

**«УТВЕРЖДАЮ»**

**Проректор  
Московского  
государственного**

**университета**

**имени М.В. Ломоносова**

**профессор А.А. Федягин**

**2021 г.**



## **ОТЗЫВ**

ведущей организации – федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» на диссертационную работу Москаleva Mihaila Evgen'evicha на тему «Закономерности формирования и механизмы обменного смещения в поликристаллических пленках Ni-Mn/Fe-Ni», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – физика магнитных явлений.

Исследование процессов в многослойных ультратонких структурах, перспективных для микроэлектроники, спинtronики и сенсорики, остается одной из актуальных задач современного этапа развития физики магнитных явлений. Этим проблемам уделяется большое внимание на международных конференциях и в публикациях, с их решением связывают надежды в прорывном развитии магнитной сенсорики и универсальной магнитной памяти на базе эффектов гигантского и тунNELьного магнитного сопротивления. Несмотря на современные достижения в спинtronике, многие наблюдаемые в тонкопленочных многослойных структурах эффекты поняты еще не до конца. Наряду с другими, к таковым вопросам относятся эффекты возникновения односторонней магнитной анизотропии, обусловленной взаимодействием между слоями ферромагнетика ( $\Phi$ ) и антиферромагнетика ( $A\Phi$ ) на границе раздела (интерфейсе)  $\Phi/A\Phi$ ,

проявляющейся в сдвиге петли гистерезиса на величину т.н. обменного смещения.

В настоящее время существует несколько моделей механизмов обменного смещения, но, тем не менее, остается много вопросов, связанных с ролью интерфейсных слоев, межслойной диффузией и т.п. Несмотря на ряд интересных эффектов, которые наблюдаются в структурах с обменным смещением, многие аспекты их поведения не получили адекватного объяснения. Указанные обстоятельства мотивируют исследования по дальнейшему изучению многопленочных систем на основе ферромагнитных/антиферромагнитных пленок. Наиболее прямой путь – целенаправленное варьирование состава, изменение толщин слоев и добавление промежуточных разделительных пленок. Все эти подходы представлены в рассматриваемой работе.

Из вышесказанного следует, что тема диссертации Москаleva Михаила Евгеньевича является **актуальной**, а появление публикаций, на которых она основана, было весьма важно и своевременно. .

Диссертационная работа по содержанию и структуре отвечает требованиям, предъявляемым ВАК к научно-квалификационным работам на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. Работа изложена на 141 странице, включает 81 рисунок и 1 таблицу. Библиографический список включает 138 наименований. Содержание диссертации включает введение, литературный обзор, описание экспериментальных методик, три главы с оригинальными результатами, заключение, список использованных обозначений и сокращений, библиографический список и список публикаций по теме диссертации.

В введении проведен анализ актуальности исследований и степени разработанности темы, сформулирована цель, определены задачи и методы их решения, обсуждаются новизна и практическая значимость работы, обосновывается выбор исследуемых образцов, приведены положения, выносимые диссертантом на защиту, показывается степень достоверности результатов, описаны степень апробации работы и личный вклад автора.

В первой главе содержится анализ современных моделей обменного смещения в поликристаллических тонкопленочных структурах, представлено детальное описание сплавов и соединений бинарной системы NiMn, их магнитных и структурных свойств. Убедительно представлены противоречивые данные о механизмах эффекта обменного смещения в

поликристаллических пленках со слоем NiMn. С учетом представленной информации формулируется заключение, обосновывающее проведенные исследования.

Во второй главе описаны материалы и экспериментальные методики, использованные при выполнении диссертационной работы. Приведены основные параметры технологических и экспериментальных установок, освоенных диссертантом. В частности, описаны установка магнетронного напыления AJA ATC Inc. Orion-8 UHV, рентгеновский флуоресцентный спектрометр на полном внешнем отражении Rigaku NanoHunter, магнитооптический Керр-микроскопа Evico magnetics, вибрационный магнитометр LakeShore Cryotronics Inc. 7407 VSM и измерительного комплекса Quantum Design Inc. PPMS DynaCool 9T. В главе также детально описана методика получения распределения температур блокировок для оценки величины эффективной константы анизотропии антиферромагнитного слоя, использованная диссертантом при анализе результатов.

В последующих трех главах приведены оригинальные результаты диссертанта и проведен их подробный анализ. Каждая глава завершается кратким заключением, обобщающим изложенный материал.

