

06.5

Влияние термомагнитных обработок на доменную структуру аморфных пленок типа фанмет

© В.Е. Иванов, В.Н. Лепаловский

Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия
E-mail: vladimir.ivanov@urfu.ru

Поступило в Редакцию 21 марта 2022 г.

В окончательной редакции 25 апреля 2022 г.

Принято к публикации 9 мая 2022 г.

Проведены термомагнитные обработки пленок типа фанмет с осью легкого намагничивания в плоскости при действии постоянного и вращающегося магнитного поля с целью получения изотропного состояния. После термообработки в постоянном поле произошла переориентация оси легкого намагничивания по линии действия поля, в результате чего доменные границы ориентировались по новой оси. После термомагнитной обработки во вращающемся поле наблюдения доменной структуры выявили области с различным характером анизотропии, в том числе и изотропные области.

Ключевые слова: доменная структура, термомагнитная обработка, вращающееся магнитное поле.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.13.52739.19194

Магнитные металлические пленки могут стать подходящими сенсорными средами для магнитооптической визуализации и топографирования неоднородных магнитных полей [1] благодаря более высокой функциональности, поскольку они позволяют визуализировать три компоненты неоднородного поля. Наличие магнитной анизотропии и коэрцитивной силы в индикаторных пленках препятствует адекватному отражению неоднородных полей [2]. Аморфные пленки фанмет (Finemet) обладают достаточно хорошими магнитомягкими свойствами для визуализации и топографирования неоднородных полей средней напряженности [3]. Термообработки пленок типа фанмет при подходящей температуре приводят к улучшению их магнитомягких свойств, вероятно вследствие релаксации напряжений [4]. Применение вращающегося магнитного поля во время термообработки аморфных лент препятствует возникновению так называемой *M*-наведенной анизотропии в направлении ориентации намагниченности при охлаждении от температуры отжига. В результате такой термомагнитной обработки было получено практически изотропное состояние [5].

В настоящей работе изучались свойства доменной структуры (ДС), которые определяются характером магнитной анизотропии, изменяющейся в результате термомагнитных обработок. Целью работы является получение изотропного состояния пленок фанмет. Эта проблема имеет научный и практический интерес.

Образцы тонких пленок толщиной 100 nm были получены методом высокочастотного ионно-плазменного распыления мишени с составом $\text{Fe}_{72.5}\text{Cu}_{1.1}\text{Nb}_{1.5}\text{Mo}_2\text{Si}_{14.2}\text{B}_{8.7}$ диаметром 50 mm в атмосфере аргона на установке УРМЗ-013. Рабочее давление аргона составляло 10^{-3} mm Hg. Напыление пленок происходило на стеклянные подложки в присутствии по-

стоянного технологического магнитного поля напряженностью 100 Oe, прикладываемого в плоскости подложки. Направление этого поля задавало ориентацию оси легкого намагничивания (ОЛН). В отсутствие технологического поля наводится анизотропия с изменяющимся направлением ОЛН. Формирование однородной по плоскости анизотропии способствовало наблюдению тенденции ее изменения в результате термомагнитных обработок.

Согласно данным рентгеноструктурного анализа, структурное состояние пленок без термообработки можно характеризовать как рентгеноаморфное. Наблюдаемое гало в основном формируется областями когерентного рассеяния, размер которых составляет 1.1 ± 0.1 nm. Впоследствии пленки были покрыты слоем ZrO_2 для улучшения качества магнитооптических изображений и защиты пленки от окисления. Для проведения термообработок из пленок исходного размера вырезались образцы размером около 10×10 mm.

Термообработка проводилась на воздухе в присутствии однородного постоянного внешнего поля и во вращающемся магнитном поле при температурах 300, 350 и 400°C в течение часа. Постоянное и вращающееся магнитное поле в плоскости пленок напряженностью 200 Oe создавались парой магнитов. Частота вращения составляла 40 Hz. Величина поля менялась на 50% в пределах пленки. Такая неоднородность является несущественной, поскольку действие этого поля заключается в ориентации намагниченности пленки в заданном направлении.

