



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 537.226

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/12486>

Исследования сверхтонких взаимодействий в ферритах кобальта со структурой шпинели CoFe_2O_4 , легированных Hf, Lu и Yb, с использованием методов Мессбауэровской спектроскопии и возмущенных угловых $\gamma\gamma$ -корреляций

В. М. Вахтель^{4✉}, А. И. Величков^{1,2}, Д. В. Караиванов^{1,2}, М. М. Миланова³, Ю. Г. Сегал⁴,
Н. Т. Темербулатова^{1,5}, Д. В. Философов¹, М. П. Цветков³

¹Объединенный институт ядерных исследований,
ул. Жолио-Кюри 6, Дубна 141980, Московская обл., Российская федерация

²Институт ядерных исследований и ядерной энергетики при Болгарской академии наук,
Бульвар „Цариградско шосе“ № 72, София 1784, Болгария

³Софийский университет,
бул. «Царь Освободитель», 15, София 1504, Болгария

⁴ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»,
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская федерация

⁵Институт ядерной физики,
ул. Ибрагимова 1, Алматы 050032, Казахстан

Аннотация

Методом Мессбауэровской спектроскопии (МС) на ядрах ^{57}Fe в кобальтовых ферритах со структурой шпинели (феррошпинель) - CoFe_2O_4 , легированных Lu, Yb и Hf (1 мас. %), изучены сверхтонкие взаимодействия (СТВ), вызывающие на существование (CoFe_2O_4 : Lu – 11 %, CoFe_2O_4 : Yb – 23.4%) и отсутствие (CoFe_2O_4 :Hf) дополнительных фаз. Установлено существенное изменение параметров СТВ на ядрах ^{57}Fe в октаэдрических позициях феррошпинелей, легированных Hf, Lu и Yb. При этом на ядра ^{57}Fe в тетраэдрических позициях относительное влияние примеси незначительное.

Методом возмущенных угловых $\gamma\gamma$ корреляций ($\gamma\gamma$ -ВУК) получены параметры сверхтонких полей на ядрах ^{172}Yb в ферритах кобальта. Ионы ^{172}Yb внедрялись в образец двумя способами: путем добавления изотопов ^{172}Hf и ^{172}Lu . Выявлено существенное отличие в параметрах СТВ для этих двух случаев. Локальное окружение ионов ^{172}Yb оказывается разным в двух вариантах внедрения изотопов в образец (Hf или Lu). Различие СТВ сохраняется в температурном интервале 300–1000 К.

Установлено что разное влияние, которые Hf и Lu оказывают на параметры (градиент электрического поля, магнитное поле, и изомерный сдвиг) СТВ в образце, выявляется обоими методами МС и ВУК независимо от количества легирующего элемента. Согласно МС Hf и Lu не приводят к существенным изменениям в параметрах СТВ тетраэдрических узлов («Sextet 1»), но оказывают существенно разное влияние на те же самые параметры в октаэдрических узлах («Sextet 2»). Подобная картина наблюдается и методом ВУК – замена Hf на Lu не выявляет изменение в параметрах СТВ в одном из узлов (это октаэдрический узел), но указывает на существенную разницу в другом узле.

Ключевые слова: мессбауэровская спектроскопия, возмущённые корреляции, шпинели, оксиды, ферриты

Благодарности: Центру коллективного пользования Воронежского государственного университета за исследования методами порошковой рентгеновской дифракции.

✉ Вахтель Виктор Матвеевич, e-mail: vakhtel@phys.vsu.ru

© Вахтель В. М., Величков А. И., Караиванов Д. В., Миланова М. М., Сегал Ю. Г., Темербулатова Н. Т., Философов Д. В., Цветков М. П., 2025



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Вахтель В. М., Величков А. И., Караиванов Д. В., Миланова М. М., Сегал Ю. Г., Тембурлатова Н. Т., Философов Д. В., Цветков М. П. Исследования сверхтонких взаимодействий в ферритах кобальта со структурой шпинели CoFe_2O_4 , легированных Hf, Lu и Yb с использованием методов мессбауэровской спектроскопии и возмущенных угловых $\gamma\gamma$ -корреляций. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2025;27(1): 96–103. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/12486>

For citation: Vakhtel V. M., Velichkov A. I., Karaivanov D. V., Milanova M. M., Segal Yu. G., Temburlatova N. T., Filosofov D. V., Tsvetkov M. P. Study of hyperfine interactions in spinel cobalt ferrite CoFe_2O_4 doped with Hf, Lu, and Yb using Mössbauer spectroscopy and perturbed $\gamma\gamma$ angular correlation. *Condensed Matter and Interphases*. 2025;27(1): 96–103. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/12486>

