

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ КОБАЛЬТСОДЕРЖАЩИХ НАНОЧАСТИЦ

Л.П. Арефьева

А.А. Кравцов

А.В. Блинов

С.В. Харченко

А.В. Серов

И.Е. Соловьев

Ludmilochka529@mail.ru

sanya-kravtsov@ya.ru

Blinov.a@mail.ru

diezdiezdiezdiezdiez@gmail.com

sav_ncstu@mail.ru

solovin117@gmail.com

Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Российская Федерация

Аннотация

Разработана методика синтеза стабильных золь кобальта методом химического восстановления, получены тонкие пленки кобальта на кремниевой подложке, исследована их морфология и геометрические характеристики. В качестве прекурсора использован ацетат кобальта, в качестве восстановителя — аскорбиновая кислота, синтез осуществлен в спиртовой среде. Полученный золь был исследован методом фотонно-корреляционной спектроскопии. Анализ данных фотонно-корреляционной спектроскопии показал наличие в образце двух фракций со средним гидродинамическим радиусом меньшей фракции 3,9 нм и более крупной — 278 нм. Тонкие пленки кобальта были получены методом высушивания золя и методом нанесения на вращающуюся подложку. Полученные пленки исследованы методами энергодисперсионного анализа и атомно-силовой микроскопии. По результатам атомно-силовой микроскопии изучены морфология пленок и геометрические характеристики наночастиц кобальта. Анализ АСМ-снимков поверхности полученных пленок позволил сделать вывод о форме и размерах наночастиц кобальта

Ключевые слова

Кобальтсодержащие наночастицы, метод химического восстановления, атомно-силовая микроскопия, тонкие пленки, фотонно-корреляционная спектроскопия, энергодисперсионный анализ

Поступила в редакцию 14.07.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Создание новых материалов на основе наночастиц кобальта является перспективным направлением современного материаловедения. Вследствие большой магнитной индукции насыщения и высокой каталитической активности нанодисперсный кобальт представляет собой перспективный материал для создания магнитных жидкостей и постоянных магнитов, компактных композиционных материалов, в качестве катализаторов, магнитных сенсоров, а также в медицине и биологии [1–5]. Согласно исследованиям, условия синтеза оказывают значительное влияние на форморазмерные, структурные, каталитические и магнитные свойства получаемых наночастиц кобальта [1–7]. Отдельную проблему

представляет собой стабилизация наночастиц химически активных металлов, в особенности при синтезе в неводных средах [1]. Один из наиболее эффективных методов синтеза кобальтсодержащих наночастиц — химическое восстановление кобальта из его солей в водной среде [8]. В качестве восстановителя использовали боргидрид натрия. В результате получены золи с размерами частиц 1...10 нм. В основе физико-химических методов получения металлических наночастиц также лежит реакция восстановления соли металла и возникает необходимость использовать неводные среды [1].

Для разработки методики синтеза кобальтсодержащих наночастиц в процессе синтеза применяли различные кобальтсодержащие прекурсоры и восстановители. В качестве прекурсоров использовали хлорид, ацетат и сульфат кобальта, в качестве восстановителей — гидразин, боргидрид натрия, аскорбиновую кислоту и цитрат натрия, в качестве стабилизатора — этиленгликоль. В различных экспериментах синтез проводили в водной и в спиртовой средах (этанол). В процессе экспериментов также варьировали температуру синтеза (25...100 °С). По результатам серии экспериментов была разработана методика, позволяющая получать стабильные монодисперсные золи наночастиц кобальта. Синтез включает в себя следующие стадии:

- 1) растворение ацетата кобальта в этиленгликоле;
- 2) добавление в реакционную смесь этилового спирта;
- 3) растворение аскорбиновой кислоты в полученном растворе;
- 4) нагрев реакционной смеси до температуры 100 °С и выдерживание при этой температуре в течение 1 ч.

В процессе синтеза наблюдалось изменение цвета реакционной смеси от бледно-фиолетового до красного, что свидетельствует об образовании золя.

В случае использования других кобальтсодержащих прекурсоров, воды в качестве растворителя и при отсутствии нагрева, образование золя не наблюдалось. При использовании боргидрида натрия в качестве восстановителя были получены нестабильные золи черного цвета.

