

05;07

## Регистрация фотоманитного эффекта методом ядерного магнитного резонанса

© И.В. Плешаков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург  
E-mail: vp.shuv@pop.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 25 ноября 2002 г.  
В окончательной редакции 5 февраля 2003 г.

На примере прозрачного легкоплоскостного антиферромагнетика  $\text{FeVO}_3$  (брат железа) показано, что ядерный магнитный резонанс (ЯМР) является эффективным инструментом исследования фотоманитизма в магнитоупорядоченных материалах. Обнаружено, что в  $\text{FeVO}_3$  под действием света происходит сдвиг частоты ЯМР  $^{57}\text{Fe}$ , связанный с изменением электронной намагниченности, а также значительное увеличение сигнала ядерной индукции в области существования доменных границ.

Фотоманитные явления в магнитоупорядоченных веществах, т.е. любые изменения магнитных параметров этих материалов, происходящие под действием света, весьма интересны с физической точки зрения, и изучаются со времени открытия в конце шестидесятых годов [1] до сегодняшнего дня. Практически важным аспектом такой деятельности являются исследования возможностей магнитооптической записи и поиск для нее наилучшего носителя.

Хорошо известно, что ЯМР позволяет регистрировать достаточно тонкие особенности поведения упорядоченных магнетиков, зачастую не обнаружимые другими методами, так как основные характеристики ЯМР определяются магнитными параметрами материала [2]. Частоты ЯМР заданы электронными намагниченностями подрешеток, интенсивность сигнала связана с полями анизотропии, а также восприимчивостью доменных границ и т.д. Поскольку параметры фотоманитного материала под действием света так или иначе изменяются, можно ожидать, что ЯМР окажется чувствительным индикатором фотоманитного эффекта и позволит изучить новые стороны этого явления. С целью показать возможности ЯМР при изучении фотоманитизма и была выполнена настоящая работа.

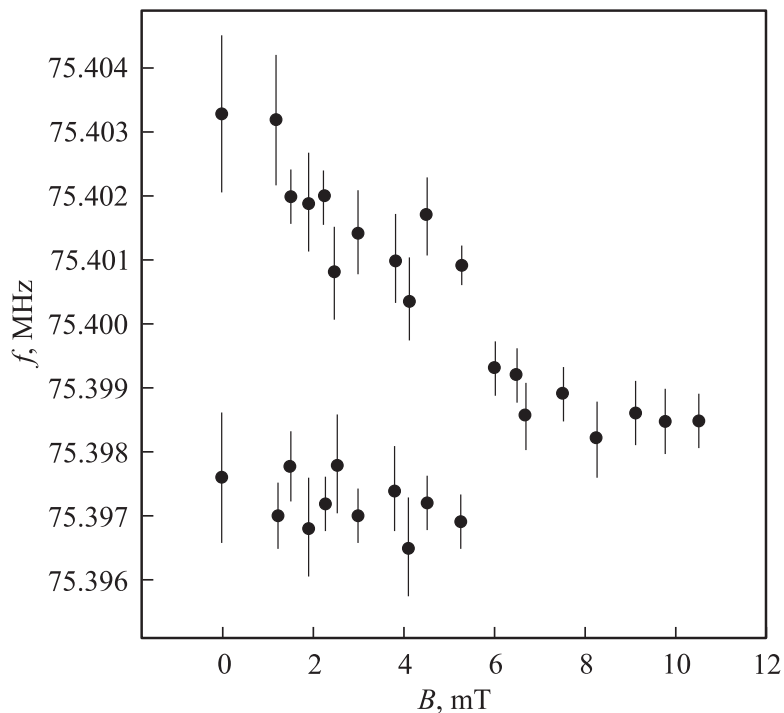
Для эксперимента был выбран борат железа, который является представителем крайне немногочисленной группы материалов, сохраняющих магнитный порядок и прозрачность в видимом диапазоне при относительно высоких температурах. Фотомагнитный эффект в этом веществе изучен очень подробно [3–10], причем надежно установлено [9], что он обусловлен свойствами самого материала, а не легирующими примесями, которые лишь усиливают фоточувствительность. Узкая линия и большая интенсивность сигнала ЯМР в борате железа делают его практически единственным кандидатом на роль модельного объекта при решении поставленной задачи.

В работе использовался тонкий прямоугольный монокристалл номинально чистого бората железа с размерами  $2 \times 2 \times 0.2$  mm, плоскость которого совпадала с плоскостью легкого намагничивания. Образец был обогащен изотопом  $^{57}\text{Fe}$  до 80%. ЯМР этих ядер возбуждался радиочастотными импульсами на несущей частоте  $f \cong 75.4$  MHz и наблюдался по сигналу свободной индукции. Для управления доменной структурой к образцу прикладывалось постоянное магнитное поле  $B$ , перестраиваемое в пределах 0–10 mT. Радиочастотное и постоянное поля были взаимно перпендикулярны и лежали в плоскости кристалла.

