

УДК 537.622.4

doi:10.21685/2072-3040-2021-3-9

Исследование магнитных свойств стронций-замещенного ферроманганита гадолиния методом мессбауэровской спектроскопии и электронного парамагнитного резонанса

Р. А. Хамзин¹, В. В. Парфенов², И. В. Яцык³, Ф. Г. Вагизов⁴, Р. М. Еремина⁵

^{1,2,3,4,5}Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

¹RAKhamzin@stud.kpfu.ru, ²Viktor.Parfenov@kpfu.ru, ³i.yatzyk@gmail.com,

⁴vagizovf@gmail.com, ⁵REremina@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Мультиферроики редкоземельных манганитов RMnO_3 привлекают большое внимание вследствие существенной корреляции электрических и магнитных параметров упорядочения. Замещение редкоземельных ионов в RMnO_3 атомами другого радиуса и/или валентности приводит к появлению новых эффектов, таких как колоссальное магнитосопротивление, и разнообразных термомагнитных эффектов. Эти явления обычно связывают с магнитным расслоением в подсистеме магнитных моментов – образованием микрообластей ферромагнитного упорядочения в антиферро- или парамагнитной матрице. При изучении этого явления перспективно применение методов мессбауэровской спектроскопии и электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), которые позволяют регистрировать наличие порядка долей процента магнитных примесей. *Материалы и методы.* Стронций-замещенный ферроманганит гадолиния $\text{Gd}_{0,82}\text{Sr}_{0,18}\text{Mn}_{0,9}\text{Fe}_{0,1}\text{O}_3$ приготовлен по керамической технологии. Исследована его магнитная микроструктура методом мессбауэровской спектроскопии при температурах 100–300 К и ЭПР при температурах 100–340 К. *Результаты.* Данные мессбауэровских и ЭПР измерений свидетельствуют о магнитном фазовом расслоении в системе магнитных моментов в стронций-замещенном ферроманганите гадолиния. *Выводы.* Анализ мессбауэровских спектров показывает наличие одного квадрупольного дублета, изомерный сдвиг которого соответствует ионам Fe^{3+} , и суперпозиции двух зеемановских секстетов, которые говорят нам о расслоении магнитной подсистемы. Аппроксимация спектров ЭПР производилась тремя линиями L_1 , L_2 и L_3 . Две линии относятся к ферромагнитным кластерам, которые наблюдаются в парамагнитной матрице при температурах, превышающих температуру Нееля, а другая связана с ионами марганца и железа в парамагнитном состоянии. Похожее поведение магнитной подсистемы наблюдалось в керамике $\text{Eu}_{0,65}\text{Sr}_{0,35}\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ с $x = 0,2; 0,25$.

Ключевые слова: ферроманганиты, мессбауэровская спектроскопия, ЭПР, магнитно-фазовое расслоение

Для цитирования: Хамзин Р. А., Парфенов В. В., Яцык И. В., Вагизов Ф. Г., Еремина Р. М. Исследование магнитных свойств стронций-замещенного ферроманганита гадолиния методом мессбауэровской спектроскопии и электронного парамагнитного резонанса // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2021. № 3. С. 103–113. doi:10.21685/2072-3040-2021-3-9

Studying the magnetic characteristics of strontium-substituted gadolinium ferromanganite by the method of Mossbauer spectroscopy and electron paramagnetic resonance

© Хамзин Р. А., Парфенов В. В., Яцык И. В., Вагизов Ф. Г., Еремина Р. М., 2021. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

R.A. Khamzin¹, V.V. Parfenov², I.V. Yatsyk³, F.G. Vagizov⁴, R.M. Eremina⁵^{1,2,3,4,5}Kazan Federal University, Kazan, Russia¹RAKhamzin@stud.kpfu.ru, ²Viktor.Parfenov@kpfu.ru, ³i.yatsyk@gmail.com,⁴vagizovf@gmail.com, ⁵REremina@yandex.ru

