

01,05

Исследование сверхтонких магнитных полей на ядрах ^{57}Fe в $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и соединениях Fe с металлами

© М.М. Гусейнов

Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Махачкала, Россия

E-mail: gusmagm@yandex.ru

Поступила в Редакцию 25 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 25 апреля 2024 г.

Принята к публикации 26 июня 2024 г.

Проведены гамма-резонансные исследования сверхтонких магнитных полей на ядрах ^{57}Fe в многокомпонентных соединениях железа с металлами и неодимовым магните состава $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. На ядрах железа ^{57}Fe во всех исследованных соединениях наблюдаются сверхтонкие магнитные поля H_n . Наибольшее значение H_n наблюдается на ^{57}Fe в соединении $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{45}\text{B}_{10}$, значительно превышающее поле на ^{57}Fe в $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, обладающим также и наибольшей магнитной индукцией среди известных постоянных магнитов. Предлагается качественный анализ механизма формирования сверхтонких магнитных полей на ядрах железа в исследованных соединениях.

Ключевые слова: магнетизм, постоянные магниты, металлы, гамма-резонанс, неодимовый магнит, спектр ядер, сверхтонкие магнитные поля, изомерный сдвиг.

DOI: 10.61011/FTT.2024.08.58592.104

1. Введение

Магнетизм, как и естественная радиоактивность, остается пока одним из загадочных и мало понятых явлений природы. И замечательно, что для изучения магнетизма, наряду с другими методами, успешно применяется, используемая в ядерной гамма-резонансной спектроскопии (ЯГРС) радиоактивность ядер железа ^{57}Fe , который также является основным носителем магнетизма в Природе. Обладая чрезвычайно высокой чувствительностью к эффектам ближнего порядка, ЯГРС является мощным экспериментальным методом изучения сверхтонких взаимодействий в веществах, на ядрах атомов которых наблюдается эффект Мёссбауэра. Такими объектами являются и постоянные магниты на основе железа.

Постоянные магниты различной формы и габаритов широко используются в современной технике, промышленности и быту. С дальнейшим научно-техническим развитием, естественно, потребность в них будет возрастать. Поэтому поиск материала, разработка технологии и создание разнообразных по форме, размерам и необходимым техническим характеристикам постоянных магнитов остается актуальной научно-технической задачей. При этом, основными требованиями к постоянным магнитам являются их высокая магнитная индукция, разнообразие размеров и форм, устойчивость к температурным перепадам, агрессивным средам и электромагнитной радиации.

2. Постоянные магниты (краткий обзор)

В современной технике и быту широко используется четыре класса постоянных магнитов, для производства

которых используются четыре основных состава материалов: неодим–железо–бор ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$), самарий–кобальт (SmCo), алюминий–никель–кобальт (Alnico), ферриты (керамические магниты), каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Наиболее мощными из них по магнитной индукции пока остаются неодимовые магниты. Они стойки к размагничиванию, имеют высокие магнитные характеристики и сохраняют их исходные значения на протяжении многих лет [1].

Магниты Альнико на основе сплава алюминий–никель–кобальт, обладают высокой стабильностью магнитных параметров при разных механических и климатических условиях, имеют высокую рабочую температуру (до 800°C), временную стабильность параметров, устойчивы к размагничиванию, коррозии, структурному старению и влиянию радиации.

Керамические магниты (ферриты) представляют собой ферромагнитные соединения, получаемые путем смешивания оксида железа с Mn, Ba, Zn.

Самарий–кобальтовые магниты устойчивы к размагничиванию, коррозии и окислению, а по коэрцитивной силе превосходят неодимовые магниты. Они обладают магнитной анизотропией, и поэтому их можно намагничивать только по оси их магнитной ориентации.

Магниты SmCo_5 или $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ по сочетанию магнитных свойств располагаются между неодимовыми и ферритовыми магнитами. Из-за высокой магнитной индукции, высокого сопротивления к размагничиванию, мелких размеров и разных форм, они также применяются в космических аппаратах, авиационной и компьютерной технике, мобильных телефонах. Недостатком их является хрупкость и склонность к сколам.

