



Обзор

Обзорная статья

УДК (54+621.315.592):001.3(09)

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3524>

Наноразмерные полупроводниковые и диэлектрические пленки и магнитные нанокристаллы – новые направления развития научной школы Я. А. Угая «Химия твердого тела и полупроводников». Обзор

И. Я. Миттова^{1✉}, Б. В. Сладкопцев¹, В. О. Миттова²

¹Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

²Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко,
Студенческая ул., 10, Воронеж, 394036, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены новые направления развития научной школы Якова Александровича Угая «Химия твердого тела и полупроводников» в разделе «Материаловедение полупроводников и наноразмерных функциональных пленок на их основе», руководимые И. Я. Миттовой. Работы учеников и последователей научной школы Я. А. Угая охватывают материаловедческую тематику в области химии твердого тела, неорганической и физической химии. На современном этапе исследований упор сделан именно на наноразмерные объекты, т. к. здесь наиболее ярко выявляется основная закономерность современной химии твердого тела: способ синтеза – состав – структура (степень дисперсности) – свойства. Под руководством д. х. н., проф. Миттовой И. Я. ведутся исследования в двух ключевых направлениях: «Наноразмерные полупроводниковые и диэлектрические пленки» и «Допированные и недопированные нанокристаллические ферриты». В первой области решается проблема создания качественных полупроводниковых и диэлектрических наноразмерных пленок на $A^{III}B^V$ за счёт воздействия на процесс термоокисидирования полупроводников обоснованно выбранных хемостимуляторов и/или направленной модификации состава и свойств пленок. Приведены достигнутые к настоящему моменту конкретные результаты, отражающие положительное влияние хемостимуляторов и модификаторов на темп формирования диэлектрических и полупроводниковых пленок наноразмерного диапазона толщины и их функциональные характеристики, имеющих перспективы практического применения.

Наноматериалы на основе ортоферритов иттрия и лантана со структурой перовскита обладают уникальными магнитными, оптическими и каталитическими свойствами. Использование различных подходов к их синтезу и допированию позволяет в широком диапазоне управлять структурой и свойствами. В области магнитных нанокристаллов под руководством проф. Миттовой И. Я. проводятся исследования влияния допирующей примеси на состав, структуру и свойства наночастиц ортоферритов иттрия и лантана замещением катиона $Y(La)^{3+}$ и Fe^{3+} . В рамках этого направления в Социалистической республике Вьетнам успешно работает один из талантливых учеников проф. И. Я. Миттовой – Нгуен Ань Тьен; к настоящему времени разработаны новые методики синтеза нанокристаллов допированных и недопированных ферритов, в том числе и ферритов неодима, празеодима, гольмия и т. п.

Ключевые слова: полупроводники, диэлектрики, магнитные нанокристаллы, ферриты, наноразмерные плёнки, нанокристаллы

Благодарности: авторы выражают благодарность академику РАН В. М. Иевлеву за предоставление возможности дальнейшего творческого развития исследований в рамках научной школы, за поддержку и помощь.

Для цитирования: Миттова И. Я., Сладкопцев Б. В., Миттова В. О. Наноразмерные полупроводниковые и диэлектрические пленки и магнитные нанокристаллы – новые направления развития научной школы Я. А. Угая

✉ Миттова Ирина Яковлевна, e-mail: imittova@mail.ru

© Миттова И. Я., Сладкопцев Б. В., Миттова В. О., 2021



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

«Химия твердого тела и полупроводников». *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021;23(3): 309–336. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3524>

For citation: Mittova I. Ya., Sladkopevtsev B. V., Mittova V. O. Nanoscale semiconductor and dielectric films and magnetic nanocrystals - new directions of development of the scientific school of Ya. A. Ugai "Solid state chemistry and semiconductors". *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2021;23(3): 309–336. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3524>

1. Введение

Новые исследования научной школы Я. А. Угая «Химия твердого тела и полупроводников» [1] в разделе «Материаловедение полупроводников и наноразмерных функциональных пленок на их основе», руководимые И. Я. Миттовой, развиваются по целому ряду направлений «вширь» и «вглубь». Их ведут как непосредственные ученики Якова Александровича, так и

«ученики учеников», что отражено в табл. 1. На самом деле можно говорить о более глубокой научной преемственности, поскольку Яков Александрович защищал кандидатскую диссертацию по физико-химическому анализу солевых систем под руководством проф. А. П. Палкина, который, в свою очередь, являлся непосредственным учеником академика Н. С. Курнакова. Из табл. 1 следует охват современной материаловедческой

Таблица 1. Защиты диссертаций

№ п/п	Диссертация	ФИО соискателя ученой степени	Название диссертационной работы	Год защиты
1	2	3	4	5
Научный руководитель/консультант проф. Миттова И.Я.				
1	Докторская	Пономарева Наталья Ивановна	Формирование функциональных слоев на полупроводниках парофазным химическим осаждением из элементоорганических соединений	2004
2	Докторская	Самойлов Александр Михайлович	Направленный синтез легированных галлием и индием пленок теллурида свинца с контролируемым содержанием примесных атомов и отклонением от стехиометрии	2006
3	Докторская	Кострюков Виктор Федорович	Совместное воздействие хемостимуляторов на термоокисидирование арсенида галлия	2011
4	Докторская	Томина Елена Викторовна	Хемостимулированное окисидирование GaAs и InP под воздействием d-металлов (Ni, Co, V), их оксидов и композиций оксидов	2017
5	Кандидатская	Гадебская Татьяна Александровна	Кинетика роста и некоторые свойства легированных оксидных пленок на кремнии	1983
6	Кандидатская	Пономарева Наталья Ивановна	Взаимодействие хлоридов элементов III, IV и V групп с поверхностью кремния и арсенида галлия в окислительной атмосфере	1984
7	Кандидатская	Пухова Виктория Владимировна	Взаимодействия в структурах Si- $\Delta_x S_y$ ($\Delta = \text{In, Ge, Pb, Sb, Bi}$) и GaAs- $\Delta_x S_y$ ($\Delta = \text{In, Pb, Sb}$) при их термическом окислении	1986
8	Кандидатская	Свиридова Вера Васильевна	Термическое окисидирование арсенида галлия и фосфида индия в присутствии оксидов-примесей	1995
9	Кандидатская	Кузнецова Ирина Владимировна	Процессы фазообразования в алюмооксидной керамике, модифицированной оксидами меди, никеля и бора	1995
10	Кандидатская	Томина Елена Викторовна	Термическое окисление арсенида галлия и фосфида индия при участии хлоридов и оксохлоридов элементов IV–VI групп	1997
11	Кандидатская	Кострюков Виктор Федорович	Нелинейность совместного воздействия оксидов свинца, сурьмы и висмута на процесс термического окисления арсенида галлия	2000

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
12	Кандидатская	Пиняева Ольга Анатольевна	Хемостимулирующее воздействие производных хрома на термоокисидирование арсенида галлия	2001
13	Кандидатская	Артамонова Ольга Владимировна	Синтез нанокерамических материалов на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом индия	2004
14	Кандидатская	Сухочев Алексей Сергеевич	Твердофазные взаимодействия при термическом окислении структур Me/GaAs и MeO/GaAs (Me = Fe, Co, Ni)	2006
15	Кандидатская	Донкарева Ирина Александровна	Области локализации взаимодействий между оксидами-активаторами при термическом окислении арсенида галлия	2006
16	Кандидатская	Пенской Петр Константинович	Термическое окисление GaAs под воздействием композиций хемостимуляторов Sb_2O_3 , Bi_2O_3 , MnO , MnO_2 с инертными компонентами Ga_2O_3 , Al_2O_3 , Y_2O_3	2009
17	Кандидатская	Нгуен Ань Тьен	Синтез, структура и свойства нанопорошков $La(Y)_{1-x}Sr(Ca)_xFeO_3$ ($x = 0.0; 0.1; 0.2; 0.3$)	2009
18	Кандидатская	Лапенко Александр Александрович	Эволюция наноразмерных плёночных и островковых структур Me/InP (GaAs) и Me_xO_y/InP (GaAs) (Me = V, Co) в процессе термоокисидирования	2010
19	Кандидатская	Динь Ван Так	Золь-гель синтез и свойства нанокристаллических ферритов на основе системы $Y_2O_3-Fe_2O_3$	2012
20	Кандидатская	Сладкопевцев Борис Владимирович	Влияние методов формирования структур V_xO_y/InP на особенности их термоокисидирования и состав пленок	2013
21	Кандидатская	Самсонов Алексей Алексеевич	Термическое окисидирование InP, модифицированного нанесенными композициями оксидов $NiO + PbO$, $V_2O_5 + PbO$	2013
22	Кандидатская	Бережная Мария Викторовна	Влияние цинка и бария на структуру и свойства нанопорошков на основе $YFeO_3$ и $LaFeO_3$, синтезированных золь-гель методом	2019
Научный руководитель проф. Пономарева Н. И.				
23	Кандидатская	Манеляк Павел Иванович	Влияние дезинфицирующего раствора анолита на стабильность геометрических форм силиконовых оттисков (совместное руководство с д.м.н., профессором Каливраджием Эдвардом Саркисовичем, ныне покойным)	2009
24	Кандидатская	Будакова Елена Викторовна	Клинико-экспериментальное обоснование применения изопрен-стирольного термоэластопласта для базисных съёмных пластиночных протезов (совместное руководство с д.м.н., профессором Каливраджием Эдвардом Саркисовичем, ныне покойным)	2009
25.	Кандидатская	Попрыгина Татьяна Дмитриевна	Синтез, структура и свойства гидроксипатита, композитов и покрытий на его основе	2012
Научный руководитель проф. Самойлов А.М.				
26	Кандидатская	Шаров Михаил Константинович	Синтез и свойства легированных галлием пленок теллурида свинца на кремниевых подложках	2000
27.	Кандидатская	Беленко Сергей Владимирович	Одностадийный синтез легированных галлием пленок $PbTe/Si$ с заданным составом и оптимизированными функциональными параметрами	2013

тематики в области химии твердого тела, неорганической и физической химии, разрабатываемой учениками и последователями научной школы Я. А. Угая, его «научными детьми, внуками и правнуками». Здесь нельзя не упомянуть одну из самых талантливых, любимых и успешных учениц Я. А. Угая – Эвелину Павловну Домашевскую. Она много лет заведовала кафедрой физики твердого тела и наноструктур ВГУ, а сейчас – профессор этой кафедры. Созданная ей научная школа «Атомное и электронное строение твердого тела и наноструктур» широко известна не только в России, но и на мировом уровне. Несомненно, большой вклад внесли и сыграли огромную роль в становлении нашей научной школы уже, к сожалению, ушедшие от нас такие выдающиеся ученики Якова Александровича, как доцент Е. М. Авербах (его первый аспирант), профессор В. З. Анохин, доценты В. Р. Пшестанчик и В. Л. Гордин. Все они заложили основы исследований новых для того времени объектов – тонких пленок различного функционального назначения на полупроводниках. Новые объекты исследований в основном имеют наноразмеры, поскольку именно в этой области наиболее зримо и ярко проявляется основная закономерность современной химии твердого тела: способ синтеза – состав – структура (степень дисперсности) – свойства. Такой выбор обусловлен необходимостью установления новых фундаментальных закономерностей химии твердого тела, требованиями современного материаловедения, отраженными в актуальных Перечне критических технологий (Технологии получения и обработки функциональных наноматериалов) и Перечне приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации (Индустрия наносистем).

