

Синтез замещенного гексаферрита бария с применением электрогенерированных реагентов

© Мухамадеев⁺ Артур Эдуардович, Дресвянников^{*} Александр Федорович

Кафедра технологии электрохимических производств. Институт нефти, химии и нанотехнологий

Казанский национальный исследовательский технологический университет. ул. К. Маркса, 68.

г. Казань, 420008. Республика Татарстан. Россия. Тел.: +7 (996) 125-58-79. E-mail: m.artur_98@mail.ru

*Ведущий направление; ⁺Поддерживающий переписку

Ключевые слова: анодное растворение, сталь 3, электрохимический синтез, сталь 3, осадок, термообработка, рентгенофазовый анализ, гексаферрит бария.

Аннотация

В данной работе оценена возможность получения замещенного церием гексаферрита бария с помощью электрохимического метода, основанного на анодном растворении железного анода, и последующей термообработкой осадка, полученного в объеме раствора при электролизе. Электролиз проводили в коаксиальном бездиафрагменном электролизере – реакторе с катодом в виде проволоки из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т, площадь которого много меньше площади анода из низкоуглеродистой стали. Анодный выход по току при электролизе превышает 100%, что свидетельствует о растворении стального электрода, как по электрохимическому, так и химическому механизму. Усредненная скорость анодного окисления электрода составляет около 33 мг·см⁻²·ч⁻¹. Невысокая скорость обусловлена замедлением анодного растворения металла с течением времени за счет образования на его поверхности малорастворимых продуктов. Кислотность реакционной среды в объеме реактора-электролизера в течение процесса изменяется в широких пределах: от 1.66 у исходного электролита до 12.37 у реакционной смеси с осадком по окончании электролиза. Повышение pH реакционной среды происходит за счет подщелачивания околочатодного пространства и перемещения продуктов катодной реакции в результате движения масс раствора выделяющимися пузырьками водорода по направлению от центра к периферии реактора-электролизера. Часть поверхностных соединений железа в виде полиядерных гидроксоаквакомплексов переходит в раствор, где в условиях изменения pH среды превращается в малорастворимые основные соединения железа – предшественники оксидов. Интенсивное выделение водорода на катоде способствует перемешиванию раствора во всем объеме реактора, а также осаждению компонентов раствора и продуктов растворения анода за счет подщелачивания электролита. Фазовый состав продукта, установленный рентгеноструктурным анализом, показал, что в случае осадка, подвергнутого низкотемпературной обработке (100 °С), в его состав входит церат бария (1%), а также оксиды железа. Высокотемпературная обработка высушенного осадка при 1100 °С позволяет получить с высоким выходом (~95%) гексаферрит бария с минимальным количеством примесей (оксид церия и магнетит).

Выходные данные для цитирования русскоязычной печатной версии статьи:

Мухамадеев А.Э., Дресвянников А.Ф. Синтез замещенного гексаферрита бария с применением электрогенерированных реагентов. *Бутлеровские сообщения*. 2025. Т.84. №10. С.52-57.

DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-10-52

Выходные данные для цитирования русскоязычной электронной версии статьи:

Мухамадеев А.Э., Дресвянников А.Ф. Синтез замещенного гексаферрита бария с применением электрогенерированных реагентов. *Бутлеровские сообщения А*. 2025. Т.11. №4. Id.4. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-10-52/ROI-jbc-RA/25-11-4-4

The output for citing the English online version of the article:

Artur E. Mukhamadeev, Alexander F. Dresvyannikov. Synthesis substituted barium hexaferrite using electrogenerated reagents. *Butlerov Communications A*. 2025. Vol.11. No.4. Id.4. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-10-52/ROI-jbc-A/25-11-4-4

