

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«Федеральный исследовательский центр  
«Красноярский научный центр  
Сибирского отделения  
Российской академии наук»  
(КНЦ СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН)



Академгородок, 50,  
г. Красноярск, 660036, Россия  
тел.: +7 (391)243-45-12, факс: +7 (391)290-53-78  
e-mail: [fic@ksc.krasn.ru](mailto:fic@ksc.krasn.ru), <http://ksc.krasn.ru>  
ОКПО 05239177, ОГРН 1022402133698  
ИНН/КПП 2463002263/246301001

от 06.12.2014 № 356-42/6224  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«Утверждаю»  
директор КНЦ СО РАН, ФИЦ КНЦ  
СО РАН, д.ф.-м.н.

Волков Н.В.

«06» декабря 2017



## ОТЗЫВ

Ведущей организации федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр "Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук"» на диссертационную работу Миляева Михаила Анатольевича «Эффекты магнитной анизотропии в антиферромагнетиках и многослойных обменно-связанных наноструктурах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений»

Актуальной задачей науки о материалах является поиск и изучение новых сред с необычными и практически важными свойствами. Современные технологические тенденции ориентированы на использование композиционных материалов, что позволяет существенно расширить диапазон прикладных свойств изделий. В частности, в последние три десятилетия одним из направлений современного магнетизма является исследование планарных композитов, представляющих собой магнитные наноструктуры, сформированные из многослойных пленок с обменно-связанными индивидуальными слоями 3-д металлов, разделенных немагнитным материалом. Здесь обнаружен ряд новых эффектов – эффект гигантского магнитосопротивления, тунNELьное

магнитосопротивление, перпендикулярная анизотропия и т.д. – которые в настоящее время нашли практическое применение в области магнитоэлектроники и спинtronики. В магнитных наноструктурах реализуются различные типы магнитного упорядочения: антиферромагнитное, ферромагнитное и неколлинеарное. Поэтому кажется естественным включение в качестве реперных материалов монокристаллов антиферромагнетиков, с хорошо определяемой кристаллохимией и счетным числом дефектов. Дело в том, что в пленочных нанокомпозитах число технологических параметров, влияющих на атомную и магнитную структуру материала, а следовательно – на их физические свойства – очень велико. Поэтому актуальна цель диссертационной работы, сформулированная как: - «установление закономерностей поведения магнитных и магнитотранспортных свойств ... в антиферромагнетиках и многослойных наноструктурах, разработка эффективных методов управления ... и получения высокочувствительных материалов на основе эффекта ГМС.»

От общих слов перейдем к анализу диссертационной работы. Диссертация состоит из четырех глав. К сожалению, нет главы, которая представляла бы добротный обзор литературных источников, анализ которых привел автора к собственному видению обсуждаемых концепций. Выбран другой путь: каждая глава сопровождается кратким литературным обзором по результатам исследований по теме главы, что позволяет сформулировать здесь же задачи исследования.

**В первой главе** теоретически и экспериментально исследованы эффекты, обусловленные доменной структурой монокристаллов антиферромагнетиков  $\text{FeGe}_2$  и  $\text{Fe}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Ge}_2$  и проявляющие на кривых намагничивания и магнитосопротивления. Получено хорошее согласие между теорией и экспериментом.

**Главы 2, 3 и 4** посвящены исследованиям, выполненных на планарных нанокомпозитах и объединены общей особенностью магнитной структуры – антиферромагнитной связью отдельных элементов – так что данные нанокомпозиты могут быть определены как синтетические антиферромагнетики.

**Вторая глава** посвящена исследованиям эффектов анизотропии в магнитных металлических обменно-связанных сверхрешетках ( $\text{Fe}/\text{Cr}$ ), обладающих гигантским магнитосопротивлением (ГМС). Так как поле анизотропии Fe составляет величину  $\sim 500\text{Э}$ , а поле насыщения сверхрешеток

Fe/Cr в области первого антиферромагнитного максимума ГМС  $H_S \sim 20$  кЭ, то для выявления искомых эффектов автору пришлось идти на ряд ухищрений:

- использование монокристаллических подложек различных кристаллографических ориентаций;
- сверхрешетки Fe/Cr выращивать методом молекулярно-лучевой эпитаксии;
- увеличение толщины сплава Fe и Cr с целью уменьшения поля магнитного насыщения ( $H_S \sim H_A$ );
- создание упругих напряжений, индуцированных подложкой и изменяющихся от слоя к слою и т.д.

