

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 537.624

### ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ, НАВЕДЕННОЙ НАПРЯЖЕНИЯМИ, НА ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТОМЯГКИХ СВОЙСТВ, ЭФФЕКТ ГМИ И ДИНАМИКУ ДОМЕННЫХ СТЕНОК

© 2020 г. В. Жукова<sup>a, b</sup>, П. Корте-Леон<sup>b</sup>, Л. Гонсалес-Легаретта<sup>a, c</sup>, М. Ипатов<sup>a, b</sup>, А. Талаат<sup>a, b</sup>,  
Х. М. Бланко<sup>b</sup>, Х. Гонсалес<sup>a</sup>, Х. Оливера<sup>d, e</sup>, А. Жуков<sup>a, b, f, \*</sup>

<sup>a</sup>Отделение материаловедения, Химический факультет, Университет Страны Басков,  
Сан-Себастьян, 20018 Испания

<sup>b</sup>Отделение прикладной физики, Инженерная школа Гепускоа, Университет Страны Басков,  
Сан-Себастьян, 20018 Испания

<sup>c</sup>Отделение ресурсосберегающих процессов в химической технологии, Факультет неорганической химии —  
Университет Кантабрии, Группа наномедицинских исследований,  
просп. де Лос Кастрос 46, Сантандер, 39005 Испания

<sup>d</sup>Понтификальный католический университет “Мать и Наставница”,  
Почтовый ящик 2748, Санто Доминго, Доминиканская республика

<sup>e</sup>Общая таможенная лаборатория, Доминиканская республика

<sup>f</sup>IKERBASQUE, Баскский научный фонд, Бильбао, 48011 Испания

\*e-mail: arkadi.joukov@ehu.es

Поступила в редакцию 16.09.2019 г.

После доработки 01.10.2019 г.

Принята к публикации 23.10.2019 г.

Показано, что отжиг в присутствии напряжений, выполняемый при соответствующих условиях, может привести к улучшению магнитомягких свойств и увеличению скорости доменной стенки (ДС) и эффекта гигантского магнитного импеданса (ГМИ) в микропроводах на основе Fe. При отжиге в присутствии напряжений было достигнуто увеличение отношения ГМИ почти на порядок и скорости ДС более чем на 100%. Наблюдаемые зависимости были вызваны трансформацией доменной структуры, что подтверждается изменением петель гистерезиса при отжиге в присутствии напряжений. Наблюдаемые результаты обсуждаются с учетом того, что внешняя доменная оболочка с поперечной магнитной анизотропией влияет на перемещение доменной ДС так же, как при приложении поперечного магнитного поля смещения. Повышение отношения ГМИ обусловлено распределением магнитной анизотропии, реализуемом при отжиге в присутствии напряжений.

**Ключевые слова:** аморфные микропровода, магнитоупругая анизотропия, эффект гигантского магнитного импеданса, динамика доменных стенок, отжиг

DOI: 10.31857/S001532302004018X

#### ВВЕДЕНИЕ

Магнитомягкие провода могут иметь магнитные свойства, представляющие интерес для промышленных применений, такие как эффект гигантского магнитного импеданса (ГМИ) или магнитная бистабильность, связанная с большим единичным скачком Баркгаузена [1–9]. Эти свойства могут наблюдаться в магнитных проводах как с кристаллической, так и с аморфной структурой, однако важными преимуществами обладают аморфные магнитные провода, а именно: высокие механические и магнитомягкие свойства, обусловленные отсутствием механических дефектов (границы

зерен, кристаллическая текстура, дислокации, точечные дефекты, и др.) [7, 10]. Поэтому они не требуют длительной и прецизионной последующей обработки. Таким образом, начиная с 70-х гг., аморфные провода привлекают большое внимание [1, 5–13].

Уменьшение диаметра провода предоставляет новые функциональные возможности и позволяет реализовать ряд новых приложений [14–17]. Поэтому магнитные микропровода в стеклянной оболочке, изготовленные способом Тейлора–Улитовского, представляющие собой металлическую жилу (обычно диаметром от 0.5 до 50 мкм), покрытую гибким, непроводящим и биосовме-



стимым стеклом, оказываются востребованными для самых различных приложений [5, 15, 17]. Способ изготовления микропроводов в стеклянной оболочке Тейлора–Улитовского, известный с 60-х гг. [18, 19], позволяет получить очень тонкие быстро закаленные магнитные провода.