2. Наноразмерные полупроводниковые и диэлектрические пленки

Перспективы развития всех сфер деятельности человека однозначно связаны с совершенствованием микроэлектронной и нанoeлектронной элементных баз. Многообразие свойств полупроводников типа $A^{III}B^V$ обуславливает их широкое применение в устройствах различного технического назначения: для создания разнообразных оптоэлектронных устройств инфракрасного и видимого диапазонов, быстродействующих электронных и мощных СВЧ-приборов [2].

Одной из основных задач целевого формирования гетероструктур на $A^{III}B^V$ с заданными

свойствами является получение качественных диэлектрических и полупроводниковых пленок нанометровой толщины и улучшение свойств границ раздела. Создание качественных гетероструктур на $A^{III}B^V$ термическим окислением осложняется механизмом протекающих процессов, обуславливающим за счет реализации отрицательного канала связи между стадиями покомпонентного окисления в случае InP обогащение пленок неокисленными индием, а для GaAs – сегрегацию мышьяка в элементарном состоянии на внутренней границе раздела гетероструктуры [3]. Термоокисление $A^{III}B^V$ при одновременном воздействии модификаторов границы раздела и растущих пленок, позволяющих управлять их составом, наноструктурой и свойствами, и хемостимулирующих агентов, способствующих ускоренному формированию пленок при снижении рабочих параметров процесса и блокирующих отрицательный канал связи собственного термоокисления $A^{III}B^V$, позволяет достичь приемлемых оптических и электрофизических характеристик и контролировать наноструктуру пленок, которая является одним из факторов, определяющих их свойства.

Качественные термические окисные пленки на InP имеют потенциал применения в разработках высокоэффективных и дешевых фотопреобразователей естественного и линейно поляризованного излучения на основе InP. Арсенид галлия, наряду с фосфидом индия, является наиболее вероятным материалом для производства СВЧ интегральных схем следующего поколения [4].

Результатом появления арсенид-галлиевой микроэлектроники стало создание на основе гетероструктур GaAs/GaAlAs эффективных и мощных инжекционных лазеров и светодиодов в диапазоне длин волн 600–900 нм. Фосфид индия оказался необходимым компонентом более сложных гетероэпитаксиальных структур. В результате этих работ возникла и быстро развилась InP-технология, составляющая в настоящее время значительную базу микро- и оптоэлектроники. Лазерные диоды на основе InP/InGaPAs/InP представляют собой ключевой элемент оптоэлектроники для волоконно-оптической связи, обработки, хранения информации и т.д., поскольку они перекрывают диапазоны наибольшей прозрачности оптоволокна (длины волн 1.3 и 1.55 мкм) [5]. В современной коммерческой и технической кабельной связи (межкомпьютерные связи, дальняя телефония, местные сети и

т. д.) используются в основном именно эти гетеролазеры.

Энергетические параметры монокристаллической фазы InP и GaAs очень близки к параметрам монокристаллического кремния, что делает возможным изготовление гибридных приборов интегральной электроники, совместимых с кремнием [6]. Кроме реализации в технологии производства сверхвысокочастотных интегральных схем [4, 7, 8], гетероструктуры на фосфиде индия и арсениде галлия находят множество других применений, например, в качестве фотодетекторов [9, 10], в полевых транзисторах на основе Gatestacktechnology [11], ячейках памяти [12], оптоэлектронных приборах [13], в солнечных элементах [14].

Широкозонный и оптически прозрачный фосфид галлия является основным материалом для создания светодиодов, фотоприемников, фотодетекторов, перспективен для разработки приборов высокотемпературной электроники, способных функционировать при температурах, значительно превышающих достигнутые пределы современных сенсоров температуры [15–17]. На уникальных оптических свойствах монокристаллов GaP основано изготовление оптических линз и линз для лазеров [13]. Однако любое практическое приложение GaP требует формирования на его поверхности разнообразных функциональных плёнок (проводящие, диэлектрические, просветляющие и т. д.), что, несомненно, связано с целым рядом технических сложностей. Применение фосфида галлия в качестве волноводов и оптических линз для лазеров обычно связано с заключением монокристаллов GaP в слои материала с меньшим показателем преломления ($n_{\text{GaP}} < 3.3$), то есть просветлением. Обычно в качестве наносимого материала применяют AlGaP, который хорошо согласован по размеру решетки с GaP [18].

Отдельно следует выделить направления исследований, связанных с формированием различными методами гетероструктур оксид металла/полупроводник A^{III}B^V. Среди них можно отметить гетероструктуры ZnO/InP, применяемые для создания оптоэлектронных устройств и акустических датчиков [19, 20]; SnO₂/InP с определёнными электрофизическими свойствами, позволяющими использовать их для газочувствительных сенсоров [21, 22]; многослойные гетероструктуры со слоем диоксида марганца, обладающие перспективными магнитными характеристиками [23]. Спектр используемых методов

синтеза для подобных гетероструктур чрезвычайно широк: пиролиз аэрозолей, молекулярно-лучевая эпитаксия, магнетронное распыление, CVD-процессы и т. д. Однако к настоящему времени остаётся практически нереализованной идея многоцелевого управления посредством допантов процессами формирования на поверхности полупроводников A^{III}B^V функциональных наноразмерных плёнок. Данный подход позволяет тонко регулировать кинетику и механизм процессов синтеза указанных объектов и варьировать в широких пределах их состав, наноструктуру, а, следовательно, и свойства.

В современном мире возрастает спрос на портативные газовые датчики в связи с необходимостью их широкого использования в различных отраслях техники (для предотвращения взрывов, пожаров) для контроля загрязнения окружающей среды. Все это стимулировало развитие исследований в области полупроводниковых газовых датчиков во всем мире. Однако изучение физико-химических процессов, лежащих в основе работы датчиков, еще далеко от завершения. А именно понимание этих процессов обуславливает возможность создания нового поколения высокоэффективных, надежных и экономичных приборов на основе сенсорных элементов. Среди изученных материалов наибольшее практическое применение нашел нанокристаллический диоксид олова [24–27]. Помимо материалов на основе диоксида олова также изучаются другие оксидные материалы (In₂O₃, ZnO, MoO₃, Ga₂O₃), которые могут представлять интерес для создания химических сенсоров. Оксид индия обладает высокой чувствительностью, быстродействием, удобным диапазоном изменения сопротивления, достаточно низкой температурой при детектировании окислительных и восстановительных газов в воздухе [24]. Данные [28, 29] и результаты исследований [30] позволяют считать, что решающую роль в исключительных сенсорных свойствах In₂O₃ играет, по-видимому, высокая подвижность поверхностного кислорода, характерная для этого оксида. Имеет место адсорбционно-конкурентный механизм сенсорного отклика, который связан с вытеснением кислорода с поверхности с последующей адсорбцией детектируемых молекул газа на активных центрах оксида индия. Однако низкоразмерная структура одного полупроводникового оксида металла, получаемая различными способами, не решает проблемы селективности и стабильности сенсорного материала.

Поэтому возникает необходимость легирования оксида. В работе [24] показано, что тонкие пленки $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{In}_2\text{O}_3$ проявляют максимальную чувствительность к озону при рабочей температуре 370 °С. Кроме того, в настоящее время увеличивается число работ, в которых для детектирования хлора в воздухе предлагается применять многокомпонентные системы на основе оксида индия с добавками других оксидов металлов: $\text{ZnO-In}_2\text{O}_3$, $\text{MgO-In}_2\text{O}_3$, $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ [31, 32]. Уделяется также внимание сенсорам на основе оксида меди [33–35].

Существенным недостатком материалов, представленных в литературе различными авторами для создания сенсоров, является высокая рабочая температура (выше 200 °С). Этот недостаток может быть нивелирован путем создания материалов смешанного состава [35].

Основное направление развития наших идей, продолжающих развитие рассматриваемого раздела научной школы, заключается в использовании в процессе оксидирования $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ хемостимуляторов и модификаторов границы раздела и растущих пленок с целью управления скоростью их формирования, составом, наноструктурой и свойствами [36–39]. Решение проблемы создания качественных полупроводниковых и диэлектрических пленок нанометрового масштаба толщины на $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ возможно при изменении механизма термооксидирования этих полупроводников с собственного на хемостимулированный за счет воздействия на процесс обоснованно выбранных хемостимуляторов и/или направленной модификации состава и свойств пленок. Участие хемостимуляторов в процессе оксидирования обеспечивает протекание новых интерфейсных реакций с кинетически сопряженными и гетерогенно-каталитическими стадиями. При этом осуществляется кинетическое блокирование отрицательных каналов связи между стадиями окисления компонентов A^{III} и B^{V} за счет создания новых, положительных каналов с участием хемостимуляторов, снижаются температура и время процесса синтеза с одновременным модифицированием состава и свойств функциональных пленок нанометровой толщины в случае хемостимулятора, обладающего модифицирующим действием. Нами ранее показано [40–42], что использование только модификаторов внутренней границы раздела и самих пленок уже позволяет предотвратить испарение летучего компонента и деградацию внутренней границы раздела, снизить плотность по-

верхностных состояний на внутренней границе раздела гетероструктуры, осуществить управление структурой и рельефом поверхности на наноуровне. Естественно, что использование совместного действия хемостимулятора и модификатора является наиболее эффективным подходом к решению данной научной задачи. На основании многолетних исследований нами разработаны 2 способа введения хемостимулятора (модификатора) в окислительную среду: непосредственно в процессе термооксидирования полупроводника через газовую фазу (способ 1) и предварительное нанесение на поверхность, после чего происходит термооксидирование уже сформированной гетероструктуры (способ 2). При этом, в зависимости от того, какое воздействие на поверхность полупроводника оказывается в процессе нанесения на нее хемостимулятора (модификатора), в рамках способа 2 нами применялось два метода – метод 1 (жесткий метод) – магнетронное или вакуумно-термическое нанесение на поверхность полупроводника и метод 2 (мягкий метод) осаждения из аэрозоля или центрифугирование. При использовании метода 2 не оказывается заметного воздействия на поверхность полупроводника в процессе создания гетероструктуры [43,44].

