

СИНТЕЗ И СТРУКТУРА ГЕКСАФЕРРИТА БАРИЯ $\text{BaFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$ ($x = 0-1$)

© 2024 г. А. Ю. Пунда^{1,*}, К. П. Гафарова¹, В. Е. Живулин¹, А. С. Чернуха^{1,2}, А. Р. Зыкова¹,
С. А. Гудкова^{1,2}, Л. А. Песин¹, Г. П. Вяткин¹, Д. А. Винник¹⁻³

¹ Южно-Уральский государственный университет

(национальный исследовательский университет), Челябинск, 454080 Россия

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, 141701 Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

*e-mail: pundaai@susu.ru

Поступило в редакцию 18 января 2024 г.

После доработки 20 марта 2024 г.

Принято к печати 21 марта 2024 г.

В работе представлены результаты синтеза и исследования замещенного индием гексаферрита бария состава $\text{BaFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$. Исследуемые ферриты получены методом твердофазного синтеза. Степень замещения $x(\text{In})$ варьировали от 0 до 1 с шагом в 0.25. Исследование полученных материалов проводили методом рентгенофлуоресцентной энергодисперсионной спектроскопии и рентгенофазового анализа. По данным рентгенофлуоресцентной спектроскопии рассчитаны брутто-формулы полученных соединений. По данным рентгенофазового анализа установлено, что все материалы имеют одну кристаллическую фазу со структурой феррита М-типа. По данным порошковой дифракции рассчитаны параметры элементарной кристаллической ячейки. Выявлено линейное увеличение объема кристаллической ячейки при замещении железа индием при $x = 0-0.84$ от 696.94 (8) до 714.35(4) Å³ соответственно. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии определены температуры Кюри. Установлено линейное уменьшение температуры Кюри с 452 до 292°C при замещении железа индием.

Ключевые слова: гексаферриты М-типа, твердофазный синтез, $\text{BaFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$, температура Кюри, легирование индием

DOI: 10.31857/S0044460X24020149, **EDN:** GUJHYL

ВВЕДЕНИЕ

Получение функциональных керамических материалов с заданными свойствами для нужд промышленности является актуальной задачей в современном материаловедении. Функциональные керамические материалы должны обладать возможностью настройки свойств для обеспечения функционала и стабильности работы конечного изделия.

Материалы на основе ферритов М-типа привлекают большое внимание исследователей за счет их магнитных свойств. Главное применение обусловлено высокими показателями анизотропии свойств и,

соответственно, высокими значениями естественного ферромагнитного резонанса, что важно для поглотителей электромагнитного излучения [1–4], устройств СВЧ электроники [5–7], элементов антенн приемопередачи [8] и экранирования электромагнитных помех [9, 10]. В последние годы гексаферриты все чаще применяют в приборах терагерцового [11, 12] и субтерагерцового диапазонов частот [13], таких как настраиваемые резонаторы [14], изоляторы [15] и радиопоглощающие покрытия, в которых гексаферриты (прежде всего, гексаферрит бария) применяют как в виде пленок, так и в виде объемных материалов [16].

Частичное замещение железа в структуре гексаферрита бария является одним из возможных способов варьирования функциональных характеристик. Кристаллографически структура магнетоплюмбита включает пять неэквивалентных позиций ионов железа, которые образуют две магнитные подрешетки с противоположно направленными спинами. Замещение железа другим элементом в подрешетках позволяет получать твердые растворы со свойствами, отличными от чистого гексаферрита. Это связано с отличием электронной, магнитной структур и ионного радиуса замещающего элемента от железа.

Известны работы, направленные на замещение железа в гексаферрите алюминием [17, 18], марганцем [19–21], медью [22], гадолинием [23, 24], никелем [25, 26], кобальтом [27] и скандием [28]. Также есть работы с одновременным замещением железа двумя катионами различных элементов [29–35]. Найдены работы о замещении железа индием до $x = 0.1$ в формуле $\text{BaFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$, описаны их структурные и термические [36], а также магнитные свойства [37].

