

УДК 539.143.43  
 © 1990

## ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ЯДРАХ ФЕРРОМАГНЕТИКА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НИЗКОЧАСТОТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

*В. К. Мальцев, В. И. Цифринович, Н. В. Бакшеев, В. Д. Ульянов*

Экспериментально исследуется поперечная релаксация ядерных спинов в кобальте и литиевом феррите, индуцированная низкочастотным полем. Установлено, что в области, где мгновенное значение поля  $H_i$  близко к коэрцитивной силе, происходит резкое изменение релаксации. Показано, что вне этой области изменение магнитных полей на ядрах пропорционально  $H_i$  и поперечная релаксация эффективно подавляется с помощью импульсов магнитного поля.

Известно, что в ферромагнитных средах низкочастотное (НЧ) магнитное поле индуцирует ядерную поперечную релаксацию  $\Gamma_{нч}$ , которая связана с движением магнитной структуры [1, 2]. При этом магнитное поле на ядре описывается выражением  $H_n = H_n^0 + \Delta H_n(t)$ , где  $H_n^0$  — исходное значение  $H_n$ ,  $\Delta H_n(t)$  — некоторая случайная функция времени. При исследовании действия импульсов магнитного поля на ядерное спиновое эхо было установлено, что в некоторых соединениях имеет место линейная связь между  $\Delta H_n$  и мгновенным значением внешнего магнитного поля  $H_i$

$$\Delta H_n(t) = \lambda H_i(t), \tag{1}$$

где  $\lambda$  — случайная величина со средним значением  $\langle \lambda \rangle = 0$  [3, 4]. В этом случае амплитуда эха задается простым выражением

$$A = A_0 \langle \exp i\lambda \Delta S \rangle, \tag{2}$$

где  $\Delta S$  — разность площадей, занимаемых полем  $H_i$

$$\Delta S = \int_0^\tau H_i(t) dt - \int_\tau^{2\tau} H_i(t) dt, \tag{3}$$

$\tau$  — временной интервал между возбуждающими радиоимпульсами. Если амплитуда эха описывается выражением (2), релаксация  $\Gamma_{нч}$  может быть подавлена с помощью дополнительного импульса магнитного поля, компенсирующего разность площадей  $\Delta S$ . В настоящей работе исследуется область применимости линейного соотношения (1) при воздействии на образец НЧ поля.

### 1. Методика проведения эксперимента

На ферромагнитный образец накладывается НЧ поле  $H_i = H_m \sin \times (2\pi Ft)$ . Эффективное время поперечной релаксации  $T_2^{\text{эфф}}$  измеряется по спаду амплитуды эха  $A(\tau)$ . Программа эха синхронизирована с НЧ полем. Период повторения программы  $T_0$  кратен периоду НЧ поля  $T_0 = n/F$ . Значение  $n = n_0$  выбирается таким образом, чтобы амплитуда  $A$  не изме-

нялась при  $n > n_0$  (т. е. ядерная система за время  $T_0$  успевает вернуться в равновесное состояние; для кобальта  $T_0 \geq 1$  мс).

При изменении  $\tau$  временное положение эха относительно НЧ поля  $t=t_E$  удовлетворяет условию  $\sin \varphi_E = \text{const}$ ,  $\varphi_E = 2\pi F t_E$ . Поэтому значение  $H_i(t_E)$ , а следовательно, и коэффициент усиления ядерного сигнала не изменяются. С другой стороны, с ростом  $\tau$  возбуждающие импульсы «отодвигаются» от эха и при этом происходит изменение коэффициента усиления высокочастотного поля радиоимпульсов. Для компенсации такого изменения амплитуда радиоимпульсов при каждом значении  $\tau$  подстраивается таким образом, чтобы сигнал эха был максимальным. Для сравнения время поперечной релаксации  $T_2^{\text{эфф}}$  измеряется также при квазистатическом изменении поля  $H_i$ . В этом случае величина  $H_i$  медленно изменяется в тех же пределах, что и НЧ поле.

