

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки

Институт теоретической и
прикладной электродинамики
Российской академии наук

доктор физико-математических наук



К.Н. Розанов

« 23 » августа 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Данилова Георгия Егоровича
«Разработка методов и средств сканирующей ГМИ-магнитометрии для
исследования локальных магнитных свойств материалов и изделий»,
представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Актуальность темы диссертационной работы

Диссертационная работа Данилова Г.Е. посвящена разработке методов и средств сканирующей магнитометрии для исследования локальных магнитных свойств материалов.

Методы сканирующей магнитометрии, отличающиеся чувствительностью по уровню регистрируемого магнитного поля и размерами измеряемых неоднородностей, используются для магнитного неразрушающего контроля и в биомедицинских приложениях. Магнитометры различаются типом применяемого датчика магнитного поля, при этом одними из наиболее перспективных являются датчики на основе эффекта гигантского магнитоимпеданса (ГМИ). Эффект ГМИ заключается в изменении

комплексного сопротивления ферромагнитного проводника, возбуждаемого переменным током, в присутствии внешнего магнитного поля. Интерес к ГМИ связан с возможностью его использования для разработки миниатюрных высокочувствительных датчиков слабых магнитных полей. Применение ГМИ-датчиков может существенно расширить возможности метода сканирующей магнитометрии для измерений неоднородных магнитных полей вблизи поверхности слабомагнитных образцов.

В связи с вышеизложенным тема диссертационной работы Данилова Г.Е., посвящённой разработке метода сканирующей ГМИ-магнитометрии для исследования магнитных свойств материалов, несомненно, является весьма актуальной.

Краткое содержание диссертационной работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, отмечены научная новизна и практическая значимость работы. Также обоснована достоверность полученных результатов, содержатся сведения об апробации результатов и личном вкладе автора.

В первой главе диссертационной работы представлен обзор литературных данных, посвящённых существующим методам сканирующей магнитометрии для измерений неоднородных локальных магнитных полей. Подробно рассмотрены аморфные ферромагнитные микропровода в стеклянной оболочке, которые предлагается использовать в качестве чувствительного элемента разрабатываемого датчика. Приведено описание технологии изготовления аморфных ферромагнитных микропроводов, проанализированы типы магнитной анизотропии, магнитные свойства и эффект ГМИ в микропроводах. Также описан метод сканирующей ГМИ-магнитометрии для измерения слабых магнитных полей, и приведена конструкция сканирующего магнитометра. По результатам проведённого анализа сформулированы основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена описанию проведённой модернизации сканирующего ГМИ-магнитометра. Разработан ГМИ-датчик с улучшенными характеристиками по магнитной чувствительности и пространственному разрешению, и в конструкцию ГМИ-магнитометра дополнительно включена система колец Гельмгольца, позволяющая намагнить исследуемый объект. Также представлено описание разработанного специализированного программного комплекса для обработки, визуализации и анализа магнитных полей рассеяния исследуемых объектов.

В третьей главе предложена процедура магнитной калибровки ГМИ-магнитометра с использованием двухпроводной линии с протекающими по ней противоположно направленными токами известного значения. На основе проведённых экспериментальных исследований магнитного поля двухпроводной линии получены поправочные коэффициенты, связанные с особенностями работы ГМИ-датчика, которые используются для пересчёта выходного сигнала ГМИ-магнитометра и нахождения количественных значений локальных магнитных полей слабомагнитных образцов.

В четвёртой главе представлены результаты исследования магнитных полей рассеяния вблизи поверхности образцов с малым остаточным магнитным моментом, проведённые с использованием модернизированного сканирующего ГМИ-магнитометра. Приведены результаты исследования остаточной намагниченности образцов напечатанных знаков текста, содержащих наночастицы оксида железа, а также результаты измерений намагниченности аморфных микропроводов на основе железа, покрытых стеклянной оболочкой.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационного исследования.

Научная новизна результатов работы

Полученные автором результаты и положения, выносимые на защиту, обладают научной новизной. Из результатов, полученных в диссертационной работе, на наш взгляд, особый интерес представляют следующие.

1. Предложена специальная процедура калибровки ГМИ-датчика, основанная на известном пространственном распределении магнитного поля двухпроводной линии. Использование разработанной процедуры позволяет анализировать количественные значения неоднородных магнитных полей вблизи исследуемых объектов с малым магнитным моментом.

2. Продемонстрирована возможность получения пространственных магнитных изображений образцов знаков текста, напечатанных на лазерном принтере. Показано, что количественные данные о распределении магнитных полей позволяют определить значения остаточной намагниченности и концентрации наночастиц оксида железа, являющихся магнитными характеристиками тонера, что представляет интерес для приложений.