Главной причиной сильного магнетизма $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ считается тетрагональная кристаллическая структура, которая обладает высокой одноосной магнито-кристаллической анизотропией и предпочтительным намагничиванием вдоль определенной оси решетки, которая состоит из чередующихся слоев атомов железа и соединения Nd-B [2]. Магнетизму $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ способствует также геометрическая форма и размеры зерен материала в пределах $45\text{--}100\ \mu\text{m}$, их лучшее выравнивание и температура спекания [3,4].

Недостатком их является низкая рабочая температура и неустойчивость к агрессивным средам [5–7]. Но благодаря лучшим магнитным характеристикам, различным формам и габаритам, неодимовые магниты широко используются в технике — в жестких дисках компьютеров, мобильных телефонах и других технических устройствах.

Существуют также специфические магниты, один из которых ферритин-металлоорганическое одномолекулярное соединение, обладающее суперпарамагнитным поведением в интервале температур $4\text{--}60\ \text{K}$, способным хранить информацию и обеспечивать гораздо более плотный магнитный носитель, чем традиционные магниты [8].

Из приведенных сведений о постоянных магнитах следует, что к настоящему времени разработаны разные типы постоянных магнитов, каждый из которых может быть успешно использован в конкретных условиях температуры, внешних магнитных полей, агрессивных сред и радиации.

Дальнейший технический прогресс, связанный с использованием постоянных магнитов в значительной мере будет зависеть от создания универсального постоянного магнита, обладающего лучшими совокупными техническими характеристиками, необходимыми для использования их в любых условиях окружающей среды и сильных электромагнитных полей. Однако на пути создания такого магнита могут возникнуть принципиальные трудности, связанные с ограниченностью как предельного значения магнитной индукции реальной системы атомных электронов, так и ограниченностью природных типов кристаллических решеток материала магнита. Тем не менее, нельзя согласиться с тем, что намагниченность насыщения $J_s \approx 1.6\ \text{T}$ и остаточная намагниченность — $1.3\ \text{T}$ являются предельными для постоянных магнитов, а нужно искать новые материалы и новые технологии создания магнитов.

Как известно, основным сегментом в системе генерации электроэнергии — важнейшей для современного мира энергии, является именно магнит [9], в связи с чем поиск состава материала для сильного магнита — актуальная задача для физиков, технологов, инженеров. Исследования показывают, что для создания сильного магнита необходимо сочетание элементного состава материала, его кристаллической структуры и практической технологии. Уникальность неодимового магнита состоит, по-видимому, в какой-то мере случайном, хотя, как

следует из истории его создания, осмысленном подборе авторами элементного состава, оказавшегося в сочетании с кристаллической структурой и технологии, весьма благоприятным для его магнетизма.

И поскольку лучшими по магнетизму сегодня являются неодимовые магниты, улучшению всех характеристик Nd-Fe-B и поиску подобных им других материалов, посвящены многие работы, в которых исследуются сверхтонкие взаимодействия в различных магнитных системах [10–19]. Однако, в них авторы не акцентируют внимание на связь внутриатомных СТМП и намагниченности вещества, хотя такие поля наблюдаются даже на немагнитных атомах, сплавленных с железом [20].

3. Эксперимент и результаты

Измерения проведены на спектрометре MC-1104Em в сжатой геометрии пропускания в диапазоне доплеровских скоростей $\pm 10\ \text{mm/s}$ при $T = 300\ \text{K}$. Источником гамма-лучей служил изотоп $^{57}\text{Co}(\text{Cr})$, расшифровка спектров проведена с помощью программы UnivemMS. Образцы представляли собой мелкодисперсные порошки соединений железа, полученных методом многостадийной холодной прокатки на четырехвалковом прокатном стане с усилием $50\ \text{kN}$ и такой же порошок неодимового плоского магнита из жесткого диска от компьютера.

В связи с наблюдаемыми в соединениях железа СТМП на ядрах ^{57}Fe в [16,18–20], нас заинтересовал вопрос о роли намагниченности (магнитного момента) в формировании сверхтонких магнитных полей H_n на ядрах ^{57}Fe в постоянных магнитах. Представлял также интерес наблюдаемое в магнитных и мёссбауэровских измерениях расхождение в определении температуры фазового перехода (T_c).