Для исследования формы и размеров частиц кобальта была синтезирована тонкая пленка кобальта методом высушивания золя. Золь кобальта наносили по каплям на кремниевую пластину Si (100), затем просушивали при комнатной температуре и при температуре 100 °С в течение 3 ч.

Кобальтсодержащая тонкая пленка также была получена методом нанесения на вращающуюся подложку — кремниевую пластину Si (100) размером 1×1 см². Для получения пленки использовали растворы ацетата кобальта и боргидрида натрия. Скорость вращения подложки составляла 4000 мин⁻¹. Растворы по каплям поочередно наносили на подложку. Таким образом, восстановление металлического кобальта из ацетата происходило непосредственно на поверхности кремниевой подложки. Для улучшения растекания раствора по подложке и формирования равномерной пленки в систему вводили поверхностно-активное вещество (ПАВ) — цетилтриметиламмония бромид. После образования структурированной

пленки образец просушивался при комнатной температуре, а затем — при температуре 100 °С в течение 3 ч.

Полученный золь кобальта был исследован с помощью метода фотонно-корреляционной спектроскопии на приборе *Photocor Complex*. Данный метод исследования позволяет определить средний гидродинамический радиус частиц золя (рис. 1). Анализ гистограммы показал наличие в образце двух фракций со средним гидродинамическим радиусом меньшей фракции 3,9 нм, более крупной — 278 нм, что можно объяснить наличием в золе отдельных наночастиц и агрегатов.

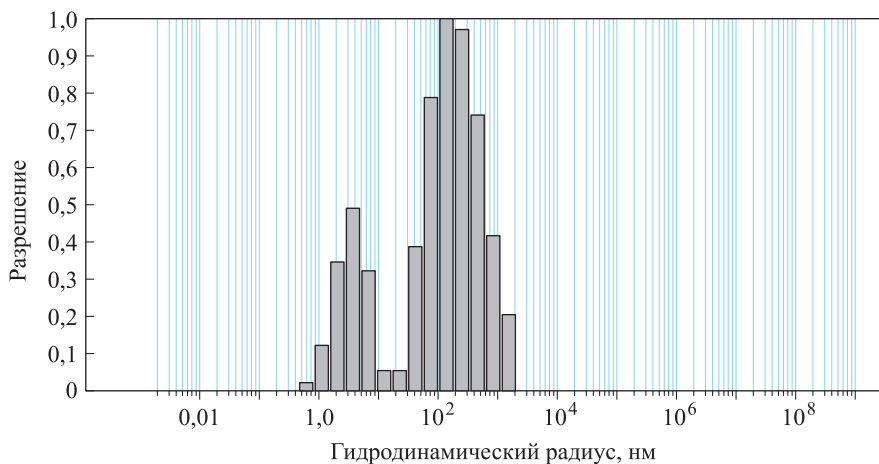


Рис. 1. Гистограмма распределения гидродинамических радиусов наночастиц кобальта

В целях установления элементного состава кобальтсодержащих пленок полученные образцы были исследованы с помощью энергодисперсионного анализа на сканирующем электронном микроскопе *MIRA-LMH* с системой определения элементного состава *AZtecEnergy Standart / X-max 20 (standard)* фирмы *Tescan*. Полученный EDX-спектр представлен на рис. 2.