Результаты термообработок контролировались наблюдением перестройки ДС в магнитном поле различных ориентаций и измерением коэрцитивной силы. При этом мы руководствовались следующими соображениями. Доменные границы в равновесном (размагниченном по ОЛН) состоянии ориентируются вдоль ОЛН, показывая

ее ориентацию. При размагничивании перпендикулярно оси легкого намагничивания доменные границы ориентируются по оси легкого намагничивания со значительно более плотной упаковкой, что связано с дисперсией анизотропии (так называемые заблокированные структуры) [6]. Плотность упаковки зависит от величины дисперсии анизотропии. Регулярность доменной структуры зависит от коэрцитивности доменных границ, которая также является структурно-чувствительной величиной. На данный момент нет экспериментальных наблюдений доменной структуры в изотропных пленках макроскопических размеров, однако известны особенности свойств при действии различных полей, в частности легкая ориентация намагниченности по полю в любом направлении и отсутствие доменных границ, перпендикулярных краям пленки. При наличии однородной анизотропии ОЛН легко идентифицируется размагничиванием переменным полем в различных направлениях. Наличие неоднородной по направлениям анизотропии после размагничивания идентифицируется различными ориентациями доменных границ, которые показывают локальные ориентации легких осей.

Наблюдения ДС выполнялись при помощи магнитооптического продольного эффекта Керра. При этом поле зрения практически совпадало с размерами пленки. Размагничивание пленок проводилось переменным полем промышленной частоты с убывающей до нуля амплитудой. Измеренная коэрцитивная сила исследуемых пленок составляла 2 Ое, поле анизотропии 15 Ое, температура Кюри 300°С.

В исходном состоянии после размагничивания в переменном магнитном поле, ориентированном по ОЛН, ДС имеет вид, типичный для пленок с ОЛН (ЕА) в плоскости пленки (рис. 1, а). Доменные границы ориентированы предпочтительно по ОЛН. Размагничивание перпендикулярно ОЛН приводило также к параллельной ОЛН ориентации доменных границ при их более плотной упаковке. Такое поведение, как правило, обусловлено небольшим отклонением легких осей нанокристаллитов от среднего направления (механизмом заблокированных структур [6]).

После термообработки в постоянном магнитном поле, которое было ориентировано перпендикулярно наведенной во время осаждения ОЛН, размагничивание переменным полем приводило к ориентации доменных границ параллельно вновь наведенной оси (рис. 1, б). Наши наблюдения показали, что размагничивание в перпендикулярном направлении приводит к еще более плотной по сравнению с исходным состоянием упаковке доменных границ, ориентированных вдоль новой ОЛН. Этот эксперимент показал, что температура 300°С достаточна для термического активирования релаксации анизотропии, наведенной во время осаждения. Кроме того, используемое поле было достаточным для установки намагниченности в заданном направлении во время термообработки, в результате чего была наведена ОЛН в направлении этого поля. Снижение коэрцитивной силы

