

## ОТЗЫВ

официального оппонента Моисеева Алексея Анатольевича 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.

Высокий интерес к аморфным и нанокристаллическим магнитомягким сплавам в первую очередь обусловлен широкими перспективами их практического применения в современном приборостроении. Уникальное сочетание магнитомягких и механических свойств данных сплавов определило область их применения в качестве чувствительных элементов различных сенсоров. При изготовлении сенсоров предпочтительны технологии, позволяющие получить чувствительный элемент в виде тонкой пленки. Это позволяет снизить материалоемкость производства и, как следствие, конечную себестоимость сенсора, при этом открываются возможности миниатюризации устройств и расширения их функциональности за счет применения нескольких чувствительных элементов. В настоящее время свойства сплавов типа Finemet в аморфном и нанокристаллическом состояниях достаточно хорошо изучены для образцов в виде лент и проволок. Однако ожидаемое изменение свойств данных сплавов при переходе в тонкопленочное состояние вызывает ряд вопросов. Поиску ответов на данные вопросы, а так же исследованию возможности модификации свойств тонких пленок сплавов типа Finemet и посвящена диссертационная работа Михалицыной Евгении Александровны «Магнитная анизотропия и гистерезисные свойства аморфных и нанокристаллических пленок Fe-M-Cu-Si-B (M: Nb, NbMo, W)», которая несомненно является актуальной и демонстрирует новизну полученных результатов.

В данной работе исследуются серии тонких пленок сплавов Fe-M-Cu-Si-B, в котором атом M - ингибитор роста зерен, варьировался Nb, NbMo, W. Основные исследования проведены для пленок толщиной от 10 нм до 200 нм, при этом для дополнительных исследований химического состава получены пленки толщиной 500 нм.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Полный объем текста составляет 165 страниц, 56 информативных рисунков, 10 таблиц и 230 источников в списке использованной литературы.

Во введении обозначено современное состояние проблемы, исходя из которой формулируются цели и задачи исследования. Представлены краткое описание методики экспериментов, научная новизна полученных результатов, теоретическая и практическая значимость работы. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен научный обзор основных работ, касающихся технологий получения и формирования свойств тонких пленок. Подробно освещены работы, в которых представлены результаты исследований структурного состояния и магнитных свойств сплавов типа Finemet, а также особенности данных сплавов в тонкопленочном состоянии. Представленный обзор еще раз подтверждает актуальность исследования и позволяет конкретизировать цели и задачи, что успешно сделано диссертантом.

Во второй главе достаточно подробно представлена методика эксперимента и аттестации образцов. При получении пленок контролировалось их структурное состояние. Оценено влияние технологических параметров на магнитные свойства образцов. Аттестация структурного состояния, а также исследования магнитных свойств полученных образцов проводились на современном высокоточном оборудовании. Отдельно стоит отметить результаты исследования соответствия химического состава пленок и исходного сплава. Столкнувшись с рядом экспериментальных трудностей, диссертант провел дополнительные исследования с целью минимизации влияния подложки на результаты определения химического состава пленок. Полученные дополнительные результаты хорошо коррелируют с ранее известными, что формирует положительное впечатление о работе в целом.

Третья глава посвящена исследованию влияния толщины пленок Fe-M-Cu-Si-B (M: Nb, NbMo, W) в исходном состоянии на их магнитные характеристики. Получены и объяснены зависимости намагниченности насыщения и коэрцитивной силы от толщины пленок для всех исследуемых составов. Снижение намагниченности насыщения при уменьшении толщины пленок автор связывает с увеличением относительного объема естественного неферромагнитного оксидного слоя. Проведенная оценка толщины данного оксидного слоя соответствует результатам, полученным другими авторами. Экспериментальная зависимость коэрцитивной силы от толщины пленок с максимумом в области малых толщин также аналогична зависимостям, представленным в работах других авторов. Данный факт еще раз подтверждает корректность проведения и анализа результатов эксперимента, выполненного автором.