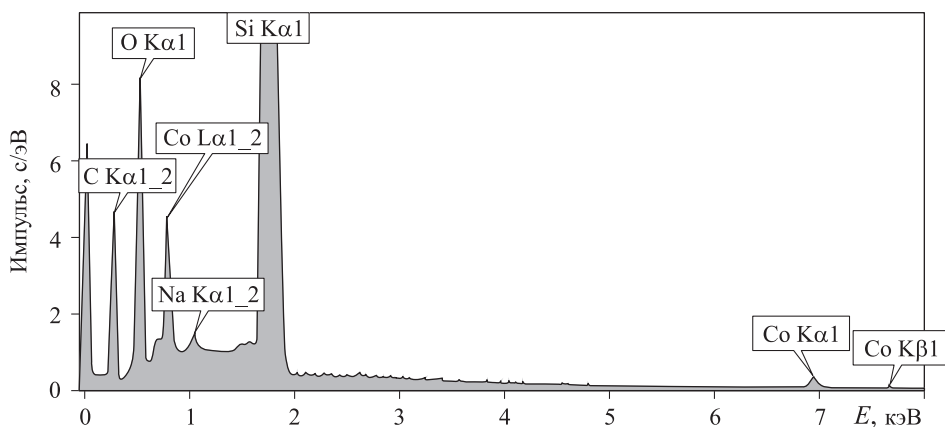


Рис. 2. EDX-спектр образцов тонких кобальтсодержащих пленок

В исследуемых образцах содержатся такие элементы как кобальт, кислород, углерод, кремний (подложка) и натрий в следовых количествах. Большое содержание кислорода позволяет предположить, что поверхность кобальтсодержащих частиц покрыта оксидной пленкой.

Морфология полученных пленок и их геометрические характеристики изучены методом атомно-силовой микроскопии *Ntegra Aura* в контактном режиме. Трехмерное изображение рельефа поверхности кобальтсодержащей тонкой пленки, полученной методом высушивания золя, представлено на рис. 3. Агломераты наночастиц кобальта отстоят друг от друга на значительном расстоянии, т. е. тонкая пленка кобальта имеет островковый характер.

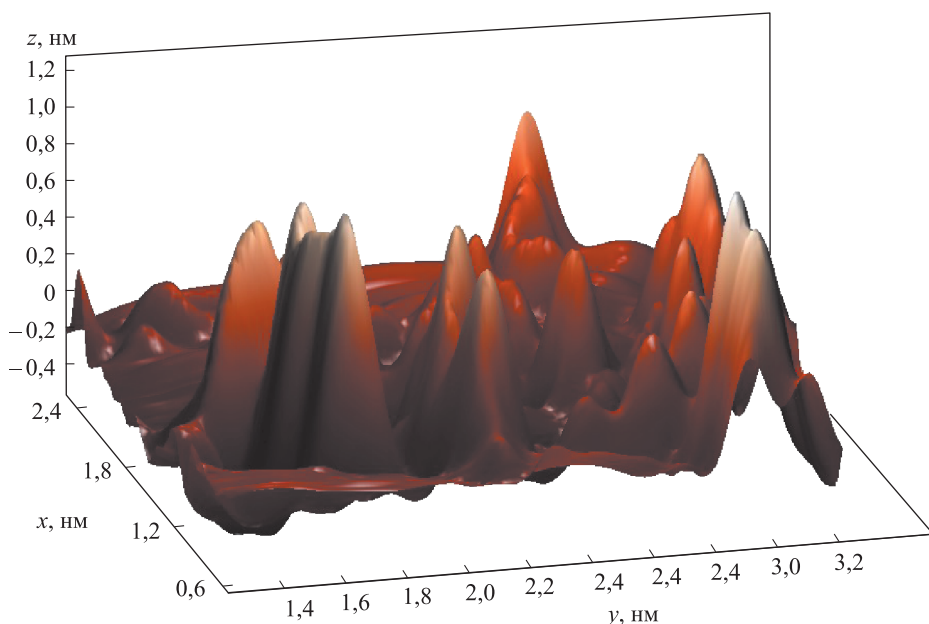


Рис. 3. Трехмерное изображение рельефа поверхности кобальтсодержащей пленки, осажденной на кремниевой пластине Si (100) методом высушивания золя

С помощью функции *Grain Analysis* удалось идентифицировать на поверхности подложки Si (100) размером 10×10 мкм 898 кристаллов. При работе с указанной функцией использована стандартная модель: образец содержит отдельно стоящие частицы или агломераты частиц; частицы имеют один пик.

Гистограммы распределения наночастиц по высоте и характерным размерам показаны на рис. 4. Согласно полученному массиву данных геометрических характеристик частиц, в образце имеется одна фракция с характерными размерами 50...350 нм и высотой 150...900 нм. Анализ всех геометрических характеристик (диаметра частиц, их периметра у основания, площади поперечного сечения на половине высоты, объема и линейных размеров) позволяет сделать вывод, что форма частицы стремится к вертикально вытянутому полуэллипсоиду. Форма наночастиц на поверхности подложки определяется, прежде всего, соотношением