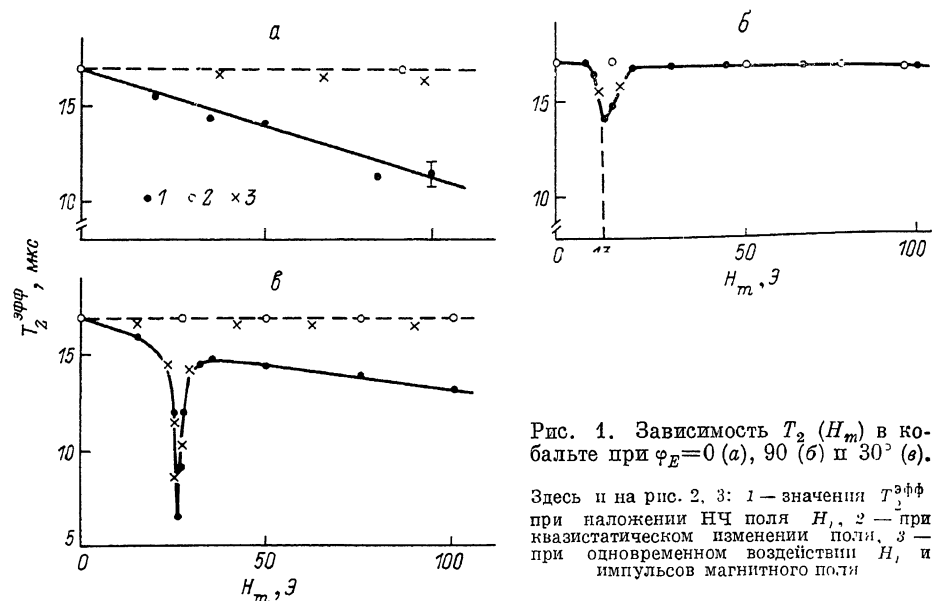


Рис. 1. Зависимость  $T_2(H_m)$  в кобальте при  $\varphi_E=0$  (а),  $90^\circ$  (б) и  $30^\circ$  (в).

Здесь и на рис. 2, 3: 1 — значения  $T_2^{\text{эфф}}$  при наложении НЧ поля  $H_m$ , 2 — при квазистатическом изменении поля, 3 — при одновременном воздействии  $H_i$  и импульсов магнитного поля

Для подавления релаксации  $\Gamma_{\text{нч}}$  в промежутке между возбуждающими радиоимпульсами или между вторым радиоимпульсом и эхо подается прямоугольный импульс магнитного поля (поле импульса коллинеарно НЧ полю). При любом значении  $\tau$  амплитуда и длительность этого импульса подбираются таким образом, чтобы сигнал эха был максимальным.

В качестве образцов использовались одноосные поликристаллические пленки кобальта (толщина 130 нм, коэрцитивная сила  $H_c=13$  Э, частота ЯМР  $f_n=213$  МГц) и кольца литиевого феррита  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$  (частота ЯМР на  $^{57}\text{Fe}$   $f_n=68$  МГц).

Все измерения проводились при комнатной температуре. В экспериментах с кобальтом высокочастотное поле радиоимпульсов было направлено перпендикулярно оси анизотропии, а НЧ поле вдоль этой оси. В ферритах высокочастотное поле воздействовало вдоль средней линии образца, а НЧ поле было ориентировано параллельно или перпендикулярно оси кольца.

## 2. Результаты эксперимента

На рис. 1 сплошными линиями изображены зависимости эффективных времен поперечной релаксации в кобальте от амплитуды НЧ поля  $H_m$  при  $F=50$  Гц и различных значениях параметра  $\varphi_E$ . Штриховыми линиями изображены зависимости  $T_2^{\text{эфф}}(H_m)$  при квазистатическом изменении магнитного поля. Отличительной особенностью этих графиков является рез-

кое уменьшение  $T_2^{\text{эфф}}$ , которое наблюдается при значениях амплитуды НЧ поля

$$H_m \sin \varphi_E \approx H_c. \quad (4)$$

т. е. усиление релаксации происходит, когда мгновенное значение НЧ поля  $H_i(t_E)$  близко к коэрцитивной силе  $H_c$ . (При измерении  $T_2^{\text{эфф}}$  в области (4) временной интервал  $\tau$  изменялся от 5 до 7 мкс, затем зависимость  $A(\tau)$  аппроксимировалась экспонентой. Вне этой области  $\tau$  изменялось от 5 до 11 мкс. Мертвое время приемного тракта составляет 2 мкс и при  $\tau \geq 5$  мкс заведомо не оказывает влияния на амплитуду эха). На рис. 2 приведена зависимость  $T_2^{\text{эфф}}(F)$  при  $\varphi_E=0$ , снятая на том же образце. С увеличением  $F$  эффективное время релаксации  $T_2^{\text{эфф}}$  резко уменьшается. На рис. 3