В настоящей работе мы исследовали ряд соединений железа с металлами из разных групп Периодической системы (Co, Ni, Ag, Zn, B) и провели собственные исследования неодимового магнита, в котором на ядрах ^{57}Fe также обнаружили высокие значения СТМП.

На рис. 1 приведены спектры ядер ^{57}Fe в исследованных нами образцах. Спектр ядер ^{57}Fe в $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, полученный в работе [15], авторы описывают в модели шести зеemanовских секстетов, соответствующих шести позициям атомов Fe в его элементарной ячейке [2]. Спектр ^{57}Fe в исследованном нами $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ также состоит из шести неразрешенных зеemanовских секстетов и парамагнитной линии, а спектр в $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{45}\text{B}_{10}$ — из близких по H_n трех неразрешенных секстетов и двух дублетов, происхождение которых, вероятно, связано с некубической симметрией решетки их окружения. Происхождение парамагнитной линии в спектре ^{57}Fe в $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ нам неизвестно, возможно она связана с локальной неоднородностью образца, изготовленного из порошка плоского магнита от жесткого диска компьютера. Поля H_n обнаружены на ядрах ^{57}Fe во всех исследованных образцах.

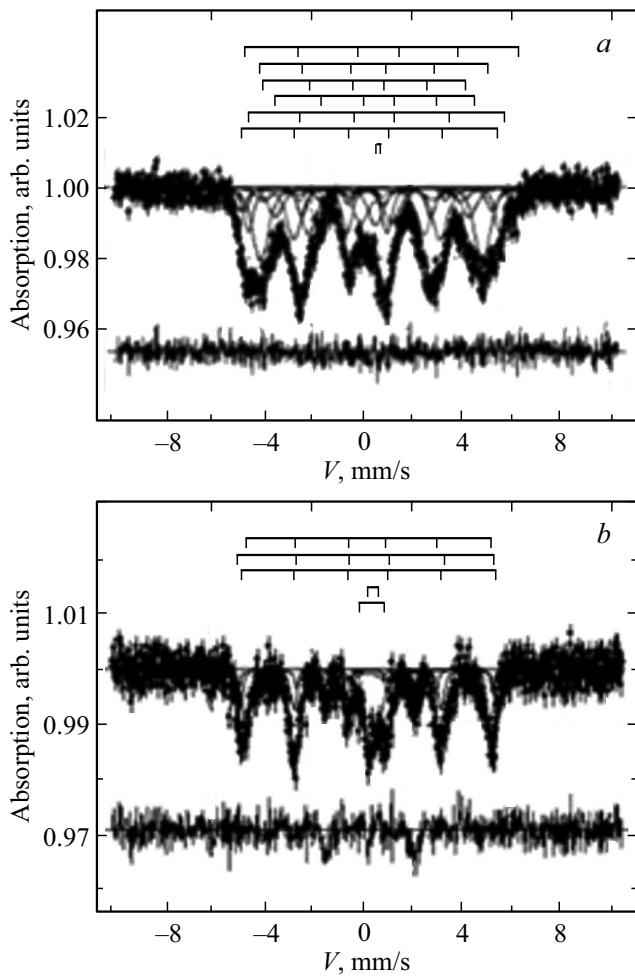


Рис. 1. Мёссбауэровские спектр ядер ^{57}Fe в $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (a) и $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{45}\text{B}_{10}$ (b) при $T = 300\text{ K}$.

дованных образцах и все они имеют ферромагнитную природу.

