

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ  
ОРГАНИЗАЦИЙ (ФАНО РОССИИ)  
Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
ИНСТИТУТ МЕТАЛЛУРГИИ  
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ  
им. А.А. Байкова  
Российской академии наук  
(ИМЕТ РАН)**

119334, Москва, Ленинский пр., 49  
Тел. (499) 135-20-60, 135-86-11; факс: 135-86-80  
E-mail: [imet@imet.ac.ru](mailto:imet@imet.ac.ru) <http://www.imet.ac.ru>  
ОКПО 02698772, ОГРН 1027700298702  
ИНН/КПП 7736045483/773601001

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора ИМЕТ РАН  
чл.-корр. РАН, д.т.н. Колмаков А.Г.

17 мая 2018 г.



### **Отзыв ведущей организации**

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**

Сплавы системы легирования Fe-M-Cu-Si-B (M - переходные металлы), получаемые в виде лент по технологии быстрой кристаллизации расплава, характеризуются сочетанием высоких значений индукции насыщения и магнитной проницаемости с чрезвычайно низкими значениями коэрцитивной силы. Так называемые ленточные магнитомягкие сплавы типа FINMET нашли широкое применение в промышленности, обеспечивая возможность миниатюризации, главным образом, электротехнического оборудования. Для развития современной микроэлектроники требуется более высокий, чем достигнут на ленточных сплавах, уровень магнитных свойств, и получение этих сплавов в виде тонких и сверхтонких плёнок различной толщины.

В этой связи, диссертационная работа Михалицыной Е.А., посвященная исследованию закономерностей влияния толщины и условий термообработки на структуру, магнитную анизотропию и гистерезисные свойства плёнок, полученных методом высокочастотного ионно-плазменного распыления из мишеней, изготовленных

из сплавов систем Fe-M-Cu-Si-B (M- один из ряда Nb, Nb-Mo или W), является актуальной.

### **Научная новизна**

В диссертационной работе впервые получены плёнки сплавов Fe<sub>73,5</sub>Nb<sub>3</sub>Cu<sub>1</sub>Si<sub>13,5</sub>B<sub>9</sub>, Fe<sub>73,5</sub>W<sub>3</sub>Cu<sub>1</sub>Si<sub>13,5</sub>B<sub>9</sub> и Fe<sub>72,5</sub>Nb<sub>1,5</sub>Mo<sub>2</sub>Cu<sub>1,1</sub>Si<sub>14,2</sub>B<sub>8,7</sub> широкого интервала толщин (от 10 до 200 нм). Исследована зависимость значений намагниченности насыщения и коэрцитивной силы от толщины полученных плёнок, дано феноменологическое описание полученных зависимостей, предложена физическая природа наблюдаемых процессов,

Получены данные о влиянии условий термообработки на фазово-структурные превращения, протекающие в процессе отжига в плёнках различной толщины, исходно полученных в аморфном (рентгено-аморфном) состоянии. Показано, что в исходном после осаждения состоянии структура плёнок характеризуется наличием зёрен размером 1-2 нм, являющихся зародышами кристаллизации при последующем отжиге. При этом процесс роста зерна с повышением температуры сопровождается процессом упорядочения, протекающим при соответствующей температуре в твёрдом растворе  $\alpha$ Fe (Si), влияющим на процесс роста зерна.

Изучено влияние условий термообработки и толщины плёнок на формирующуюся в них магнитную анизотропию. Рассматриваются причины возникновения наведённой одноосной магнитной анизотропии в плёнках, полученных при осаждении в присутствии внешнего магнитного поля. Делается предположение о влиянии магнитострикционной деформации, возникающей на межфазной границе плёнка - подложка.

Методом корреляционной магнитометрии и магнито-силовой микроскопии, выполнен анализ стохастической магнитной доменной структуры плёнок. Формирующаяся в исследованных плёнках стохастическая доменная структура характеризуется радиусом магнитных корреляций и усредненной константой анизотропии. Установлено, что при уменьшении толщины пленок происходит изменение размерности корреляций намагниченности от трехмерной к двумерной.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Выполненное в работе комплексное исследование тонких пленок Fe-M-Cu-Si-B (M=Nb, W, NbMo) выявило закономерности влияния толщины и структурного состояния на их магнитные свойства. Полученные результаты дополняют существующий и опубликованный в научной литературе массив экспериментальных данных о влиянии легирующих элементов в тонких пленках Fe-M-Cu-Si-B на их магнитные свойства. Возможность достигнуть

наименьшую, среди исследованных плёнок, коэрцитивную силу в плёнках, легированных ниобием, позволяет рассматривать плёнки с ниобием как кандидаты для применения в устройствах микроэлектроники. Важное практическое значение имеет совокупность экспериментальных результатов о влиянии температуры отжига на кинетику кристаллизации аморфных (рентгено-аморфных) пленок и их гистерезисные свойства, о стабильности магнитных свойств в них вплоть до  $550^{\circ}\text{C}$ . Эти данные позволяют рекомендовать условия термообработки, обеспечивающие формирование оптимального фазово-структурного состояния и требуемого уровня магнитных свойств тонких пленок Fe-M-Cu-Si-B (M: Nb, W, NbMo).

