

УДК 539.143.43

© А. В. Худяков, И. В. Плешаков, Я. А. Фофанов, Ю. И. Кузьмин, 2020

ПОПЕРЕЧНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ЯДЕРНОЙ СПИНОВОЙ СИСТЕМЫ В ЛИТИЙ-ЦИНКОВОМ ФЕРРИТЕ ПРИ РАЗНЫХ МОЩНОСТЯХ ВОЗБУЖДЕНИЯ

В работе приводятся результаты экспериментов по наблюдению поперечной релаксации магнитных моментов ядер ^{57}Fe при возбуждении эхо-сигналов в литий-цинковом феррите радиочастотными импульсами разной мощности. Установлено, что в достаточно широком интервале мощностей время поперечной релаксации остается приблизительно постоянным, несколько изменяясь только при существенном уменьшении уровня возбуждения. Показано, что особенности поведения регистрируемого отклика связаны со спецификой наблюдения ядерного магнитного резонанса в доменных границах.

Кл. сл.: ядерный магнитный резонанс, спиновое эхо, время поперечной релаксации, магнитные материалы

ВВЕДЕНИЕ

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР), регистрируемый по сигналу спинового эха, может быть использован для изучения магнитоупорядоченных веществ, и в частности таких важных материалов электроники, как ферриты [1–4]. Физические процессы в спиновой системе характеризуются, как известно, продольным T_1 и поперечным (или спин-спиновым) T_2 временами релаксации. Первое относится к процессу восстановления термодинамического равновесия системы, а гораздо более короткое и более сложное по механизмам поперечное описывает расфазировку изохромат в плоскости, перпендикулярной постоянному магнитному полю. Нахождение обоих этих параметров представляет одну из задач радиоспектроскопии.

Время T_2 , определяемое в магнитных материалах по зависимости амплитуды двухимпульсного эхо-сигнала от задержки между возбуждающими его радиочастотными (РЧ) импульсами, может зависеть от их мощности. Теоретическое объяснение этого факта обычно связывают с наличием доменных границ: основная идея здесь состоит в том, что в границах возбуждаются w -магноны, оказывающие дополнительное влияние на процессы расфазировки [2]. Экспериментальные данные, относящиеся к этой области, достаточно разрозненны, хотя и очевидно, что при использовании ЯМР для исследования магнетика влияние w -магнонов должно быть принято во внимание. Целью настоящей работы было проведение опытов по измерению времени поперечной релаксации ядер ^{57}Fe при различных уровнях возбуждения

спиновой системы широко используемого в технике литий-цинкового феррита.

ОБРАЗЕЦ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образец представлял собой поликристаллическое соединение состава $\text{Li}_{0.425}\text{Fe}_{2.425}\text{Zn}_{0.15}\text{O}_4$ в виде керамики, спеченой в форме колец, на которые наматывалась катушка, входящая в состав колебательного контура, настроенного на частоту ЯМР, и являющаяся одновременно возбуждающей и приемной. Материал был обогащен изотопом ^{57}Fe до 85 % для увеличения сигнала. Электронное оборудование представляло собой стандартный импульсный радиоспектрометр, созданный для наблюдения ЯМР в магнитоупорядоченных материалах, т.е. такой, в котором генерируются РЧ-импульсы малой мощности и отсутствует внешнее постоянное магнитное поле. Схема эксперимента дана на рис. 1, дополнительные пояснения можно найти в нашей ранней работе [5]. Измерения выполнялись при комнатной температуре.