Как известно, специфику и индивидуальность химического элемента определяет заряд ядра [21]. В исследованных нами двух- и трехкомпонентных соединениях (Fe_7Ag , Fe_7Zn , $\text{Fe}_{50}\text{Zn}_{50}$, $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{50}$, $\text{Fe}_{95}\text{Zn}_5$, $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{45}\text{Zn}_5$, $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{45}\text{B}_{10}$), ионы железа имеют в ближайшем соседстве атомы разных периодов и групп Периодической системы элементов — Co, Ni (VIII группа IV периода, с электронной конфигурацией $3d^74s^2$ и $3d^84s^2$ соответственно), Ag (I группа V периода, с конфигурацией $4d^95s^2$), Zn (II группа IV периода с конфигурацией $3d^{10}4s^2$) и B (III группа II периода с конфигурацией $2s^22p^1$). В образовании типа решетки и природы химической связи каждый из этих элементов играет свою, связанную с их электронной конфигурацией, особую роль. Можно допустить, что наблюдаемые на ядрах атомов „немагнитных“ элементов, сплавленных с железом СТМП [20] является следствием наличия орбитальных и спиновых магнитных моментов валентных электронов атомов магнитной матрицы. Т.е., если вещество обладает

намагниченностью, то на ядрах железа в нем должны, вероятно, наблюдаться и сверхтонкие магнитные поля. Поскольку физико-химические свойства вещества зависят от структуры кристалла и конфигурации электронных оболочек атомов, они могут быть разными в зависимости от их природы и характера химической связи между ними. Так как основным компонентом в составе почти всех материалов для магнитов является железо, то важно знать в каком именно составе ионы железа могут проявить свои максимально возможные магнитные свойства. А для ответа на вопрос — почему именно неодимовые магниты обладают высокими показателями магнитной индукции, необходимо детально исследовать не только структуру кристаллической решетки, но и электронную конфигурацию соединения NdFeB в целом и конкретно железа в нем. При образовании соединений, электронные конфигурации атомов в соответствии с их валентностью и числом реально образуемых химических связей изменяются так, что в результате суммарная спиновая система магнита, в зависимости от типа кристаллической структуры, может оказаться благоприятной как для усиления, так и ослабления намагниченности образца. При этом ожидалось, что для исследованных образцов значения сверхтонких магнитных полей на ядрах ^{57}Fe в составах $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{45}\text{B}_{10}$, $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{45}\text{Zn}_5$, $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{50}$, где содержатся ферромагнитные Co и Ni, будут значительно выше, чем в Fe_7Zn , Fe_7Ag , $\text{Fe}_{50}\text{Zn}_{50}$ с диамагнитными Ag и Zn. Кроме того, поля на ядрах ^{57}Fe в соединении $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{45}\text{B}_{10}$, схожем с $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (но с Ni вместо Nd), по причине преимущественно ферромагнитного его состава, должны быть значительно выше, чем в остальных составах. Если Ni и Co являются ферромагнетиками и могут усилить намагниченность соединений железа с ними, то диамагнитные цинк, серебро и бор могут усилить или ослабить магнетизм соединений железа с ними в зависимости от того, как выстроится суммарный магнитный момент и каким будет тип решетки образца. Эксперимент, в определенной степени, это подтверждает: на ядрах соединения железа с этими элементами имеются меньшие значения полей H_n по сравнению с полями в их соединениях с переходными и редкоземельными элементами (рис. 2). Атом железа в основном состоянии имеет электронную конфигурацию валентной зоны $3d^64s^24p^0$ с четырьмя некомпенсированными электронами на d -оболочке. Если тип кристаллической решетки $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ известен и он способствует сильному магнетизму соединения и наблюдаемому на ядрах железа полю H_n , можно допустить, что именно суммарная спиновая конфигурация соединения способствует этому, из чего следует наличие прямой связи между магнитным моментом $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и H_n на ядре ^{57}Fe в нем. Как известно, вклад в H_n вносят несколько видов магнитных полей, конкуренция которых приводит к суммарному эффективному полю H_n в области ядра. При этом основной вклад в H_n вносит поле контактного взаимодействия локализованных в области ядра s -электронов с ядром (поле Ферми) с незначительным

