

05:09;12

Магнитоимпедансный эффект в аморфных FeCoMoSiB лентах

© А.А. Анашко, А.В. Семиров, А.А. Гаврилюк

Иркутский государственный педагогический университет,
664653 Иркутск, Россия
e-mail: semirov@isttu.irk.ru

(Поступило в Редакцию 11 июня 2002 г. В окончательной редакции 7 октября 2002 г.)

Проведено исследование зависимости эффекта магнитоимпеданса от взаимной ориентации оси ленты аморфного металлического сплава $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{1.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$, постоянного магнитного поля и высокочастотного переменного электрического тока, а также величины эффективной магнитной проницаемости от взаимной ориентации оси ленты, постоянного магнитного поля и высокочастотного переменного магнитного поля. Обнаружено качественное соответствие экспериментальных зависимостей эффекта магнитоимпеданса и эффективной магнитной проницаемости от величины постоянного магнитного поля при соответствующих ориентациях высокочастотного магнитного поля и направления протекания высокочастотного электрического тока относительно оси ленты. Экспериментально полученные результаты объяснены на основе представлений о процессах перестройки доменной структуры в исследованных сплавах.

В настоящее время одним из наиболее актуальных направлений исследований в области физики магнитных явлений является изучение эффекта гигантского магнитоимпеданса [1-4]. Несмотря на значительное количество публикаций, посвященных изучению этого эффекта, до настоящего времени остается неисследованным целый ряд вопросов, необходимых для полного понимания его природы.

Целью данной работы являлось проведение комплексного исследования, а именно изучение влияния взаимной ориентации оси, совпадающей с направлением прокатки быстрозакаленного аморфного металлического сплава (оси ленты), внешнего постоянного магнитного поля H и протекающего через образец высокочастотного тока I на характер зависимости импеданса образца Z от напряженности магнитного поля H , а также зависимости эффективной магнитной проницаемости μ_{eff} образца от напряженности внешнего постоянного магнитного поля H при различной взаимной ориентации высокочастотного магнитного поля h измерительной катушки и поля H относительно оси ленты.

Исследования проводились на образцах, изготовленных из ленты аморфного металлического сплава состава $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{1.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ в виде дисков диаметром 9.5 mm, толщиной 25 μm . Магнитострикция насыщения сплава $\lambda_S = -3 \cdot 10^{-7}$, а его индукция насыщения $B_S = 0.55 \text{ T}$.

Измерение эффекта магнитоимпеданса проводилось по схеме, состоящей из последовательно соединенных высокоомного резистора и исследуемого образца. Величина эффекта магнитоимпеданса $\Delta Z/Z_0$ определялась как [4]

$$\Delta Z/Z_0 = (Z_H - Z_0)/Z_0 = (U_H - U_0)/U_0, \quad (1)$$

где Z_0 — импеданс образца при $H = 0$, Z_H — импеданс образца в магнитном поле H , U_H — напряжение на образце в поле H , U_0 — напряжение на образце при $H = 0$.

Эффект магнитоимпеданса исследовался в магнитных полях до 9600 A/m и частотах переменного тока, протекающего по образцу, от 0.1 до 10 MHz.

При ориентации оси ленты параллельно току и магнитному полю H с ростом H в интервале 0–1200 A/m импеданс образца Z оставался практически неизменным. При дальнейшем увеличении H происходило монотонное уменьшение импеданса образца Z и выход зависимости $Z(H)$ на насыщение (рис. 1, a). Величина эффекта магнитоимпеданса имела отрицательное значение и в поле 9600 A/m при частоте высокочастотного тока 1 MHz составляла 50%.

При ориентации оси ленты параллельно высокочастотному току и перпендикулярно направлению приложения внешнего постоянного магнитного поля H с ростом H наблюдается монотонное уменьшение импеданса образца Z (рис. 1, b), причем это происходит более резко, чем в случае, когда H параллельно оси ленты и протекающему высокочастотному току, а зависимость $\Delta Z/Z_0$ выходит на насыщение в меньших магнитных полях. Величина отрицательного эффекта магнитоимпеданса составляла 54% при частоте высокочастотного тока 1 MHz в магнитном поле 9600 A/m.