Abstract. *Background.* Multiferroics of rare-earth manganites RMnO_3 attract a lot of attention due to the significant correlation between the electrical and magnetic ordering parameters. The replacement of rare-earth ions in RMnO_3 with atoms of a different radius and / or valence leads to the appearance of new effects, such as colossal magnetoresistance, and various thermomagnetic effects. These phenomena are usually associated with magnetic separation in the subsystem of magnetic moments - the formation of microregions of ferromagnetic ordering in an antiferro- or paramagnetic matrix. When studying this phenomenon, it is promising to use the methods of Mossbauer spectroscopy and electron paramagnetic resonance (EPR), which make it possible to reliably record the presence of magnetic impurities of the order of fractions of a percent. *Materials and methods.* Strontium-substituted gadolinium ferromanganite $\text{Gd}_{0.82}\text{Sr}_{0.18}\text{Mn}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_3$ was prepared by ceramic technology. Its magnetic microstructure was investigated by the method of Mossbauer spectroscopy at temperatures of 67-300 K and EPR at temperatures of 100–340 K. *Results.* The experimental data of Mossbauer and EPR measurements indicate the magnetic phase separation of magnetic moments in strontium-substituted gadolinium ferromanganite. *Conclusions.* Analysis of the Mossbauer spectra shows the presence of one quadrupole doublet, whose isomeric shift corresponds to Fe^{3+} ions, and a superposition of two Zeeman sextets, which tell us about the separation of the magnetic subsystem. The EPR spectra were approximated by three lines L_1 , L_2 , and L_3 . Two lines correspond to ferromagnetic clusters, which are observed in a paramagnetic matrix at temperatures exceeding the Néel temperature, and the other is associated with manganese and iron ions in the paramagnetic state. A similar behavior of the magnetic subsystem was observed in the ceramics $\text{Eu}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ with $x = 0.2, 0.25$.

Keywords: ferromanganites, Mossbauer spectroscopy, EPR, magnetic phase separation

For citation: Khamzin R.A., Parfenov V.V., Yatsyk I.V., Vagizov F.G., Eremina R.M. Studying the magnetic characteristics of strontium-substituted gadolinium ferromanganite by the method of Mossbauer spectroscopy and electron paramagnetic resonance. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences.* 2021;(3):103–113. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3040-2021-3-9

Введение

Для соединений RMnO_3 характерны два типа кристаллических структур: гексагональные (типа ильменита) и орторомбические (перовскитоподобные), в зависимости от ионного радиуса редкоземельных элементов R^{3+} [1]. При этом орторомбическая структура с пространственной группой P_{bmm} характерна для «легких» лантаноидов ($R = \text{La} - \text{Eu}$). Эти материалы при дырочном легировании двухвалентными катионами с большим ионным радиусом (Ca^{2+} , Sr^{2+} , Pb^{2+}) обладают колоссальным магнитосопротивлением (КМС), а некоторые из них являются сегнетоэлектриками, причем сегнетоэлектрические свойства индуцированы магнитным упорядочением ($R = \text{Dy} - \text{Gd}$) [2]. Другое семейство соединений с меньшим ионным радиусом (от Ho до Lu) образует устойчивую гексагональную структуру с пространственной группой $P6_3cm$ при комнатной и более низких температурах и также проявляет КМС и свойства мультиферроика [3]. Сосуществование сегнетоэлектрического по-

рядка и магнитного упорядочения в $R\text{MnO}_3$ с гексагональной или орторомбической структурой дает сложную физическую картину взаимодействий между зарядовыми, орбитальными, решеточными и спиновыми степенями свободы. Магнитно-неоднофазное состояние в твердых растворах $R_{1-y}A_y\text{MnO}_3$, где R – редкоземельный катион, A – двухвалентный катион, возникает вследствие фрустрации магнитных моментов, вызванной конкуренцией ферромагнитного и антиферромагнитного взаимодействий, близких друг к другу по величине. Максимальное значение магнитосопротивления (отрицательного и «биполярного» [4]) наблюдается обычно при температурах, близких к температуре Кюри. Следовательно, ферромагнитные кластеры могут существовать как в антиферромагнитной, так и в парамагнитной матрице. Такое магнитно-фазовое расслоение было обнаружено в ферроманганитах лантана и неодима [5]. Целью настоящей работы являлось исследование магнитной микроструктуры в стронций-замещенном ферроманганите гадолиния методами мессбауэровской спектроскопии и электронного парамагнитного резонанса (ЭПР).

Методика эксперимента

Стронций-замещенный ферроманганит гадолиния $\text{Gd}_{0,82}\text{Sr}_{0,18}\text{Mn}_{0,9}\text{Fe}_{0,1}\text{O}_3$ приготовлен по керамической технологии из смеси оксидов и карбоната стронция. Для повышения отношения сигнал/шум в мессбауэровских измерениях окись железа была обогащена мессбауэровским изотопом ^{57}Fe ($\approx 30\%$). Рентгеноструктурный анализ был выполнен на мини-дифрактометре МД-10. Установлено, что образец однофазен и имеет орторомбическую кристаллическую симметрию (пространственная группа $Pnma$).

