



Проектор по научной деятельности
КФУ им. В.И. Вернадского

« 04 » - 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Чернышовой Татьяны Александровны «**Магнитные и магниторезистивные свойства спиновых клапанов с синтетическим ферримагнетиком и микрообъектов на их основе**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений

Актуальность темы диссертации. Металлические спиновые клапаны с обменным смещением и эффектом гигантского магнитосопротивления являются одним из современных типов магниточувствительных наноматериалов, используемых в различных изделиях магнитоэлектроники. Отличительной чертой таких объектов является резкое изменение их электросопротивления в области слабых магнитных полей. Функциональные характеристики спиновых клапанов зависят от целого ряда физических факторов, определяемых композицией многослойной структуры, типами использованных материалов и особенностями наведенной магнитной анизотропии, которые, в свою очередь, могут быть изменены в процессе синтеза таких искусственных наноматериалов. На основе понимания физических причин, управляющих функциональными характеристиками спиновых клапанов, и целенаправленного изменения технологии приготовления могут быть созданы новые варианты магниточувствительных наноматериалов, представляющих интерес для их практического использования.

Диссертационная работа Т.А. Чернышовой посвящена изучению взаимосвязи между особенностями наведенной магнитной анизотропии и магнитотранспортными свойствами спиновых клапанов с различными синтетическими ферримагнетиками, а также разработке методов создания «безгистерезисных» спиновых клапанов и вопросам повышения магниторезистивной чувствительности. Отдельное внимание уделено в работе изучению аналогичных свойств микрообъектов, сформированных из пленок спиновых клапанов

литографическими методами. В них в качестве дополнительного фактора, влияющего на процессы перемагничивания и особенности гистерезиса, выступает анизотропия формы микрообъекта. Указанные исследования являются важными как с фундаментальной точки зрения, так и с точки зрения практического применения, поэтому данная работа, безусловно, является весьма **актуальной**.

Структура и основное содержание работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. **Первая глава** представляет собой обзор сведений, имеющихся в литературе на данный момент времени по исследованию различных типов спиновых клапанов, в том числе и спиновых клапанов с синтетическим антиферромагнетиком. Особое внимание уделено особенностям магниторезистивных свойств, обусловленным формированием конфигураций с различным взаимным расположением осей анизотропии в слоях спиновых клапанов. **Во второй главе** приведено описание метода приготовления многослойных наноструктур, установки магнетронного синтеза пленочных покрытий, линейки технологического оборудования, использованного при изготовлении микрообъектов. Также приведена информация об оригинальных установках, предназначенных для исследования магнитных, магнитотранспортных свойств и проведения отжига пленочных образцов. **В третьей главе** приведены результаты исследования магнитотранспортных свойств, измеренных при различных температурах для спиновых клапанов, содержащих синтетический ферримагнетик с точкой компенсации Gd/CoFe в качестве свободного слоя. Сильное изменение магнитного момента слоя Gd при понижении температуры приводит в таких спиновых клапанах к появлению особенностей на температурных зависимостях электросопротивления и магнитосопротивления вблизи температуры компенсации. Исследовано влияние толщины слоя Gd на температуру компенсации. **В четвертой главе** описан разработанный метод термомагнитной обработки, позволяющий в спиновых клапанах с синтетическим антиферромагнетиком изменять произвольным образом направление оси однонаправленной анизотропии в плоскости слоев. Данный метод был использован для получения состояния с «почти скрещенной» взаимной ориентацией осей анизотропии в слоях спинового клапана, при которой реализуется безгистерезисный режим перемагничивания свободного слоя. Исследования проведены на спиновых клапанах с синтетическими ферримагнетиком CoFe/Ru/CoFe. Для спиновых клапанов с обменно-связанной структурой NiFe/Ru/NiFe в составе свободного слоя исследовано влияние типа магнитного порядка в данной структуре на поле смещения низкополевой петли гистерезиса. **В пятой главе** приведены результаты исследований магниторезистивных свойств микрообъектов, изготовленных из спиновых клапанов с

синтетическими ферромагнетиками CoFe/Ru/CoFe и NiFe/Ru/NiFe. Для уменьшения гистерезиса магнитосопротивления использован метод термомагнитной обработки, описанный в четвертой главе применительно к полоскам миллиметровых размеров. Описаны варианты оптимизированных сенсорных микрообъектов с функциональными характеристиками, представляющими интерес для практического использования. **Заключение** содержит основные выводы по работе и практические рекомендации для получения безгистерезисных спиновых клапанов.