Два РЧ-импульса с несущей частотой 68 МГц подавались на образец через аттенюатор, с помощью которого осуществлялась регулировка их величины (подавление, ослабление), характеризующаяся значением P (дБ). После поступления возбуждающих импульсов регистрировался эхо-сигнал (отклик) спиновой системы ядер ^{57}Fe . Временная диаграмма импульсной последовательности и отклика показана на рис. 2, на котором также видны используемые далее основные обозначения. Все эксперименты проводились при длительности

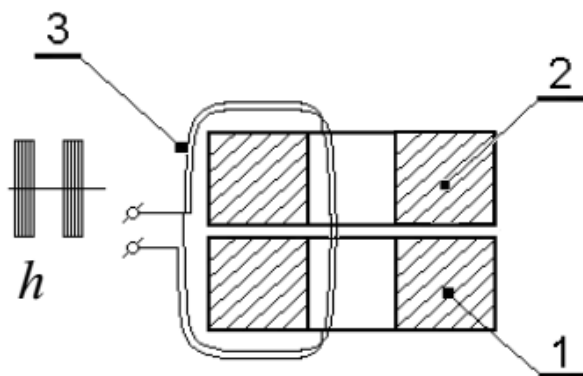


Рис. 1. Геометрия эксперимента [5].
1 и 2 — ферритовые кольца, составляющие образец (показаны в сечении); 3 — катушка возбуждения, на ее зажимах изображены РЧ-импульсы, создающие внутри образца переменное поле h

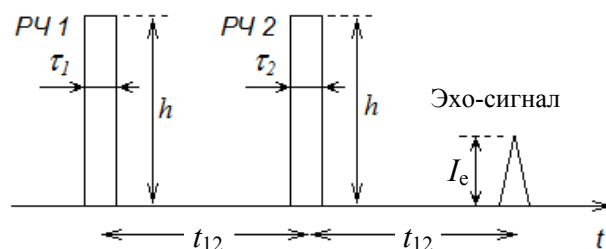


Рис. 2. Временная диаграмма возбуждающей импульсной последовательности и эхо-сигнала. Амплитуды импульсов показаны как амплитуды радиочастотного поля h внутри катушки

возбуждающих импульсов $\tau_1 = \tau_2 = 2$ мкс, задержка t_{12} изменялась в пределах нескольких сотен мкс.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов представлены на рис. 3 и 4. Видно, что зависимость амплитуды эхо-сигнала от ослабления имеет характерную форму с прохождением кривой $I_e(P)$ через максимум при достижении оптимального уровня возбуждения (рис. 3). Похожее наблюдается и в немагнитных веществах, причем для них эксперимент хорошо совпадает с простой теорией, поскольку здесь такой фактор, как коэффициент усиления РЧ-поля η , отсутствует. В магнетиках коэффициент усиления есть, и он имеет значительный разброс, что особенно сильно проявляется в доменных границах. Амплитуда сигнала в них описывается выражением

$$I_e = I_0 \sin(\gamma\eta h \tau_1) \sin^2(\gamma\eta h \tau_2 / 2) \exp(-2t_{12} / T_2),$$

где I_0 — постоянная, h — амплитуда возбуждающего радиочастотного поля, а γ — гиромагнитное отношение [3]. Очевидно, что угол поворота ядерной намагниченности $\gamma\eta h \tau$ также будет иметь разброс, и результирующий отклик должен быть получен интегрированием приведенного выражения [6]. Можно положить, однако, что разброс η внутри домена незначителен по сравнению с тем, который имеется в доменной границе, и тогда полный эхо-сигнал есть сумма единственной функции приведенного выше вида и более сложной кривой.

Поскольку величина η в доменных границах значительно больше, чем в доменах, отклики от этих подсистем по мощности возбуждения в принципе могут быть достаточно хорошо разделены.

В нашем случае подгонка функции I_e к экспериментальным данным наилучшим образом выполнялась при тех значениях P , которые соответствовали большим значениям амплитуды РЧ-поля, действующего на ядра, причем именно в этой области получались такие значения углов отклонения, которые имеют физический смысл ($\gamma\eta h \tau < 2\pi$). На рис. 3 в логарифмической шкале приведена расчетная кривая, сравнение которой с экспериментом показывает, что сигнал от доменов не относится к основному массиву данных и даже максимум отклика обеспечивается в основном ядрами, находящимися в границах. Это подтверждается результатами других работ, использовавших тот же образец [7–9]. (Определенный вклад доменов может существовать при $P < 5$ дБ.)

