

## Отзыв

на автореферат диссертации Фадеева Максима Сергеевича  
«Мёссбауэровские исследования железосодержащих нанотрубок и наночастиц»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 1.3.8 -Физика конденсированного состояния

Актуальность работы Фадеева М.С., посвященной исследованиям железосодержащих наночастиц и нанотрубок, не вызывает сомнений. В настоящее время большое внимание уделяется исследованиям нанообъектов на основе металлов и их оксидов. Уникальные физико-химические свойства таких материалов, обусловленные размерными эффектами, позволяют использовать их во многих областях науки и техники, например, в биологии, медицине, электронике, энергетике. Наночастицы и другие нанообъекты на основе железа находят применение и благодаря своим магнитным свойствам.

Проведенное в диссертационной работе исследование нанотрубок Fe-Co и Fe-Ni позволило определить структурные особенности данных объектов и влияние замещения атомов железа атомами никеля и кобальта на состояние ядер Fe. Автором предложена оригинальная модель, позволившая разделить два вклада в изменение сверхтонких параметров ядер Fe при замещении кобальтом: вклад непосредственно от появления в ближайшем окружении атомов другого сорта и вклад от изменения расстояний в кристаллической решетке.

При исследовании наночастиц на основе  $Fe_3O_4$  (исходных, покрытых золотом, прошедших модификацию поверхности различными методами) автором установлено изменение морфологии и химического состава частиц при термическом отжиге. Отметим, что обработка мёссбауэровских спектров таких частиц сильно затруднена из-за быстрого электронного обмена между соседними двух- и трехвалентными атомами Fe и суперпарамагнитной релаксации. Автором предложена и реализована модель обработки таких спектров. В результате удалось определить долю атомов железа в различных кристаллографических позициях и в различных электронных состояниях, а также степень нестехиометрии.

Также автором впервые проведено исследование влияния электронного облучения на свойства наночастиц  $\alpha-Fe_2O_3$  и влияние термического отжига на частицы Fe-Ni/Fe-Ni-O. Показано, что электронное облучение улучшает кристаллическую структуру частиц  $\alpha-Fe_2O_3$  и усиливает магнитные обменные взаимодействия, что является достаточно интересным результатом, который можно использовать для повышения эффективности

использования этих частиц в качестве катодных материалов. Результаты исследования по влиянию термического отжига на частицы Fe-Ni/Fe-Ni-O, полученные в диссертации, могут быть использованы при создании новых перспективных материалов для анодов литий-ионных батарей.

Отметим несколько не совсем ясных моментов:

1. В автореферате утверждается, что нанотрубки Fe-Co и Fe-Ni имеют магнитную текстуру вдоль оси трубки. Автором определено среднее значение угла отклонения магнитных моментов атомов Fe от оси трубки, причем, этот угол изменяется в зависимости от содержания Co или Ni. Из текста автореферата не ясна причина отклонения магнитных моментов от оси. Очевидно, что магнитостатическая энергия будет стремиться выстроить магнитные моменты вдоль оси трубок. Какие факторы вызывают отклонение моментов в поперечном направлении?
2. Одним из результатов работы является то, что под действием электронного облучения наночастиц  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  уменьшается доля локально неоднородных областей, а локально однородные области улучшают кристаллическую структуру. Не ясна физическая природа данного явления. В тексте реферата указывается только суммарная доза облучения частиц, и нет указания на мощность дозы. Например, под действием импульсного излучения (высокая мощность дозы) может происходить термический разогрев частиц до значимых температур, и модификация свойств частиц будет происходить фактически в результате температурного отжига. При низкой мощности дозы изменение свойств будет происходить непосредственно под действием электронов без значимого разогрева.
3. На рис.14 (стр.18) приведены мёссбауэровские спектры и результаты восстановления распределений сверхтонкого поля для частиц Fe-Ni/Fe-Ni-O. На графике  $P(H)$  автор выделяет области, соответствующие фазам ГЦК, ОЦК Fe-Ni, и область, соответствующую Fe-Ni-O. Судя по графику было восстановлено так называемое «одноядерное распределение», предполагающее единый набор коэффициентов корреляции (сдвиг спектра)/(сверхтонкое поле), (квадрупольное смещение)/(сверхтонкое поле). Насколько корректен данный подход для описания спектров многофазных образцов и, в частности, для частиц Fe-Ni/Fe-Ni-O?

Все перечисленные выше вопросы ни в коей мере не снижают ценность работы Фадеева М.С., а скорее могут послужить для дальнейшего развития исследований железосодержащих нанообъектов методом мёссбауэровской спектроскопии.

По актуальности, научной новизне, объему и практической значимости полученных результатов диссертационная работа Фадеева М.С. «Мёссбауэровские исследования

железосодержащих нанотрубок и наночастиц» соответствует всем критериям, определенным пп. 2.1-2.5 «Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», и ее автор, Фадеев Максим Сергеевич, достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - Физика конденсированного состояния.

кандидат физико-математических наук,

старший научный сотрудник лаборатории ферромагнитных сплавов

Клейнерман Надежда Михайловна

Тел.: 8-343-378-37-24 E-mail: [kleinerman@imp.uran.ru](mailto:kleinerman@imp.uran.ru)

620108, г. Екатеринбург, ул. С.Ковалевской, 18

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук

27.03.2023