

05

## **Поверхностная доменная структура и недиагональный магнитоимпеданс аморфных микропроволок в стеклянной оболочке**

© А.С. Антонов, Н.А. Бузников, А.А. Рахманов, В.В. Самсонова

Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, Москва  
Научно-исследовательский институт природных газов и газовых  
технологий — ВНИИГАЗ, Развилка, Московская область  
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
E-mail: asantonov@inbox.ru

*В окончательной редакции 3 июля 2008 г.*

Исследован отклик напряжения в катушке, намотанной на аморфную микропроволоку в стеклянной оболочке, возбуждаемую переменным током. Измерены зависимости амплитуд первой и второй гармоник напряжения от внешнего магнитного поля. Амплитуда первой гармоники, соответствующей линейному недиагональному магнитоимпедансу, была пренебрежимо мала, а вторая гармоника имела высокую чувствительность к магнитному полю. Наблюдавшееся поведение гармоник в частотном спектре напряжения может быть объяснено существованием регулярной доменной структуры в поверхностном слое микропроволоки в области малых внешних полей.

PACS: 75.50.Kj, 75.60.Ch

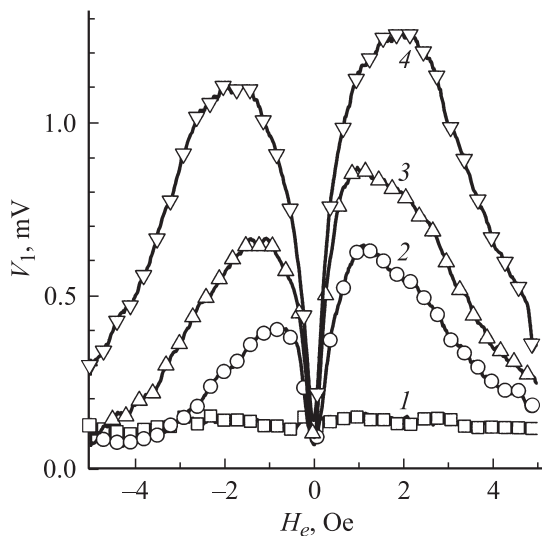
Аморфные микропроволоки в стеклянной оболочке имеют необычные магнитные свойства и представляют интерес как перспективные материалы для создания датчиков слабого магнитного поля [1,2]. Одним из явлений, наблюдающихся в таких микропроводах, является гигантский магнитоимпеданс, который заключается в сильном изменении импеданса проводника во внешнем магнитном поле [3,4]. Другой метод измерения сигнала, зависящего от внешнего магнитного поля, состоит в использовании катушки, намотанной на магнитомягкий проводник. Возникновение напряжения в катушке связано с тем, что переменный ток индуцирует в проволоке изменение магнитной индукции как в поперечном, так и в продольном направлении. Этот эффект получил

название недиагонального магнитоимпеданса и был детально исследован в аморфных проволоках на основе кобальта, полученных методом быстрого закаливания [5,6]. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования недиагонального магнитоимпеданса для аморфных микропроволок в стеклянной оболочке. Анализ экспериментальных результатов позволяет сделать заключение о существовании доменной структуры в поверхностном слое микропроволоки вблизи нулевого значения внешнего магнитного поля.

Измерения проводились на аморфных микропроволоках состава  $\text{Co}_{67.05}\text{Fe}_{3.85}\text{Ni}_{1.44}\text{B}_{11.53}\text{Si}_{14.47}\text{Mo}_{1.66}$ . Микропроволоки имели диаметр аморфной части  $24\ \mu\text{m}$ , а толщина стеклянной оболочки составляла  $3.1\ \mu\text{m}$ . В экспериментах использовались образцы длиной  $3.8\ \text{mm}$ . Для исследования недиагонального магнитоимпеданса на микропроволоку наматывалась катушка диаметром  $2\ \text{mm}$ , имевшая  $100$  витков. Амплитуда переменного тока  $I_0$ , пропускаемого через образец, варьировалась от  $0.1$  до  $20\ \text{mA}$ , а его частота изменялась от  $500\ \text{kHz}$  до  $5\ \text{MHz}$ . Кроме того, через микропроволоку мог также пропускаться постоянный ток  $I_b$  величиной до  $3\ \text{mA}$ . Микропроволока помещалась в продольное магнитное поле  $H_e$ , которое изменялось в диапазоне  $\pm 36\ \text{Oe}$ . Зависимости амплитуд первой и второй гармоник в частотном спектре напряжения в катушке от внешнего магнитного поля измерялись при помощи анализатора спектра HP4395A.

