

05

## Магнитная анизотропия и сверхвысокочувствительный стресс-магнитоимпеданс в микропроводах с положительной магнитострикцией

© М.Г. Ньёматов<sup>1,3</sup>, Л.В. Панина<sup>1,2</sup>, А. Джумъазода<sup>1,3</sup>, Н.А. Юданов<sup>1</sup>, А.Т. Морченко<sup>1</sup>, М.А. Джураев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский технологический университет „МИСиС“, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими, Душанбе, Таджикистан

E-mail: nematovmaqsud@misis.ru

Поступила в Редакцию 20 февраля 2019 г.

В окончательной редакции 26 марта 2019 г.

Принята к публикации 26 марта 2019 г.

В аморфных ферромагнитных микропроводах состава  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_5\text{B}_{11}\text{Si}_{10}\text{Cr}_3$  в стеклянной оболочке, подвергнутых токовому отжигу, достигнуто рекордное значение чувствительности магнитоимпеданса (МИ) к механическим нагрузкам (стресс-МИ) до 100% на 100 МПа в отсутствие дополнительных магнитных полей смещения. Процесс токового отжига, сочетающий действие джоулевого нагрева и циркулярного магнитного поля, приводит к индуцированию специфической магнитной анизотропии геликоидального/циркулярного типа и, таким образом, позволяет управлять поведением МИ и стресс-МИ, делая провода более подходящими для применения в сенсорных устройствах. В результате изменения направления легкой оси анизотропии внешние механические напряжения приводят к изменению направления статической намагниченности, что и обуславливает увеличение чувствительности стресс-МИ.

**Ключевые слова:** аморфный микропровод, наведенная анизотропия, токовый отжиг, процессы намагничивания, стресс-магнитоимпеданс (S-МИ).

DOI: 10.21883/FTT.2019.08.47970.389

### 1. Введение

Физические свойства аморфных сплавов, изготовленных методом быстрой закалки, в значительной степени изменяются при термической обработке ниже температуры кристаллизации и перехода в парамагнитное состояние (точка Кюри), так как при этом происходит релаксация внутренних механических напряжений [1–3], наведенных в процессе изготовления, а также изменяются параметры ближнего упорядочения. Поэтому в аморфных ферромагнитных сплавах с помощью термообработки можно управлять направлением осей магнитной анизотропии, значением константы магнитострикции, распределением внутренних напряжений и температурой Кюри [4–7].

Аморфные сплавы являются хорошими магнитомягкими материалами, поскольку в них эффективная магнитокристаллическая анизотропия невысока из-за эффекта усреднения обменного взаимодействия. При нагреве ниже, чем температура кристаллизации, магнитоупругая анизотропия уменьшается за счет релаксации внутренних напряжений. Так как величины магнитокристаллической и магнитоупругой анизотропии в таком материале достаточно снижены, поведение намагниченности может контролироваться одноосной анизотропией, ин-

дуцированной во время термообработки в присутствии магнитного поля или механического напряжения. Таким образом, индуцированная магнитная анизотропия имеет огромное практическое значение, позволяя управлять магнитной структурой в соответствии с конкретными практическими требованиями.

В данной работе геликоидальная магнитная анизотропия, индуцированная с помощью токового отжига в аморфных микропроводах состава  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_5\text{B}_{11}\text{Si}_{10}\text{Cr}_3$  со стеклянной оболочкой, позволяет получить высокую чувствительность формы петли гистерезиса и магнитоимпеданса к растягивающим механическим напряжениям. Аморфные микропровода с высоким содержанием кобальта известны как материалы, весьма подходящие для получения больших и гигантских значений МИ [3,8–10]. При надлежащем выборе состава можно изготовить микропровода с весьма малой отрицательной магнитострикцией, в которых внутренние растягивающие напряжения создают преимущественно циркулярную анизотропию. Это создает условия для достижения высокой чувствительности МИ-эффекта относительно изменений внешнего аксиального магнитного поля. С целью дальнейшего усиления циркулярной анизотропии (за счет уменьшения разброса осей анизотропии) в [11,12] были предложены различные

способы термической обработки путем токового отжига (с использованием как переменного, так и постоянного тока), что позволило увеличить чувствительность до нескольких сотен процентов в области малых магнитных полей порядка нескольких эрстед, характерных для проявления МИ эффекта. С другой стороны, традиционный отжиг, который уменьшает напряжения закалки, зачастую приводит к снижению чувствительности МИ, что может быть связано с большим разбросом направлений легких осей анизотропии [13,14].

Направление легкого намагничивания, связанное с индуцированной полем анизотропией, определяется парным упорядочением атомов переходных металлов, которое возникает при отжиге из-за изменений микроструктуры ближнего порядка. Это было подтверждено прямым наблюдением с помощью анализа HRTEM [15]. Увеличение степени упорядочения может даже привести к росту намагниченности насыщения и температуры Кюри. В случае цилиндрической геометрии проводника при токовом отжиге одновременно действуют тепловой и магнитный факторы, причем магнитное поле способствует магнитному упорядочению в циркулярном направлении. Так, например, токовый отжиг и отжиг в присутствии растягивающих напряжений использовались авторами [16,17] для изменения легкой оси анизотропии в проводах на основе Fe с положительной магнитострикцией с целью усиления эффекта МИ в этих недорогих материалах.