В аморфных материалах магнитокристаллическая анизотропия отсутствует. Поэтому одним из наиболее важных параметров становится магнитоупругая анизотропия, определяющая магнитные свойства аморфных магнитных материалов [5, 6].

Магнитоупругая анизотропия  $K_{me}$  определяется как

$$K_{me} = 3/2\lambda_s\sigma_i, \quad (1)$$

где  $\lambda_s$  — коэффициент магнитострикции,  $\sigma_i$  — величина внутренних напряжений [5, 6].

В случае микропроводов в стеклянной оболочке вклад магнитоупругой анизотропии оказывается еще более значительным, так как процесс изготовления включает не только саму по себе быструю закалку, но также и одновременное затвердевание металлической жилы, покрытой стеклом с довольно разными коэффициентами теплового расширения [5, 20–22]. На величину внутренних напряжений  $\sigma_i$  в основном влияют три основных фактора: (i) закалочные напряжения, возникающие при закалке расплава металлического сплава; (ii) напряжения, обусловленные различными коэффициентами теплового расширения металлического слитка и одновременно затвердевающего стекла и (iii) напряжения, возникающие при вытягивании затвердевающего провода [20–22].

Таким образом, микропровода в исходном состоянии, по своим магнитным свойствам могут быть разбиты на три основные группы:

1. Микропровода на основе Fe, с положительными значениями  $\lambda_s$  ( $\lambda_s \approx 10^{-5}$ ), обладающие спонтанной магнитной бистабильностью (прямоугольная петля гистерезиса);

2. Микропровода на основе Co с отрицательными значениями  $\lambda_s$  ( $\lambda_s \approx -10^{-6}$ ), имеющие безгистерезисные линейные кривые намагничивания с довольно высоким полем магнитной анизотропии;

3. Микропровода на основе Co с малым значением  $\lambda_s$  ( $\lambda_s \approx -10^{-7}$ ), имеющие наилучшие магнитомягкие свойства [5].

Микропровода в стеклянной оболочке на основе Fe, как правило, обладают эффектом магнитной бистабильности и, следовательно, быстрым переключением намагниченности за счет быстрого распространения доменной стенки (ДС) [23]. В то же время наибольший эффект ГМИ обнаружен для микропроводов на основе Co с почти нулевым коэффициентом магнитострикции [24–26].

Для большинства промышленных применений магнитные микропровода могут потребоваться в массовом количестве. Наиболее подходящими являются аморфные микропровода в стеклянной оболочке на основе Fe, однако в исходном состоянии такие провода с высокой магнитострикцией обладают незначительным эффектом ГМИ [5].

Имеются сообщения о нескольких удачных попытках улучшения магнитомягких свойств и повышения эффекта ГМИ с помощью нанокристаллизации микропроводов на основе Fe, типа фанмета [27–29]. Однако нанокристаллические материалы типа фанмета довольно хрупкие.

Недавно появилось несколько сообщений об удачных попытках улучшения магнитомягких свойств микропроводов в стеклянной оболочке путем наведения магнитной анизотропии [30–32]. Одним из преимуществ такой последующей обработки является сохранение высоких механических свойств, типичных для аморфных материалов.

В настоящей статье представлены результаты по исследованию влияния отжига в присутствии напряжений на магнитные свойства и эффект ГМИ при высоких частотах для микропроводов в стеклянной оболочке на основе Fe.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследований был выбран наиболее распространенный состав на основе Fe и изготовлены микропровода из сплава  $Fe_{75}B_9Si_{12}C_4$  (диаметр металлической жилы  $d = 15.2$  мкм, общий диаметр  $D = 17.2$  мкм) [5].

Образцы отжигали в обычной печи при температуре  $T_{ann} 300^\circ\text{C}$  в течение  $t_{ann}$  до 60 мин. При отжиге, а также при охлаждении в печи к образцу прикладывали растягивающие напряжения. При отжиге и при медленном охлаждении в печи к микропроводу прикладывали механическую нагрузку.