На рис. 4 в логарифмическом масштабе показаны экспериментальные зависимости $I_e(t_{12})$ при разных уровнях возбуждения. Хорошо видно, что на протяжении исследованных интервалов t_{12} сохраняется явно выраженный экспоненциальный характер этих зависимостей. На вставке на рис. 4 показано поведение времени поперечной релаксации в зависимости от величины ослабления импульсов. Время T_2 определялось с помощью зависимостей $I_e(t_{12})$ по спаду эхо-сигнала с увеличением t_{12} . При этом значения P соответствуют точкам на кривой $I_e(P)$, отмеченным стрелками на рис. 3.

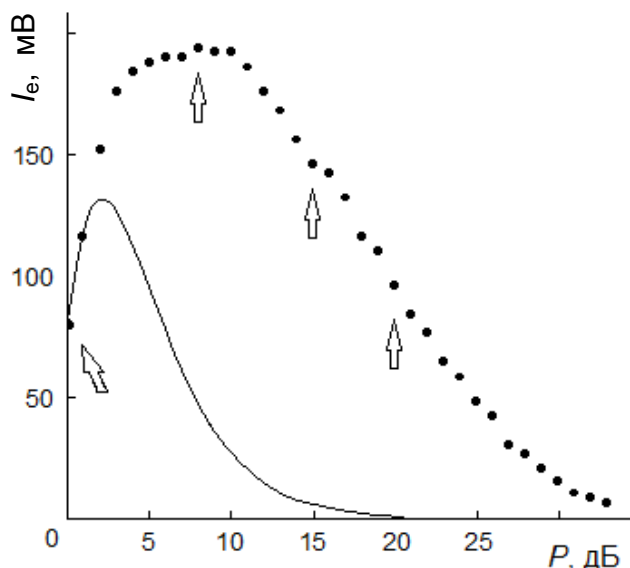


Рис. 3. Зависимость амплитуды эхо-сигнала от величины P ослабления радиочастотных импульсов.

Сплошная линия — расчет по формуле для I_e , точечная линия — эксперимент. Стрелками отмечены те значения P , при которых выполнены измерения времени релаксации

Основной результат проведенных экспериментов заключается, таким образом, в наблюдении приблизительно постоянной скорости поперечной релаксации при изменении мощности возбуждения в достаточно широком (до 15–20 дБ) интервале. Действительно, описать особенности поведения сигналов тем, что разным P соответствуют разные механизмы (процессы), представляется проблематичным, поскольку, согласно сказанному выше, наблюдаемый нами сигнал эха должен быть отнесен главным образом к доменным границам,

Можно предположить, что наблюдающееся при $P = 20$ дБ уменьшение T_2 связано с переходом к преимущественному возбуждению доменных границ другого типа. Однако отметим, что для поликристаллического материала с большим разбросом параметров кристаллитов и вытекающим из этого широким распределением величины η данное утверждение является определенного рода упрощением. Несколько необычным выглядит сам эффект уменьшения времени релаксации при уменьшении уровня возбуждения. В целом этот эффект, конечно, мог бы быть объяснен различиями в характеристиках границ, хотя это, безусловно, нуждается в дальнейшем изучении.

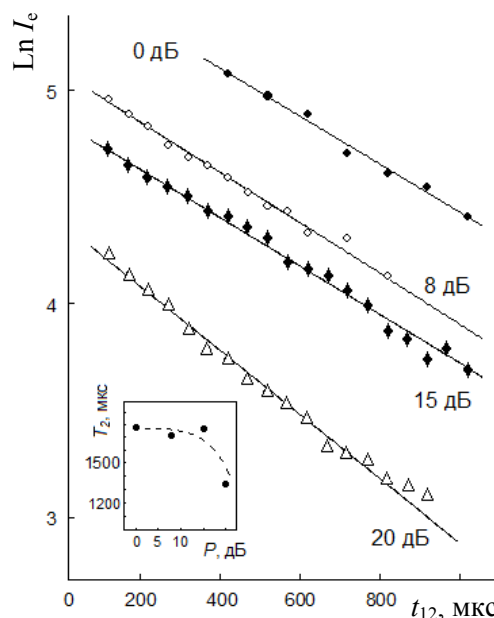


Рис. 4. Зависимости нормированной амплитуды эхо-сигнала от времени задержки между радиочастотными импульсами при разных уровнях возбуждения.