Использование модификаторов в комбинации с хемостимуляторами, помимо блокировки диффузии компонента А в пленку в неокисленном состоянии и химического связывания компонента В на внутренней границе раздела, обеспечивает управление скоростью роста, наноструктурой и свойствами термических оксидных пленок и позволяет разработать новые процессы формирования функциональных наноразмерных диэлектрических и полупроводниковых пленок на полупроводниках $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$. Комбинированное использование хемостимуляторов роста и модификаторов особенно актуально при формировании наноразмерных пленок заданной толщины, когда в процессе оксидирования с использованием только хемостимулирующего агента вследствие малой толщины синтезируемых образцов положительное воздействие хемостимулятора может не реализоваться в полной мере [45,46]. Хемостимулирующие и модифицирующие агенты могут вводиться в процессе оксидирования полупроводников в одном соединении. В частности, при нанесении химическим осаждением сульфидов (PbS , Sb_2S_3 и т. п.) на поверхность полупроводников, при оксидировании сформированных гетероструктур эле-

мент-катионообразователь, способный к транзитной передаче кислорода компонентам подложки, обеспечивает быстрое формирование пленки по каталитическому или транзитному механизму, частично выполняя модифицирующую функцию при ее легировании. Основную же модифицирующую роль играет анионообразователь, влияя на характеристики внутренней границы раздела, состав, а, следовательно, и характеристики пленок. Изменение состава пленок в процессах оксидирования гетероструктур сульфид/полупроводник по схеме сульфид–сульфат–оксосульфат–оксид позволяет получить целый спектр их различных характеристик. Эффективность воздействия серы на свойства внутренней границы раздела термической оксидной пленки с полупроводником продемонстрирована предварительной обработкой поверхности подложки в парах серы [47, 48].

При использовании сложных соединений в процессах хемостимулированного оксидирования $A^{III}B^V$ положительное влияние оказывают и такие, как ванадат-фосфаты марганца и висмута [49, 50], поскольку оксиды марганца и висмута ранее продемонстрировали себя как эффективные хемостимуляторы термооксидирования $A^{III}B^V$, в которых катион обладает ярко выраженной хемостимулирующей активностью, а анион может предоставлять готовые фрагменты растущих оксидных пленок типа группировок PO_4^{3-} либо изоструктурных им.

Перспективно использование хемостимуляторов и/или модификаторов в ступенчатом синтезе наноразмерных пленок на $A^{III}B^V$ в сочетании с разными видами активации их действия – термической обработкой или импульсной фотонной обработкой, что расширяет возможности управления скоростью формирования пленок, их составом, структурой и свойствами [43, 44, 51].

Часть достигнутых к настоящему времени в этом направлении конкретных результатов, отражающих положительное влияние хемостимуляторов и модификаторов на темп формирования диэлектрических и полупроводниковых пленок наноразмерного диапазона толщины и их функциональные характеристики, имеющих перспективы практического применения, сведена в табл. 2.

Основные фундаментальные результаты, достигнутые научной группой под руководством д. х. н., профессора И. Я. Миттовой, в состав которой входят доктора химических наук Е. В. Томина и В. Ф. Кострюков, кандидаты химических

наук Б. В. Сладкопечев и А. А. Самсонов, аспиранты и студенты, состоят в следующем:

1. Предложена концепция многофункционального воздействия хемостимуляторов-модификаторов, часто в одном соединении и в едином процессе, и представлены схемы механизмов процессов термооксидирования $A^{III}B^V$ под воздействием простых и сложных соединений и их композиций как физико-химическая основа разработки новых процессов формирования полупроводниковых и диэлектрических пленок на $A^{III}B^V$ с заданными скоростью роста и целевыми характеристиками. Выявлена специфика каталитических процессов в новых неравновесных системах с твердофазными тонкопленочными катализатором, реагентами и продуктами. Установлена природа синергетических эффектов совместного воздействия нанесенных на поверхность полупроводников $A^{III}B^V$ хемостимуляторов и модификаторов в процессах оксидирования гетероструктур [36–38, 52–55].

2. Установлены нелинейные эффекты воздействия бинарных композиций оксидов-хемостимуляторов на процесс формирования тонких пленок на GaAs и InP, количественно интерпретированные с привлечением представлений об относительных парциальных и интегральных толщинах [39, 56–64].

3. Выявлена зависимость нелинейного эффекта совместного воздействия хемостимуляторов от степени окисления элемента, образующего один из оксидов композиции, как в паре с оксидом другого элемента, так и с оксидом того же элемента, но в другой степени окисления [59, 65, 66].

4. Установлена природа и пространственная локализация связывающих стадий при совместном воздействии хемостимуляторов на процесс термооксидирования GaAs и InP, ответственных за наблюдаемые нелинейные эффекты [67–71].

5. Доказана принципиальная возможность аддитивного воздействия композиции оксидов, один из которых является инертным компонентом, на процесс термооксидирования GaAs [72–78].

6. Установлено наличие сенсорного сигнала к присутствию в атмосфере газов-восстановителей у синтезированных на поверхности GaAs и InP методом хемостимулированного термооксидирования под воздействием как индивидуальных оксидов-хемостимуляторов, так и их композиций, тонких пленок [79–82].

Таблица 2. Многофункциональность действия хемостимуляторов и модификаторов в процессах синтеза наноразмерных пленок на $A^{III}B^V$

Характеристика объекта		Режим оксидирования, $T, ^\circ C / t, \text{мин}$	ЭЭА, кДж/моль 1 этап / 2 этап	Механизм оксидирования	Относительное увеличение толщины плёнки по сравнению с собственным оксидированием (% или раз)	Состав пленок	Результат воздействия	Удельное сопротивление (ρ), напряже ние пробоя (E)	Свойства синтезированных пленок
Хемостимулятор	Полупроводник								
Модификаторы									
Способ – введение через газовую фазу									
$AlPO_4$	InP	475–550/10–60	153	собственный	120 %	$AlPO_4, InPO_4$	модифицирование		
SnO_2	InP	475–550/10–60	48	собственный	–	$In(PO_3)_{3/2}, P_2O_5, In_2O_3, SnO_2, Sn_3(PO_4)_2$	модифицирование	$\rho = 9,0 \cdot 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{см}$	полупроводниковые
$SnO_2/InP + AlPO_4$	InP	530/10–60		собственный	–	$AlPO_4, InPO_4, Sn_3(PO_4)_2$	модифицирование	$\rho = 8,5 \cdot 10^7 \text{ Ом}\cdot\text{см}$	полупроводниковые
Хемостимуляторы									
Способ – нанесение на поверхность – жёсткие методы									
MnO_2	GaAs	450–550/10–60	95	транзитный	до 7.5 раз	Ga_2O_3, As_2O_3, MnO_2	хемостимулирование	$\rho = 1.2 \cdot 10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{см};$ $E = 5.2 \cdot 10^6 \text{ В/см}$	диэлектрические
	InP	450–550/10–60	180	транзитный	до 2.1 раз	$In_2O_3, InPO_4, Mn_2O_3, MnO_2$	хемостимулирование	$\rho = 6.3 \cdot 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{см};$ $E = 7 \cdot 10^6 \text{ В/см}$	диэлектрические
Суперпозиция хемостимулятор + модификатор									
Способ – нанесение на поверхность – мягкие методы									
$BiP_xV_{1-x}O_4$	InP	490–570/5–60	51	транзитно-каталитический	62 – 248 %	$BiVO_4, InPO_4, BiPO_4, V_2O_5$	хемостимулирование и модифицирование		
	GaAs	490–550/5–60	156	транзитный	до 220 %	$MnAsO_4, Mn_3(VO_4)_2, Mn_3(PO_4)_2, GaAs, GaAsO_4$	хемостимулирование и модифицирование		

Способ – нанесение на поверхность и одновременное введение из газовой фазы									
	InP	450–550/10–60	110	транзитный	до 240%	In(PO ₃) ₃ , Mn ₂ P ₂ O ₇ , MnO, Mn ₂ O ₃ , Mn ₃ (PO ₄) ₂ , MnPO ₄	хемостиму- лирование и модифици- рование	$\rho = 1.5 \cdot 10^{10}$ Ом·см	диэлектрические
MnO ₂ /InP+ Mn ₃ (PO ₄) ₂ ^(с)									
Суперпозиция хемостимулятор + инертный компонент									
Sb ₂ O ₃ + Y ₂ O ₃	GaAs	530/10–40		транзитный	2–6 раз	Ga ₂ O ₃ , As ₂ O ₃ , Sb ₂ O ₃	хемостиму- лирование	$\rho = 1.5 \cdot 10^6$ Ом·см	Полупроводнико- вые с газовой чувствительно- стью
PbO+Y ₂ O ₃	InP	560/10–60		транзитный	2–4 раз	In ₂ O ₃ , InPO ₄ , PbO	хемостиму- лирование	$\rho = 1.5 \cdot 10^6$ Ом·см	Полупроводнико- вые с газовой чувствительно- стью
Суперпозиция хемостимулятор + хемостимулятор									
PbO + Bi ₂ O ₃	GaAs	530/10–40		транзитный	2–4 раз	Ga ₂ O ₃ , As ₂ O ₃ , PbO, Bi ₂ O ₃	хемостиму- лирование	$\rho = 1 \cdot 10^6$ Ом·см	Полупроводнико- вые с газовой чувствительно- стью
Sb ₂ O ₃ + V ₂ O ₅	GaAs	530/10–40		транзитный	3–6 раз	Ga ₂ O ₃ , As ₂ O ₃ , Sb ₂ O ₃ , V ₂ O ₅	хемостиму- лирование	$\rho = 1 \cdot 10^6$ Ом·см	Полупроводнико- вые с газовой чувствительно- стью
PbO + V ₂ O ₅	InP	560/10–60		транзитный	2–4 раз	In ₂ O ₃ , InPO ₄ , PbO, V ₂ O ₅	хемостиму- лирование	$\rho = 1 \cdot 10^6$ Ом·см	Полупроводнико- вые с газовой чувствительно- стью
Эталоны									
GaAs, эталон-1		450–550/10–60	110	собствен- ный	–	As, Ga ₂ O ₃ , As ₂ O ₃	–	$\rho = 1 \cdot 10^5$ Ом·см	Полупроводнико- вые
InP, эта- лон-2		450–550/10–60	270	собствен- ный	–	In, In ₂ O ₃ , InPO ₄	–	Омическая проводимость	Проводящие

7. Разработаны способы прецизионного легирования тонких пленок на поверхности GaAs и InP [81, 83, 84];

8. Разработаны методики синтеза наноразмерных наноструктурированных оксидных плёнок на InP и GaAs с использованием геля V_2O_5 , позволяющие модифицировать поверхность полупроводников в мягких условиях, отличающиеся экономичностью и простотой реализации, вариативностью состава, толщины и морфологии нанесенных слоёв оксидных допантов в широких пределах [43, 51, 85, 86];