Величину напряжений при отжиге для металлической жилы и стеклянного покрытия оценивали так, как было описано в работах [30–32]:

$$\sigma_m = \frac{KP}{KS_m + S_{gl}}, \quad \sigma_{gl} = \frac{P}{KS_m + S_{gl}}. \quad (2)$$

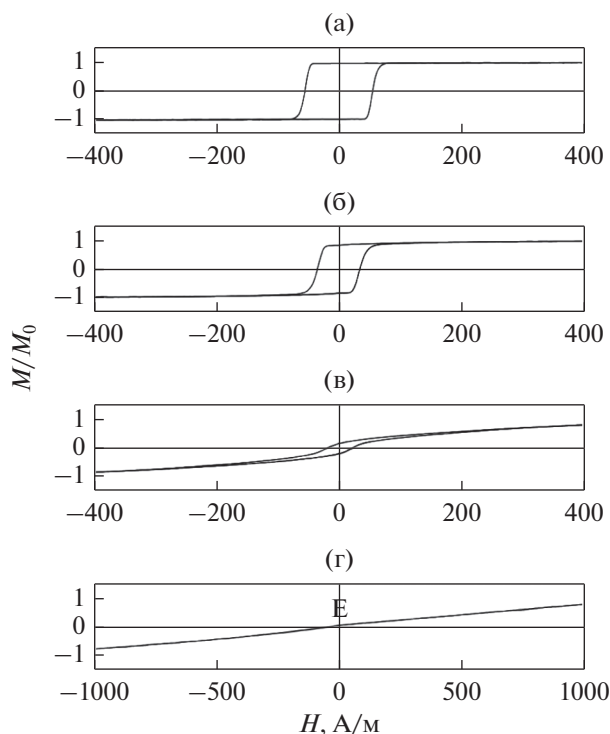
Здесь  $K = E_2/E_1$ ,  $E_i$  модули Юнга для металла ( $E_2$ ) и для стекла ( $E_1$ ) при комнатной температуре,  $P$  — приложенная механическая нагрузка,  $S_m$  и  $S_{gl}$  — поперечное сечение металлической жилы и стеклянного покрытия соответственно.

Для получения петель гистерезиса исследуемых микропроводов использовали флюксметрический метод, описанный в работе [5].

Для оценки ГМИ использовали отношение:

$$\Delta Z/Z = [Z(H) - Z(H_{max})]/Z(H_{max}), \quad (3)$$





**Рис. 1.** Петли гистерезиса микропроводов из сплава  $\text{Fe}_{75}\text{B}_9\text{Si}_{12}\text{C}_4$  в исходном состоянии (а) и после отжига в присутствии напряжений при  $T_{\text{ann}} = 300^\circ\text{C}$  при напряжении 190 (б), 389 (в) и 900 МПа (г).

где  $H_{\text{max}}$  — максимальное прилагаемое постоянное магнитное поле.

Для оценки скорости доменной стенки  $v$  применяли модифицированный метод Сикстуса-Тонкса, описанный в работе [23]. Распространение доменной стенки (ДС) приводит к возникновению электродвижущей силы (эдс) в 3 измерительных катушках, установленных вдоль микропровода, помещенного внутри длинного соленоида. Таким образом, скорость ДС определяется как

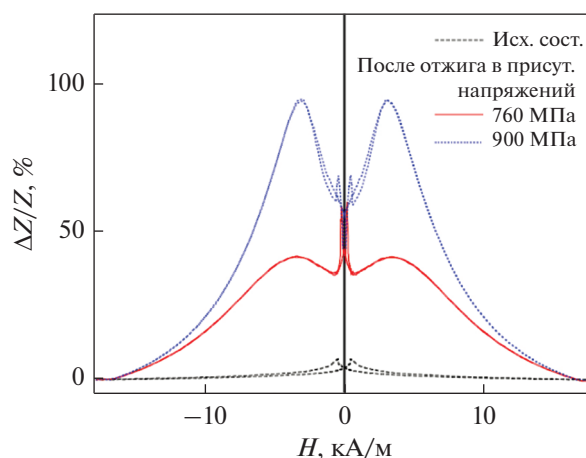
$$v = \frac{l}{\Delta t}, \quad (4)$$

где  $l$  — расстояние между парой измерительных катушек,  $\Delta t$  — интервал времени между максимумами наведенной эдс.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследуемые микропровода  $\text{Fe}_{75}\text{B}_9\text{Si}_{12}\text{C}_4$  имеют идеальные прямоугольные петли гистерезиса, характерные для микропроводов на основе Fe с большим и положительным коэффициентом магнитострикции  $\lambda_s$  ( $\lambda_s \approx 35 \times 10^{-6}$ ) (рис. 1а).