Высокая чувствительность МИ обычно связана с переориентацией направления намагниченности под влиянием внешних воздействий. В этом смысле наведенная циркулярная анизотропия оптимальна для получения высокочувствительного МИ-отклика на изменение аксиальной составляющей слабых магнитных полей. Если в качестве внешнего воздействия используется механическое напряжение (приводящее к эффекту стресс-МИ), вид анизотропии зависит от знака магнитострикции. С точки зрения влияния на МИ растягивающего напряжения для использования в сенсорах предпочтительными являются провода с аксиальной анизотропией в случае отрицательной константы магнитострикции и циркулярной — в случае положительной константы магнитострикции. При этом создаются условия для поворота ориентации намагниченности в проводе под действием растягивающего напряжения. Таким образом, для реализации стресс-МИ без использования подмагничивающего поля смещения, должен быть сформирован необходимый тип анизотропии, что можно осуществить путем надлежащей термической обработки в присутствии магнитного поля.

В настоящей работе для создания специфической магнитной анизотропии циркулярного типа в аморфных микропроводах  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_5\text{B}_{11}\text{Si}_{10}\text{Cr}_3$  с близким к нулю положительным значением коэффициента магнитострикции предложено использовать токовый отжиг. Это важно не только для повышения чувствительности МИ [18], но также позволяет расширить область применения МИ,

включая стресс-чувствительный МИ на микроволновых частотах [19] и импульсный МИ для магнитной памяти произвольного доступа (MRAM) [20–22].

## 2. Материалы и методики измерений

В настоящей работе было исследовано влияние режима токового отжига, в частности, амплитуды и времени прохождения тока, на магнитную анизотропию, петлю гистерезиса и магнитоимпеданс (МИ) в аморфных микропроводах  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_5\text{B}_{11}\text{Si}_{10}\text{Cr}_3$  с близким к нулю положительным значением коэффициента магнитострикции ( $\mu_s \sim 10^{-7}$ ), изготовленных методом Тейлора–Улитовского [23]. Аморфный микропровод (общий диаметр  $29.5\ \mu\text{m}$ , диаметр металлической жилы  $23.9\ \mu\text{m}$ ) длиной 15 см отжигали током 50 мА в течение 5–60 мин. Для создания надежного электрического соединения на концах проводов удаляли стеклянную оболочку и припаивали их к контактными площадкам. Все токовые процедуры были выполнены в одинаковых условиях. Величина тока была выбрана так, чтобы реализовать умеренный эффект нагрева в диапазоне температур 490–540 К, который лежит ниже температур Кюри ( $T_C = 637\ \text{K}$ ) и кристаллизации ( $T_{cr} = 736\ \text{K}$ ) проводов.

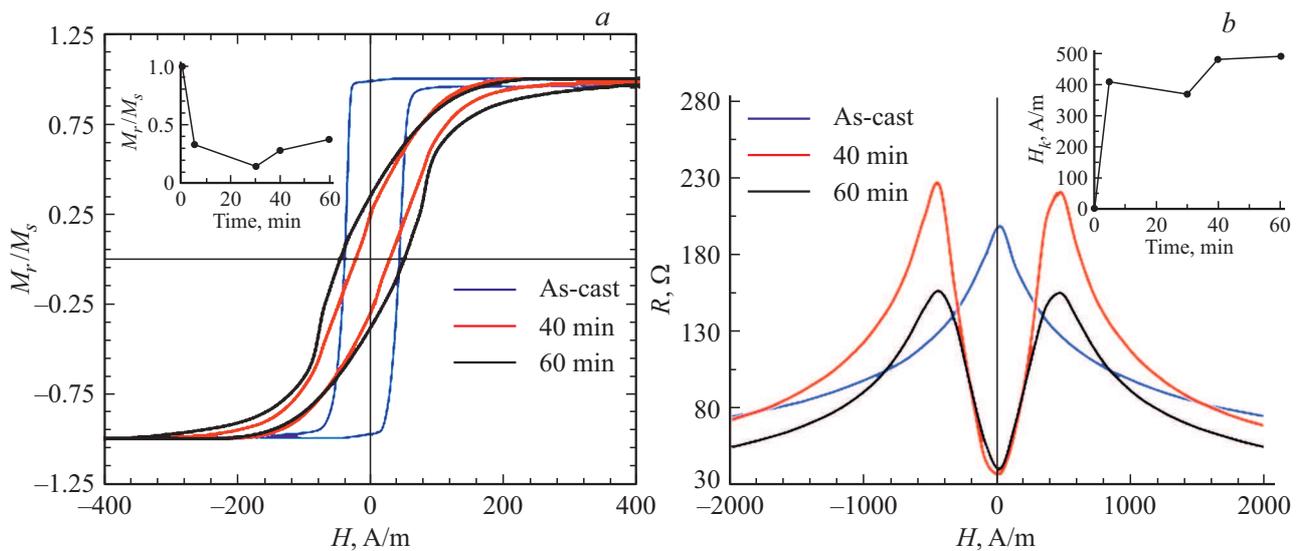
Исследования методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) проводились в атмосфере Ar при скорости нагрева 10 К/мин с помощью высокочувствительного калориметра Netzsch DSC 204 F1 Phoenix. Температуры Кюри ( $T_C = 637\ \text{K}$ ) и кристаллизации ( $T_{cr} = 736\ \text{K}$ ) проводов были определены по графику ДСК с помощью стандартных приложений.