1. Введение

Ферриты – смешанные оксиды металлов с общей формулой MFe_2O_4 , где на месте металла (М) могут быть Fe, Ni, Co, Zn и др. Они имеют ряд свойств (большое значение удельного сопротивления, высокая магнитная проницаемость, глубина проникновения магнитного СВЧ-поля), способствующих их применению в различных областях [1–9]. Кобальтовый феррит (CoFe_2O_4) является одним из наиболее востребованных магнитных материалов. В современных технологиях применяется легирование ферритов, потому что даже небольшие ($\approx 1\%$) количества добавок сильно изменяют их свойства. В последнее время в качестве легирующих добавок рассматриваются редкоземельные элементы (RE) [6–15]. В случае модификации ионами RE^{3+} , учитывая их типичное окислительное состояние +3, можно ожидать замены ими Fe^{3+} [11–15]. С другой стороны, учитывая, что ионный радиус RE больше ионного радиуса Fe^{3+} такая замена затруднительна, и возможно образование дополнительной фазы [14]. Исследования ферромагнитных полупроводников со структурой шпинели CdCr_2Se_4 , CdCr_2S_4 методом ВУК проводились в Церне – ISOLDE Collaboration [16]. Но в работе не изучали ферриты, а кроме этого внедренные изотопы (^{111}In , $^{111\text{m}}\text{Cd}$, ^{111}Ag , ^{117}Cd , $^{199\text{m}}\text{Hg}$) не являются редкоземельными элементами. Исследования с редкоземельными примесями CoFe_2O_4 проводили методом Мессбауэровской спектроскопии в [17].

Целью работы было исследование методами Мессбауэровской спектроскопии (МС) и возмущенных угловых корреляций (ВУК) сверхтонких взаимодействий в кобальтовых ферритах со структурой шпинели (феррошпинель) – CoFe_2O_4 , легированных Lu, Yb и Hf.

2. Экспериментальная часть

2.1. Синтез образцов

Для исследований были синтезированы образцы феррита кобальта CoFe_2O_4 добавлением во время синтеза легирующих добавок. В первом

случае (метод МС) добавляли природные Yb, Lu и Hf в количестве 1 мас. % от общего веса образца. Для измерений методом $\gamma\gamma$ -ВУК синтезировали CoFe_2O_4 с добавкой радионуклидов также во время синтеза.

Ферриты синтезировали из смешанных водных растворов солей Fe и Co в молярном соотношении 2:1 осаждением 1 М раствором NaOH до pH 11–12. Для модификации образцов стабильными Yb, Lu и Hf или радионуклидами к исходным водным растворам солей Fe(III) и M(II) (M = Co) добавляли растворы нитратов Yb, Lu или Hf, либо растворы радионуклидов ^{172}Lu или ^{172}Hf . Более подробно процедура описана в работах [13, 14, 15]. Получение радионуклидов описано в работе [18]. Окончательную промывку осадка проводили с помощью 50/50 по объему смеси вода/ацетон. Промытые образцы сушили при 80 °C в течение ночи, затем прокаливали при 750 °C на воздухе в течение 5 часов. Полученные смешанные оксиды металлов на основе CoFe_2O_4 обозначали как CFO.

2.2. Мессбауэровская спектроскопия

Измерения мессбауэровских спектров проводились на спектрометре MS-1104Em [20] в диапазоне масс образцов от 1 до 5 мг. Спектрометр работал в геометрии пропускания при комнатной температуре. Модулятор приводил в движение источник излучения ^{57}Co в режиме, при котором зависимость доплеровской скорости от времени имеет треугольную форму. В качестве резонансного источника γ -квантов использовался источник ^{57}Co в матрице Cr активностью 30 мКи производства ЗАО «Ритверц». Использовали сцинтилляционный детектор на основе сцинтиллятора NaI. Калибровка проводилась относительно металлического α -Fe. Скоростной режим: 12.11 мм/с, треугольная форма движения поглотителя использовалась для регистрации мессбауэровского спектра при прямом и обратном ходе. Мессбауэровские спектры аппроксимировали линиями лоренцевой формы в соответствии с критерием χ^2 .

2.3. Метод возмущенных угловых

$\gamma\gamma$ -корреляций

Метод $\gamma\gamma$ -ВУК, используемый в представленных исследованиях, основан на введении в образец радиоактивного изотопа, распад которого сопровождается испусканием каскадных γ -квантов [20, 21, 22]. Достоинством метода ВУК является очень малая концентрация ядер зонда, поэтому он не вызывает изменения свойств исследуемого образца. Для исследования методом $\gamma\gamma$ -ВУК, мы использовали изотопы ^{172}Lu (^{172}Yb) и ^{172}Hf (^{172}Lu (^{172}Yb)), дочерние нуклиды указаны в скобках.

Измерения ВУК проводились на 4-х детекторном (кристаллы BaF_2) спектрометре [22]. Детекторы размещали в одной плоскости под углами 90° друг к другу. Исследуемый образец помещают в центре между ними. Анизотропия угловой корреляции определяется формулой:

$$R(t) = A_2 G_2(t) Q_2 = 2 \frac{S(180^\circ, t) - S(90^\circ, t)}{S(180^\circ, t) + 2S(90^\circ, t)}, \quad (1),$$

где $S(90^\circ, t)$ – гамма-спектры задержанных совпадений, когда детекторы располагались под углом 90° (восемь возможных комбинаций из двух детекторов); $S(180^\circ, t)$ – спектры задержанных совпадений, когда детекторы располагались под углом 180° (четыре возможных комбинации из двух детекторов); Q_2 – геометрический фактор (соответствующий размерам и типу детекторов и источников). Максимальный интервал времени для получения спектров задержанных совпадений составляет 800 нс. Разрешение по време-

ни (^{60}Co , 1173–1332 кэВ) с сцинтиллятором BaF_2 составляло 400 пс.