В зависимости от требований к форме и морфологии получаемого материала применяют следующие методы синтеза гексаферрита бария. Золь-гель метод позволяет получить равномерно смешанные частицы гексаферрита бария с развитой поверхностью и интересными магнитными свойствами [38–41]. Твердофазный синтез применяют для получения микропорошков и керамики [42]. Метод соосаждения применяют для получения продукта с высокой чистотой и мелким размером частиц [43–47]. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, оптимальный метод для синтеза гексаферрита бария зависит от конкретных требований к морфологии частиц, магнитным свойствам и чистоте полученного продукта.

В представленной работе в качестве метода получения был выбран твердофазный синтез. Это обусловлено несколькими причинами. Во-первых, метод включает наименьшее количество этапов подготовки и синтеза. Во-вторых, это метод, в котором реагенты находятся в твердом состоянии, что обеспечивает более стабильные и контролируемые условия синтеза, это важно для получения продукта высокого качества. В-третьих, твердофазный метод синтеза гексаферрита бария более экономичен по сравнению с другими методами синтеза, так как не

требует использования большого количества растворителей и других вспомогательных компонентов. Таким образом, использование твердофазного метода синтеза является обоснованным для решения задач представленного исследования.

В качестве замещающего катиона выбран индий. Этот крупный немагнитный катион может заместить магнитный катион железа преимущественно в одной магнитной подрешетке, что увеличит магнитную проницаемость всего материала в сравнении с чистым гексаферритом бария. Актуальной является отработка методики синтеза замещенного индием гексаферрита бария, а также изучение влияния такого замещения на структуру и магнитные свойства твердых растворов, что имеет значение для выбора областей применения создаваемого материала.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для получения замещенного индием гексаферрита бария состава $\text{BaFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$ в качестве исходных компонентов использовали BaCO_3 , Fe_2O_3 , In_2O_3 . Составы исходных смесей представлены в табл. 1.

В табл. 2 представлены результаты элементного анализа полученных материалов и рассчитанные по этим данным брутто-формулы. Из таблицы видно, что изначально заданный состав шихты с достаточно хорошей точностью соответствует составу полученных ферритов. На рис. 1 представлена зависимость

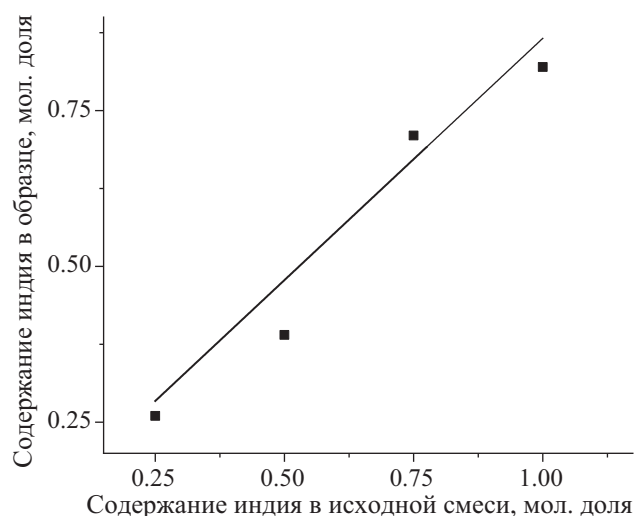


Рис. 1. Зависимость содержания индия в синтезированном материале от его содержания в исходной шихте.

Таблица 1. Состав шихты для синтеза $\text{BaFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$ (мол. доля).