Магнитная микроструктура исследовалась методами ЭПР и мессбауэровской спектроскопии. Мессбауэровские измерения проводились на стандартном спектрометре фирмы WissEL (Германия) в проточном криостате CFICEV (ICE Oxford, UK). Мессбауэровские спектры обработаны с помощью программы SpectrRelax [6]. ЭПР-спектры получены на ЭПР-спектрометре *EMXplus* в X -диапазоне (9,46 ГГц). Были найдены температурные зависимости g -фактора, резонансного поля, ширины и интенсивности линии ЭПР при температурах 100–340 К.

Результаты и их обсуждение

В ходе проведенного эксперимента были получены мессбауэровские спектры стронций-замещенного ферроманганита гадолиния $\text{Gd}_{0,82}\text{Sr}_{0,18}\text{Mn}_{0,9}\text{Fe}_{0,1}\text{O}_3$ при различных температурах ($T = 100\text{--}300\text{ K}$) (рис. 1). На всех спектрах присутствуют один квадрупольный дублет, изомерный сдвиг которого соответствует ионам Fe^{3+} (табл. 1), а также суперпозиция двух зеемановских секстетов, что может свидетельствовать о расслоении магнитной подсистемы образца, аналогично той, что наблюдалась ранее для ферроманганитов других лантаноидов [7, 8].

С ростом температуры относительная площадь дублета не изменяется (в пределах точности обработки). Изомерный сдвиг дублета и обоих секстетов уменьшается с ростом температуры образца, оставаясь в пределах, характерных для иона Fe^{3+} [7, 8]. Уменьшение изомерного сдвига этих составляющих обусловлено эффектом Доплера второго порядка. На рис. 2 приведена

температурная зависимость изомерного сдвига дублета. Сплошной линией показана кривая, аппроксимирующая экспериментальные данные в приближении модели Дебая с характеристической температурой $\theta_D = 378 \pm 30$ К.

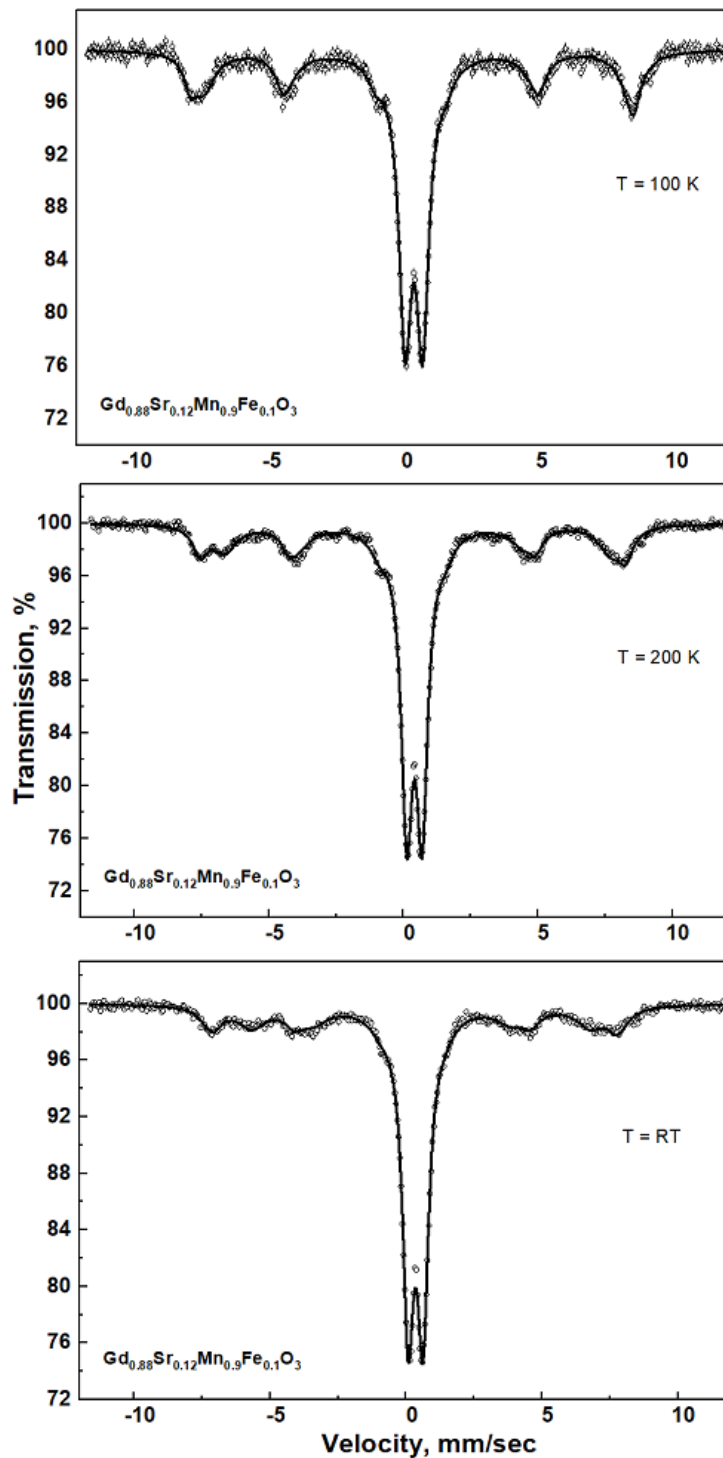


Рис. 1. Мессбауэровские спектры $\text{Gd}_{0.82}\text{Sr}_{0.18}\text{Mn}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_3$ при $T = 100\text{--}300$ К

