



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«Челябинский государственный университет»  
(ФГБОУ ВО «ЧелГУ»)

ул. Братьев Кашириных, 129, г. Челябинск, 454001  
тел. (351) 799-71-01, факс: (351) 742-09-25  
E-mail: odou@csu.ru; http://www.csu.ru  
ОКПО 05121292, ОГРН 1027402324905,  
ИНН/КПП 7447012841/744701001

05.05.2017

№ 54-01-146

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

ректор ФГБОУ ВО «ЧелГУ»  
проф. Циринг Д.А.

«02» мая 2017 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертацию Петра Михайловича Ветошко

**«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.

Диссертационная работа П.М. Ветошко посвящена вопросам физики магнитных процессов в материалах чувствительных элементов магнитных сенсоров с внешней модуляцией. Прикладная направленность исследований диссертанта очевидна – найти способы повышения чувствительности магнитометров.

В сравнении с другими твердотельными магнитометрами, магнитомодуляционные сенсоры с использованием магнитоупорядоченного материала, обеспечивают наибольшую энергию взаимодействия с исследуемым полем, и потенциально, чрезвычайно высокую чувствительность, не требуют охлаждения, дешевы и технологичны. Главным препятствием для реализации огромного потенциала этих приборов является избыточный шум, возникающий в процессе перемагничивания магнитного материала.

Таким образом, исследование процессов перемагничивания с целью создания новых чувствительных элементов является актуальной научной и прикладной задачей.

В диссертационной работе рассматривается процесс циркулярного вращения намагниченности в насыщающем вращающемся магнитном поле.

Насыщенное состояние магнетика препятствует возникновению избыточных шумов, связанных с перестройкой доменной структуры, а равномер-

169563

ное вращение вектора намагниченности обеспечивает равновесность процесса перемагничивания, и как следствие – минимально возможный уровень флуктуаций намагниченности. В качестве магнитного материала выбраны монокристаллические пленки феррит-граната, поскольку эти материалы обладают минимальным уровнем диссипации, и как следует из флуктуационно-диссипационных соотношений – минимальным уровнем магнитного шума.

П.М. Ветошко проведен анализ влияния ростовой и магнитокристаллической анизотропии на вращение вектора намагниченности в плоскости (111) феррит-граната с учетом констант кубической анизотропии четвертого и шестого порядков. Показан разделяющийся трехмерный отклик сенсора на все три компоненты внешнего измеряемого поля. Получены условия компенсации влияния констант кубической анизотропии на поле анизотропии в плоскости вращения. С учетом полученных данных изготовлены образцы замещенных феррит-гранатовых пленок состава  $Tm_3Fe_{4.3}Sc_{0.7}O_{12}$  с полем анизотропии в плоскости (111)  $\sim 0.03$  Э, что позволило применить данные образцы в магнитомодуляционном сенсоре.

Диссертантом произведена оценка предельной чувствительности сенсора, обусловленная тепловыми флуктуациями намагниченности в феррит-гранате, а также с учетом влияния возбуждающей электромагнитной системы. Оценка проводилась на основе флуктуационно-диссипационной теоремы исходя из данных по комплексной магнитной восприимчивости, полученных экспериментально и из решения уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта. Сравнение экспериментальных данных с данными полученными из решения уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта показало хорошее соответствие для состава  $Tm_3Fe_{4.3}Sc_{0.7}O_{12}$ , что подтверждает применимость выбранной модели. Интересно отметить, что в выбранной модели собственный шум магнитного материала в насыщенном состоянии определяется только диссипацией и намагниченностью магнетика и не зависит от величины приложенного поля.

С учетом диссипации в возбуждающей электромагнитной системе, оказалось, что чувствительность сенсора зависит от частоты и амплитуды возбуждающего поля. Сделанные сравнения шумов, вносимых магнетиком и электромагнитной системой в зависимости от частоты и амплитуды поля возбуждения, показали, что необходимым условием повышения чувствительности сенсора является снижение поля насыщения магнитной пленки.

Диссертантом проведены исследования по снижению поля насыщения сенсорного элемента в форме диска путем плавного уменьшения толщины в направлении края диска, т.е. зависимости поля насыщения от формы профиля края образца.