Процессы намагничивания проводов под действием растягивающего напряжения до 1000 МПа исследовались индукционным методом с использованием двух миниатюрных дифференциальных катушек с внутренним диаметром 3 мм. Частота тока в намагничивающих катушках составляла 500 Hz, максимальная амплитуда намагничивающего поля — 1000 А/м. Для построения петли гистерезиса индуцированный электрический сигнал оцифровывался и интегрировался как функция магнитного поля. Приложенное напряжение  $\sigma_{ex}$  в металлической жиле оценивалось как:

$$\sigma_{ex} = \frac{PE_m}{E_m S_m + E_{gl} S_{gl}}, \quad (1)$$

где  $P$  — приложенная нагрузка,  $S_m$  и  $S_{gl}$  — площади металлической жилы и стеклянной оболочки соответственно с учетом значений модуля Юнга металла ( $E_m \sim 130\ \text{GPa}$ ) и стеклянной оболочки ( $E_{gl} \sim 70\ \text{GPa}$ ) [24].

Зависимость высокочастотного импеданса от магнитного поля исследовалась в диапазоне частот 1–100 МГц с помощью векторного анализатора цепей (Hewlett-Packard 8753E) путем измерения параметра  $S_{21}$  (коэффициента передачи) в цепи, содержащей микропровод в специально разработанной микроволновой полосковой



**Рис. 1.** Петли гистерезиса (а) и зависимость действительной части импеданса от магнитного поля (б) при различном времени отжига током 50 мА в аморфном микропроводе состава  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_5\text{B}_{11}\text{Si}_{10}\text{Cr}_3$ . На вставках показаны зависимости остаточной намагниченности  $M_r/M_s$  (а) и эффективного поля циркулярной анизотропии  $H_K$  (б) от времени отжига.  $M_s$  — намагниченность насыщения.

ячейке [25]. Длина провода для измерений импеданса составляла 11 мм. Образец в горизонтальном положении помещался внутри катушки Гельмгольца, создающей медленно меняющееся магнитное поле напряженностью до 3000 А/м. Растягивающая нагрузка прикладывалась в центре провода с помощью подвешенного груза на диамагнитной нити.

### 3. Обсуждение результатов

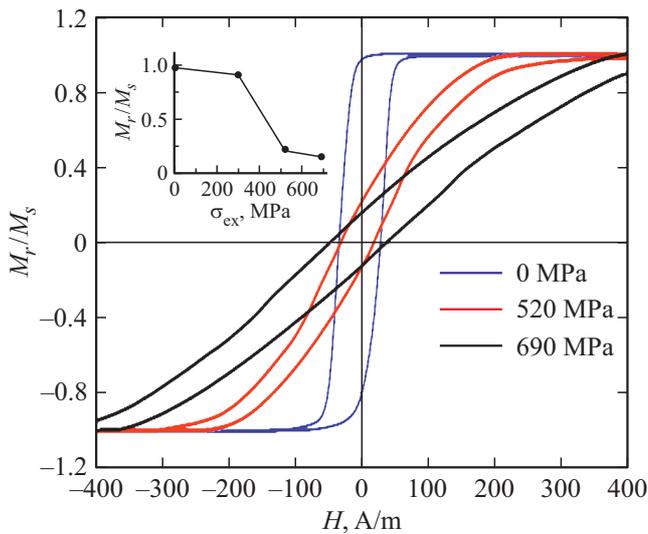
Изучение структурных параметров микропроводов до и после токового отжига при 50 мА в течение 60 мин было проведено методами рентгеновской дифракции и ДСК. Рентгенограмма показала сплошное широкое гало, типичное для аморфного состояния [26]. Было выявлено, что даже длительный отжиг не приводит к частичной кристаллизации образцов.