3. Показано, что измеренные с использованием ГМИ-магнитометра распределения магнитных полей вблизи отрезка аморфного микропровода на основе железа позволяют получить информацию о распределении намагниченности микропровода, оценить размер замыкающих доменов, а также определить величину магнитного поля, при котором происходит скачкообразное переключение намагниченности микропровода.

Практическая значимость результатов работы

Практическая значимость результатов работы обусловлена широкими перспективами потенциальных применений метода сканирующей ГМИ-магнитометрии. Результаты измерений магнитных полей рассеяния вблизи токовых структур показывают возможность обнаружения неисправностей в электронных схемах. Продемонстрированная в работе регистрация магнитных полей миллиметровых отрезков аморфных микропроводов открывает потенциальную возможность разработки на их основе магнитных микрометок для подтверждения подлинности различных изделий.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Достоверность результатов, представленных в диссертации, основывается на использовании современного научного оборудования,

стандартных методов статистической обработки данных и взаимодополняющих экспериментальных методик, а также подтверждается воспроизводимостью экспериментальных результатов. Обоснованность полученных результатов подтверждается согласием экспериментальных данных с результатами, ранее полученными в других исследованиях.

Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы

Результаты работы могут быть использованы в организациях, занимающихся научными и прикладными исследованиями в области физики магнитных явлений, магнитного неразрушающего контроля и материаловедения, например, в ИОФ РАН, ИКИ РАН, ИРЭ РАН, ИЗМИРАН, Центральном НИИ технологии машиностроения, Центральном НИИ химии и механики, НИТУ «МИСИС», НИЯУ МИФИ, МИРЭА.

Замечания по диссертационной работе

К диссертационной работе Данилова Г.Е. имеются небольшие замечания.

1. При описании сканирующего магнитометра в разделе 2.1 отмечается, что для измерений нормальной компоненты локальных магнитных полей ГМИ-датчик ориентируется строго перпендикулярно поверхности исследованного образца. Однако в работе не обсуждается, как повлияет отклонение от вертикального положения на чувствительность датчика к нормальной компоненте магнитного поля, и существует ли возможность изменения ориентации ГМИ-датчика для исследования магнитных полей в других направлениях.

2. На рисунке 17 (а), иллюстрирующем ориентацию исследуемого объекта, системы колец Гельмгольца и ГМИ-датчика, допущена опечатка в обозначениях осей X и Y , что затрудняет восприятие описания конструкции модернизированного сканирующего магнитометра.

3. Из текста раздела 4.2 не ясно, возможно ли использование разработанного метода сканирующей ГМИ-магнитометрии для измерения

магнитных полей ансамблей наночастиц оксида железа в случае, если они имеют неравномерное распределение по поверхности образца.

4. В разделе 4.3 методом сканирующей ГМИ-магнитометрии подробно исследована намагниченность коротких аморфных микропроводов на основе железа. В работе все измерения проводились для микропроводов одного состава. При этом несомненный интерес представляет исследование влияния состава и диаметра микропроводов, а также типа магнитной анизотропии на результаты, полученные с помощью сканирующего ГМИ-магнитометра.

Сделанные замечания не носят принципиального характера, не затрагивают основного содержания работы и не изменяют общей положительной оценки диссертационной работы

Заключение по диссертационной работе

По материалам диссертационной работы опубликовано 2 статьи в научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, и 1 статья в журнале из списка ВАК РФ. Также автором получены свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и патент на изобретение. Полученные автором результаты докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научных конференциях, и должная апробация результатов диссертации не вызывает сомнений.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Основные научные результаты, положения, выносимые на защиту, и выводы диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

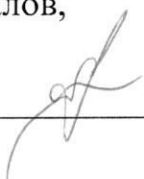
Диссертационная работа Данилова Г.Е. является законченной научно-квалификационной работой, посвящена актуальной теме, выполнена на высоком экспериментальном и теоретическом уровне, содержит ряд новых, важных в научном и практическом плане результатов, достоверность которых не вызывает сомнений. Работа соответствует требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней в Национальном исследовательском

технологическом университете «МИСИС», а её автор, Данилов Георгий Егорович заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

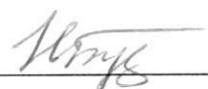
Диссертационная работа была представлена автором и обсуждена на семинаре Института теоретической и прикладной электродинамики РАН 2 июля 2024 г., протокол № 1.

Отзыв составили

Заведующий лабораторией
электрофизики новых функциональных материалов,
кандидат физ.-мат. наук

 С.С. Маклаков

Ведущий научный сотрудник лаборатории
электрофизики новых функциональных материалов,
доктор физ.-мат. наук

 Н.А. Бузников

Сведения о ведущей организации

Полное наименование: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук

Сокращенное наименование: ИТПЭ РАН

Почтовый адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 6

Телефон: +7 (495) 484-23-83

Электронная почта: itae@itae.ru

Сайт: <http://www.itae.ru>