Литература

- [1] D.A. Vinnik, A.Yu. Tarasova, D.A. Zhrebtsov, S.A. Gudkova, D.M. Galimov, V.E. Zhivulin, E.A. Trofimov, S. Nemrava, N.S. Perov, L.I. Isaenko, R. Niewa. Magnetic and Structural Properties of Barium Hexaferrite $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ from Various Growth Techniques. *Materials*. **2017**. Vol.10. No.6. DOI: 10.3390/ma10060578
- [2] А.В. Труханов, С.В. Труханов, В.Г. Костишин, Л.В. Панина, М.М. Салем, И.С. Казакевич, В.А. Турченко, В.В. Кочервинский, Д.А. Кривченя. Мультиферроидные свойства и структурные особенности Al-замещенных гексаферритов бария М-типа. *ФТТ*. **2017**. Т.59. №4. С.721-729. DOI: 10.21883/FTT.2017.04.44274.328 [A.V. Trukhanov, S.V. Trukhanov, V.G. Kostishin, L.V. Panina, M.M. Salem, I.S. Kazakevich, V.A. Turchenko, V.V. Kochervinskiy, D.A. Krivchenya. Multiferroic properties and structural features of M-type Al-substituted barium hexaferrites. *FTT*. **2017**. Vol.59. No4. P.721-729. DOI: 10.21883/FTT.2017.04.44274.328 (Russian)]
- [3] M. Zahid, S. Siddique, R. Anum, M. Fayzan Shakir, Y. Nawab, Z.A. Rehan. M-Type Barium Hexaferrite-Based Nanocomposites for EMI Shielding Application: a Review. *J. Supercond. Nov. Magn.* **2021**. Vol.34. P.1019-1045. DOI: 10.1007/s10948-021-05859-1
- [4] S.V. Trukhanov, A.V. Trukhanov, V.G. Kostishyn, N.I. Zabeivorota, L.V. Panina, An.V. Trukhanov, V.A. Turchenko, E.L. Trukhanova, V.V. Oleynik, O.S. Yakovenko, L.Yu. Matzui, V.E. Zhivulin. High-frequency absorption properties of gallium weakly doped barium hexaferrites. *Phil. Mag.* **2018**. Vol.99. No.5. P.585-605. DOI: 10.1080/14786435.2018.1547431
- [5] M. Waqar, M.A. Rafiq, T.A. Mirza, F.A. Khalid, A. Khaliq, M.S. Anwar, M. Saleem. Synthesis and properties of nickel-doped nanocrystalline barium hexaferrite ceramic materials. *Appl. Phys. A*. **2018**. Vol.124. No.286. DOI: 10.1007/s00339-018-1717-z
- [6] X.S. Liu, P.H. Gomez, Y.X. Deng, K. Huang, X.B. Xu, S.X. Qiu, D. Zhou. Analysis of magnetic disaccommodation in La^{3+} - Co^{2+} -substituted strontium ferrites *J. Magn. Magn. Mater.* **2009**. Vol.321. No.16. P.2421-2424. DOI: 10.1016/j.jmmm.2009.02.124
- [7] E.A. Gorbachev, L.A. Trusov, A.E. Sleptsova, E.S. Kozlyakova, L.N. Alyabyeva, S.R. Yegiyani, A.S. Prokhorov, V.A. Lebedev, I.V. Roslyakov, A.V. Vasiliev, P.E. Kazin. Hexaferrite materials displaying ultra-high coercivity and sub-terahertz ferromagnetic resonance frequencies. *Mater. Today*. **2020**. Vol.32. P.13-18. DOI: 10.1016/j.mattod.2019.05.020
- [8] A. Goldman. Ferrites for Microwave Applications. In: Modern Ferrite Technology. *Springer, Boston, MA*. **2006**. P.375-386. DOI: 10.1007/978-0-387-29413-1_15
- [9] J.G. Fisher, H. Sun, Y.-G. Kook, J.-S. Kim, P.G. Le. Growth of single crystals of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ by solid state crystal growth. *J. Magn. Magn. Mater.* **2016**. Vol.416. P.384-390. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.04.079
- [10] K. Huang, J.Y. Yu, L. Zhang, J.R. Xu, Z.Y. Yang, C.C. Liu, W. Wang, X.C. Kan. Structural and magnetic properties of Gd-Zn substituted M-type Ba-Sr hexaferrites by sol-gel auto-combustion method. *J. Alloys Compd.* **2019**. Vol.803. P.971-980. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.348
- [11] J. Carvalheiras, R.M. Novais, F. Mohsenia, J. S. Amaral, M.P. Seabra, J.A. Labrincha, R.C. Pullar. Synthesis of red mud derived M-type barium hexaferrites with tuneable coercivity. *Ceram. Int.* **2020**. Vol.46. No.5. P.5757-5764. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.11.025
- [12] Susilawati, Doyan, A., Al-Qoyyim, T. M., Ap'aludin, Maemum, P. J., Ristanti, C. I., Ariani, B. I. Synthesis of Barium M-Hexaferrite Using Co-precipitation Method with Zn Doping Based on Natural Iron Sand at Tebing Beach, North Lombok as Microwave Absorbent Material. *JPPIPA*. **2023**. Vol.9. No.1. P.498-503. DOI: 10.29303/jppipa.v9i1.2935
- [13] Y. Ahmed, A. Paul, P.H. Boštjančič, A. Mertelj, D. Lisjak D. Zabek. Synthesis of barium hexaferrite nanoparticles for ethylene glycol ferrofluids. *J. Mater. Chem. C*. **2023**. Vol.11. No.45. P.16066-16073. DOI: 10.1039/D3TC03833E
- [14] А.С. Чернуха, А.А. Зверева, Г.М. Зирник, Д.Р. Пашнин, К.Э. Мустафина, И.Е. Беляев, О.В. Дюкова, М.В. Артюкова, Е.В. Малёв, В.Е. Живулин, Т.В. Мосунова, Д.А. Винник. Получение гексаферрита бария методом самовозгорания. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия»*. **2021**. Т.13. №3. С.40-48. DOI: 10.14529/chem210305 [A.S. Chernukha, A.A. Zvereva, G.M. Zirnuk, D.R. Pashnin, K.Ye. Mustafina, I.E. Belyaev, O.V. Dyukova, M.V. Artyukova, E.V. Malyov, B.E. Zhivulin, T.V. Mosunova, D.A. Vinnik. Synthesis of Barium Hexaferrite by the Self-combustion Method. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chemistry*. **2021**. Vol.13. No3. С.40-48. DOI: 10.14529/chem210305 (Russian)]
- [15] R.K. Verma, R.K. Singh, A. Narayan, L. Verma, A.K. Singh, A. Kumar, P.K. Pathak, A.K. Aman. Low-temperature synthesis of hexagonal barium ferrite ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) nanoparticles by annealing at 450 C followed by quenching. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2017**. Vol.129. No.8. P.691-699. DOI: 10.1007/s10973-017-6247-y
- [16] A.I. Kovalev, D.A. Vinnik, D.A. Zhrebtsov, E.A. Belaya. Sol-Gel synthesis of nanodispersed solid solutions based on $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ barium hexaferrite. *Rev. and Adv. in Chem.* **2023**. Vol.13. No.1. P.60-65. DOI: 10.1134/S2634827623700198