9. Исследованиями хемостимулированного термоокисления GaAs и InP установлено определяющее влияние физико-химической природы хемостимулятора, способа и метода его введения в систему на механизм процесса. Показано, что введение оксидного хемостимулятора через газовую фазу и нанесение его мягкими методами на поверхность полупроводника обуславливает транзитный механизм окисления. При нанесении жесткими методами соединений, обеспечивающих возобновляемую цикличность процесса, он протекает по синхронному каталитическому механизму. Получены данные о зависимости состава, толщины и скорости формирования плёнок, их морфологии от способа и метода введения в систему различных хемостимуляторов-модификаторов [46, 51, 86–90];

10. Доказана высокая эффективность применения метода спектральной эллипсометрии для определения толщин и оптических постоянных наноразмерных плёнок сложного состава, выращенных в результате термоокисления InP и GaAs под воздействием хемостимуляторов-модификаторов [81, 91–94];

11. Установлено, что магнетронное распыление является оптимальным методом формирования гетероструктур оксид (V_2O_5 , MnO_2 и др.)/полупроводник, хорошо блокирующим диффузию неокисленного индия в пленку в процессе термоокисления по сравнению с мягкими методами модифицирования поверхности полупроводника. Синтезированы слабопоглощающие плёнки с низким содержанием неокисленного индия, не более 1–2 % [89, 93];

12. Хемостимулированное окисление фосфида индия с наноразмерным слоем ванадат-фосфата висмута на поверхности приводит к значительному снижению ЭЭА (~50 кДж/моль) по сравнению с собственным окислением InP (~270 кДж/моль), что свидетельствует о значительном хемостимулирующем воздействии

сложного хемостимулятора на процесс термоокисления InP за счет разложения сложного хемостимулятора-модификатора с образованием оксидов-хемостимуляторов, а также структурных фосфатных и ванадатных фрагментов, встраивающихся в формирующуюся пленку. Наличие в пленках V_2O_5 при значительном снижении ЭЭА и большом относительном приросте толщины пленок на протяжении всего процесса позволяет говорить о каталитической составляющей механизма окисления [95]. Состав и оптические свойства пленок подтверждают эффективное блокирование диффузии неокисленного индия в формирующиеся пленки, что благоприятно сказывается на их функциональных свойствах. Хемостимулированное окисление арсенида галлия с наноразмерным слоем ванадат-фосфата марганца на поверхности протекает по транзитному механизму, в пользу чего говорит значение ЭЭА процесса (порядка 150 кДж/моль), сравнимое по порядку величины с таковым для эталонного окисления InP (~270 кДж/моль). Согласно результатам РФА, в пленках не обнаружен хемостимулятор с ярко выраженным каталитическим механизмом действия (V_2O_5), первоначально присутствующий в исходном ванадат-фосфате, что свидетельствует об отсутствии цикла регенерации катализатора $V_2O_5 \leftrightarrow VO_2$. Ванадат-фосфаты висмута и марганца выступают одновременно и хемостимуляторами, и модификаторами процесса термоокисления, действующими по транзитному механизму для гетероструктур на GaAs и транзитно-каталитическому – для гетероструктур на InP, и приводящими к ускорению процесса до 220–248 % (см. табл. 2). Термоокисление InP с магнетронно нанесенными наноразмерными слоями хемостимулятора MnO_2 и одновременном введении хемостимулятора-модификатора $Mn_3(PO_4)_2$ через газовую фазу приводит к увеличению скорости роста пленок до 240 % по сравнению с собственным окислением InP, отсутствию в плёнках недоокисленного индия, большому содержанию целого спектра фосфатов (РФА, ИКС, ОЭС, УМРЭС, СЭ), и, как следствие, их диэлектрическим характеристикам (удельное сопротивление до 10^{10} Ом·см, табл. 2).

Традиции, заложенные научной школой профессора Якова Александровича Угая, продолжает в своих работах и д. х. н., проф. А. М. Самойлов [96–101].

Основными целями этих исследований являются изучение фундаментальных физико-хи-

мических свойств полупроводниковых систем с сенсорными свойствами, а также совершенствование методов направленного синтеза гетеро- и наноструктур на основе этих материалов с целью достижения оптимальных значений их функциональных параметров.

В центре внимания находятся многокомпонентные узкозонные полупроводники $A^{IV}B^{VI}$, способные эффективно детектировать электромагнитное излучение в терагерцовой и инфракрасной области спектра [102–115], а также широкозонные транспарентные оксиды металлов, перспективные для создания газовых сенсоров и датчиков ультрафиолетового излучения [116–129]. Исследование этих материалов в настоящее время осуществляется по нескольким направлениям: изучаются и уточняются фундаментальные физико-химические свойства, которые являются принципиальными при функционировании этих систем в качестве сенсорных материалов [102, 103, 105, 109–112]; на основании данных о растворимости Ga и In в PbTe оптимизируются методы синтеза тонких пленок $PbTe<Ga>$ и $PbTe<In>$ с высокой чувствительностью к ИК-излучению [104, 106, 111, 124, 125].

Полученные экспериментальные данные о термической стабильности и кристаллической структуре оксида палладия (II) позволили разработать методы синтеза наноструктур с различной морфологической организацией, которые продемонстрировали высокую чувствительность к токсичным газам с окислительными свойствами, хорошее быстродействие и стабильность сенсорного отклика во времени [120–123]. Результаты расчета области нестехиометрии нанокристаллических пленок PdO [127–129] позволят в дальнейшем найти оптимальные условия синтеза наноструктур, обладающих высокой селективностью при детектировании в атмосферном воздухе ядовитых и взрывоопасных газов с окислительными и восстановительными свойствами [126].

Несколько неожиданное развитие материаловедческие традиции школы получили в работах д. х. н., профессора Н. И. Пономаревой по развитию новых методов синтеза композитов гидроксиапатита (ГА), позволяющих получать частицы, включенные в биополимерную матрицу. Так как свойства как самого ГА, так и композитов на его основе зависят от размера частиц, задачей исследований было получение нано-ГА. Показано, что при капельном смешении реагентов и добавлении ализаринового красного, спо-

собствующего возникновению центров индуцированной кристаллизации, скорость образования стехиометрического ГА в водном растворе увеличивается более чем в 100 раз по сравнению с эталонным процессом. Синтез ГА в модельной жидкости организма (SBF) приводит к образованию карбонатгидроксиапатита типа А, соответствующего формуле $Ca_{10}(PO_4)_6(CO_3)_{0.5x}(OH)_{2-x}$, где $x < 2$ (ЛРСМА, ИКС), что объясняется присутствием гидрокарбонат-иона в SBF и углекислого газа в воздухе [130, 131]. Разработан способ синтеза нано-ГА в каплях микроэмульсий, приготовленных на основе толуола/октана и воды с добавлением АОТ в качестве ПАВ и показано, что частицы имеют игольчатую форму (длина 10–20 нм и ширина 2–4 нм) и покрыты аморфной оболочкой. Установлено, что при образовании композитов ГА с биополимерами определяющими факторами являются наличие карбоксильных, гидроксильных и сульфогрупп в используемых биополимерах и отрицательный заряд поверхности полимеров. Избыток ионов кальция увеличивает степень связывания этих органических компонентов с ГА и существенно повышает твердость композитов (до 260 Мн/м^2) [132–134]. Н. И. Пономаревой с соавторами предложен новый экономически целесообразный способ формирования на поверхности титана биоактивных покрытий осаждением из раствора карбонатных пленок с их последующей трансформацией в фосфатные и гидроксиапатитовые [133–137]. Авторами даны рекомендации по импрегнированию углеродистых имплантатов ГА [138, 139].

3. Допированные и недопированные нанокристаллические ферриты иттрия и лантана

Развитие исследований в области полупроводниковых и диэлектрических пленок наноразмерного диапазона толщины последовательно научной школы Я. А. Угая закономерно распространилось в область магнитных нанокристаллов. Повышенный интерес к наноматериалам на основе ортоферритов иттрия и лантана со структурой перовскита вызван уникальными магнитными, оптическими и каталитическими свойствами [140, 141] и возможностью в широком диапазоне управлять их структурой и свойствами посредством допирования.

Среди методов получения наноразмерных ферритов РЗЭ широко распространен золь-гель метод, позволяющий при относительно низких температурах, используя простое и недорогое

оборудование, формировать нанопорошки с узким распределением частиц по размерам. К разновидностям золь-гель метода относят полимер-гель процесс, в котором образование геля достигается введением в исходный раствор водорастворимого полимера с последующим упариванием, и метод Печини (цитрат-гель), в котором используют лимонную кислоту, этиленгликоль или поливиниловый спирт [142–144]. Гидротермальная обработка осажденных гидроксидов иттрия и железа (III) позволяет получать монокристаллы феррита иттрия [145, 146], микрокристаллические [147, 148] и нанокристаллические порошки [147, 149, 150], подбирая соответствующие прекурсоры, pH среды и условия гидротермальной обработки. Механизм формирования нанопорошков феррита иттрия в условиях глицин-нитратного горения описан в работах [151, 152]. Синтезированные частицы характеризуются ромбической и гексагональной структурой с размером частиц от 30 до 53 нм и от 6 до 14 нм соответственно. Установлено, что на фазовый состав и средний размер кристаллитов существенное влияние оказывает соотношение глицин/нитраты, которое определяет температуру горения.

Методом разложения алкоксидных комплексов нанопорошки ортоферрита иттрия формируются при температуре 680 °C и проявляют слабый ферромагнетизм [153]. Одним из современных способов синтеза нанокристаллов ферритов является микроволновой синтез. Способ синтеза ванадатов и ферритов осаждением из раствора прекурсоров под воздействием микроволнового излучения характеризуется простотой реализации, экономичностью, высокой скоростью синтеза. Микроволновое излучение стимулирует разложение солевых прекурсоров, дегидратацию и синтез целевых продуктов за счет однородности и высокой скорости микроволнового нагрева и ускорения процессов «зародышеобразования» под влиянием «нетермических» эффектов [154].

Для эффективного поглощения микроволнового излучения необходимо наличие в веществе либо диполей, способных переориентироваться и вращаться под микроволновым воздействием, либо свободных носителей зарядов, способных перемещаться при наложении микроволнового поля. Молекулы воды, находящиеся в кристаллической решетке кристаллогидратов-прекурсоров, обладают значительным дипольным моментом. Разложение используемых кристаллогидратов в микроволновом поле идет до окси-

дов, поскольку образование оксидного продукта начинается до удаления всей содержащейся в системе воды.

По сравнению с традиционными способами нагрева микроволновый нагрев имеет несколько несомненных преимуществ: при микроволновом нагревании стенки сосуда не нагреваются, греется только реакционная смесь. В результате этого: сокращается время реакции (в 10–1000 раз); осуществляется направленная активация реагирующих молекул; отсутствуют побочные процессы деструкции на стенках сосуда, перегрев растворителя выше температуры кипения; после прекращения реакции поступление энергии прекращается [155, 156].