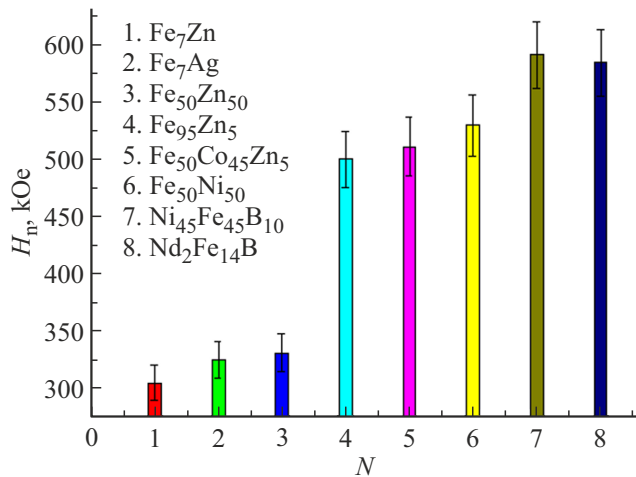


Рис. 2. Сверхтонкие магнитные поля на ядрах ^{57}Fe в исследованных образцах при $T = 300$ К.

вкладом p -электронов собственного атома [22]:

$$H_{\text{fermi}} = -\frac{8\pi}{3} \mu_B \sum_n V \rho_{ns}^{\uparrow\downarrow}(0) i, \quad (1)$$

где

$$\sum_n \rho_{ns}^{\uparrow\downarrow}(0) = \sum_n (\rho_{ns}^{\uparrow}(0) - \rho_{ns}^{\downarrow}(0))$$

— спиновая плотность в области расположения ядра, $\rho_{ns}^{\downarrow}(0)$ — плотности s -электронов с антипараллельными спинами на ns -оболочке атома, μ_B — магнетон Бора. Спаренные электроны с антипараллельными спинами не дают вклада в поле, но результирующий спин d -электронов поляризует внутренние s -электроны атома и в результате их обменного взаимодействия происходит деформация электронного облака внутренних s -электронов, которые и создают поле H_n в области ядра. Поэтому, согласно теоретическим расчетам [22], вклад H_{fermi} пропорционален магнитному моменту $3d$ -оболочки атома железа, а в отдельных соединениях его вклад в поле H_n является определяющим: $H_n = -k\mu_{\text{Fe}}$.

В высокоспиновом состоянии, железо имеет конфигурацию $3d^6 4s^2 4p^2$ с восемью неспаренными электронами на d - и p -оболочках. Неодим — элемент III группы VI периода, относится к группе лантаноидов и в нормальном состоянии имеет конфигурацию $4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^5$ с четырьмя некомпенсированными спинами на f -оболочке. Для образования химической связи с ближайшими соседями, неодим должен перейти в высокоспиновое состояние, подключив для этого один электрон из $6s$ -оболочки на свободную ячейку f -орбитали и увеличить до 6 число некомпенсированных спинов ($5s^2 5p^6 6s^1 4f^5$). Электронная конфигурация атома бора в основном состоянии $1s^2 2s^2 2p^1$. В возбужденном состоянии его один электрон из s -орбитали может перейти на вакантную p -орбиталь и образовать конфигурацию

из трех не компенсированных спинов. Такое редкое сочетание 17 спинов, ориентированных в выбранном направлении решетки, естественно, может обеспечить высокую магнитную индукцию $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Однако мы не знаем в какой электронной конфигурации образуют связи Fe, Nd и B между собой, следовательно, не знаем и значение суммарного магнитного момента магнита. Но с учетом известной кристаллической структуры, можем сделать предположение о наиболее вероятной ориентации магнитного момента образца вдоль известной легкой оси кристалла. Тем не менее, можно предположить, что именно в $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ реализуется благоприятная для создания высокой магнитной индукции суммарная электронная конфигурация, при которой оказывается максимум некомпенсированных спинов соединения в целом.

