

PACS 76.60.-k
УДК 537.9/.635

ЯМР характеристики ионов Fe^{3+} при изменении концентрации изотопа ^{57}Fe в $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$

А.А. Безлепкин, С.П. Кунцевич, В.И. Костюков

anatoliy.a.bezlepkin@univer.kharkov.ua
Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина
Украина, 61077, Харьков, пл. Свободы, 4

Изучены спектры спинового эха и скорость релаксации ядер ^{57}Fe в гексаферрите $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ с естественным содержанием изотопа ^{57}Fe (2,21%) и в феррите, обогащенном до 95%. Установлено, что при низких температурах уменьшение концентрации изотопа железа ^{57}Fe от 95% до 2,21% не приводит к изменению частот ЯМР и существенному изменению скорости продольной и поперечной ядерной релаксации. Показано, что сул-накамуровское взаимодействие не вносит существенного вклада в скорость спин-спиновой релаксации.

Ключевые слова: ЯМР, спектр, изотоп, релаксация.

Вивчені спектри спінової луни та швидкість релаксації ядер ^{57}Fe в гексафериті $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ з природнім вмістом ізотопу ^{57}Fe (2,21%) та фериту, збагаченого до 95%. Установлено, що при низьких температурах зменшення концентрації ізотопу заліза ^{57}Fe від 95% до 2,21% не приводить до зміни частот ЯМР та швидкості ядерної релаксації. Показано, що сул-накамурівська взаємодія не вносить суттєвого внеску в швидкість спин-спінової релаксації.

Ключові слова: ЯМР, спектр, изотоп, релаксация.

Spectra of a spin echo and relaxation rate of ^{57}Fe nuclei in hexaferrite $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ with the natural content of ^{57}Fe isotope (2,21%) and with ferrite enriched to 95% are studied. It is found out that at low temperatures the reduction of concentration of an isotope of iron ^{57}Fe from 95 % to 2,21% does not lead to a change of frequencies of a nuclear magnetic resonance, nor to an essential change of the rate of a spin-lattice and spin-spin nucleus relaxation. It is shown that Sul-Nakamura interaction does not make an essential contribution to the rate of spin-spin relaxation.

Keywords: NMR, spectra, isotope, relaxation.

При исследовании ЯМР в многоподрешеточных магнетиках на ядрах ионов железа возникает необходимость проводить обогащение образцов изотопом ^{57}Fe , ядра которого обладают спиновым магнитным моментом. Обогащение позволяет существенно увеличить сигналы ЯМР, что дает дополнительные возможности при экспериментальных исследованиях. Связь ядерной и электронной подсистем определяется сверхтонким взаимодействием, и увеличение концентрации изотопа ^{57}Fe может привести к сдвигу резонансных частот обеих подсистем и к изменению времени релаксации. В связи с этим в данной работе изучены ЯМР характеристики гексаферрита $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ с естественным содержанием изотопа ^{57}Fe (2,21%) и обогащенного до 95%.

Образцы и методика измерений

В качестве образцов использовались

монокристаллы гексаферрита $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (BaM), выращенные методом раствора в расплаве флюса. Для выращивания кристаллов использовался флюс $\text{BaO} \times \text{B}_2\text{O}_3$. Кристаллизация производилась на вращающуюся затравку в интервале температуры 1420–1300 К. Фазовый состав кристаллов контролировался рентгенографическим методом. Постоянные кристаллической решетки при комнатной температуре: $a=0,589$ нм, $c=2,32$ нм. Образцы имели геометрические размеры ~ 6 мм в базисной плоскости и ~ 5 мм вдоль гексагональной оси c .

