

«УТВЕРЖДАЮ»

ректор ИСМАН

чл-корр. РАН

М.И. Алымов

марта 2017 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГА

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения
Российской академии наук

на диссертационную работу Жаркова Сергея Михайловича
«Структурные свойства и фазовые превращения в наноматериалах на основе
переходных 3d-металлов (Fe, Co, Ni, Cr, Cu)», представленную на соискание
ученой степени доктора физико-математических наук по специальности
01.04.07 – физика конденсированного состояния

На отзыв представлены:

- текст диссертационной работы на 319 страницах, включая 119 рисунков и 14 таблиц, библиографический список из 322 источников; диссертация состоит из введения, шести глав и заключения;
- автореферат диссертации на 38 страницах, включая список из 26 основных публикаций по теме диссертационной работы, из которых 26 статей в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ.

Диссертация Жаркова С.М. посвящена структурным свойствам и фазовым превращениям в широком спектре наноматериалов на основе переходных 3d-металлов (Fe, Co, Ni, Cr, Cu), полученных химическими и физическими методами в виде нанопорошков, нанопленок и пленочных композиционных наноматериалов.

Актуальность темы диссертации определяется выбором материала исследования – наноматериалы на основе переходных 3d-металлов, представляющие как фундаментальный, так и практический интерес. Актуальность фундаментального исследования связана с недостаточной

изученностью структурных, физических свойств и фазовых переходов в наноразмерной области. Решенная в диссертации научная проблема имеет большое практическое значение для развития микро- и наноэлектроники, современных медицинских технологий и других перспективных научно-технологических и промышленных отраслей, важных для развития страны. В диссертации использован комплексный подход к изучению структурно-морфологических характеристик наноматериалов и их физических свойств, что позволило установить взаимосвязь между условиями получения наноматериалов и их структурными и физическими свойствами. Комплексное исследование структурных свойств изучаемых наноматериалов проведено методами просвечивающей электронной микроскопии, дифракции электронов и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Следует особо отметить использование *in situ* методов просвечивающей электронной микроскопии и дифракции электронов, позволивших получить информацию о фазовых превращениях в процессе твердофазных реакций, инициированных в многослойных наноматериалах с помощью термического нагрева непосредственно в колонне просвечивающего электронного микроскопа.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав и заключения.

Во введении обоснована актуальность проведенной работы. Описана степень её разработанности, методология и методы научного исследования. Сформулированы цели и задачи исследования, положения, выносимые на защиту. Показана научная новизна работы, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Приводятся сведения о публикациях. По теме диссертации автор имеет 57 печатных работ (из них 26 опубликованы в научных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ для публикации результатов докторских диссертаций). Приведены сведения об апробации результатов исследования – результаты были доложены на 15 международных и 16 всероссийских

конференциях.

В **Главе 1** приведен обзор литературы, посвященной наноматериалам на основе 3d-металлов. Приведена классификация наноструктур, рассмотрены магнитные наноматериалы на основе 3d-металлов, твердофазные реакции в наноматериалах. На основе анализа литературных данных сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

В **Главе 2** описаны методы получения и исследования образцов. Приведена информация о методах получения наноматериалов на основе переходных 3d-металлов (Fe, Co, Ni, Cr, Cu) – наночастиц халькогенидных шпинелей хрома: CuCr_2S_4 ; $\text{Cu}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Cr}_2\text{Se}_4$ ($0 \leq x \leq 0.4$); пленочных композиционных наноматериалов Ni/SiO_2 , Co/SiO_2 , Fe/ZrO_2 ; однослойных и двухслойных тонких пленок на основе переходного 3d-металла (Fe, Co, Ni); а также эпитаксиальных пленок $\text{Fe}_3\text{Si/Si}(111)$. Описаны использованные в диссертационной работе методы исследования структурных и физических (магнитных, электрических) свойств вышеперечисленных наноматериалов. Особое внимание удалено электронно-микроскопическим методам исследования.