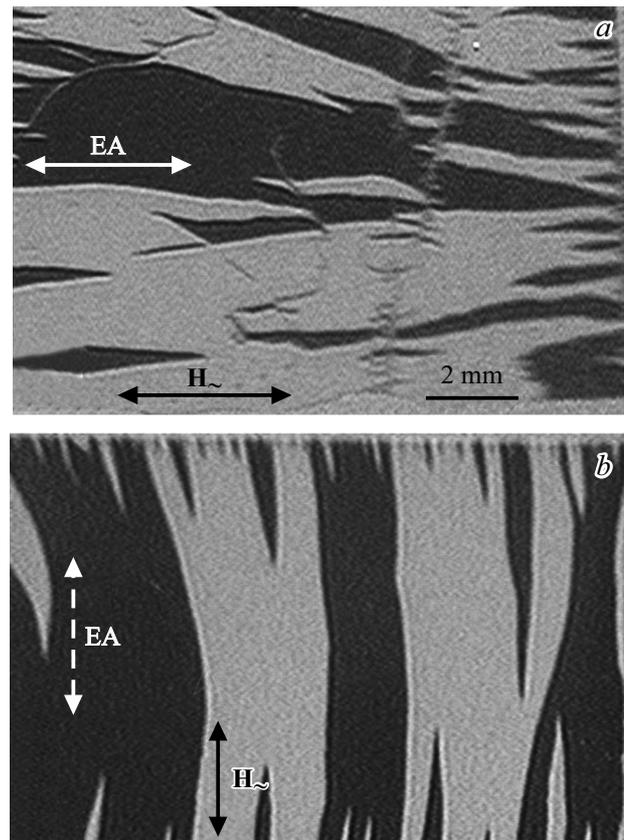


Рис. 1. Доменная структура пленки файнмет в размагниченном состоянии до термомагнитной обработки (а) и после термомагнитной обработки в присутствии постоянного поля (б). Ориентация размагничивающего поля (H_{\sim}) показана темными сплошными стрелками. Наведенная в процессе термомагнитной обработки легкая ось показана светлой штриховой стрелкой.

от 2.2 до 1.6 Ое и более регулярный вид доменной структуры после термической обработки, вероятно, указывают на снятие неоднородных остаточных напряжений. В то же время более плотная упаковка доменных границ при размагничивании перпендикулярно легкой оси свидетельствует, вероятно, о начале роста кристаллитов, обуславливающим блокирование доменной структуры.

Термообработка во вращающемся магнитном поле при температуре 300°С показала, что эта температура недостаточна велика для релаксации как исходной, так и наведенной анизотропии.

После термообработки во вращающемся магнитном поле при температуре 350°С свойства доменной структуры претерпевают качественные изменения. Размагничивание переменным полем различных направлений аналогично описанному выше способу не выявило выраженной ОЛН. Конфигурация ДС после размагничивания переменным полем в двух взаимно перпендикулярных направлениях (параллельно и перпендикулярно оси легкого намагничивания в исходном состоянии) различает-