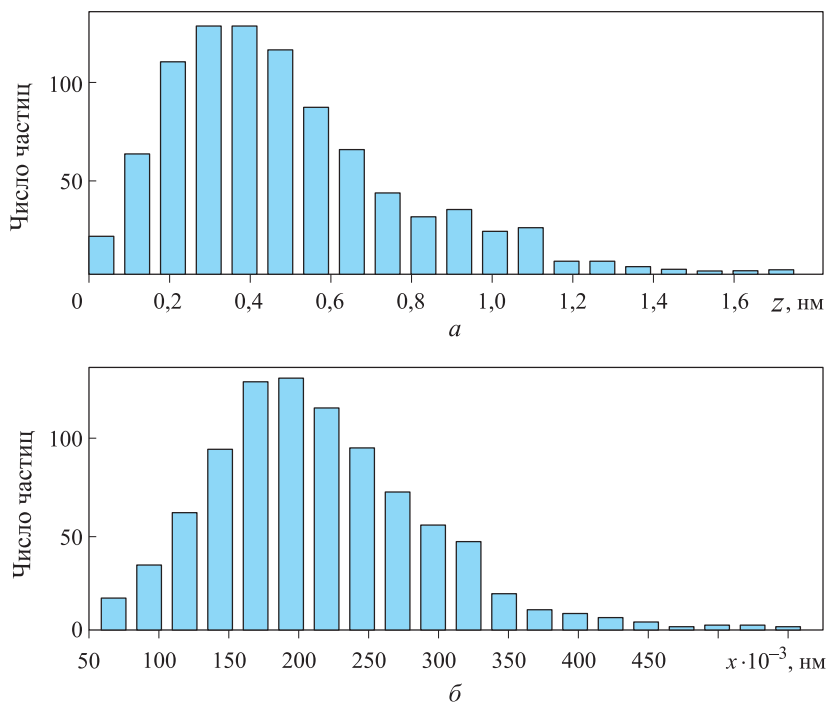


Рис. 4. Гистограммы распределения кобальтсодержащих наночастиц, осажденных на кремниевой пластине Si (100) методом высушивания золя, по высоте (а) и по характерным размерам (б)

поверхностных энергий материалов подложки и частицы, а также межфазной энергией границы раздела [12]. Следовательно, при стабилизации частиц кобальта этиленгликолем преобладает энергия когезии материала наночастиц.

Трехмерное изображение рельефа поверхности кобальтсодержащей пленки, полученной методом нанесения на вращающуюся подложку, приведено на рис. 5.

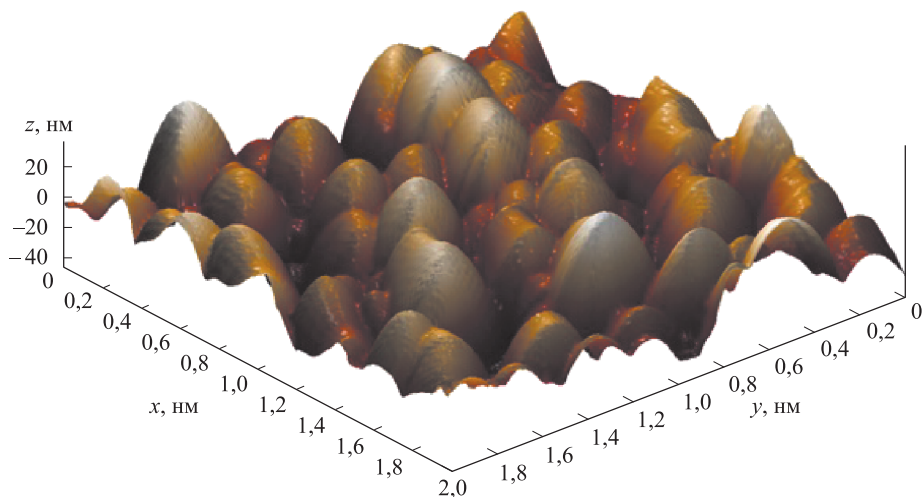


Рис. 5. Трехмерное изображение рельефа поверхности кобальтсодержащей пленки, полученной методом нанесения на вращающуюся подложку

По результатам применения функции *Grain Analysis* на участке снимка размером 10×10 мкм обнаружено 628 кристаллов. Гистограммы распределения наночастиц кобальта по высоте и характерным размерам приведены на рис. 6.