Таблица 1

Мессбауэровские параметры для стронций-замещенного ферроманганита гадолиния $Gd_{0,82}Sr_{0,18}Mn_{0,9}Fe_{0,1}O_3$ при различных температурах

T, K		IS, мм/с	QS, мм/с	Относительная площадь, %	$H_{эфф}$, кЭ
100	Дублет	0,48 (0,01)*	0,66 (0,01)	62 (1)	
	Секстет 1	0,39	0,12	11	512 (2)
	Секстет 2	0,48	0,16	27	489
200	Дублет	0,41	0,57	62	
	Секстет 1	0,35	-0,01	14	490
	Секстет 2	0,41	0,26	24	447
300	Дублет	0,36	0,54	63	
	Секстет 1	0,28	0,10	18	463
	Секстет 2	0,37	0,34	19	386

Примечание. В скобках указана ошибка определения параметра.

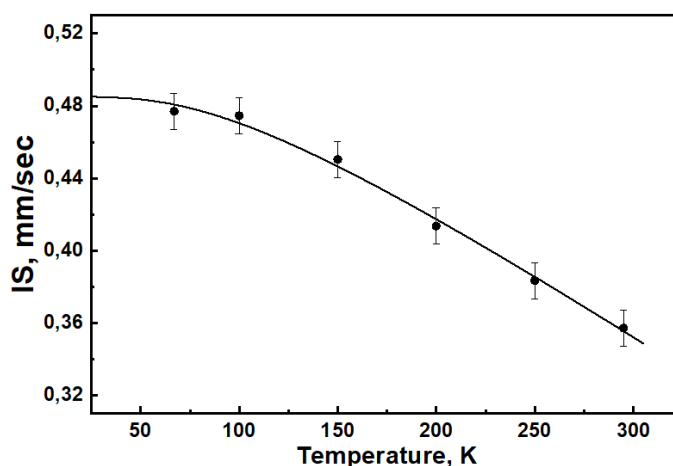


Рис. 2. Температурная зависимость изомерного сдвига дублета

Эффективное поле $H_{эфф}$ обоих секстетов также убывает с ростом температуры, причем для второго секстета примерно в 2 раза быстрее, чем для первого (табл. 1). По-разному ведет себя с ростом температуры и относительная площадь «магнитных» структур: растет у первого секстета и убывает у второго. Можно предположить, что в исследованном при различных температурах образце стронций-замещенного ферроманганита гадолиния $Gd_{0,82}Sr_{0,18}Mn_{0,9}Fe_{0,1}O_3$ наблюдается магнитное фазовое расслоение, что приводит к появлению в спектрах двух секстетов, соответствующих магнитно-упорядоченной фазе. Стехиометрический манганит гадолиния $GdMnO_3$ является антиферромагнетиком А-типа с невысокой (44 К) температурой Нееля [9]. Антиферромагнитное упорядочение реализуется в $GdMnO_3$ за счет косвенного обменного взаимодействия в подрешетке Mn^{3+} . Замена части ионов Gd^{3+} на ионы Sr^{2+} приводит к появлению в 3D-подрешетке, наряду с катионами Mn^{3+} , катионов Mn^{4+} , вступающих в кинетический ферромагнитный обмен с ионами трехвалентного марганца. Вследствие этого появляются области ферромагнитного упорядочения в антиферромагнитной или парамагнитной

матрице [5]. Попадающий в такую область мессбауэровский зонд ^{57}Fe демонстрирует в спектрах магнитную сверхтонкую структуру.

Спектры ЭПР исследованы для образца $\text{Gd}_{0,82}\text{Sr}_{0,18}\text{Mn}_{0,9}\text{Fe}_{0,1}\text{O}_3$ при температурах 100–340 К (рис. 3). Во всем температурном интервале формы линий спектра ЭПР описывались формулой (рис. 4) [10]:

$$P = \left[\frac{\Delta B + \alpha(B - B_0)}{4(B - B_0)^2 + \Delta B^2} + \frac{\Delta B - \alpha(B + B_0)}{4(B + B_0)^2 + \Delta B^2} \right], \quad (1)$$

где P – мощность поглощенного микроволнового излучения; B – магнитное поле; B_0 – резонансное поле; ΔB – ширина линии поглощения (полуширина на полувысоте); α – параметр асимметрии.