В третьей главе представлены результаты исследований общих закономерностей формирования обменного смещения в плёнках на основе системы Ni-Mn. В частности проанализированы данные о связи кристаллической структуры с параметрами обменного смещения, рассмотрено влияние температуры и отжига на параметры обменного поля и коэрцитивной силы. Рассмотрена роль буферных слоев пермаллюя и прослоек Та в формировании структуры и влиянии на гистерезисные свойства и обменное смещение в многослойных структурах Fe-Ni/Ni-Mn/Fe-Ni. Подтверждено предположение о существовании термоиндуцированного фазового перехода в NiMn. Интересные данные получены при анализе влияния толщины слоя Ni-Mn, как инструмента модификации магнитных свойств плёнок. В частности, показано, что при уменьшении толщины закрепляющего слоя становится возможным уменьшить термочувствительность  $H_{ex}$ . Так, в случае толщины слоя Ni-Mn равной 12,0 нм поле обменного смещения оставалось стабильным от комнатной температуры до 400 К. Данный результат весьма важен для разработчиков магнитной памяти на обменно-связанных структурах. Представляют также

большой интерес данные о влиянии прослойки tantalа, при толщине которой 0,3 нм происходит примерно десятикратное падение поля обменного смещения при 300 К по сравнению с плёнкой без прослойки. Важно, что поле обменного смещения и коэрцитивная сила оказываются более чувствительными к введению прослойки tantalа, чем к уменьшению толщины слоя Ni-Mn. К достоинствам работы следует отнести предложенные модельные объяснения всех полученных экспериментальных зависимостей.

В четвертой главе приводятся результаты систематических исследований роли структурных преобразований в формировании и необратимом исчезновении обменного смещения в плёнках Ni-Mn/Fe-Ni. В частности диссертантом установлено, что исследованные образцы в исходном состоянии являлись рентгеноаморфными. Обнаружено, что присутствие некоторого количества нетекстуированных зёрен  $\gamma$ -Ni-Mn в аморфной матрице наблюдается лишь в наиболее богатых марганцем образцах. Показано, что аморфизация плёнок способствует присутствие буферного слоя tantalа, относительно низкая температура подложки и высокая скорость осаждения – наименьшей она была именно в случае образцов богатых марганцем. При отжиге происходила лишь слабая кристаллизация образцов. После отжига плёнки по-прежнему представляют собой аморфную матрицу, в которой помимо зёрен  $\gamma$ -Ni-Mn появляются зёрна  $\theta$ -NiMn, что подтверждено данными рентгеноструктурного анализа. Интересно, что положение пиков после отжига оказалось между положениями, соответствующими пикам (111)  $\gamma$ -Ni-Mn и  $\theta$ -NiMn. Утверждается, что это может свидетельствовать о существовании двух фаз из-за незавершённого структурного превращения. Кроме того, автор делает вывод о том, что необратимое исчезновение обменного смещения в плёнках связано со структурными преобразованиями, происходящими в плёнках. Отмечается также, что в процессе преобразования важную роль играет межслойная диффузия, приводящая к изменению структурных и магнитных свойств смежных слоёв Fe-Ni, о чём, по мнению диссертанта, свидетельствует существенное изменение положений пиков смежных слоёв Fe-Ni.

В пятой главе выполнен анализ температурного поведения обменного смещения в поликристаллических плёнках Ni-Mn/Fe-Ni. Для этого проведены исследования температурных зависимостей поля обменного смещения  $H_{ex}$ ,

полученных после охлаждения образца  $\text{Ni}_{29}\text{Mn}_{71}$ (20 нм)/ $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ (40 нм) в магнитном поле разной полярности, что позволило разделить вклады низкотемпературных фаз. Полученные данные позволили оценить температурную зависимость эффективной константы анизотропии антиферромагнитного слоя Ni-Mn. Установлено, что эта зависимость показывает линейный по температуре рост константы анизотропии в интервале температур от 180 К до 445 К.

В заключении приводятся основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Следует особо подчеркнуть огромный объем экспериментов, проведенных соискателем.