Измеренная зависимость амплитуды первой гармоники напряжения  $V_1$  от внешнего магнитного поля показана на рис. 1. Сигнал первой гармоники был пренебрежимо мал, и для его увеличения необходимо было пропускать через проволоку постоянный ток. Из рис. 1 видно, что амплитуда первой гармоники монотонно возрастала с увеличением постоянного тока. При этом зависимость амплитуды первой гармоники от внешнего магнитного поля имела асимметричный характер, и максимум сигнала при положительных значениях поля был больше, чем при отрицательных полях.

Обсудим связь между амплитудой первой гармоники, соответствующей линейному недиагональному магнитоимпедансу, и поверхностной доменной структурой микропроволоки. Магнитные свойства аморфных проводников определяются в основном магнитоупругими взаимодействиями. Вследствие влияния внутренних напряжений поверхностный слой аморфных проволок и микропроволок в стеклянной оболочке с отрицательной магнитострикцией имеет в общем случае геликоидальную



**Рис. 1.** Зависимости амплитуды первой гармоники  $V_1$  от внешнего магнитного поля  $H_e$  при амплитуде переменного тока 1 мА, частоте 1 МГц и различных значениях постоянного тока  $I_b$ ,  $\mu\text{A}$ : 1 — 0; 2 — 430; 3 — 860; 4 — 2560.

анизотропию [1]. Обычно предполагается, что при малых внешних полях этот слой разбивается на домены с противоположным направлением азимутальной компоненты намагниченности (так называемая бамбуковая доменная структура) [7]. Однако расчеты показали, что такая доменная структура является энергетически невыгодной для аморфных проволок с малой отрицательной магнитострикцией, и в поверхностном слое проволок может существовать однодоменное состояние с однородным по длине образца распределением намагниченности [8].

Эффект недиагонального магнитоимпеданса является чувствительным к поверхностной доменной структуре, и сигнал в измерительной катушке должен быть максимальным в однодоменных проволоках [5,6]. В образцах с бамбуковой доменной структурой вклады соседних доменов в недиагональный магнитоимпеданс имеют противоположные знаки. В результате сигнал первой гармоники, усредненный по доменной структуре, должен быть мал [6]. Эффект недиагонального магнитоимпеданса был использован для исследования поверхностной доменной

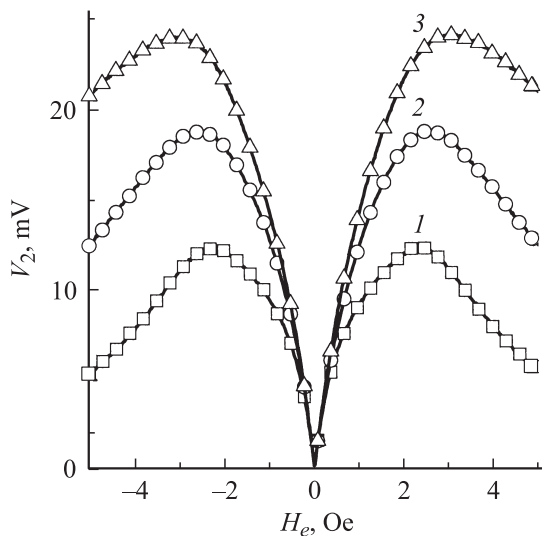
структуры в аморфных проволоках на основе кобальта, полученных методом быстрого закалывания [9,10]. Анализ экспериментальных данных показал, что в этих проволоках устойчивая регулярная бамбуковая доменная структура не возникает [6,9,10].