Глава 3 посвящена исследованию магнитных и структурных характеристик наночастиц халькогенидных шпинелей хрома – CuCr_2S_4 , CuCr_2Se_4 , $\text{Cu}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Cr}_2\text{Se}_4$ ($0 \leq x \leq 0.4$), полученных методом химического синтеза из раствора. Установлена взаимосвязь между технологическими условиями получения, морфологией наночастиц и их магнитными свойствами. Показано, что понижение температуры Кюри (T_C) в исследованных образцах (CuCr_2S_4 , CuCr_2Se_4) не связано как с изменением фазового состава, так и с размерным эффектом, предположено, что оно определяется высокой степенью дефектности кристаллической решетки шпинели. В случае образцов $\text{Cu}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Cr}_2\text{Se}_4$, температура Кюри уменьшается с увеличением содержания железа – $T_C=401$ К ($x=0.2$), $T_C=322$ К ($x=0.4$), что объясняется появлением локального антиферромагнитного обменного взаимодействия,

возникающего вследствие появления промежуточного состояния между ферромагнитным CuCr_2Se_4 и антиферромагнитным FeCr_2Se_4 состояниями. Показано, что вследствие плотной упаковки нанокристаллитов, составляющих нанокластеры CuCr_2S_4 , между ними существует достаточно сильное взаимодействие. Прежде всего, это взаимодействие диполь-дипольного типа, однако есть вклад и обменного взаимодействия между нанокристаллитами.

В Главе 4 представлены результаты исследования структурных и магнитных свойств пленочных композиционных наноматериалов, полученных на основе переходных 3d-металлов (Fe, Co, Ni): Ni/SiO_2 и Co/SiO_2 , полученных методом имплантации ионов Ni^+ (или Co^+) в аморфную матрицу SiO_2 ; $\text{Co/Sm}_2\text{O}_3$, полученных методом импульсно-плазменного испарения; Fe/ZrO_2 , полученных твердофазной реакцией.

Установлено, что в результате имплантации ионов Ni^+ , Co^+ в аморфный плавленый кварц в приповерхностном слое SiO_2 формируются композиционные наноматериалы Ni/SiO_2 , Co/SiO_2 , представляющие собой изолированные наночастицы ГЦК Ni или ГПУ Co (средний размер 5-8 nm) в матрице SiO_2 . Показано, что при увеличении дозы имплантации ионов увеличивается средний размер имплантированных наночастиц. Впервые экспериментально обнаружены наночастицы никеля и кобальта с морфологией "ядро/оболочка", сформировавшиеся при имплантации ионов Ni^+ , Co^+ в аморфный SiO_2 . Установлено, что "оболочка" состоит из кристаллического Ni, Co. Исследования магнитных свойств композиционных наноматериалов Ni/SiO_2 , Co/SiO_2 показали, что все исследованные образцы являются суперпарамагнетиками при комнатной температуре и переходят в "замороженное состояние" при различных температурах: Ni/SiO_2 – от 25 до 70 K, Co/SiO_2 – 270 K в зависимости от дозы имплантации, чем больше доза имплантации, тем больше размер частиц и выше температура блокировки. Наблюдаются небольшие отклонения полевых зависимостей

намагнченности, полученных при комнатной температуре, и температурных зависимостей намагнченности, полученных в процессе нагрева образцов в режимах охлаждения без поля и в поле, от классических, характерных для суперпарамагнитных частиц. Рассмотрены возможные причины такого отклонения, показано, что это связано с морфологией наночастиц "ядро/оболочка", а не с взаимодействием между наночастицами.

