

О т з ы в

официального оппонента

на диссертационную работу **Ветошко Петра Михайловича** «Перемагничивание однородным вращением феррит - гранатовых пленок в чувствительных элементах магнитных сенсоров», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Диссертация Ветошко П. М. посвящена исследованию механизмов перемагничивания феррит-гранатовых плёнок, которые используются в чувствительных элементах магнитных сенсоров с внешней модуляцией. Автор ставил своей целью - разработать способы повышения чувствительности магнитометров, работающих при комнатных температурах. Поставленная цель достигнута путем реализации режима равномерного вращения намагниченности в плоскости (111) насыщенного образца магнитной пленки феррит-граната. Для реализации режима циркулярного вращения намагниченности потребовалось решение ряда задач:

1. Теоретические и экспериментальные исследования динамики намагничивания эпитаксиальной феррит - гранатовой пленки в диапазоне частот до 1 МГц с учетом магнитной анизотропии.
2. Теоретический анализ и экспериментальные исследования тепловых флуктуаций намагниченности в объеме чувствительного элемента на основе монокристаллической пленки феррита - граната.
3. Выяснить влияние в краевых областей пленочного образца на переход в насыщенное состояние, и величину тепловых флуктуаций.
4. Изготовить образцы пленок феррита-граната, с минимальным полем насыщения в плоскости пленки и минимальными тепловыми флуктуациями. Реализовать метод измерения полного вектора магнитного поля с помощью фиксированной дисковой пленки.

Актуальность этих исследований не вызывает сомнений.

Научная значимость результатов, полученных в ходе выполнения работы, обусловлена новыми данными о влиянии констант одноосной и кубической анизотропии на перемагничивание кубического магнетика в плоскости (111); исследованием трехмерного отклика на внешнее измеряемое магнитное поле; теоретическим и экспериментальным исследованием теплового шума магнитного сенсора с учетом влияния катушек возбуждения.

Разработанная методика уменьшения поля насыщения в плоскости магнитной пленки путем формирования ступенчатого профиля открывает перспективы создания нового объекта для физических исследований – монокристаллического магнетика макроскопических размеров с высокой магнитной восприимчивостью.

Рецензируемая диссертационная работа П.М. Ветошко изложена на 134 страницах, включает 5 таблиц, 71 рисунок и состоит из введения, четырех глав, выводов, двух приложений. Список цитируемой литературы имеет 175 наименований.

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы ее цели и задачи, определены положения, выносимые на защиту, отмечается научная значимость и новизна полученных результатов.

В первой главе, дан обзор магнитных материалов и способов перемагничивания чувствительных элементов магнитных сенсоров с внешней модуляцией. Показано, что порог чувствительности магнитного сенсора с внешней модуляцией может быть уменьшен вплоть до предельных значений при перемагничивании путем когерентного вращения намагниченности. Выявлены преимущества применения феррита-граната в качестве рабочего материала магнитного сенсора.

Вторая глава содержит теоретические и экспериментальные исследования магнитной восприимчивости кубического магнетика при перемагничивании путем когерентного вращения намагниченности в плоскости монокристаллической тонкой магнитной пленки.

Для корректного описания движения вектора намагниченности, в разложении свободной энергии магнетика по углу поворота в плоскости (111) автором были учтены квадратичные члены по углу выхода из плоскости и первые две константы кубической анизотропии. Получены выражения для поля наведенной анизотропии в плоскости вращения (111) в зависимости от намагниченности, константы одноосной анизотропии и констант кубической анизотропии четвертого и шестого порядков. Обнаружено явление взаимной компенсации влияния констант кубической анизотропии четвертого и шестого порядков на вращение намагниченности в плоскости (111).

