

**Исследование температурной стабильности постоянных магнитов
методом мёссбауэровской спектроскопии***Ш. М. Алиев, М. Ш. Алиев, Ж. Г. Ибаев*

Предложен и экспериментально проверен метод определения температурного коэффициента остаточной намагниченности порошковых постоянных магнитов из феррита бария $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, основанный на эффекте Мёссбауэра. Преимуществом данного метода является возможность использования для измерений полностью размагниченного образца.

Ключевые слова: постоянный магнит, остаточная намагниченность, намагниченность насыщения, ферриты, подрешетки феррита, эффект Мёссбауэра.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-54-57

Введение

При конструировании магнитных приборов, предназначенных для работы в разных внешних условиях, применяемые в конструкциях постоянные магниты проходят процесс магнитной стабилизации. Основными методами магнитной стабилизации являются частичное размагничивание магнита и его термообработка. Частичное размагничивание магнита заключается в том, что намагниченный магнит подвергают действию переменного магнитного поля с убывающей до нуля амплитудой. После этого, магнит несколько раз нагревают и охлаждают до температуры значительно выше и ниже ожидаемых изменений температуры – термообработка. В результате, дальнейшие изменения магнитных свойств стабилизированного магнита в некотором диапазоне изменений внешних условий (температуры,

напряженности магнитного поля) становятся обратимыми [1]. Эти изменения оцениваются соответствующими коэффициентами [1], в частности температурным коэффициентом остаточной намагниченности:

$$\alpha_{M_r} = \frac{\Delta M_r}{M_r(T_1) \Delta T}, \quad (1)$$

где $M_r(T_1)$ – остаточная намагниченность магнита при начальной температуре T_1 ; $\Delta T = T_1 - T_2$ – изменение температуры; $\Delta M_r = M_r(T_1) - M_r(T_2)$ – изменение остаточной намагниченности магнита, вызванное изменением температуры ΔT .

В данной работе, на основе эффекта Мёссбауэра, предложен метод определения коэффициента α_{M_r} применительно к порошковым постоянным магнитам из феррита бария $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$. Отметим, что мёссбауэровская спектроскопия успешно применяется для исследования структурных и магнитных свойств магнитных материалов, содержащих частицы или кластеры нанометрового размера [2–4].

Описание метода

В работе [5] было показано, что при условии параллельности направления распро-

Алиев Шамиль Минкайлович, с.н.с.
Алиев Минкаил Шамильевич, н.с.
Ибаев Жавраил Гаджиевич, с.н.с. к.ф.-м.н.
E-mail: ibaev77@mail.ru

Институт физики им. Х. И. Амирханова Дагестанского
федерального исследовательского центра РАН.
Россия, 367003, г. Махачкала, ул. Ярагского 94.

Статья поступила в редакцию 17 марта 2022 г.

© Алиев Ш. М., Алиев М. Ш., Ибаев Ж. Г., 2022

странения γ -лучей с осью текстуры магнита по относительным площадям линий поглощения мёссбауэровского спектра размагниченного образца можно определить угол рассеяния магнитной текстуры θ_i и относительную остаточную намагниченность магнита $\frac{M_r}{M_s}$ (M_r и M_s – остаточная намагниченность и намагниченность насыщения магнита соответственно). Для двух значений температуры T_1 и T_2 можем записать [5]:

$$M_r(T_1) = M_s(T_1) \frac{1 + \cos \theta_{i_1}}{2} \quad (2)$$

$$\frac{M_s(T_2)}{M_s(T_1)} = \frac{H_1(T_2) + 6H_2(T_2) + H_3(T_2) - 2H_4(T_2) - 2H_5(T_2)}{H_1(T_1) + 6H_2(T_1) + H_3(T_1) - 2H_4(T_1) - 2H_5(T_1)}, \quad (5)$$

где H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 – эффективные магнитные поля, действующие на ядра ионов железа в подрешетках феррита $2a, 12k, 2b, 4f_1$ и $4f_2$ соответственно, при значениях температуры T_1 и T_2 . Знаки минус в выражении (5) означают, что магнитные моменты $4f_1$ и $4f_2$ подрешеток феррита антипараллельны магнитным моментам $2a, 12k$ и $2b$ подрешеток и что результирующая намагниченность создается магнитными моментами последних подрешеток [7].