**Достоверность полученных результатов** обеспечена использованием взаимно дополняющего современного экспериментального оборудования. Результаты, полученные разными методами, согласуются друг с другом. Представленные результаты согласуются с данными, полученными ранее другими исследователями.

#### **Замечания**

1. Потребность микроэлектроники в плёночных магнитомягких материалах связана с развивающейся быстрыми темпами миниатюризацией этих устройств и совершенствованием технологии их получения, а не, как указано в диссертации, “уменьшение стоимости и возможности применения в более широком диапазоне устройств”.

2. Отсутствует объяснения более эффективного влияния Nb, по сравнению с другими исследованными легирующими переходными металлами, M, на достижение минимальной величины коэрцитивной силы после отжига.

3. На фазово-структурное состояние плёнок магнитомягких сплавов оказывает влияние комплекс различных факторов, при этом, толщина плёнки не “в первую очередь”, как указано в диссертации (с.49).

4. Не указано сохраняется ли в температурном интервале отжига плёнок магнитное упорядочение постоянных магнитов Sm-Co, используемых для наведения магнитной анизотропии в плёнках (с. 39).

5. Не проведена оценка шероховатости использованных в работе подложек Si/SiO<sub>2</sub>. Использование литературных данных о таком параметре не является достаточным (с. 43).

6. Не приводится объяснение, почему диамагнитная стеклянная подложка при отрицательной температуре (5К) демонстрирует кривую намагничивания не типичную для диамагнетика (рисунок 2.9, с.50).

7. Изменение зависимости коэрцитивной силы от толщины плёнки объяснено изменением типа доменной стенки (с. 58). Однако, не учитывается то, что причиной

изменения коэрцитивной силы может быть изменение размерности упаковки зёрен при изменении толщины плёнки, обнаруженное и описанное с использованием метода корреляционной магнитометрии в последней главе работы.

8. При обсуждении количественных результатов корреляционной магнитометрии (с. 121) сказано, что структурный коэффициент автокорреляции, определённый из локальной корреляционной функции, убывает вдвое на расстоянии  $R_c$ . По нашему мнению количественная оценка “убывает вдвое” может быть сделана только при определении корреляционной функции из анализа прямых экспериментальных результатов (микроскопия, дифракционные методы и т.п.).

9. Термин “трансформация структурного и фазового состояния” (с.64) обычно не используется в лексике материаловедения. Приемлемыми терминами являются “превращение или эволюция”.

Сделанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общую положительную оценку научной и практической значимости работы.

### **Заключение**

Диссертация Михалицыной Евгении Александровны «Магнитная анизотропия и гистерезисные свойства аморфных и нанокристаллических плёнок Fe-M-Cu-Si-B (M: Nb, NbMo, W)» является законченной научно-квалификационной работой, в которой получены новые результаты в области физики магнитомягких тонких плёнок. Содержание диссертации соответствует пункту 2. «Экспериментальные исследования магнитных свойств и состояний веществ различными методами, установление взаимосвязи этих свойств и состояний с химическим составом и структурным состоянием, выявление закономерностей их изменения под влиянием различных внешних воздействий» и пункту 3. «Исследование изменений различных физических свойств вещества, связанных с изменением их магнитных состояний и магнитных свойств» паспорта специальности 01.04.11 Физика магнитных явлений.

Структура и содержание диссертации соответствуют цели и задачам исследования. Работа хорошо оформлена. Личный вклад автора не вызывает сомнений.

Автореферат и опубликованные работы в полной мере отражает содержание диссертации.

Результаты работы могут быть использованы в научно-исследовательских организациях и вузах, занимающихся исследованиями в области физики магнитных явлений, физики конденсированного состояния вещества и проблем материаловедения.

На основе актуальности темы исследования, достоверности, научной новизны, практической и теоретической значимости полученных результатов можно заключить, что

диссертационная работа Михалицкой Е.А. отвечает требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842. Автор диссертации, Михалицкая Евгения Александровна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Диссертационная работа Михалицкой Е.А. была заслушана и получила положительную оценку на заседании Лаборатории конструкционных сталей и сплавов Института металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской академии наук. (Протокол заседания от 17 мая 2018).

Заведующий лабораторией

Конструкционных сталей и сплавов ИМЕТ РАН

кандидат технических наук

Баннх Игорь Олегович

119334 Москва, Ленинский пр-т, 49

Телефон: +7 (499) 135-32-15

Факс: +7 (499) 135-86-80

e-mail: igorbannykh@gmail.com