Теоретически и экспериментально (на примере феррит-гранатов составов $Y_3Fe_5O_{12}$, $Tm_3Fe_{4.3}Sc_{0.7}O_{12}$ и $Lu_{2.15}Pr_{0.85}Fe_5O_{12}$) исследован отклик магнитного сенсора на все три компоненты внешнего квази стационарного поля. Построен алгоритм разделения всех трех компонент измеряемого поля, представленных Фурье - компонентами сигнала отклика, и показана оригинальная возможность получения информации обо всех трех компонентах измеряемого поля от одного фиксированного в пространстве магнитного сенсора.

Третья глава посвящена оценке термодинамических флуктуаций в сенсоре с учетом тепловых возбуждений в магнетике и возбуждающих катушках. Оценка шумов производилась исходя из комплексной магнитной восприимчивости феррит-гранатового диска с помощью флуктуационно-диссипативных соотношений. Показано, что для диска диаметром 1 см и толщиной 3 мкм спектральная плотность эффективного стороннего магнитного поля, вызванного термомагнитными флуктуациями, в магнитном материале составляет $\sim 2,2 \cdot 10^{-11}$ Э/Гц^{0.5} (2.2 фТл/Гц^{1/2}). Для проверки применимости модели диссипации, произведены экспериментальные измерения комплексной магнитной восприимчивости образцов ферритов-гранатов, в диапазоне полей и частот (10^0 - 10^2 Эрстед, 10^5 - 10^6 Гц). Анализ шумов сенсора с учетом измерительных катушек показал, что чувствительность реального сенсора определяет конечная добротность резонатора. Так, например, для сенсора из феррит-гранатового диска и катушками из меди, с учетом толщины подложки 500 мкм собственная добротность катушек ~ 10 , а величина шумовых флуктуаций $\sim 10^{-9}$ Э/Гц^{0.5} (0.1 пТл/Гц^{1/2}). Это значение почти на 2 порядка превышает величину теоретической оценки, полученной для магнетика без резонатора. При этом шумовой порог чувствительности сенсора зависит линейно от амплитуды поля насыщения магнетика, в то время как шум сенсора без учета возбуждающего резонатора вообще не зависит от приложенного поля.

В четвертой главе изучено влияние формы края пленочного датчика на процесс насыщения феррит-гранатового элемента. Методом моделирования предсказано снижение поля насыщения (фактора деполяризации) сенсорного элемента в форме диска при плавном уменьшении толщины в направлении края диска.

В этой же главе описана процедура изготовления эпитаксиальных феррит-гранатовых пленок, и экспериментально показано, что при трехступенчатом крае уровень шума на порядок меньше, чем при одноступенчатом.

На основе процесса циркулярного вращения намагниченности в плоскости тонкой пленки феррит-граната построен магнитометр с уровнем собственного шума 10^{-9} Э/Гц^{0.5} (100фТл/Гц^{0.5}). Полученный результат на два порядка величины лучше уровня существующих магнито модуляционных сенсоров.

По постановке задач, выработке способов их решения и полученным результатам работа является **новой**. В ней предложено и реализовано перемагничивание рабочего элемента магнитного сенсора циркулярным вращением намагниченности в состоянии полного насыщения. Резюмируя, итоги работы состоят в следующем:

- Исследования магнитной восприимчивости в плоскости (111) и условий насыщения на краях феррит-гранатового диска, привели к созданию образцов с полем анизотропии в плоскости 0.03 Э и порогом насыщения ~ 15 Э.

- В результате проведенных исследований автору удалось создать конструкцию магнитометра, в котором спектральная плотность шума $\sim 10^{-9}$ Э/Гц^{0.5} в диапазоне частот 0.1 Гц – 1 кГц на два порядка ниже уровня чувствительности современных магнито модуляционных сенсоров. При этом, разработанный алгоритм разделения всех трех компонент измеряемого поля, дал возможность получения информации обо всех трех компонентах измеряемого поля от одного фиксированного в пространстве магнитного сенсора. Достигнутые параметры существенно расширяют области применения твердотельных магнитометров работающих при комнатной температуре.

Практическая значимость полученных результатов очевидна. Благодаря высокой чувствительности новые твердотельные магнитометры, работающие при комнатной температуре, найдут применение в областях доступных ранее только охлаждаемым приборам.