Как можно видеть из рис. 1 (1б–1г), отжиг в присутствии напряжений приводит к поперечной магнитной анизотропии и значительному улуч-



**Рис. 2.** Зависимость  $\Delta Z/Z(H)$  микропроводов из сплава  $\text{Fe}_{75}\text{B}_9\text{Si}_{12}\text{C}_4$  в исходном состоянии и после отжига в присутствии напряжений при  $T_{\text{ann}} = 300^\circ\text{C}$  (760 и 900 МПа), измеренная при частоте 200 МГц.

шению магнитомягких свойств: коэрцитивная сила  $H_c$ , уменьшается от 55 до 2 А/м. Магнитные свойства сильно зависят от величины напряжения  $\sigma_m$ , прикладываемого во время отжига: наведенная поперечная магнитная анизотропия становится более значительной при повышении значений  $\sigma_m$ .

Соответственно, для микропроводов сплава  $\text{Fe}_{75}\text{B}_9\text{Si}_{12}\text{C}_4$  после отжига в присутствии напряжений наблюдается значительное, на порядок величины, улучшение отношения ГМИ  $\Delta Z/Z$  (рис. 2).

Зависимость  $\Delta Z/Z(H)$ , наблюдаемая в образцах после отжига в присутствии напряжений, имеет нерегулярную форму, что может быть объяснено суперпозицией зависимости  $\Delta Z/Z(H)$  с двойным пиком (более заметным для образца, отожженного при напряжении  $\sigma_m = 900$  МПа) и ослаблением  $\Delta Z/Z$  при увеличении магнитного поля  $H$ .

Стоит отметить, что нерегулярная форма зависимости  $\Delta Z/Z(H)$  исчезает при увеличении частоты (рис. 3). При более высоких частотах ( $f = 500$  МГц) наблюдается зависимость  $\Delta Z/Z(H)$  с двойным пиком (рис. 3).

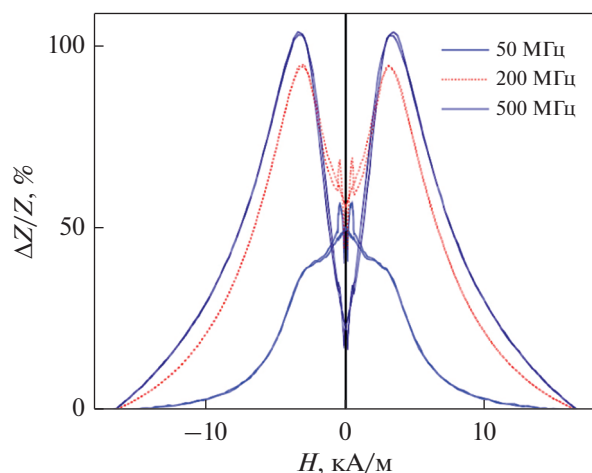
Наблюдаемое влияние частоты на зависимость  $\Delta Z/Z(H)$  может быть объяснено зависимостью толщины скин-слоя  $\delta$  от частоты, а также распределением магнитной анизотропии внутри металлической жилы.

Точно установлено [2–6], что толщина скин-слоя  $\delta$ , уменьшается при увеличении частоты как:

$$\delta = (\pi \sigma \mu_\phi f)^{-\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

где  $\sigma$  — электропроводность,  $\mu_\phi$  — периферическая (поверхностная) магнитная проницаемость.





**Рис. 3.** Зависимость  $\Delta Z/Z(H)$  микропроводов из сплава  $\text{Fe}_{75}\text{B}_9\text{Si}_{12}\text{C}_4$  после отжига в присутствии напряжений при  $T_{\text{ann}} = 300^\circ\text{C}$  (900 МПа) при различных частотах.

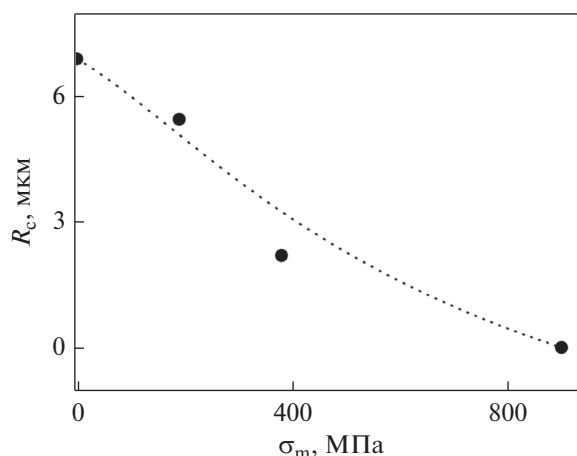
При относительно низкой частоте (50 МГц) толщина скин-слоя сравнима и даже превышает радиус микропровода и ток протекает через всю ферромагнитную жилу.

