

## ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертацию Теджетова Валентина Алексеевича «Развитие физико-химической концепции формирования фазового состояния и структуры пленок FeZrN и FeTiB с особыми магнитными свойствами», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 (01.04.07) – «Физика конденсированного состояния»

Диссертационная работа Теджетова Валентина Алексеевича посвящена исследованию пленок систем Fe-Zr-N и Fe-Ti-B, относящимся к системе сплавов Fe-Me-X, содержащих MeIV, составы которых соответствуют эвтектическим в равновесных квазибинарных системах Fe-MeIVX. Стимулом для исследования свойств этих материалов явилось экспериментальное указание на необычно высокое значение магнитной индукции насыщения в плёнках нитрида Fe<sub>16</sub>N<sub>2</sub>, существенно превышающее значение для αFe. Величина магнитного момента в насыщении является важной характеристикой ферромагнитных пленок и тонких слоев для различных приложений, таких как записывающие головки в магнитных информационных носителях, в устройствах магнитной сенсорики, спинтроники и т.д. Особое значение приобретает возможность контролировать магнитный момент в комбинации с другими характеристиками, такими как коэрцитивность, магнитная анизотропия, магнитоупругие, механические, антикоррозионные свойства и пр. Поэтому, тема диссертационной работы Теджетова В. А. является безусловно **актуальной**.

Диссертационная работа Теджетова В. А. хорошо структурирована, материал представлен последовательно и логично. Диссертация состоит из введения, 5 глав, перечня основных результатов и выводов, основных публикаций по результатам работы и списка литературы. Работа изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 50 рисунков и 12 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 155 наименований.

Во введении кратко рассмотрена ситуация с развивающейся индустрией элементов магнитной памяти и требуемой для нее магнитомягких пленок на основе Fe. Обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи, диссертационной работы, приведены основные положения, выносимые на защиту,

отмечены научная новизна и практическая значимость. Во введении также обоснована достоверность полученных результатов, содержатся сведения об апробации результатов и личном вкладе автора.

Первая глава представляет собой литературный обзор, который достаточно полно отражает текущее состояние вопроса. Здесь рассмотрены опубликованные данные о равновесных тройных и образующих их двойных диаграммах состояния систем Fe-Zr-N и Fe-Ti-B. На основе выполненного анализа научно-технической литературы сформулированы цель и задачи исследования и обоснован выбор объектов исследования – плёнки сплавов систем Fe-Zr-N и Fe-Ti-B.

Во второй главе диссертации описаны используемые в работе ВЧ- и DC-методы и режимы магнетронного осаждения пленок системы Fe-Zr-N: доэвтектических ( $\text{Fe}_{92-89}\text{Zr}_{3-4}\text{N}_{5-7}$ ) и близких к эвтектическому ( $\text{Fe}_{83-78}\text{Zr}_{9-11}\text{N}_{8-12}$ ) составов в области двухфазного равновесия Fe-ZrN; пленок системы Fe-Ti-B: доэвтектических ( $\text{Fe}_{98.5-89}\text{Ti}_{0.5-4}\text{B}_{1-7}$ ), близких к эвтектическому ( $\text{Fe}_{91-75}\text{Ti}_{3-6}\text{B}_{5-20}$ ), и заэвтектических ( $\text{Fe}_{57-56}\text{Ti}_{9-16}\text{B}_{28-34}$ ), составов в области двухфазного равновесия Fe-TiB<sub>2</sub> и составов близких к равновесной эвтектике по В с избытком титана ( $\text{Fe}_{86-74}\text{Ti}_{8-17}\text{B}_{3-9}$ ); пленки-эталон: Fe и  $\text{Fe}_{65}\text{Zr}_{35}$ . Описаны использованные автором методы определения химического состава пленок (энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (ЭДС), метод оптической эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда (ОЭСТР)), методы исследования структуры пленок (рентгеновская дифракция (РД), просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ)), метод количественного фазового анализа (полнопрофильный метод Ритвельда - определение объемной доли фаз, размеров зерна и микродеформации в нем), Оценка величины и знака макронапряжений в пленках (рентгенодифракционный метод  $\sin^2\Psi$ ). Описан метод вибрационной магнитметрии для определения статических магнитных свойств ((магнитной индукции в насыщении,  $B_S$  и коэрцитивности,  $H_C$ ).

В Главе 3 излагаются результаты исследований пленок FeZrN, полученных DC- и ВЧ-магнетронным осаждением. Исследованы зависимости химического состава и морфологии пленок, фазового состава, структуры и макронапряжений в пленках от скорости роста пленок, в исходном состоянии (после осаждения) и после отжига.

Аналогичные исследования были проведены с пленками FeTiB, результаты которых изложены в Главе 4.

