

Заключение диссертационного совета МГУ.013.5  
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

Решение диссертационного совета от « 20 » июня 2024г. № 27

О присуждении Лю Наньнань, гражданке Китайской Народной Республики, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Изучение механизмов тепловыделения в магнитных наночастицах, перспективных для лечения рака с помощью магнитной гипертермии: магнитотепловые свойства наночастиц феррита  $ZnMn$ » по специальности 1.3.12 Физика магнитных явлений принята к защите диссертационным советом 02.05.2024, протокол № 24.

Соискатель, Лю Наньнань, 1994 года рождения, в 2019 году окончила педагогический университет Внутренней Монголии с присвоением квалификации «Магистр» по направлению «Физика и химия материалов». В 2024 году она успешно освоила программу подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия».

Диссертация выполнена на кафедре общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научные руководители:

– доктор физико-математических наук профессор, профессор кафедры общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова Тишин Александр Метталинович;

– доктор физико-математических наук профессор РАН, профессор кафедры физики колебаний физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова Пятаков Александр Павлович – утверждены решением Ученого совета физического факультета.

Официальные оппоненты:

– Пирогов Юрий Андреевич – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры медицинской физики физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова;

– Моргунов Роман Борисович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, руководитель группы Магнитных и спиновых логических процессов и устройств Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии РАН;

– Родионова Валерия Викторовна – кандидат физико-математических наук, доцент, директор Научно-образовательного центра «Умные материалы и биомедицинские приложения» образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий» Балтийского Федерального Университета имени И. Канга,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Соискатель имеет 7 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 7 работ (9.12 п.л.), из них 4 статьи (3.45 п.л.), опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.12 Физика магнитных явлений (физико-математические науки).

В качестве основных публикаций можно выделить следующие работы:

1). **Liu N.N.**, Alekhina Y.A., Pyatakov A.P., Perov N.S., Kovalev B.B., Sukhorukov G.B., Tishin A.M., Moriwaki T., Nakazawa K., Ichiyanagi Y. Investigation of Impact of the Annealing on Magnetothermal Properties of  $Zn_{0.2}Mn_{0.8}Fe_2O_4$  Nanoparticles // IEEE Magn. Lett. 2023. Vol.14. P. 1–5. (Impact Factor 1.2 - Journal Citation Reports (Clarivate Analytics)) Объем – 0.53 п.л. Авторский вклад – 0.5. doi: 10.1109/LMAG.2022.3233222

2). **Liu N.N.**, Pyatakov A.P., Saletsky A.M., Zharkov M.N., Pyataev N.A., Sukhorukov G.B., Gun'ko Y.K., Tishin A.M. The “field or frequency” dilemma in magnetic hyperthermia: The case of Zn Mn ferrite nanoparticles // J. Magn. Mater. 2022. Vol.555. P.169379. (Impact Factor 2.7 - Journal Citation Reports (Clarivate Analytics)). Объем – 1.06 п.л. Авторский вклад – 0.5. doi: 10.1016/j.jmmm.2022.169379

- 3). **Liu N.N.**, Pyatakov A.P., Zharkov M.N., Pyataev N.A., Sukhorukov G.B., Alekhina Y.A., Perov N.S., Gun'ko Y.K., Tishin A.M.. Optimization of Zn–Mn ferrite nanoparticles for low frequency hyperthermia: Exploiting the potential of superquadratic field dependence of magnetothermal response // Appl. Phys. Lett. 2022 Vol.120. P.102403. (Impact Factor 3.9 - Journal Citation Reports (Clarivate Analytics)) Объем – 0.64 п.л. Авторский вклад – 0.5. doi: 10.1063/5.0082857
- 4). **Лю Н.Н.**, Пятаков А.П., Жарков М.Н., Пятаев Н.А., Черепанова Ж.В., Итиянаги Ю., Наказава К., Мориваки Т., Сухоруков Г.Б., Тишин А.М. Зависимость магнитотепловых свойств наночастиц  $Zn_xMn_{1-x}Fe_2O_4$  от магнитного поля в области физиологического предела Брезовича // Физика металлов и металловедение 2022 Vol.123. P.1022–1028. doi: 10.31857/S0015323022600824 (**Liu N.N.**, Pyatakov A.P., Zharkov M.N., Pyataev N.A., Cherepanova J.V., Ichiyonagi Y., Nakazawa K., Moriwaki T., Sukhorukov G.B., Tishin A.M. The Dependence of the Magnetothermal Properties of  $Zn_xMn_{1-x}Fe_2O_4$  Nanoparticles on the Magnetic Field Near Physiological Brezovich Limit // Phys. Metals. Metallogr. 2022. Vol.123. P. 954–962. (Impact Factor 1.3 - CiteScore(Scopus)) Объем – 1.22 п.л. Авторский вклад – 0.5. doi: 10.1134/S0031918X22600919).