ЯМР изучался методом спинового эха на ядрах, локализованных в доменах, при больших уровнях возбуждающего напряжения на радиочастотном контуре ($\sim 1,5$ кВ). Длительность импульсов, формирующих сигналы эха, составляла 3-10 мкс. Использовались двух- и трехимпульсные последовательности возбуждающих импульсов. Для трехимпульсной последовательности зависимость амплитуды эха A от τ_{23} задается выражением [1]

$$A \approx A_0 \exp\left(-\frac{2\tau_{12}}{T_2} - \frac{\tau_{23}}{T_1}\right) \quad (1)$$

а для двухимпульсной последовательности формирования спинового эха зависимость амплитуды сигналов эха от τ_{12} описывается соотношением

$$A = A_0 \exp\left(-\frac{2\tau_{12}}{T_2}\right), \quad (2)$$

где τ_{12} – время задержки между первым и вторым возбуждающими импульсами, T_1 – время спин-решеточной (продольной) релаксации, T_2 – время спин-спиновой (поперечной) релаксации.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Наиболее интенсивные сигналы спинового эха наблюдались от ядер подрешеток a ($12k$), и c ($4f_1$). В табл. 1 приведены значения частот ЯМР ядер этих подрешеток при температуре 77 К. Как следует из данных таблицы, частоты ЯМР соответствующих подрешеток обогащенного и необогащенного ферритов совпадают. Это, по-видимому, обусловлено тем, что сдвиг частот ЯМР $\Delta\omega$ при возникновении связанных электронно-ядерных колебаний пропорционален отношению ядерной намагниченности m к электронной M [2]

$$\Delta\omega \sim \eta \frac{m}{M} \quad (3)$$

где η – коэффициент усиления, имеющий величину 10–30.

Вследствие того, что $m \ll M$, величина $\Delta\omega$ мала и экспериментально не зафиксирована.

Величины эхо сигналов для образцов с естественной концентрацией изотопа ^{57}Fe были существенно меньше по сравнению с образцами, обогащенными до 95%. Наиболее сильные сигналы наблюдались от ядер подрешетки c . На рис. 1 приведена зависимость амплитуды сигналов спинового эха для подрешетки c ($4f_1$) от времени задержки между первым и вторым возбуждающими импульсами τ_{12} при 77 К.

Определенное по данным, приведенным на рис. 1, с помощью соотношения (2) значение $T_2 = 8,8$ ms приведено в табл. 1.

На рис. 2 приведена зависимость амплитуды сигналов эха для подрешетки c ($4f_1$) от времени задержки τ_{23} между вторым и третьим возбуждающими радиочастотными импульсами для образца феррита с естественной концентрацией изотопа ^{57}Fe при 77 К.

Определенное по этим экспериментальным данным с помощью соотношения (1) время $T_1 = 0,57$ s приведено в табл. 2. В этой же таблице приведены также значения T_1 и T_2 для образцов с 95% концентрацией изотопа ^{57}Fe .

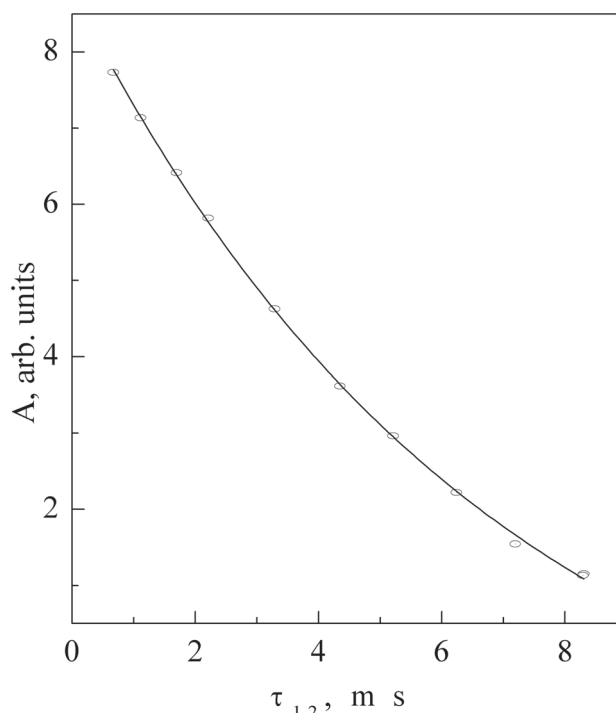


Рис. 1. Зависимость амплитуды сигнала спинового эха для подрешетки c ($4f_1$) феррита ВаМ с естественной концентрацией изотопа ^{57}Fe от времени задержки τ_{12} при 77 К.

