

## ОТЗЫВ

**Официального оппонента Комогорцева Сергея Викторовича на диссертационную работу Михалицыной Евгении Александровны «Магнитная анизотропия и гистерезисные свойства аморфных и нанокристаллических пленок Fe-M-Cu-Si-B (M: Nb, NbMo, W)», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений»**

### **Актуальность работы**

Тонкие магнитные пленки являются основой функциональных элементов в современных технологиях управления информацией: электронике, спинтронике, магнотронике. Значительный технологический прогресс в этих областях приводит к актуальности поиска новых материалов для магнитных пленок. К настоящему моменту достаточно хорошо изучены и внедрены пленки на основе простых систем: однокомпонентные Fe, Co, Ni, Gd, двухкомпонентные Fe-Ni, Co-Pt, Fe-Pt, Fe-Co, Fe-Cr, Fe-Si и т.д. Одним из новых вызовов для исследователей является приготовление многокомпонентных пленок таких сплавов, которые уже зарекомендовали себя “лидерами” с точки зрения свойств и характеристик, но изначально изготавливаются в объемном состоянии. Аморфные и нанокристаллические системы Fe-M-Cu-Si-B являются примером таких сплавов,готавливаемых в виде ленты толщиной несколько десятков микрон. В течение последних десятилетий подробно изучались многие вопросы магнетизма и материаловедения таких сплавов. Накопленные сведения, с одной стороны позволяют надеяться на успех в приготовлении магнитных пленок состава Fe-M-Cu-Si-B с улучшенными свойствами, с другой стороны указывают, что в тонкопленочном состоянии физика и материаловедение этих сплавов будут совершенно новыми. Поэтому работа Е. А. Михалицыной, посвященная получению и исследованию структуры и магнитных свойств сплава Fe-M-Cu-Si-B (M: Nb, NbMo, W) в виде тонких пленок, представляется актуальной и интересной.

### **Оценка проведенного исследования и полученных результатов**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы ее задачи, отмечена новизна, научное и практическое значение результатов, а также приведены сведения об апробации работы.

**В 1-й главе** представлен обзор основных методик получения тонких пленок. Рассмотрены некоторые механизмы связи свойств тонких пленок с их толщиной и

структурой. Подробно рассмотрены вопросы получения и корреляций структурно-свойства в лентах сплава Fe-M-Cu-Si-B. Также рассмотрены уже имеющиеся работы по приготовлению и исследованию пленок Fe-M-Cu-Si-B. Глава завершается формулировкой основных задач работы.

**Во 2-й главе** описаны детали технологии высокочастотного ионно-плазменного распыления в атмосфере аргона, примененной для синтеза пленок Fe-M-Cu-Si-B (M: Nb, NbMo, W). Описаны детали последующей термообработки пленок. Также дано детальное описание использованных методов и подходов к исследованию структуры и магнитных свойств. По результатам главы автор демонстрирует, что использованный метод позволяет получать пленки  $Fe_{72,5}Nb_{1,5}Mo_2Cu_{1,1}Si_{14,2}B_{8,7}$ ,  $Fe_{73,5}Nb_3Cu_1Si_{13,5}B_9$  и  $Fe_{73,5}W_3Cu_1Si_{13,5}B_9$  контролируемой толщины (от 10 до 200 нм) и состава.

**В 3-й главе** приведены результаты исследования намагниченности насыщения и коэрцитивной силы тонких пленок полученных сплавов до термической обработки. Обнаружено, что в среднем намагниченность уменьшается при уменьшении толщины пленок. Такое снижение автор связывает с наличием слоя с нулевой намагниченностью на поверхности пленок. Предполагается, что этот слой представляет собой немагнитный оксид железа. Получена оценка толщины этого слоя порядка 4,5 нм. Обнаружено, что коэрцитивная сила пленок растет до толщин 30 нм, а при дальнейшем росте толщины уменьшается. Используя расчеты, автор аргументирует, что критическая толщина 30 нм обусловлена сменой типа доменных стенок. Рост величины коэрцитивной силы с уменьшением толщины описан в рамках магнитостатического вклада от неровностей поверхности пленки. При этом использованы данные о рельефе, и магнитных константах измеренные в независимых экспериментах. В результате получено впечатляющее согласие теоретической оценки и эксперимента.

**В 4-й главе** даны результаты исследования влияния термообработки на структуру и некоторые свойства полученных тонких пленок. В исходном состоянии пленки рентгеноаморфны. В процессе термообработки на картине рентгеновской дифракции появляется достаточно узкий пик, свидетельствующий о кристаллизации. Обнаружено, что кристаллизация в пленках при нагреве начинается раньше, чем в лентах, а размер зерен, стабилизирующийся при отжиге, больше чем в лентах. Обнаружено немонотонное изменение параметра решетки ОЦК железа в процессе отжига, которое объясняется процессами насыщения кристаллита железа кремнием, а так же упорядочением атомов кремния в решетке ОЦК железа.

**В 5-й главе** приводятся результаты исследования магнитной анизотропии полученных пленок, как в исходном состоянии, так и после термообработки. Исследования магнитной анизотропии выполнены как в масштабе всего образца (наведенная макроскопическая магнитная анизотропия), так и на масштабах

кристаллита и стохастического магнитного домена (локальная магнитная анизотропия). Обнаружено, что в исходном состоянии (до отжига) пленки характеризуются наведенной одноосной анизотропией с осью легкого намагничивания вдоль направления магнитного поля, приложенного при напылении образцов. Термообработка приводит к исчезновению наведенной анизотропии. Автор связывает этот процесс с релаксацией напряжений в пленках, а в качестве причины возникновения наведенной анизотропии предлагает магнитострикционную деформацию пленок при напылении. Анализ кривых приближения намагниченности к насыщению использован для оценки параметров стохастической магнитной структуры пленок. С уменьшением толщины пленок протяженность корреляций намагниченности становится существенно больше чем толщина пленки, что приводит к переходу от трехмерных к двумерным корреляциям намагниченности. Эти данные находят подтверждение при исследовании неоднородности намагниченности методом магнитной силовой микроскопии.