С другой стороны, экспериментально подтверждено, что доменная структура магнитных проводов состоит из внешней доменной оболочки с радиальным или циркулярным направлением намагничивания и внутреннего аксиально намагниченного ядра [33, 34]. Поэтому при увеличении частоты следует ожидать увеличение вклада внешней доменной оболочки. Для аксиальной магнитной анизотропии прогнозируется уменьшение импеданса при увеличении магнитного поля [35]. В то же время для поперечной магнитной анизотропии предполагается наличие зависимости  $\Delta Z/Z(H)$  с двойным пиком [2–6, 35]. Следовательно, нерегулярная форма зависимости  $\Delta Z/Z(H)$  должна быть связана с радиальной магнитной анизотропией.

Наблюдаемое влияние отжига в присутствии напряжений на петли гистерезиса микропроводов из сплава  $\text{Fe}_{75}\text{B}_9\text{Si}_{12}\text{C}_4$  (рис. 1) может быть связано с изменением доменной структуры после отжига в присутствии напряжений. Фактически изменение петель гистерезиса в зависимости от напряжений, прикладываемых при отжиге  $\sigma_m$ , можно использовать для оценки происходящего при этом изменения доменной структуры. Так, радиус аксиально намагниченного ядра  $R_c$  может быть оценен как квадратный корень из отношения  $M_r/M_s$  [5, 6, 33, 34]:

$$R_c = R(M_r/M_s)^{1/2}, \quad (6)$$

где  $R$  – радиус микропровода.



**Рис. 4.** Зависимость радиуса внутреннего аксиально намагниченного ядра  $R_c$  от напряжения, прикладываемого при отжиге при  $T_{\text{ann}} = 300^\circ\text{C}$  микропровода из сплава  $\text{Fe}_{75}\text{B}_9\text{Si}_{12}\text{C}_4$ .

Исходя из значений  $M_r/M_s$ , нами была выполнена оценка зависимости радиуса аксиально намагниченного ядра  $R_c$  от  $\sigma_m$ . Как можно видеть из рис. 4, значения  $R_c$  последовательно уменьшаются по мере возрастания значений  $\sigma_m$ .

Исходя из результатов, представленных на рис. 4, можно предположить, что при отжиге в присутствии напряжений происходит рост внешней доменной оболочки за счет уменьшения внутреннего аксиально намагниченного ядра.

Как было указано выше, одним из представляющих интерес свойств микропроводов на основе Fe является магнитная бистабильность и связанное с этим быстрое распространение отдельной доменной стенки (ДС) вдоль микропровода. Микропровод в исходном состоянии имеет идеальные прямоугольные петли гистерезиса (рис. 1а). Такая форма петли гистерезиса окончательно теряется после длительного отжига или в присутствии достаточно больших напряжений (рис. 1в, 1г). Однако при сравнительно коротком времени отжига или довольно малых напряжениях, прикладываемых при отжиге, петли гистерезиса сохраняют свою прямоугольность (рис. 1б).

Зависимость скорости доменной стенки  $v(H)$  для микропровода в исходном состоянии и подвергнутого отжигу в присутствии напряжений ( $T_{\text{ann}} = 300^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{ann}} = 60$  мин и  $\sigma_m = 190$  МПа) приведена на рис. 5. По сравнению с образцами в исходном состоянии для образцов, подвергнутых отжигу в присутствии напряжений, наблюдается существенное повышение скорости ДС: при  $H = 65$  А/м для образца в исходном состоянии  $v \approx 650$  м/с, тогда как образец, отожженный в присутствии напряжений, имеет  $v \approx 1475$  м/с.