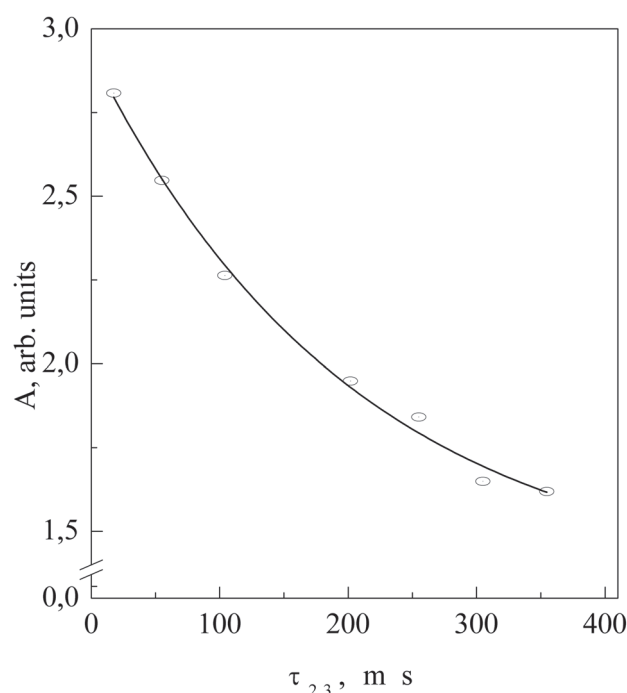


Рис. 2. Зависимость амплитуды сигналов эха для подрешетки c ($4f_1$) от времени задержки τ_{23} для образца феррита ВаМ с естественной концентрацией изотопа ^{57}Fe при 77 К.

Как следует из данных таблицы, величины T_1 и T_2 мало отличаются для обогащенных и необогащенных образцов.

Скорость поперечной релаксации T_2^{-1} можно представить как сумму нескольких вкладов [3]

$$T_2^{-1} = 2T_1^{-1} + T_{2s}^{-1} + T_{2d}^{-1} \quad (4)$$

где $2T_1^{-1}$ – слагаемое, связанное с процессами спин-решеточной релаксации, T_{2s}^{-1} – слагаемое, обусловленное сул-накамуrowsким взаимодействием, T_{2d}^{-1} – слагаемое, обусловленное низкочастотными флуктуациями продольного, относительно оси квантования, магнитного поля. Величина T_{2s}^{-1} зависит от концентрации ядер C_p , на которых наблюдается ЯМР [4]

$$T_{2s}^{-1} \sim \sqrt{C_I} \quad (5)$$

При определяющем факторе сул-накамуrowsкого взаимодействия с увеличением концентрации изотопа ^{57}Fe в 45 раз для обогащенных образцов время релаксации должно увеличиться приблизительно в 7 раз. По данным табл. 2 видно, что скорость и, соответственно, время спин-спиновой релаксации как обогащенного, так и не обогащенного ферритов мало различаются. Это свидетельствует о том, что вклад сул-накамуrowsкого взаимодействия в T_2 в гексаферритах типа М мал.

Работа выполнена при поддержке фонда фундаментальных исследований МОН Украины (№ ГР 0109 U001430).

Таблица 1

Частоты ЯМР (в МГц) подрешеток в образцах феррита $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ с естественной концентрацией изотопа ^{57}Fe и обогащенных при температуре 77 К.

Подрешетка	Феррит	
	Обогащенный	Необогащенный
<i>a</i>	70,22	70,22
<i>c</i>	72,38	72,38

Таблица 2

Время релаксации T_1 и T_2 при температуре 77 К для ядер ^{57}Fe подрешетки *a* образцов ВаМ с различной концентрацией изотопа ^{57}Fe .

Концентрация ^{57}Fe	T_1 , s	T_2 , ms
95%	0,64	11
2,21%	0,57	8,8

1. Петров М.П., Куневич А.В. Изв. АН СССР, сер. физ. 35, № 6. С 1090 (1971).
2. Туров Е.А., Петров М.П. Ядерный магнитный резонанс в ферро- и антиферромагнетиках, М: Наука. (1969), 165 с.
3. Петров М.П., Смоленский Г.А., Леманов В.В. Физика магнитных диэлектриков, Л: Наука. (1974), с. 177-299.
4. Иванов С.В., Куркин М.И. Динамические и кинетические свойства магнетиков. М: Наука, (1986), с. 223-245.