Микроволновое воздействие с последующей ультразвуковой обработкой синтезируемых образцов $YFeO_3$ и $BiFeO_3$ при использовании в качестве осадителя гидроксида натрия позволило нам синтезировать химически однородные нанопорошки при значительном снижении энергоёмкости процесса. Полученные частицы $YFeO_3$ и $BiFeO_3$ имеют близкую к сферической форму, для них характерна небольшая дисперсия по размерам в интервале 20–100 нм [157, 158].

Изменение магнитных свойств допированных ферритов вызвано несколькими причинами: изменением размера и формы частиц, искажением кристаллической решетки вследствие разницы ионных радиусов, изменением валентного состояния железа при введении допанта, возникновением кислородной нестехиометрии.

Исследования влияния допирующей примеси на состав, структуру и свойства наночастиц ортоферрита иттрия можно подразделить на два направления: замещение катиона Y^{3+} и Fe^{3+} . Нами ведутся работы по обоим этим направлениям.

На первом этапе исследований было показано, что замещение катионов Y^{3+} на La^{3+} в нанопорошках феррита иттрия, синтезированных совместным осаждением, приводит к увеличению намагниченности от 0.041 А·м²/кг для $x = 0$ до 0.231 А·м²/кг для $x = 0.4$ и уменьшению коэрцитивной силы, что свидетельствует о значительном вкладе искажения кристаллической решетки в формирование магнитных свойств материала [159]. Такой эффект обнаружен даже при изовалентном замещении и в данном случае он обусловлен размерным фактором.

Изменение же магнитных свойств в случае гетеровалентного замещения обусловлено не только размерными факторами, но и изменени-

ем валентного состояния железа для компенсации заряда и возникновением кислородной нестехиометрии.

Ряд данных, полученных при допировании феррита иттрия некоторыми двухзарядными катионами, представлен нами в [160–162]. Методика золь-гель синтеза образцов $Y_{1-x}A_xFeO_3$ (где $A - Ca^{2+}, Sr^{2+}, Cd^{2+}$) основана на процессах совместного осаждения катионов и отжиге в муфельной печи при температуре 750 °С в течение 1 ч. Допирование катионами Ca^{2+} и Cd^{2+} , ионный радиус которых незначительно превышает ионный радиус Y^{3+} , приводит к уменьшению размера частиц, удельной намагниченности и коэрцитивной силы. Уменьшение D_{cp} объясняется возникновением внутренних напряжений, обуславливающих ограничение роста кристаллов [163]. Несмотря на отклонение от правила Гольдшмидта [164], замещение Y^{3+} катионами стронция возможно и вызывает значительное увеличение коэрцитивной силы от 3.98 кА/м ($x = 0$) до 409.94 кА/м ($x = 0.3$), т.е. формирование нового типа магнитного материала – магнитножесткого ферромагнетика.

Можно было предположить, что допирование феррита иттрия катионами бария приведет к сильному увеличению магнитных характеристик, вследствие встраивания Ba^{2+} в положение Y^{3+} (т. к. $r(Ba^{2+}) > r(Y^{3+})$ [165]), а введение Zn^{2+} может изменять магнитные свойства как в сторону уменьшения (т.к. катионы цинка имеют небольшой радиус), так и повышения их величины в случае замещения катионов железа ионами Zn^{2+} . Действительно, в работах нашего коллектива показано [165, 166], что замещение катионов La^{3+} или Y^{3+} в ортоферритах двухзарядными ионами Zn^{2+} и Ba^{2+} вызывает искажение кристаллической решетки, изменение валентного состояния железа, что, в свою очередь, влияет на силу обменного взаимодействия и приводит к изменению физико-химических свойств, что расширяет области применения синтезированных материалов. Так, нанокристаллические порошки $(1-x)YFeO_{3-\delta} : xZn^{2+}$ и $(1-x)LaFeO_{3-\delta} : xZn^{2+}$, характеризующиеся слабым ферромагнетизмом, являются перспективными материалами для изготовления устройств, требующих быстрого перенамагничивания образца с минимальными затратами энергии, например, при создании катушек трансформаторов, а, нанопорошки $(1-x)YFeO_{3-\delta} : xBa^{2+}$ и $(1-x)LaFeO_{3-\delta} : xBa^{2+}$ могут быть использованы для решения проблемы увеличения плотности магнитной записи информации, т. к. яв-

ляются магнитножесткими материалами. Показано, что допирование нанокристаллических порошков феррита иттрия цинком методом совместного осаждения с последующей термообработкой вызывает немонокотное уменьшение размера кристаллитов от 60 ± 6 нм $x = 0$ до 50 ± 4 нм $x = 0.2$ (РФА), способствует увеличению удельной намагниченности от $0.242 \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$ для $x = 0$ до $0.556 \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$ для $x = 0.2$ (в поле 1250 кА/м). Наличие в образцах примеси $ZnFe_2O_4$ приводит к усилению ферромагнитного характера образцов.

Установлено, что разработанная методика синтеза [167] нанопорошков $(1-x)YFeO_{3-\delta} : xBa^{2+}$ приводит к формированию частиц с размером от 30 ± 2 нм для $x = 0$ до 55 ± 5 для $x = 0.1$ (РФА), характеризующихся наличием магнитномягкой и магнитножесткой подрешеток в рамках одной химической фазы.

В наших работах [168] представлена методика золь-гель синтеза $LaFeO_3$ с использованием в качестве осадителя водного раствора аммиака, проведено допирование феррита лантана кальцием и стронцием. Установлено, что введение катионов Ca^{2+} в решетку феррита обуславливает увеличение среднего диаметра кристаллитов от 30 нм для $LaFeO_3$ до 50 нм, в случае Sr^{2+} – до 70 нм. Допирование катионами кальция и стронция приводит к увеличению коэрцитивной силы и удельной намагниченности образцов. Изменение магнитных свойств феррита лантана при допировании двухзарядными катионами вызвано частичным переходом Fe^{3+} в Fe^{4+} , а также искажением кристаллической решетки из-за разницы ионных радиусов La^{3+} и допанта. При равном содержании катионов Ca^{2+} и Sr^{2+} в составе образцов магнитные свойства различаются: $H_c(La_{0.7}Ca_{0.3}FeO_3) < H_c(La_{0.7}Sr_{0.3}FeO_3)$, а $J(La_{0.7}Ca_{0.3}FeO_3) > J(La_{0.7}Sr_{0.3}FeO_3)$.

Сложность формирования нанопорошков феррита лантана, допированного цинком и барием, обусловлена большой разницей ионных радиусов лантана и вводимого допанта. Однако, несмотря на узкую область гомогенности, получены однофазные образцы, характеризующиеся сложной магнитной структурой [169, 170]. Максимальная степень допирования феррита лантана цинком составляет $x_{реал} = 0.07$. По мере увеличения количества вводимого допанта немонокотно увеличиваются объем элементарной ячейки от 240.634 \AA^3 ($x = 0$) до 242.245 \AA^3 ($x = 0.2$) и средний размер кристаллитов от 58 ($x = 0$) до 123 нм ($x = 0.2$), что обусловлено встраиванием ионов Zn^{2+} в положение Fe^{3+} , т. к. $r(Zn^{2+}) > r(Fe^{3+})$.

Наночастицы $(1-x)\text{LaFeO}_{3-\delta} : x\text{Zn}^{2+}$ в зависимости от состава обладают разным типом магнитного упорядочения: антиферромагнитным и ферри-магнитным. Допирование нанопорошков YFeO_3 катионами Zn^{2+} , радиус которых меньше, чем Y^{3+} , должно отрицательно влиять на намагниченность и коэрцитивную силу. Однако наблюдается образование нанокристаллов, характеризующихся сложным распределением допирующего катиона. Формирование частиц со структурой «кристаллическое ядро – аморфная оболочка» приводит к расположению части ионов допанта в форме аморфной оболочки из оксида цинка. Увеличение удельной намагниченности $(1-x)\text{YFeO}_{3-\delta} : x\text{Zn}^{2+}$ при повышении количества Zn^{2+} обусловлено переориентацией магнитных моментов ионов железа, как наблюдалось в [171]. Искажение кристаллической решетки незначительно, поэтому в данном случае существенного влияния на свойства не оказывает. Усиление ферромагнитного характера материала также обусловлено присутствием в образцах шпинельной фазы феррита цинка [166]

Введение катионов Ba^{2+} в решетку LaFeO_3 в положение La^{3+} вызывает увеличение параметров кристаллической решетки и среднего диаметра частиц от 25 ($x = 0$) до 42 нм ($x = 0.1$). Максимальная номинальная степень допирования составляет $x = 0.1$ (РФА). Синтезированные частицы проявляют свойства магнитножесткого ферромагнетика с широкой петлей гистерезиса. Немонотонное изменение магнитных характеристик обусловлено формированием сложной магнитной структуры сочетающей магнитножесткую и магнитномягкую подрешетку.

Таким образом, как и в случае феррита иттрия, допирование феррита лантана двухзарядными катионами бария и цинка приводит к образованию материалов, проявляющих различные магнитные свойства, что позволяет их использовать для изготовления устройств хранения информации [165, 166, 169, 170]

Изменения магнитных свойств феррита иттрия при допировании двухзарядными катионами вызваны несколькими причинами: во-первых, из-за разности ионных радиусов Y^{3+} и допанта возникает искажение кристаллической решетки и меняется размер частиц; во-вторых, подобное допирование относится к гетеровалентным изоморфным превращениям, в результате которых образуются катионы Fe^{4+} , т. е. возникает двойное обменное взаимодействие $\text{Fe}^{3+}-\text{O}^{2-}-\text{Fe}^{4+}$, генерируются дырки, которые являются пе-

реносчиками заряда при переходе с иона Fe^{4+} на ион Fe^{3+} через p -орбиталь кислорода [172]. В работах [159, 161] показано, что при допировании феррита лантана увеличение намагниченности может быть вызвано аналогичными причинами. Отсутствие такого взаимодействия в перовските $\text{Y}_{1-x}\text{La}_x\text{FeO}_3$ [159] объясняет более низкую его намагниченность по сравнению с $\text{Y}_{1-x}\text{Cd}_x\text{FeO}_3$ [161] при одинаковой степени замещения, т.к. с ростом содержания кадмия, хотя размер полученных частиц $\text{Y}_{1-x}\text{Cd}_x\text{FeO}_3$ уменьшается, их намагниченность монотонно увеличивается. Следовательно, вышеописанная компенсация, по-видимому, оказывает более сильное влияние на намагниченность, чем изменение размера частиц.

Отметим, что имеющиеся в литературе данные о влиянии цинка на размер нанокристаллов и магнитные свойства нанопорошков LaFeO_3 весьма противоречивы. В работах [173, 174] показана возможность замещения катионов La^{3+} катионами Zn^{2+} в ортоферрите лантана, синтезированном методом соосаждения. Уменьшение объема кристаллической решетки с увеличением концентрации допанта приводит к увеличению орторомбического искажения решетки перовскита LaFeO_3 , что вызывает увеличение намагниченности.

