АННОТАЦИЯ

диссертационной работы Мадияровой Алтынай Муратовны на тему: «Разработка физико-химических основ получения новых сложных оксидных магнитных материалов» представленной на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе «8D05301 – Химия»

Диссертационная работа представлена в соответствии с требованиями пункта 5-1, подпункта 2) Правил присуждения ученых степеней, утвержденных приказом Министра науки и высшего образования Республики Казахстан от 06 января 2025 года №4.

Согласно указанным требованиям, по теме диссертации опубликованы научные работы в изданиях, входящих в первый и (или) второй квартиль по импакт-фактору в соответствии с данными Journal Citation Reports компании Clarivate Analytics. Публикационная активность докторанта соответствует установленным нормативам и включает не менее двух научных статей, а также одну обзорную статью либо серию из трех научных публикаций. При этом в одной из статей докторант выступает в качестве первого автора или автора для корреспонденции.

Кроме того, в соответствии с пунктом 7 Положения о диссертационном совете Некоммерческого акционерного общества «Казахский национальный женский педагогический университет», утвержденного приказом №09-02-19/277 от 25 мая 2025 года, а именно подпунктом 7.2.1 «Представление докторской диссертации», диссертационная работа представлена к защите в форме серии опубликованных научных статей, то есть в виде совокупности научных публикаций, подготовленных и опубликованных докторантом.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена исследованию физико-химических основ синтеза новых сложных оксидных магнитных материалов. В ходе исследования были синтезированы новые ферритные материалы со шпинельной структурой, а также проведено комплексное изучение их структурных, морфологических и электрофизических свойств.

Для получения образцов применялся золь-гель метод синтеза. Кристаллическая структура синтезированных соединений была определена методом рентгенодифракционного анализа, а их морфология и элементный состав исследованы методом сканирующей электронной микроскопии. Кроме того, изучены зависимости диэлектрических и электрических свойств от температуры и частоты.

В результате исследования установлено, что новые сложные ферриты обладают однофазной структурой шпинельного типа, а также выявлены взаимосвязи между их структурными параметрами и физическими свойствами.

Актуальность исследования

В современной науке о материалах разработка функциональных магнитных материалов и управление их свойствами являются одним из приоритетных научных направлений. В частности, ферритные материалы

широко применяются в электронике, телекоммуникациях и энергетике благодаря таким свойствам, как высокая магнитная проницаемость, низкие диэлектрические потери и высокое электрическое сопротивление.

В последние годы значительно возрос научный интерес к ферритам со шпинельной структурой. Свойства этих материалов напрямую зависят от их химического состава, кристаллической структуры и метода синтеза. Особое внимание уделяется литийсодержащим ферритам, которые характеризуются высокими магнитными и электрическими свойствами и рассматриваются как перспективные материалы для использования в электронных устройствах и системах накопления энергии.

В этой связи синтез новых сложных ферритов, а также исследование их структурных особенностей и физико-химических свойств представляют собой одну из актуальных задач современной науки о материалах.

Степень изученности темы

В направлении исследования структуры и свойств ферритных материалов выполнено значительное количество научных работ. В зависимости от кристаллической структуры ферриты подразделяются на несколько групп: шпинельные ферриты, гексагональные ферриты, гранатовые ферриты и ортоферриты.

Среди них ферриты со шпинельной структурой являются наиболее изученными и представляют особый научный интерес как функциональные материалы. Общая формула таких соединений имеет вид MFe_2O_4, где катионы металлов располагаются в тетраэдрических и октаэдрических позициях. Распределение катионов по этим позициям существенно влияет на магнитные и электрические свойства ферритов.

В последние годы особое внимание уделяется исследованию структурных и электрических свойств литийсодержащих ферритов. Однако вопросы синтеза новых сложных ферритов и изучения их структурно-функциональных характеристик остаются недостаточно исследованными. В этой связи получение новых ферритных материалов и определение их свойств имеют важное научное и практическое значение.

