

## ОТЗЫВ

научного руководителя на диссертацию Фадеева Максима Сергеевича "Мессбауэровские исследования железосодержащих нанотрубок и наночастиц", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Фадеева Максима Сергеевича посвящена мессбауэровским исследованиям магнитных наносистем – железосодержащих нанотрубок и наночастиц. Выбор объектов исследования был продиктован, во-первых, их уникальными физико-химическими свойствами, хорошей устойчивостью к внешним воздействиям, а также широкими возможностями их практического применения в биомедицине, энергетике, фотокатализе, микроэлектронике и хранении информации, и, во-вторых, тем, что железо обладает очень удобным для исследования сверхтонких взаимодействий и особенностей локальной структуры мессбауэровским изотопом  $^{57}\text{Fe}$ .

Методами мессбауэровской спектроскопии с привлечением данных рентгеновской дифрактометрии и электронной микроскопии Фадеевым М.С. проведены исследования степени влияния атомов Co и Ni на магнитную анизотропию и сверхтонкие взаимодействия ядер  $^{57}\text{Fe}$  в Fe-Co и Fe-Ni нанотрубках, синтезированных в полимерных ионно-трековых мембранах, а также железосодержащих наночастиц, которые подвергались поверхностной модификации (наночастицы  $\text{Fe}_3\text{O}_4@Au$ , покрытые карбораном  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  наночастицы), термическому (наночастицы  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4@Au$  и Fe-Ni / Fe-Ni-O) и электронному (наночастицы  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) воздействию. Следует отметить, что диссертационная работа Фадеева М.С. выполнялась в рамках научно-исследовательских работ по теме «Мессбауэровская спектроскопия локально неоднородных систем» и многолетних совместных научных исследований с сотрудниками Института ядерной физики Республики Казахстан.

В результате проведенных исследований Фадееву М.С. удалось получить ряд новых важных результатов, которые вызвали интерес у специалистов в области мессбауэровской спектроскопии и железосодержащих наносистем. Выделю среди них следующие.

1. Обнаружена магнитная текстура вдоль оси Fe-Co и Fe-Ni нанотрубок. Показано, что среднее значение угла между магнитным моментом атома Fe и осью нанотрубок в рамках одной объёмно-центрированной кубической (ОЦК) или гранецентрированной кубической (ГЦК) кристаллической структуры уменьшается с увеличением концентрации атомов Co и Ni.

2. Установлено, что замещение атома Fe на атом Co или Ni в ближайшем окружении атома Fe в Fe-Co и Fe-Ni нанотрубках с ОЦК структурой приводит к увеличению сверхтонкого магнитного поля на ядрах  $^{57}\text{Fe}$ , а в Fe-Ni нанотрубках с ГЦК структурой – к его уменьшению.

3. Выявлены два механизма изменения средних значений сверхтонкого магнитного поля и сдвига мессбауэровского спектра ядер  $^{57}\text{Fe}$  с изменением концентрации атомов Co, обусловленные замещением атомов Fe атомами Co в ближайшем окружении атома Fe и изменением расстояния между атомом железа и атомами его ближайшего окружения. Проведено разделение вкладов от этих двух механизмов.

4. Предложена и реализована модель обработки мессбауэровских спектров наночастиц оксидов железа при наличии быстрого электронного обмена между двух- и трехвалентными атомами Fe в структуре магнетита с учетом суперпарамагнитной релаксации.

5. Методами мессбауэровской спектроскопии определены молярные концентрации маггемита и магнетита, степень нестехиометрии нестехиометрического магнетита, энергия

магнитной анизотропии и средний размер области магнитного упорядочения атомов Fe в наночастицах нестехиометрического магнетита в зависимости от температуры отжига.

6. Установлено, что при увеличении дозы электронного облучения наночастиц гематита  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  доля локально неоднородных областей уменьшается, при этом локально однородные области улучшают свою кристаллическую и магнитную структуру – снимаются напряжения, а значит и деформации решетки, усиливаются обменные взаимодействия.

Результаты, полученные в диссертации, имеют научное и практическое значение, они не вызывают сомнений в их обоснованности и достоверности.

Выполнение диссертационной работы потребовало от Фадеева Максима Сергеевича разносторонних специальных знаний из области ядерной физики, физики твердого тела и наносистем, а также навыков экспериментальных исследований. Он успешно освоил экспериментальные методы мессбауэровской спектроскопии и современные методы обработки и анализа мессбауэровских спектров с использованием априорной информации об объекте исследования, а также данных рентгеновской дифрактометрии и электронной микроскопии. В процессе работы Фадеев М.С. проявил себя как способный, умеющий концентрировать свои усилия и решать поставленные перед ним научные задачи исследователь. Его отличают неподдельный интерес к научной работе, ответственность и добросовестность. Фадеев М.С. пользуется доверием и уважением окружающих.

Диссертация Фадеева М.С. представляет собой научно-квалификационную работу по актуальной тематике. Результаты, полученные в диссертационной работе, имеют существенное значение для развития научного направления – исследования взаимосвязи локальных атомной, электронной и магнитной структур с макроскопическими свойствами вещества. Сама диссертация хорошо оформлена и написана ясным научным языком. Автореферат дает достаточно полное представление о диссертационной работе. Результаты, полученные Фадеевым М.С. в диссертационной работе, изложены в 13 статьях в реферируемых журналах, 2 статьях в сборниках трудов и 7 тезисах докладов, представленных на международных конференциях.

Считаю, что диссертация Фадеева М.С. удовлетворяет всем критериям, изложенным в разделе 2 «Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», и может быть рекомендована к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния (физ.-мат. науки).

Научный руководитель  
доктор физ.-мат. наук,  
профессор кафедры общей физики физического факультета  
МГУ имени М.В. Ломоносова

В.С. Русаков

Подпись профессора В.С. Русакова заверяю

Ученый секретарь Уч  
МГУ имени М.В. Лом  
профессор

В.А. Караваев