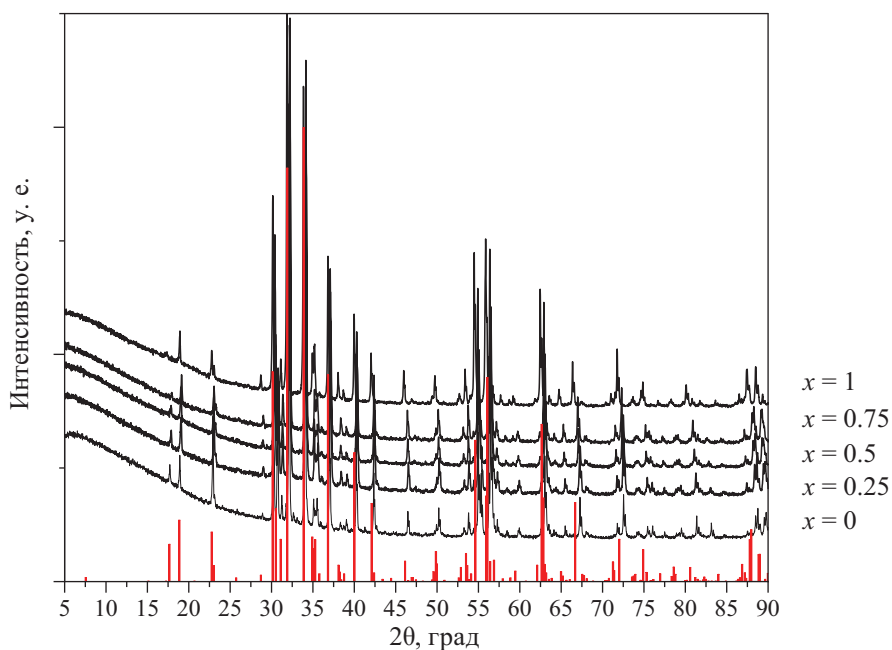
Образец	In_2O_3	Fe_2O_3	BaCO_3
$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	—	0.8292	0.1707
$\text{BaFe}_{11.75}\text{In}_{0.25}\text{O}_{19}$	0.0297	0.8017	0.1686
$\text{BaFe}_{11.5}\text{In}_{0.5}\text{O}_{19}$	0.0586	0.7749	0.1665
$\text{BaFe}_{11.25}\text{In}_{0.75}\text{O}_{19}$	0.0868	0.7487	0.1645
$\text{BaFe}_{11}\text{In}_1\text{O}_{19}$	0.1143	0.7232	0.1625

Таблица 2. Состав твердых растворов $\text{BaFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$.

Расчетная брутто-формула	Элементный состав, ат%			Экспериментальная брутто-формула
	In	Fe	Ba	
$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	0	92.73	7.27	$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$
$\text{BaFe}_{11.75}\text{In}_{0.25}\text{O}_{19}$	2.07	90.09	7.84	$\text{BaFe}_{11.74}\text{In}_{0.26}\text{O}_{19}$
$\text{BaFe}_{11.5}\text{In}_{0.5}\text{O}_{19}$	3.08	88.92	8	$\text{BaFe}_{11.11}\text{In}_{0.39}\text{O}_{19}$
$\text{BaFe}_{11.25}\text{In}_{0.75}\text{O}_{19}$	5.56	86.57	7.87	$\text{BaFe}_{11}\text{In}_{0.71}\text{O}_{19}$
$\text{BaFe}_{11}\text{In}_1\text{O}_{19}$	6.77	84.99	8.24	$\text{BaFe}_{10.32}\text{In}_{0.82}\text{O}_{19}$

содержания индия в синтезированном материале от его содержания в исходной шихте. Видно, что с увеличением содержания индия в исходной смеси линейно возрастает содержание этого элемента в твердом растворе. При этом

наблюдается небольшое систематическое снижение концентрации индия при увеличении его содержания в шихте. Вероятно, это снижение связано с неравномерным испарением компонентов исходной смеси.


Рис. 2. Дифрактограммы твердых растворов $\text{BaFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$. Красной штрихграммой обозначены литературные данные для $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ [48].