Таким образом, определяя по мёссбауэровским спектрам отношение $\frac{M_s(T_2)}{M_s(T_1)}$ и углы рассеяния магнитной текстуры θ_{i_1} и θ_{i_2} [5], можно найти коэффициент α_{M_r} . Метод проверялся на порошковом постоянном магните из феррита бария $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ марки 28БА-170 [1]. Образец представлял собой диск диаметром 15 мм и толщиной 70 μm , вырезанный из магнита по плоскости, перпендикулярной оси текстуры и отшлифованный с помощью алмазной пасты. Перед измерением образец размагничивался в переменном магнитном поле с убывающей до нуля амплитудой. Мёсс-

$$M_r(T_2) = M_s(T_2) \frac{1 + \cos \theta_{i_2}}{2}. \quad (3)$$

Подставляя (2) и (3) в (1), получим:

$$\alpha_{M_r} = \frac{1}{\Delta T} \left[1 - \frac{M_s(T_2)(1 + \cos \theta_{i_2})}{M_s(T_1)(1 + \cos \theta_{i_1})} \right]. \quad (4)$$

Эффективное магнитное поле, действующее на ядро иона железа в магнитной подрешетке феррита, пропорционально магнитному моменту иона [6]. Учитывая это, для феррита бария $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, имеющего пять магнитных подрешеток [7], можем записать:

бауэровские спектры ядер ^{57}Fe записывались на спектрометре ЯГРС-4М с источником γ -излучения $^{57}\text{Co}(\text{Cr})$. Исследования проводились в интервале температур 300–120 К. Образец помещался в комбинированную с криостатом температурную камеру с плавной регулировкой температуры. Автоматическая терморегулировка обеспечивала поддержание заданной температуры с точностью $\pm 0,5$ К.

Анализ полученных мёссбауэровских спектров образца (рисунок) с помощью программы Univem MS показал, что они представляют собой суперпозицию пяти зеемановских секстетов, обусловленных ионами железа Fe^{3+} в пяти магнитных подрешетках гексагонального феррита $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ типа М [7]. Более детально, кристаллическая структура гексагонального феррита $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (типа М) может быть представлена как чередование вдоль гексагональной оси С плотноупакованных шпинельных S и гексагональных R-блоков кислорода. Иона железа Fe^{3+} в этой структуре занимают пять кристаллографических неэквивалентных положений, соответственно различают пять магнитных подрешеток.

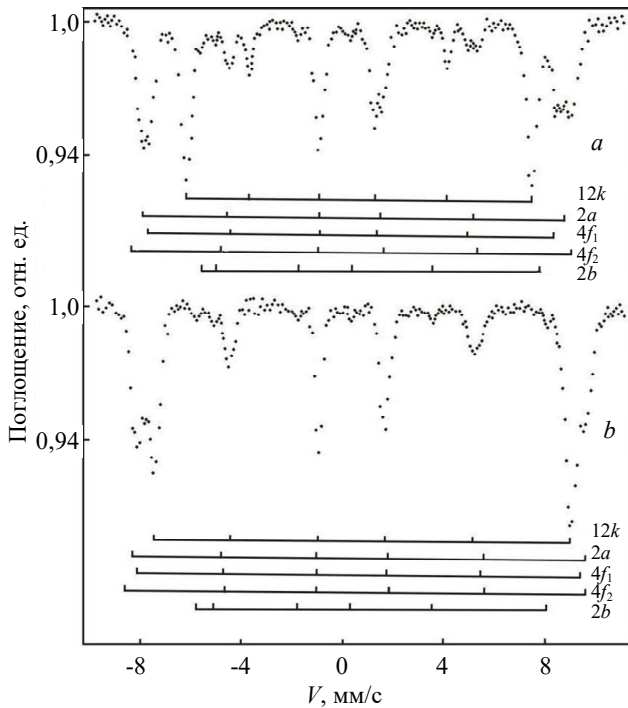


Рисунок. Мёссбауэровские спектры ядер ^{57}Fe в образце из постоянного магнита марки 28БА-170: а – $T = 300$ К; б – $T = 120$ К. Направление распространения γ -лучей параллельно оси текстуры магнита

Мёссбауэровские спектры образца свидетельствуют о сильной анизотропии тепловых колебаний ионов железа в $2b$ положениях. Амплитуда колебаний $2b$ -ионов вдоль оси С значительно выше по сравнению с амплитудой колебаний в базисной плоскости бипирамиды, что является причиной необычно большого для иона Fe^{3+} значения квадрупольного расщепления ΔE в $2b$ подрешетке [7]. В таблице приведены характеристики кристаллографических положений ионов железа в соответствующих подрешетках феррита $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, их мёссбауэровские характеристики (изомерный сдвиг δ , квадрупольное расщепление ΔE) и величины эффективных магнитных полей $H_{\text{эфф}}$ действующих на ядра ионов железа в этих подрешетках при $T = 300$ К и $T = 120$ К, полученные по мёссбауэровским спектрам образца. Угол рассеяния магнитной текстуры в образце θ_t , определяемый по относительным площадям линий поглощения мёссбауэровского спектра [5], оставался неизменным в этой области температур $\theta_t = 30^\circ$.

