

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу Мельникова Григория Юрьевича «Магнитодинамические свойства наноструктурированных пленочных элементов на основе пермаллоя с высокой магнитной проницаемостью», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12.- физика магнитных явлений.

Магнитномягкие материалы на основе пермаллоя активно используются в электронике, радиотехнике и вычислительной технике уже многие десятилетия. Применению магнитномягких сплавов в микроэлектронике, приборостроении и медицине уделяется все большее внимание исследователей, при этом приоритет отдается материалам с высоким показателем биосовместимости (способности материала встраиваться в организм пациента, не вызывая побочных клинических проявлений). Такие сплавы и элементы на их основе активно используются в композитных структурах, а также для изготовления различных датчиков и исполнительных механизмов. При этом остаются открытыми вопросы, связанные с влиянием геометрии и морфологии элементов из магнитномягких сплавов на их физические свойства. Следует отметить, что неоднородность поверхности, естественные и искусственные дефекты, соотношение размеров элементов и внешних покрытий и ряд других параметров могут кардинально влиять на поведение таких элементов. В связи с этим изучение особенностей влияния текстуры и морфологии на физические и эксплуатационные свойства материалов является **актуальной** задачей.

Следует отметить, что диссертантом освоены все основные виды экспериментальной деятельности: приготовление образцов и разработка методик измерений, проведение различных видов экспериментальных исследований, обработка результатов и численное моделирование. Таким образом можно констатировать, что **Мельников Г.Ю. является сложившимся научным работником** широкого профиля.

Диссертация Мельникова Г.Ю. представляет собой **законченное научное исследование** содержащее новые научные положения, вынесенные на защиту. Диссертация содержит 141 страницу текста, включающего оглавление, введение, литературный обзор, обосновывающий выбранные цели и задачи исследования, главу, посвященную анализу экспериментальных методик, три главы с описанием оригинальных результатов, заключение, список сокращений, список цитируемой литературы, список публикаций автора по теме диссертации и благодарности.

Во **введении** обосновывается актуальность и формулируются цели работы.

В **первой главе** дается краткий обзор литературы по теме диссертационного исследования. Диссертантом анализируются методы формирования композитных структур на основе пермаллоя и способы изучения их свойств. Подробно рассмотрены описанные в литературе особенности наноструктурированных магнитоимпедансных элементов и способов их использования.

Во **второй главе** рассмотрены методы получения композитных структур на основе пермаллоя и использованные подходы к анализу их свойств. Обсуждаются возможности детектирования магнитных наночастиц с помощью импедансных датчиков на основе предложенных композитных структур. Для экспериментальной

проверки были получены несколько типов магнитных частиц и композитов на их основе. В заключительном параграфе **описана оригинальная схема** модели эксперимента по магнитоимпедансному детектированию полей рассеяния магнитного композита в форме цилиндра, представляющая интерес с точки зрения перспектив практического использования в медицине.

Третья глава посвящена исследованию композитных наноструктурированных элементов на основе слоев пермаллоя и меди. Показано, что магнитоэлектронные взаимодействия в композитной структуре влияют на ориентацию осей анизотропии и процессы перемагничивания в ней. **Следует отметить обнаруженную** Мельниковым Г.Ю. связь между наноструктурированием пермаллового слоя и микромагнитной структурой соседнего слоя. **Значительный интерес представляют разработанные автором методы** определения параметров магнитной анизотропии пленочных структур на основе ФМР. Результаты опубликованы в высокорейтинговом журнале "Sensors" в 2023 году.

В четвертой главе представлены результаты исследования пленочных элементов с наноструктурированной поверхностью, полученные различными способами. Автором были изучены структурные и магнитные свойства как сплошных пленок пермаллоя различной толщины, так и ансамблей микроэлементов различной формы, толщины и состава. На заключительном этапе исследовались магнитоимпедансные свойства образцов. **Впервые определена оптимальная** толщина пермалловых элементов для импедансных структур. Обнаружено, что при изменении размеров элементов ансамбля меняется анизотропия структуры - при размерах элементов в 300 и более микрон структура становится изотропной. Результаты опубликованы в журналах "Физика металлов и металловедение" и "Физика твердого тела" в 2022 году.