В четвертой главе диссертации представлены результаты исследования влияния термообработки на структурные превращения в исследуемых образцах. Исходное состояние характеризуется как рентгеноаморфное, однако результаты рентгеноструктурного анализа указывают на области когерентного рассеяния размером 1-2 нм в области углов, соответствующих ОЦК решетке Fe. Автором данные области рассматриваются как предвыделения кристаллической фазы. Толщина пленки оказывает существенное влияние на кинетику кристаллизации исследуемых образцов. Автором установлено, что в тонкопленочном состоянии процесс кристаллизации начинается при более низких температурах в сравнение с лентами аналогичного состава, при этом толщина пленки влияет на скорость кристаллизации. Для

объяснения наблюдаемых зависимостей привлечены процессы упорядочения атомов кремния, которые корректно укладываются в общепринятые теории.

Пятая глава посвящена исследованию магнитной анизотропии исследуемых образцов с учетом результатов исследований структуры и магнитных характеристик, представленных в предыдущих главах. Получение пленок в присутствии внешнего магнитного поля способствует формированию одноосной макроскопической магнитной анизотропии. Автором показано, что наиболее вероятным механизмом формирования данной анизотропии является закрепление магнитострикционной деформации. Термообработка приводит к необратимой релаксации внутренних напряжений и переходу пленки в магнитоизотропное состояние. Полученный результат позволяет подбирать режимы предварительной термо- или термомагнитной обработки для получения заданного набора магнитных характеристик, что актуально для практического применения. Проведенный автором магнитокорреляционный анализ показал изменение размерности корреляций намагниченности при уменьшении толщины пленки. Данный факт представляет интерес как для разработчиков практических приложений, так и для исследователей в области физики магнитных явлений.

Диссертация Евгении Александровны является законченной исследовательской работой, выполненной на профессиональном уровне, и заслуживает высокой положительной оценки. Сопоставление результатов, полученных на современном оборудовании, с научными обзорными данными подтверждает их достоверность. Общему положительному впечатлению о работе способствует высокое качество представления экспериментальных результатов в тексте диссертации.

По материалам диссертационной работы автором опубликовано 4 научные статьи в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Результаты работы докладывались и обсуждались с ведущими специалистами как на всероссийских, так и международных конференциях. Автореферат диссертации полностью отражает содержание диссертационной работы.

По диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

1. Аморфное состояние сплавов, так же как и нанокристаллическое, является неравновесным, в связи с чем для практического применения актуальным является определение диапазонов температурной обратимости исследуемых свойств. В работе не указано на проведение подобных исследований.

2. По тексту работы говорится о проведении исследований на серии образцов, при этом статистических данных о результатах не приводится. Возникает вопрос о воспроизводимости экспериментальных результатов.

3. Процесс получения пленок с Nb и W осуществлялся со скоростью 5,3 нм/мин, тогда как пленки с NbMo получены со скоростью 3,4 нм/мин. Величина скорости осаждения определяется размерами мишеней исходных сплавов. Почему мишени не изготовлены одинакового размера для обеспечения одинаковой скорости осаждения?

4. Почему в третьей главе зависимость коэрцитивной силы от толщины представлены для всех исследуемых составов, тогда как зависимость намагниченности насыщения от толщины представлена только для пленок с NbMo?

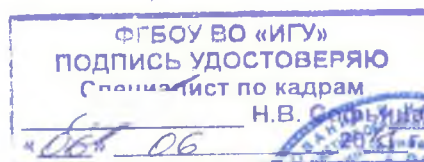
5. Из трех исследуемых составов пленки сплава с NbMo демонстрируют значительное отличие коэрцитивной силы. Почему для проведения магнитокорреляционного анализа выбран состав с Nb?

Приведенные замечания не снижают научной ценности диссертационной работы и не влияют на общее положительное впечатление. Диссертация по содержанию, предмету, целям и результатам исследований полностью соответствует избранной специальности – Физика магнитных явлений.

Диссертационная работа Михалицыной Евгении Александровны «Магнитная анизотропия и гистерезисные свойства аморфных и нанокристаллических пленок Fe-M-Cu-Si-B (M: Nb, NbMo, W)» полностью удовлетворяет требованиям п. 9 Положения «О порядке присуждения ученых степеней» ВАК Министерства образования и науки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Михалицына Е.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11. – Физика магнитных явлений.

кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры физики  
Педагогического института ИГУ,  
«06» июня 2018 г.

А.А. Моисеев



Почтовый рабочий адрес:

664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Иркутский государственный университет», Педагогический институт, кафедра физики

Раб. тел. +7 (3952) 200-976

Моб. тел. +7 9

e-mail: [moiseev.al.an@gmail.com](mailto:moiseev.al.an@gmail.com)