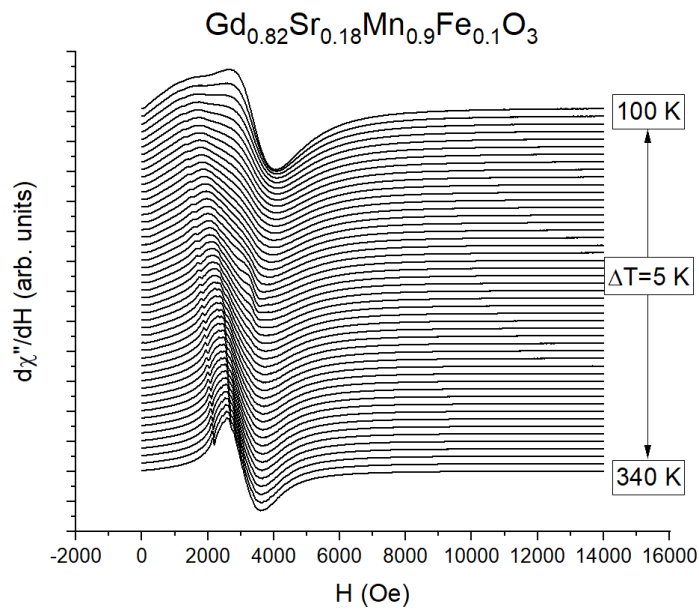


Рис. 3. Вид спектра ЭПР $\text{Gd}_{0,82}\text{Sr}_{0,18}\text{Mn}_{0,9}\text{Fe}_{0,1}\text{O}_3$ при $T = 100\text{--}340$ К

Описание спектров ЭПР в керамике $\text{Gd}_{0,82}\text{Sr}_{0,18}\text{Mn}_{0,9}\text{Fe}_{0,1}\text{O}_3$ проводилось с использованием трех линий L_1 , L_2 и L_3 (рис. 4), что совпадает с полученным результатом в мессбауэровской спектроскопии (дублет и 2 секстета). Из анализа спектров ЭПР керамического образца $\text{Gd}_{0,82}\text{Sr}_{0,18}\text{Mn}_{0,9}\text{Fe}_{0,1}\text{O}_3$ получены температурные зависимости ширины линии поглощения, резонансного поля, g -фактора и интегральной интенсивности линии ЭПР, которые представлены на рис. 5–8 соответственно.

Эффективный g -фактор у первой линии ($g_{\text{eff}} \approx 2$) практически не зависит от температуры, у второй линии он меняется от 3,64 при $T = 100$ К до 2,35 при 340 К, а у третьей – от 6,16 (100 К) до 3,07 (340 К). Спины ионов железа и марганца в ферроманганитах гадолиния связаны изотропным обменным взаимодействием, которое сужает линию ЭПР в парамагнитной фазе. Также известно, что g_{Mn} и $g_{\text{Fe}} \approx 2$. Из этого можно сделать вывод, что L_1 с эффективным g -фактором ≈ 2 в исследуемом спектре ЭПР связана с ионами марганца и железа в парамагнитном состоянии.

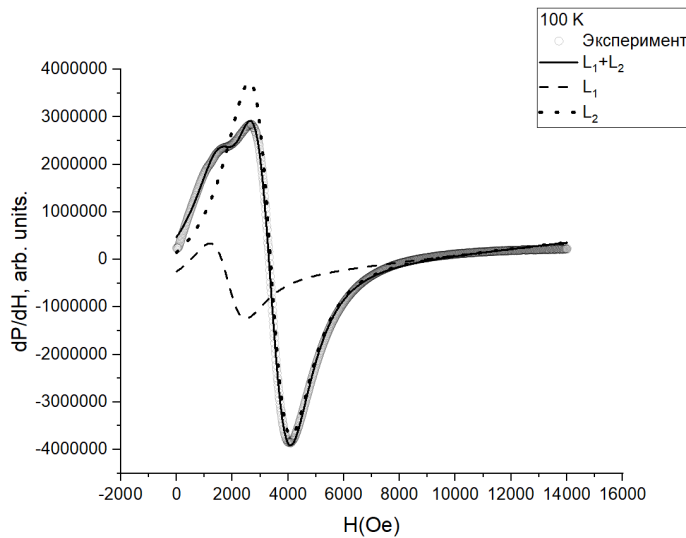


Рис. 4. Вид спектра ЭПР $Gd_{0.82}Sr_{0.18}Mn_{0.9}Fe_{0.1}O_3$ при $T = 100$ К и его аппроксимация формулой (1) (третья линия ввиду ее слабой интенсивности при данной температуре не приведена)