Постановка задач диссертационного исследования и построение плана проведения экспериментальных работ были выполнены автором совместно с научными руководителями. Все экспериментальные исследования, а также обработка и анализ результатов рентгеноструктурного анализа, магнитотепловых измерений и просвечивающей электронной микроскопии проводились диссертантом. Синтез магнитных наночастиц и исследования с использованием вибрационной магнитометрии проводились диссертантом совместно с соавторами публикаций. Подготовка и написание текстов статей, осуществлялось автором диссертации. Публикация полученных результатов была осуществлена преимущественно диссертантом при содействии соавторов представленных научных работ.

На диссертацию и автореферат поступило 3 дополнительных отзыва, все положительные.

Выбор официальных оппонентов обосновывался соответствием их научных интересов профилю рассматриваемой диссертации, профессионализмом, высокими достижениями и компетентностью в соответствующей отрасли науки, а также наличием публикаций, соответствующих тематике диссертации. Указанные оппоненты не имеют совместных проектов и публикаций по теме диссертации с соискателем.

Диссертационный совет отмечает, что представленная диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований были решены важные научные задачи, связанные с определением особенностей механизмов нагрева при магнитной гипертермии. На основе биосовместимых и нетоксичных наночастиц феррита ZnMn проанализирована зависимость SAR (удельной скорости поглощения) от размера частиц, а также амплитуды и частоты магнитного поля исследованных образцов в водном растворе, в глицерине и в коллоидном состоянии. Полученные результаты могут иметь существенное практическое значение для клинического применения магнитной гипертермии.

Диссертация представляет собой самостоятельное законченное исследование, обладающее внутренним единством. Положения, выносимые на защиту, содержат новые научные результаты и свидетельствуют о личном вкладе автора в науку:

- 1). Для крупных магнитных наночастиц феррита  $Zn_xMn_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x = 0.15$  и  $0.2$ ) выявлена сверхквадратичная зависимость SAR от амплитуды магнитного поля в диапазоне действующих значений 60–100 Э, в то время как для более мелких частиц ( $x = 0.25$ ,  $x = 0.3$ ) зависимость SAR тяготеет к традиционному квадратичному закону.
- 2). Частотные зависимости SAR отражают также зависимость этого параметра от размера частиц: максимум SAR магнитных наночастиц с высоким содержанием цинка ( $x = 0.25$  и  $0.3$ ) смещается в область высоких частот. Подбор оптимальных характеристик магнитных наночастиц магнитных наночастиц, а также определение амплитуды и частоты воздействующего

электромагнитного поля являются взаимосвязанными задачами, неотделимыми друг от друга, и составляют трилемму магнитной гипертермии.

3). На механизм тепловыделения магнитных наночастиц и величину SAR значительное влияние оказывает отжиг. Предельный размер суперпарамагнитных частиц смещается в сторону больших диаметров: с 13 нм для неотожженных частиц до 25 нм для отожженных магнитных наночастиц.

4). Стабилизация коллоидных магнитных наночастиц ZnMn феррита с помощью олеиновой кислоты приводит к зависимости SAR от амплитуды и частоты Электромагнитного поля, характерной для суперпарамагнитных частиц с неелевской релаксацией, в то время как для водных суспензий непокрытых частиц доминирует гистерезисный механизм нагрева.

На заседании 20 июня 2024 г. диссертационный совет принял решение присудить Лю Наньнань ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 Физика магнитных явлений.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 18, против нет, недействительных бюллетеней нет.

Заместитель председателя

диссертационного совета МГУ.013.5

доктор физико-математических наук,

профессор

Кашкаров Павел Константинович

Ученый секретарь

диссертационного совета МГУ.013.5

кандидат физико-математических наук

Шапаева Татьяна Борисовна

20.06.2024