Все это вознаграждено обнаружением многоступенчатых кривых намагничивания и магнитосопротивления, свидетельствующих о множественности спин-флип переходах, указывающих на последовательное перемагничивание отдельных слоев Fe в многослойном нанокомпозите.

**Третья глава** посвящена исследованию атомной структуры, магнитных и магнитотранспортных свойств планарных многослойных композитов, получивших название спин-вентильные структуры (или спиновые клапаны) и ориентирована на «выгон» соответствующих эксплуатационных характеристик. Специфику материала лучше всего иллюстрирует один из выводов главы: «С использованием специальной термомагнитной обработки в магнитном поле, соответствующем спин-флоп состоянию в синтетическом антиферромагнетике, получены спиновые клапаны, сочетающие большую величину магнитосопротивления, практически отсутствующий гистерезис и высокую магниторезистивную чувствительность.», либо приведение, в качестве примера, химической формулы изучаемых нанокомпозитов – Ta(50 Å)/NiFe(20 Å)/CoFe(55 Å)/Cu(24 Å)/CoFe(55 Å)/FeMn(150 Å)/Ta(20 Å); Ta(50 Å)/NiFe(30 Å)/CoFe(20 Å)/Cu(22 Å)/CoFe(25 Å)/MnIn(50 Å)/Ta(20 Å); Ta(50 Å)/NiFe(30 Å)/CoFe(35 Å)/Cu(25 Å)/CoFe(35 Å)/Ru(8 Å)/CoFe(25 Å)/FeMn(100 Å)/Ta(20 Å). Спиновые клапаны были приготовлены методом магнетронного напыления.

**В четвертой главе** рассмотрены вопросы оптимизации функциональных характеристик сверхрешеток CoFe/Cu, Ni<sub>65</sub>Fe<sub>15</sub>Co<sub>20</sub>/Cu, Ni<sub>76</sub>Fe<sub>10</sub>Co<sub>14</sub>/Cu с целью «выгона» высоких значений величин магнитосопротивления. Убедительно показаны важность подбора композиций и толщин будущих слоев. Так, обнаружен эффект гигантского изменения характеристик петель магнитного

гистерезиса и магнитосопротивления в десятки раз при изменении толщины буферного слоя Cr с 15 Å до 20 Å. Показано повышение величины магнитосопротивления при использовании буферного подслоя из немагнитного сплава PyCr. Показано, что использование композиционного буферного подслоя Ta/PyCr позволяет для сверхрешетки Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>/Cu получить рекордную величину магнитосопротивления (81%) при комнатной температуре. ГМС-решетки изготавливались магнетронным напылением.

Сформулируем основные (на наш взгляд) существенные результаты диссертации:

1. Методом МЛЭ на подложках (211)MgO выращены сверхрешетки (210)[Fe/Cr] с одноосной анизотропией в плоскости слоев, на которых обнаружены многоступенчатые кривые намагничивания и магнитосопротивления, обусловленные последовательным перемагничиванием индивидуальных слоев Fe;
2. Установлены условия реализации безгистерезисного перемагничивания «свободного» ферромагнитного слоя в спиновых клапанах различных композиций. К ним относятся – создание совершенной текстуры и определенных конфигураций оси легкого намагничивания и оси односторонней (обменной) анизотропии;
3. Установлено существенное влияние буферного подслоя (состава – Cr, PyCr, композиций – Ta/PyCr) на совершенство выращиваемых на нем сверхрешеток, что приводит к значительным модификациям функциональных свойств сверхрешеток. Пример: изготовление сверхрешетки Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>/Cu с рекордной величиной магнитосопротивления (81% при комнатной температуре).

После перечисления достоинств работы отметим допущенные в ней, с нашей точки зрения, упущения.

1. Работа хорошо написана и хорошо оформлена, однако не свободна от редакционных погрешностей, что во многом обусловлено ее объемом.
2. В работе строится «дорожная карта» комплексного структурного и магнитного исследования выбранных планарных нанокомпозитов, но технологический маршрут представлен качественно, а не количественно. При выборе других технологических методик конденсации металлов в вакууме, либо иных технологий, других подложек и т.д. весь комплекс исследования для получения оптимальных функциональных свойств конденсаторов придется повторять заново.

