

Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу Ершова Николая Владимировича на тему: «Закономерности формирования атомной структуры магнитомягких железосилицистых сплавов», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния»

Диссертационная работа Ершова Н.В. посвящена установлению закономерностей модификации атомной структуры в кристаллических, аморфных и нанокристаллических железосилицистых сплавах в ходе ТО, ТМО, ТМехО, а также от содержания кремния, прямыми структурными методами.

Тема диссертации Ершова Н.В. безусловно актуальна, исследования, проведенные в диссертации имеют большое значение для теоретического и прикладного материаловедения, а также для теоретического и прикладного магнетизма.

Известно, что железосилицистые стали являются важнейшими материалами электротехники и радиоэлектроники в диапазоне частот до 500 Гц. Улучшение физических свойств этих магнитомягких сплавов осуществляют как металлургическими (оптимизация толщины ленты и размера кристаллического блока, создание кристаллографической текстуры и т.д.), так и физическими методами (формирование наведенной магнитной анизотропии термомагнитной и термомеханической обработками, магнитоструктурных барьеров и оптимизированной доменной структуры), приводящими к максимальному снижению магнитных потерь и к петлям магнитного гистерезиса с нужными характеристиками. Аморфные и нанокристаллические сплавы, содержащие 70÷80% железа, позволили увеличить рабочую частоту в устройствах радиоэлектроники до десятков кГц.

Механизмы и закономерности формирования оптимальной магнитной и атомной структуры в этом новом классе магнитомягких материалов в настоящее время устанавливаются. Некоторые из них нашли решение в реферируемой диссертации.

Исследования по теме диссертации получили финансовую поддержку в рамках программ фундаментальных исследований УрО РАН, ОФН РАН, Президиума РАН и грантов РФФИ, стимулировали кооперацию с другими научными коллективами, опубликованы в 24 журнальных публикациях и в одной главе коллективной монографии «Nanocrystal», представлены на многочисленных конференциях высокого уровня (более 40-ка). Диссертация изложена на 322 страницах и включает 106 иллюстраций, 27 таблиц и список литературы из 222 источников. Текст работы разбит на введение, четыре раздела (аналоги глав) и заключение.

Во введении содержится убедительное обоснование актуальности темы диссертации, формулируются основные цели и задачи исследования и суммируются результаты, составляющие научную новизну и практическую значимость диссертации.

В первом разделе на 53 стр. приводятся результаты исследования атомной структуры кристаллических железокремнистых сплавов, содержащих от 5 до 8 ат. % Si. Показано, что при переходе от Fe к Fe-Si сплаву сильные брегговские рефлексы не изменяются, что указывает на сохранение дальнего порядка ОЦК решетки, со смещением линий в большие углы θ , соответствующие уменьшению параметра ОЦК ячейки. В то же время в сплавах обнаруживаются слабые диффузионные и сверхструктурные пики (на несколько порядков меньше атомных). Регистрация этих слабых пиков позволила идентифицировать кластеры, упорядоченные по типу B2 (стехиометрия FeSi) и кластеры, упорядоченные по типу DO₃ (стехиометрия Fe₃Si) и устанавливать их пространственные размеры. Результаты, полученные рентгеновской дифракцией, были усилены результатами, полученными методом ЯГР-спектроскопии. Путем разложения спектров ЯГР на подспектры были определены доли отдельных конфигураций атомов кремния в двух координационных сферах атома Fe. Путем сопоставления подспектров с теоретическими для разупорядоченных твердых растворов получены данные о расслоении химической структуры сплавов на области, обедненные и обогащенные Si. Последнее согласуется с данными РД.

Во втором разделе на 39 стр. представлены результаты теоретического моделирования локальной атомной структуры сплавов Fe-Si и влияние на неё температуры и концентрации Si. Расчеты выполнены приглашенными теоретиками и, в дальнейшем, были использованы автором диссертации для интерпретации результатов экспериментальных исследований. Наибольшей информативностью, по мнению оппонента, обладает рассчитанная вероятность обнаружения пары Si-Si в координационных сферах Si для различных температур и концентрациях. Установлены условия существования пар Si-Si – третьи соседи (сверхструктура DO₃), пар Si-Si – вторые соседи (сверхструктура B2), условия трансформаций структуры B2 в структуру DO₃. Установлена нулевая вероятность образования пар Si-Si – первые соседи, что существенно задевает основы классической теории направленного упорядочения.