Схема распада ^{172}Lu и использованных каскадов γ -квантов ^{172}Yb представлены на рис. 1. Поскольку ^{172}Hf распадается в ^{172}Lu [23], для исследования $\gamma\gamma$ -ВУК с изотопом ^{172}Yb в образце внедрялись либо ^{172}Lu либо ^{172}Hf .

3. Результаты и обсуждение

3.1. Исследования ферритов с добавкой 1 % стабильных Hf, Yb и Lu

Исследовались порошковые образцы шпинели CFO (CoFe_2O_4), легированные Hf, Lu и Yb (1 мас. %). Далее будем их обозначать как $\text{CoFe}_2\text{O}_4:\text{Hf}$, $\text{CoFe}_2\text{O}_4:\text{Yb}$ и $\text{CoFe}_2\text{O}_4:\text{Lu}$. На рис. 2 представлены мессбауэровские спектры ^{57}Fe для данных образцов. Спектры измерены при комнатной температуре.

В кристаллической решетке феррита шпинели катионы железа в В-позиции (октаэдрическое окружение) находятся в степенях окисления +2 и +3, в то время как в А-позиции (тетраэдрическое окружение) – только в +3. Для каждой из позиций в спектре соответствует свой секстет («Sextet_1» – $(\text{CoFe}_2\text{O}_4)_\text{A}$ и «Sextet_2» – $[\text{CoFe}_2\text{O}_4]_\text{B}$), который несёт информацию о магнитном дипольном и электрическим квадрупольным взаимодействиях. Оба секстета обозначены гладкими линиями фита на фоне спектра. Также на спектрах хорошо видно проявление примесного дублета (дополнительной фазы) в случаях примесей Lu и Yb. В случае Hf примесного дублета (фазы) нет. Все параметры обработки мессбауэровских спектров представлены в табл. 1. Рентгенографические исследования порошкообразных образцов $\text{CoFe}_2\text{O}_4:\text{Hf}$, $\text{CoFe}_2\text{O}_4:\text{Yb}$ и $\text{CoFe}_2\text{O}_4:\text{Lu}$ проведены на дифрактометре ДРОН-3 на линии $K\alpha\text{Mo}$ в режиме отражения [24]. При рентгенографии наших образцов удалось определить наличие дополнительной фазы только в случае $\text{CoFe}_2\text{O}_4:\text{Yb}$. Ранее в работе [15] при рентгенографических исследованиях образцов CoFe_2O_4 , легированных Lu и Hf, также не наблюдали второй фазы.

Анализ параметров мессбауэровских спектров показал, что образец $\text{CoFe}_2\text{O}_4:\text{Hf}$ содержит 100 % стандартные секстеты шпинели ($(\text{CoFe}_2\text{O}_4)_\text{A}$ и $[\text{CoFe}_2\text{O}_4]_\text{B}$), образец $\text{CoFe}_2\text{O}_4:\text{Lu}$ кроме стандартных секстетов содержит 11 % примесной фазы CoFe и образец $\text{CoFe}_2\text{O}_4:\text{Yb}$, содержит 23.4 % примесной фазы CoFe.

Данные для изомерных сдвигов на ^{57}Fe (рис. 3) в CoFe_2O_4 (1 мас. %) Hf, Lu и Yb указывают на сильное влияние примеси на ^{57}Fe в пози-

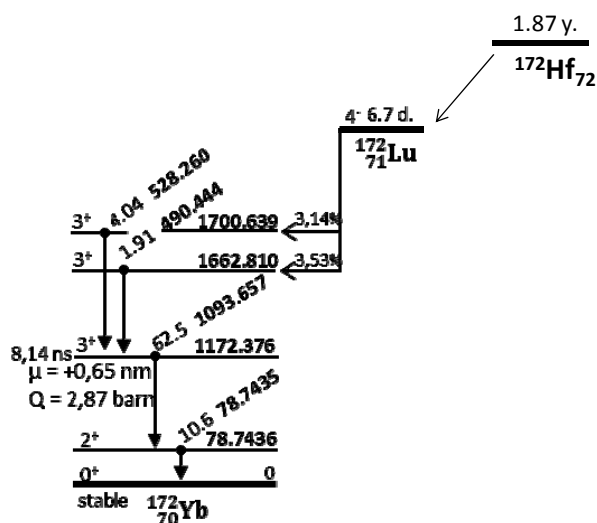


Рис. 1. Схемы распадов ^{172}Hf и ^{172}Lu в области интереса для измерений ВУК на ^{172}Yb [24]