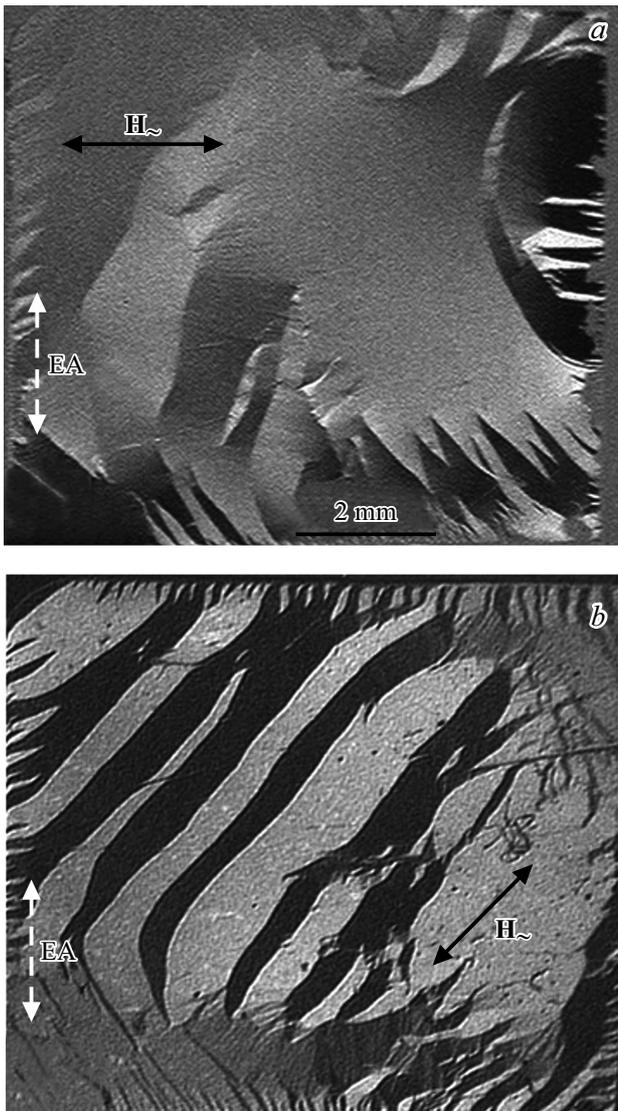


Рис. 2. Доменная структура пленки фанмет в размагниченном состоянии после термомагнитной обработки во вращающемся магнитном поле при температуре 350°C . Направление оси легкого намагничивания в исходном состоянии показано светлыми штриховыми стрелками, ориентация переменного размагничивающего поля показана темными сплошными стрелками.

ся незначительно. Пример такой конфигурации приведен на рис. 2, *a*. Отличительной особенностью является формирование кинжаловидных доменов вблизи краев пленки, в то время как в средней части отсутствуют акцентированно выраженные границы доменов (рис. 2, *a*). В этой области переменное поле при некоторых промежуточных ориентациях оказывает ориентирующее действие на намагниченность и доменные границы, они выстраиваются по линии действия поля (рис. 2, *b*). Такое поведение доменной структуры свидетельствует о полной релаксации M -наведенной анизотропии в средней части пленки.

Формирование кинжаловидных доменов вблизи краев пленки при размагничивании в любом направлении указывает на наличие анизотропии, причем ориентация легких осей меняется по периметру пленки. Вероятно, эта „остаточная“ анизотропия связана с напряжениями, которые не релаксировали во время термомагнитной обработки (или возникли в результате различных коэффициентов термического расширения пленки и подложки). Если исключить эти области из рассмотрения, можно сделать вывод, что в результате термообработки во вращающемся магнитном поле при 350°C определена тенденция формирования изотропного состояния.

Повышение температуры отжига до 400°C во вращающемся поле приводит к псевдоизотропному состоянию. После размагничивания переменным полем доменные границы в среднем ориентированы по линии действия переменного размагничивающего поля. Однако обращают на себя внимание значительная изломанность доменных границ и наличие мелкодисперсной островковой доменной структуры, что, по-видимому, связано с появлением центров пиннинга доменных границ. Об этом свидетельствует значительное повышение коэрцитивной силы до 6 Ое. Повышение температуры термообработок приводит, вероятно, к образованию кристаллических фаз [4], которые являются центрами зародышей перемагничивания по линии действия поля.

Положительный эффект приближения к состоянию изотропности продемонстрирован на примере визуализации плоскостной компоненты магнитного поля четырехполюсной магнитной системы (рис. 3). Эта система сконструирована для создания магнитного поля заданной конфигурации.

Экспериментальное магнитооптическое изображение поля системы, которое выявлено при помощи магнитной индикаторной пленки, не прошедшей термомагнитной обработки, не позволяет сделать выводы о конфигурации и величине плоскостного поля (рис. 3, *a*), поскольку анизотропия не позволяет сориентировать намагниченность индикаторной пленки по линии действия поля. Также приведено магнитооптическое изображение поля этой системы, которое выявлено „изотропной“ областью пленки, прошедшей термообработку во вращающемся магнитном поле при температуре 350°C . Это магнитооптическое изображение хорошо выявляет особые точки плоскостного поля. Непрерывное изменение контраста свидетельствует о том, что намагниченность ориентируется по направлению неоднородного поля системы (рис. 3, *b*).

Таким образом, принимая во внимание предыдущие исследования и наши результаты, мы предполагаем, что намеченный путь получения изотропных пленок для магнитооптической визуализации определяется следующими факторами.

Термообработка в поле, ориентированном перпендикулярно наведенной оси, приводит к переориентации легкой оси и снижению коэрцитивной силы, что, вероятно, связано с частичной релаксацией напряжений.