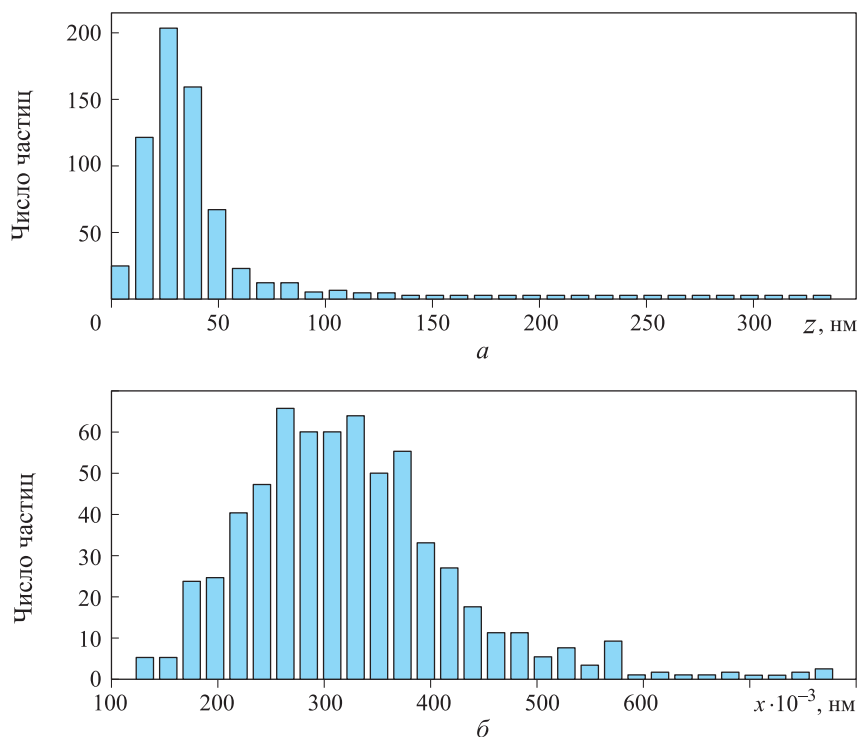


Рис. 6. Гистограммы распределения кобальтсодержащих наночастиц, осажденных на кремниевой пластине (100) методом нанесения на вращающуюся подложку, по высоте (а) и характерным размерам (б)

По полученным данным геометрических характеристик частиц видно, что в образце имеется одна фракция с характерными размерами 200...450 нм и высотой 10...50 нм. Анализ данных показывает, что форма частиц кобальта стремится к эллипсоидальному сектору с малым углом смачивания поверхности подложки около 6° . Следовательно, преобладает энергия адгезии кобальтсодержащих наночастиц к подложке, что и должно было наблюдаться, так как при нанесении пленки использован ПАВ.

В соответствие с результатами проведенных исследований можно сделать вывод, что синтез кобальтсодержащих наночастиц вызывает некоторые трудности, так как получаемые золи кобальта агрегативно неустойчивы и нестабильны. Для решения возникающих проблем необходимо тщательно подбирать прекурсоры кобальта, восстановители и стабилизаторы, способ подготовки растворов и температуру реакционной среды. В частности, стабильные золи кобальта могут быть получены методом химического восстановления в спиртовой среде из ацетата кобальта восстановлением аскорбиновой кислоты при стабилизации эти-