- Полная исследовательская публикация** _____ Мухамадеев А.Э., Дресвянников А.Ф.
- [17] E. Mazario, P. Herrasti, M.P. Morales, N. Menendez. Synthesis and characterization of CoFe₂O₄ ferrite nanoparticles obtained by an electrochemical method. *Nanotechnology*. **2012**. Vol.23. No.35. 355708. DOI: 10.1088/0957-4484/23/35/355708
- [18] Попов Ю.А. Теория взаимодействия металлов и сплавов с коррозионно-активной средой. *Москва: Наука*. **1995**. 200с. [Yu.A. Popov. Theory of interaction of metals and alloys with a corrosive environment. *Moscow: Nauka*. **1995**. 200p. (Russian)]

The English version of the article have been published in the international edition of the journal

Butlerov Communications A

Advances in Organic Chemistry & Technologies

The Reference Object Identifier – ROI: jbc-A/25-11-4-4

The Digital Object Identifier – DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-10-52/ROI-jbc-A/25-11-4-4

**Synthesis substituted barium hexaferrite
using electrogenerated reagents**

© **Artur E. Mukhamadeev,⁺ Alexander F. Dresvyannikov***

Electrochemical engineering Division. Institute of Petroleum, Chemistry and Nanotechnologies.

Kazan National Research Technological University. Karl Marx, 68. Kazan, 420015.

Tatarstan Republic. Russia. Phone: +7 (996) 125-58-79. E-mail: m.artur_98@mail.ru

*Supervising author; ⁺Corresponding author

Keywords: anodic dissolution, steel 3, electrochemical synthesis, sediment, heat treatment, XRD analysis, barium hexaferrite.

Abstract

In this work, the possibility of obtaining cerium-substituted barium hexaferrite by an electrochemical method based on anodic dissolution of the iron anode and subsequent heat treatment of the precipitate obtained in the volume of the solution during electrolysis is evaluated. The electrolysis was carried out in a coaxial diaphragm-free electrolysis reactor with a cathode in the form of a 12X18H10T stainless steel wire, the area of which is much smaller than the area of the anode made of low carbon steel. The anodic current efficiency during electrolysis exceeds 100%, which indicates the dissolution of the steel electrode, both by electrochemical and chemical mechanisms. The average rate of anodic oxidation of the electrode is about 33 mg·cm⁻²·h⁻¹. The low rate is due to the slowing of anodic dissolution of the metal over time due to the formation of poorly soluble products on its surface. The acidity of the reaction medium within the reactor-electrolyzer varies widely during the process: from 1.66 for the initial electrolyte to 12.37 for the reaction mixture with sediment at the end of electrolysis. The increase in the pH of the reaction medium occurs due to the alkalization of the near-cathode space and the movement of the products of the cathode reaction as a result of the movement of the masses of the solution by the released hydrogen bubbles in the direction from the center to the periphery of the reactor-electrolyzer. Some of the surface iron compounds in the form of polynuclear hydroxo-aqua complexes pass into solution, where, under conditions of changing pH of the environment, they are converted into poorly soluble basic iron compounds – precursors of oxides. Intensive hydrogen evolution at the cathode promotes mixing of the solution throughout the reactor volume, as well as precipitation of solution components and anode dissolution products due to alkalization of the solution. The phase composition of the product, determined by X-ray diffraction, showed that in the case of a precipitate subjected to low-temperature treatment (100 °C), its composition includes barium cerate (1%) and iron oxides. High-temperature treatment of the dried precipitate at 1100 °C makes it possible to obtain barium hexaferrite with a high yield (~95%) with a minimum amount of impurities (cerium oxide and maghemite).