ представлены на рис. 11.

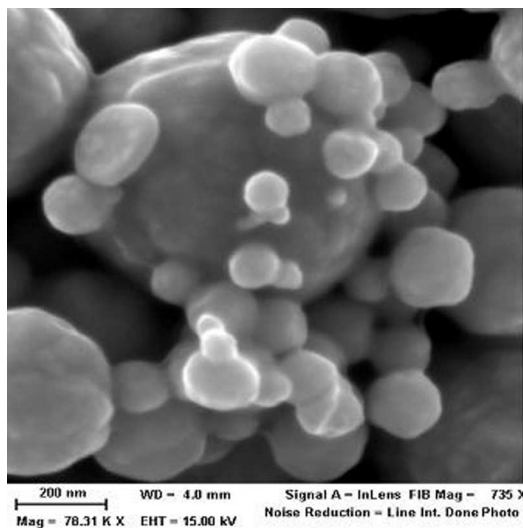


Рис. 11. Микрофотография композиционного порошка серебра, полученного при концентрации 0,4 моль/л раствора восстановителя и pH = 7,5 при капельном введении раствора восстановителя

Статистическая обработка размеров частиц полученного порошка выявила бимодальный характер гранулометрического распределения. Крупные частицы полученного композиционного порошка имеют размер в диапазоне 0,6–1,0 мкм (средний размер составляет около 0,8 мкм). Мелкие наночастицы имеют размеры до 150 нм, но основная их часть это частицы диаметром от 80 до 100 нм.

Выводы. Разработана новая методика синтеза высокодисперсных порошков серебра композиционного состава без использования токсичных реагентов. При восстановлении органических прекурсоров серебра в растворах использовали порошковые прекурсоры серебра состава $C_6H_5Ag_3O_7$. Их подвергали разложению в растворе дистиллированной воды при температуре 160 °С при повышенном давлении (около 6 атмосфер). Рентгеновские исследования показали, что восстановление происходит уже при 10-минутной обработке. Увеличение времени обработки приводит к слипанию частиц и образованию крупных агломератов. Синтез композиционного порошка серебра проводили методом жидкофазного химического осаждения из растворов солей серебра, используя растворы реактивов высокой концентрации. Растворы аскорбиновой кислоты по отношению к раствору нитрата серебра брались в эквимолярных и избыточных количествах.

Увеличение pH раствора от 8 до 9,5 приводит к увеличению и агрегированию частиц серебра, а при $pH \geq 9,5$ появляются частицы с огранкой. Оптимальное значение pH = 7,5. Применяли растворы нитрата серебра и аскорбиновой кислоты следующих концентраций: ($AgNO_3$) – 0,05 моль/л; ($C_6H_8O_6$) – 0,4 моль/л. Полученные растворы обрабатывали в микроволновой печи в течение 10 мин. Для аттестации синтезированных нанопорошков серебра и комбинированных порошков использовали методы РФА, РЭМ и химического анализа. Статистическая обработка размеров частиц полученного порошка выявила бимодальный характер гранулометрического распределения. Крупные частицы композиционного порошка имеют размер в диапазоне 0,6–1,0 мкм (средний размер составляет около 0,8 мкм). Мелкие наночастицы имеют размеры до 150 нм, но основная их часть – это частицы диаметром от 80 до 100 нм.

Список литературы

1. Крутяков Ю. А., Кудринский А. А. Синтез и свойства наночастиц серебра: достижения и перспективы // Успехи химии. 2008. Т. 77. № 3. С. 243–245.
2. Зеленский В. А. [и др.] Получение нанопорошка серебра с частицами пластинчатой формы // Физика и химия обработки материалов 2013. №1. С. 65–68.
3. Зеленский В. А., Анкудинов А. Б., Трегубова И. В., Забелин С. Ф. Получение пористого материала из порошков серебра // Учёные записки ЗабГУ. Сер. «Физика, математика, техника, технология». 2013. № 3 (50). С. 35–42.
4. Альмов М. И., Зеленский В. А., Трегубова И. В., Анкудинов А. Б. Метод получения нанопорошков серебра водородным восстановлением металлоорганических прекурсоров: материалы Международ. науч.-тех. конф. «Нанотехнологии функциональных материалов». СПб.: Политехнический ун-т. 2012. С. 361–362.
5. Meng C., Li-Ying, Jian-Tao Han, Jun-Yan Zhang, Zhi-Yuan Li, Dong-Lin Qian. Preparation and Study of Polyacryamide-Stabilized Silver Nanoparticles through a One-Pot Process // Journal of Fudan University. 2006. Vol. 45. № 17. P. 34–38.
6. Мецлер Д. Биохимия. Химические реакции в живой клетке. М.: Мир, 1980. 384 с.
7. Raveendran P., Jie Fua, Scott L. Wallen. A simple and "green" method for the synthesis of Au, Ag, and Au-Ag alloy nanoparticles // Journal of The Royal Society of Chemistry. 2006. Vol.12. № 8. P. 34–38.
8. Sun X., Li Y. Ag_2C Core/ Shell Structured Nanoparticles: Controlled Synthesis, Characterization and Assembly. Langmuir. 2005. Vol. 45. № 21. P. 6019–6024.
9. Panacek A. L., Kvirtek R., Prucek M., Kolarř R., Vecerova N., Pizurova, V.K. Sharma, T. Nevecna, R. Zboril. Silver Colloid Nanoparticles: Synthesis, Characterization, and Their Antibacterial Activity // Journal of American Chemical Society. 2006. Vol. 26. № 16. P. 37–43.
10. Волков А. И., Жарский И. М. Большой химический справочник. М.: Современная школа, 2005. 608 с.
11. Fischer and M. Jansen Cyclic Voltammetry and X-ray Diffraction Study of Anodic Crystallization of Highly Oxidized Silver Oxide, Solid State Ionics. 1990. P. 61–67.
12. Ryosuke O. Suzuki, Takamichi Ogawa, and Katsutoshi Ono. Use of Ozone to Prepare Silver Oxides . J. Am. Ceram. Soc. 1999. V.82 (8). P. 2033–2038.
13. Галахов А. В. [и др.]. Жидкофазный синтез оксинитрида алюминия // Учёные записки ЗабГУ. Сер. «Физика, математика, техника, технология». 2013. № 3 (50). С. 22–28.