Проведено исследование структурных и магнитных характеристик ферромагнитных композиционных нанопленок α -Fe/ZrO₂, полученных с помощью твердофазной реакции. Нанопленки α -Fe/ZrO₂ состоят из наночастиц α -Fe (размером 25-70 nm) равномерно распределенных в матрице ZrO₂. Исходные двухслойные пленки Zr/ α -Fe₂O₃ получены путем окисления слоя α -Fe и последующего напыления слоя Zr. Установлено, что твердофазная реакция между нанослоями Zr и α -Fe₂O₃ начинается при ≈ 250 °C с формирования фаз: α -Fe, Fe₃O₄, c-ZrO₂ (или t-ZrO₂). При температуре отжига выше 300 °C начинается твердофазная реакция между Fe₃O₄ и непрореагировавшим Zr. Отжиг образцов при 450-500°C приводит к формированию композиционных нанопленок α -Fe/ZrO₂. Сделан вывод, что объемное содержание наночастиц α -Fe немного ниже порога переколяции ($x \sim 0.5$), при этом наночастицы α -Fe, окруженные ZrO₂, слабосвязаны между собой. Намагнченность насыщения полученных образцов составляет $\approx 80\%$ от намагнченности насыщения исходных пленок α -Fe. Представленный метод позволяет получать при относительно низких температурах ферромагнитные композиционные нанопленки α -Fe/ZrO₂, обладающие магнитомягкими свойствами и высокой намагнченностью.

В Главе 5 представлены результаты исследований структурных, магнитных и электрических свойств тонких пленок на основе переходных 3d-металлов (Fe, Co, Ni), полученных методом импульсно-плазменного испарения (ИПИ) в высоком вакууме: Fe-C; Co-C; Ni. Исследовано изменение атомной структуры пленок на основе 3d-металлов (Fe, Co, Ni) толщиной

20÷50 nm, полученных методом ИПИ, в процессе температурного воздействия (отжига) или путем нагрева пучком электронов в просвечивающем электронном микроскопе. Установлена корреляция между атомной структурой и физическими свойствами (магнитными, электрическими) исследованных образцов. Предложена модель структуры исследованных пленок Fe-C, Co-C в исходном состоянии – пленки состоят из кластеров Fe (Co) или Fe-C (Co-C) размером $\approx 3\div4$ nm, окруженных углеродной оболочкой. На нанокристаллических пленках Fe-C и Co-C впервые наблюдали кристаллизацию, проходящую взрывным путем со скоростью до 1 cm/s (Fe-C) и ~ 1 μ m/s (Co-C) с формированием дендритных и ячеисто-дендритных структур (размером ~ 1 μ m), состоящих из когерентно-ориентированных микрокристаллитов. На примере кристаллизации в пленках Fe-C показано, что зависимость между скоростью роста дендритных ветвей (или ячеек) при взрывной кристаллизации и радиусом закругления кончиков дендритных ветвей может быть качественно описана уравнениями, применяемыми для расчета роста кристалла в переохлажденном расплаве. Для объяснения механизма взрывной кристаллизации использована модель жидкой зоны, формирующейся на фронте кристаллизации.

Глава 6 посвящена исследованию структурных фазовых превращений и атомного упорядочения, инициированных термическим нагревом, при твердофазных реакциях в многослойных тонких пленках, полученных методами вакуумного осаждения, и содержащих слои переходного 3d-металла (Fe, Ni, Cu) или золота: Al/Ni; Al/Au; Cu/Au; Fe/Si; Fe₃Si/Si(111); Pd/α-Fe(001). Исследования проведены методами *in situ* просвечивающей электронной микроскопии и дифракции электронов. Процессы твердофазной реакции и атомного упорядочения инициированы путем термического нагрева пленочных образцов непосредственно в колонне просвечивающего электронного микроскопа. Определены температуры инициирования твердофазных реакций, последовательности формирования фаз при

твердофазных реакциях в исследованных двухслойных и многослойных пленках. Исследованы процессы формирования атомно-упорядоченных фаз: CuAuI и FePd (сверхструктура типа $L1_0$) и CuAuII (длиннопериодическая сверхструктура), а также процесс фазовых переходов типа порядок-беспорядок.

Установлено, что процесс атомного упорядочения в двухслойных пленках Cu/Au (с атомным отношением Cu:Au=48:52) начинается одновременно с процессом формирования неупорядоченной фазы $Cu_{50}Au_{50}$ при температуре ≈ 240 °C. Установлено, что на начальном этапе твердофазной реакции в результате взаимодиффузии в образце формируется матрица с включенными в нее кристаллитами размером 4-6 nm, состоящими из смеси атомно-неупорядоченной фазы CuAu и атомно-упорядоченной фазы CuAuI. Матрица представляет собой нанокристаллиты твердого раствора Cu-Au с областью когерентного рассеяния ≈ 1 nm.