В третьем разделе на 59 стр. приводятся результаты исследований влияния ТМО и ТМехО на локальную атомную структуру сплавов Fe-Si. Отметим, что это первые исследования ориентационно чувствительным структурным методом причин наведенной одноосной магнитной анизотропии ТМО и ТМехО. Установлено, что в монокристаллах Fe-Si (5;6 ат.% Si) НМА обусловлена анизотропией пространственного распределения кластеров B2 типа, причем вдоль оси НМА протяженность B2 областей больше, а ортогонально оси меньше. Этот результат, полученный прямым методом РД, подтверждается математической обработкой ЯГР-спектров. Результаты исследований локальной атомной структуры сплавов Fe-Si, её модификации до и после ТМО и ТМехО и корреляции с магнитными свойствами позволило обоснованно выдвинуть представление о происхождении наведенной магнитной анизотропии. Это представление подкреплено многочисленными экспериментами.

В четвертом разделе на 104 стр. приведены результаты исследований атомной структуры и фазового состава магнитомягких нанокристаллических сплавов FeSiNbCuB и её

корреляции с магнитными свойствами. Заметим, что в результате этих исследований появились новые представления о природе НМА в сплавах типа файнмет. Сплавы изготовлены по химической формуле $\text{Fe}_{87-x}\text{Si}_x\text{Nb}_3\text{B}_9\text{Cu}$, где содержание Si менялось от классического, для сплава finemet (13,5 ат.%), до нуля. Анализ дифрактограмм показал, что в аморфных сплавах имеются области с ближним порядком характерным для Fe-Si с ОЦК решеткой. Средний размер ОКР (зерен) около 2 нм. При отжиге формируются ОЦК нанокристаллиты Fe-Si размером 10-12 нм и аморфная матрица с Fe, Nb и B. Матрица занимает 30 об.% и разделяет нанокристаллиты на 1-2 нм. При $\text{Si} > 10$ ат.% нанокристаллы Fe_3Si со структурой DO_3 , при $\text{Si} = 13.5$ ат.% объемная доля нанокристаллов 80 %. При ТМехО пики от ОЦК решетки в продольной и поперечной дифрактограммах указывают на увеличение межплоскостного расстояния в направлении приложения нагрузки и уменьшения в ортогональном направлении. Разница Δd_{hkl} зависит от угла Φ между векторами $[hkl]$ и ближайшей осью $\langle 111 \rangle$. Были измерены: деформации растяжения и сжатия, коэффициенты податливости, относительные деформации и коэффициенты Пуассона. Проведенные исследования позволили сформулировать новые представления о природе наведенной магнитной анизотропии в НК сплавах типа файнмет.

Заключение (7 стр.) подводит итог проведенному исследованию и содержит десять правильно сформулированных выводов. Здесь же приведено резюме результатов, имеющих практически важные последствия (по мнению автора работы).

Таким образом, диссертация разбивается на несколько крупных блоков, объединенных общепринятой формулой физического материаловедения – физические свойства материала обусловлены его составом и атомной структурой – одноосная магнитная анизотропия в сплавах Fe-Si и НК-FeSiBNbCu легко наводится ТМО и ТМехО; следовательно должна осуществляться соответствующая модификация химической и атомной структуры этих материалов. Так вот, основная заслуга автора диссертации заключается в том, что им был предложен комбинированный подход (РД и ЯГР-спектроскопия), который позволил прямыми структурными методами обнаружить эффекты модификации локального атомного упорядочения в этих железокремнистых сплавах.

Диссертационная работа хорошо написана и оформлена, однако, не свободна от редакционных погрешностей. Встречаются орфографические ошибки, неизбежные при компьютерном наборе, часть из них попала и в автореферат.

Переходя в оценке диссертационной работы в целом необходимо отметить следующее:

1. Актуальность работы. Производство электротехнической стали, аморфных и нанокристаллических сплавов на основе железа огромно. Для получения нужных магнитных свойств формируется нужная магнитная структура. В большинстве случаев наведением одноосной магнитной анизотропии методами ТМО либо ТМехО. Существует ряд феноменологических теорий, описывающих кинетику процесса и т.д., основанных на идее парного упорядочения примесных атомов. Прямая демонстрация автором структурным

методом, что за НМА стоит упорядочение пар Si-Si (вторые соседи – структура B2) – сильный результат. На этой основе многие методы оптимизации основных, используемых на практике с магнитных характеристик, должны быть подвергнуты ревизии и переосмыслены.