Точки — эксперимент, сплошные линии — экспоненциальные функции. На вставке приведено поведение времени релаксации в зависимости от величины ослабления импульсов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные нами измерения показывают, что в том диапазоне мощностей радиочастотного магнитного поля, которые относятся к возбуждению ЯМР в доменных границах, значительного изменения времени поперечной ядерной (спиновой) релаксации ^{57}Fe в литий-цинковом феррите не происходит. Некоторое уменьшение T_2 регистрируется при дальнейшем снижении мощности возбуждения и приближении к границе исследованного диапазона.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 075-00780-19-02 (тема № 0074-2019-0007) Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туров Е.А., Петров М.П. Ядерный магнитный резонанс в ферро- и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1969. 260 с.
2. Куркин М.И., Туров Е.А. ЯМР в магнитоупорядоченных веществах и его применения. М.: Наука, 1990. 244 с.
3. Петров М.П. Электронно-ядерные взаимодействия // Физика магнитных диэлектриков. Л.: Наука, 1974. С. 177–283.

4. *Нестеров М.М., Плешаков И.В., Фофанов Я.А.* Информационно-физические свойства нестационарных откликов в системах обработки импульсных сигналов // Научное приборостроение. 2006. Т. 16, № 2, С. 3–21. URL: <http://iairas.ru/mag/2006/abst2.php#abst1>
5. *Плешаков И.В., Голощанов С.И., Кузьмин Ю.И., Паугурт А.П., Фофанов Я.А., Дудкин В.И., Клёмта Н.С., Явтушенко А.И.* Анализ поведения сигнала ядерного спинового эха в намагничиваемом феррите // Научное приборостроение. 2012. Т. 22, № 3, С. 61–68. URL: <http://iairas.ru/mag/2012/abst3.php#abst10>
6. *Кузьмин В.С., Колесенко В.М., Борботко Е.П.* Сигнал двухимпульсного ядерного эха в магнитоупорядоченных средах // Физика твердого тела. 2008. Т. 50, № 11. С. 2043–2049. DOI: 10.1134/S1063783408110218
7. *Плешаков И.В., Попов П.С., Кузьмин Ю.И., Дудкин В.И.* Изучение пиннинга доменных границ магнитоупорядоченного материала методом ядерного магнитного резонанса // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42, № 2. С. 9–15. DOI: 10.1134/S1063785016010296
8. *Плешаков И.В., Попов П.С., Кузьмин Ю.И., Дудкин В.И.* Эффект мультиплексирования при воздействии на рабочее вещество спинового эхо-процессора импульсами магнитного поля // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 2. С. 180–188. DOI: 10.1007/s11141-016-9686-6
9. *Плешаков И.В., Попов П.С., Дудкин В.И., Кузьмин Ю.И.* Спиновый эхо-процессор в устройствах функциональной электроники: управление откликами при обработке многоимпульсных последовательностей // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62, № 6. С. 561–565. DOI: 10.1134/S1064226917060171

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург (Худяков А.В.)

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург (Плешаков И.В., Кузьмин Ю.И.)

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург (Фофанов Я.А.)

