

О влиянии магнитоупругого взаимодействия на скорость переходных процессов в монокристаллах бората железа

© О.С. Колотов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

(Поступила в Редакцию 14 июля 1998 г.)

Предложено полуэмпирическое соотношение, связывающее скорость переходных процессов в монокристаллах бората железа с амплитудой магнитного поля и интенсивностью магнитоупругих колебаний. Приводятся экспериментальные данные, подтверждающие применимость выражения к реальным кривым импульсного перемагничивания.

Ранее в [1–3] показано, что одним из факторов, определяющих длительность переходных процессов в монокристаллах бората железа (FeVO_3), является магнитоупругое взаимодействие. Возбуждение ударных магнитоупругих колебаний приводит к дополнительному рассеянию энергии и связанному с ним замедлению переходного процесса. Найдено [2,3], что эффективность магнитоупругого взаимодействия спадает при длительности процессов $\tau \leq 13\text{--}17\text{ ns}$. В результате скорость изменения намагниченности резко возрастает, и на кривых импульсного перемагничивания, представляющих зависимость обратного времени перемагничивания τ^{-1} от амплитуды импульсного магнитного поля H_s , появляются изломы. В целом же накопленные к настоящему времени данные дают лишь качественное представление о роли магнитоупругого взаимодействия. Для получения количественной информации здесь предлагается полуэмпирическое выражение, аппроксимирующее зависимость скорости переходного процесса τ^{-1} от поля H_s и интенсивности магнитоупругих колебаний.

При выводе интересующего нас выражения воспользуемся тем обстоятельством, что большинство импульсных процессов в FeVO_3 связано с вращением намагниченности [3–5]. Предположим, что энергия, получаемая образцом от магнитного поля, поглощается магнитной подсистемой кристалла и расходуется на возбуждение магнитоупругих колебаний. Соответственно для плотности энергии имеем

$$\Delta M H_s = \Delta E_m + \Delta E_{me}, \quad (1)$$

где ΔM — изменение намагниченности при переходном процессе. Чтобы оценить плотность потерь энергии ΔE_m в магнитной подсистеме, воспользуемся выражением для диссипативной функции \dot{w}_m . Для слабого ферромагнетика [6,7]

$$\dot{w}_m = \frac{M_0 \alpha}{2\gamma} \left(\frac{d\mathbf{l}}{dt} \right)^2, \quad (2)$$

где α — коэффициент затухания Гильберта, \mathbf{l} — нормированный вектор антиферромагнетизма, равный $\mathbf{L}/M_0 = (\mathbf{M}_1 - \mathbf{M}_2)/M_0$, \mathbf{M}_1 и \mathbf{M}_2 — намагниченности подрешеток, M_0 — их абсолютное значение, γ — гиромагнитное отношение.

Из-за большой величины плоскостной анизотропии [8] можно считать, что вектор \mathbf{l} остается в плоскости монокристалла. Тогда

$$\dot{w}_m \cong \alpha M_0 \dot{\varphi}^2 / 2\gamma, \quad (2a)$$

где φ — азимутальный угол. Допустим, что мгновенная скорость изменения этого угла $\dot{\varphi}$ равна средней скорости его изменения за время переходного процесса. Тогда потери энергии в магнитной подсистеме

$$\Delta E_m = \dot{w}_m \tau. \quad (3)$$

Будем также считать, что потери энергии на возбуждение магнитоупругих колебаний

$$\Delta E_{me} = k A^2, \quad (4)$$

где коэффициент пропорциональности k зависит от упругих и магнитоупругих констант материала, а также способ определения интенсивности магнитоупругих колебаний A .

Из выражений (1)–(4) следует, что

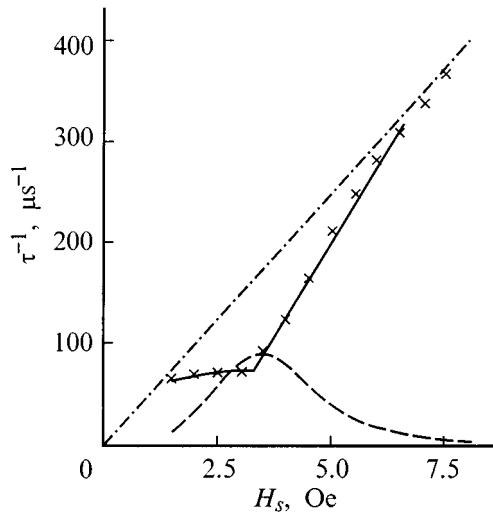
$$\tau^{-1} = a H_s - b A^2, \quad (5)$$

где

$$a = \frac{2\gamma M_s (\cos \eta_2 - \cos \eta_1)}{\alpha M_0 (\eta_2 - \eta_1)^2},$$

$a = ak$, а η_1 и η_2 — углы между начальным и конечным положениями вектора намагниченности образца \mathbf{M}_s и полем \mathbf{H}_s .

Из-за неполноты сведений об упругих и магнитоупругих свойствах бората железа, а также отсутствия данных о величине коэффициента затухания α в интервале частот $\sim 10\text{--}100\text{ MHz}$, соответствующем исследуемым нами процессам с длительностью $\sim 3\text{--}30\text{ ns}$ [8], расчет коэффициентов a и b затруднен. Однако для получения количественной информации о степени влияния магнитоупругих колебаний можно воспользоваться экспериментальными значениями обсуждаемых коэффициентов. Очевидно, что сама возможность определения этих величин из эксперимента связана с применимостью выражения (5) к реальным переходным процессам.