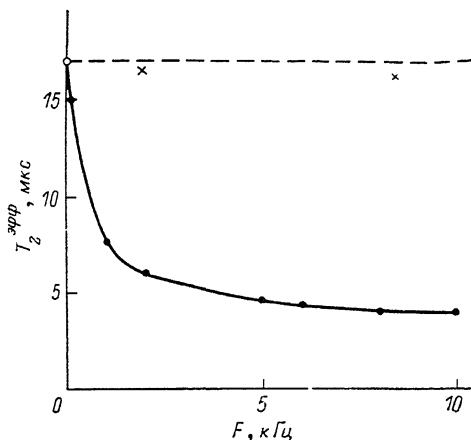


Рис. 2. Зависимость  $T_2^{\text{эфф}}(F)$  в кобальте при  $\varphi_E=0$ ,  $H_m=25$  Э.

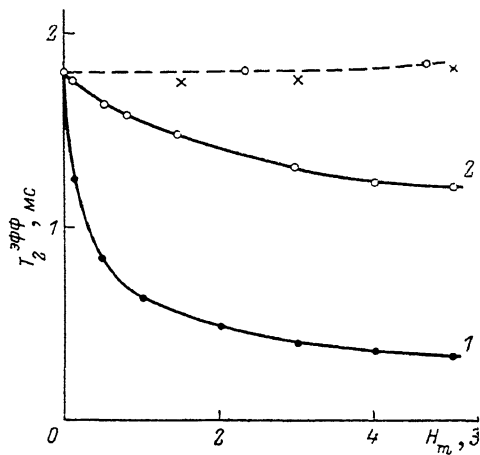


Рис. 3. Зависимость  $T_2^{\text{эфф}}(H_m)$  в литиевом феррите при  $F=50$  Гц,  $\varphi_E=30^\circ$ .

сплошными линиями изображена зависимость  $T_2^{\text{эфф}}(H_m)$  в литиевом феррите для двух ориентаций НЧ поля при  $\varphi_E=30^\circ$ . В обоих случаях с ростом  $H_m$  наблюдается монотонное уменьшение  $T_2^{\text{эфф}}$ . Штриховая линия соответствует значению  $T_2^{\text{эфф}}$  при квазистатическом изменении поля, которое в исследуемых образцах одинаково для обоих направлений поля и не зависит от величины  $H_m$ .

Как отмечалось ранее, для подавления релаксации  $\Gamma_{\text{нч}}$  на образец подавались импульсы магнитного поля. На рис. 1—3 крестиками изображены значения  $T_2^{\text{эфф}}$ , полученные при воздействии этих импульсов. Видно, что в области (4) индуцированная релаксация не подавляется. Вне этой области величина  $T_2^{\text{эфф}}$  увеличивается почти до значений, соответствующих квазистатическому изменению поля. Типичные осциллограммы, изображающие восстановление эха, показаны на рис. 4. Максимальные сигналы эха наблюдаются, когда площадь импульса магнитного поля компенсирует разность площадей  $\Delta S$ .

### 3. Обсуждение результатов

Проведенные эксперименты показывают, что в ферромагнитном кобальте при наложении НЧ поля с амплитудой от нуля до 100 Э везде, за исключением узкой области (4), поперечная релаксация  $\Gamma_{\text{нч}}$  эффективно подавляется с помощью импульсов магнитного поля. Это означает, что на временных интервалах  $\Delta t \leq 20$  мкс изменение магнитных полей на ядрах приблизительно описывается линейным соотношением (1).

Полученные выводы позволяют объяснить поведение кривых на рис. 1, 2 вне области (4). Уменьшение  $T_2^{\text{эфф}}(H_m)$  при  $\varphi_E=0$  (рис. 1, а) связано с ростом крутизны НЧ поля и соответствующим увеличением разности

площадей  $\Delta S$ . Аналогичная ситуация имеет место при изменении  $F$  (рис. 2). При  $\varphi_E=90^\circ$  величина  $\Delta S$  увеличивается очень слабо; поэтому в зависимости  $T_2^{\text{эфф}}(H_m)$  при  $F=50$  Гц и квазистатическом изменении поля практически совпадают (рис. 1, б). При промежуточном значении  $\varphi_E=30^\circ$