Сделанные замечания не снижают общего положительного впечатления от диссертации и являются скорее следствием методических возможностей автора. В целом диссертация Миляева М. А. представляет собой законченное, достаточно масштабное исследование, выполненное на стыке фундаментальной науки и технологии, является значительным вкладом в пленочное материаловедение и в формирующуюся новую отрасль физической науки – «нанофизику». Научные и прикладные аспекты данной диссертации могут быть использованы в деятельности ряда академических, отраслевых и учебных заведений.

Автореферат правильно отражает содержание диссертационной работы.

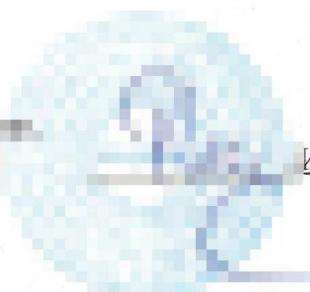
Все полученные результаты, частично отмеченные выше, научный и экспериментально-технологический уровень диссертации Миляева М. А. «Эффекты магнитной анизотропии в антиферромагнетиках и многослойных обменно-связанных наноструктурах» позволяют сделать вывод, что данная работа отвечает всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а диссертант - Миляев Михаил Анатольевич – заслуживает присуждения научной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 «физика магнитных явлений».

Доклад Миляева М.А. по теме диссертации был заслушан и обсуждался на семинаре неструктурного отдела «Физика магнитных явлений» с привлечением специалистов.

доктор физико-математических наук, профессор  
зав. лабораторией физики магнитных плёнок

Исхаков Рауф Садыкович

*С отчётом однаково.*  
*Миляев М.А.*  
*11.12.2017*



Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения  
Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН  
Адрес: 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 38  
Тел. +7(391) 243-26-35  
Факс +7(391)243-89-23  
E-mail: [rauf@iph.krasn.ru](mailto:rauf@iph.krasn.ru)

Ученый секретарь  
Института физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения  
Российской академии наук –  
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН  
к.ф.-м.н.



Злотников

## **Сведения о ведущей организации**

по диссертационной работе

**Миляева Михаила Анатольевича «Эффекты магнитной анизотропии в антиферромагнетиках и многослойных обменно-связанныхnanoструктурах»,**  
представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических  
наук по специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений»

1. Полное наименование и сокращенное наименование:

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (КНЦ СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН)

2. Место нахождения:

Россия, Красноярский край, г. Красноярск, Академгородок, 50.

3. Почтовый адрес, телефон, адрес электронной почты (при наличии), адрес официального сайта в сети «Интернет» (при наличии):

660036, Красноярский край, г. Красноярск, Академгородок, 50.

Телефон: +7(391)243-45-12, факс +7(391)290-53-78, e-mail: [fic@ksc.krasn.ru](mailto:fic@ksc.krasn.ru),  
<http://ksc.krasn.ru>

4. Список основных публикаций работников ведущей организации по теме диссертации соискателя в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не менее 5-ти):

1. Denisova E.A., Kuzovnikova L.A., Iskhakov R.S., Bukaemskiy A. A., Eremin E.V., Nemtsev I. V. Effect of ball milling and dynamic compaction on magnetic properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Co(P) composite particles// J. Appl. Phys. – 2014. - Vol.115, Is. 17. - P. 17B530.
2. Balaev D. A., Krasikov A.A., Dubrovskii A.A., Semenov S.V., Bayukov O.A., Stolyar S.V., Iskhakov R.S., V.P. Ladygina, Ishchenko L.A. Magnetic properties and the mechanism of formation of the uncompensated magnetic moment of antiferromagnetic ferrihydrite nanoparticles of a bacterial origin // J. Exp. Theor. Phys. - 2014. - Vol. 119, Is. 3. - P. 479-487, DOI 10.1134/S1063776114080044.
3. Iskhakov R.S., Komogortsev S.V., Balaev A.D., Gavriliuk A.A. The manifestations of the two-dimensional magnetic correlations in the nanocrystalline ribbons Fe<sub>64</sub>CO<sub>21</sub>B<sub>15</sub> // J. Magn. Magn. Mater. - 2015. - Vol. 374. - P. 423-426, DOI: [10.1016/j.jmmm.2014.08.078](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.08.078).