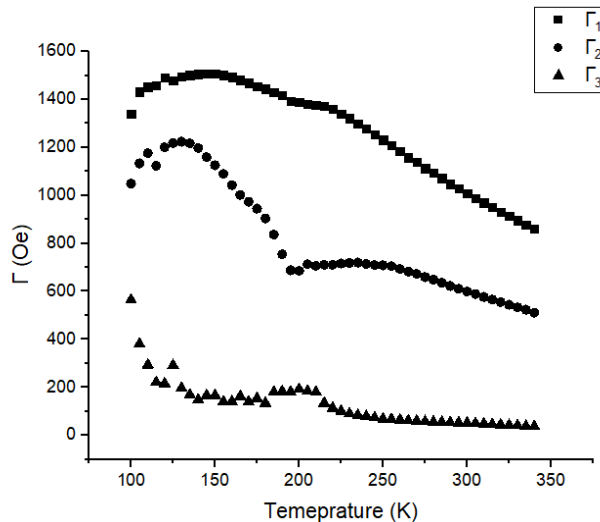


Рис. 5. Температурная зависимость ширины линии поглощения при $T = 100\text{--}350$ К

Однако L_2 и L_3 , мы полагаем, относятся к ферромагнитным кластерам, которые наблюдаются в парамагнитной матрице при температурах, превышающих температуру Нееля. Интегральная интенсивность и ширина линии сигнала второй линии имеют максимум при температуре 130 К, соответствующей температуре блокировки T_{B1} [11]. По мере увеличения температуры ширина линии ферромагнитного сигнала (L_2) примерно уменьшается в 2,4 раза от 1224 Э при 130 К до 511 Э при 340 К, а у другого (L_3) – с 564 Э при 100 К до 37 Э при 340 К. Ширина линии парамагнитного сигнала (L_1) матрицы растет от 1339 до 1500 Э в интервале 100–120 К и практически не меняется при температурах от 120 до 160 К, а при повышении температуры до 340 К

уменьшается примерно в 1,7 раза (до 861 Э). Похожее поведение магнитной подсистемы наблюдалось в керамике $\text{Eu}_{0,65}\text{Sr}_{0,35}\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ [8].