Неодим слабо антиферромагнитен и в чистом виде его магнетизм проявляется только при низких температурах, но соединение неодима с железом имеет достаточно высокую температуру Кюри. Относительно роли бора в магнетизме $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, в связи с его аксессуарным содержанием, имеются разные мнения. Считается, что диамагнитные атомы бора не вносят непосредственного вклада в магнетизм, но улучшают сцепление ионов за счет сильной ковалентной связи. В работе [23] показано, что зависимость коэрцитивной силы соединения Nd-Fe-Al-Ti-B от содержания бора имеет экстремальный характер. Величина и положение максимума зависят от содержания бора — с образованием борсодержащих фаз Ti-B и перенасыщением основной магнитной фазы по бору. Однако, известно, что примесь кардинально может изменить свойство вещества, и бор, благодаря его необходимому минимуму содержания в соединении и взаимодействию с атомами Nd, возможно, и образует удачную для высокой магнитной индукции структуру $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Как видно из рис. 2, поля на ядрах железа, разбавленных диамагнетиками Ag и Zn действительно имеют низкие значения по сравнению с полями в соединениях железа с $3d$ -металлами — кобальтом и никелем. В то же время наибольшее значение поля имеется у соединения $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{45}\text{B}_{10}$, где ферромагнитный Ni и диамагнитный бор, образуя, вероятно, параллельную решетку железа общую магнитную решетку Ni-B, способствуют созданию сильного поля на ^{57}Fe . В соединении $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{45}\text{B}_{10}$, подобном по процентному соотношению компонент соединению $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{45}\text{Zn}_5$, но с диамагнитным бором вместо цинка, поле на ядрах железа больше на десятки килоэрстед, чем в соединениях с Ag и Zn. Т.е., диамагнитные бор и цинк в этих соединениях по-разному влияют на электронную структуру Fe, что по-разному и отражается на его энергетических спектрах. Именно связь Ni-B, возможно, и является главным агентом формирования высокоспинового состояния железа в $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{45}\text{B}_{10}$, как и Nd-B в $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. На основании того, что H_n на ядрах ^{57}Fe в $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{45}\text{B}_{10}$ значительно больше поля H_n в $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, мы допускаем, что и магнитная индукция $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{45}\text{B}_{10}$, изготовленного по технологии

Параметры секстетов мёссбауэровских спектров образцов

№	Образец	δ_s , mm/s	Q_s , mm/s	H_n , kOe	G , mm/s	S , %
1	Fe_7Zn	0.2192	5.7842	304.48	0.3480	7.46
2	Fe_7Ag	-0.0028	1.5231	324.23	0.1794	1.87
3	$\text{Fe}_{50}\text{Zn}_{50}$	-0.1278	0.7501	330.43	0.2870	5.72
4	$\text{Fe}_{95}\text{Zn}_5$	-0.0738	1.5179	499.33	0.2009	0.49
5	$\text{Fe}_{50}\text{Co}_{45}\text{Zn}_5$	0.1559	3.7580	510.60	0.5899	7.98
6	$\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{50}$	-0.2166	5.0564	529.04	0.7759	8.51
7	$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	0.3163	0.6132	563.21	0.776	16.40
8	$\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{45}\text{B}_{10}$	1.0182	1.0922	590.32	0.7760	11.58

спекания и намагничивания неодимового магнита, может быть больше, чем магнитная индукция $\text{Ni}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Из электронных конфигураций Ni ($4s^2 3d^8$) и Nd ($4f^5 6s^1$) в возбужденном состоянии также следует, что Ni имеет 8, а Nd 6 неспаренных электронов во внешней оболочке, что говорит о преимуществе Ni в создании магнетизма в $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{45}\text{B}_{10}$ перед Nd в магнетизме $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, но только если Ni входит в соединение именно в высокоспиновом состоянии. Вопрос о механизме взаимосвязи магнитных полей на ядрах ^{57}Fe и магнитной индукции вещества требует более глубокого теоретического анализа. Пока только можно предположить о наличии такой связи, так как все исследованные нами образцы соединений обладают ферромагнитными свойствами и в каждом из них на ядрах ^{57}Fe имеются сильные сверхтонкие магнитные поля. В таблице, в целях данной работы, приведены параметры только наиболее широкого секстета мёссбауэровских спектров исследованных образцов.