Процессы намагничивания и МИ в аморфных микропроводах во многом определяются магнитной анизотропией, поэтому токовый отжиг, который вызывает изменение характера магнитной анизотропии для  $\lambda_s > 0$ , приводит к изменению поведения петли гистерезиса и кривой МИ [24,27]. На вставке к рис. 1 приведены зависимости остаточной намагниченности ( $M_r$ ) и эффективного поля циркулярной анизотропии ( $H_K$ ), определенные из кривых намагниченности и магнитоимпеданса, от времени отжига при величине тока 50 мА. Как видно из рис. 1, а, петля гистерезиса исходных проводов имеет прямоугольную форму, что характерно для образцов с аксиальной анизотропией и положительной магнитострикцией  $\lambda_s > 0$ , а кривые МИ этих же проводов (в исходном виде) характеризуются одним центральным пиком (рис. 1, б) [28]. После токового отжига

происходит изменение поведения петель гистерезиса от прямоугольного к наклонному, и соответствующее изменение поведения МИ от кривой с одним пиком к кривой с двумя симметричными пиками (рис. 1, б), что соответствует изменению легкой оси анизотропии, которая приближается к циркулярному направлению. С ростом времени отжига наклон петель гистерезиса растет и достигает своего максимума при времени отжига, равному 40 мин. Значение эффективного поля магнитной анизотропии, равно напряженности поля, в котором МИ достигает максимума, также увеличивается с ростом времени отжига. Отжиг в течение 60 мин и более приводит к росту коэрцитивной силы, расширению пиков МИ и одновременному уменьшению чувствительности к магнитному полю.

Изменение в поведении петель гистерезиса и МИ проводов после токового отжига может быть связано с индуцированием циркулярной магнитной анизотропии из-за упорядочения пар атомов ближнего порядка в процессе термической обработки при температурах ниже точки Кюри в присутствии циркулярного магнитного поля. Магнитное поле, созданное постоянным током в микропроводе, соответствует 665 А/м на периферии провода. В любом случае, циркулярная анизотропия не может наводиться во всем объеме провода, поэтому вблизи оси провода остается некоторая область с аксиальной анизотропией, о чем свидетельствует поведение кривых намагничивания.

Было выявлено, что отжиг в течение времени, превышающего 40 мин, приводит к увеличению коэрцитивной силы и уменьшению чувствительности МИ к магнитному полю. Как правило, по прошествии определенного времени (определяемого энергией активации) происхо-



**Рис. 2.** Влияние растягивающего напряжения на поведение петли гистерезиса в исходном аморфном микропроводе  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_5\text{B}_{11}\text{Si}_{10}\text{Cr}_3$ . На вставке показана зависимость остаточной намагниченности ( $M_r/M_s$ ) от растягивающего напряжения.

дит завершение кинетических процессов и достигается равновесное состояние аморфной фазы, поэтому дальнейшее увеличение длительности отжига не приводит к изменению основных магнитных параметров, но могут появляться центры кристаллизации, на которых могут закрепляться доменные границы. Для объяснения поведения намагниченности следует учитывать также такие факторы, как изменение микроструктуры и магнито-стрикции образцов. Влияние отжига на магнито-стрикцию не всегда коррелирует с изменением магнитной анизотропии. Это можно объяснить с точки зрения релаксации напряжений, связанных с процессом изготовления и изменениями в аморфном состоянии материала жилы, которые достигают равновесия в течение более длительного времени. Внутренние напряжения могут сильно влиять на магнито-стрикцию аморфных проводов, если значение ее константы  $\lambda_s$  находится на уровне  $10^{-7}$ . Зависимость магнито-стрикции от механических напряжений определяется по формуле

$$\lambda_s = \lambda_{s0} - B\sigma_a, \quad \sigma_a = \sigma_{in} + \sigma_{ex}, \quad (2)$$

где  $\lambda_{s0}$  — константа магнито-стрикции в отсутствие механических напряжений (положительная для данных проводов),  $B$  — коэффициент, имеющий значение  $\sim (1 \dots 6) \cdot 10^{-10} \text{ MPa}^{-1}$  [29]),  $\sigma_i$  — внутренние напряжения, возникающие в процессе быстрого затвердевания аморфного сплава,  $\sigma_{ex}$  — внешние растягивающие напряжения. Можно предположить, что при уменьшении  $\sigma_{in}$  из-за релаксации внутренних напряжений, значение константы магнито-стрикции возрастает, и ее вклад в осевую магнитную анизотропию увеличивается.