Цель исследования

Разработка физико-химических основ синтеза новых сложных оксидных магнитных материалов и исследование их структурных, морфологических и электрических свойств.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

– Выбор эффективных методов синтеза новых сложных ферритных материалов;

– Синтез сложных ферритов методом золь-гель технологии;

– Определение кристаллической структуры синтезированных материалов методом рентгенодифракционного анализа;

– Исследование морфологии и элементного состава материалов методом сканирующей электронной микроскопии;

– Изучение диэлектрических и электрических свойств новых ферритов;

– Определение влияния параметров синтеза на структурные и физические свойства материалов.

Объект исследования - Новые сложные ферритные оксиды со шпинельной структурой.

Предмет исследования - Синтез сложных ферритов, а также их структурные, морфологические и электрофизические свойства.

Методы исследования - В ходе диссертационного исследования были использованы следующие современные физико-химические методы исследования: золь-гель метод синтеза, рентгенофазовый анализ (XRD, MiniFlex-600), сканирующая электронная микроскопия (SEM), рамановская спектроскопия, измерение диэлектрических и электрических свойств, а также определение пикнометрической плотности.

Применение указанных методов позволило провести комплексное исследование структурных и физико-химических свойств синтезированных материалов.

Научная новизна диссертационного исследования

В результате проведенных исследований:

– впервые синтезированы новые сложные ферриты состава $Li_{0.5}MnFe_{1.5}O_4$ и $LiCr_{3.4}Fe_{1.6}O_8$;

– установлено, что синтезированные соединения представляют собой однофазные сложные оксиды со шпинельной структурой;

– определены их кристаллическая структура, морфология и элементный состав;

– выявлено влияние на электрические и диэлектрические свойства новых синтезированных сложных оксидов.

Основные положения, выносимые на защиту, отражающие научную новизну исследования

– предложена научно обоснованная методика синтеза новых сложных ферритов методом золь-гель технологии;

– доказано формирование шпинельной кристаллической структуры синтезированных ферритов;

– установлены структурные и морфологические особенности новых ферритов;

– определены зависимости электрических и диэлектрических свойств сложных ферритов от температуры и частоты.

Научные результаты

1. Научные результаты по первой статье

В ходе исследования в качестве метода синтеза был использован золь-гель метод, и изучена физико-химическая природа нового сложного феррита состава $Li_{0.5}MnFe_{1.5}O_4$. Структура и состав синтезированного феррита были определены методом рентгенофазового анализа. Результаты анализа показали, что образец кристаллизуется в пространственной группе Fd3m, характерной

для шпинельной структуры, что свидетельствует о высокой симметрии расположения атомов в кристаллической решетке.

Параметры решетки составляют a = b = c = 8.3677 Å, что указывает на формирование гранецентрированной кубической кристаллической структуры. Объем элементарной ячейки равен 585.90 Å³. Кроме того, близость значений рентгеновской плотности (4.678 г/см³) и пикнометрической плотности (4.675 г/см³) свидетельствует о высокой плотности материала и минимальном количестве дефектов и пор в его структуре.

Микроструктура и количественное содержание элементов в составе соединения были исследованы методом сканирующей электронной микроскопии (SEM). По СЭМ-изображениям установлено, что поверхность материала состоит из мелкозернистых взаимосвязанных частиц. Большинство частиц агломерировано, то есть несколько наночастиц объединены в более крупные структуры. Размеры агломератов составляют несколько микрометров, тогда как отдельные частицы имеют наноразмер. Такая морфология обусловлена процессами укрупнения наночастиц и их агломерации вследствие высокой поверхностной энергии в процессе синтеза. Поверхность частиц характеризуется пористостью и равномерным распределением, что способствует высокой реакционной способности материала.

Установлено, что синтезированные ферриты соответствуют формуле $Li_{0.5}MnFe_{1.5}O_4$. Размеры сформированных частиц варьируются в диапазоне примерно 10–50 мкм. В EDS-спектре отчетливо наблюдается распределение элементов по энергиям: кислород (O) и литий (Li) — в низкоэнергетической области, марганец (Mn) и железо (Fe) — в высокоэнергетической области.