4. Заключение

Пока нет теоретического обоснования наличия непосредственной связи между намагниченностью вещества и сверхтонкими магнитными полями на ядрах железа в нем, но наблюдаемые особенности на ядрах ^{57}Fe в $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (обладающим также высокой магнитной индукцией), соединении $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{45}\text{B}_{10}$ и других интерметаллических соединениях можно считать основанием для такого утверждения. Иначе говоря, при наличии намагниченности образца (постоянного магнита), должны наблюдаться и сверхтонкие магнитные поля на ядрах железа в нем. А так как поля на ядрах ^{57}Fe в $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{45}\text{B}_{10}$ значительно больше, чем в $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, мы и полагаем, что и магнитная индукция магнита, изготовленного из $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{45}\text{B}_{10}$ по соответствующей технологии, будет выше, чем в неодимовых магнитах. И именно бор, вероятно, играет основную роль в формировании высокоспинового состояния $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{45}\text{B}_{10}$.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность С.В. Таскаеву за любезно представленные для исследования образцы и полезные научные советы.

Список литературы

- [1] Ю.М. Пятин. Постоянные магниты. Справочник. Энергия, М. (1980).
- [2] J.F. Herbst, J.J. Croat, F.E. Pinkerton, W.B. Yelon. Phys. Rev. B **29**, 4176 (1984).
- [3] Kyoung Hoon Bae, Tae Hoon Kim, Seong Rae Lee, Hyo Jun Kim, Min Woo Lee, Tae Suk Jang. J. Alloys Comp. **612**, 6, 183 (2014).
- [4] D. Salazar, A. Martín-Cid, R. Madugundo, J.M. Barandiaran, G.C. Hadjipanayis. Appl. Phys. Lett. **113**, 152402 (2018).
- [5] J. Ni, T.Y. Ma, X.G. Cui, Y.R. Wu. J. Alloys Comp. **502**, 2, 346 (2010).
- [6] H. Yang, S. Mao, Z. Song. Mater. Corrosion **63**, 4, 292 (2012).
- [7] E. Iisa Isotahdon, E. Huttunen-Saarivirta, Veli-Tapani Kuokkala, Martti Paju. J. Alloys Comp. **585**, 203 (2014).
- [8] Single-molecule magnet — Wikipedia (turbopages.org).
- [9] Bhupathi Raja R, Chirra Anil Kumar Reddy, Nagraj Sachin Kumar, Dr. Kusuma Devi G.H. JETIR **7**, 10, 2349 (2020).
- [10] T. Kobayashi, M. Yamasaki, M. Hamano. J. Appl. Phys. **87**, 6579 (2000).
- [11] D. Plusa, J. Olszewski, M. J. Dośpiał. Nukleonika S9252, Suppl.1, S89 (2007).
- [12] T. Zak, N. Talijan. Acta Phys. Polonica A **113**, 279 (2008).
- [13] E.C. Kim, S.J. Kim, J.K. Baek, S.R. Lee. Hyperfine Interact. **183**, 55 (2008).
- [14] Lei Jin, Guangfei Ding, Jinhao Zhu. J. Alloys Comp. **870**, 159375 (2021).
- [15] Mieczysław Budzyński, Virgil C. Constantin, J. Ana-Maria. Nukleonika **60**, 1, 5 (2015).
- [16] V.S. Rusakov, V.S. Pokatilov, T.V. Gubaidulina, M.E. Matsnev. Electr. Magn. Proper. **120**, 339 (2019).
- [17] А.К. Аржников, Л.В. Добышева, Ф. Брауерс. ФТТ **42**, 1, 86 (2000).
- [18] I.S. Lyubutin., K.V. Frolov, O.A. Alekseeva. J. Alloys Comp. **909**, 164747 (2022).
- [19] Agnieszka Ceglarek, Danuta Plusa, Piotr Pawlik, Piotr Gębara. Nukleonika **58**, 1, 105 (2013).
- [20] В.В. Самойлов, Е. П. Скляревский, Е.П. Степанов. Эко Энергия (1958).
- [21] В.И. Сидоров, Ю.В. Устинова, Т.П. Никифорова. Общая химия / Под ред. В.И. Сидорова. М. (2014).
- [22] В.С. Русаков. Основы мёссбауэровской спектроскопии. МГУ, М. (2011). 154 с.
- [23] Е.Н. Каблов, О.Г. Оспенникова, Д.В. Королёв, В.П. Пискорский, Р.А. Валеев, И.И. Резчикова. Авиационные материалы и технологии **52**, 015, 30 (2015).

Редактор Т.Н. Василевская