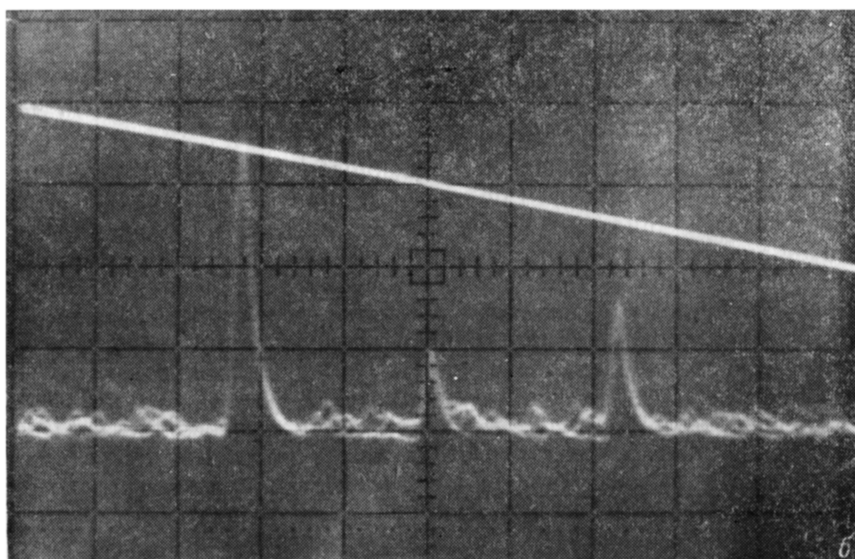
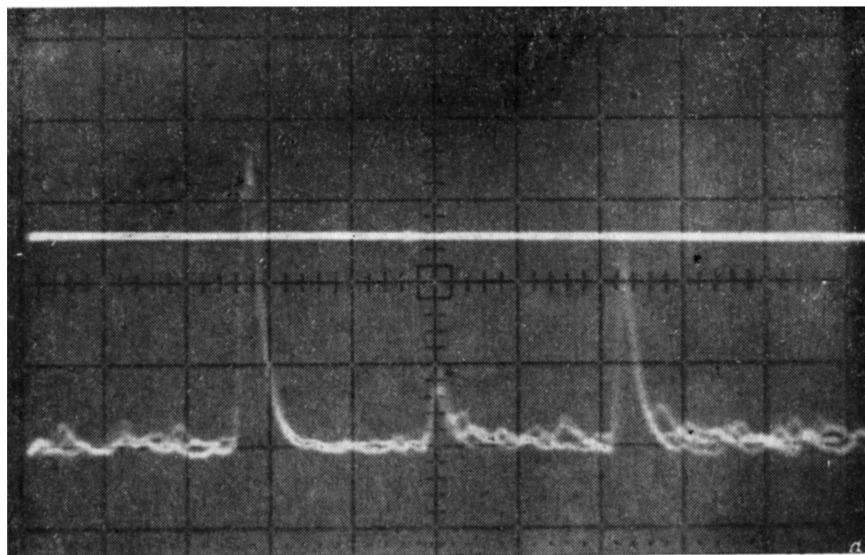


Рис. 4. Осциллограммы Эха при  $H_m=0$  (а), после наложения НЧ поля,  $F=50$  Гц,  $H_m=6$  Э,  $\varphi_E=0$  (б), после воздействия импульса магнитного поля, компенсирующего разность площадей  $\Delta S$  (в).

(рис. 1, в) разность между квазистатическим и динамическим значениями  $T_2^{\text{эфф}}$  увеличивается медленнее, чем при  $\varphi_E=0$ .

Рассмотрим теперь область (4), где наблюдается резкое изменение поперечной релаксации, причем  $\Gamma_{\text{нч}}$  не подавляется при воздействии импульсов магнитного поля. Измерения, проведенные на петлескопе, показывают, что исследуемые образцы при  $H_m \ll 8$  Э находятся в размагниченном состоянии: макроскопическая электронная намагниченность отсутствует. При  $H_m \approx 8$  Э появляется частная петля гистерезиса, а когда  $H_m \geq 20$  Э,



наблюдается полностью раскрытая петля. Поэтому изменение магнитных полей  $H_n$  на ядрах вне области (4), по-видимому, связано с движением микромагнитной структуры в доменах. В области (4) происходит перемагничивание образца которое, очевидно, сопровождается необратимым изменением  $H_n$ . Для  $\varphi_F=90^\circ$  (рис. 1, б) минимальное значение  $T_2^{ФФ}$  дости-

