

УДК 537.9:53.03

ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ АНИЗОТРОПИЯ В ПЛЕНКАХ Ni–Fe

© 2023 г. П. А. Савин^{1, *}, О. А. Аданаква¹, В. Н. Лепаловский¹,
Е. В. Кудюков¹, В. О. Васьковский^{1, 2}

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина”, Екатеринбург, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт физики металлов имени М.Н. Михеева” Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, Россия

*E-mail: Peter.Savin@urfu.ru

Поступила в редакцию 28.10.2022 г.

После доработки 15.11.2022 г.

Принята к публикации 26.12.2022 г.

Получены пленки FeNi, обладающие эффектом “отрицательной анизотропии”, заключающемся в формировании наведенной анизотропии перпендикулярно полю осаждения. Протестирована ранее предложенная модель эффекта, основанная на отрицательной магнитострикции и неоднородных напряжениях. Влияние дополнительных напряжений анализировалось по изменяющейся форме $R-H$ кривых. Изменения анизотропии согласуются с моделью.

DOI: 10.31857/S0367676522700880, EDN: NLMHKW

Железо-никелевые пленки являются предметом активных научных исследований с 50-х гг. прошлого века и по настоящее время. Это связано с широким спектром реализуемых свойств и возможностями технического применения, например, в области записи и обработки информации, спинтронике, магниторезистивных датчиках [1, 2]. Автор [3] показал наличие в некоторых пленках FeNi небольших областей с “отрицательной анизотропией”. Название эффекта связано с возможностью описания одноосной анизотропии плотностью свободной энергии $E_k = K_{\pm} \sin^2 \varphi$, где φ — угол между намагниченностью $\vec{M}$ и полем осаждения $\vec{H}_{dep}$. Константа анизотропии $K_{\pm}$ может быть выбрана положительной или отрицательной в зависимости от направления наведенной анизотропии: вдоль поля $\vec{H}_{dep}$ или поперек. Для формирования оси легкого намагничивания (ОЛН), при осаждении пленки обычно прикладывают магнитное поле осаждения $\vec{H}_{dep}$ в плоскости подложки и ОЛН формируется вдоль этого направления [4].

Авторы [5] предложили модель для объяснения эффекта отрицательной анизотропии, суть которой состоит в совместном действии двух факторов: анизотропного распределения (миграции) дефектов и отрицательной магнитострикции с неоднородными напряжениями.

Механизм анизотропии поясняется схемой (рис. 1). Осажденную пленку можно представить в виде набора отдельных кристаллитов (квадратики) и дефектов (точки). При повышенной температуре (сопутствующей процессу напыления), беспорядочно расположенные дефекты могут мигрировать к границам зерен. Наличие технологического поля $\vec{H}_{dep}$, провоцирует неравномерное распределение дефектов в межзеренном пространстве, уменьшая магнитостатическую энергию [6]. В результате вдоль направления поля осаждения образуются “цепочки кристаллитов”, разделенные скоплениями дефектов.

Теперь, для создания оси легкого намагничивания, перпендикулярной полю осаждения, необходимо приложить растягивающее напряжение вдоль “цепочек”, так как состав $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{90}$ обладает отрицательной магнитострикцией [7]. Это обеспечивается следующим механизмом. Коэффициент теплового расширения металлической пленки намного больше, чем у стеклянной подложки. В результате, по завершении процесса осаждения, пленка испытывает растягивающие напряжения. Эти напряжения действуют как вдоль, так и поперек “цепочек кристаллитов”. Однако анизотропное распределение дефектов демпфирует напряжения в поперечном направлении, в результате чего продольное натяжение “цепочек кристаллитов” оказывается доминирующим.

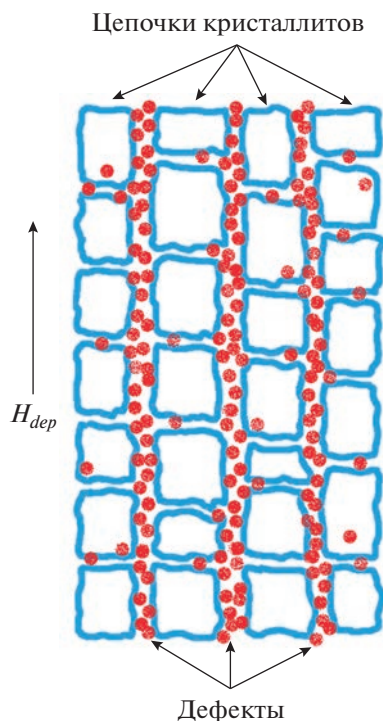


Рис. 1. Схема формирования "цепочек кристаллитов" вследствие анизотропного распределения дефектов.