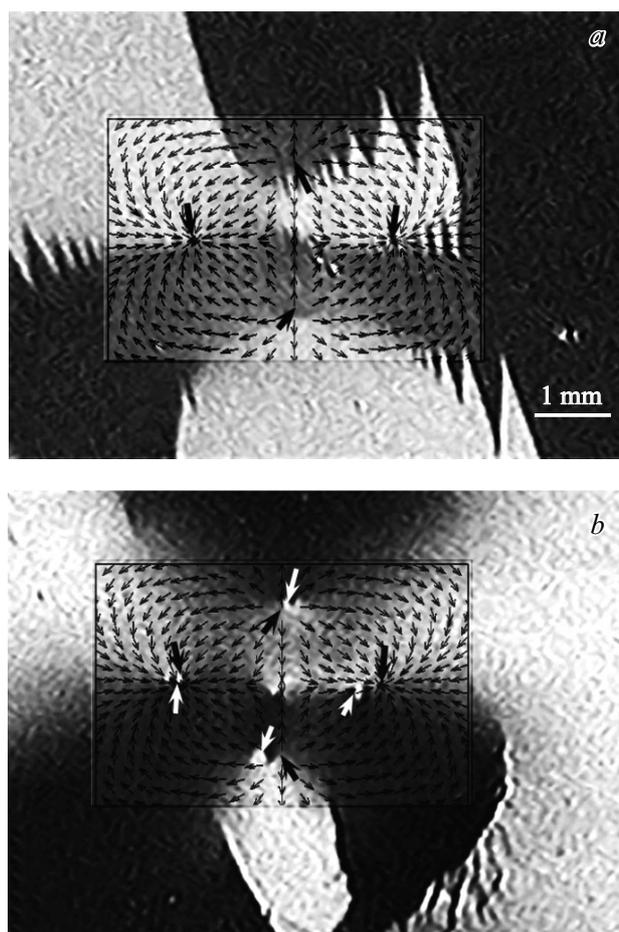


Рис. 3. Магнитооптические изображения распределения плоскостной компоненты магнитного поля четырехполюсного микромагнита, выявленные при помощи пленки фаннет до термомагнитной обработки (*a*) и после термомагнитной обработки во вращающемся магнитном поле (*b*). На магнитооптическое изображение наложена карта векторного поля, рассчитанная для магнитной системы. Темными стрелками отмечены особые точки рассчитанного поля, светлыми — поля магнита.

Вращающееся магнитное поле подавляет M -наведенную анизотропию. Термообработка во вращающемся магнитном поле при температуре 350°C выявила положительные тенденции получения изотропных пленок. Можно выделить области изотропности в средней части пленки. По периметру пленки наблюдаются анизотропные области, причем с ориентацией осей, близкой к перпендикулярной по отношению к краям пленки. Вероятно, наличие областей с выраженной анизотропией связано с остаточными напряжениями.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FEUZ-2020-0051.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.Е. Иванов, Письма в ЖТФ, **35** (9), 100 (2009). [V.E. Ivanov, Tech. Phys. Lett., **35** (5), 435 (2009). DOI: 10.1134/S1063785009050150].
- [2] V.E. Ivanov, N.A. Kulesh, J. Magn. Magn. Mater., **513**, 167067 (2020). DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.167067
- [3] V.E. Ivanov, V.N. Lepalovskij, J. Phys.: Conf. Ser., **1389**, 012112 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1389/1/012112
- [4] E.A. Mikhailitsyna, V.A. Kataev, A. Larrañaga, V.N. Lepalovskij, A.P. Turygin, J. Magn. Magn. Mater., **415**, 61 (2016). DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.01.040
- [5] R. Schäfer, G. Herzer, IEEE Trans. Magn., **37** (4), 2245 (2001). DOI: 10.1109/20.951137
- [6] A. Hubert, R. Schäfer, in *Magnetic domains* (Springer, N.Y., 1998), p. 428.