Таблица

Характеристики кристаллографических положений и параметры сверхтонких взаимодействий (СТВ) ядер ^{57}Fe в подрешетках феррита $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$

Подрешетки	Количество ионов Fe^{3+}	Блок	Направление спина	Параметры СТВ при $T=300$ К			$H_{\text{эфф}}$ (кОе) при $T=120$ К
				$H_{\text{эфф}}$ кОе	ΔE , мм/сек	δ , мм/сек	
12k	6	S	↑	418	0,40	0,28	512
2a	1	S	↑	504	0,05	0,31	535
4f ₁	2	S	↓	490	0,20	0,17	521
4f ₂	2	R	↓	519	0,14	0,33	537
2b	1	R	↑	403	2,25	0,26	420

По описанному методу мы нашли $\alpha_{M_r} = -2 \times 10^{-3}$ град $^{-1}$, что совпадает с температурным коэффициентом остаточной намагниченности, полученным по магнитным измерениям [1].

Заключение

На основе эффекта Мёссбауэра предложен метод определения температурного коэффициента остаточной намагниченности порошковых постоянных магнитов из феррита

бария $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$. При магнитных измерениях этого коэффициента, применяемый в конструкции постоянный магнит проходит процесс магнитной стабилизации, заключающийся в частичном размагничивании его и многократном нагревании и охлаждении до температуры выше и ниже ожидаемой [1]. В предлагаемом методе, для определения этого коэффициента используется полностью размагниченный образец, что придает методу более прикладной характер.

Авторы статьи подтверждают отсутствие конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Преображенский А. А., Бишард Е. Г. Магнитные материалы и элементы. – М.: Высшая школа, 1986.
2. Чуев М. А. // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 98. № 8. С. 523.
3. Чуев М. А. // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 99. № 5. С. 319.
4. Алиев Ш. М., Ибаев Ж. Г., Алиев М. Ш. // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 19. С. 47.
5. Алиев Ш. М., Камилев И. К., Алиев М. Ш., Гамзатов А. Г., Ибаев Ж. Г. // ПТЭ. 2011. № 6. С. 86.
6. Николаев В. И., Попов Ф. И., Черепанов В. М. // ЖЭТФ. 1970. Т. 58. № 2. С. 515.
7. Башкиров Ш. Ш., Либерман А. Б., Синявский В. И. Магнитная микроструктура ферритов. – Изд. Казанского Университета, 1978.

PACS: 76.80.+y

Investigation of the temperature stability of permanent magnets by Mössbauer spectroscopy

Sh. M. Aliev, M. Sh. Aliev, and Zh. G. Ibaev

Institute of Physics of Dagestan Scientific Center of Russian Academy of Sciences
94 Yaragsky st., Makhachkala, 367003, Russia
E-mail: ibaev77@mail.ru

Received March 17, 2022

A method for determining the temperature coefficient of remanent magnetization of permanent magnets made of barium ferrite $Ba_2Fe_{12}O_{19}$ based on the Mössbauer effect has been proposed and experimentally verified. The advantage of the Mössbauer method is the possibility of using a completely demagnetized sample for measurements.

Keywords: permanent magnet, remanent magnetization, saturation magnetization, ferrites, ferrite sublattices, Mössbauer effect.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-54-57

REFERENCES

1. A. A. Preobrazhensky and E. G. Bishard, *Magnetic materials and elements*. (Higher school, Moscow, 1986).
2. M. A. Chuev, JETP Letters **98** (8), 523 (2013).
3. M. A. Chuev, JETP Letters **99** (5), 319 (2014).
4. Sh. M. Aliev, Zh. G. Ibaev, and M. Sh. Aliev, JETP Letters **45** (19), 47 (2019).
5. Sh. M. Aliev, I. K. Kamilov, M. Sh. Aliev, A. G. Gamzatov, and Zh. G. Ibaev, PTE, No. 6, 86 (2011).
6. V. I. Nikolaev, F. I. Popov, and V. M. Cherepanov, JETP **58** (2), 515 (1970).
7. Sh. Sh. Bashkirov, A. B. Lieberman, and V. I. Sinyavsky, *Magnetic microstructure of ferrites*. (Izd. Kazan University, 1978).