Поскольку, в соответствии с моделью, одним из факторов формирования "отрицательной анизотропии" являются напряжения, нас интересовала зависимость анизотропии от дополнительных напряжений. Мы исходили из предположения, что возникающая анизотропия состоит из совместного действия двух механизмов, каждый из которых порождает взаимно перпендикулярные направления анизотропии. Первый механизм обусловлен анизотропией формы "цепочек кристаллитов", а второй обеспечивается механическими напряжениями и магнитострикцией. Следовательно, соотношение вкладов от этих двух механизмов, может изменить как величину, так и знак константы анизотропии.

Образцы изготавливались по технологии магнетронного напыления. Пленки осаждались на квадратные, 22×22 мм, стеклянные подложки, помещенные на вращающийся со скоростью 32 оборота в минуту подложкодержатель. Пленки осаждались в присутствии параллельного подложке магнитного поля, напряженностью 250 Э, которое вращалось вместе с подложкодержателем. Давление рабочего газа (аргона) составляло 0.2 Па. В качестве мишени использовался диск из сплава $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{90}$. Скорость осаждения пленки составляла $0.12 \text{ нм} \cdot \text{с}^{-1}$, а толщина пленки 40 нм.

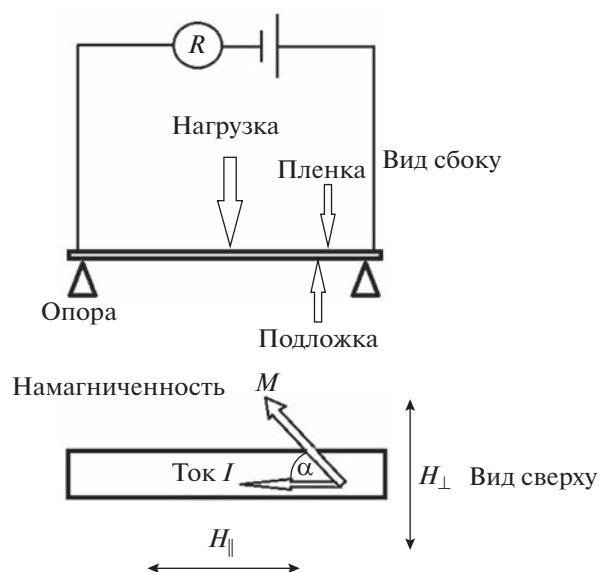


Рис. 2. Схема измерения $R-H$ кривых на полосовых образцах под действием деформирующей нагрузки.

Для наблюдения за изменением анизотропии за счет упругого напряжения, были измерены $R-H$ кривые (зависимость электрического сопротивления от магнитного поля) на образцах без деформирующей нагрузки или с деформирующей нагрузкой. Для этого использовали способ, представленный на рис. 2. Образцы имели форму полос 10×2 мм и вырезались как вдоль, так и поперек направления поля осаждения. $R-H$ кривые были измерены при приложении поля вдоль полосы ($\vec{H}_{\parallel}$) и поперек полосы ($\vec{H}_{\perp}$). Продольные сжимающие напряжения обеспечивались деформирующей нагрузкой. Поскольку сопротивление R образца зависит от угла α между током $\vec{I}$ и намагниченностью $\vec{M}$ (эффект анизотропии магнетосопротивления), $R-H$ кривые позволяют определить направление оси легкого намагничивания. Для этого надо иметь в виду, что низкое значение сопротивления R соответствует перпендикулярной ориентации намагниченности $\vec{M}$ к полосе, а высокое значение R — параллельной.

Если предположения модели верны, то приложение дополнительных напряжений вдоль или поперек "цепочек кристаллитов" должно влиять на анизотропию. Когда, например, вдоль "цепочек кристаллитов" прикладывается сжимающее напряжение — исходное растягивающее напряжение компенсируется. Можно предполагать, что механизм анизотропии, связанный с магнитострикцией, таким образом можно "выключить". Тогда будет преобладать вклад от анизотропии формы "цепочек кристаллитов" и, следовательно, ось легкого намагничивания должна повернуться на 90 градусов.