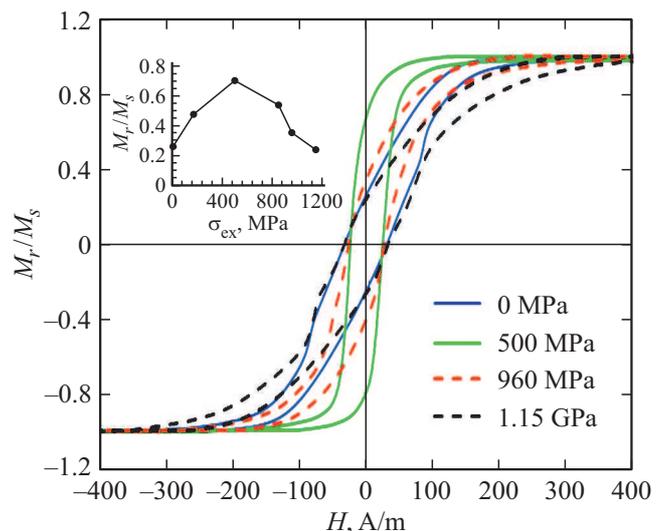
Зависимость кривых намагничивания от растягивающего напряжения для проводов в исходном виде и после

токового отжига приведены на рис. 2 и 3 соответственно. Петли гистерезиса неотожженных проводов остаются прямоугольными до нагрузки  $\sigma_{ex} < 500 \text{ MPa}$ , при этом наблюдается увеличение коэрцитивной силы ( $H_c$ ). Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к изменению вида петли гистерезиса от прямоугольной к наклонной, при этом значение  $H_c$  уменьшается. Такое поведение связано с изменением знака  $\lambda_s$  от положительного к отрицательному, как следует из уравнения (2). Изменение знака магнито-стрикции под действием внешних напряжений в аналогичных аморфных сплавах ранее наблюдалось в [30]. Действительно, энергия магнитной анизотропии  $E_{ma}$  имеет вид

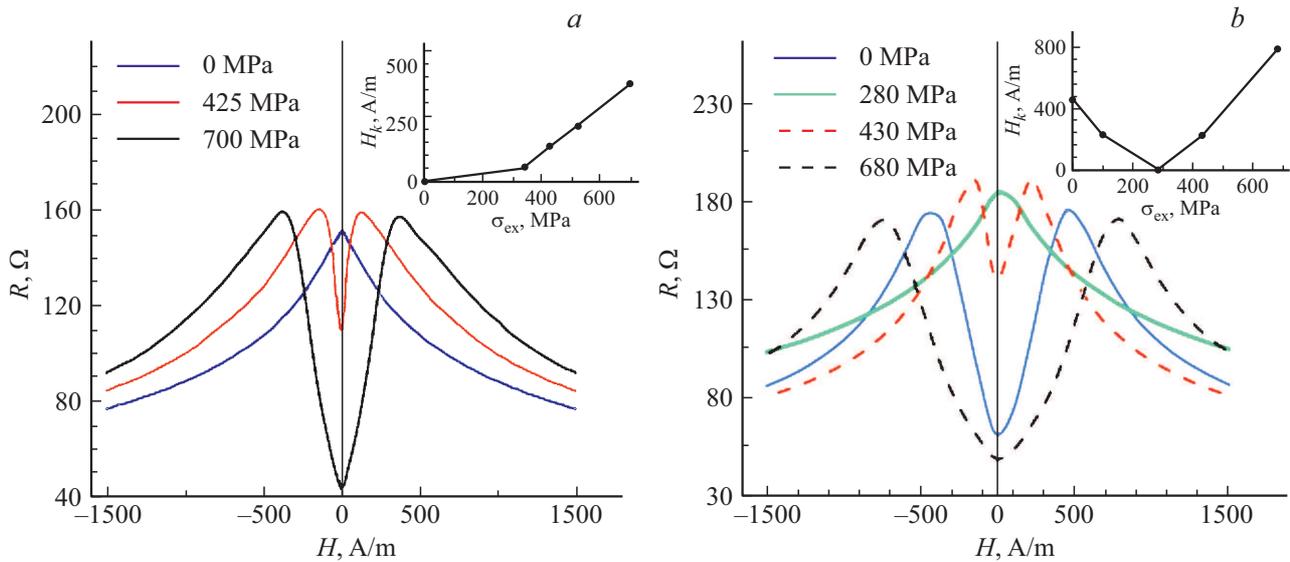
$$E_{ma} = -(K + K_{me}) \cos^2 \theta, \quad K_{me} = \frac{3}{2} \lambda_s (\sigma_{in} + \sigma_{ex}), \quad (3)$$

где  $K$  — константа анизотропии,  $\theta$  — угол между намагниченностью и осью провода. Как следует из формул (2)–(3), в присутствии растягивающего напряжения  $\sigma_{ex}$  константа магнитоупругой анизотропии  $K_{me}$  растет, достигая своего максимума при  $\sigma_{ex} = (\lambda_{s0} - B\sigma_{in})/2B$ , и может становиться отрицательной при  $\sigma_{ex} = (\lambda_{s0} - B\sigma_{in})/B$ . Если значение  $K$  пренебрежимо мало, направление легкого намагничивания провода имеет циркулярное направление.

Форма петель гистерезиса отожженных проводов под действием нагрузки до  $\sigma_{ex} < 500 \text{ MPa}$  преобразуется от наклонной к прямоугольной (рис. 3). В данном случае, константа наведенной анизотропии  $K < 0$ , в то время как  $K_{me}$  растет ( $\lambda_s > 0$ ), растягивающее напряжение приводит к увеличению вклада аксиальной анизотропии.