К наиболее важным научным результатам, полученным диссертантом, можно отнести следующее:

Впервые проведен синтез и систематическое исследование структуры и магнитных свойств тонких магнитных пленок Fe-M-Cu-Si-B (M: Nb, NbMo, W) с толщиной от 10 до 200 нм. Установлены зависимости намагниченности пленок Fe-M-Cu-Si-B от толщины. Изучена зависимость коэрцитивной силы пленок Fe-M-Cu-Si-B, от их толщины L. Обнаружена немонотонная зависимость с максимумом вблизи 30 нм. Исследованы детали процесса кристаллизации пленок Fe-M-Cu-Si-B. Обнаружено, что в процессе кристаллизации размер зерен ОЦК-FeSi стабилизируется на уровне 16–20 нм. Показано, что с уменьшением толщины пленок кристаллизация протекает медленнее.

Исследованиями закона приближения намагниченности к насыщению и изображений магнито-силовой микроскопии в пленках Fe-M-Cu-Si-B впервые измерены параметры стохастической магнитной структуры. Показано, что с уменьшением толщины пленок наблюдается переход от трехмерных к двумерным корреляциям намагниченности.

### **Практическая значимость работы**

Результаты комплексной работы дают ответ на важный вопрос о перспективах получения нанокристаллических сплавов типа *finemet* в виде тонких пленок. Обнаруженные закономерности влияния толщины и структурного состояния на магнитные свойства пленок закладывают основу для дальнейшего синтеза новых пленок в рамках применяемого подхода – магнетронное напыление многокомпонентного аморфного сплава и его последующий отжиг.

Рецензируемая работа не свободна от отдельных недостатков.

1. Под кинетикой обычно понимают исследование зависимости степени превращения от времени. Поэтому название пункта 4.2.2 кажется не вполне удачным.
2. Кристаллизация при нагреве представляет собой непрерывный и необратимый процесс. Следует иметь в виду, что в течение измерения одного спектра (18 мин.) превращения также происходят. В виду этого можно предположить, что ширина пиков будет зависеть от времени измерения. Так как из ширины пиков оценивается размер кристаллита ОЦК Fe, возникает вопрос: велика ли погрешность вносимая таким протоколом измерения.
3. Формула 3.1 подразумевает нулевую намагниченность поверхностного оксида. Оксидные слои с антиферромагнитной структурой действительно характеризуются нулевой намагниченностью, но обычно приводят к эффекту обменного смещения петли гистерезиса в двухслойных пленках содержащих также ферромагнитный слой. Такое смещение, однако, не наблюдается на экспериментальных петлях магнитного гистерезиса.
4. Коэрцитивная сила снижается с уменьшением толщины пленок ниже 30 нм. Объяснение этому не предлагается.
5. Во 2-й главе о температуре подложек сообщается «Температура подложек при получении пленок составляла не более, чем 40 – 50 °С.» Учитывая, что структура пленок очень чувствительна к температуре подложки, хотелось бы видеть не только оценку сверху, но некоторый доверительный интервал для такой температуры.
6. В объяснениях к рисунку 2.4 автор обсуждает собственные результаты, но в подписи к рис. 2.4 почему-то дана ссылка на чужую статью.
7. Из подписи рис.3.9 и из самого рисунка нельзя понять, каким пленкам соответствуют разные символы. Обсуждения в тексте нет, однако есть вывод к главе касающийся этих результатов.

### **Общий вывод**

Анализ диссертации Михалицыной Е.А. позволяет сделать заключение о достаточно высоком научном уровне и практической значимости полученных в ней результатов. Работа обладает четкой структурой, материал подается автором в логической последовательности, продиктованной поставленной целью и раскрывающими ее задачами. Математический аппарат используется соискателем корректно. Выполненные расчеты хорошо согласуются с экспериментальными

данными, что указывает на их достоверность. Результаты работы хорошо опубликованы и прошли всестороннюю апробацию на российских и международных конференциях.

В целом, считаю, что работа Михалицыной Е.А. представляет собой самостоятельное законченное исследование, в котором содержится решение важной научной задачи, связанной с синтезом и систематическим исследованием структуры и магнитных свойств тонких магнитных пленок Fe-M-Cu-Si-B. Автореферат полностью отражает содержание диссертации и представленные в ней выводы. Профиль диссертации соответствует формуле специальности 01.04.11– (физика магнитных явлений), а сама работа по своему научному уровню, значению и достоверности результатов полностью соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и удовлетворяет требованиям п. 9 Положения «О порядке присуждения ученых степеней». Таким образом, Михалицына Евгения Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физ.-мат. наук по указанной выше специальности.

#### Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, доцент,  
старший научный сотрудник  
лаборатории физики магнитных плёнок

Комогорцев Сергей Викторович

«1» 06 2018 г.

Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения  
Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

Адрес: 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 38

Тел. +7(391) 243-26-35

Факс +7(391)243-89-23

E-mail: [komogor@iph.krasn.ru](mailto:komogor@iph.krasn.ru)

«Я, Комогорцев Сергей Викторович, даю свое согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку»

«1» 06 2018

Подпись Комогорцева С.В. заверяю



Златичка А.О.  
уг. секретаря