В отличие от аморфных проволок поверхностная магнитная структура микропроволок в стеклянной оболочке определяется, главным образом, напряжениями, возникающими на границе аморфной части и стеклянной оболочки вследствие различия в коэффициента теплового расширения аморфной фазы и стекла. Эти напряжения могут приводить к возникновению бамбуковой доменной структуры в микропроволоках в стеклянной оболочке. В частности, такая доменная структура наблюдалась ранее магнитооптическими методами [11].

Малая величина амплитуды первой гармоники напряжения в измерительной катушке указывает на существование бамбуковой доменной структуры в исследованных образцах. Вследствие малой коэрцитивной силы микропроволоки пропускание через образец постоянного тока приводит к изменению относительного объема доменов и даже к исчезновению бамбуковой доменной структуры. В результате вклады доменов с противоположным направлением азимутальной компоненты намагниченности в сигнал в катушке становятся различными, и линейный недиагональный магнитоимпеданс возрастает с увеличением величины постоянного тока. Асимметрия зависимости амплитуды первой гармоники от магнитного поля связана с тем, что циркулярное поле постоянного тока изменяет равновесный угол намагниченности, что приводит к зависимости распределения намагниченности от знака внешнего поля [12].

Следует отметить, что отклик напряжения в измерительной катушке является линейным только при относительно малых амплитудах возбуждающего переменного тока. При более высоких амплитудах тока измеряемый сигнал включает в себя множество гармоник с частотами, кратными частоте переменного тока [13].

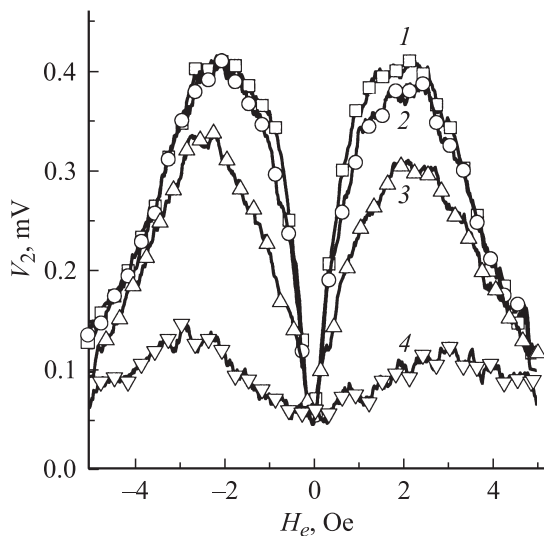
Измеренная зависимость амплитуды второй гармоники напряжения  $V_2$  в катушке от внешнего магнитного поля показана на рис. 2 для различных значений амплитуды переменного тока. Из рис. 2 видно, что величина  $V_2$  отлична от нуля даже в отсутствие постоянного тока и амплитуда второй гармоники и ее чувствительность к внешнему полю возрастают с увеличением  $I_0$ . Влияние постоянного тока на амплитуду второй гармоники проиллюстрировано на рис. 3. В отличие от первой



**Рис. 2.** Зависимости амплитуды второй гармоники  $V_2$  от внешнего магнитного поля  $H_e$  при частоте 1.5 МГц, нулевом постоянном токе и различных значениях амплитуды переменного тока  $I_0$ , мА: 1 — 4.6; 2 — 9.2; 3 — 18.4.

гармоники, с увеличением  $I_b$  амплитуда второй гармоники падала. Возникновение второй гармоники в напряжении в катушке при малых значениях внешнего поля может быть объяснено влиянием движения доменных границ [14,15]. Колебания доменных границ под действием поля переменного тока приводят к изменению относительного объема доменов. Так как направление движения доменных границ меняется дважды за цикл изменения тока, вторая гармоника становится основной в частотном спектре напряжения [15].