**Рис. 3.** Влияние растягивающего напряжения на поведение петли гистерезиса в аморфном микропроводе  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_5\text{B}_{11}\text{Si}_{10}\text{Cr}_3$  после токового отжига при  $50 \text{ mA}$  в течение  $60 \text{ min}$ : сплошные линии соответствуют  $\sigma_{ex} \leq 500 \text{ MPa}$ , пунктирные линии —  $\sigma_{ex} > 500 \text{ MPa}$ . На вставке показана зависимость остаточной намагниченности ( $M_r/M_s$ ) от растягивающего напряжения.



**Рис. 4.** Зависимость действительной части импеданса в аморфном микропроводе  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_5\text{B}_{11}\text{Si}_{10}\text{Cr}_3$  от напряженности внешнего магнитного поля при разных значениях растягивающего напряжения: (а) в исходном виде, (б) после токового отжига при 50 мА в течение 60 мин. Вставки к рисункам показывают соответствующее изменение эффективного поля циркулярной анизотропии.

Дальнейшее увеличение нагрузки (выше 500 МПа) приводит к обратному изменению процессов намагничивания, и поведение петель гистерезиса преобразуется от прямоугольного вида к наклонному.

Интересно заметить, что растягивающее напряжение умеренной величины, приложенное к отожженным микропроводам, почти полностью восстанавливает петлю гистерезиса, наблюдаемую в необработанных проводах без нагрузки (сравнение с рис. 2). Следовательно, в проводах с положительной магнитострикцией токовый отжиг и воздействие растягивающего напряжения противоположным образом влияют на формирование направления легкого намагничивания провода.

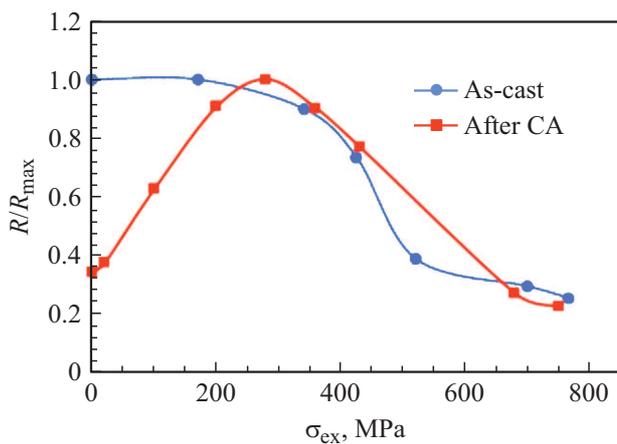
Таким образом, результирующая анизотропия является следствием действия обоих факторов (анизотропия, наведенная током и механическими напряжениями). Эти наблюдения согласуются с предыдущими результатами, демонстрирующими, что токовый нагрев значительно усиливает циркулярную анизотропию в проводах с отрицательной магнитострикцией [31], но одновременно приводит к частичной релаксации внутренних напряжений [32]. Важность полученных результатов связана с возможностью формирования анизотропии, близкой к циркулярной, в проводах с положительной магнитострикцией, поскольку в них при воздействии внешних растягивающих напряжений восстанавливается осевая анизотропия. Это открывает путь к получению микропроводниковых материалов с высоким стресс-чувствительным МИ эффектом.

Основной целью нашей работы является достижение высокочувствительного стресс-МИ. Зависимость эффективного поля циркулярной анизотропии от растягивающего напряжения в проводах, не подвергнутых

обработке, и после токового отжига приведены на рис. 4. Здесь же представлены кривые магнитоимпеданса. В неотожженных проводах под действием растягивающего напряжения наблюдается заметное изменение поведения МИ при  $\sigma_{\text{ex}} = 300$  МПа, когда центральный пик расщепляется на два небольших симметричных пика. Весьма большие изменения наблюдаются при напряжениях выше 500 МПа вследствие смены знака константы магнитострикции и соответствующего изменения ориентации легкой оси анизотропии от аксиального к циркулярному направлению.

Такое поведение согласуется с процессами намагничивания, что иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 2. В отожженных проводах наблюдается обратное поведение МИ под действием растягивающего напряжения. При воздействии умеренного напряжения ( $\sigma_{\text{ex}} = 280$  МПа) графики МИ существенно изменяют свою форму от зависимости с двумя симметричными пиками к кривой с одним пиком, как показано на рис. 4, б. Увеличение растягивающего напряжения вызывает обратную тенденцию преобразования поведения МИ. Это также согласуется с изменениями характера анизотропии и вида петель гистерезиса.