2. Многие полученные комбинированным подходом (РД и ЯГР-спектроскопия) результаты являются новыми и важными для теоретического и прикладного материаловедения.

3. Результаты работы достоверны и убедительно доказаны.

Подводя итог, отмечу, что диссертационная работа Ершова Н.В. «Закономерности формирования атомной структуры магнитомягких железоникелевых сплавов» удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук и соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней» в редакции, утвержденной Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 с изменениями от 21.04.2016 г. № 335".

Научные и прикладные аспекты диссертационной работы Ершова Н.В. могут быть использованы в деятельности ряда академических, отраслевых и учебных организаций: ИФТТ РАН, ЦНИИ ЧерМет, ИМЕТ РАН, МИСиС, ИФ СО РАН, УрФУ, ДвФУ и т.д.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Считаю, что Николай Владимирович Ершов является высококвалифицированным научным работником в области физики конденсированного состояния и заслуживает присуждения искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Зав. лаб. Физика магнитных пленок

Института физики им. Л.В. Киренского

Сибирского отделения Российской академии наук –

обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (ИФ СО РАН)

доктор физико-математических наук,

по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений

профессор,

Р.С. Исхаков

«24» января 2020 г.

Почтовый адрес: 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, строение №38

Тел. +7(391)243-26-35

Факс +7(391)243-89-23

e-mail: rauf@iph.krasn.ru

Подпись Р.С. Исхакова заверяю

Ученый секретарь ИФ СО РАН,

кандидат физ.-мат. наук

А.О. Злотников

Сотворено и подписано
/Н.В. Ершов/
28.01.2020

Сведения об официальном оппоненте

Фамилия, имя, отчество – Исхаков Рауф Садыкович

Ученая степень и ученое звание – доктор физико-математических наук, профессор

Научная специальность, по которой защищена диссертация, – 01.04.11 – физика магнитных явлений

Полное наименование организации, являющейся основным местом работы – Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (ИФ СО РАН);

Должность – заведующий лабораторией Физика магнитных пленок;

Список основных публикаций официального оппонента по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 публикаций)

1. Iskhakov, R.S. The manifestations of the two-dimensional magnetic correlations in the nanocrystalline ribbons $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$ / R.S. Iskhakov, S.V. Komogortsev, A.D. Balaev, A.A. Gavriluk//J. Magn. Magn. Mater. – 2015. – V. 374. – P. 423-426.
2. Балаев, Д.А. Влияние низкотемпературной термообработки на магнитные свойства наночастиц ферригидрита биогенного происхождения /Д.А. Балаев, А.А. Красиков, А.А. Дубровский, О.А. Баюков, С.В. Столяр, Р.С. Исхаков и др// Письма в Журн. техн. физ. – 2015. – Т. 41, № 14. – С. 88-96.
3. Denisova, E.A. Bulk CoNiFe-SiB Amorphous and Nanostructured Alloys Produced by Plasma Spray Deposition and Dynamic Compaction: Formation of Soft Magnetic Properties /E.A. Denisova, L.A. Kuzovnikova, R.S. Iskhakov, A.A. Kuzovnikov, A. A. Lepeshev, et.al// Physics Procedia. – 2015. – V. 75. – P. 1238-1243.
4. Балаев, Д.А. Изменение магнитных свойств наноферригидрита в ходе низкотемпературного отжига, обусловленное ростом объема наночастиц /Д.А. Балаев, А.А. Красиков, С.В. Столяр, Р.С. Исхаков, и др //ФТТ. – 2016. – Т. 58, № 9. – С. 1724-1732.
5. Денисова, Е.А. Влияние термической обработки на магнитные свойства гранулированных нанокомпозитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$ /Е.А. Денисова, С.В. Комогорцев, Р.С. Исхаков, Л.А. Чеканова, и др.// Изв. РАН. Сер. физич. –2016. – Т. 80, № 11. – С. 1500.
6. Столяр, С.В. Магнитные и резонансные свойства наночастиц ферригидрита, легированных кобальтом /С.В. Столяр, Р.Н. Ярославцев, Р.С. Исхаков, О.А. Баюков, Д.А. Балаев и др.// ФТТ. – 2017. – Т. 59, № 3. – С. 538-545.
7. Кузовникова, Л.А. Магнитоструктурные исследования наноструктурированных объемных сплавов $(\text{Co-P})_{100-x}\text{Cu}_x$ / Л.А. Кузовникова, С.В. Комогорцев, И.В. Немцев, Р.С. Исхаков, Л.А. Чеканова, В.К. Мальцев //Изв. РАН. Сер. физич. – 2017. – Т. 81, № 3. – С. 323-326.
8. Комогорцев, С.В. Микромагнетизм в планарной системе со случайной магнитной анизотропией и двумерными магнитными корреляциями /С.В. Комогорцев, В.А. Фельк, Р.С. Исхаков, Г.В. Шадрина// ЖЭТФ. – 2017. – Т. 152, № 2. – С. 379-390.
9. Denisova, E.A. Magnetic anisotropy in multilayer nanogranular films $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{50}(\text{SiO}_2)_{50}/\alpha\text{-Si:H}$ /E.A. Denisova, S.V. Komogortsev, R.S. Iskhakov, L.A. Chekanova, A.D. Balaev, Y.E. Kalinin, A.V. Sitnikov// J. Magn. Magn. Mater. – 2017. – V.440. – P. 221-224.
10. Столяр, С.В. Модификация магнитных свойств порошков $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ в результате ультразвуковой обработки / С.В. Столяр, О.А. Баюков, Р.С. Исхаков, Р.Н. Ярославцев, В.П. Ладыгина //Письма в ЖТФ. – 2017. – Т. 43, № 24. – С. 3-8.