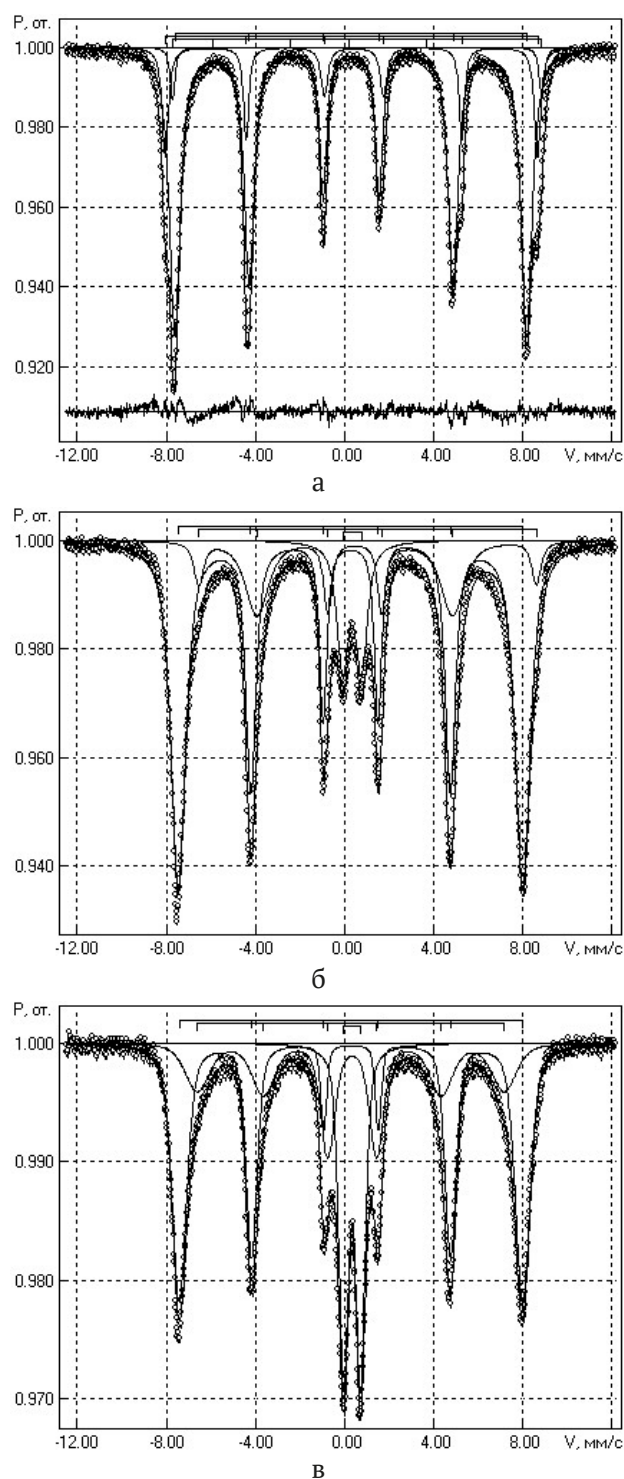


Рис. 2. Мессбауэровские спектры для ^{57}Fe в образцах: а) $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{:Hf}$; б) $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{:Lu}$ и в) $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{:Yb}$, измеренных при 298 К

ции В и незначительное влияние в позиции А.

Изучение квадрупольного состояния на ^{57}Fe в ферритах CoFe_2O_4 (1 мас. %) Hf, Lu и Yb (рис. 4) тоже дает интересный результат. Для ^{57}Fe в CoFe_2O_4 (1 мас. %) Lu наблюдается большое ква-

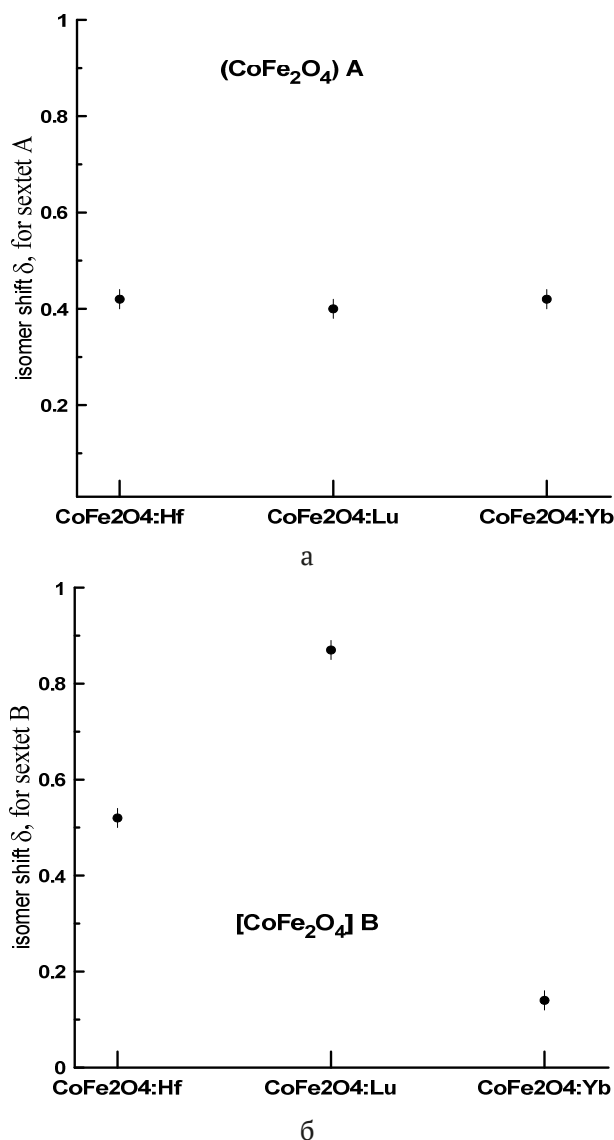


Рис. 3. Изомерный сдвиг на ^{57}Fe в CoFe_2O_4 (1 мас. %) Lu, Yb, Hf в позиции: а) $(\text{CoFe}_2\text{O}_4)\text{A}$ и б) $[\text{CoFe}_2\text{O}_4]\text{B}$

друпольное расщепление относительно ферритов с внедренными Yb и Hf. Кроме этого квадрупольное расщепление на ^{57}Fe проявляется только в позиции $[\text{CoFe}_2\text{O}_4]\text{B}$.