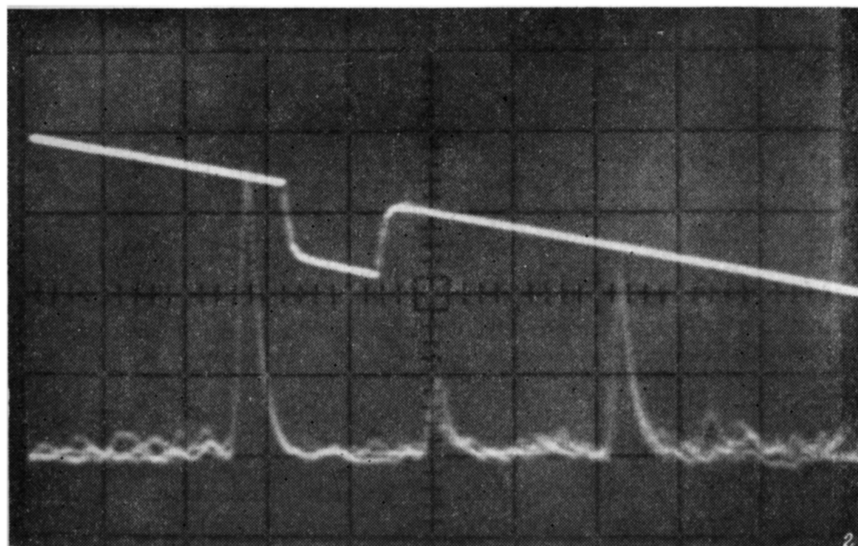
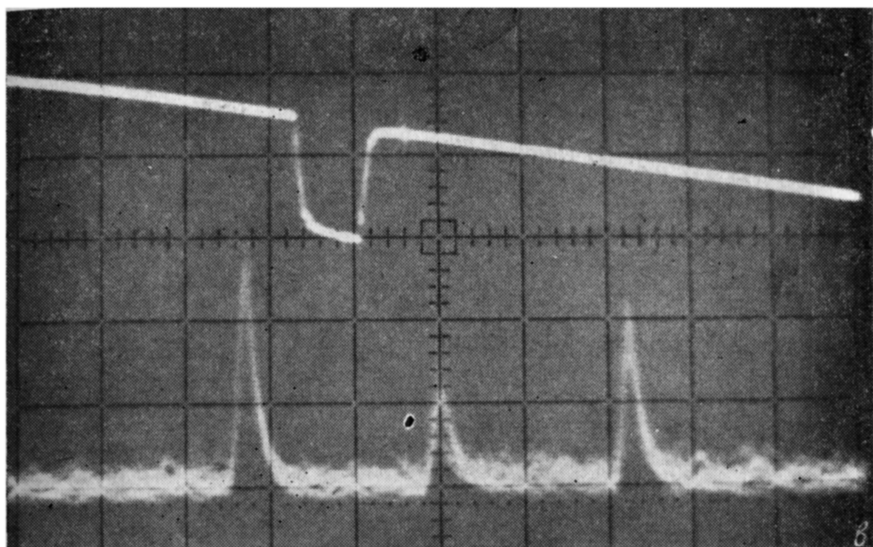


Рис. 4 (продолжение).

гается при  $H_i(t_E)=H_m \simeq H_c$ , а для  $\varphi_E=30^\circ$  (рис. 1, в) — при  $H_i(t_E) \simeq 0.5H_m \simeq H_c$ . Второй случай соответствует значительно более быстрому изменению намагниченности образца, что является причиной более резкого уменьшения  $T_2^{ФФ}$ .

В ферритах при изменении  $H_m$  от нуля до 5 Э индуцированная релаксация одинаково эффективно подавляется для обеих ориентаций НЧ поля (рис. 3). Вероятно, в этих образцах НЧ поле индуцирует обратимое смещение доменных границ, которое сопровождается неоднородным измене-

нием магнитных полей на ядрах в границах. Почти полное подавление  $\Gamma_{\text{яч}}$  в исследованном диапазоне изменения  $H_m$  означает, что в ферритах приближенно выполняется линейное соотношение (1).

#### Список литературы

- [1] Бакшеев Н. В., Логинов В. М., Мушаилов Э. С., Цифринович В. И. // ЖЭТФ. 1983. Т. 85. № 3. С. 962—966.
- [2] Мушаилов Э. С., Норкараев Х. М. // ФММ. 1987. Т. 63. № 3. С. 616—619.
- [3] Мальцев В. К., Рейнгардт А. Е., Цифринович В. И. // ФММ. 1984. Т. 57. № 2. С. 401—402.
- [4] Рейнгардт А. Е. // Автореф. канд. дис. Красноярск, 1985. 22 с.

Институт физики им. Л. В. Киренского  
СО АН СССР  
Красноярск

Поступило в Редакцию  
9 августа 1989 г.