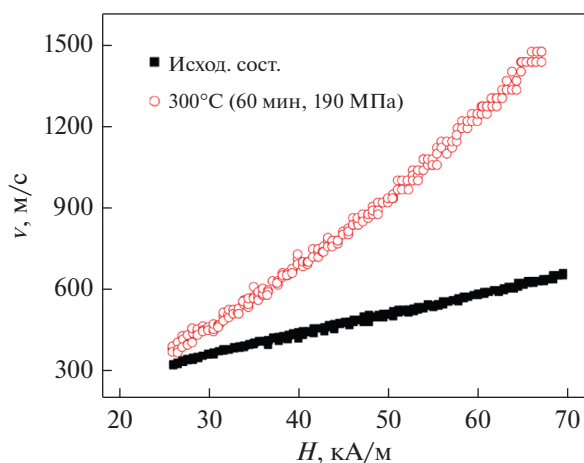


Рис. 5. Зависимость скорости доменной стенки  $v(H)$  в микропроводе из сплава  $\text{Fe}_{75}\text{B}_9\text{Si}_{12}\text{C}_4$  в исходном состоянии и после отжига в присутствии напряжений при  $T_{\text{анн}} = 300^\circ\text{C}$  и  $\sigma_m = 190$  МПа.

Такое положительное воздействие на скорость ДС может быть обусловлено различными явлениями: остаточными напряжениями, связанными с магнитной анизотропией, наведенной при отжиге в присутствии напряжений [36], и поперечной магнитной анизотропией. Об этом свидетельствует уменьшение радиуса внутреннего аксиально намагниченного ядра (рис. 4).

Таким образом, положительное влияние поперечной магнитной анизотропии на скорость ДС (рис. 1–4) следует связать с увеличением объема внешней доменной оболочки при возникновении поперечной магнитной анизотропии в результате отжига в присутствии напряжений. Действительно, в предыдущих работах уже сообщали об увеличении скорости ДС при приложении поперечного магнитного поля смещения [34, 37, 38].

Таким образом, отжиг в присутствии напряжений ферромагнитных микропроводов на основе Fe, позволяет получить необычную комбинацию магнитных свойств. А именно, для микропроводов на основе Fe отжиг в присутствии напряжений позволяет значительно улучшить магнитомягкие свойства, повысить скорость ДС и эффект ГМИ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы сообщают о положительном влиянии отжига в присутствии напряжений на магнитные свойства, распространение доменной стенки (ДС) и эффект гигантского магнитного импеданса (ГМИ) в микропроводах из сплава  $\text{Fe}_{75}\text{B}_9\text{Si}_{12}\text{C}_4$ . На наблюдаемую анизотропию, наведенную напряжениями, значительно влияют условия отжига (время отжига, температура или напряжения, прилагаемые при отжиге).

При отжиге в присутствии напряжений достигается значительное увеличение отношения ГМИ

(приблизительно от 7 до 90% при 200 МГц). Кроме того, отжиг в присутствии напряжений влияет на форму зависимости  $\Delta Z/Z(H)$ . Наблюдаемые изменения обусловлены трансформацией доменной структуры, о чем свидетельствует зависимость радиуса внутреннего аксиально намагниченного ядра от условий отжига.

Положительное влияние отжига в присутствии напряжений на эффект ГМИ и динамику ДС обусловлено наведенной поперечной магнитной анизотропией. Авторы предполагают, что внешняя доменная оболочка с поперечной магнитной анизотропией влияет на перемещение ДС так же, как при приложении поперечного магнитного поля смещения, что приводит к увеличению скорости ДС. Таким образом, отжиг в присутствии напряжений позволяет получить распределение магнитной анизотропии, позволяющее оптимизировать как эффект ГМИ, так и динамику ДС.

Следовательно, отжиг в присутствии напряжений представляет эффективный способ формирования магнитомягких свойства и воздействия на динамику ДС и эффект ГМИ в микропроводах в стеклянной оболочке на основе Fe.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Данная работа была выполнена при поддержке Министерства науки, инноваций и университетов, грант PGC2018-099530-B-C31 (MCIU/AEI/FEDER, UE), Правительства Страны Басков, грант PIBA 2018-44 и Университета страны Басков в рамках проекта “Помощь консолидированным группам” (номер: GIU-18/192). Авторы благодарят Центр коллективного пользования Гепускоа (магнитные измерения) Университета Страны Басков и Европейские фонды (ERDF и ESF) за техническую и кадровую поддержку.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Harrison E.P., Turney G.L., Rowe H. Electrical Properties of Wires of High Permeability // *Nature*. 1935. V. 135. P. 961.
2. Panina L.V., Mohri K. Magneto-impedance effect in amorphous wires // *Appl. Phys. Lett.* 1994. V. 65. P. 1189.
3. Beach R., Berkowitz A. Giant magnetic field dependent impedance of amorphous FeCoSiB wire // *Appl. Phys. Lett.* 1994. V. 64. P. 3652–3654.
4. Phan M.H., Peng H.X. Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications // *Prog. Mater. Sci.* 2008. V. 53. P. 323–420.
5. Zhukov A., Ipatov M., Zhukova V. Advances in Giant Magnetoimpedance of Materials / *Handbook of Magnetic Materials*, ed. Buschow K.H.J. 2015. V. 24. P. 139–236 (chapter 2).
6. Knobel M., Vazquez M., Kraus L. Giant magnetoimpedance / *Handbook of magnetic materials* ed. Bruck E. 2003. V. 15. P. 497–563.
7. Hauser M., Kraus L., Ripka P. Giant magnetoimpedance sensors // *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. 2001. V. 4(2). P. 28–32.