Диссертантом предложена и реализована конструкция магнитометра на основе процесса циркулярного вращения намагниченности в плоскости тонкой пленки феррит-граната с уровнем собственного шума  $10^{-9}$  Э/Гц<sup>0.5</sup> (100 фТл/Гц<sup>0.5</sup>). Полученный результат на два порядка величины лучше уровня существующих магнитомодуляционных сенсоров. Впервые с помощью теплого твердотельного магнитометра измерены кардиограммы человека и крысы, причем без усреднения.

Приведенные результаты имеют безусловную практическую значимость.

Благодаря сочетанию аналитического подхода с численным микромагнитным моделированием исследуемых структур, а также апробации результатов с данными прямых экспериментальных исследований П.М. Ветошко **удалось получить ряд новых и интересных научных результатов**, среди которых следует выделить следующие.

1. Теоретически определен и экспериментально измерен трехмерный отклик магнитного сенсора на внешнее квазистационарное магнитное поле. Отклик на нормальную к плоскости пленки компоненту магнитного поля в ориентации (111) обусловлен кубической анизотропией магнетика. При этом влияние наведенной анизотропии в плоскости пленки может быть скомпенсировано соответствующим выбором констант кубической анизотропии четвертого и шестого порядков, что значительно увеличивает поперечную восприимчивость. Таким образом, используя единый сенсорный элемент в форме пленки, может быть получена информация обо всех трех компонентах внешнего измеряемого поля. Представляется, что предложенная методика векторного измерения будет востребована для разработки миниатюрных сенсоров.

2. Разработан метод разделения вкладов в магнитный шум дискового чувствительного элемента от материала эпитаксиальной пленки в режиме вращения намагниченности и возбуждающей электромагнитной системы. Термомагнитные флуктуации оценены на основе флуктуационно-диссипационной теоремы при использовании точных выражений для комплексной магнитной восприимчивости.

Определены условия минимизации уровня магнитного шума с учетом обоих факторов. С нашей точки зрения, разработанный подход исследования шумовых параметров представляет интерес для оценки чувствительности различных сенсоров магнитного поля. Анализ шумов проведен на основе разработанной методики измерения комплексной восприимчивости, которая может представлять интерес для исследования различных плоскостных магнетиков.

3. Методом микромагнитного моделирования предсказана и экспериментально реализована схема снижения поля насыщения сенсорного элемента в форме диска путем плавного уменьшения толщины в направлении края диска. Уменьшение поля насыщения происходит из-за изменения соотношений обменного и магнитостатического полей с уменьшением толщины пленки. Предполагалось, что влиянием анизотропии можно пренебречь.

Разработанная методика позволяет создавать новые объекты для физических исследований – монодоменные магнетики макроскопических размеров с высокой магнитной восприимчивостью.

Процессы перемагничивания таких магнетиков принципиально отличаются от обычных перестроений доменных структур и происходят с потерями энергии, обусловленными фундаментальными механизмами диссипации, что позволяет наблюдать механизмы взаимодействия намагниченности с кри-

сталлической решеткой.

4. На основе процесса циркулярного вращения намагниченности в плоскости тонкой пленки феррит-граната с градиентным краем построен магнитометр с уровнем собственного шума  $10^{-9}$  Э/Гц<sup>0.5</sup> (100 фТл/Гц<sup>0.5</sup>). Полученный результат на два порядка величины лучше уровня существующих магнитомодуляционных сенсоров и находится на нижней границе чувствительности СКВИД- магнетометров. Этот результат представляется особенно важным, так как разработанные сенсоры имеют значительный потенциал для биомедицинских приложений, например, для магнитной кардиографии.

**Полученные результаты являются новыми и хорошо обоснованы.** Их достоверность подтверждается согласованностью результатов аналитического исследования, численного моделирования и физического эксперимента между собой.

В работе, однако, **имеется ряд недостатков** из которых следует отметить следующие:

1. Известно, что намагниченность насыщения а следовательно и величина насыщающего магнитного поля феррит-гранатовой пленки может быть существенно снижена путем замещения ионов железа в тетраэдрической подрешетке (разбавление ионами Ga<sup>3+</sup>, Al<sup>3+</sup>). В работе никак не исследуется и не упоминается такая возможность для снижения поля насыщения чувствительного элемента.