Сплошная линия — экспериментальная кривая импульсного перемагничивания. Штрих-пунктирная линия — предельная зависимость $\tau^{-1}(H_s)$ при $A = 0$. Штриховая линия — зависимость величины bA^2 от поля H_s . Крестами нанесены значения $\tau^{-1} = aH_s - bA^2$.

В данной работе изучались два процесса: 180° и 90° импульсное перемагничивание. Исследования были выполнены с помощью индукционной установки с временным разрешением ~ 1 ns [9]. Время перемагничивания τ , как обычно, полагалось равным интервалу между моментами, когда напряжение продольного сигнала перемагничивания составляло 0.1 его амплитуды. Интенсивность магнитоупругих колебаний A определялась по амплитуде колебаний сигнала [1–3]. Исследована партия из шести монокристаллов с толщиной от 22 до $110 \mu\text{m}$. Полученные результаты иллюстрируются здесь на примере образца со следующими параметрами: толщина $45 \mu\text{m}$, поле технического насыщения 1.4 Oe, период магнитоупругих колебаний 22 ns.

Если выражение (5) действительно аппроксимирует реальные зависимости, то значения коэффициентов a и b можно найти из системы двух уравнений, полученных для двух разных полей H_s и соответствующих им экспериментальных значений τ^{-1} и A^2 . Пример применения выражения (5) к реальным процессам приведен на рисунке. Сплошной линией здесь представлена экспериментально полученная кривая $\tau^{-1}(H_s)$ при 90° импульсном перемагничивании. Крестами показаны величины, рассчитанные с помощью выражения (5) при $a = 50 (\mu\text{s Oe})^{-1}$ и $b = 3 (\mu\text{s})^{-1}(\text{mV})^{-2}$, которые располагаются вблизи реальной кривой импульсного перемагничивания.

Подобные результаты были получены и для других исследованных образцов. Таким образом, несмотря на ряд упрощающих допущений, использованных при выводе выражения (5), оно достаточно хорошо аппроксимирует реальные кривые импульсного перемагничивания. Используя экспериментальные значения коэффициента b , можно получить более наглядное представление о влиянии магнитоупругих колебаний на скорость пере-

ходных процессов. С этой целью на рисунке штриховой линией показана зависимость значений bA^2 от поля H_s . Штрих-пунктирная прямая, соответствующая зависимости $\tau^{-1} = aH_s$, характеризует скорость перемагничивания в отсутствие магнитоупругого взаимодействия. Из сопоставления приведенных кривых наглядно видно, что возникновение магнитоупругих колебаний приводит к сильному торможению переходного процесса. Вместо прямой линии с коэффициентом переключения $S_{w0} = 1/a$ (равного 0.02 Oe μs для рассматриваемого образца) на кривой импульсного перемагничивания наблюдаются два участка. На первом — коэффициент переключения S_{w1} (0.14 Oe μs) существенно выше, а на втором — S_{w1} (0.013 Oe μs) — заметно меньше, чем S_{w0} . Наиболее сильное торможение наблюдается в районе излом кривой $\tau^{-1}(H_s)$. Здесь скорость перемагничивания уменьшается до 1.5–2.5 раз (для разных образцов).

Очевидно, что прямая $\tau^{-1} = aH_s$ должна аппроксимировать скорость перемагничивания при достаточно больших полях, когда $A \rightarrow 0$. Это означает, что в полях $H_s \sim 8–10$ Oe на кривых импульсного перемагничивания должен появиться загиб. Такой загиб действительно наблюдается. Однако поскольку времена перемагничивания, при которых это имеет место, сравнимы с временным разрешением установки, для более надежного обнаружения этого загиба необходимо увеличить временное разрешение аппаратуры.

В заключение отметим, что, используя экспериментальные значения коэффициента a и приводимые в литературе данные о величинах M_s , M_0 и γ , можно оценить величину коэффициента затухания Гильберта, соответствующего исследуемым здесь процессам. Найденные таким образом значения α оказались близки к 0.01.

Автор признателен Л.И. Антонову, В.А. Погожеву, Г.В. Смирнову за ценные обсуждения, а А.П. Красножону — за дискуссию и помощь в проведении эксперимента.

Список литературы

- [1] О.С. Колотов, Ким Ен Хен, А.П. Красножон, В.А. Погожев. Письма в ЖЭТФ **58**, 1, 52 (1993).
- [2] О.С. Колотов, Ким Ен Хен, А.П. Красножон, В.А. Погожев. ФТТ **36**, 1, 231 (1994).
- [3] О.С. Колотов, А.П. Красножон, В.А. Погожев. ФТТ **38**, 4, 1017 (1996).
- [4] О.С. Колотов, Ким Ен Хен, В.А. Погожев. ФТТ **36**, 2, 515 (1994).
- [5] О.С. Колотов, Ким Ен Хен, В.А. Погожев. Вестн. МГУ. Сер. 3, Физика, астрономия, **6**, 57 (1996).
- [6] А.К. Звездин, А.А. Мухин. ЖЭТФ **102**, 2(8), 577 (1992).
- [7] V.G. Bar'yakhtar, M.V. Chetkin, B.A. Ivanov, S.N. Gadetskii. Springer Tracts in Modern Physics **129**, 1 (1994).
- [8] R. Diehl, W. Jantz, B.I. Nolang, W. Wettling. Current. Topics. Mater. Sci. **11**, 1, 241 (1984).
- [9] О.С. Колотов, В.А. Погожев, Р.В. Телеснин. Методы и аппаратура для исследования импульсных свойств тонких магнитных пленок. Изд-во МГУ, М. (1970).