8. *Han Zhou, Zhongming Pan and Dasha Zhang.* Operating Point Self-Regulator for Giant Magneto-Impedance Magnetic Sensor // *Sensors*. 2017. V. 17. P. 1103.
9. *Mohri K., Uchiyama T., Shen L.P., Cai C.M., Panina L.V.* Amorphous wire and CMOS IC-based sensitive micro-magnetic sensors (MI sensor and SI sensor) for intelligent measurements and controls // *J. Magn. Magn. Mater.* 2001. V. 249. P. 351–356.
10. *Uchiyama T., Mohri K., and Nakayama Sh.* Measurement of Spontaneous Oscillatory Magnetic Field of Guinea-Pig Smooth Muscle Preparation Using Pico-Tesla Resolution Amorphous Wire Magneto-Impedance Sensor // *IEEE Trans. Magn.* 2011. V. 47. P. 3070–3073.
11. *Honkura Y.* Development of amorphous wire type MI sensors for automobile use // *J. Magn. Magn. Mater.* 2002. V. 249. P. 375–381.
12. *Cobeño A.F., Zhukov A., Blanco J.M., Larin V., Gonzalez J.* Magnetoelastic sensor based on GMI of amorphous microwire // *Sensors and Actuators (A)*. 2001. V. 91. P. 95–98.
13. *Gudoshnikov S., Usov N., Nozdrin A., Ipatov M., Zhukov A., Zhukova V.* Highly sensitive magnetometer based on the off-diagonal GMI effect in Co-rich glass-coated microwire // *Phys. Stat. Sol. (a)*. 2014. V. 211(5). P. 980–985.
14. *Ding L., Saez S., Dolabdjian C., Melo L.G.C., Yelon A., Ménard D.* Development of a high sensitivity Giant Magneto-Impedance magnetometer: comparison with a commercial Flux-Gate // *IEEE Sensors*. 2009. V. 9(2). P. 159–168.
15. *Talaat A., Alonso J., Zhukova V., Garaio E., García J.A., Srikanth H., Phan M.H., Zhukov A.* Ferromagnetic glass-coated microwires with good heating properties for magnetic hyperthermia // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. P. 39300.
16. *Panina L.V., Mohn K., Uchiyama T., Noda M.* Giant Magneto-Impedance in Co-Rich Amorphous Wires and Films // *IEEE Trans. Magn.* 1995. V. 31(2). P. 1249–1260.
17. *Zhukov A., Ipatov M., Churyukanova M., Talaat A., Blanco J.M., Zhukova V.* Trends in optimization of giant magnetoimpedance effect in amorphous and nanocrystalline materials // *J. Alloy Compd.* 2017. V. 727. P. 887–901.
18. *Gemperle R., Kraus L. and Schneider J.* Magnetization reversal in amorphous  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x)_{80}\text{P}_{10}\text{B}_{10}$  microwires // *Czech. J. Phys. B*. 1978. V. 28. P. 1138–1145.
19. *Ulitsky A.V., Maiani I.M., Avramenco A.I.* Method of continuous casting of glass coated microwire, Patent No128427 (USSR), 15.05.60, Bulletin. № 10. P. 14.
20. *Baranov S.A., Larin V.S., Torcunov A.V.* Technology, Preparation and Properties of the Cast Glass-Coated Magnetic Microwires // *Crystals*. 2017. V. 7. P. 136.
21. *Chiriac H., Óvári T.A.* Amorphous glass-covered magnetic wires: preparation, properties, applications // *Progr. Mater. Sci.* 1996. V. 40(5). P. 333–407.
22. *Zhukov A., Gonzalez J., Torcunov A., Pina E., Prieto M.J., Cobeño A.F., Blanco J.M., Larin V., Baranov S.* Ferromagnetic resonance and Structure of Fe-based Glass-coated Microwires // *J. Magn. Magn. Mater.* 1999. V. 203. P. 238–240.