ленгликолем. Анализ зольей кобальта показал наличие в образце двух фракций частиц со средним гидродинамическим радиусом меньшей фракции 3,9 нм, более крупной — 278 нм. Исследование морфологии наночастиц кобальта, нанесенных на кремниевую подложку, показало, что в пленках, полученных методом высушивания золя, частицы кобальта имеют форму вытянутого полуэллипсоида со средними характерными размерами 50...350 нм и высотой 150...900 нм. Пленки, полученные методом нанесения на вращающуюся подложку, образованы частицами, имеющими форму эллипсоидального сектора с характерными размерами 200...450 нм и высотой 10...50 нм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оленин Ю.А., Лисичкин Г.В. Получение, динамика структуры объема и поверхности металлических наночастиц в конденсированных средах // Успехи химии. 2011. Т. 80. № 7. С. 635–662.
2. Salman S.A., Usami T., Kuroda K., Okido M. Synthesis and characterization of cobalt nanoparticles using hydrazine and citric acid // Journal of Nanotechnology. 2014. Vol. 2014. DOI: 10.1155/2014/525193 URL: <https://www.hindawi.com/journals/jnt/2014/525193>
3. Puentes V.F., Krishnan K., Alivisatos A.P. Synthesis of colloidal cobalt nanoparticles with controlled size and shapes // Topics in Catalysis. 2002. Vol. 19. No. 2. P. 145–148. DOI: 10.1023/A:1015252904412 URL: <http://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1015252904412?no-access=true>
4. Yu Y., Mendoza-Garcia A., Ning B., Sun S. Cobalt-substituted magnetite nanoparticles and their assembly into ferrimagnetic nanoparticle arrays // Advanced Materials. 2013. Vol. 25. No. 22. P. 3090–3094. DOI: 10.1002/adma.201300595 URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.201300595/references>
5. Puentes V.F., Krishnan K.M., Alivisatos A.P. Colloidal nanocrystal shape and size control: The case of cobalt // Science. 2001. Vol. 291. No. 5511. P. 2115–2117. DOI: 10.1126/science.1058495 URL: <http://science.sciencemag.org/content/291/5511/2115>
6. Mary Donnabelle L. Balela. Synthesis and characterization of cobalt nanoparticles prepared by liquid-phase reduction. Universiti Sains Malaysia, 2008. 168 p. URL: http://eprints.usm.my/10360/1/SYNTHESIS_AND_CHARACTERIZATION_OF.pdf
7. Markova-Deneva I., Alexandrova K., Dragieva I. Synthesis and characterization of cobalt nanoparticles, nanowires and their composites // Book of the 3rd International Conference on Multi-Material Micro Manufacture. Bulgaria: Borovets, 2007. 211 p.
8. Влияние способа получения на свойства нанопорошков кобальта / Э.Л. Дзидзигури, Г.П. Карпачева, Н.С. Перов, А.В. Самохин, Н.В. Шатрова // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2014. Т. 324. № 3. С. 7–15. URL: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Bulletin_TPU/2014/v324/i3/01.pdf
9. Колмыков Р.П. Получение и изучение свойств нанопорошков никеля, кобальта и их взаимной системы: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. Кемерово, 2011. 20 с.
10. Синтез, свойства и применение в экспериментальной медицине и биологии магниточувствительных нанокомпозитов, содержащих благородные металлы / С.П. Туранская, А.Д. Четыркин, И.В. Дубровин, В.В. Туров, П.П. Горбик // Поверхность. 2011. Т. 3. № 18. С. 343–366.

11. *Каширина Л.Г., Деникин С.А.* Влияние кобальта в наноразмерной форме на физиологические и биохимические процессы в организме кроликов // Вестник КрасГАУ. 2014. № 4. С. 203–207. URL: <http://www.kgau.ru/vestnik/content/2014/4.pdf>

12. *Поверхностные явления и фазовые превращения в конденсированных пленках / Н.Т. Гладких, С.В. Дукаров, А.П. Крышталь, В.И. Ларин, В.Н. Сухов, С.И. Богатыренко.* Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2004. 276 с.

Арефьева Людмила Павловна — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры технологии наноматериалов Института электроэнергетики, электроники и нанотехнологий Северо-Кавказского федерального университета (Российская Федерация, 355009, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1).

Кравцов Александр Александрович — ассистент кафедры технологии наноматериалов Института электроники, электроэнергетики и нанотехнологий Северо-Кавказского федерального университета (Российская Федерация, 355009, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1).

Блинов Андрей Владимирович — ассистент кафедры технологии наноматериалов Института электроэнергетики, электроники и нанотехнологий Северо-Кавказского федерального университета (Российская Федерация, 355009, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1).

Харченко Сергей Вячеславович — магистрант кафедры технологии наноматериалов Института электроэнергетики, электроники и нанотехнологий Северо-Кавказского федерального университета (Российская Федерация, 355009, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1).

Серов Александр Владимирович — д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой технологии наноматериалов Института электроэнергетики, электроники и нанотехнологий Северо-Кавказского федерального университета (Российская Федерация, 355009, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1).