Таким образом, анализ зависимостей амплитуд первой и второй гармоник напряжения в катушке от внешнего магнитного поля позволяет сделать заключение о том, что в поверхностном слое исследованных образцов существует бамбуковая доменная структура. Следует отметить, что этот вывод расходится с результатами, полученными ранее в работе [9]. Исследования доменной структуры микропроволок CoFeSiB в стеклянной оболочке методом недиагонального магнитоимпеданса показали, что первая гармоника напряжения в катушке



**Рис. 3.** Зависимости амплитуды второй гармоники  $V_2$  от внешнего магнитного поля  $H_e$  при амплитуде переменного тока 1 мА, частоте 1 МГц и различных значениях постоянного тока  $I_b$ ,  $\mu\text{A}$ : 1 — 0; 2 — 430; 3 — 860; 4 — 2560.

была отлична от нуля и при этом фаза сигнала не изменялась при движении катушки вдоль образца. Это обстоятельство указывает на существование в поверхностном слое микропроволоки однодоменного состояния. По-видимому, поверхностная доменная структура аморфных микроволокон зависит от толщины стеклянной оболочки, состава и магнитных свойств образца, и необходимы дальнейшие детальные исследования влияния этих параметров на условия возникновения бамбуковой доменной структуры.

## Список литературы

- [1] *Vázquez M., Hernando A.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1996. V. 29. N 4. P. 939–949.
- [2] *Zhukov A., González J., Vázquez M., Larin V., Torcunov A.* // Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology / Ed. H.S. Nalwa. American Scientific Publishers: Stevenson Ranch, CA. 2004. V. 6. P. 365.

- [3] *Vázquez M.* // J. Magn. Magn. Mater. 2001. V. 226–230. Part 1. P. 693–699.
- [4] *Knobel M., Pirota K.R.* // J. Magn. Magn. Mater. 2002. V. 242–245. Part 1. P. 33–40.
- [5] *Antonov A., Iakubov I., Lagarkov A.* // IEEE Trans. Magn. 1997. V. 33. N 5. P. 3367–3369.
- [6] *Antonov A.S., Iakubov I.T., Lagarkov A.N.* // J. Magn. Magn. Mater. 1998. V. 187. N 2. P. 252–260.
- [7] *Mohri K., Humphrey F.B., Kawashima K., Kimura K., Mizutani M.* // IEEE Trans. Magn. 1990. V. 26. N 5. P. 1789–1791.
- [8] *Usov N., Antonov A., Dykhne A., Lagarkov A.* // J. Magn. Magn. Mater. 1997. V. 174. N 1–2. P. 127–132.
- [9] *Rakhmanov A.A., Antonov A.S., Buznikov N.A., Prokoshin A.F.* // J. Magn. Magn. Mater. 2006. V. 300. N 1. P. e37-e40.
- [10] *Samsonova V., Antonov A., Iakubov I., Nastasjuk A., Perov N., Rakhmanov A.* // J. Non-Cryst. Sol. 2007. V. 353. N 8–10. P. 938–940.
- [11] *Шалыгина Е.Е., Молоканов В.В., Комарова М.А.* // ЖЭТФ. 2002. Т. 122. С. 593–599.
- [12] *Panina L.V., Mohri K., Makhnovskiy D.P.* // J. Appl. Phys. 1999. V. 85. N 8. P. 5444–5446.
- [13] *Antonov A.S., Buznikov N.A., Iakubov I.T., Lagarkov A.N., Rakhmanov A.L.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34. N 5. P. 752–757.
- [14] *Бузников Н.А., Антонов А.С., Рахманов А.Л.* // ЖТФ. 2000. Т. 70. В. 2. С. 43–47.
- [15] *Buznikov N.A., Antonov A.S., Kim C.G., Kim C.O., Rakhmanov A.A., Yoon S.S.* // J. Magn. Magn. Mater. 2005. V. 285. N 1–2. P. 101–111.