Поскольку исследования МИ были проведены на частоте 50 МГц, то вследствие скин-эффекта они в первую очередь отражают процессы, происходящие в поверхностном слое микропровода. В исходных проводах характер магнитной анизотропии этого слоя сходен с тем, который имеет место в остальной части провода, где намагниченность ориентирована в аксиальном направлении. В отожженных проводах циркулярная анизотропия сильнее проявляется именно в поверхностном слое, в основном отвечающем за МИ эффект. В результате ме-



**Рис. 5.** Зависимость действительной части импеданса в аморфном микропроводе  $Co_{71}Fe_5B_{11}Si_{10}Cr_3$  от приложенного растягивающего напряжения в отсутствие магнитного поля ( $H = 0$ ): (a) в исходном проводе, (b) после токового отжига при 50 мА в течение 60 мин. Значение импеданса нормировано к его максимальному значению.

ханические напряжения оказывают более сильное влияние на поведение МИ, чем на ход петли гистерезиса.

Полученная возможность изменения направления легкой оси анизотропии с помощью токового отжига в проводах с положительной магнитострикцией открывает широкие перспективы для применения в сенсорах механических напряжений, работающих в высокочастотном диапазоне. Такая наведенная магнитная анизотропия также представляет большой интерес для повышения чувствительности МИ [33] и, что более важно, создает условия для проявления эффекта сверхвысокого стресс-чувствительного МИ без использования дополнительных магнитных полей (или токов) смещения.

Зависимость импеданса от приложенного растягивающего напряжения в отсутствие магнитного поля ( $H = 0$ ) для проводов в исходном состоянии и после токового отжига при 50 мА в течение 60 мин, показана на рис. 5. Как видно из графика, значение МИ исходных проводов под действием растягивающего напряжения величиной менее 250 МПа не проявляет значительного изменения. Когда нагрузка превышает 340 МПа, значение МИ начинает резко уменьшаться. Это связано с изменением знака константы магнитострикции под действием растягивающего напряжения с положительного на отрицательный.

Таким образом, поведение МИ в отожженных проводах в отсутствие магнитного поля ( $H = 0$ ) под действием растягивающего напряжения демонстрирует две противоположные тенденции, обусловленные магнитной анизотропией циркулярного типа, наводимой в поверхностном слое провода, и магнитоупругой анизотропией аксиального типа. Значение МИ линейно растет при нагрузках  $\sigma_{ex} < 250$  МПа и достигает максимума при  $\sigma_{ex} < 300$  МПа. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к уменьшению как самого значения МИ, так и его

чувствительности к изменению магнитного поля. Указанные тенденции могут быть объяснены в рамках баланса между наведенной током и магнитоупругой анизотропии с учетом характера поведения константы магнитострикции под действием растягивающего напряжения. Достигнутое значение чувствительности к внешним механическим напряжениям в отсутствие магнитного поля превышает 260% при нагрузках  $\sigma_{ex} < 250$  МПа, причем эта возможность реализуется без использования дополнительных магнитных полей (или токов) смещения.

## 4. Выводы

Наведенная током анизотропия циркулярного типа в проводах с положительной магнитострикцией создает условия для значительного изменения МИ под действием растягивающего напряжения, что можно назвать эффектом гигантского стресс-магнитоимпеданса (стресс-МИ). Стресс-МИ открывает широкие перспективы для создания сенсоров механического напряжения, работающих в микроволновом диапазоне. Так, нами продемонстрирована возможность управления направлением легкой оси анизотропии в отожженных током аморфных ферромагнитных микропроводах с помощью растягивающего механического напряжения. Это предоставляет возможность манипулировать поведением магнитоимпеданса и процессов намагничивания проводов с помощью внешних воздействий. Таким образом, токовый отжиг аморфных ферромагнитных микропроводов позволяет изготавливать сенсорные элементы с требуемым типом магнитной анизотропии. Кроме того, провода с положительной магнитострикцией и наведенной циркулярной анизотропией могут быть использованы при создании конструкционных смарт-материалов, в которых реализована способность дистанционного контроля механических напряжений.

## Благодарности

Авторы благодарны В. Ларину (MFTI Ltd, <http://www.microwires.com>) за предоставление образцов микропроводов.

## Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках программы повышения конкурентоспособности НИТУ «МИСиС», осуществляемой постановлением правительства от 16 марта 2013 г. № 211 и грант РФФИ № 18-38-00637.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] V. Larin, L.V. Panina, E.-A. Patroi, D. Patroi, V. Bashev, N. Kutseva. *J. Phys. Status Solidi A* **213**, 2, 384 (2016).
- [2] M.H. Phan, H.X. Peng, *J. Prog. Mater. Sci.* **53**, 323 (2008).
- [3] M. Knobel, M. Vázquez, L. Kraus. *Handbook of Magnetic Materials*. V. 15, Elsevier Science, Amsterdam (2003). Chap. 5. 497 p.
- [4] A. Zhukova, A. Talaat, M. Ipatov, J.M. Blanco, V. Zhukova. *J. Alloys Compd.* **615**, 610 (2014).
- [5] O. Thiabgoh, H. Shen, T. Eggers, A. Galati, S. Jiang, J.S. Liu, Z. Li, J.F. Sun, H. Srikanth, M.H. Phan. *J. Sci. Adv. Mater. Dev.* **1**, 69 (2016).
- [6] A. Zhukov, M. Ipatov, V. Zhukova, C. García, J. Gonzalez, J.M. Blanco. *J. Phys. Status Solidi A* **205**, 1367 (2008).
- [7] I. Astefanoaei, D. Radu, H. Chiriac. *J. Phys. Cond. Matter* **18**, 2689 (2006).
- [8] Y. Zhao, H. Hao, Y. Zhang. *J. Intermet.* **42**, 62 (2013).
- [9] A. Zhukov, V. Zhukova, J.M. Blanco, J. Gonzalez. *J. Magn. Mater.* **294**, 182 (2005).
- [10] L.V. Panina, K. Mohri. *J. Appl. Phys. Lett.* **65**, 1189 (1994).
- [11] J. Liu, F.X. Qin, D. Chen, H. Shen, H. Wang, D. Xing, M.H. Phan, J. Sun. *J. Appl. Phys.* **115**, 17A326 (2014).
- [12] A. Amirabadizadeh, R. Mardani, M. Ghanaatshoar. *J. Alloys Compd.* **661**, 501 (2015).
- [13] P. Tiberto, Marco Coisson, F. Vinai, S.N. Kane. *IEEE Trans. Magn.* **38**, 5, 3093 (2002).
- [14] M.G. Nematov, M.M. Salem, A.M. Adam, M. Ahmad, L.V. Panina, A.T. Morchenko. *IEEE Trans. Magn.* **53**, 2003106 (2017).
- [15] Dong-Ming Chen, Da-Wei Xing, Fa-Xiang Qin, Jing-Shun Liu, Huan Wang, Xiao-Dong Wang, Jian-Fei Sun. *J. Phys. Status Solidi A* **210**, 11, 2515 (2013).
- [16] V. Zhukova, J.M. Blanco, M. Ipatov, M. Churyukanova, S. Taskaev, A. Zhukov. *J. Sci. Rep.* **8**, 3202 (2018).
- [17] H. Chiriac, T.-A. Ovari. *J. Progr. Mater. Sci.* **40**, 333 (1996).
- [18] A. Zhukov, A. Talaat, M. Ipatov, V. Zhukova. *J. IEEE Magn. Lett.* **6**, 2500104 (2015).
- [19] D.P. Makhnovskiy, L.V. Panina. *J. Phys. Rev. B* **74**, 064205 (2006).
- [20] M. Ipatov, V. Zhukova, A. Zhukov, J. Gonzalez. *J. Sci. Rep.* **6**, 36180 (2016).
- [21] J.-M. Hu, Z. Li, L.-Q. Chen, C.-W. Nan. *J. Adv. Mater.* **24**, 2869 (2012).
- [22] J.-M. Hu, Z. Li, L.-Q. Chen, C.-W. Nan. *J. Nature Commun.* **2**, 553 (2011).
- [23] V.S. Larin, A.V. Torcunov, A. Zhukov, J. Gonzalez, M. Vazquez, L. Panina. *J. Magn. Mater.* **249**, 39 (2002).
- [24] T. Kitoh, K. Mohri, T. Uchiyama. *IEEE Trans. Magn.* **31**, 3137 (1995).
- [25] L.V. Panina, A. Dzhumazoda, S.A. Evstigneeva, A.M. Adam, A.T. Morchenko, N.A. Yudanov, V.G. Kostishyn. *J. Magn. Mater.* **459**, 147 (2018).
- [26] S. Evstigneeva, A. Morchenko, A. Trukhanov, L. Panina, V. Larin, N. Volodina, N. Yudanov, M. Nematov, H. Hashim, H. Ahmad. *EPJ Web Conf.* **185**, 04022 (2018).
- [27] L.V. Panina, K. Mohri, D.P. Makhnovskiy. *J. Appl. Phys.* **85**, 5444 (1999).
- [28] M. Vazquez, H. Chiriac, A. Zhukov, L. Panina, T. Uchiyama. *Phys. Status Solidi A* **208**, 493 (2011).
- [29] A. Zhukov, J.M. Blanco, J. González. *J. Appl. Phys.* **87**, 1402 (2000).
- [30] M.M. Salem, M.G. Nematov, A. Uddin, L.V. Panina, M.N. Churyukanova, A.T. Morchenko. *J. Phys. Conf. Ser.* **903**, 012007 (2017).
- [31] K.D. Sossmeier, F. Bohn, H. Chiriac, M. Carara. *J. Phys. D* **40**, 3233 (2007).
- [32] K.D. Sossmeier, J.T.D. Oliveira, L.F. Schelp, M. Carara. *J. Magn. Mater.* **316**, 541 (2007).
- [33] M.G. Nematov, N.A. Yudanov, R.A. Yakubtsev, L.V. Panina, A.V. Beklemisheva, A.T. Morchenko, A. Thakur. *EPJ Conf.* **185**, 04030 (2018).

Редактор Т.Н. Василевская