23. *Zhukova V., Blanco J.M., Rodionova V., Ipatov M., Zhukov A.* Domain wall propagation in micrometric wires: Limits of single domain wall regime // *J. Appl. Phys.* 2012. V. 111. P. 07E311.
24. *Pirota K.R., Kraus L., Chiriac H., Knobel M.* Magnetic properties and GMI in a CoFeSiB glass-covered microwire // *J. Magn. Magn. Mater.* 2000. V. 21. P. L243–L247.
25. *Zhukov A., Zhukova V., Blanco J.M. and Gonzalez J.* Recent research on magnetic properties of glass-coated microwires // *J. Magn. Magn. Mater.* 2005. V. 294. P. 182–192.
26. *Corte-León P., Zhukova V., Ipatov M., Blanco J.M., Gonzalez J., Zhukov A.* Engineering of magnetic properties of Co-rich microwires by joule heating // *Intermetallics*. 2019. V. 105. P. 92–98.
27. *Zhukov A., Ipatov M., Talaat A., Blanco J.M., Hernando B., Gonzalez-Legarreta L., Suñol J.J., Zhukova V.* Correlation of Crystalline Structure with Magnetic and Transport Properties of Glass-Coated Microwires // *Crystals*. 2017. V. 7. P. 41.
28. *Talaat A., Zhukova V., Ipatov M., del Val J.J., Blanco J.M., Gonzalez-Legarreta L., Hernando B., Churyukanova M., Zhukov A.* Engineering of Magnetic Softness and Magnetoimpedance in Fe-Rich Microwires by Nanocrystallization // *JOM*. 2016. V. 68(6). P. 1563–1571.
29. *Chiriac H., Ovari T.A., Marinescu C.S.* Giant magnetoimpedance effect in nanocrystalline glass-covered wires // *J. Appl. Phys.* 1998. V. 83. P. 6584–6586.
30. *Zhukova V., Blanco J.M., Ipatov M., Churyukanova M., Taskaev S., Zhukov A.* Tailoring of magnetoimpedance effect and magnetic softness of Fe-rich glass-coated microwires by stress-annealing // *Sci. Rep.* 2018. V. 8. P. 3202.
31. *Zhukova V., Blanco J.M., Ipatov M., Gonzalez J., Churyukanova M., Zhukov A.* Engineering of magnetic softness and giant magnetoimpedance effect in Fe-rich microwires by stress-annealing // *Scr. Mater.* 2018. V. 142. P. 10–14.
32. *Zhukova V., Ipatov M., Talaat A., Blanco J.M., Churyukanova M., Taskaev S., Zhukov A.* Effect of stress-induced anisotropy on high frequency magnetoimpedance effect of Fe and Co-rich glass-coated microwires // *J. Alloy Compd.* 2018. V. 735. P. 1818–1825.
33. *Vázquez M., Chen D.-X.* The magnetization reversal process in amorphous wires // *IEEE Trans. Magn.* 1995. V. 31(2). P. 1229–1239.
34. *Zhukova V., Blanco J.M., Ipatov M., Zhukov A.* Effect of transverse magnetic field on domain wall propagation in magnetically bistable glass-coated amorphous microwires // *J. Appl. Phys.* 2009. V. 106. P. 113914.
35. *Usov N.A., Antonov A.S. and Lagarkov A.N.* Theory of giant magneto-impedance effect in amorphous wires with different types of magnetic anisotropy // *J. Magn. Magn. Mater.* 1998. V. 185. P. 159–173.
36. *Zhukov A., Zhukova V., Larin V., Blanco J.M., Gonzalez J.* Tailoring of magnetic anisotropy of Fe-rich microwires by stress induced anisotropy // *Physica B*. 2006. V. 384. P. 1–4.
37. *Kunz A. and Reiff S.C.* Enhancing domain wall speed in nanowires with transverse magnetic fields // *J. Appl. Phys.* 2008. V. 103. P. 07D903.
38. *Yang J., Beach G.S.D., Knutson C., Erskine J.L.* Magnetic domain-wall velocity enhancement induced by a transverse magnetic field // *J. Magn. Magn. Mater.* 2016. V. 397. P. 325–332.