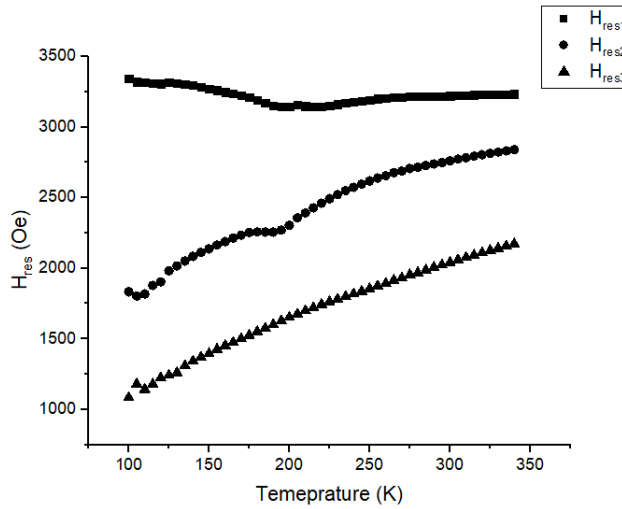


Рис. 6. Температурная зависимость резонансного поля при $T = 100\text{--}350$ К

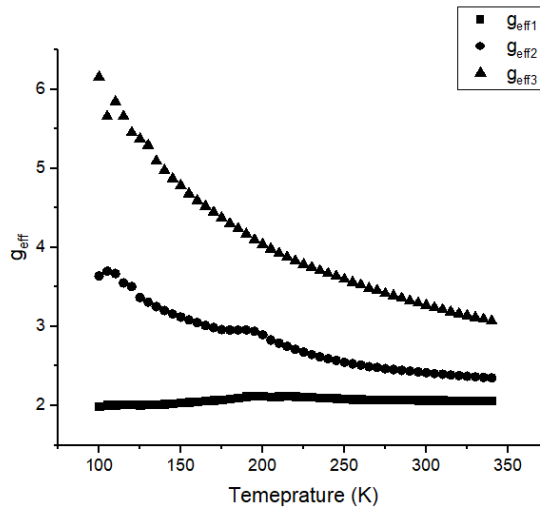


Рис. 7. Температурная зависимость g-фактора при $T = 100\text{--}350$ К

Заключение

В результате исследования магнитной микроструктуры стронций-замещенного ферроманганита гадолия $\text{Gd}_{0,82}\text{Sr}_{0,18}\text{Mn}_{0,9}\text{Fe}_{0,1}\text{O}_3$ методом мессбауэровской спектроскопии были обнаружены один квадрупольный дублет, изомерный сдвиг которого соответствует ионам Fe^{3+} , и суперпозиция двух зеемановских секстетов, которые говорят нам о расслоении магнитной подсистемы. Спектр ЭПР $\text{Gd}_{0,82}\text{Sr}_{0,18}\text{Mn}_{0,9}\text{Fe}_{0,1}\text{O}_3$ удается описать тремя линиями, что соответствует результатам ядерного гамма-резонанса. Две линии относятся к ферромагнитным кластерам, которые наблюдаются в парамагнитной матрице при температурах, превышающих температуру Нееля, а другая связана с ионами марганца и железа в парамагнитном состоянии.

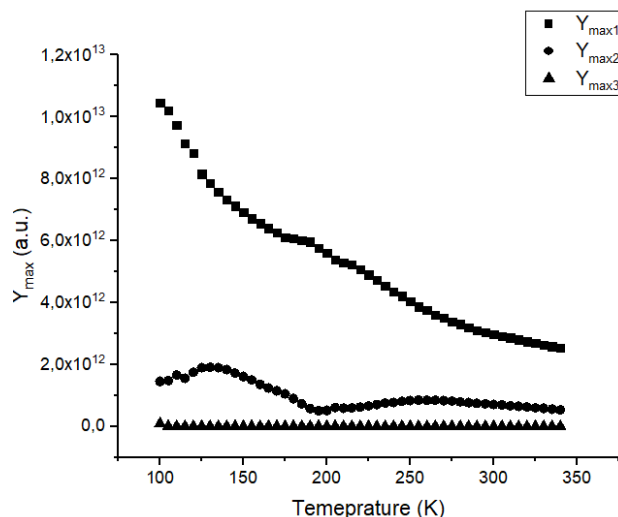


Рис. 8. Температурная зависимость интегральной интенсивности при $T = 100\text{--}350$ К

Список литературы

1. Shannon R. D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides // *Acta Cryst A*. 1976. Vol. 32. P. 751–767.
2. Rao C. N. R., Raveau B. Colossal magnetoresistance. Charge ordering and related properties of manganese oxides. Singapore : World Scientific, 1998. 356 p.
3. Wang Y. T., Luo C. W., Kobayashi T. Understanding multiferroic hexagonal manganites by static and ultrafast optical spectroscopy // *Adv. Condens. Matter Phys.* 2013. Vol. 2013. P. 1–13.
4. Харматуллин А. Р., Гильмутдинов И. Ф., Парфенов В. В., Нигьматуллина И. И. Электрические свойства стронций-замещенных ферриманганитов тулия и иттербия // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*. 2018. № 3. С. 79–86.
5. Нагаев Э. Л. Манганиты лантана и другие магнитные проводники с гигантским магнитосопротивлением // *Успехи физических наук*. 1996. Т. 166, № 8. С. 833–857.
6. Matsnev M. E., Rusakov V. S. SpectrRelax: An application for Mössbauer spectra modeling and fitting // *AIP Conf. Proc.* 2012. Vol. 1489. P. 178–185.
7. Нигьматуллина И. И., Парфенов В. В., Еремина Р. М., Гаврилова Т. П., Яцык И. В. Исследование Sr-допированных ферроманганитов иттербия методами ЭПР и мессбауэровской спектроскопии // *Физика твердого тела*. 2018. Т. 60, № 5. С. 933–939.
8. Еремина Р. М., Нигьматуллина И. И., Парфенов В. В., Ибрагимов Ш. З., Пятаев А. В., Назипов Р. А. Исследование магнитного фазового расслоения в керамике $\text{Eu}_{0,65}\text{Sr}_{0,35}\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ методами ЭПР и мессбауэровской спектроскопии // *Физика твердого тела*. 2010. Т. 52, № 11. С. 2245–2249.
9. Wang X. L., Li D., Cui T. Y., Kharel P., Liu W., Zhang Z. D. Magnetic and optical properties of multiferroic GdMnO_3 nanoparticles // *Journal of Applied Physics*. 2010. Vol. 107, № 09B510. P. 1–3.
10. Joshi J. P., Bhat S. V. On the analysis of broad Dysonian electron paramagnetic resonance spectra // *Journal of Magnetic Resonance*. 2004. Vol. 168. P. 284–287.
11. Губин С. П., Юрков Г. Ю., Кокшаров Ю. А., Хомутов Г. Б. Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства // *Успехи химии*. 2005. Т. 74, № 6. С. 539–574.