Электрофизические измерения проводились на приборе LCR-800 в диапазоне температур 293–483 K и частот 1,5–10 кГц. Установлено, что при повышении температуры от 300 K до ~380–390 K электропроводность постепенно возрастает, что связано с увеличением активности носителей заряда. С ростом температуры облегчается движение электронов по кристаллической решетке, что приводит к увеличению проводимости. Однако в области ~390–400 K проводимость достигает максимума, после чего начинает резко снижаться. Данное явление связано с изменением структурного или магнитного состояния материала — переходом от ферримагнитного к парамагнитному состоянию.

2. Научные результаты по второй статье

В работе синтезирован новый сложный феррит состава $LiCr_{3.4}Fe_{1.6}O_8$ методом золь-гель технологии и исследованы его физико-химические характеристики. Рентгенодифракционный анализ (XRD) показал, что соединение является однофазным, обладает шпинельной структурой и формирует гранецентрированную кубическую решетку с параметрами a = b = c = 8,279 Å. Низкое значение R-фактора (0,036 или 3,6%) подтверждает корректность структурной модели.

Близость значений рентгеновской (4,694 г/см³) и пикнометрической (4,695 г/см³) плотностей свидетельствует о высокой фазовой чистоте

материала и равномерном включении ионов хрома в кристаллическую решетку.

Анализ по методу Уильямсона–Холла показал, что точки на графике сосредоточены в узкой области, что свидетельствует о структурной однородности материала и близости параметров дифракционных пиков. По наклону прямой определено значение микродеформации, а по точке пересечения с осью — средний размер кристаллитов. Установлено, что размер кристаллитов составляет около 9,12 нм, а микродеформация — $1{,}71\times10^{-3}$.

Для изучения колебательных свойств структуры применена рамановская спектроскопия. Наблюдение характерных пиков, соответствующих связям Fe–O и Cr–O, дополнительно подтверждает шпинельную структуру соединения. В первом спектре зафиксированы полосы в областях 195–206 $см^{-1}$, 509–516 $см^{-1}$, 597–618 $см^{-1}$ и 650–720 $см^{-1}$, соответствующие колебаниям связей металл–кислород (Me – O). Интенсивная полоса в области 650–720 $см^{-1}$ соответствует симметричным колебаниям тетраэдрических связей Me – O. Небольшие смещения полос обусловлены внедрением ионов Cr в кристаллическую решетку.

Во втором спектре основные полосы наблюдаются в областях 348 $см^{-1}$, 400 $см^{-1}$, 851 $см^{-1}$, 892 $см^{-1}$ и 930 $см^{-1}$, при этом наиболее интенсивная полоса (~851 $см^{-1}$) соответствует основным симметричным колебаниям связей металл–кислород.

Микроструктура и элементный состав исследованы методом SEM. Установлено, что материал является однофазным, с однородной морфологией поверхности. Размеры частиц варьируются в диапазоне примерно 5–200 мкм. Частицы преимущественно агломерированы, имеют полусферическую и многогранную форму. Наноразмерные первичные частицы образуют микрометрические агломераты. В EDS-спектре четко наблюдаются пики Li и O в низкоэнергетической области и Cr и Fe — в высокоэнергетической области.

Электрофизические измерения (LCR-800) показали, что в диапазоне температур 300–400 K электрическое сопротивление постепенно снижается, что связано с переносом заряда по механизму «хоппинга» между ионами Fe^{2+}–Fe^{3+}. При ~390–400 K сопротивление достигает минимума, после чего начинает возрастать, что обусловлено переходом материала из ферримагнитного в парамагнитное состояние.

Также установлено, что при низких частотах переменного тока электропроводность остается практически постоянной, что свидетельствует о высоких диэлектрических свойствах материала и возможности его применения в резисторах и конденсаторах. С увеличением температуры и частоты удельное сопротивление уменьшается вследствие роста подвижности носителей заряда.