Результаты для магнитного сверхтонкого поля на ^{57}Fe в CoFe_2O_4 (1 мас. %) Hf, Lu и Yb представлены на рис. 5а, б. Наблюдается большое изменение сверхтонкого поля на ^{57}Fe в позиции $[\text{CoFe}_2\text{O}_4]\text{B}$ в зависимости от примесного элемента. Влияние примесного элемента на ^{57}Fe в позиции $[\text{CoFe}_2\text{O}_4]\text{A}$ незначительное.

3.2. Исследования ферритов CoFe_2O_4 методом ВУК

Для исследования ВУК на ядрах ^{172}Yb мы можем добавлять в образец либо радиоактивный

Таблица 1. Мессбауэровские параметры образцов CoFe_2O_4 . δ – изомерный сдвиг, ΔE_Q^a – квадрупольное расщепление, Γ – ширина линии, H – магнитное поле Fe, A – площадь под спектром

Образец	Составляющая	δ (мм/с)	ΔE_Q^a (мм/с)	Γ (мм/с)	H (кЭ)	A (%)	Компонента
CoFe_2O_4 +1 % Hf	«Sextet_1»	0.42	-0.00	0.56	490	77.40	$(\text{CoFe}_2\text{O}_4)_A$
	«Sextet_2»	0.52	-0.06	0.44	518	22.60	$[\text{CoFe}_2\text{O}_4]_B$
CoFe_2O_4 +1 % Lu	«Sextet_1»	0.40	-0.00	0.80	480	68.50	$(\text{CoFe}_2\text{O}_4)_A$
	«Sextet_2»	0.87	0.57	0.50	470	20.46	$[\text{CoFe}_2\text{O}_4]_B$
	«Doublet_1»	0.47	0.84	0.63		11.04	CoFe
CoFe_2O_4 +1 % Yb	«Sextet_1»	0.42	-0.00	0.79	478	48.83	$(\text{CoFe}_2\text{O}_4)_A$
	«Sextet_2»	0.14	-0.06	1.29	427	27.87	$[\text{CoFe}_2\text{O}_4]_B$
	«Doublet_1»	0.14	0.74	0.51		23.39	CoFe

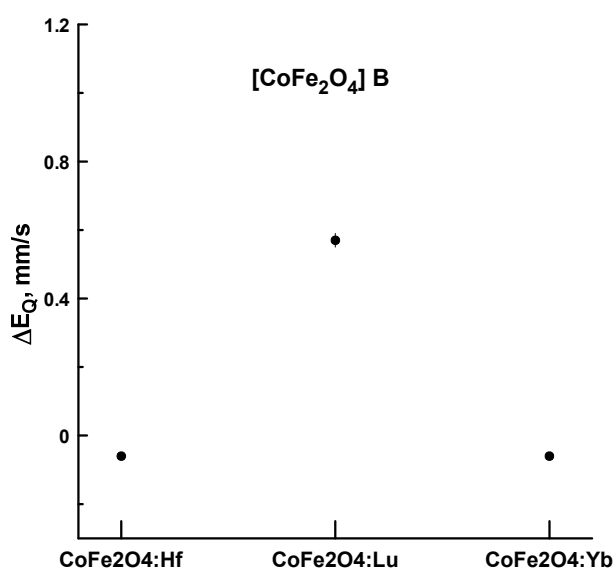


Рис. 4. Квадрупольное расщепление на ^{57}Fe в ферритах CoFe_2O_4 (1 мас. %) Hf, Lu и Yb

изотоп ^{172}Lu , либо ^{172}Hf . Надо отметить, что радиоактивные изотопы внедрялись без носителя. Важным допущением, по-видимому достаточно очевидным, является то, что положение пробного ядра в матрице образца совпадает с положением материнского ядра.

Изучение результатов при комнатной температуре (заметно ниже температуры Кюри) показали, что для феррита CoFe_2O_4 (CFO) с внедренным ^{172}Hf (рис. 6, сверху) мы наблюдаем для ^{172}Yb два состояния, характеризующиеся двумя магнитными полями $B_{\text{hf1}} = 14(1)$ Тл и $B_{\text{hf2}} = 17(1)$ Тл с отношением заселенностей $\sim 2:1$. В случае внедрения ^{172}Lu (рис. 6, внизу) обработка спектра указывает на наличие одного магнитного поля $B_{\text{hf}} = 18(1)$ Тл. Это существенное отличие можно объяснить предположением, что при комнатной температуре ^{172}Lu внедряется предпочтительно только в один тип узлов кристаллической решетки.