При ориентации оси ленты перпендикулярно направлению приложения H и высокочастотного тока с ростом H импеданс образца Z сначала возрастал, достигая максимума при $H = 1680 \text{ A/m}$, а затем монотонно уменьшался с дальнейшим выходом зависимости $Z(H)$ на насыщение (рис. 1, c). Максимальное значение положительного эффекта магнитоимпеданса наблюдалось при частоте высокочастотного тока равной 1.5 MHz и достигало 60%. Значение отрицательного эффекта магнитоимпеданса составляло 25% в магнитном поле $H = 9600 \text{ A/m}$ при частоте высокочастотного тока 1.5 MHz.

При ориентации оси ленты параллельно направлению приложения H и перпендикулярно высокочастотному току с ростом H от 0 до 1200 A/m импеданс образца Z

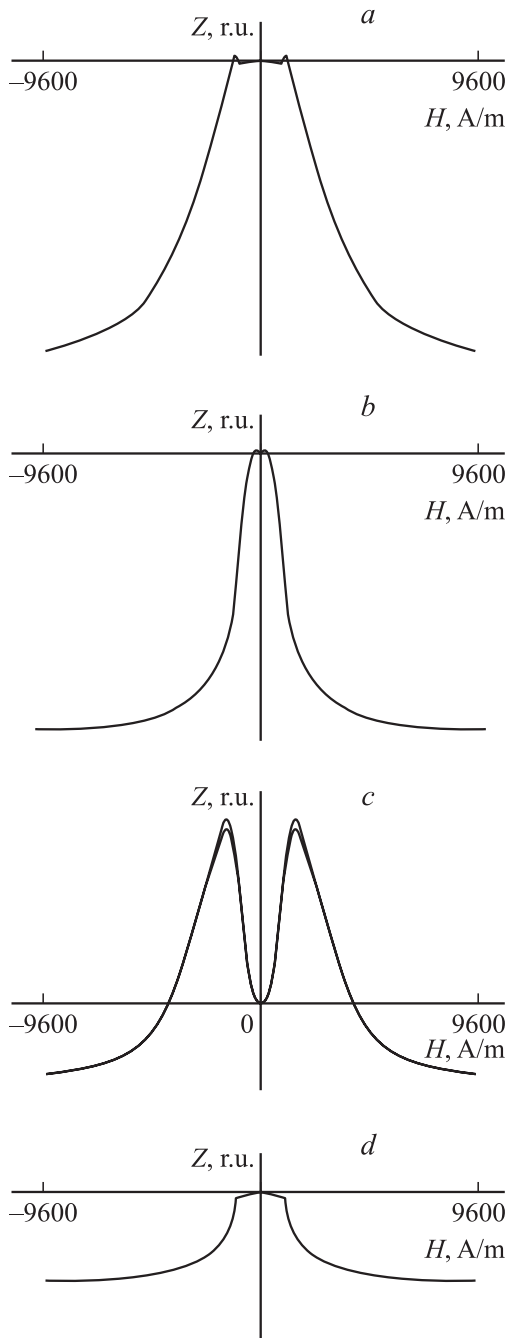


Рис. 1. Зависимость импеданса образца от величины внешнего постоянного магнитного поля. *a* — ось ленты параллельна высокочастотному току и внешнему магнитному полю, *b* — ось ленты параллельна высокочастотному току и перпендикулярна магнитному полю, *c* — ось ленты перпендикулярна высокочастотному току и внешнему магнитному полю, *d* — ось ленты перпендикулярна высокочастотному току и параллельна внешнему магнитному полю.

оставался практически неизменным. При дальнейшем увеличении H происходят монотонное уменьшение импеданса образца Z и выход зависимости $Z(H)$ на насыщение (рис.1, *d*). Отрицательный эффект магнитоимпеданса

в магнитном поле $H = 9600$ А/м при частоте высокочастотного тока 1.5 МГц составляет 28%.

Независимо от направления приложения H и высокочастотного тока относительно оси ленты в насыщающем поле импеданс образца Z принимает минимальное значение.

Согласно развитым в [5] представлениям, эффект магнитоимпеданса связан со скин-слоем. В магнитных материалах его толщина δ определяется соотношением

$$\delta = (\rho / \pi f \mu_0 \mu_{\text{eff}})^{1/2} \quad (2)$$

где ρ — удельное объемное электросопротивление образца, f — частота высокочастотного тока, μ_{eff} — эффективная магнитная проницаемость, μ_0 — магнитная проницаемость вакуума.