3. Научные результаты по третьей статье

В обзорной статье систематически проанализированы методы синтеза, структурные особенности и функциональные свойства шпинельных ферритных наночастиц состава MFe_2O_4. Проведено сравнительное

рассмотрение различных методов синтеза, включая соосаждение, горение, золь-гель, термическое разложение, гидротермальный, сольвотермальный, микроволновый, сонохимический, электрохимический методы и метод твердофазных реакций, с анализом их физико-химических основ, преимуществ и ограничений.

Подробно рассмотрено влияние параметров синтеза на кристаллическую структуру, морфологию, распределение катионов по тетраэдрическим и октаэдрическим позициям, а также на магнитные, диэлектрические и оптические свойства материалов.

Кроме того, обобщены возможности методов характеризации, таких как рентгенодифракционный анализ (XRD), сканирующая электронная микроскопия в сочетании с энергодисперсионной спектроскопией (SEM/EDS), инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (FTIR), FT-рамановская спектроскопия, а также диэлектрические и магнитные измерения.

В заключении отмечено, что шпинельные ферритные наночастицы обладают высоким потенциалом применения в электронике, микроволновых устройствах, очистке воды, катализе, сенсорных технологиях и биомедицине.

Теоретическая и практическая значимость работы

– Результаты исследования позволяют установить физико-химические закономерности синтеза новых сложных ферритных материалов;

– Полученные результаты могут быть использованы при разработке функциональных магнитных материалов, в производстве электронных устройств, развитии сенсорных технологий и систем накопления энергии.

Апробация практических результатов исследования

Основные результаты диссертационной работы были представлены на международных научных конференциях и обсуждены в научном сообществе.

1. Международная конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты развития химии и инновационных технологий», посвящённая 90-летию со дня рождения академика НАН Кыргызской Республики Сулайманкулова Какина Сулайманкуловича. Бишкек, Кыргызстан, 2023 г.

2. Казахстанско-Узбекский симпозиум «Современные проблемы науки о полимерах», посвящённый обсуждению современного состояния и тенденций развития исследований в области химии высокомолекулярных соединений, а также вопросам организации перспективных научных направлений, производства природных и синтетических полимеров, композиционных материалов и интеграции науки и образования в области химии. Алматы, Казахстан, 2023 г.

Публикации по теме исследования и личный вклад автора

Основные результаты диссертационного исследования отражены в 6 публикациях, в том числе: 3 статьи опубликованы в научных изданиях, индексируемых в базе Web of Science компании Clarivate Analytics и входящих в первый и/или второй квартиль по импакт-фактору; 2 статьи — в изданиях, включенных в перечень Комитета по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Республики Казахстан; 1 статья — в базе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

1. Mataev M., **Madiyarova A.,** Patrin G., Abdraimova M., Nurbekova M., Durmenbayeva Z. Synthesis of New Complex Ferrite $Li_{0.5}MnFe_{1.5}O_4$: Chemical–Physical and Electrophysical Research. Materials 2024, 17, 3754. https://doi.org/10.3390/ma17153754.

Статус автора: докторант — корреспондирующий автор. Показатели журнала (2024): импакт-фактор 3.2; Q2 по направлению «Металлургия и металлургическое машиностроение». CiteScore (2024): 6.4; 71-й перцентиль по общему материаловедению.

Вклад докторанта: проведение экспериментов, интерпретация результатов, подготовка и оформление оригинального текста статьи, участие в полном приведении статьи в соответствие с требованиями журнала. Собственный авторский вклад - 70%.

2. Mataev M., **Madiyarova A.,** Abdraimova M., Nurbekova M., Seibekova K., Tursyn Z., Kezdykbayeva A., Ramachandran K., Keskin B. Novel Spinel Li–Cr Nano-Ferrites: Structure, Morphology, and Electrical/Dielectric Properties. Int. J. Mol. Sci. 2025, 26, 10409. https://doi.org/10.3390/ijms262110409

Статус автора: докторант — корреспондирующий автор. Показатели журнала (2025): импакт-фактор 4.9; Q1 по неорганической химии. CiteScore (2025): 9.9; 85-й перцентиль по неорганической химии.