Фотомагнитные эффекты индуцировались светом лампы накаливания с широким спектром излучения. Свет подводился к измерительной ячейке волоконно-оптическим жгутом и направлялся на поверхность образца через диффузный рассеиватель, что обеспечивало однородное освещение с плотностью мощности  $\sim 0.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ .

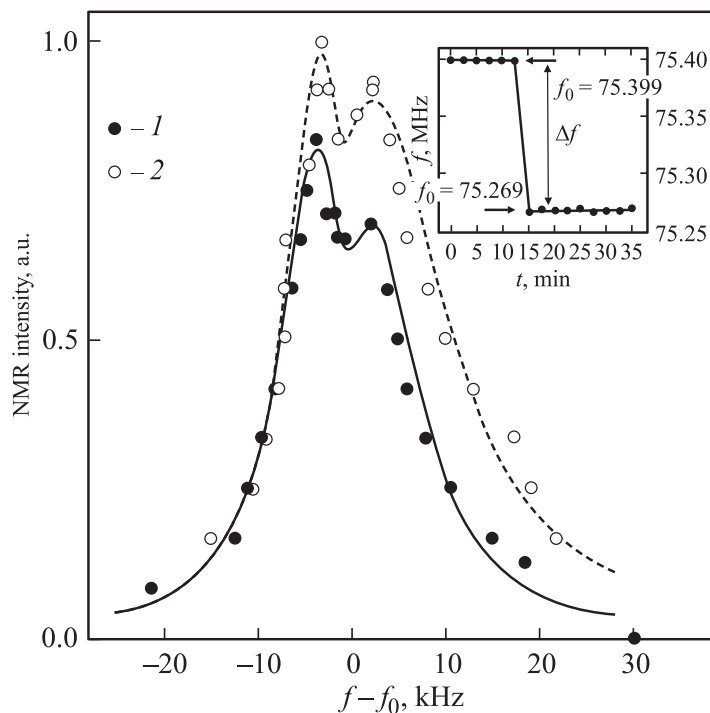
Эксперимент проводился при температуре жидкого азота.

При малых постоянных полях в спектре ЯМР наблюдалось расщепление, причем регистрировались два пика, слияние которых в один происходило только приблизительно при 5–6 mT (рис. 1). Появление нескольких линий в спектре  $\text{FeVO}_3$  наблюдалось и ранее [11–13], но их поведение во внешнем поле имело иной характер, что объясняется иными условиями эксперимента. В указанных работах использовались достаточно мощные возбуждающие импульсы и в некоторых вариантах другая геометрия полей, т.е. исследовался сигнал от ядер в различном образом ориентированных доменах. В нашем случае наблюдался сигнал от ядер в доменных границах, поскольку для его возбуждения требовались существенно меньшие мощности импульсов, чем для образца, заведомо находящегося в состоянии насыщения.



**Рис. 1.** Зависимость частот, при которых наблюдается максимум сигнала ЯМР, от внешнего магнитного поля.

Известно, что доменная структура полностью размагниченного бората железа содержит блоховские и неелевские границы [4,14–16], однако последние исчезают уже в очень небольшом внешнем поле, составляющем десятые доли мТ. Поэтому оба пика в спектре ЯМР, скорее всего, следует отнести к блоховским границам, что дополнительно подтверждается одинаковым уровнем их оптимального возбуждения ( $90^\circ$ -ные импульсы для них одинаковы). Причина расщепления спектра ЯМР в границах одного типа до конца не ясна, но можно предположить, что она связана с существованием двух разновидностей блоховских границ с разными углами поворота намагниченности, [4,14]. В [16] полное намагничивание  $\text{FeVO}_3$  достигалось при  $B_{sat} = 1.6 \text{ mT}$ , хотя,



**Рис. 2.** Спектр ЯМР при  $B = 2.5$  мТ для неосвещенного (1) и освещенного (2) образца. На вставке: изменение частоты ЯМР при включении освещения (внешнее поле  $B = 7.5$  мТ).

конечно, эта величина может меняться в зависимости от условий и от образца к образцу. Для использованного в настоящей работе кристалла ранее было определено поле насыщения  $B_{sat} \approx 5$  мТ (при  $T = 77$  К) [17], что хорошо согласуется с рис. 1. Основные эксперименты по регистрации фотомагнитного эффекта были выполнены при  $B = 2.5$  мТ и  $B = 7.5$  мТ, т.е. для состояний, которые считаются соответственно многодоменным и однодоменным.