Установлена область термической стабильности эпитаксиальной пленки $Fe_3Si(111)$ толщиной 20 nm выращенной на монокристаллической подложке Si(111). Показано, что при термических отжигах (в течение 30 min при фиксированной температуре в диапазоне 200-550 °C с шагом 50 °C) вплоть до 400 °C не происходит видимых изменений фазового состава. Твердофазная реакция между эпитаксиальной пленкой $Fe_3Si(111)$ и монокристаллической подложкой Si(111) регистрируется в процессе термического отжига при температуре 450 °C, при этом формируются фазы ϵ -FeSi и β -FeSi₂.

Исследован фазовый переход порядок-беспорядок атомно-упорядоченной фазы $L1_0$ -FePd, сформировавшейся при твердофазной реакции в тонких двухслойных пленках Pd/ α -Fe(001). Установлено, что переход атомно-упорядоченной фазы $L1_0$ -FePd в атомно-неупорядоченную фазу FePd начинается при ≈ 725 °C, и, при 740 °C во всем объеме пленки присутствует только атомно-неупорядоченная фаза FePd. Наблюдаемая температура фазового перехода порядок-беспорядок смешена на 35 °C в

сторону более высоких температур по сравнению с диаграммой фазовых равновесий, характерной для массивных сплавов. Наиболее вероятной причиной этого является более высокая концентрация атомов палладия на границах кристаллических зерен Fe Pd за счет зернограничной адсорбции.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что

1. В случае наночастиц CuCr_2S_4 выявлено, что формирование нанокластеров из наночастиц CuCr_2S_4 оказывает существенное влияние на их магнитные свойства. Для наночастиц халькогенидных шпинелей хрома (CuCr_2S_4 , CuCr_2Se_4) показано, что понижение температуры Кюри связано с повышенной дефектностью кристаллической структуры шпинели.
2. Впервые в ионно-синтезированных композиционных материалах Ni/SiO_2 , Co/SiO_2 обнаружены наночастицы никеля и кобальта с морфологией "ядро/оболочка", сформировавшиеся при имплантации ионов Ni^+ , Co^+ в аморфный SiO_2 . Установлено, что "оболочка" состоит из кристаллического Ni или Co.
3. Установлено, что в результате твердофазной реакции между нанослоями Fe_2O_3 и Zr формируются ферромагнитные композиционные нанопленки $\alpha\text{-Fe/ZrO}_2$, представляющие собой наночастицы $\alpha\text{-Fe}$ (размером 25-70 nm), равномерно распределенные в матрице ZrO_2 . Определены температура и последовательности образования фаз в процессе твердофазной реакции.
4. Впервые в нанокристаллических пленках Fe-C и Co-C обнаружена взрывная кристаллизация, проходящая со скоростью до 1 cm/s.
5. Впервые установлена область термической стабильности системы: эпитаксиальная пленка $\text{Fe}_3\text{Si}(111)$ – монокристаллическая подложка Si(111). Показано, что при термических отжигах системы

$\text{Fe}_3\text{Si}(111)/\text{Si}(111)$ вплоть до 400°C не происходит видимых изменений фазового состава.

6. Методами *in situ* просвечивающей электронной микроскопии и дифракции электронов проведены исследования структурных фазовых превращений и атомного упорядочения в процессе твердофазных реакций в двухслойных пленках Cu/Au и Pd/ α -Fe(001). Установлено, что температура фазовых переходов типа порядок-беспорядок в тонких пленках Cu-Au ($\text{CuAuI} \rightarrow \text{CuAuII} \rightarrow \text{CuAu}$; $\text{Cu}_3\text{AuI} \rightarrow \text{Cu}_3\text{Au}$) соответствует диаграмме фазовых равновесий, а в случае FePd ($\text{L1}_0\text{-FePd} \rightarrow \text{FePd}$) смещена на ≈ 35 °C в сторону более высоких температур по сравнению с температурой, полученной из диаграммы фазовых равновесий.