Вклад докторанта: проведение экспериментов, интерпретация результатов, подготовка и оформление оригинального текста статьи, участие в полном приведении статьи в соответствие с требованиями журнала. Собственный авторский вклад - 70%.

3. Mataev M., **Madiyarova A.,** Abdraimova M., Tursyn Z., Ramachandran K. Structure–Property–Application Relationships of Spinel Ferrite Nanoparticles: From Synthesis to Functional Systems. Int. J. Mol. Sci. 2026, 27, 2096. https://doi.org/10.3390/ijms27052096

Статус автора: докторант — корреспондирующий автор. Показатели журнала (2026): импакт-фактор 4.9; Q1 по неорганической химии. CiteScore (2026): 9.9; 85-й перцентиль по неорганической химии.

Вклад докторанта: проведение экспериментов, интерпретация результатов, подготовка и оформление оригинального текста статьи, участие в полном приведении статьи в соответствие с требованиями журнала. Собственный авторский вклад - 70%.

4. Mataev M.M., **Madiyarova A.M.,** Patrin G.S., Abduraimova M.R., Nurbekova M.A., Tursunova Zh.I. Synthesis and physico-chemical characteristics of complex ferrite CrNaFe2O5. Chem. J. Kaz., 2024, 1(85), 109–118. https://doi.org/10.51580/2024-1.2710-1185.11

Вклад докторанта: проведение экспериментов, интерпретация результатов, подготовка и оформление оригинального текста статьи, участие в полном приведении статьи в соответствие с требованиями журнала. Собственный авторский вклад - 70%.

5. Mataev M.M., **Madiyarova A.M.,** Patrin G.S., Abdraimova M.R., Nurbekova M.A. Synthesis and physico-chemical properties of a new complex ferrite. Proceedings of the National Academy of Sciences of the Republic of

Kazakhstan. Series Chemistry and Technology, 2024, 3(460), 137–146. https://doi.org/10.32014/2024.2518-1491.242

Вклад докторанта: проведение экспериментов, интерпретация результатов, подготовка и оформление оригинального текста статьи, участие в полном приведении статьи в соответствие с требованиями журнала. Собственный авторский вклад - 70%.

6. Матаев М.М., Абдраймова М.Р., **Мадиярова А.М.,** Патрин Г.С. Синтез сложного феррита $CrLiFe_2O_5$, рентгенографическое и электронно-микроскопическое исследование. Известия Национальной академии наук Кыргызской Республики. Бишкек, 2023. ISSN 0002-3221.

Вклад докторанта: проведение экспериментов, интерпретация результатов, подготовка и оформление оригинального текста статьи, участие в полном приведении статьи в соответствие с требованиями журнала. Собственный авторский вклад - 70%.

7. Матаев М.М., Патрин Г.С., Мадиярова А.М., Абдраймова М.Р. Синтез сложного феррита $CrNaFe_2O_5$ и его физико-химические характеристики. Материалы Казахско-Узбекского симпозиума «Современные проблемы науки о полимерах», Алматы, 2024.

Вклад докторанта: проведение экспериментов, интерпретация результатов, подготовка и оформление оригинального текста, участие в подготовке материалов в соответствии с требованиями. Собственный авторский вклад - 70%.

Связь работы с национальными научными программами

Работа выполнена в рамках грантового финансирования научных и (или) научно-технических проектов Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан на 2025–2027 годы:

– «Синтез и изучение свойств многокомпонентных перовскитов для создания магниточувствительных сред с контролируемыми физико-химическими характеристиками» (ИРН AP26198947).

– Внутреннее финансирование в соответствии с приказом № 236 от 26 апреля 2023 года Казахского национального педагогического университета для девушек: «Синтез и физические основы новых композитных мультиферроиков для спинтроники»

Научный руководитель:
д.х.н., профессор **М. Матаев**

PhD, и.о. ассоциированный профессор **М.Абдраймова**