К наиболее важным результатам работы, отражающим ее **научную новизну**, можно отнести следующие:

- для спиновых клапанов, содержащих в составе свободного слоя Gd/CoFe слой гадолиния обнаружено качественное изменение формы магниторезистивной кривой с обычной П-образной формы на инвертированную;

- установлено, что вблизи температуры компенсации составного свободного слоя Gd/CoFe переход между магнитными состояниями, сопровождаемый изменением сопротивления спинового клапана, происходит при изменении температуры и фиксированной напряженности магнитного поля;

- продемонстрирована возможность эффективного использования спин-флоп состояния в синтетическом антиферромагнетике CoFe/Ru/CoFe при проведении термомагнитной обработки для формирования произвольного угла между осями анизотропии в слоях спиновых клапанов;

- для различных композиций спиновых клапанов и микрообъектов на их основе найдены условия, при которых наблюдается значительное ослабление низкополевого гистерезиса магнитосопротивления.

Практическая значимость полученных результатов. В диссертации разработаны и опробованы режимы термомагнитной обработки, позволяющие получать спиновые клапаны и микрообъекты на их основе с сочетанием функциональных характеристик, представляющим интерес для практических применений. В итоге синтезированы спиновые клапаны, которые могут быть использованы для изготовления высокочувствительных магнитных сенсоров.

Достоверность полученных экспериментальных результатов не вызывает сомнений, поскольку представленные в работе экспериментальные данные были получены с использованием современных аттестованных приборов, апробированных методик и эталонных образцов. Характеристики полученных наноструктурных материалов

исследованы несколькими взаимно-дополняющими методами. Полученные результаты не противоречат экспериментальным и теоретическим данным других исследователей. Основные результаты докладывались на 8 международных конференциях и симпозиумах, опубликованы в 9 научных статьях, из них 6 – в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

К замечаниям по диссертационной работе можно отнести следующее.

1. В разделе диссертации, посвященном спиновым клапанам на основе Gd/CoFe с точкой компенсации, сдвиг петель гистерезиса с ростом толщины слоя Gd объясняется ростом шероховатости всей наноструктуры. Но наличие шероховатости должно было бы привести к росту ширины петель гистерезиса, что не видно из результатов, приведенных на рис.43 и 44. Эта не совсем очевидная гипотеза могла бы быть легко проверена посредством использования, например, атомно-силовой микроскопии .

2. Хотелось бы услышать комментарии автора по поводу влияния размерных эффектов на РККИ-обмен в Ru при исследовании магнитного и магниторезистивного гистерезиса в пленках CoFe/Ru/CoFe. Как видно из рис.78 и 79 коэффициент прямоугольности магнитного гистерезиса как при ферро-, так антиферромагнитном упорядочении слоев близок к единице, в то время как при магниторезистивном гистерезисе это не так. Более того, при близких значениях толщины слоя Ru ширины магниторезистивных кривых при антиферромагнитном упорядочении значительно шире, чем при ферромагнитном (рис.74), и это естественно из-за возможных эффектов на интерфейсе. Однако это расходится с данными, приведенными для аналогичных зависимостей на рис. 78.

3. Трудно также согласиться с одним из пунктов заключения по главе 4.6 о наблюдаемой температурной стабильности основных характеристик клапанов с синтетическим антиферромагнетиком. Согласно рис.58 и 61 максимальное значение магнитосопротивления и магниторезистивной чувствительности в исследованном температурном интервале изменяются почти в 2 раза.