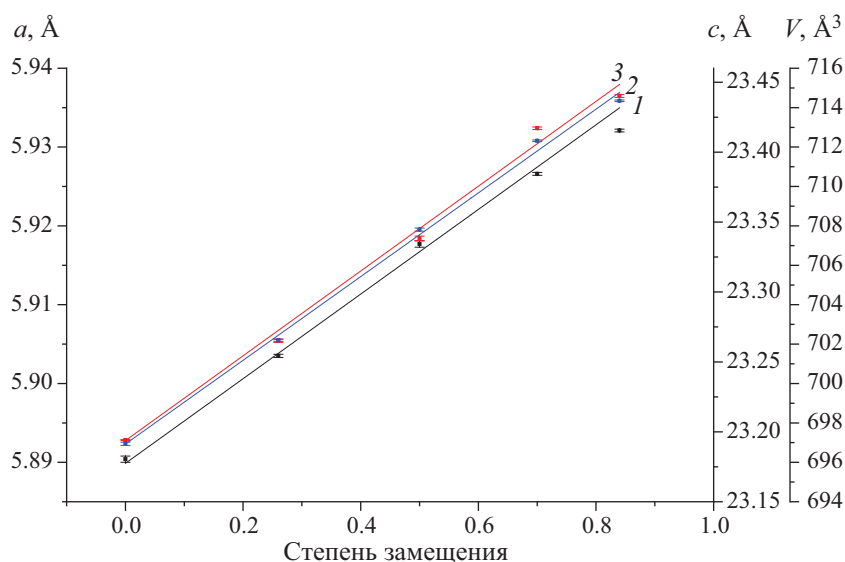


Рис. 3. Параметры элементарной кристаллической ячейки твердых растворов $\text{BaFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$. 1 – a (Å), 2 – c (Å), 3 – V (Å³).

На рис. 2 представлены дифрактограммы полученных материалов. Штрихграмма обозначает положения максимумов для гексаферрита бария $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ [48]. Штрихграмма из работы [48] сдвинута в сторону меньших углов относительно рентгенограммы полученного в настоящей работе $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$. Предположительно, это связано с разными физическими условиями синтеза (скоростью нагрева печи, скоростью охлаждения и др.). По данным рентгенофазового анализа можно сделать

заключение о том, что все полученные материалы имеют одну кристаллическую фазу со структурой магнетоплюмбита. Увеличение концентрации индия приводит к сдвигу рентгеновских рефлексов в область меньших углов 2θ , что свидетельствует об увеличении параметров кристаллической решетки. По данным порошковых дифрактограмм рассчитаны параметры элементарной кристаллической решетки. Рассчитанные параметры кристаллической решетки представлены на рис. 3. Увеличение значений параметров кристаллической решетки практически линейно зависит от состава, что обусловлено отличием ионных радиусов индия и железа. Ионный радиус индия для КЧ = 4 составляет $r(\text{In}^{3+}) = 0.76$ Å, для железа $r(\text{Fe}^{3+}) = 0.63$ Å [49].

Значение температуры Кюри также практически линейно снижается с увеличением содержания индия (рис. 4). Это происходит из-за уменьшения обменного взаимодействия в магнитных подрешетках с увеличением концентрации индия.

ВЫВОДЫ

Методом твердофазного синтеза получены замещенные индием ферриты состава $\text{BaFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$. Выявлено, что оптимальной температурой для проведения твердофазной реакции является температура 1350°C. Обнаружено незначительное

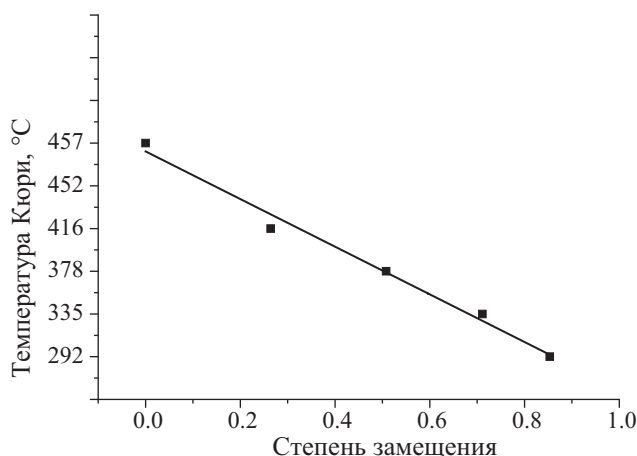


Рис. 4. Значения точки Кюри для твердых растворов $\text{BaFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$ (погрешность $\pm 2^\circ\text{C}$).