References

1. Krutyakov Yu. A., Kudrinskii A. A. Sintez i svoistva nanochastits serebra: dostizheniya i perspektivy // Uspekhi khimii. 2008. T. 77. № 3. S. 243–245.
2. Zelenskii V. A. [i dr.]. Poluchenie nanoporoshka serebra s chastitsami plastinchatoi formy // Fizika i khimiya obrabotki materialov 2013. № 1. S. 65–68.
3. Zelenskii V. A., Ankudinov A. B., Tregubova I. V., Zabelin S. F. Poluchenie poristogo materiala iz poroshkov serebra // Uchenye zapiski ZabGU. "Ser. Fizika, matematika, tekhnika, tekhnologiya". 2013. № 3 (50). S. 35–42.
4. Alymov M. I., Zelenskii V. A., Tregubova I. V., Ankudinov A. B. Metod polucheniya nanoporoshkov serebra vodorodnym vosstanovleniem metalloorganicheskikh prekursorov: materialy Mezhdunarod. nauch.-tekhn. konf. „Nanotekhnologii funktsional'nykh materialov“. SPb.: Politekhnikeskii un-t. 2012. S. 361–362.
5. Meng C., Li-Ying, Jian-Tao Han, Jun-Yan Zhang, Zhi-Yuan Li, Dong-Lin Qian. Preparation and Study of Polyacryamide-Stabilized Silver Nanoparticles through a One-Pot Process // Journal of Fudan University. 2006. Vol. 45. № 17. P. 34–38.

6. Metsler D. Biokhimiya. Khimicheskie reaktsii v zhivoi kletke. M.: Mir, 1980. 384 s.
7. Raveendran P., Jie Fua, Scott L. Wallen. A simple and „green“ method for the synthesis of Au, Ag, and Au–Ag alloy nanoparticles // Journal of The Royal Society of Chemistry. 2006. Vol. 12. № 8. P. 34–38.
8. Sun X., Li Y. Ag_2C Core/ Shell Structured Nanoparticles: Controlled Synthesis, Characterization and Assembly. Langmuir. 2005, Vol. 45, №21, P. 6019–6024.
9. Panacek A. L. Kvirtek R. Pucek M. Kolarř R. Vecerova N. Pizurova, V.K.Sharma, T. Nevecna, R. Zboril. Silver Colloid Nanoparticles: Synthesis, Characterization, and Their Antibacterial Activity // Journal of American Chemical Society. 2006. Vol. 26. № 16. P. 37–43.
10. Volkov A. I., Zharskii I. M. Bol'shoi khimicheskii spravochnik. M.: Sovremennaya shkola, 2005. 608 s.
11. Fischer and M. Jansen Cyclic Voltammetry and X-ray Diffraction Study of Anodic Crystallization of Highly Oxidized Silver Oxide, Solid State Ionics. 1990. P. 61–67.
12. Ryosuke O. Suzuki, Takamichi Ogawa, and Katsutoshi Ono. Use of Ozone to Prepare Silver Oxides . J. Am. Ceram. Soc. 1999. V.82 (8). P. 2033–2038.
13. Galakhov A. V. [i dr.]. Zhidkofaznyi sintez oksinitrida alyuminiya // Uchenye zapiski ZabGU. Ser. „Fizika, matematika, tekhnika, tekhnologiya“. 2013. № 3 (50). S. 22–28.

Статья поступила в редакцию 10.05.2014