В работах [175, 176] приведены результаты синтеза нанопорошков $\text{LaFe}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_3$ методом сгорания геля, описан механизм встраивания допанта и влияния на магнитную структуру материала. Введение Zn^{2+} вместо Fe^{3+} приводит к преобразованию $\text{Fe}^{3+} - \text{Fe}^{4+}$ и формированию кислородных вакансий в структуре перовскита, что изменяет угол и длину связей $\text{Fe}-\text{O}$. Структурный анализ показал, что допирование цинком вызывает кислородную нестехиометрию в системе. Это может изменить валентное состояние Fe^{3+} и, следовательно, намагниченность [176].

Допирование феррита лантана цинком, независимо от способа получения и положения допанта в решетке перовскита (в положении La^{3+} или Fe^{3+}) приводит к формированию частиц со сложной магнитной структурой: антиферромагнитное ядро – ферромагнитная оболочка, о чем свидетельствует смещение петли гистерезиса в сторону отрицательной величины напряженности поля [174–176].

В связи с тем, что разница радиусов $\text{La}^{3+} - \text{Zn}^{2+}$ значительно больше, чем у $\text{Fe}^{3+} - \text{Zn}^{2+}$, более вероятно замещение катионов железа на цинк. Это доказано нами для нанопорошков $(1-x)\text{LaFeO}_{3-\delta} : x\text{Zn}^{2+}$, синтезированных совмест-

ным осаждением с последующим отжигом в муфельной печи [170]. Замещение части ионов Fe^{3+} ионами Zn^{2+} приводит к формированию материала со сложной магнитной структурой. Контролируя количество вводимого допанта, можно получать материалы с антиферромагнитными (для $x = 0; 0.075; 0.15$) или ферримагнитными ($x = 0.05; 0.1; 0.2$) свойствами.

Более низкая удельная намагниченность для образцов феррита иттрия, допированного катионами Zn^{2+} , Cd^{2+} , Ca^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} , по сравнению с $(1-x)\text{LaFeO}_{3-\delta}\cdot x\text{Э}^{2+}$, свидетельствуют о значительном вкладе влияния двойного обменного взаимодействия на магнитные свойства материала. Величина намагниченности и коэрцитивной силы нанопорошков феррита лантана, допированного двухзарядными катионами, зависит от разницы ионных радиусов, т. е. от искажения кристаллической решетки. С ростом содержания допанта зависимость намагниченности от размера частиц не установлена. Следовательно, вышеописанная компенсация и структурный фактор, по-видимому, оказывают более сильное влияние на намагниченность, чем изменение размера частиц исследуемых ферритов иттрия и лантана. Описанные результаты могут быть использованы для получения композитных материалов [177, 178]. Кроме того, обнаруженные включения ферромагнитных фаз Fe_2O_3 , BaFe_2O_4 , ZnFe_2O_4 показывают перспективность синтезированных образцов для создания гранулированных структур [179, 180].

Из вышеизложенного следует сложный механизм встраивания цинка в решетки ферритов иттрия и лантана, причем, судя по разнице атомных радиусов, наиболее вероятно встраивание его на место железа. Тем не менее, как показано выше, это утверждение далеко неоднозначно. Такие выраженные переходные элементы, как марганец и никель, должны занимать в структуре позиции железа, поскольку они достаточно близки по свойствам. Соответствующие исследования отвечают вышеозначенному второму направлению. Существенное увеличение магнитных параметров наночастиц YFeO_3 наблюдается при допировании магнитными ионами Mn^{3+} , как было показано в [181]. Считается, что магнитный момент иона Mn^{3+} больше, чем у Fe^{3+} в оксидах перовскитного типа, и это должно быть причиной увеличения магнитных моментов с ростом количества допанта в $\text{YFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ [182]. Кроме того, усиление антиферромагнитного упорядочения обусловлено искажениями в кристаллической

решетке. В работах [183, 184] представлены результаты допирования никелем Ni^{2+} порошков ферритов иттрия и лантана, методом последовательного осаждения с использованием водного раствора гидроксида калия [184]. Однофазность образцов $\text{YFe}_{1-x}\text{Ni}_x\text{O}_3$ ($x = 0-0.25$) достигается при температуре 800°C в течение 1 ч соответственно (РФА). При увеличении содержания допанта Ni до $x = 0.3$ после отжига при 800°C в течение 1 ч, помимо YFeO_3 образуются примесные фазы NiO и Y_2O_3 . С увеличением содержания Ni^{2+} в решетке YFeO_3 от $x = 0.1$ до 0.25 наблюдается уменьшение коэрцитивной силы от 1332.6 до 887.9 Э, в то время как значения избыточной намагниченности M_r и намагниченности насыщения M_s увеличиваются: $1.8 \cdot 10^{-1}$ до $3.2 \cdot 10^{-1}$ А·м²/кг, 0.67 до 1.18 А·м²/кг соответственно.

Введение катионов Ni^{2+} в решетку LaFeO_3 в положение Fe^{3+} вызывает уменьшение параметров кристаллической решетки и среднего диаметра частиц от 28.72 ($x = 0$) до 23.59 нм ($x = 0.25$). Для образцов $\text{LaFe}_{1-x}\text{Ni}_x\text{O}_3$ с увеличением содержания допанта Ni^{2+} от $x = 0$ до 0.25 наблюдается увеличение коэрцитивной силы от 42.53 Э до 160.76 Э, при этом значения избыточной намагниченности M_r и намагниченности насыщения M_s снижаются: $1.0 \cdot 10^{-2}$ до $3.8 \cdot 10^{-4}$ А·м²/кг, а от $0.24 \cdot 10^0$ до $0.74 \cdot 10^{-4}$ А·м²/кг [183]. Установлено, что увеличение содержания допанта Ni^{2+} в решетках YFeO_3 и LaFeO_3 позволяет варьировать величину коэрцитивной силы (H_c) и намагниченности насыщения (M_s), что расширяет новые возможности применения допированных ферритов иттрия и лантана в сильном магнитном поле.

В [185] нанопорошки перовскита $\text{YFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ ($x = 0.1; 0.2; 0.3; 0.4$) синтезированы методом химического совместного осаждения с применением KOH 5 % в качестве осаждающего реактива. Введение ионов марганца в решетку YFeO_3 предложенным способом приводит к увеличению параметров кристаллической решетки ($b = 7.7373 \div 7.5194$ Å, $c = 5.3014 \div 5.2592$ Å); объем элементарной ячейки ($V = 229.425 \div 224.4012$ Å³), среднего размера частиц ($D_{\text{XRD}} = 23.6081 \div 22.9449$ нм). Установлено, увеличение коэрцитивной силы ($H_c = 56.94 \div 150.95$ Э) и остаточной намагниченности ($M_r = 0.23-0.50$ А·м²/кг) при повышении содержания допанта.

Методом совместного осаждения с последующим термическим отжигом при 950°C в течение 1 ч синтезированы нанокристаллические порошки $\text{La}_{1-x}\text{Cd}_x\text{FeO}_3$ ($x = 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$), ха-

рактически узкой областью гомогенности $x_{\max} = 0.09$ (ЛРСМА, РФА). Введение катионов Cd^{2+} приводит к уменьшению среднего размера кристаллитов от 10–70 нм для $x = 0$ до 5–60 нм для $x = 0.1$ (ПЭМ). Синтезированные нанокристаллы проявляют свойства ферромагнетиков [186].

В этом направлении работы, относящиеся к рассматриваемому в настоящей статье разделу научной школы Я. А. Угая, продолжаются и за рубежом. Так, в Социалистической республике Вьетнам Нгуен Ань Тьен, защитивший диссертацию в России под руководством И. Я. Миттовой, заведует кафедрой общей и неорганической химии Хошиминского педагогического университета, и со своими коллегами и соавторами успешно реализует исследования по синтезу и характеристике нанокристаллов ферритов. Работы ведутся в соавторстве с российскими коллегами (научная группа под руководством И. Я. Миттовой) в соответствии с подписанным между Воронежским государственным университетом и Хошиминским педагогическим университетом Меморандумом о взаимопонимании, касающимся программы развития сотрудничества в сфере высшего образования. К настоящему времени разработаны новые методики синтеза нанокристаллов допированных и недопированных ферритов, в том числе и ферритов РЗЭ (неодим, празеодим, гольмий и т. п.) растворными методами, установлены закономерности изменения магнитных свойств в зависимости от метода синтеза, размера частиц, физико-химической природы допанта и уровня допирования [187–192]. Эти исследования неоднократно были поддержаны внутренними грантами Социалистической Республики Вьетнам.

В нашей стране исследования, продолжающие заложенные основы и традиции научной школы Я. А. Угая, поддерживаются следующими грантами и Программами (езде руководитель – проф. Миттова И. Я.):

1. МНФ Дж. Сороса № NZN000+NZN300.
2. НТП «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники», подпрограмма (208) – электроника, код проекта 01.01.004.
3. Грант Минобразования Е00-5.0-363 (регистрационный номер 01.2.00104702).
4. НТП Исследования Высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники.
5. Федеральная программа «Университеты России – фундаментальные исследования» (гранты № 06.01.07, № УР.06.01.020, № УР.06.01.001).

6. Программа по фундаментальным исследованиям в области радиотехники и электроники (грант № 97-5-1.1-32).

7. РФФИ № 02-03-32418 – Хемостимулированное окисление полупроводников $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ при формировании гетероструктур.

8. РФФИ № 03-03-96500-р2003цчр_a – Нелинейные эффекты в процессах хемостимулированного синтеза диэлектрических оксидных слоев на $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$.

9. РФФИ № 06-03-96338_p_центр_a – Воздействие хемостимуляторов на кинетику и механизм термического окисления полупроводников $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ в процессах формирования тонких пленок и гетероструктур.

10. РФФИ № 09-03-97552-р_центр_a – Каталитические и транзитные твердофазные взаимодействия в наносистемах на основе полупроводниковых материалов.

11. РФФИ 10-03-00949-a – Размерные эффекты в процессах синтеза оксидных слоев на GaAs и InP.

12. РФФИ № 13-03-00705-a – Роль V_2O_5 как катализатора оксидирования, модификатора границы раздела и наноструктуры функциональных нанометровых пленок на InP и GaAs.

13. РФФИ № 16-43-360595_p_a – Модифицирование поверхности GaAs, GaP и InP как способ управления наноструктурой, оптическими и электрофизическими свойствами оксидных пленок нанометрового диапазона толщины для микроэлектроники.

14. РФФИ № 18-03-00354_a – Разработка фундаментальных основ химически управляемого синтеза функциональных наноразмерных пленок на полупроводниках A^3B^5 для опто- и микроэлектроники, газочувствительных сенсоров.