снижение содержания индия в полученных материалах в сравнении с составом смеси для синтеза. Методом рентгенофазового анализа показано, что замещение железа индием приводит к монотонному увеличению параметров кристаллической решетки, что согласуется с данными работы [37]. Причиной этого является различие в ионных радиусах железа и индия. Кристаллическая решетка рассчитана с использованием программного пакета PDXL.

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии определена температура Кюри ферритов. Выявлено, что монотонное увеличение степени замещения индием приводит к монотонному уменьшению значения температуры Кюри. Авторами [37] в диапазоне замещения 0.1–1 железа индием установлены температуры Кюри от 417 до 297°C, что хорошо согласуется с данными, полученными в нашей работе. В дальнейшем планируется исследования магнитных и электрических свойств.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходных компонентов для синтеза образцов использовали порошки BaCO_3 , Fe_2O_3 , In_2O_3 с квалификацией ЧДА. Вещества смешивали в стехиометрических отношениях и перетирали в агатовой ступе до однородного состояния. После перетирания смесь прессовали в таблетки с использованием металлической пресс-формы диаметром 20 мм при помощи лабораторного гидравлического пресса с усилием в 5 т/см². Полученные таблетки помещали в высокотемпературную печь. Для исключения взаимодействия синтезируемых веществ с элементами печи образцы размещали на платиновой подложке. Синтез проводили при 1350°C в течение 5 ч.

Элементный состав изучали, используя сканирующий электронный микроскоп JEON модели JSM7001F, оборудованный рентгеновским энергодисперсионным спектрометром INCA X-max 80. Фазовый состав и структуру полученных материалов изучали с применением порошкового рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima IV.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (шифр проекта 103751372).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Velhal N., Kulkarni G., Mahadik D., Chowdhury P., Barshilia H., Puri V. // J. Alloys Compd. 2016. Vol. 682. P. 730. doi 10.1016/j.jallcom.2016.04.310
2. Pullar R. // Progr. Mater. Sci. 2012. Vol. 57. P. 1191. doi 10.1016/j.pmatsci.2012.04.001
3. Xu Z., Qi Z., Wang G., Liu C., Cui J., Li W., Wang T. // Chinese Phys. (B). 2022. Vol. 33. N 3. doi 10.1088/1674-1056/ac5240
4. Tran N., Yang R., Jeong W., Manh D.H., Phan T., Lee B. // J. Am. Ceram. Soc. 2022. Vol. 105. P. 4122. doi 10.1111/jace.18378
5. Vovchenko L., Matzui L., Brusylovets L., Oliynyk V., Launets V., Shames A., Yakovenko O., Skoryk N. // Mater. Sci. Eng. Technol. 2016. Vol. 47. P. 139. doi 10.1002/mawe.201600487
6. Wang Y., Huang P., Tran N., Ayed H., Mouldi A. // Surfaces and Interfaces. 2022. Vol. 31. Art. no. 102065. doi 10.1016/j.surfin.2022.102065
7. Xiong X., Ma H., Mohammed J., Mehrez S., Alamri S., Giang H., Hoi H., // Ceram. Int. 2022. Vol. 48. P. 27420. doi 10.1016/j.ceramint.2022.05.395
8. Miranda F.A., Subramanyam G., Keuls F.W., Romanofsky R.R., Warner J.D., Mueller C.H. // IEEE Trans. Microwave Theory Technol. 2000. Vol. 48. P. 1181. doi 10.1109/22.853458
9. Suthar M., Roy P.K. // Mater. Sci. Eng. (B). 2022. Vol. 283. Art. no. 115801. doi 10.1016/j.mseb.2022.115801
10. Shakir H.M.F., Shahzad M., Aziz H.R., Rizwan M.S., Shahid S., Ali S.H., Zhao T. // J. Alloys Compd. 2022. Vol. 902. Art. no. 163847. doi 10.1016/j.jallcom.2022.163847
11. Hu Z., Koval V., Wu J., Yang B., Leavesley A., Wylde R., Reece M., Jia C., Yan H. // ACS App. Mater. Interfaces. 2022. Vol. 14. P. 46738. doi 10.1021/acsami.2c13088
12. Ahmed A., Prokhorov A.S., Anzin V., Bush A., Vinnik D. A., Gorshunov B., Alyabyeva L.N. // J. Alloys Compd. 2022. Vol. 898. P. 162761. doi 10.1016/j.jallcom.2020.155462
13. Alyabyeva L.N., Prokhorov A.S., Vinnik D.A., Anzin V.B., Ahmed A.G., Mikheykin A., Bednyakov P., Kadlec C., Kadlec F., Prado E., Prokleška J., Proschek P., Kamba S., Pronin A.V., Dressel M., Abalmasov V.A., Dremov V.V., Schmid S., Savinov M., Lunkenheimer P., Gorshunov B.P. // NPG Asia Mater. 2021. Vol. 13. Art. no. 63. doi 10.1038/s41427-021-00331-x
14. Gorbachev E.A., Trusov L.A., Sleptsova A.E., Kozlyakova E.S., Alyabyeva L.N., Yegiyani S.R., Prokhorov A.S., Lebedev V.A., Roslyakov I.V., Vasiliev A.V., Kazin P.E. //