Контакты: *Фофанов Яков Андреевич*,
yakinvest@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 30.01.2020

TRANSVERSE RELAXATION OF NUCLEAR SPIN SYSTEM IN LITHIUM-ZINC FERRITE AT DIFFERENT EXCITATION POWERS

A. V. Khudyakov¹, I. V. Pleshakov², Ya. A. Fofanov³, Yu. I. Kuzmin²

¹*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*

²*Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia*

³*Institute for Analytical Instrumentation of RAS, St. Petersburg, Russia*

The paper presents the results of experiments on the study of the transverse relaxation of the magnetic moments of ⁵⁷Fe nuclei when the echo signals are excited by radio frequency pulses of various powers. As a sample lithium-zinc ferrite was used. The investigation was carried out according to a standard scheme of non-steady nuclear magnetic resonance observation in magnetically ordered materials: without using an external permanent magnetic field and with a reduced pulse power compared to conventional case. Measurements were performed at room temperature. It is established that in a sufficiently wide range of capacities, the time of transverse relaxation remains approximately constant, changing slightly only with a significant decrease in the level of excitation. It is shown that the behavior of the spin echo signal is related to the specifics of observing nuclear magnetic resonance in domain boundaries.

The work was performed in accordance with State Assignment No. 075-00780-19-02 (theme No. 0074-2019-0007) of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

Keywords: nuclear magnetic resonance, spin echo, transverse relaxation time, magnetic materials

REFERENCES

1. Turov E.A., Petrov M.P. *Yadernyj magnitnyj rezonans v ferro- i antiferromagnetikah* [Nuclear magnetic resonance in ferro- and antiferromagnets]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 260 p. (In Russ.).
2. Kurkin M.I., Turov E.A. *YAMR v magnitouporyadochenykh veshchestvakh i ego primeneniya* [NMR in magnetically ordered substances and its applications]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 244 p. (In Russ.).
3. Petrov M.P. [Electronic and nuclear interactions]. *Fizika magnitnykh dielektrikov* [Physics of magnetic dielectrics], Leningrad, Nauka Publ., 1974, 177–283 p. (In Russ.).
4. Nesterov M.M., Pleshakov I.V., Fofanov Ya.A. [Information-physical properties of nonsteady state responses in the systems of pulsed signal processing]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2006, vol. 16, no 2, pp. 3–21. (In Russ.).
URL: <http://iairas.ru/en/mag/2006/abst2.php#abst1>
5. Pleshakov I.V., Goloshchapov S.I., Kuzmin Yu.I., Paugurt A.P., Fofanov Ya.A., Dudkin V.I., Kloekhta N.S., Yavtushenko A.I. [Analysis of the spin echo behavior in a magnetized ferrite]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2012, vol. 22, no 3, pp. 61–68. (In Russ.). <http://iairas.ru/en/mag/2012/abst3.php#abst10>
6. Kuzmin V.S., Kolesenko V.M., Borbotko E.P. [Dual pulse nuclear echo signal in magnetically ordered media]. *Fizika tverdogo tela* [Physics of a solid body], 2008, vol. 50, no 11, pp. 2043–2049. DOI: 10.1134/S1063783408110218 (In Russ.).
7. Pleshakov I.V., Popov P.S., Kuzmin Yu.I., Dudkin V.I. [Study of pinning of domain boundaries of magnetically ordered material by nuclear magnetic resonance method]. *Pisma v ZHTF* [Applied Physics Letters], 2016, vol. 42, no 2, pp. 9–15. DOI: 10.1134/S1063785016010296 (In Russ.).
8. Pleshakov I.V., Popov P.S., Kuzmin Yu.I., Dudkin V.I. [Effect of multiplexing when spin echo processor is exposed to magnetic field pulses]. *Izvestiya VUZov. Radiofizika* [News of Higher Education Institutions. Radiophysics], 2016, vol. 59, no 2, pp. 180–188. DOI: 10.1007/s11141-016-9686-6 (In Russ.).
9. Pleshakov I.V., Popov P.S., Dudkin V.I., Kuzmin Yu.I. [Pin Echo Processor in Function Electronics Devices - Multi-Pulse Sequence Response Control]. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio technician and electronic engineer], 2017, vol. 62, no 6, pp. 561–565. DOI: 10.1134/S1064226917060171 (In Russ.).

Contacts: *Fofanov Yakov Andreevich*,
yakinvest@yandex.ru

Article received by the editorial office on 30.01.2020