15. Аналитическая ведомственная целевая программа (№ Г.Р. 01200602176) «Развитие научного потенциала высшей школы» в рамках программного мероприятия 1 «Проведение фундаментальных исследований в рамках тематических планов» «Разработка методов синтеза и установление механизма формирования наноразмерных слоев, нанопорошков и кристаллов полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов».

16. Проект Министерства образования и науки РФ: государственное задание 3.1673.2011.

17. Государственное задание ВУЗам в сфере научной деятельности на 2014-2016 годы (проекты № 673, 225).

18. Грант РФФИ № 20-33-90048 «Механизмы формирования, особенности строения и свойств углерод-содержащих нанокompозитов на основе нанокристаллических ферритов с перовскитоподобной структурой» («Аспиранты»).

Аспирант Копейченко Е. И. (научный руководитель – проф. Миттова И. Я.) выиграла конкурс на лучшие научные проекты, выполняемые молодыми учеными под руководством кандидатов и докторов наук в научных организациях Российской Федерации (грант РФФИ № 19-33-50104 мол_нр «Мобильность»).

Российской Академией Естествознания выдан сертификат И. Я. Миттовой как руководителю научной школы «Управление процессами синтеза, составом и свойствами функциональных (полупроводниковых, диэлектрических, пара- и ферромагнитных) наноразмерных пленок, магнитных нанокристаллов и нанолюми-

нофоров посредством хемостимуляторов и допантов» (Российская академия естествознания, сертификат №01165, «Ведущие научные школы. Москва: Издательский дом Академии Естествознания, 2018. Т. 11. 132 с.; Миттова Ирина Яковлевна, с. 81; <http://www.famous-scientists.ru/school/1393>»), являющейся воплощением идей Я. А. Угая, его учеников и последователей в области материаловедения полупроводников и наноразмерных функциональных пленок на их основе, распространением их в область новых вызовов и научных тенденций сегодняшнего дня.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных



отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Сидоркин А. С. *Ведущие научные школы*. Воронеж: Воронежский государственный университет; 2001. 172 с.
2. Mikhailova M. P., Moiseev K. D., Yakovlev Y. P. Discovery of III–V semiconductors: Physical properties and application semiconductors. *Semiconductors*. 2019;53(3): 273–290. <https://doi.org/10.1134/S1063782619030126>
3. Wilmsen C. W. Oxide layers on III–V compound semiconductors. *Thin Solid Films*. 1976;39(1-2-3): 105–117. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(76\)90628-3](https://doi.org/10.1016/0040-6090(76)90628-3)
4. Oktyabrsky S., Ye P. *Fundamentals of III-V Semiconductor MOSFETs*. Springer Science LCC; 2013. 447 p.
5. Moorthy S. B. K. *Thin film structures in energy applications*. Springer; 2015. 292 p.
6. Болховитянов Ю. Б., Пчеляков О. П. Эпитаксия GaAs на кремниевых подложках: современное состояние исследований и разработок. *Успехи физических наук*. 2008;178(5): 459–480. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0178.200805b.0459>
7. Engström O. *The MOS System*. Cambridge University Press; 2014. 216 p.
8. Aderstedt E., Medugorac I., Lundgren P. High-gain MOS tunnel emitter transistors. *Solid-State Electronics*. 2002;46(4): 497–500. [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(01\)00298-2](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(01)00298-2)
9. Чистохин И. Б., Журавлев К. С. СВЧ-фотодетекторы для аналоговой оптоволоконной связи. *Успехи прикладной физики*. 2015;3(1): 85–94. <https://advance.orion-ir.ru/UPF-15/1/UPF-3-1-85.pdf>
10. Li Sheng S. *Semiconductor Physical Electronics. Second Edition*. Springer-Verlag New York; 2006. 708 p.
11. Arbiol J., Xiong Q. *Semiconductor Nanowires: Materials, Synthesis, Characterization and Applications*. Elsevier Ltd.; 2015. 554 p.
12. Bachhofer H., Reisinger H., Bertagnolli E., Philipsborn von H. Transient conduction in multidielectric silicon–oxide–nitride–oxide semiconductor structures. *Journal of Applied Physics*. 2011;89(5): 2791–2800. <https://doi.org/10.1063/1.1343892>
13. Ahmad S. R., Cartwright M. *Laser Ignition of Energetic Materials*. John Wiley & Sons Ltd.; 2015. 425 p.
14. Ünlü H., Horing N. J. M., Dabowski J. *Low-Dimensional and Nanostructured Materials and Devices*. Springer Science LCC; 2015. 674 p.
15. Биксей М. П., Добровольский Ю. Г., Шабашкевич Б. Г. Фотоприемник ультрафиолетового излучения на основе фосфида галлия. *Прикладная физика*. 2005;4: 97–100. <https://applphys.orion-ir.ru/appl-05/05-4/PF-05-4-97.pdf>
16. Добровольский Ю. Г. Фотодиод на основе GaP с повышенной чувствительностью в коротковолновой области УФ-спектра. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2012;5: 31–34. <http://dSPACE.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/51709/07-Dobrovolskii.pdf?sequence=1>
17. Соболев М. М., Никитин В. Г. Высокотемпературный диод на основе эпитаксиальных слоев GaP. *Письма в ЖТФ*. 1998;24(9): 1–7. http://elibrary.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/ioffe/pztf/1998/09/pztf_t24v09_01.pdf
18. Алешкин В. Я., Афоненко А. А., Дубинов А. А. Генерация излучения на разностной частоте среднего и дальнего инфракрасных диапазонов в полупроводниковых волноводах на основе фосфида галлия. *Журнал технической физики*. 2006;76(9): 98–100. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20337292>
19. Purica M., Budianu E., Rusu E. Heterojunction with ZnO polycrystalline thin films for optoelectronic devices applications. *Microelectronic Engineering*. 2000;51–52: 425–431. [https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(99\)00492-X](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(99)00492-X)
20. Bang K. H., Hwang D. K., Park M. C., Ko Y. D., Yun I., Myoung J. M. Formation of p-type ZnO film on InP substrate by phosphor doping. *Applied Surface Science*. 2003;210(3–4): 177–182. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00151-X](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00151-X)
21. Thilakan P., Kumar J. Reactive thermal deposition of indium oxide and tin-doped indium oxide thin films on InP substrates. *Thin Solid Films*. 1997;292(1-2): 50–54. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(96\)08943-2](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(96)08943-2)
22. Kim T. W., Lee D. U., Yoon Y. S. Microstructural, electrical, and optical properties of SnO₂ nanocrystalline thin films grown on InP (100) substrates for applications as gas sensor devices. *Journal of Applied Physics*. 2000;88: 3759. <https://doi.org/10.1063/1.1288021>
23. Lee D. J., Park C. S., Lee C. J., Song J. D., Koo H. C., Yoon C. S., Yoon I. T., Kim H. S., Kang T. W., Shon Y. Enhanced ferromagnetism by preventing antiferromagnetic MnO₂ in InP:Be/Mn/InP:Be triple layers fabricated using molecular beam epitaxy. *Current Applied Physics*. 2014;14(4): 558–562. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2014.01.017>
24. Бельшева Т. В., Боговцева Л. П., Гутман Э. Е. Применение металлооксидных полупроводниковых гетеросистем для газового анализа. *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. 2003;S1: 128. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12879078>
25. Румянцева М. Н., Сафонова О. В., Булова М. Н., Рябова Л. И., Гаськов А. М. Газочувстви-

тельные материалы на основе диоксидов олова. *Сенсор*. 2003;2: 8–33.

26. Рембеза С. И., Свистова Т. В., Рембеза Е. С. Борсякова О. И. Микроструктура и физические свойства тонких пленок SnO₂. *Физика и техника полупроводников*. 2001;35(7): 796–800. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21321639>

27. Lekshmy S. S., Joy K. Structural and optoelectronic properties of indium doped SnO₂ thin films deposited by sol gel technique. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2014;25(4): 1664–1672. <https://doi.org/10.1007/s10854-014-1781-x>

28. Лугин Г., Жарский И. М. Использование термоэлектрических эффектов тонких пленок оксидов индия и олова для создания газовых сенсоров. *Микросистемная техника*. 2001;10: 10–14. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=8970862>

29. Ivanovskaya M., Bogdanov P., Faglia G., Sberveglieri G. Properties of thin film and ceramic sensors for the detection of CO and NO₂. *Proc. of Int. Meeting "Euroensors XIII"*. 1999. p. 145–148.

30. Бельшева Т. В., Боговцева Л. П., Гутман Э. Е. Модифицированные золотом пленки In₂O₃ как селективные сенсоры CO в воздухе. *Журнал прикладной химии*. 2000;73(12): 1983–1986.

31. Miyata T., Hikosaka T., Minami T. High sensitivity chlorine gas sensors using multicomponent transparent conducting oxide thin films. *Sensors and Actuators*. 2000;69(1-2): 16–21. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(00\)00301-4](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(00)00301-4)

32. Miyata T., Minami T., Shimokawa K., Kakumu T., Ishii M. New materials consisting of multicomponent oxides for thin film gas sensors. *Journal of the Electrochemical Society*. 1997;144(7): 2432–2436. <https://doi.org/10.1117/12.352810>

33. Петров В. В., Назарова Т. Н., Копылова Н. Ф., Заблуда О. В., Киселев И., Брунс М. Исследование физико-химических и электрофизических свойств, газочувствительных характеристик нанокomпозитных пленок состава SiO₂-SnO_x-CuO_y. *Нано- и микросистемная техника*. 2010;8(121): 15–21. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15260225>

34. Mingqing Y., Junhui H., Xiaochun H., Chunxiao Y., Zhenxing C., Yingqiang Z., Guomin Z. Copper oxide nanoparticle sensors for hydrogen cyanide detection: Unprecedented selectivity and sensitivity. *Sensors and Actuators B*. 2011;155(2): 692–698. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2011.01.031>

35. Satyendra S., Yadava B. C., Rajiv P., Bharat B., Jae R. Synthesis of nanorod and mixed shaped copper ferrite and their applications as liquefied petroleum gas sensor. *Applied Surface Science*. 2011;257(24): 10763–10770. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.07.094>

36. Миттова И. Я. Влияние физико-химической природы хемостимулятора, способа и метода его

введения в систему на механизм термоокисидирования GaAs и InP. *Неорганические материалы*. 2014;50(9): 948–955. <https://doi.org/10.7868/S0002337X14090097>

37. Томина Е. В., Миттова И. Я., Зеленина Л. С. Термическое окисидирование как способ создания наноразмерных функциональных пленок на полупроводниках A^{III}B^V: воздействие нанесенных слоев металлов: обзор. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2018;20(1): 6–24. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2018.20/472>

38. Томина Е. В., Миттова И. Я., Сладкопепцев Б. В., Кострюков В. Ф., Самсонов А. А., Третьяков Н. Н. Термическое окисидирование как способ создания наноразмерных функциональных пленок на полупроводниках A^{III}B^V: хемостимулирующее воздействие оксидов металлов: обзор. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2018;20(2): 184–203. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2018.20/522>