- Mater. Today. 2020. Vol. 32. P. 13. doi 10.1016/j.mat-tod.2019.05.020
15. Song Y.Y., Ordóñez-Romero C.L., Wu M. // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 95. P. 142506. doi 10.1063/1.3246170
 16. Harris V.G. // IEEE Trans. Magnetics. 2012. Vol. 48. P. 1075. doi 10.1109/TMAG.2011.2180732
 17. Trukhanov A., Trukhanov S., Kostishyn V.G., Panina L.V., Salem M., Kazakevich I.S., Turchenko V., Kochervinsky V.V., Krivchenya D.A. // Phys. Solid State. 2017. Vol. 59. P. 737. doi 10.1134/S1063783417040308
 18. Chen D., Liu Y., Li Y., Yang K., Zhang H. // J. Magn. Magn. Mater. 2013. Vol. 337–338. P. 65. doi 10.1016/j.jmmm.2013.02.036
 19. Almessiere M.A., Slimani Y., Gungunes H., Ali S., Baykal A., Ercan I. // Ceram. Int. 2019. Vol. 45. N 8. P. 10048. doi 10.1016/j.ceramint.2019.02.050
 20. Zhang W., Peng B., Zhang W., Zhou S., Schmidt H. // J. Magn. Magn. Mater. 2010. Vol. 322. P. 1859. doi 10.1016/j.jmmm.2009.12.041
 21. Песин Л.А., Гудкова С.А., Живулин В.Е., Павлова К.П., Стариков А.Ю., Шерстюк Д.П., Лебедев А.М., Чумаков Р.Г., Винник Д.А. // ЖСХ. 2023. Т. 64. Вып. 12. С. 119470. doi 10.26902/JSC_id119470; Pesin L.A., Gudkova S.A., Zhivulin V.E., Pavlova K.P., Starikov A.Y., Sherstyuk D.P., Lebedev A.M., Chumakov R.G., Vin-nik D.A. // J. Struct. Chem. 2023. Vol. 64. P. 2358. doi 10.1134/S0022476623120077
 22. Wu C., Wang W., Li Q., Wei M., Luo Q., Fan Y., Jiang X., Lan Z., Jiao Z., Tian Y., Sun K., Yu. Z. // J. Am. Ceram. Soc. 2022. Vol. 105. P. 7492. doi 10.1111/jace.18702
 23. Mahadevan S., Sankar A.R., Singh S., Sharma P. // J. Alloys Compd. 2023. Vol. 959. Art. no. 170456. doi 10.1016/j.jallcom.2023.170456
 24. Li Y., Liu Q., Qi M., Chen Y. // J. Electr. Mater. 2023. Vol. 52. P. 523. doi 10.1007/s11664-022-10021-1
 25. Mohammad F.Z., Huma F., Ali K. // J. Mater. Sci. 2023. Vol. 34. P. 1022. doi 10.1007/s10854-023-10377-y
 26. Irshad Z., Bibi I., Ghafoor A., Majid F., Kamal S., Ez-zine S., Elqahtani Z. M., Alwadai N., Messaoudi N., Iqbal M. // Res. Phys. 2022. Vol. 42. Art. no. 106006. doi 10.1016/j.rinp.2022.106006
 27. Teh G.B., Nagalingam S., Jefferson D.A. // Mater. Chem. Phys. 2007. Vol. 101. P. 158. doi 10.1016/j.matchemphys.2006.03.008
 28. Denisov V.M., Denisova L.T., Irtyugo L.A., Patrin G.S., Volkov N.V., Chumilina L.G. // Phys. Solid State. 2013. Vol. 55. P. 240. doi 10.1134/S1063783412120116
 29. Zhang W., Li P., Wang Y., Guo J., Li J., Shan S., Ma S., Xing S. // Magnetochemistry. 2022. Vol. 8. P. 51. doi 10.3390/magnetochemistry8050051
 30. Khan M.A., Afzal S., Gulbadan S., Mahmood K., Ash-raf G.A., Akhtar M.N. // Ceram. Int. 2023. Vol. 49. P. 12144. doi 10.1016/j.ceramint.2022.12.066