11. Stolyar, S.V. Modification of the Structure and Magnetic Properties of Cobalt-Doped Ferrihydrite Nanoparticles Under Heat Treatment /S.V. Stolyar, A.D.Balaev, O.A. Bayukov, R.S. Iskhakov, et. all //Journal of Supercond. and Novel Magnetism. – 2018. – V. 31, № 4. – P. 1133-1138.

12. Комогорцев, С.В. Влияние фрактальной размерности на кривую намагничивания обменно-связанного кластера магнитных наночастиц /С.В. Комогорцев, Р.С. Исхаков, В.А. Фельк //ЖЭТФ. –2019. – Т. 155, № 5. – С. 886-893.

13. Komogortsev, S.V. Macro- and Nanoscale Magnetic Anisotropy of FeNi(P) Micropillars in Polycarbonate Membrane /S.V. Komogortsev, L.A. Chekanova, E.A. Denisova, A.A. Bukaemskiy, R.S. Iskhakov, S.V. Mel'nikova //Journal of Supercond. and Novel Magnetism. – 2019. – V. 32, № 4. – P. 911-916.

14. Столяр, С.В. Нанокристаллы магнетита с повышенной константой магнитной анизотропии, наведенной формой частицы /С.В. Столяр, С.В. Комогорцев, Л.А. Чеканова, Р.Н. Ярославцев, О.А. Баюков, Д.А. Великанов, М.Н. Волочаев, Е.В. Черемискина, М. Sh. Bairmani, П.Е. Ерошенко, Р.С. Исхаков //ПЖТФ. – 2019. – Т. 45, № 17. – С. 28-30.

Зав. лаб. Физика магнитных пленок

Института физики им. Л.В. Киренского

Сибирского отделения Российской академии наук –

обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (ИФ СО РАН)

доктор физико-математических наук,

по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений

профессор,

Р.С. Исхаков
«23» Июль 2020 г.

Почтовый адрес: 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, строение №38

Тел. +7(391)243-26-35

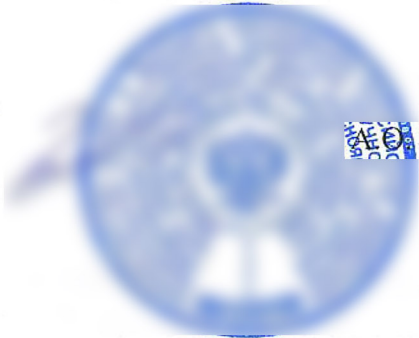
Факс +7(391)243-89-23

e-mail: rauf@iph.krasn.ru

Подпись Р.С. Исхакова заверяю

Ученый секретарь ИФ СО РАН,

кандидат физ.-мат. наук

  Злотников