Импеданс образца Z пропорционален следующему выражению:

$$Z \sim (\rho f \mu_{\text{eff}})^{1/2}. \quad (3)$$

В аморфных магнитомягких материалах внешнее постоянное магнитное поле может на 2–3 порядка менять величину μ_{eff} [5], что приводит к значительному изменению толщины скин-слоя, а следовательно, и к большим значениям эффекта магнитоимпеданса. Следует отметить, что величина μ_{eff} , а следовательно и Z , сложным образом зависят от поля H . В связи с этим для адекватного объяснения экспериментально полученных зависимостей $Z(H)$ необходимо проведение исследований характера зависимости $\mu_{\text{eff}}(H)$ при различной взаимной ориентации оси ленты, H и пробного высокочастотного магнитного поля h .

Измерение μ_{eff} проводилось по схеме, состоящей из последовательно соединенных высокоомного резистора и измерительной катушки. Исследуемый образец помещался в измерительную катушку, в цепи которой протекал высокочастотный ток, создающий пробное высокочастотное магнитное поле h . Напряжение, снимаемое с измерительной катушки, было пропорционально величине эффективной магнитной проницаемости исследуемого образца. Измерение величины μ_{eff} проводилось в диапазоне частот переменного магнитного поля от 0.1 до 10 МГц в интервале H от 0 до 9600 А/м при различной взаимной ориентации оси ленты, внешнего магнитного поля H и пробного высокочастотного магнитного поля h .

На рис. 2 представлены семейства зависимостей величины эффективной магнитной проницаемости от постоянного намагничивающего поля, полученных при различных частотах пробного высокочастотного магнитного поля. При этом рис. 2, *a* соответствует случаю, когда ось ленты параллельна H и перпендикулярна h ; рис. 2, *b* — случаю, когда ось ленты перпендикулярна H и h ; рис. 2, *c* — случаю, когда ось ленты перпендикулярна H и параллельна h ; рис. 2, *d* — случаю, когда ось ленты параллельна H и h . Как следует из полученных результатов, ход зависимостей $Z(H)$ аналогичен ходу зависимостей $\mu_{\text{eff}}(H)$ при условии, что высокочастотный