Пятая глава содержит описание результатов использования разработанных ранее структур для практических приложений в медицинских целях. Автором исследованы свойства нескольких типов магнитных частиц оксидов железа для которых различными методами проведены оценки размерных распределений. Проведено сопоставление результатов различных методов. Предложен и реализован метод получения магнитных композитных структур из эпоксидных смол и магнитных частиц с различным содержанием последних. Полученные образцы были использованы для разработки медицинских приложений. В частности Мельниковым Г.Ю. **был разработан и апробирован метод** магнитоимпедансного детектирования массивов магнитных частиц оксидов железа с целью локализации их в живых организмах. Результаты, представленные в данной главе, опубликованы в журналах "Sensors" (2021), "Известия ВУЗов. Физика" (2021), "Журнал технической физики" (2022), "Физика твердого тела" (2023), "Физика металлов и металловедение" (2023).

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Диссертация **соответствует п. 3-6 паспорта специальности 1.3.12** – физика магнитных явлений, физико-математические науки (3. 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. 4. Исследование изменений различных физических свойств вещества, связанных с изменением их магнитных состояний и

магнитных свойств. 5. Исследование явлений, связанных с взаимодействием различного рода электромагнитных излучений и потоков элементарных частиц с магнитными моментами вещества или его структурных составляющих: атомов, атомных ядер, электронов (парамагнитный, ферромагнитный, ядерный магнитный, ядерный гамма резонансы и др.). 6. Моделирование свойств и физических явлений в материалах с различными видами магнитного упорядочения, а также в композитных структурах на их основе.)

Замечания по работе

Что касается **замечаний** к диссертационной работе, то они не касаются защищаемых положений и сводятся к следующему:

1. Название второй главы не вполне соответствует её содержанию, поскольку в ней рассматриваются не столько методы, сколько методика эксперимента. И, на мой взгляд, было бы желательно расширить описание особенностей технологии подготовки образцов. В частности, частицы, получаемые методом электрического взрыва проволоки, должны быть металлическими, а автор пишет о них как о частицах оксида железа. Каким образом проводилось окисление не написано.
2. В тексте диссертации постоянно используется термин «in-of-plane», который подразумевает ориентацию в плоскости образца. Но в таком случае нужно писать «in-plane».
3. При проведении расчетов для одних и тех же образцов автор использует различные величины намагниченности насыщения (На стр.62 $M_s=820$ Гс, а на стр. 60 - 750Гс, на стр.68 - 880Гс). Хотелось бы узнать причины такой разницы.
4. В тексте диссертации и автореферата содержится заметное число опечаток и стилистических погрешностей (например, на странице 10, 6я строка сверху: написано СВЧ вместо СВР; на странице 15, 6я строка сверху написано: "спины на поверхности ТМП не имеют соседей, в отличие от спинов внутри материала" - речь идет не о спинах, а о магнитных моментах, и соседи есть, просто их меньше; стр.36, 15я строка сверху: написано "0.5", а должно быть "5.0"; на стр.46, ур-я (2.16)-(2.18)-коэффициент A отсутствует, но описан; на стр.64 и 65 отсылка к табл.1.3, а должно быть к табл.3.3.; раздел 5.2.1, заголовок: "неоднородных" вместо "неоднородных").

Несмотря на сделанные замечаний, можно сказать, что диссертация Мельникова Г.Ю. является завершенным научным исследованием, в котором решена актуальная научная задача оптимизации магнитных статических и динамических свойств композитных структур на основе элементов пермаллоя. Материал, представленный в работе, прошел достаточную апробацию на международных и российских конференциях, опубликован в рецензируемых изданиях, индексируемых в международных базах данных WoS и Scopus. Автореферат полностью отражает содержание и структуру диссертации, а также ее ключевые аспекты.

Диссертационная работа «Магнитодинамические свойства наноструктурированных пленочных элементов на основе пермаллоя с высокой магнитной проницаемостью» удовлетворяет требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а сам соискатель Мельников Григорий Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. - Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент

Перов Николай Сергеевич



Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой магнетизма физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Контактная информация

Телефон: +7(495)939-1847

Электронная почта: perov@physics.msu.ru

Адрес: Россия 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр.2, физический факультет федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Подпись заведующего кафедрой магнетизма физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» **Перова Николая Сергеевича удостоверяю:**

И.о.декана физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» профессор



В.В. Белокуров