Замечания по диссертационной работе.

1. Весьма лаконично изложены методы измерений, в частности, угловые зависимости восприимчивостей. Описание магнитометра и его характеристики достойны отдельной главы.

2. Обилие формул, без качественной их интерпретации затрудняет понимание физики.

3. Сравнение графиков на рис. 4.20, рис. 4.7 и рис. 4.9 не является убедительным доказательством согласия экспериментальные данных с результатами моделирования, как утверждает автор. Это разные зависимости, и их близость требует пояснений.

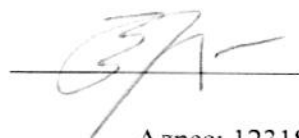
Отмеченные недостатки не снижают общее хорошее впечатление о диссертации. Диссертационная работа П.М.Ветошко выполнена на высоком научном уровне, ее результаты обоснованы и представляют большой научный и практический интерес.

Результаты диссертации достаточно полно отражены в публикациях автора (18 работ в журналах из списка ВАК, 3 патента) и представлены в докладах на международных конференциях (23 выступления). Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 01.04.11 - физика магнитных явлений. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

У меня нет никаких сомнений, что диссертационная работа «Перемагничивание однородным вращением феррит - гранатовых пленок в чувствительных элементах магнитных сенсоров» удовлетворяет требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.13, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – **Петр Михайлович Ветошко** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Официальный оппонент
Начальник лаборатории физики низких температур и сильных магнитных полей Курчатовского комплекса НБИКС технологий
НИЦ «Курчатовский институт»,
доктор физико-математических наук,
профессор, специальность 01.04.07 –
физика конденсированного состояния

26 апреля 2017 г.



Красноперов Е.П.

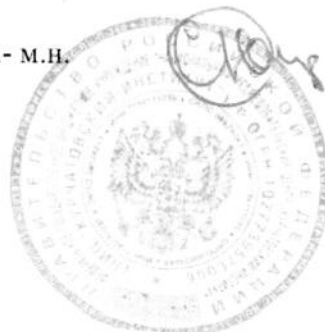
Адрес: 123182, г. Москва, пл. Курчатова д.1
НИЦ Курчатовский Институт
Официальный сайт: <http://www.nrcki.ru>
Тел. 8 499 1967109
E-mail: Krasnoperov_EP@nrcki.ru

Подпись Е.П. Красноперова

Заверяю:

Главный Ученый секретарь Центра

к.ф.-м.н.



С.Ю. Стремоухов

*С отзывом ознакомлен
12.05.2017 г. / Ветошко*

Сведения об официальном оппоненте

ФИО: Красноперов Евгений Павлович

Ученая степень, звание: доктор физико-математических наук, профессор

Полное наименование организации: Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Должность: начальник лаборатории физики низких температур и сильных магнитных полей Курчатовского комплекса НБИКС-технологий НИЦ «Курчатовский институт»

Почтовый адрес: 123182, пл. Курчатова, д.1, г. Москва

Тел.: 8 499 196 7109

E-mail: Krasnoperov_EP@nrcki.ru

Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. Negative magnetic relaxation in superconductors, European Physics Journal, v. 40, 10001 (2013)
2. Pulse Heating and negative Magnetic Relaxation on bulk HTS Annuli J. Supercond Nov Magn. v.28 (2015) 2815
3. Flux jumps at pulsed field magnetization, J Supercond Nov Magn, (2016) 29:1893–1896

2 мая 2017 г.



Е.П. Красноперов

Адрес: 123182, г. Москва, пл. Курчатова д.1
НИЦ Курчатовский Институт
Официальный сайт: <http://www.nrcki.ru>
Тел. 8 499 1967109
E-mail: Krasnoperov_EP@nrcki.ru

Подпись Е.П. Красноперова

Заверяю:

Главный ученый секретарь Центра,
к.ф.-м.н.



С.Ю. Стремоухов