При включении света происходило понижение частоты ЯМР с характерным временем, не превышающим 2.5 min (см. вставку рис. 2). За величину сдвига  $\Delta f$  принято смещение центральной частоты  $f_0$ ,

которая в случае сложного спектра является средней между частотами отдельных пиков. Величина  $\Delta f$  соответствует уменьшению подрешеточной намагниченности на 0.17%, что по порядку величины соответствует данным работы [10], в которой использовалось лазерное излучение с  $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$  и приблизительно той же плотностью мощности, что в настоящей работе. В [9,10] показано, что при  $T = 77 \text{ K}$  фотоиндуцированный вклад в изменение намагниченности, причиной которого является перераспределение заселенностей уровней фоточувствительных ионов  $\text{Fe}^{2+}$ , составляет не менее 35%, а теоретически он может быть и значительно больше. Использование численных данных из [8,10] позволило грубо оценить нагрев образца в нашем эксперименте и определить тепловой вклад в величину  $\Delta f$  приблизительно в 10%. Отметим, что в рассматриваемом здесь случае действие света на образец сопровождалось не только смещением частоты ЯМР вниз, но и довольно значительным ростом сигнала. Это дает качественное подтверждение того, что механизм явления в значительной степени не тепловой, поскольку последний может приводить только к уменьшению отклика спиновой системы. Так как в исследованном интервале полей сильной зависимости  $\Delta f$  от  $B$  не обнаружено, можно считать, что величины электронной намагниченности внутри домена и в доменной границе под действием света претерпевают одинаковые изменения.

Хотелось бы обратить внимание на то, что, поскольку частота ЯМР связана с намагниченностью именно отдельной подрешетки (в  $\text{FeVO}_3$  присутствуют две эквивалентные подрешетки), а не с полной намагниченностью образца, радиоспектроскопические исследования в отличие от магнитометрии дают сведения о фотоиндуцированных изменениях на более локальном уровне.

Для сравнения особенностей спектров ЯМР при наличии и отсутствии освещения они построены на одном графике в зависимости от разностной частоты  $f - f_0$  (рис. 2). Обращают на себя внимание практически точное совпадение положений пиков в многодоменной области ( $B = 2.5 \text{ mT}$ ) и увеличение сигнала ЯМР освещенного образца, особенно сильное в области правого крыла спектра. При  $B = 7.5 \text{ mT}$  также происходит возрастание сигнала (примерно на 25%), но оно более равномерно распределено по спектру и, по всей вероятности, вызвано понижением эффективного поля анизотропии в базисной плоскости, представляющим

собой одно из проявлений фотомагнитного эффекта в борате железа [5]. Поскольку коэффициент усиления ЯМР в доменных границах определяется их восприимчивостью [2], можно предположить, что причиной асимметричного воздействия света на спектр ЯМР при  $B = 2.5 \text{ мТ}$  является различие в воздействии света на восприимчивость блоховских границ с разным углом поворота намагниченности.

Таким образом, в настоящей работе впервые продемонстрированы возможности метода ЯМР при изучении фотомагнитных явлений в магнитоупорядоченных кристаллах. Обнаружены некоторые особенности фотомагнитного процесса, проявившиеся в спектре ЯМР бората железа, выяснение механизма которых является предметом дальнейших исследований.

## Список литературы

- [1] *Enz U., Lems W., Metselaar R. et al. // IEEE Trans. on Magnetics. 1969. V. MAG-5. N 3. P. 467–472.*
- [2] *Туров Е.А., Петров М.П. Ядерный магнитный резонанс в ферро- и антиферромагнетиках. М., 1969. 260 с.*
- [3] *Lacklison D.E., Chadwick J., Page J.L. // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. N 4. P. 1445–1446.*
- [4] *Lacklison D.E., Chadwick J., Page J.L. // J. Phys. D. 1972. V. 5. N 1. P. 810–816.*
- [5] *Seavey M.H. // Solid State Commun. 1973. V. 12. N 1. P. 49–52.*
- [6] *Боровец М., Гармонов А.А., Рудов С.Г. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 50. № 10. С. 431–433.*
- [7] *Petrakovskii G.A., Patrin G.S., Volkov N.V. // Phys. Stat. Sol. (a). 1985. V. 87. P. K153–K156.*
- [8] *Patrin G.S., Petrakovskii G.A., Rudenko V.V. // Phys. Stat. Sol. (a). 1987. V. 99. P. 619–623.*
- [9] *Патрин Г.С., Великанов Д.А., Петраковский Г.А. // ЖЭТФ. 1993. Т. 103. № 1. С. 234–250.*
- [10] *Патрин Г.С., Великанов Д.А., Петраковский Г.А. // ФТТ. 1995. Т. 37. № 4. С. 1214–1219.*
- [11] *Багаутдинов Р.А., Богданова Х.Г., Голенищев-Кутузов В.А. и др. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 3. С. 924–926.*
- [12] *Богданова Х.Г., Голенищев-Кутузов В.А., Медведев Л.И. и др. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 2. С. 379–385.*

- [13] *Богданова Х.Г., Леонтьев В.Е., Шакирзянов М.М.* // ФТТ. 1999. Т. 41. № 2. С. 290–292.
- [14] *Haisma J., Stacy W.T.* // J. Appl. Phys. 1973. V. 44. N 7. P. 3367–3371.
- [15] *Scott G.B.* // J. Phys. D. 1974. V. 7. N 2. P. 1574–1587.
- [16] *Саланский Н.М., Глоzman Е.А., Селезнев В.Н.* // ЖЭТФ. 1975. Т. 68. № 4. С. 1413–1417.
- [17] *Петров М.П., Иванов А.В., Паугурт А.П.* и др. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 6. С. 1819–1822.