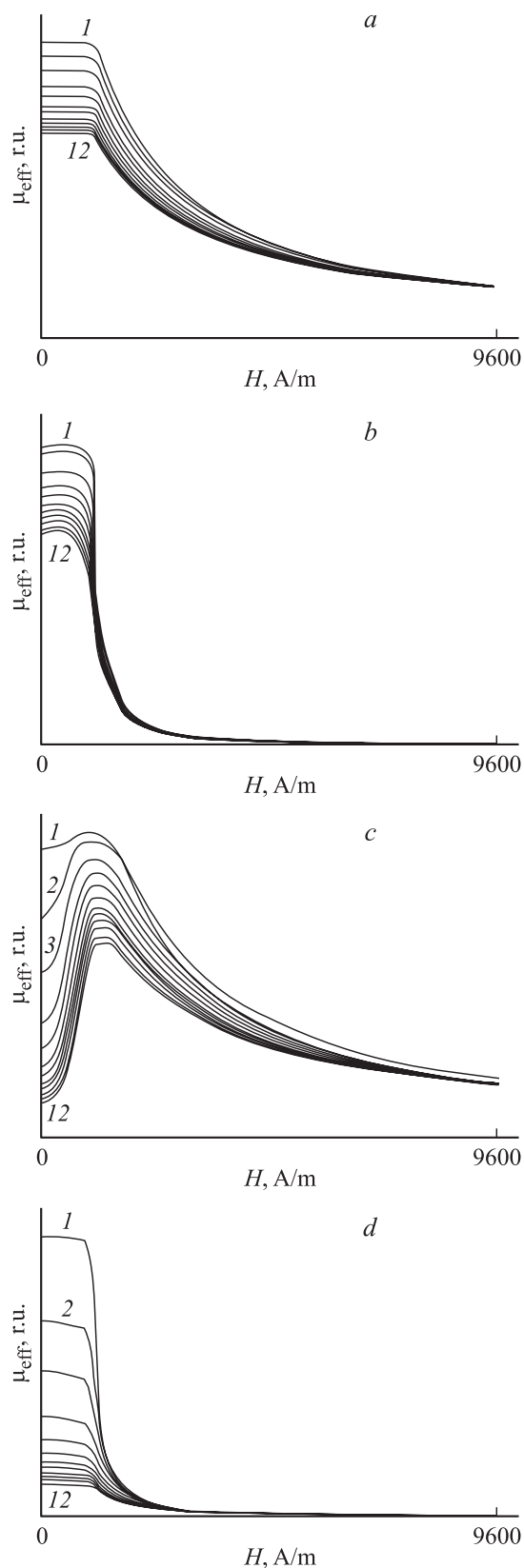


Рис. 2. Семейства зависимостей эффективной магнитной проницаемости от постоянного магнитного поля при различных частотах ν пробного магнитного поля. h , ν , МГц: 1 — 0.1, 2 — 0.5, 3 — 1, 4 — 2, 5 — 3, 6 — 4, 7 — 5, 8 — 6, 9 — 7, 10 — 8, 11 — 9, 12 — 10.

ток, протекающий по образцу в процессе измерения эффекта магнитоимпеданса, перпендикулярен пробному высокочастотному магнитному полю при измерении эффективной магнитной проницаемости. При измерении эффекта магнитоимпеданса с намагниченностью образца взаимодействует высокочастотное магнитное поле, созданное протекающим через образец высокочастотным током и перпендикулярное этому току.

Экспериментально полученные результаты могут быть объяснены на качественном уровне, исходя из следующих представлений. Как показывают результаты ранее проведенных исследований [6], в аморфных металлических сплавах на основе кобальта, полученных методом быстрой закалки, поверхностная ось легкого намагничивания совпадает с осью прокатки ленты. Поэтому можно предположить, что доменная структура на поверхности лент имеет преимущественно полосовой характер.

В работе [7], посвященной экспериментальному исследованию характера зависимости магнитной проницаемости от процессов перемагничивания, показано, что процессы смещения 180° -ных доменных границ не сказываются на ее величине. При перемагничивании путем поворота намагниченности с ростом H величина μ_{eff} сначала возрастает, достигает максимума, а затем монотонно уменьшается и выходит на насыщение в больших полях. Величина μ_{eff} в общем случае может быть представлена в виде суммы двух компонент

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_d + \mu_r,$$

где μ_d — связано с процессами смещения доменных границ, μ_r — с процессами вращения намагниченности в образце.

При этом μ_d и μ_r различным образом зависят от частоты переменного магнитного поля [7]. Компонента магнитной проницаемости, связанная с процессами смещения доменных границ, с ростом частоты высокочастотного магнитного поля уменьшается более резко, чем компонента, связанная с процессами вращения намагниченности.

При ориентации оси ленты перпендикулярно h и параллельно H эффективная проницаемость μ_{eff} определяется компонентой μ_r . Под действием внешнего постоянного магнитного поля H перемагничивание образца происходит за счет смещения доменных границ. При этом на начальном участке зависимости $\mu_{\text{eff}}(H)$ эффективная магнитная проницаемость образца остается практически неизменной. При дальнейшем увеличении H величина μ_{eff} уменьшается и в насыщающем поле стремится к единице (рис. 2, *a*). Тогда максимальный отрицательный эффект магнитоимпеданса достигается в насыщающем магнитном поле и определяется выражением

$$\Delta Z/Z_0 = (\mu_s^{1/2} - \mu_r^{1/2})/\mu_r^{1/2}, \quad (4)$$

где μ_s — эффективная магнитная проницаемость образца в состоянии насыщения.

Когда ось ленты перпендикулярна h и H (рис. 2, *b*), эффективная магнитная проницаемость также определяется компонентой μ_r . С ростом постоянного магнитного поля происходит поворот намагниченности, приводящий к росту компоненты намагниченности вдоль H , следовательно, к уменьшению μ_r и к росту μ_d . Если на некоторой частоте высокочастотного тока выполняется соотношение $\mu_r > \mu_d$, то с ростом H $\mu_{\text{эф}}$ уменьшается более резко, чем в предыдущем случае, и выходит на насыщение в меньших магнитных полях, а начальный участок с неизменным значением $\mu_{\text{эф}}$ отсутствует. Так как в насыщающем магнитном поле $\mu_{\text{эф}}$ стремится к единице, то независимо от направления H максимальный отрицательный эффект определяется из соотношения (4).