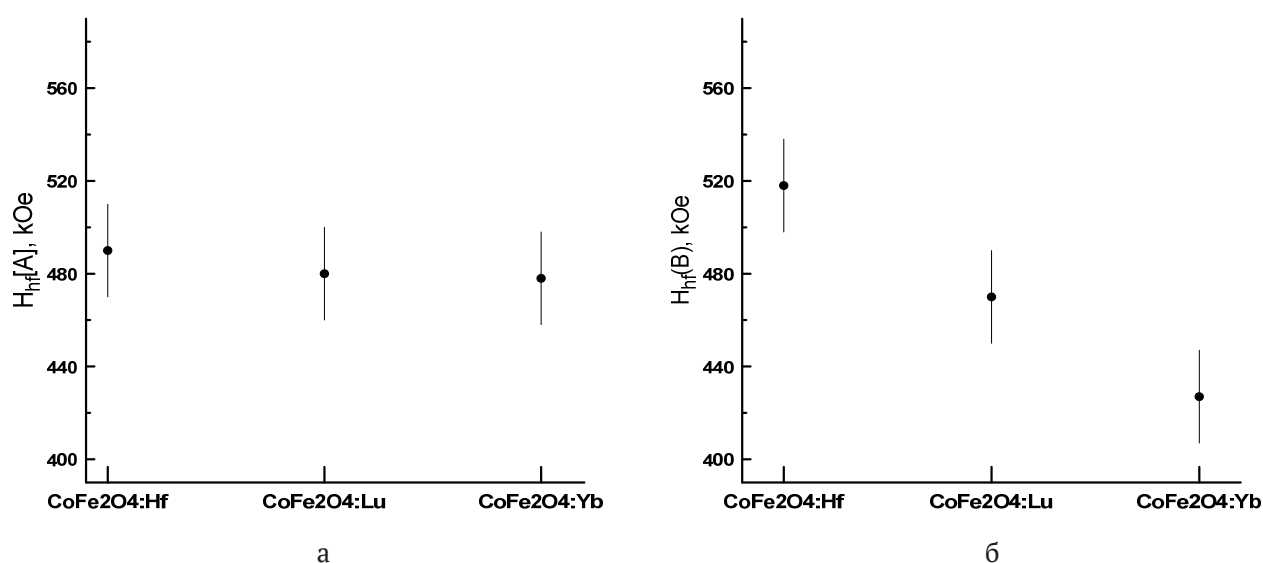


Рис. 5. Сверхтонкое магнитное поле на ^{57}Fe в ферритах CoFe_2O_4 (1 мас. %) Lu, Yb, Hf в позиции: а) $[\text{CoFe}_2\text{O}_4]_A$ и б) $[\text{CoFe}_2\text{O}_4]_B$

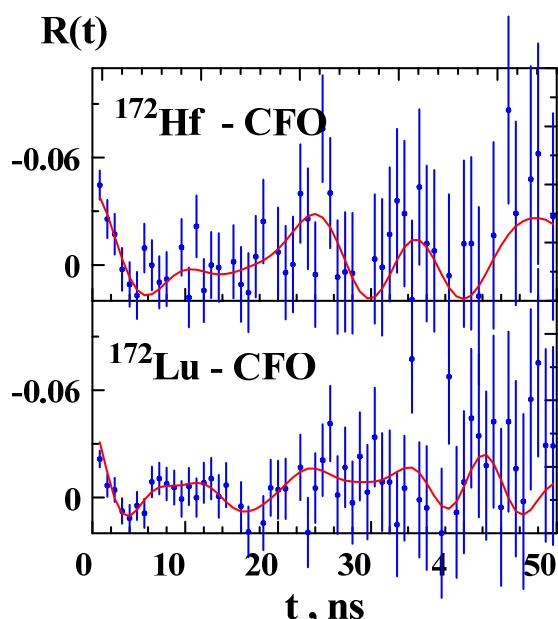


Рис. 6. Спектры $\gamma\gamma$ -ВУК для ^{172}Yb в феррит CoFe_2O_4 измеренные при 298K, после внедрении в образце ^{172}Hf (сверху) и ^{172}Lu (внизу)

Следует отметить, что ниже температуры Кюри сверхтонкое поле смешанное – магнитное дипольное и электрическое квадрупольное. Чтобы более четко выявить воздействие легирующих ионов (Hf и Lu) на электрическое квадрупольное взаимодействие (напрямую связано с положение легирующего иона в кристаллической решётке) мы провели измерения выше температуры Кюри (1000 K). В табл. 2 представлены полученные квадрупольные частоты, градиенты электрического поля и относительная заселенность узлов для ^{172}Yb в CoFe_2O_4 (CFO), после внедрении в образце ^{172}Lu или ^{172}Hf .

Наблюдаемое отличие параметров можно связать с предположением, что в два неэквивалентных узла решетки ионы ^{3+}Lu и ^{4+}Hf внедряются с разным распределением: помимо разных зарядов этих ионов, ион лютеция имеет больший ионный радиус.

Строго говоря, возможно проявление «после эффектов ядерного распада» на локальное окру-

жение ^{172}Yb в CFO. Однако в кристаллических фазах обычно не наблюдается значительного влияния данных эффектов на параметры СТВ.

4. Заключение

Методом Мессбауэровской спектроскопии на ядрах ^{57}Fe исследовано сверхтонкие взаимодействия в ферритах CoFe_2O_4 , легированных Hf, Lu и Yb (1 мас. %). Показано, что легирование Lu и Yb приводит к образованию дополнительных немагнитных фаз (Lu – 11 % и Yb – 23.4 %). В феррите, легированном гафнием Hf, дополнительная фаза не наблюдается. Выявлено существенное изменение параметров СТВ на ^{57}Fe в октаэдрической позиции ферритов CoFe_2O_4 , легированных Hf, Yb или Lu соответственно. При этом на ^{57}Fe в тетраэдрической позиции относительное влияние примеси незначительное. Образование новой фазе в случае Yb и Lu можно соотнести с тем, что ионные радиусы Yb и Lu примерно на 14–13 % больше ионного радиуса Hf.