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в установлении взаимосвязи между физическими свойствами (магнитными, электрическими), технологическими условиями получения и структурно-морфологическими характеристиками наноматериалов, полученных различными технологиями. Это позволяет на основе таких материалов разрабатывать новые магнитные, оптоэлектронные и др. устройства. Результаты исследования твердофазных реакций на границе раздела (Cu/Au, Fe/Si и др.), инициированных термическим нагревом, имеют практическую значимость, так как способствуют определению безопасного температурного диапазона работы микроэлектронных устройств и приборов, функционирующих на основе этих материалов.

Достоверность полученных в работе результатов не вызывает сомнений и подтверждается их внутренней непротиворечивостью, воспроизводимостью, а также использованием современных взаимодополняющих методов исследований.

Результаты работы можно рекомендовать для использования в организациях, в которых ведутся научные исследования по сходной тематике:

Федеральном государственном бюджетном учреждение науки Институте физики твердого тела Российской академии наук, Национальном исследовательском технологическом университете "Московский институт стали и сплавов", Институте физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» и других научно-исследовательских организациях.

Доклад С.М. Жаркова по материалам диссертационной работы заслушан и обсужден на тематическом семинаре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук 27 марта 2017 г., (Протокол № 2/2017). По результатам обсуждения диссертация получила положительную оценку.

По существу диссертационной работы необходимо сделать следующие **замечания:**

1. Во второй главе диссертации не приведено схемы держателя для нагрева образцов и геометрии проведения эксперимента, что затрудняет понимание процесса исследования фазообразования при твердофазных реакциях, инициированных в колонне просвечивающего электронного микроскопа.
2. В третьей главе на основании качественного анализа интенсивностей дифракционных рефлексов на электронограммах, полученных от наночастиц халькогенидных шпинелей хрома (CuCr_2S_4 , CuCr_2Se_4), предположено наличие точечных дефектов кристаллической структуры. Применение методов полнопрофильного анализа позволило бы построить модель атомной структуры наночастиц и уточнить тип и количество дефектов кристаллической структуры.
3. При обсуждении процессов твердофазных реакций в четвертой и шестой главах не совсем понятно, что подразумевается под температурой начала

твердофазных реакций. Необходимо учитывать, что определенные в настоящей работе температуры начала твердофазной реакции зависят как от скорости нагрева, так и от условий получения тонкопленочных образцов, и, строго говоря, не являются характеристикой твердофазных реакций.

4. В диссертации не оценено влияние различных скоростей нагрева на фазообразование при твердофазных реакциях в исследованных многослойных пленках.

5. При обсуждении результатов, полученных в п.6.4, не объясняется, почему в процессе твердофазной реакции в многослойных пленках Si/Fe/Si не происходит формирование фаз Fe_3Si и Fe_5Si_3 .

6. На вставке рисунка 4.20а (стр. 149) диссертации и в подрисуночной подписи не указана температура, при которой получена кривая гистерезиса. На рисунке 4.20б не указано направление хода кривой электросопротивления от температуры.

7. Механизм образования полостей внутри наночастиц путем конденсации вакансий требует, на наш взгляд, более убедительного обоснования. Не ясно, почему вакансии не выходят на поверхность частиц; не очевидно, что светлое « пятно», наблюдаемое внутри частиц методом просвечивающей электронной микроскопии, является микрополостью, а не частицей («ядром») с меньшей плотностью.

8. Формулировка «реакция Гольдшмидта» не совсем точна. Реакции восстановления оксидов алюминием были открыты Н.Н. Бекетовым и использованы Г. Гольдшмидтом при создании металлотермии. Более правильно использовать термин «металлотермическая реакция».

9. Текст диссертации и автореферата содержит избыток запятых.

Заключение

Приведенные замечания не носят принципиального характера и потому не снижают ценности диссертационной работы и ее результатов и не влияют на высокую оценку работы.

Считаем, что диссертационная работа «Структурные свойства и фазовые превращения в наноматериалах на основе переходных 3d-металлов (Fe, Co, Ni, Cr, Cu)» имеет как научную, так и практическую ценность. Автореферат диссертации и публикации в рецензируемых научных изданиях отражают содержание диссертационной работы. Выводы по диссертации являются полными, логичными и обоснованными.