 31. Mohammed I., Mohammed J., Carol T.T., Srivastava A.K. // Hybrid Adv. 2023. Vol. 3. P. 100058. doi 10.1016/j.hybadv.2023.100058
 32. Verma S., Singh A., Sharma S., Kaur P., Godara S.K., Malhi P.S., Ahmed J., Babu P.D., Singh M. // J. Alloys Compd. 2023. Vol. 930. P. 167410. doi 10.1016/j.jall-com.2022.167410
 33. Manglam M.K., Kar M. // J. Alloys Compd. 2022. Vol. 899. Art. no. 163367. doi 10.1016/j.jallcom.2021.163367
 34. Gorbachev E.A., Trusov L.A., Alyabyeva L.N., Ro-slyakov I.V., Lebedev V.A., Kozlyakova E.S., Magdy-syuk O.V., Sobolev A.V., Glazkova I.S., Beloshapkin S.A., Gorshunov B.P., Kazin P.E. // Mater. Horizons. 2022. Vol. 9. P. 1264. doi 10.1039/D1MH01797G
 35. Younus S., Murtaza G., Aloufi N.M., Somaily H.H. // Ceram. Int. 2022. Vol. 48. P. 31041. doi 10.1016/j.cera-mint.2022.07.065
 36. Agayev F., Trukhanov S., Trukhanov A., Jabarov S., Ayubova G., Mirzayev M., Trukhanova E., Vinnik D., Kozlovskiy A., Zdorovets M., Sombra A., Zhou D., Jota-nia R., Singh C., Trukhanov A. // J. Therm. Anal. Calorim. 2022. Vol. 147. P. 14107. doi 10.1007/s10973-022-11742-5
 37. Коровушкин В.В., Труханов А.В., Шупко М.Н., Кости-шин В.Г., Исаев И.М., Миронович А.Ю., Труха-нов С.В. // ЖХХ. 2019. Т. 64. № 5. С. 463. doi 10.1134/S0044457X19050118; Korovushkin V.V., Trukhanov A.V., Shipko M.N., Kostishin V.G., Isaev I.M., Mironovich A.Yu., Trukhanov S.V. // Russ. J. Inorg. Chem. 2019. Vol. 64. N 5. P. 574. doi 10.1134/S0036023619050115
 38. Baykal A., Gungunes H., Sözeri H., Amir M., Auwal I., Asiri S., Shirsath S., Korkmaz A.D. // Ceram. Int. 2017. Vol. 43. N 17. P. 15486. doi 10.1016/j.ceramint.2017.08.096
 39. Найден Е.П., Журавлев В.А., Минин Р.В., Итин В.И., Коровин Е.Ю. // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58. Вып. 1. С. 112.
 40. Hong Y.S., Ho C.M., Hsu H.Y., Liu C.T. // J. Magn. Magn. Mater. 2004. Vol. 279. P. 401. doi 10.1016/j.jmmm.2004.02.008
 41. Alange R., Khirade P., Birajdar S., Humbe A., Jad-hav K.M. // J. Mol. Struct. 2015. Vol. 1106. P. 460. doi 10.1016/j.molstruc.2015.11.004
 42. Lim E.S., Mun K.R., Kang Y.M. // J. Magn. Magn. Mater. 2018. Vol. 464. P. 26. doi 10.1088/1757-899X/202/1/012040
 43. Hu S.L., Liu J., Yu H.Y., Liu Z.W. // J. Magn. Magn. Mater. 2019. Vol. 473. P. 79. doi 10.1016/j.jmmm.2018.10.044
 44. Phan T.L., Tran N., Nguyen H.H., Yang D., Dang N., Lee B. // J. Alloys Compd. 2019. Vol. 216. Art. no. 152528. doi 10.1016/j.jallcom.2019.152528
 45. Rianna M., Situmorang M., Kurniawan C., Tetuko A.P., Setiadi E.A., Ginting M., Sebayang P. // Mater. Lett. 2019. Vol. 256. Art. no. 126612. doi 10.1016/j.mat-let.2019.126612