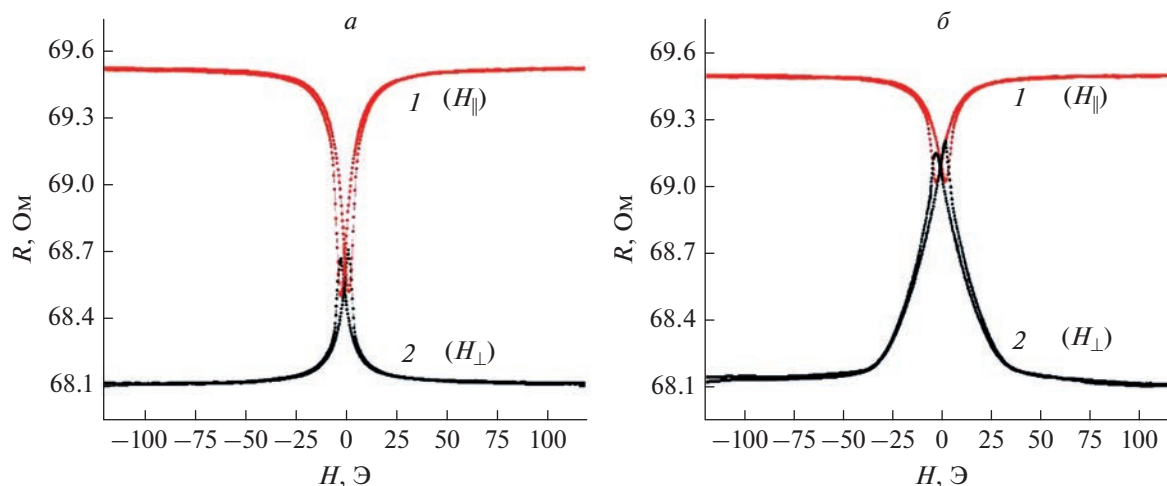


Рис. 3. R – H кривые для полосового образца, вырезанного вдоль действия поля осаждения $\vec{H}_{dep}$ (“цепочки кристаллитов” вдоль образца): без деформирующей нагрузки (а), с деформирующей нагрузкой (б).

Описанная ситуация соответствует рис. 3, на котором показаны R – H кривые для полосового образца, вырезанного из исходной $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{90}$ пленки, вдоль направления действия технологического поля $\vec{H}_{dep}$. Согласно модели, это соответствует ориентации “цепочек кристаллитов” вдоль полосы.

Из рис. 3а (без деформирующей нагрузки), мы можем видеть, что приложение поля вдоль полосы ($\vec{H}_{\parallel}$, красная кривая – 1) существенно изменяет (увеличивает) сопротивление R , в то время как поперечное приложение поля ($\vec{H}_{\perp}$, черная кривая – 2) изменяет сопротивление незначительно. Другими словами, увеличение поля $\vec{H}_{\parallel}$ вдоль полосы, поворачивает намагниченность от исходно (при $\vec{H}_{\parallel} = 0$ Э) перпендикулярной к полоске ориентации, к продольной ориентации (с увеличением поля $\vec{H}_{\parallel}$ до насыщения), в то время как приложение поля $\vec{H}_{\perp}$, поперек полосы, вращает намагниченность незначительно. Из этого можно заключить, что ОЛН в образце, ориентирована преимущественно поперек полосы.

Из рис. 3б (с деформирующей нагрузкой), мы можем видеть, что приложение сжимающего напряжения вдоль полосы “переворачивает” ситуацию: теперь приложение поля вдоль полосы ($\vec{H}_{\parallel}$, красная кривая – 1) изменяет сопротивление незначительно, в то время как поперечное приложение поля ($\vec{H}_{\perp}$, черная кривая – 2) изменяет (уменьшает) сопротивление существенно. Из этого мы можем заключить о переориентации ОЛН, которая теперь ориентирована преимущественно вдоль полосы.

Рисунок 4 соответствует ситуации, когда полоска вырезана из исходной пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{90}$ поперек направления действия технологического поля, т.е., “кристаллические цепочки” ориентированы поперек полосы. Анализируя рис. 4а, можно сделать вывод, что ось легкого намагничивания ориентирована вдоль полосы. Рисунок 4б соответствует приложению поперечного сжимающего напряжения к “цепочкам кристаллитов”. Как и следовало ожидать, приложенное сжимающее напряжение не только не меняет ориентацию оси легкого намагничивания, но и приводит к примерно двукратному увеличению поля анизотропии. Действительно, для поворота намагниченности поперек полосы необходимо поле $\vec{H}_{\perp} \approx 25$ Э (рис. 4а, черная кривая – 2), а при приложении деформирующей нагрузки, требуется поле $\vec{H}_{\perp} \approx 50$ Э (рис. 4б, черная кривая – 2). Мы полагаем, что это результат совместного действия напряжений, растягивающих “цепочки кристаллитов” продольно (согласно модели), и внешних напряжений, сжимающих их в поперечном направлении.