Все перечисленные выше результаты, приведенные в главах 3-5, получены **впервые и определяют научную новизну** работы. Кратко можно сказать, что новизна работы состоит в установлении закономерностей структурных преобразований, приводящих к формированию равновесной антиферромагнитной фазы  $\theta\text{-NiMn}$  как из первоначально аморфного состояния, так и из неравновесной неупорядоченной антиферромагнитной фазы  $\gamma\text{-Ni-Mn}$ . На основе анализа распределения температур блокировок впервые получена зависимость эффективной константы анизотропии антиферромагнитного слоя Ni-Mn от его толщины и от температуры. Полученные результаты позволили объяснить наблюдаемый в ряде образцов аномальный рост поля обменного смещения с увеличением температуры. Впервые установлено, что причиной необратимых изменений и исчезновения эффекта обменного смещения в плёнках типа Ni-Mn/Fe-Ni при нагреве их до температур, достигающих температуры блокировки, является распад фазы  $\theta\text{-NiMn}$ .

**Однако, работа не свободна от недостатков, о которых следует сказать:**

1. Во второй главе при описании экспериментальных установок и методов опущены оценки возможных погрешностей и источников ошибок, которые могут повлиять на экспериментальные данные. Например, при обсуждении толщин напыляемых пленок отмечается, что воспроизводимость имеет погрешность порядка 6А (0.6 нм), погрешность такого порядка может оказаться существенной при анализе свойств пленок с толщинами 5-10 нм.

2. В пятой главе утверждается, что низкотемпературные фазы представляют собой спиновое стекло. Данное утверждение требует дополнительное аргументации, поскольку ранее в подобных системах состояние спинового стекла не наблюдалось, а приведенных в работе данных недостаточно, на наш взгляд, для доказательства.

3. В тексте диссертации и автореферата для обозначения температур используются одновременно шкалы Кельвина и Цельсия, что затрудняет восприятие информации.

4. При анализе результатов диссертант использует понятия "ослабления" и "усиления" текстуры не объясняя, какой смысл вкладывается в эти выражения. В каких величинах и каким образом происходит оценка параметров текстуры?

5. В тексте диссертации присутствует заметное число опечаток и стилистических погрешностей, например:

"Подача смещающего напряжения возможна и на подложкодержатель благодаря отдельному RF-источнику мощностью 100 Вт и частотой 13,56 МГц" (стр.49) - смещающее напряжение, по идеи, должно быть постоянным;

"...просвечивающий электронный микроскоп Jeol Ltd. JEM-2100 с максимальной мощностью 200 кВт." (стр.57) - возможно речь идет об ускоряющем напряжении?

"3.3.1 Варьирование толщины слоя Ni-Mn на обменное смещение в плёнках Ni-Mn/Fe-Ni" (стр.78) - предложение несогласовано.

Отмеченные недостатки ни в коей мере не затрагивают основных выводов и результатов диссертации, не снижают их ценности и не ставят под сомнение их значимость.

Полученные в диссертационной работе результаты **имеют научную и практическую значимость** как для решения фундаментальной задачи физики магнитных явлений – раскрывают механизмы формирования обменного смещения в структурах на основе пленок NiMn, так и для выработки рекомендаций по параметрам структур для формирования заданных величин смещения.

**Обоснованность и достоверность** вошедших в диссертационную работу результатов и положений, выносимых на защиту, обеспечивается использованием апробированных экспериментальных методов современной физики, представленным огромным экспериментальным материалом,

сопоставлением с доступными экспериментальными данными и теоретическими результатами, полученными другими авторами.

**Результаты диссертации могут быть рекомендованы для ознакомления и использованы** в научных и образовательных организациях, где осуществляются теоретические и экспериментальные исследования магнитоупорядоченных материалов и многопленочных структур, например, ФГБУН «ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН» (г. Москва), ФГБУН «Институт физики им. Х.И. Амирханова» ДФИЦ РАН (г. Махачкала), ФГБОУ ВО «МГУ им. М.В. Ломоносова» (г. Москва), ФГБУН ИФМ им. М.Н. Михеева УрО РАН (г. Екатеринбург), ФГАОУ ВО «НИТУ «МИСиС» (г. Москва), ФГБОУ ВО «БашГУ» (г. Уфа), ФГАОУ ВО «БФУ им. Иммануила Канта» (г. Калининград), ФГБОУ ВО «СГУ им. Питирима Сорокина» (г. Сыктывкар), ФГБОУ ВО «ОмГУ им. Ф.М. Достоевского» (г. Омск), ФГБУН УдмФИЦ УрО РАН (г. Ижевск) и других научно-исследовательских учреждениях.