46. Rahman L., Rahman S., Biswas B. // Helion. 2023. Vol. 9. P. 1. doi 10.1016/j.heliyon.2023.e14532
47. Gordani G., Mohseni M., Ghasemi A., Hosseini S. // Mater. Res. Bull. 2016. Vol. 76. P. 187. doi 10.1016/j.materresbull.2015.12.021
48. Wong-Ng W., McMurdie H., Paretzkin B., Hubbard C., Dragoo A. // Powder Diffract. 1988. Vol. 3. P. 246.
49. Shannon R.D. // Acta Crystallogr. 1976. Vol. 32. P. 751. doi 10.1107/S0567739476001551

Synthesis and Structure of Barium Hexaferrite

$\text{BaFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$ ($x = 0-1$)

A. Yu. Punda^{a,*}, K. P. Gafarova^a, V. E. Zhivulin^a, A. S. Chernukha^{a,b}, A. R. Zykova^a,
S. A. Gudkova^{a,b}, L. A. Pesin^a, G. P. Vyatkin^a, and D. A. Vinnik^{a-c}

^a South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, 454080 Russia

^b Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, 141701 Russia

^c St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia

*e-mail: pundaai@susu.ru

Received January 18, 2024; revised March 20, 2024; accepted March 21, 2024

This study presents the results of the synthesis and examination of indium-substituted barium hexaferrite samples with the formula $\text{BaFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$. The ferrites were obtained via a solid state synthesis method. The substitution level of indium, represented by $x(\text{In})$, was varied from 0 to 1 in 0.25 increments. The stoichiometric formulas of the compounds were calculated using the EDS data. The powder X-ray diffraction analysis indicated that all samples form a single crystalline phase with the M-type hexaferrite structure. Parameters of the crystal unit cell were calculated from powder diffraction data. An expansion of the crystal lattice parameters was observed as iron was substituted with indium, from $x = 0$ to $x = 0.84$. The Curie temperatures of the synthesized ferrites were determined using differential scanning calorimetry (DSC) method. It is established that the Curie temperature decreases from 452 to 292°C with In content growth from $x = 0$ to $x = 0.84$ in the $\text{BaFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$.

Keywords: M-type hexaferrites, solid-phase synthesis, $\text{BaFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$, Curie temperature, indium doping