References

1. Shannon R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Cryst A*. 1976;32:751–767.
2. Rao C.N.R., Raveau B. *Colossal magnetoresistance. Charge ordering and related properties of manganese oxides*. Singapore: World Scientific, 1998:356.
3. Wang Y.T., Luo C.W., Kobayashi T. Understanding multiferroic hexagonal manganites by static and ultrafast optical spectroscopy. *Adv. Condens. Matter Phys.* 2013;2013:1–13.
4. Kharmatullin A.R., Gil'mutdinov I.F., Parfenov V.V., Nig'matullina I.I. Electrical characteristics of strontium-substituted thulium and ytterbium ferrimanganites. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences*. 2018;(3):79–86. (In Russ.)
5. Nagaev E.L. Lanthanum manganites and other magnetic conductors with giant magnetoresistance. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Advances in physical sciences*. 1996;166(8):833–857. (In Russ.)
6. Matsnev M.E., Rusakov V.S. SpectrRelax: An application for Mössbauer spectra modeling and fitting. *AIP Conf. Proc.* 2012;1489:178–185.
7. Nig'matullina I.I., Parfenov V.V., Eremina R.M., Gavrilova T.P., Yatsyk I.V. Studying Cr-doped ytterbium ferromanganites by EPR and Mössbauer spectroscopy. *Fizika tverdogo tela = Solid state physics*. 2018;60(5):933–939. (In Russ.)
8. Eremina R.M., Nig'matullina I.I., Parfenov V.V., Ibragimov Sh.Z., Pyataev A.V., Nazipov R.A. Studying the magnetic phase separation in ceramics $\text{Eu}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ using EPR and Mössbauer spectroscopy methods. *Fizika tverdogo tela = Solid state physics*. 2010;52(11):2245–2249. (In Russ.)
9. Wang X.L., Li D., Cui T.Y., Kharel P., Liu W., Zhang Z.D. Magnetic and optical properties of multiferroic GdMnO_3 nanoparticles. *Journal of Applied Physics*. 2010;107(09B510):1–3.
10. Joshi J.P., Bhat S.V. On the analysis of broad Dysonian electron paramagnetic resonance spectra. *Journal of Magnetic Resonance*. 2004;168:284–287.
11. Gubin S.P., Yurkov G.Yu., Koksharov Yu.A., Khomutov G.B. Magnetic nanoparticles: methods of preparation, structure and properties. *Uspekhi khimii = Advances in chemistry*. 2005;74(6):539–574. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Руслан Айратович Хамзин

магистрант, Казанский (Приволжский) федеральный университет (Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 16а)

E-mail: RAKhamzin@stud.kpfu.ru

Ruslan A. Khamzin

Master's degree student, Kazan Federal University (16a Kremlyovskaya street, Kazan, Russia)

Виктор Всеволодович Парфенов

доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физики твердого тела, Казанский (Приволжский) федеральный университет (Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 16а)

E-mail: Viktor.Parfenov@kpfu.ru

Viktor V. Parfenov

Doctor of physical and mathematical sciences, associate professor, professor of the sub-department of solid state physics, Kazan Federal University (16a Kremlyovskaya street, Kazan, Russia)

Иван Владимирович Яцык

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры общей физики,
Казанский (Приволжский) федеральный
университет (Россия, г. Казань,
ул. Кремлевская, 16а)

E-mail: i.yatzyk@gmail.com

Ivan V. Yatsyk

Candidate of physical and mathematical
sciences, associate professor
of the sub-department of general
physics, Kazan Federal University
(16a Kremlyovskaya street, Kazan, Russia)

Фарит Габдулхакович Вагизов

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры физики твердого тела,
Казанский (Приволжский) федеральный
университет (Россия, г. Казань,
ул. Кремлевская, 16а)

E-mail: vagizovf@gmail.com

Farit G. Vagizov

Candidate of physical and mathematical
sciences, associate professor
of the sub-department of solid state
physics, Kazan Federal University
(16a Kremlyovskaya street, Kazan, Russia)

Рушана Михайловна Еремина

доктор физико-математических наук,
доцент, профессор кафедры общей
физики, Казанский (Приволжский)
федеральный университет (Россия,
г. Казань, ул. Кремлевская, 16а)

E-mail: REremina@yandex.ru

Rushana M. Eremina

Doctor of physical and mathematical
sciences, associate professor, professor
of the sub-department of general physics,
Kazan Federal University
(16a Kremlyovskaya street, Kazan, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 31.05.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 05.07.2021

Принята к публикации / Accepted 20.07.2021