Результаты работы представлены в 4 статьях, опубликованных в ведущих российских и зарубежных журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus, а также в 19 тезисах докладов международных и всероссийских конференций, хорошо известны специалистам.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Таким образом, диссертационная работа Москаleva Mихаила Евгеньевича на тему «Закономерности формирования и механизмы обменного смещения в поликристаллических пленках Ni-Mn/Fe-Ni», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – физика магнитных явлений, является завершенной научно-квалификационной работой, в которой получены результаты, имеющие значение для развития физики магнитных явлений. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.12 – физика магнитных явлений.

Работа соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе критериям раздела II Положения «О порядке присуждения ученых степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 с последующими изменениями, а ее автор Москалев Михаил Евгеньевич, несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – физика магнитных явлений.

Диссертационная работа и заключение обсуждены на заседании кафедры магнетизма физического факультета ФГБОУ ВО «МГУ им. М.В. Ломоносова» «22» ноября 2021 г., протокол №15.

Доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий кафедрой  
магнетизма Физического факультета  
ФГБОУ ВО «МГУ им. М.В.  
Ломоносова», специальность 01.04.11 –  
Физика магнитных явлений

Перов Н.С.



Доктор физико-математических наук,  
профессор, профессор кафедры магнетизма  
Физического факультета ФГБОУ ВО  
«МГУ им. М.В. Ломоносова»,  
специальность 01.04.11 – Физика  
магнитных явлений

Грановский А.Б.



Подписи Перова Н.С. и Грановского А.Б. заверяю



С отцывом однокомиссионной комиссии  
13.12.2021

Алена (Москалев А.Е.)

**Сведения о ведущей организации по диссертации Москаleva  
Михаила Евгеньевича на тему «Закономерности формирования и  
механизмы обменного смещения в поликристаллических пленках Ni-  
Mn/Fe-Ni», представленной на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук по специальности 1.3.12. - физика  
магнитных явлений.**

**Организация:**

Полное название: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования «Московский  
государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Сокращённое название: «Московский государственный университет  
имени М.В.Ломоносова»

**Контактные данные:**

Юридический адрес: 119991, Российская Федерация, Москва,  
Ленинские горы, д. 1, Московский государственный университет имени  
М.В.Ломоносова

Телефон: (495) 939-10-00

Факс: (495) 939-01-26

Адрес официального сайта в сети Интернет: <https://www.msu.ru/>

Адрес электронной почты: [info@rector.msu.ru](mailto:info@rector.msu.ru)

Ректор:

академик Виктор Антонович Садовничий

Список избранных научных трудов работников организации по  
специальности диссертации за 2017-2021 годы:

1. Ganshina E.A., Garshin V.V., Pripechenkov I.M., Ivkov S.A.,  
Sitnikov A.V., Domashevskaya E.P. "Effect of Phase Transformations of a Metal  
Component on the Magneto-Optical Properties of Thin-Films Nanocomposites  
(CoFeZr)<sub>x</sub> (MgF<sub>2</sub>)<sub>100-x</sub>." Nanomaterials 2021, 11, 1666. <https://doi.org/10.3390/nano11071666>

2. Ганьшина Е.А., Гаршин В.В., Буйлов Н.С., Зубарь Н.Н.,  
Ситников А.В., Домашевская Э.П."Исследование магнитных свойств  
аморфных многослойных наноструктур [(CoFeB) 60C40/SiO<sub>2</sub>]<sub>200</sub> and  
[(CoFeB)34(SiO<sub>2</sub>)66/C]<sub>46</sub> с помощью экваториального эффекта Керра"  
Конденсированные среды и межфазные границы, 2020, том 22, № 4, с. 438-  
445 DOI <http://dx.doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3114>