Следует отметить, что не все исследованные нами пленки состава $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{90}$ обнаруживали эффект “отрицательной анизотропии”. На пленке толщиной 70 нм, эффект не был обнаружен. Вероятно, причина может быть в следующем. Как было отмечено выше, направление оси легкого намагничивания определяется конкуренцией двух механизмов, порождающих взаимно перпендикулярные направления ОЛН. Свойства тонких магнитных пленок зависят от толщины. Известно, например, что распределение кристаллитов по размерам может зависеть от толщины пленки [8]. Вполне возможно, что вклад этих механизмов может иметь различную зависимость от толщины пленки. Реше-

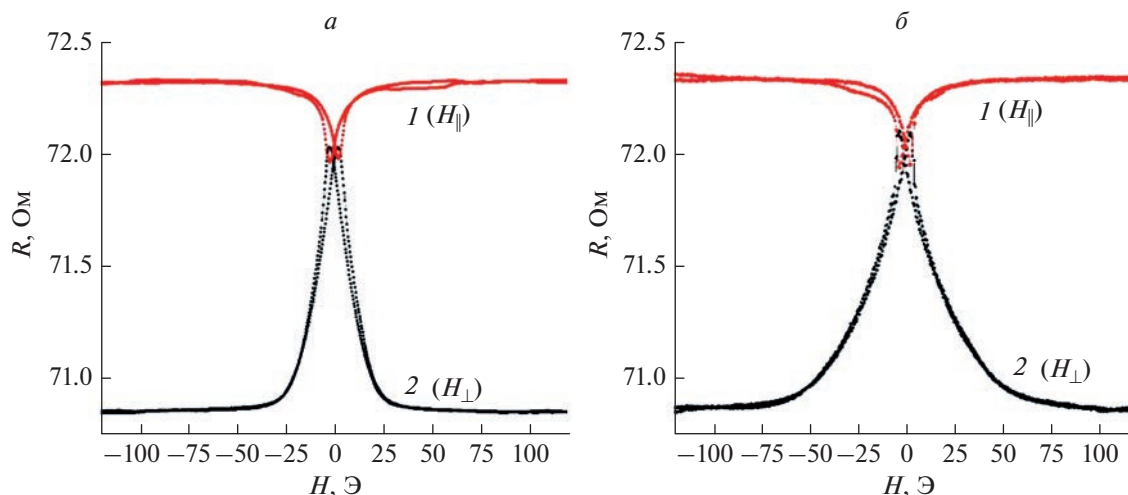


Рис. 4. R – H кривые для полосового образца, вырезанного поперек действия поля осаждения $\vec{H}_{dep}$ (“цепочки кристаллитов” поперек образца): без деформирующей нагрузки (*а*), с деформирующей нагрузкой (*б*).

ние этого вопроса требует дополнительных исследований. Вопрос о том, какие именно дефекты участвуют в формировании анизотропии, остается за рамками статьи. Отметим лишь, что пленки, полученные по технологии ионно-плазменного напыления, могут иметь значительное количество дефектов [9].

Модель может быть использована для изучения механизмов формирования наведенной магнитной анизотропии, а также для управления ею в изделиях планарной технологии [2], ферромагнитных микропроводах со стеклянным покрытием [10].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Программа развития Уральского федерального университета в рамках Программы “Приоритет-2030”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blois M.S. // J. Appl. Phys. 1955. V. 26. P. 975.
2. Jogschies L., Klaas D., Kruppe R. et al. // Sensors. 2015. V. 15. Art. No. 28665.
3. Smith D.O. // Appl. Phys. Lett. 1963. V. 2. P. 191.
4. Soohoo R.F. // Czech. J. Phys. 1971. V. 21. P. 494.
5. Savin P.A., Adanakova O.A., Lepalovskij V.N. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1389. Art. No. 012122.
6. Лесник А.Г. Индуцированная магнитная анизотропия. Киев: Наукова думка, 1976. 160 с.
7. Miyazaki T., Oomori T., Sato F. et al. // J. Magn. Mater. 1994. V. 129. Art. No. L135.
8. Савин П.А., Васильковский В.О., Кандаурова Г.С., Лепаловский В.Н. // Микроэлектроника. 1991. Т. 20. С. 407.
9. Maissel L.I., Glang R. Handbook of thin film technology. N.Y.: McGraw Hill, 1970.
10. Zhukov A., González J., Blanco M. et al. // J. Mater. Res. 2000. V. 15. P. 2107.

Negative anisotropy in Ni–Fe films

P. A. Savin^{a, *}, O. A. Adanakova^a, V. N. Lepalovskij^a, E. V. Kudyukov^a, V. O. Vas'kovskiy^{a, b}

^a Ural Federal University, Yekaterinburg, 620002 Russia

^b Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, 620108 Russia

*e-mail: Peter.Savin@urfu.ru

Fe–Ni films were obtained in which the effect of “negative anisotropy” is observed. This effect consists in the formation of easy magnetization axis perpendicular to the deposition field. A model based on negative magnetostriction, and inhomogeneous stresses is tested. The model parameters were varied by applying additional stresses to the film. The effect of additional stresses is analyzed by changing the shape of the R – H curves. It is shown that changes in anisotropy occur in accordance with the model.