Диссертация С.М. Жаркова представляет собой научно-квалификационную работу, которая по своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований и практической значимости полученных результатов удовлетворяет критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 (п.9) от 24 сентября 2013 года, а её автор Жарков Сергей Михайлович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Председатель семинара, г.н.с., д.т.н.

Рецензент, в.н.с., д.ф.-м.н.

Ученый секретарь ИСМАН, к.ф.-м.н.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
Российской академии наук (ИСМАН)

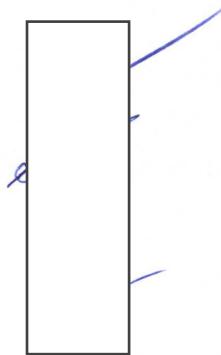
Академика Осипьяна ул., д. 8, г. Черноголовка, 142432.

Тел. +7 (496) 524 63 76

Факс +7 (496) 524 62 55

E-mail: isman@ism.ac.ru , webmaster@ism.ac.ru

Web: <http://www.ism.ac.ru>



В.И. Юхвид

Ю.Г. Морозов

О.К. Камынина

СПИСОК
избранных научных работ сотрудников

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук за 2013-2016 гг.

№ п/п	Наименование работы	Вид работы	Выходные данные	Соавторы
1	2	3	4	5
1.	Influence of the high energy ball milling on structure and reactivity of the Ni+Al powder mixture	статья	Journal of Alloys and Compounds. - 2013. - Vol. 577. - P. 600-605	Rogachev A. S. Shkodich N. F. Vadchenko S. G. Kovalev D. Y. Rouvimov S. Nepapushev A. A. Mukasyan A. S. Baras F.
2.	Microstructure development during NiAl intermetallic synthesis in reactive Ni-Al nanolayers: numerical investigations vs. TEM observations	статья	Surface and Coatings Technology. - 2013. - V. 215. - P. 485-492	Politano O. Baras F. Mukasyan A. S. Vadchenko S. G. Rogachev A.S.
3.	Solution combustion synthesis of nano-crystalline metallic materials: mechanistic studies	статья	Journal of Physic Chemistry C. - 2013. - V. 117. - No. 46. - P. 24417-24427	Manukyan K. V. Cross A. Wolf E. E. Mukasyan A. S. Roslyakov S. Rogachev A.S. Rouvimov S.
4.	Reactivity of mechanically activated powder blends: role of micro and nano structures	статья	International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. - 2013. - V. 22. - No. 4. - P. 210-216	Rogachev A.S. Shkodich N.F. Vadchenko S. G. Sachkova N. V. Boyarchenko O. D. Baras F. Chassagnon R.

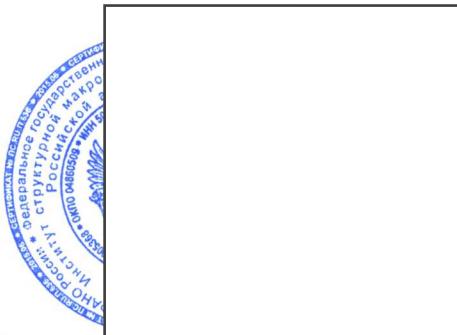
5.	Самораспространяющийся высокотемпературный синтез нанопорошков карбида кремния	статья	Доклады Академии наук. - 2013. - Т. 449. - № 2. - С. 176	Московских Д. О. Мукасьян А. С. Рогачев А.С.
6.	Synthesis of copper ferrite nanoparticles	статья	Inorganic Materials. - 2013. - V. 49. - No. 6. - P. 606-615	Kuznetsov M. V. Morozov Y. G. Belousova O. V.
7.	Исследование процессов зернограничного и межфазного проскальзывания в наноламинатах системы Cu/Nb	статья	Российские нанотехнологии. - 2013. - Т. 8. - № 11-12. - С. 91-95	Клименко Д. Н. Колобов Ю. Р. Карпов М. И. Моржов В. П. Голосов Е. В. Раточка И. В.
8.	Structure evolution and reaction mechanism in the Ni/Al reactive multilayer nanofilms	статья	Acta Materialia. - 2014. - V. 66. - P. 86-96	Rogachev A.S. Vadchenko S. G. Sachkova N. V. Baras F. Politano O. Rouvimov S. Mukasyan A. S.
9.	Spark plasma sintering of SiC powders produced by different combustion synthesis routes	статья	Journal of the European ceramic society. – 2015. – V. 35. – Iss. 2. – P. 477-486	Moskovskikh D.O. Lin Y.C. Rogachev A.S. McGinn P.J. Mukasyan A.S.
10.	Combustion synthesis in nanostructured reactive systems	статья	Advanced Powder Technology. – 2015. – V. 26. – Iss. 3. – P. 954-976	Mukasyan A.S. Rogachev A.S. Aruna S.T.
11.	Combustion in reactive multilayer Ni/Al nanofoils: Experiments and molecular dynamic simulation	статья	Combustion and Flame. – 2016. – V. 166. – P. 158-169	Rogachev A.S. Vadchenko S.G. Baras F. Politano O. Rouvimov S. Sachkova N.V. Grapes M.D. Weihs T.P. Mukasyan A.S.