3. Komlev Aleksei S., Karpenkov Dmitriy Y., Kiselev Dmitry A., Ilina Tatiana S., Chirkova Alisa, Gimaev Radel R., Usami Takamasa, Taniyama Tomoyasu, Zverev Vladimir I., Perov Nikolai S. "Ferromagnetic phase nucleation and its growth evolution in FeRh thin films" *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, том 874, с. 1-8 DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159924>
4. Диаграммы стабильности туннельной наногетероструктуры в приближении свободных электронов / Д. А. Лифатова, А. В. Ведяев, Н. В. Рыжанова и др. // ЖЭТФ/ЯЕРП. — 2019. — Т. 156, № 2. — С. 338–347.
5. Correlation effects in the ground state of Ni-(Co)-Mn-Sn Heusler compounds / B. Bernardo, P. Aki, N. Johannes et al. // MRS Advances. — 2019. — Vol. 4, no. 8. — P. 441–446.
6. Nonlocal signal and noise in t-shaped lateral spin-valve structures / A. Vedyayev, N. Ryzhanova, N. Strelkov et al. // Physical Review Applied. — 2018. — Vol. 10, no. 6. — P. 064047.
7. Andrianov T., Vedyayev A., Dieny B. Magnetic modulation of inverse spin hall effect in lateral spin-valves // Journal of Physics D. — 2018. — Vol. 51, no. 20. — P. 205003.
8. Influence of spin-orbit interaction within the insulating barrier on the electron transport in magnetic tunnel junctions / A. Vedyayev, N. Ryzhanova, N. Strelkov et al. // Physical Review B. — 2017. — Vol. 95. — P. 064420–1–064420–6.
9. Analytical description of ballistic spin currents and torques in magnetic tunnel junctions / M. Chshiev, A. Manchon, A. Kalitsov et al. // Physical Review B. — 2015. — Vol. 92, no. 10. — P. 104422.
10. Measurements of the superconducting anisotropy in FeSe with a resonance frequency technique / R. X. Cao, J. Dong, Q. L. Wang et al. // AIP advances. — 2019. — Vol. 9, no. 4. — P. 045220–1–045220–5.
11. Milestones of low-d quantum magnetism / V. Alexander, V. Olga, Z. Elena, M. Maria // Nature Partner Journals. Quantum Materials. — 2018. — Vol. 3, no. 18. — P. s41535–018–0090–7.
12. Vortex-core properties and vortex-lattice transformation in fese / A. V. Putilov, C. D. Giorgio, V. L. Vadimov et al. // Physical Review B. — 2019. — Vol. 99. — P. 144514–1–144514–13.
13. High-pressure phase diagram of NdFeAsO<sub>0.9</sub>F<sub>0.1</sub>: Disappearance of superconductivity on the verge of ferromagnetism from Nd moments / M. Abdel-Hafiez, M. Mito, K. Shibayama et al. // Physical Review B. — 2018. — Vol. 98, no. 9. — P. 094504.

14. Superconducting gap symmetry in the superconductor BaFe(1.9)Ni(0.1)As(2) / T. E. Kuzmicheva, S. A. Kuzmichev, A. V. Sadakov et al. // Physical Review B. — 2018. — Vol. 97, no. 23. — P. 235106.

15. Upper critical fields in Ba<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>As<sub>4</sub>O single crystals: Evidence for dominant pauli paramagnetic effect / M. Abdel-Hafiez, J. Brisbois, Z. Zhu et al. // Physical Review B. — 2018.

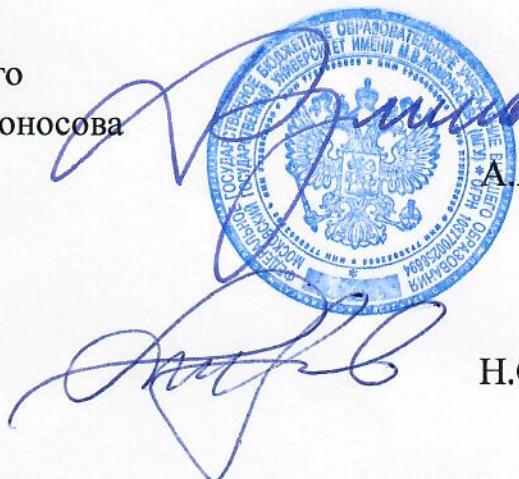
16. Anisotropic superconducting gaps and boson mode in FeSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> single crystals / C. Di\_Giorgio, A. V. Putilov, D. J. Trainer et al. // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. — 2017. — Vol. 30, no. 3. — P. 763–768.

17. Anisotropic effect of appearing superconductivity on the electron transport in FeSe / P. D. Grigoriev, A. A. Sinchenko, K. K. Kesharpu et al. // JETP Letters. — 2017. — Vol. 105, no. 12. — P. 786–791.

18. Gossamer high-temperature bulk superconductivity in FeSe / A. A. Sinchenko, P. D. Grigoriev, A. P. Orlov et al. // Physical Review B. — 2017. — Vol. 95, no. 16. — P. 165120.

Проректор  
Московского государственного  
университета имени М.В.Ломоносова  
профессор

Зав. кафедрой магнетизма  
д.ф.-м.н., профессор



А.А. Федянин

Н.С. Перов