4. Балаев Д.А., Красиков А.А., Дубровский А.А., Баюков О.А., Столляр С.В., Исхаков Р.С., Ладыгина В.П., Ярославцев Р.Н. Влияние низкотемпературной термообработки на магнитные свойства наночастиц ферригидрита биогенного происхождения // Письма в Журн. техн. физ. - 2015. - Т. 41, Вып. 14. - С. 88-96.
5. Stolyar S.V., Balaev D. A., Yaroslavtsev R.N., Bayukov O.A., Iskhakov R.S., Ishchenko L.A., Ladygina V.P. Production and magnetic properties of biogenic ferrihydrite nanoparticles // J. Optoelectron. Adv. Mater. - 2015. - Vol. 17, Is. 7-8. - P. 968-972.
6. Komogortsev S.V., Iskhakov R.S., Zimin A.A., Filatov E. Yu., Korenev S.V., Shubin Yu. V., Chizhik N.A., Yurkina G. Yu., Eremina E.V. The exchange interaction effects on magnetic properties of the nanostructured CoPt particles // J. Magn. Magn. Mater. - 2016. - Vol. 401. - P. 236-241, DOI 10.1016/j.jmmm.2015.10.041.
7. Балаев Д. А., Красиков А.А., Дубровский А.А., Семенов С.В., Попков С.И., Столляр С.В., Исхаков Р.С., Ладыгина В.П., Ярославцев Р.Н. Особенности магнитных свойств наночастиц ферригидрита бактериального происхождения: смещение петли гистерезиса// Физ. тверд. тела. – 2016. - Т. 58 Вып. 2. - С. 280-284
8. Balaev D. A., Krasikov A.A., Dubrovskii A.A., Popkov S.I., Stolyar S.V., Bayukov O.A., Iskhakov R.S., Ladygina V.P., Yaroslavtsev R.N. Magnetic properties of heat treated bacterial ferrihydrite nanoparticles // J. Magn. Magn. Mater. - 2016. - Vol. 410. - P. 171-180, DOI10.1016/j.jmmm.2016.02.059.
9. Балаев Д.А., Красиков А.А., Столляр С.В., Исхаков Р.С., Ладыгина В.П., Ярославцев Р.Н., Баюков О.А., Воротынов А.М., Волочаев М.Н., Дубровский А.А. Изменение магнитных свойств наноферригидрита в ходе низкотемпературного отжига, обусловленное ростом объема наночастиц [Текст] / Д. А. Балаев [и др.]. - 9 с. // Физ. тверд. тела. – 2016. - Т. 58 Вып. 9. - С. 1724–1732
10. Balaev D. A., Krasikov A.A., Dubrovskii A.A., Popkov S.I., Stolyar S.V., Iskhakov R.S., Ladygina V.P., Yaroslavtsev R.N. Exchange bias in nano-ferrihydrite // J. Appl. Phys. - 2016. - Vol. 120, Is. 18. - P. 183903, DOI 10.1063/1.4967912.
11. Денисова Е. А., Л.А. Кузовникова, Р.С. Исхаков, В.К. Мальцев. Объемные наноструктурированные материалы на основе кобальта, полученные динамическим компактированием композиционных частиц “ядро–оболочка”// Изв. РАН. Сер. физич. - 2016. - Т. 80, № 11. - С. 1555-1558, DOI 10.7868/S0367676516110193 .
12. Столляр С.В., Ярославцев Р.Н., Исхаков Р.С., Баюков О.А., Балаев Д.А., Дубровский А.А., Красиков А.А., Ладыгина В.П., Воротынов А.М., Волочаев М.Н. Магнитные и резонансные свойства наночастиц ферригидрита, легированных кобальтом // Физ. тверд. тела. - 2017. - Т. 59, Вып. 3. - С. 538–545, DOI 10.21883/FTT.2017.03.44166.329.
13. Кузовникова Л. А., Комогорцев С.В., Немцев И.В., Исхаков Р.С., Чеканова Л.А., Мальцев В.К. Магнитоструктурные исследования наноструктурированных объемных сплавов (Co–P)100 – xCux // Изв. РАН. Сер. физич. - 2017. - Т. 81, № 3. - С. 323-326, DOI 10.7868/S0367676517030255.

05.12.2017

Ученый секретарь  
ФИЦ КНЦ СО РАН  
к.ф.-м.н.



Шкуряев П.Г.