4. В тексте диссертации и автореферате встречаются опечатки и погрешности в оформлении, связанные в основном с англоязычными обозначениями и названиями единиц измерения (например, рис. 1 в автореферате, рис 19. в диссертации)

Указанные замечания не являются принципиальными и не снижают общий научный уровень диссертационной работы.

В целом диссертационная работа заслуживает высокой оценки. Чернышовой Т.А. получены важные экспериментальные результаты при решении актуальной научной задачи по установлению взаимосвязи между особенностями наведенной магнитной анизотропии и

магнитотранспортными свойствами спиновых клапанов с различными синтетическими ферримагнетиками. Разработаны методы получения безгистерезисных спиновых клапанов с функциональными характеристиками, представляющими интерес для практических приложений. Диссертация соответствует паспорту заявленной специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений. Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Результаты диссертации могут быть использованы в научно-исследовательских организациях и вузах, занимающихся исследованиями в области физики магнитных явлений и разработкой новых магнитных материалов и устройств на их основе, в частности МГУ им. М.В. Ломоносова, Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН, ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, УрФУ им. Б.Н. Ельцина, ВГУ, НИТУ «МИСИС».

Считаем, что работа Чернышовой Татьяны Александровны «Магнитные и магниторезистивные свойства спиновых клапанов с синтетическим ферримагнетиком и микрообъектов на их основе» по своему научному уровню, значению, достоверности и новизне результатов полностью соответствует требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры экспериментальной физики Физико-технического института Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, протокол № 7 от 4 марта 2019 года.

Заведующий кафедрой экспериментальной
физики доктор физ.-мат. наук, профессор



Владимир Наумович Бержанский

Почтовый адрес: 295007, г. Симферополь, Республика Крым, проспект академика Вернадского, 4 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского
Тел.: +38 (0652) 63-75-95, e-mail: v.n.berzhansky@gmail.com



С отзывом ознакомлена
13.03.19 В.А.
(Чернышова Т.А.)

Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского
Россия, Республика Крым, 295007, г. Симферополь, проспект академика Вернадского, 4
Телефон: (3652) 60-84-98
E-mail: cf_university@mail.ru
www: <https://cfuv.ru/>

Основные научные направления

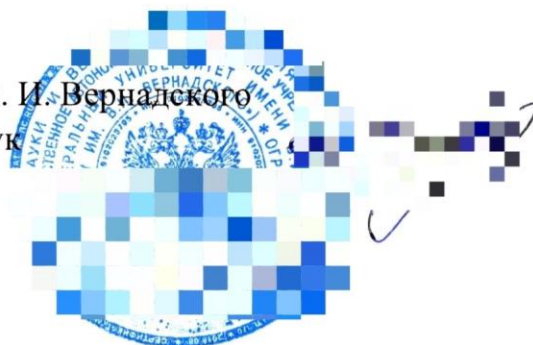
1. Квантовая теория магнетизма, теория фазовых переходов
2. Магнитофотоника и магнитоплазмоника
3. Магнитоакустика
4. Магнитосенсорика
5. Ядерный магнитный резонанс в магнетиках и ферромагнитный резонанс
6. Синтез и исследование пленок ферритов гранатов и наноструктур на их основе

Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. Conductivity features of nanoislet metal films / S.V. Tomilin, V.N. Berzhansky, E.T. Milyukova, O.A. Tomilina, A.S. Yanovsky // *Physics of the Solid State*. – 2018. – Vol. 60, No. 7. – P. 1255-1262.
2. Investigation of welds by the method of the magneto-optical eddy current flaw detection / N. Lugovskoy, V. Berzhansky, D. Filippov, A. Prokopov, A. Shuysky // *EPI Web of Conf.* – 2018. – Vol. 185_02014.
3. Magneto-optical, structural and surface properties of RIB sputtered (Bi,Ga)-substituted DyIG films / Shaposhnikov A.N., Prokopov A.R., Berzhansky V.N., Karavainikov A.V., Vysokikh Y.E., Gerasimenko N.N., Smirnov D.I. // *Materials Research Bulletin*. – 2017. – Vol. 95. – P. 115-122.
4. Berzhansky V.N. Magneto-optical visualization of eddy current magnetic fields / V.N. Berzhansky, D.M. Filippov, N.V. Lugovskoy // *Physics Procedia*. – 2016. – № 230. – P. 273-278.
5. Одномерные магнитофотонные кристаллы с двойными магнитооптическими слоями / В.Н. Бержанский, А.Н. Шапошников, А.Р. Прокопов, А.В. Каравайников [et al.] // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2016. – Т. 150, вып. 5 (11). – С. 859-867.
6. Scanning probe microscopy of high-coercive iron garnet films / Y.V. Danishevskaya, A.S. Krikun, A.S. Nedviga, T.V. Mikhailova, V.N. Berzhansky // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2017. – Vol. 917 (7). – 072004.
7. Nano- and micro-scale Bi-substituted iron garnet films for photonics and magneto-optic eddy current defectoscopy / V.N. Berzhansky, A.V. Karavainikov, T.V. Mikhailova, A.R. Prokopov, A.N. Shaposhnikov [et al.] // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2017. – Vol. 440. – P. 175-178.
8. Magneto-optical microcavity with Au plasmonic layer / T.V. Mikhailova, S.D. Lyashko, S.V. Tomilin, A.V. Karavainikov [et al.] // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2017. – Vol. 917 (6). – 062053.

9. Vector magneto-optical sensor based on transparent magnetic films with cubic crystallographic symmetry / A. E. Rogachev, P. M. Vetoshko, N. A. Gusev, M. A. Kozhaev, A. R. Prokopov [et al.] // Applied Physics Letters. – 2016. – Vol. 109. – P. 162403.
10. Ultrathin and nanostructured Au films with gradient of effective thickness. Optical and plasmonic properties / S.V. Tomilin, V.N. Berzhansky, A.N. Shaposhnikov, A.R. Prokopov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 741_012113.
11. Optimization of one-dimensional photonic crystals with double layer magnetoactive defect / T.V. Mikhailova, V.N. Berzhansky, A.N. Shaposhnikov, A.V. Karavainikov, A.R. Prokopov [et al.] // Optical Materials. – 2018. – Vol. 78. – P. 521-530.
12. Temperature dependence of Faraday rotation in microcavity 1D-MPCs containing magneto-optical layers with a compensation temperature / V.N. Berzhansky, A.V. Karavainikov, T.V. Mikhailova, A.R. Prokopov, A.N. Shaposhnikov [et al.] // Solid State Phenomena. – 2015. – Vol. 230. – P. 247-252.
13. Features of linear defects eddy current images obtained with use of ferrite garnet films / V.G. Vishnevskii, V.N. Berzhansky, N.L. Lugovskoy, A.R. Prokopov, F.N. Pankov // Solid State Phenomena. – 2015. – Vol. 230. – P. 273-278.
14. Magnetic properties of epitaxial bismuth ferrite-garnet mono- and bilayers / E.Yu. Semuk, V.N. Berzhansky, A.R. Prokopov, A.N. Shaposhnikov [et al.] // J. Magn. & Magn. Mater. – 2015. – Vol. 394. – P. 92-95.
15. Epitaxial Bi-Gd-Sc iron-garnet films for magnetophotonic applications / A.R. Prokopov, P.M. Vetoshko, A.G. Shumilov, A.N. Shaposhnikov, A.N. Kuz'michev, N.N. Koshlyakova, V.N. Berzhansky, A.K. Zvezdin, V.I. Belotelov // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – Vol. 671. – P. 403-407.
16. Magneto-optics of single and microresonator iron-garnet films at low temperatures / A.N. Shaposhnikov, A.R. Prokopov, V.N. Berzhansky, T.V. Mikhailova, A.V. [et al.] // Optical Materials. – 2016. – Vol. 52.– P. 21-25.
17. High-coercive garnet films for thermo-magnetic recording / V.N. Berzhansky, Y.V. Danishevskaya, A.S. Nedviga, H.T. Milyukova // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 741_012187.

Ученый секретарь КФУ им. В. И. Вернадского
кандидат филологических наук



Л. М. Митрохина