При ориентации оси ленты параллельно направлению приложения h и перпендикулярно H величина $\mu_{\text{эф}}$ определяется компонентой μ_d . С ростом H происходит поворот вектора намагниченности образца. При этом вклад компоненты μ_d в $\mu_{\text{эф}}$ уменьшается, а компоненты μ_r — увеличивается. Если на некоторой частоте высокочастотного тока выполняется соотношение $\mu_r > \mu_d$, то с ростом H происходит увеличение $\mu_{\text{эф}}$. Когда величина внешнего магнитного поля становится достаточной для поворота намагниченности вдоль H , т.е. равной полю анизотропии H_k , $\mu_{\text{эф}}$ полностью определяется компонентой μ_r и достигает своего максимального значения (рис. 2, *c*). В таком магнитном поле достигают своих максимальных значений импеданс образца и величина положительного значения эффекта магнитоимпеданса, которая определяется относительным изменением $\mu_{\text{эф}}$ с ростом H из следующего выражения:

$$\Delta Z/Z_0 = (\mu_r^{1/2} - \mu_d^{1/2})/\mu_d^{1/2}. \quad (5)$$

При дальнейшем увеличении H величина $\mu_{\text{эф}}$ уменьшается и в поле насыщения стремится к единице. Максимальный отрицательный эффект магнитоимпеданса при этом наблюдается в поле насыщения и определяется относительным изменением $\mu_{\text{эф}}$ с ростом H от значения μ_d в поле $H \approx 0$ до μ_r в поле $H \approx H_k$

$$\Delta Z/Z_0 = (\mu_s^{1/2} - \mu_d^{1/2})/\mu_d^{1/2}. \quad (6)$$

При ориентации оси ленты параллельно h и H (рис. 2, *d*) эффективная магнитная проницаемость $\mu_{\text{эф}}$ определяется компонентой μ_d . С ростом H протекает процесс смещения 180° -ных доменных границ. При этом на начальном участке зависимости $\mu_{\text{эф}}(H)$ эффективная проницаемость образца остается практически неизменной. Дальнейшее увеличение H приводит к уменьшению $\mu_{\text{эф}}$, которая в насыщающем магнитном поле стремится к единице. В этом случае положительный эффект магнитоимпеданса отсутствует, а максимальный отрицательный эффект определяется изменением $\mu_{\text{эф}}$ от μ_d до $\mu_s = 1$ из соотношения (6).

На основании проведенных исследований могут быть сделаны следующие выводы.

1. Характер зависимости величины эффекта магнитоимпеданса в аморфных металлических лентах на основе кобальта, полученных методом быстрой закалки из расплава, от величины постоянного магнитного поля определяется взаимной ориентацией оси ленты, направлением приложения постоянного магнитного поля и направлением протекания высокочастотного тока.

2. Наблюдается корреляция зависимостей эффекта магнитоимпеданса и эффективной магнитной проницаемости от величины внешнего постоянного магнитного поля при соответствующих ориентациях пробного магнитного поля и направления протекания высокочастотного тока относительно оси ленты.

3. Различия в ходе зависимостей импеданса исследуемых образцов от постоянного магнитного поля при различной взаимной ориентации оси ленты, постоянного магнитного поля и направления протекания высокочастотного тока обусловлены различными механизмами процесса перемагничивания в исследуемых образцах.

Список литературы

- [1] *Panina L.V., Mohri K., Bushida K. et al.* // J. Appl. Phys. 1994. Vol. 76. N 10. P. 6168–6203.
- [2] *Beach R.S., Berkowitz A.R.* // J. Appl. Phys. 1994. Vol. 76. N 10. P. 6209–6213.
- [3] *Panina L., Mohri K.* // JMMM. 1996. Vol. 157/158. P. 137–140.
- [4] *Сокол-Кутыловский О.Л.* // ФММ. 1997. Т. 84. Вып. 3. С. 54–61.
- [5] *Антонов А.С., Гадецкий С.Н., Грановский А.Б. и др.* // ФММ. 1997. Т. 83. Вып. 6. С. 60–71.
- [6] *Судзуки Х., Фудзимори Х., Хасимото К.* // Аморфные металлы. М.: Металлургия, 1987. 328 с.
- [7] *Числяков Н.С., Тушков Б.П.* // Аппаратура и методы исследования тонких магнитных пленок. Красноярск, 1968. С. 291–296.