Соловьев Иван Евгеньевич — лаборант-исследователь лаборатории перспективных технологий керамики Северо-Кавказского федерального университета (Российская Федерация, 355009, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1).

Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Арефьева Л.П., Кравцов А.А., Блинов А.В., Харченко С.В., Серов А.В., Соловьев И.Е. Синтез и исследование морфологии кобальтсодержащих наночастиц // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2017. № 2. С. 85–95.

DOI: 10.18698/1812-3368-2017-2-85-95

SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF COBALT CONTAINING NANOPARTICLES MORPHOLOGY

L.P. Aref'eva

A.A. Kravtsov

A.V. Blinov

S.V. Kharchenko

A.V. Serov

I.E. Solov'ev

Ludmilochka529@mail.ru

sanya-kravtsov@ya.ru

Blinov.a@mail.ru

diezdiezdiezdiezdiezdiez@gmail.com

sav_ncstu@mail.ru

solovin117@gmail.com

North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation

Abstract

The aim of this work is to develop methods of synthesis of stable monodisperse cobalt sol by the method of chemical reduction and obtain cobalt thin films on a silicon substrate, investigate their morphology and geometrical characteristics. Cobalt acetate was used as a precursor in this study, ascorbic acid was used as a reducing agent, the synthesis was carried out in an alcoholic medium. The resulting sol was studied by the method of photon correlation spectroscopy. Analysis of the data of the photon correlation spectroscopy revealed the presence of two fractions in a sample with an average hydrodynamic radius of the smaller fraction of about 3.9 nm and the larger one — 278 nm. Thin cobalt films were obtained by the method of drying the sol and method of rotating substrate coating. The obtained films were studied by the methods of energy dispersive analysis and atomic force microscopy. Analysis of AFM images of the film surface allowed us to make the conclusion about the shape and size of cobalt nanoparticles. Investigation of the morphology of nanoparticles deposited on the silicon substrate Co showed that the cobalt particles obtained by the method of drying sol films have a form of an elongated semi-ellipsoid with average typical dimensions of 50 to 350 nm and a height of 150 to 900 nm. The films obtained by method of deposition on a rotating substrate formed by particles have a shape of ellipsoidal sector with typical dimensions of 200 to 450 nm and a height of 10 to 50 nm

Keywords

Cobalt nanoparticles, chemical reduction method, atomic force microscopy, thin films, photon correlation spectroscopy, energy dispersive analysis

REFERENCES

- [1] Olenin Yu.A., Lisichkin G.V. Metal nanoparticles in condensed media: Preparation and the bulk and surface structural dynamics. *Russian Chemical Reviews*, 2011, vol. 80, no. 7, pp. 605–630. DOI: 10.1070/RC2011v080n07ABEH004201 Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1070/RC2011v080n07ABEH004201>
- [2] Salman S.A., Usami T., Kuroda K., Okido M. Synthesis and characterization of cobalt nanoparticles using hydrazine and citric acid. *Journal of Nanotechnology*, 2014, vol. 2014. DOI: 10.1155/2014/525193 Available at: <https://www.hindawi.com/journals/jnt/2014/525193>
- [3] Puentes V.F., Krishnan K., Alivisatos A.P. Synthesis of colloidal cobalt nanoparticles with controlled size and shapes. *Topics in Catalysis*, 2002, vol. 19, no. 2, pp. 145–148. DOI: 10.1023/A:1015252904412 Available at: <http://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1015252904412?no-access=true>
- [4] Yu Y., Mendoza-Garcia A., Ning B., Sun S. Cobalt-substituted magnetite nanoparticles and their assembly into ferrimagnetic nanoparticle arrays. *Advanced Materials*, 2013, vol. 25, no. 22, pp. 3090–3094. DOI: 10.1002/adma.201300595 Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.201300595/references>
- [5] Puentes V.F., Krishnan K.M., Alivisatos A.P. Colloidal nanocrystal shape and size control: The case of cobalt. *Science*, 2001, vol. 291, no. 5511, pp. 2115–2117. DOI: 10.1126/science.1058495 Available at: <http://science.sciencemag.org/content/291/5511/2115>