Методом $\gamma\gamma$ -ВУК получены параметры СТВ на ядрах ^{172}Yb в ферритах CoFe_2O_4 . Ионы ^{172}Yb внедрялись (10^{-7} – 10^{-8} мас. %) в образцы двумя способами: через ^{172}Hf (цепочка $^{172}\text{Hf} \rightarrow ^{172}\text{Lu} \rightarrow ^{172}\text{Yb}$) или через материнский ^{172}Lu . Выявлено существенное отличие в параметрах СТВ для этих двух случаев. Различие параметров СТВ сохраняется в температурном интервале 300–1000 K. Наблюдаемое отличие связано с различным распределением ^{3+}Lu и ^{4+}Hf по узлах решётки в следствие разных зарядов и ионных радиусов этих ионов.

Замечательно то, что разное влияние, которые Hf и Lu оказывают на параметры (градиент электрического поля, магнитное поле и изомерный сдвиг) СТВ в образце, выявляется обоими методами МС и ВУК независимо от количества легирующего элемента. А именно: согласно МС Hf и Lu не приводят к существенным изменениям в параметрах СТВ тетраэдрических узлов («Sextet 1»), но оказывают существенно разное влияние на те же самые параметры в октаэдрических узлах («Sextet 2»). Подобная картина наблюдается и методом ВУК – замена Hf на Lu не

Таблица 2. Параметры СТВ (выше температуры Кюри) для ^{172}Yb при внедрении ^{172}Lu или ^{172}Hf в CFO: квадрупольная частота ω_Q , градиент электрического поля V_{zz} и относительная заселенность узлов f

	ω_Q , Мрад/с	V_{zz} , 10^{21} В/м ²	$f(\omega_1)$, %	ω_Q , Мрад/с	V_{zz} , 10^{21} В/м ²	$f(\omega_2)$, %
$^{172}\text{Hf}(^{172}\text{Lu}(^{172}\text{Yb}))$	220(15)	10.12(69)	65(8)	60(8)	2.76(37)	35(7)
$^{172}\text{Lu}(^{172}\text{Yb})$	231(5)	10.63(56)	55(7)	108(9)	4.97(41)	45(8)