В Главе 5 рассматриваются результаты измерения статических магнитных свойств  $B_S$  и  $H_C$  плёнок FeZrN и FeTiB, фазовый состав которых сформирован при различных условиях осаждения и последующего отжига. Установлено, что максимальное значение индукции насыщения  $B_S$  пленок FeZrN – 2,2 Тл и пленок FeTiB – 1,8 Тл снижается до ~1,3 и ~1,4 Тл, соответственно, с увеличением количества второй неферромагнитной или ферромагнитной фазы с меньшей, чем у  $\alpha$ Fe, величиной  $B_S$ . С увеличением температуры отжига от 300 до 600°C  $B_S$  уменьшается в пленках FeZrN вплоть до 1,1-1,5 Тл и практически не изменяется в пленках FeTiB. Отжиг при 200°C, однофазных пленок FeTiB, приводит к увеличению  $B_S$  до значений 2,1-2,2 Тл. Все исследованные плёнки в исходном состоянии являются магнитомягкими с коэрцитивной силой  $H_C$ , меняющейся в зависимости от состава, в интервале 0,02- 2,72 кА/м для пленок FeZrN и 0,24-2,96 кА/м для пленок FeTiB.

Полученные автором результаты и положения, выносимые на защиту, обладают несомненной научной **новизной**. Из новых результатов, полученных в диссертационной работе, особый интерес представляют следующие:

Впервые исследованы закономерности формирования фазово-структурного состояния плёнок FeZrN и FeTiB в широком диапазоне составов, получаемых в различных условиях магнетронного осаждения, и его эволюция при последующем отжиге.

Впервые выполнена количественная оценка статических магнитных свойств ( $B_S$  и  $H_C$ ) плёнок FeZrN и FeTiB широкого диапазона составов, дано их структурное обоснование на основе исследованной взаимосвязи свойств с фазово-структурным состоянием плёнок.

Важным достоинством диссертации, определяющим ее **практическую важность**, является формулировка положений физико-химической концепции целенаправленного выбора химического состава и условий получения плёнок FeZrN и FeTiB, обеспечивающих формирование в них двухфазной нанокристаллической, дисперсно-упрочнённой структуры  $\alpha$ Fe+ZrN/TiB<sub>2</sub>. Это предоставляет возможность ускорить процесс создания плёнок Fe-Me<sub>IV</sub>X с

комплексом свойств, требуемых для применения в современной магнитной микроэлектронике.

**Достоверность** представленных экспериментальных результатов не вызывает сомнений. Она базируется на широком использовании современных методов исследования композиционных, фазово-структурных, магнитных свойств в сочетании с тщательным анализом экспериментальных данных. **Основные положения и выводы диссертации** надежно обоснованы приводимыми в диссертации экспериментальными данными и их анализом.

Результаты и выводы диссертации были апробированы автором на многочисленных российских и международных конференциях и опубликованы в 60 печатных работах, среди которых 16 статей в российских и международных авторитетных рецензируемых научных журналах. Автореферат достаточно полно и адекватно отражает содержание диссертационной работы.

Однако, диссертационная работа не свободна от некоторых недостатков.

- 1) Не обсуждается вопрос о вариации состава по толщине пленок, хотя указания на это можно видеть на многих рисунках ОЭСТР-распределений: рис.3.2, 4.3. Может ли вариация элементного состава приводить к вариации фазового и структурного состава с глубиной и толщиной образца?
- 2) На стр.28 и далее по тексту в соотношении для фазовых превращений типа « $\delta\text{Fe} \leftrightarrow \gamma\text{Fe} + \text{L}$ » следовало бы пояснить обозначение L.
- 3) Рис. 4.7в,г (стр 97), 4.13в (стр. 106): не понятно обозначение вертикальной оси и нет подписи горизонтальной шкалы.

Сделанные замечания не носят принципиального характера, не затрагивают основного содержания работы и не изменяют общей положительной оценки диссертации Теджетова В. А. Диссертационная работа «Развитие физико-химической концепции формирования фазового состояния и структуры пленок FeZrN и FeTiB с особыми магнитными свойствами», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 (01.04.07) – «Физика конденсированного состояния», отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к кандидатской диссертации, а ее автор Теджетов Валентин Алексеевич, несомненно,

заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 (01.04.07) – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом физики атомного ядра Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова» (НИИЯФ МГУ)

Чеченин Николай Гаврилович

 05.04.2023

Контактные данные:

тел.: +7-495-939-23-48, e-mail: [chechenin@sinp.msu.ru](mailto:chechenin@sinp.msu.ru)

Специальности, по которым официальным оппонентом защищена диссертация:

01.04.16 – «Физика ядра и элементарных частиц», 01.04.04 – «Физическая электроника»

Адрес места работы:

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына (НИИЯФ МГУ), отдел физики атомного ядра

Тел.: +7-495-939-23-48; e-mail: [chechenin@sinp.msu.ru](mailto:chechenin@sinp.msu.ru)

Подпись сотрудника Н.Г. Чеченина удостоверяю:

Зам. директора НИИЯФ МГУ



Д.О. Еременко