- [6] Mary Donnabelle L. Balela. Synthesis and characterization of cobalt nanoparticles prepared by liquid-phase reduction. Universiti Sains Malaysia, 2008. 168 p. Available at: http://eprints.usm.my/10360/1/SYNTHESIS_AND_CHARACTERIZATION_OF.pdf
- [7] Markova-Deneva I., Alexandrova K., Dragieva I. Synthesis and characterization of cobalt nanoparticles, nanowires and their composites. *Book of the 3rd International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*. Bulgaria, Borovets, 2007. 211 p.
- [8] Dzdiziguri E.L., Karpacheva G.P., Perov N.S., Samokhin A.V., Shatrova N.V. Effect of cobalt production method on properties of its nanopowders. *Izvestiya TPU. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2014, vol. 324, no. 3, pp. 7–15 (in Russ.). Available at: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Bulletin_TPU/2014/v324/i3/01.pdf
- [9] Kolmykov R.P. Poluchenie i izuchenie svoystv nanoporoshkov nikelya, kobal'ta i ikh vzaimnoy sistemy: avtoref. dis. kand. khim. nauk [Preparation and properties study of nickel and cobalt nanopowder and their mutual systems: Abstract kand. tech. sci. diss.]. Kemerovo, 2011. 20 p.
- [10] Turanskaya S.P., Chetyrkin A.D., Dubrovin I.V., Turov V.V., Gorbik P.P. Synthesis, properties and appliace of magnetosensitive nanocomposites with noble metal in experimental medicine and biology. *Poverkhnost'*, 2011, no. 3, no. 18, pp. 343–366 (in Russ.).
- [11] Kashirina L.G., Denikin S.A. The nano-size form cobalt influence on the physiologic and biochemical processes of rabbits' organisms. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2014, no. 4, pp. 203–207 (in Russ.). Available at: <http://www.kgau.ru/vestnik/content/2014/4.pdf>
- [12] Gladkikh N.T., Dukarov S.V., Kryshtal' A.P., Larin V.I., Sukhov V.N., Bogatyrenko S.I. Poverkhnostnyye yavleniya i fazovye prevrashcheniya v kondensirovannykh plenkakh [Surface phenomena and phase transitions in condensed films]. Khar'kov, KhNU n.a. V.N. Karazin Publ., 2004. 276 p.

Aref'eva L.P. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Professor of Nanomaterial Technology Department, Institute of Electric Power Engineering, Electronics and Nano-Technologies, North-Caucasus Federal University (Pushkin ul. 1, Stavropol, 355009 Russian Federation).

Kravtsov A.A. — assistant of Nanomaterial Technology Department, Institute of Electric Power Engineering, Electronics and Nano-Technologies, North-Caucasus Federal University (Pushkin ul. 1, Stavropol, 355009 Russian Federation).

Blinov A.V. — assistant of Nanomaterial Technology Department, Institute of Electric Power Engineering, Electronics and Nano-Technologies, North-Caucasus Federal University (Pushkin ul. 1, Stavropol, 355009 Russian Federation).

Kharchenko S.V. — master of Nanomaterial Technology Department, Institute of Electric Power Engineering, Electronics and Nano-Technologies, North-Caucasus Federal University (Pushkin ul. 1, Stavropol, 355009 Russian Federation).

Serov A.V. — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Head of Nanomaterial Technology Department, Institute of Electric Power Engineering, Electronics and Nano-Technologies, North-Caucasus Federal University (Pushkin ul. 1, Stavropol, 355009 Russian Federation).

Solov'ev I.E. — assistant researcher of Laboratory of Prospective Ceramic Technologies, North-Caucasus Federal University (Pushkin ul. 1, Stavropol, 355009 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Aref'eva L.P., Kravtsov A.A., Blinov A.V., Kharchenko S.V., Serov A.V., Solov'ev I.E. Synthesis and Investigation of Cobalt Containing Nanoparticles Morphology. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2017, no. 2, pp. 85–95. DOI: 10.18698/1812-3368-2017-2-85-95



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие авторов

А.В. Чашкина, Д.А. Жукова

**«Элементы конечной алгебры: группы,
кольца, поля, линейные пространства»**

Рассмотрены основные алгебраические структуры и их свойства. Все утверждения снабжены подробными доказательствами и проиллюстрированы большим числом примеров. Основное внимание уделено конечным полям и линейным пространствам над конечными полями.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

+7 (499) 263-60-45

press@bmstu.ru

www.baumanpress.ru