выявляет изменение в параметры СТВ в одном из узлов (согласно работе [15] это октаэдрический узел), но указывает на существенную разницу (см. табл. 2) в другом узле.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Casbeer E., Sharma V. K., Li X.-Zh. Synthesis and photocatalytic activity of ferrites under visible light: a review. *Separation and Purification Technology*. 2012;87: 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.11.034>
2. Tsoncheva T., Manova E., Velinov N., ... Mitov I. Thermally synthesized nanosized copperferrites as catalysts for environment protection. *Catalysis Communications*. 2010;12: 105–109. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2010.08.007>
3. Manova E., Tsoncheva T., Estournés Cl., ... Petrov L. Nanosized iron and iron–cobalt spinel oxides as catalysts for methanol decomposition. *Applied Catalysis A: General*. 2006;300(2): 170–180. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2005.11.005>
4. Behra Y., Singh N. B. Solid state properties of zinc ferrite in presence of dopants. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(7): 15451–15457. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.05.032>
5. Sun L., Zhang R., Ni Q., Cao E., Hao W., Zhang Y., Ju L. Magnetic and dielectric properties of $Mg_xCo_{1-x}Fe_2O_4$ ferrites prepared by the sol-gel method. *Physica B: Condensed Matter*. 2018;545: 4–11. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.05.030>
6. Wu X., Ding Z., Song N., Li L., Wang W. Effect of the rare-earth substitution on the structural, magnetic and adsorption properties in cobalt ferrite nanoparticles. *Ceramics International*. 2016;42(3): 4246–4255. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.11.100>
7. Zhao X., Wang W., Zhang Y., Wu S., Li F., Liu J. P. Synthesis and characterization of gadolinium doped cobalt ferrite nanoparticles with enhanced adsorption capability for Congo Red. *Chemical Engineering Journal*. 2014;250: 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.03.113>
8. Bulai G., Diamandescu L., Dumitru I., Gurlui S., Feder M., Caltun O. F. Effect of rare earth substitution in cobalt ferrite bulk materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015;390: 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.04.089>
9. Bulte J. W. M., Douglas T., Mann S., ... Frank J. A. Magnetoferritin: characterization of a novel superparamagnetic MR contrast agent. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 1994;4(3): 497–505. <https://doi.org/10.1002/jmri.1880040343>
10. Zipare K. V., Bandgar S. S., Shahane G. S. Effect of Dy-substitution on structural and magnetic properties of MnZn ferrite nanoparticles. *Journal of Rare Earths*. 2018;36(1): 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2017.06.011>
11. Wu X., Chen W., Wu W., Wu J., Wang Q. Improvement of the magnetic moment of NiZn ferrites induced by substitution of Nd^{3+} ions for Fe^{3+} ions. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2018;453: 246–253. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.01.057>
12. Shoba M., Kaleemulla S. Structural, optical and dielectric studies of Er substituted zinc ferrite nanospheres. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2017;111: 447–457. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2017.08.028>
13. Tsvetkov M., Milanova M., Pereira L. C. J., ... Mitov I. Magnetic properties of binary and ternary mixed metal oxides $NiFe_2O_4$ and $Zn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ doped with rare earths by sol-gel synthesis. *Chemical Papers*. 2016;70(12): 1600–1610. <https://doi.org/10.1515/chempap-2016-0097>
14. Tsvetkov M., Milanova M., Ivanova I., ... Abrashev M. Phase composition and crystal structure determination of cobalt ferrite, modified with Ce^{3+} , Nd^{3+} and Dy^{3+} ions by X-ray and neutron diffraction. *Journal of Molecular Structure*. 2019;1179: 233–241. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.07.083>
15. Temerbulatova N. T., Tsvetkov M. P., Karaivanov D. K., Velichkov A. I., Filosofov D. V., Milanova M. M. Rare earths doped ferrites, characterized by time differential $\gamma\gamma$ perturbed angle correlations method. *Journal of Solid State Chemistry*. 2019;277: 281–289. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2019.05.029>
16. Samokhvalov V., Unterricker S., Burlakov I., ... The ISOLDE Collaboration. Investigation of ferromagnetic spinel semiconductors by hyperfine interactions of implanted nuclear probes. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2003;64(9–10): 2069–2073. [https://doi.org/10.1016/s0022-3697\(03\)00152-5](https://doi.org/10.1016/s0022-3697(03)00152-5)
17. Sawatzky G. A., van der Woude F., Morris A. H. Cation distributions in octahedral and tetrahedral sites of the ferrimagnetic spinel $CoFe_2O_4$. *Journal of Applied Physics*. 1968;39: 1204. <https://doi.org/10.1063/1.1656224>
18. Dadakanov J. A., Lebedev N. A., Velichkov A. I., ... Filosofov D. V. $^{172}Hf \rightarrow ^{172}Lu$ radionuclide generator based on a reverse-tandem separation scheme. *Radiochemistry*. 2018;60(4): 415–426. <https://doi.org/10.1134/s1066362218040112>
19. Мессбауэровский спектрометр Ms-1104Em, производитель Научно-исследовательский институт физики ГОУ ВПО «Ростовский государственный университет». Режим доступа: https://www.sfedu.ru/www/stat_pages22.show?p=ELS/inf/D&x=ELS/-240
20. Abraham A., Pound R. V. Influence of electric and magnetic fields on angular correlations. *Phys. Rev.* 1953;92(4): 943. <https://doi.org/10.1103/physrev.92.943>
21. Brudanin V. B., Filosofov D. V., Kochetov O. I., ... Akselrod Z. Z. PAC spectrometer for condensed matter investigation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. 2005;547(2–3): 389–399. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.04.002>
22. Rinneberg H. H. Application of perturbed angular correlations to chemistry and related areas of solid state physics. *Atomic Energy Review*. 1979;17: 477.
23. *Table of isotopes*. Version 1.0. R. B. Fierstone, V. S. Shirley (eds.). New York: Wiley; 1996.

Информация об авторах

Вахтель Виктор Матвеевич, к. ф.-м. н., доцент, кафедра «Ядерная физика» Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

vakhtel@phys.vsu.ru

Величков Атанас Иванов, к. ф.-м. н., с. н. с. сектора №4 радиохимии, Научно-экспериментальный отдел ядерной спектроскопии и радиохимии, Объединенный институт ядерных исследований (Дубна, Московская обл., Российская Федерация).

aiv@jinr.ru

Караиванов Димитър Веселинов, к. ф.-м. н., с. н. с. сектора №4 радиохимии, Научно-экспериментальный отдел ядерной спектроскопии и радиохимии, Объединенный институт ядерных исследований (Дубна, Московская обл., Российская Федерация).

dvk@jinr.ru

Миланова Мария Милинова, д. н., профессор, кафедра «Неорганическая химия», Факультет химии и фармации, Софийский Университет «Св. Климент Охридски» (София, Болгария).

nhmm@chem.uni-sofia.bg

Сегал Юрий Гаврилович, заведующий лабораторией «Ядерной спектроскопии», кафедра «Ядерная физика» Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

ysemov@gmail.com

Темербулатова Наргиза, м. н. с. сектора № 4 радиохимии, Научно-экспериментальный отдел ядерной спектроскопии и радиохимии, Объединенный институт ядерных исследований (Дубна, Московская обл., Российская Федерация).

Философов Дмитрий Владимирович, к. н. х., начальник сектора №4 радиохимии, Научно-экспериментальный отдел ядерной спектроскопии и радиохимии, Объединенный институт ядерных исследований (Дубна, Московская обл., Российская Федерация).

filosofov@jinr.ru

Цветков Мартин Петров, д. н., доцент, кафедра «Неорганическая химия», Факультет химии и фармации, Софийский Университет «Св. Климент Охридски» (София, Болгария).

nhmt@chem.uni-sofia.bg

Поступила в редакцию 01.07.2024; одобрена после рецензирования 30.07.2024; принята к публикации 16.09.2024; опубликована онлайн 25.04.2025.