2. Несмотря на то, что материалом для проведения исследований являлись пленки монокристаллов, нигде не приведены данные рентгеноструктурного анализа или хотя бы зондового микроанализа. Такие данные могли бы послужить независимой оценкой качества монокристаллов.

3. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ, однако, в ней имеются опечатки. Так, например, в приложении 1 график на рис. 4 и график на рис. 5 приведены в других единицах измерений, нежели график на рис. 1. Также, в ряде предложений отсутствуют запятые.

Несмотря на отмеченные недостатки, диссертационная работа производит хорошее впечатление. **Работа выполнена на высоком научном уровне. Несомненна также и практическая значимость полученных результатов.**

Полученные результаты в диссертационной работе П.М. Ветошко могут быть использованы при проведении фундаментальных и прикладных НИР в академических и отраслевых организациях таких как ОАО «Российская корпорация нанотехнологий» (г. Москва), ОАО «НИИ физических измерений» (г. Пенза), Государственное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики (г. Санкт-Петербург), Технологический

центр микросистемотехники НИИ многопроцессорных вычислительных систем Южного Федерального Университета (г. Таганрог), Институт проблем микроэлектроники и особо чистых материалов (г. Черноголовка Московской области), НПК «Технологический центр» МИЭТ (Москва, Зеленоград), Научно-исследовательский центр нанотехнологий ФСТЭК России (г. Москва), Компаниях и фирмах-производителях ОАО «Компания «Сухой» (г. Москва), ГУП «Алмаз-Антей» (г. Москва), Компания «НТ-МДТ» (Москва, Зеленоград), ОАО «Российские Космические Системы» (г. Москва), ООО "Циклон" (г. Москва) и др.

**В целом, диссертация П.М. Ветошко является завершенной научно-исследовательской работой, представляющей заметное научное достижение в области исследования физики магнитных процессов в материалах чувствительных элементов магнитных сенсоров с внешней модуляцией. Как по объему, так и по содержанию данная диссертационная работа полностью отвечает требованиям Положения ВАК РФ о порядке присуждения научным и научно-педагогическим работникам ученых степеней, 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.**

Отзыв обсужден и одобрен на научном семинаре кафедры физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «ЧелГУ» 17 апреля 2017 г., протокол № 8 от 17 апреля 2017 г.

Доктор физ.-мат. наук, доцент  
декан физического факультета  
ФГБОУ ВО «ЧелГУ»

Таскаев Сергей Валерьевич



*высшей школы по кафедре*

*С отзывом ознакомлен  
05.05.2017 г. / [Signature] / Ветошко П.М.*

## Сведения о ведущей организации

Полное наименование: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Челябинский государственный университет»

Краткое наименование: ФГБОУ ВО «ЧелГУ»

Почтовый адрес: 454001, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129.

Тел.: +7(351)799-71-01, факс.: +7(351)742-09-25.

E-mail: [odou@csu.ru](mailto:odou@csu.ru)

<http://www.csu.ru>

### Основные научные направления

- физика конденсированного состояния
- физика металлов и сплавов
- физика магнитных явлений

### Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. Taskaev, Sergey V.; Skokov, Konstantin P.; Khovaylo, Vladimir V.; Gorshenkov, Mikhail V.; Vasiliev, Alexander N.; Volkova, Olga S.; Bataev, Dmitry S.; Pellenen, Anatoliy P.; Gutfleisch, Oliver. Magnetic Properties of Nd and Sm Rare-Earth Metals After Severe Plastic Deformation. IEEE MAGNETICS LETTERS (2016) 7.
2. Skokov, Konstantin P.; Pastushenkov, Yury G.; Taskaev, Sergey V.; Rodionova, Valeria V. Micromagnetic analysis of spin-reorientation transitions. The role of magnetic domain structure. PHYSICA B-CONDENSED MATTER(2015)478,12-16.
3. Taskaev, S.; Skokov, K.; Khovaylo, V.; Buchelnikov, V.; Pellenen, A.; Karpenkov, D.; Ulyanov, M.; Bataev, D.; Usenko, A.; Lyange, M.; Gutfleisch, O. Effect of severe plastic deformation on the specific heat and magnetic properties of cold rolled Gd sheets. JOURNAL OF APPLIED PHYSICS (2015) 117-12.
4. Palacios, Elias; Bartolome, Juan; Wang, Gaofeng; Burriel, Ramon; Skokov, Konstantin; Taskaev, Sergey; Khovaylo, Vladimir Analysis of the Magnetocaloric Effect in Heusler Alloys: Study of Ni<sub>50</sub>CoMn<sub>36</sub>Sn<sub>13</sub> by Calorimetric Techniques. ENTROPY(2015)17,3,1236-1252.
5. Taskaev, S.; Skokov, K.; Karpenkov, D.; Khovaylo, V.; Buchelnikov, V.; Zherebtsov, D.; Ulyanov, M.; Bataev, D.; Drobosyuk, M.; Pellenen, A. Magnetocaloric Properties of Severe Plastic Deformed Gd<sub>100-x</sub>Y<sub>x</sub> Alloys. ACTA PHYSICA POLONICA A (2015) 127, 2, 641-643.
6. Taskaev, S. V.; Skokov, K. P.; Khovaylo, V. V.; Gunderov, D.; Karpenkov, D. Y.; Gutfleisch, O. The Influence of Severe Plastic Deformation on Magnetic Properties of Ni<sub>48</sub>Fe<sub>48</sub>Zr<sub>4</sub>, Fe<sub>1.5</sub>Co<sub>0.5</sub>B<sub>16</sub>Ta<sub>0.3</sub> and Co<sub>80</sub>Zr<sub>16</sub>B<sub>4</sub> Alloys. 2015 IEEE MAGNETICS CONFERENCE (INTERMAG) 2015.
7. Taskaev, S.; Skokov, K.; Khovaylo, V.; Gunderov, D.; Karpenkov, D. Influence of Severe Plastic Deformation on Magnetic Properties of Fe<sub>48</sub>Ni<sub>48</sub>Zr<sub>4</sub>, Fe<sub>49.5</sub>Co<sub>16.5</sub>B<sub>33</sub>Ta and Co<sub>80</sub>Zr<sub>16</sub>B<sub>4</sub> Alloys. 20TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MAGNETISM, ICM 2015 (2015) 75, 1404-1409.

8. Sokolovskiy, V. V.; Buchelnikov, V. D.; Khovaylo, V. V.; Taskaev, S. V.; Entel, P. Tuning magnetic exchange interactions to enhance magnetocaloric effect in Ni<sub>50</sub>Mn<sub>34</sub>In<sub>16</sub> Heusler alloy: Monte Carlo and *ab initio* studies. INTERNATIONAL JOURNAL OF REFRIGERATION-REVUE INTERNATIONALE DU FROID (2014) 37, 273-280.

9. Sokolovskiy, V. V.; Fayzullin, R. R.; Buchelnikov, V. D.; Drobosyuk, M. O.; Taskaev, S. V.; Khovaylo, V. V. Theoretical treatment and direct measurements effect in Ni<sub>2.19-x</sub>Fe<sub>x</sub>Mn<sub>0.81</sub>Ga Heusler alloys. JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS (2013) 343, 6-12.

10. Sokolovskiy, V. V.; Buchelnikov, V. D.; Taskaev, S. V.; Khovaylo, V. V.; Ogura, M.; Entel, P. Quaternary Ni-Mn-In-Y Heusler alloys: a way to achieve materials with better magnetocaloric properties? JOURNAL OF PHYSICS D-APPLIED PHYSICS(2013)46,30.

11. Taskaev, Sergey V.; Buchelnikov, Vasiliy D.; Pellenen, Anatoliy P.; Kuz'min, Michael D.; Skokov, Konstantin P.; Karpenkov, Dmitry Yu; Bataev, Dmitry S.; Gutfleisch, Oliver Influence of thermal treatment on magnetocaloric properties of Gd cold rolled ribbons. JOURNAL OF APPLIED PHYSICS(2013)113,17.

12. Taskaev, S. V.; Kuz'min, M. D.; Skokov, K. P.; Karpenkov, D. Yu.; Pellenen, A. P.; Buchelnikov, V. D.; Gutfleisch, O. Giant induced anisotropy ruins the magnetocaloric effect in gadolinium. JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS (2013)331,33-36.

Проректор по научной работе,  
д.физ.-мат.н., проф.



В.Д.Бучельников