12.	Spray Solution Combustion Synthesis of Metallic Hollow Microspheres	статья	Journal of Physical Chemistry C. – 2016. – V. 120. – Iss. 13. – P. 7165-7171	Trusov G.V. Tarasov A.B. Goodilin E.A. Rogachev A.S. Roslyakov S.I. Rouvimov S. Podbolotov K.B. Mukasyan A.S.
13.	Solution Combustion Synthesis of Nanoscale Materials	статья	Chemical Reviews. – 2016. – V. 116. – Iss. 23. – P. 14493-14586	Varma A. Mukasyan A.S. Rogachev A.S. Manukyan Kh.V.
14.	Effect of alloying on elastic properties of ternary Ni-Al-Ti system: Experimental validation	статья	Journal of Alloys and Compounds. - 2016. - Vol. 688. - P. 534-541	Sidnov K.P. Belov D.S. Ponomareva A.V. Abrikosov I.A. Zharmukhambetova A.M. Skripnyak N.V. Barannikova S. A. Rogachev A.S. Rouvimov S. Mukasyan A.S.
15.	Influence of high-energy ball milling on electrical resistance of Cu and Cu/Cr nanocomposite materials produced by Spark Plasma Sintering	статья	Journal of Alloys and Compounds. - 2016. - Vol. 688. - P. 468-474	Rogachev A.S. Kuskov K.V. Shkodich N.F. Moskovskikh D.O. Orlov A.O. Usenko A.A. Karpov A.V. Kovalev I.D. Mukasyan A.S.
16.	Каталитически активные магнитные наночастицы в системе Cu–O		Неорганические материалы. 2015. Т. 51. № 4. С. 359.	Кузнецов М.В., Mafina M.K., Белоусова О.В., Вакин Н.А., Щипакин С.Ю., Морозов Ю.Г.

17.	Механоактивация порошковой шихты магнитотвердого Fe-Cr-Co-сплава	статья	Металлы. 2014. № 4. С. 61-67.	Алымов М.И., Миляев И.М., Сычёв А.Е., Ковалёв Д.Ю., Корнеев В.П., Морозов Ю.Г., Юсупов В.С., Вомпе Т.А.
18.	Hydrogen-assisted phase transition in a trihydride MgNi ₂ H ₃ synthesized at high H ₂ pressures: thermodynamics, crystallographic and electronic structures	статья	Acta Materialia. 2014. Т. 82. С. 316-327	Yartys V.A., Denys R.V., Antonov V.E., Fedotov V.K., Kulakov V.I., Kuzovnikov M.A., Beskrovnyy A.I., Sheverev S.G., Crivello J.-C., Latroche M., Gupta M., Morozov Y.G., Tarasov B.P.

Список верен:

Ученый секретарь ИСМАН,
к.ф.-м.н.



О. К. Камынина