39. Кострюков В. Ф., Миттова И. Я., Томина Е. В., Сладкопепцев Б. В., Паршина А. С., Балашева Д. С. Нелинейные эффекты совместного воздействия оксидов р- и d-элементов при создании тонких пленок на поверхности GaAs и InP. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2018;20(4): 506–536. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2018.20/625>

40. Миттова И. Я., Томина Е. В., Головенко Н. А., Агапов Б. Л. Формирование термических оксидных слоев на InP в присутствии SbCl₃ в газовой фазе. *Неорганические материалы*. 1993;29(5): 603–606. <https://elibrary.ru/item.asp?id=27640857>

41. Миттова И. Я., Пухова В. В., Клементьева И. Ф., Семенов В. Н., Кашкаров В. М. Получение термическим окислением структур GaAs/Bi₂S₃ и свойства диэлектрических пленок на GaAs. *Известия Академии наук СССР. Неорганические материалы*. 1988;24(9): 1431–1434. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27454116>

42. Кострюков В. Ф., Миттова И. Я., Сладкопепцев Б. В., Паршина А. С., Балашева Д. С. Роль BiPO₄, вводимого через газовую фазу, в процессе создания тонких пленок на поверхности InP. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2019;21(2): 215–224. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2019.21/759>

43. Сладкопепцев Б. В., Томина Е. В., Миттова И. Я., Донцов А. И., Пелипенко Д. И. Термоокисидирование гетероструктур V_xO_y/InP, сформированных центрифугированием геля оксида ванадия(V). *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2016;3: 76–81. <https://doi.org/10.7868/S0207352816030185>

44. Sladkopevtsev B. V., Mittova I. Ya., Tomina E. V., Burtseva N. A. Growth of vanadium oxide films on InP under mild conditions and thermal oxidation of the resultant structures. *Inorganic Materials*.

2012;48(2): 161–168. <https://doi.org/10.1134/S0020168512020173>

45. Миттова И. Я., Третьяков Н. Н., Кострюков В. Ф., Сладкопечев Б. В. Термоокисидирование GaAs под воздействием композиций оксидов-хемостимуляторов V_2O_5 - MnO_2 с размером частиц в диапазоне 50–150 мкм. *Журнал общей химии*. 2016;86(5): 729–735 <https://doi.org/10.1134/S1070363216050017>

46. Третьяков Н. Н., Миттова И. Я., Сладкопечев Б. В., Самсонов А. А., Андреев С. Ю. Влияние магнетронно напыленного слоя MnO_2 на кинетику термоокисидирования InP, состав и морфологию синтезированных пленок. *Неорганические материалы*. 2017;53(1): 41–48. <https://doi.org/10.7868/S0002337X17010171>

47. Тарасова О. С., Донцов А. И., Сладкопечев Б. В., Миттова И. Я. Влияние обработки в парах серы на скорость термоокисидирования InP, состав, морфологию поверхности и свойства пленок. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2019;21(2): 296–305. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2019.21/767>

48. Миттова И. Я., Сладкопечев Б. В., Донцов А. И., Сыров Ю. В., Ковалева А. С., Тарасова О. С. Термическое окисидирование поверхности монокристаллического GaAs, обработанной в парах серы. *Неорганические материалы*. 2021;57(7): 693–699. <https://doi.org/10.31857/S0002337X21070137>

49. Миттова И. Я., Сладкопечев Б. В., Илясова Н. А., Томина Е. В., Донцов А. И., Тарасова О. С. Воздействие некоторых сложных хемостимуляторов и модификаторов на термоокисидирование InP. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2020;22(2): 245–256. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/2851>

50. Томина Е. В., Сладкопечев Б. В., Донцов А. И., Перфильева Л. И., Миттова И. Я. Влияние наноразмерных слоев хемостимулятора-модификатора $Mn_3(P_{0.1}V_{0.9}O_4)_2$ на процесс термического окисидирования GaAs, состав и морфологию формируемых пленок. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2020;22(1): 116–123 <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/2535>

51. Миттова И. Я., Томина Е. В., Сладкопечев Б. В., Донцов А. И. Влияние различных видов отжига на термоокисидирование структур V_xO_y/InP , сформированных осаждением геля оксида ванадия(V), фазовый состав и морфологию пленок. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2014;9: 91–100. <https://doi.org/10.7868/S0207352814090145>

52. Миттова И. Я., Томина Е. В., Лапенко А. А., Хорохордина А. О. Твердофазные процессы при термическом окислении GaAs с поверхностью,

модифицированной ванадием. *Неорганические материалы*. 2004;40(5): 519–523. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17656919>

53. Миттова И. Я., Томина Е. В., Лапенко А. А., Сладкопечев Б. В. Каталитическое действие ванадия и его оксида (V) в процессах окисидирования полупроводников $A^{III}B^V$. *Наносистемы: физика, химия, математика*. 2012;3(2): 116–138. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17881315>

54. Иевлев В. М., Миттова И. Я., Самсонов А. А., Томина Е. В., Кашкаров В. М. Каталитический эффект нанослоя композита ($V_2O_5 + PbO$) в процессе термоокисидирования кристалла InP. *Доклады Академии наук*. 2007;417(4): 497–501. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9568583>

55. Миттова И. Я., Сладкопечев Б. В., Самсонов А. А., Томина Е. В., Андреев С. Ю., Костенко П. В. Синтез и свойства наноразмерных пленок, сформированных термоокисидированием MnO_2/InP под воздействием $Mn_3(PO_4)_2$. *Неорганические материалы*. 2019;55(9): 969–974 <https://doi.org/10.1134/S0002337X19090070>

56. Миттова И. Я., Пшестанчик В. Р., Кострюков В. Ф. Нелинейный эффект совместного воздействия активаторов на процесс термоокисидирования арсенида галлия. *Доклады Академии наук*. 1996;349(5): 641–643. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27650813>

57. Миттова И. Я., Пшестанчик В. Р., Кострюков В. Ф. Знакопеременная нелинейность совместного активирующего воздействия бинарных композиций оксидов p-элементов при хемостимулированном термическом окислении GaAs. *Доклады Академии наук*. 2001;378(6): 775–777. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44438448>

58. Миттова И. Я., Пшестанчик В. Р., Пиняева О. А., Кострюков В. Ф., Скороходова С. М. Неадекватное влияние оксидов в композициях CrO_3 - PbO и CrO_3 - V_2O_5 как активаторов термического окисления арсенида галлия. *Доклады Академии наук*. 2002;385(5): 634–637. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44463075>

59. Миттова И. Я., Пшестанчик В. Р., Кострюков В. Ф., Донкарева И. А., Саратова А. Ю. Хемостимулированное термическое окисление GaAs при совместном воздействии оксида марганца (IV) с оксидами свинца (II) и ванадия (V). *Журнал неорганической химии*. 2004;49(7): 1085–1088. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17394549>

60. Миттова И. Я., Кострюков В. Ф., Лопатин С. И., Донкарева И. А., Пшестанчик В. Р., Саратова А. Ю. Нелинейные эффекты воздействия композиций $MnO + PbO$ и $MnO + V_2O_5$ на термическое окисление GaAs. *Журнал неорганической химии*. 2005;50(6): 948–952. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17330913>

61. Миттова И. Я., Пшестанчик В. Р., Кузнецова И. В., Кострюков В. Ф., Скороходова С. М., Медведева К. М. Влияние размера частиц активаторов на процесс термоокисидирования GaAs под воздействием композиций PbO + V₂O₅. *Журнал неорганической химии*. 2005;50(10): 1603–1606. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9153646>
62. Mittova I. Ya., Kostryukov V. F. GaAs thermal oxidation activated by the coaction of p-block oxides. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2014;5(3): 417–426. <http://www.mathnet.ru/links/8364620026a0f40f5d8a284be0ba04bf/nano872.pdf>
63. Третьяков Н. Н., Миттова И. Я., Козик В. В., Сладкопечев Б. В., Кострюков В. Ф., Студеникина Ю. И. Определение толщины и фазового состава пленок, синтезированных хемостимулированным термоокисидированием InP под воздействием композиции оксидов V₂O₅+MnO₂ разного состава. *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2014;57(7–2): 186–191. <https://elibrary.ru/item.asp?id=23184836>
64. Третьяков Н. Н., Миттова И. Я., Кострюков В. Ф., Сладкопечев Б. В. Взаимное влияние оксидов-хемостимуляторов V₂O₅ и MnO₂, вводимых через газовую фазу, при их совместном воздействии на термоокисидирование InP. *Журнал общей химии*. 2015;85(4): 547–553. <https://elibrary.ru/item.asp?id=23139937>
65. Миттова И. Я., Кострюков В. Ф., Донкарева И. А., Пенской П. К., Пиняева О. А., Пшестанчик В. Р. Композиция оксидов MnO + MnO₂ как неаддитивный хемостимулятор процесса термоокисидирования GaAs. *Журнал неорганической химии*. 2005;50(1): 19–23. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9141020>
66. Лосев В. Н., Кудрина Ю. В., Трофимчук А. К., Комозин П. Н. Сорбция рутения (III) и рутения (IV) силикагелями, химически модифицированными меркапто- и дисульфидными группами. *Журнал неорганической химии*. 2005;50(4): 640–644. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9139080>
67. Миттова И. Я., Пшестанчик В. Р., Кострюков В. Ф., Донкарева И. А. Пространственная локализация взаимодействий между соединениями-активаторами при хемостимулированном термоокисидировании GaAs. *Доклады Академии наук*. 2002;386(4): 499–501. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44462420>
68. Миттова И. Я., Пшестанчик В. Р., Кострюков В. Ф., Донкарева И. А. Взаимное влияние активаторов при хемостимулированном термоокисидировании GaAs с пространственным разделением связывающих стадий. *Журнал неорганической химии*. 2003;48(4): 559–562. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17278739>
69. Кострюков В. Ф., Пшестанчик В. Р., Донкарева И. А., Агапов Б. Л., Лопатин С. И., Миттова И. Я. Роль твердофазных и газофазных взаимодействий между активаторами в композициях MnO₂ + PbO и MnO₂ + V₂O₅ при их совместном воздействии на термоокисидирование GaAs. *Журнал неорганической химии*. 2007;52(10): 1600–1604. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9552513>
70. Миттова И. Я., Кострюков В. Ф., Пшестанчик В. Р., Донкарева И. А., Агапов Б. Л. Вклад твердофазных взаимодействий между оксидами-активаторами в нелинейный эффект их совместного воздействия на процесс термоокисидирования GaAs. *Журнал неорганической химии*. 2008;53(7): 1099–1104. <https://elibrary.ru/item.asp?id=10345125>
71. Кострюков В. Ф., Донкарева И. А., Пшестанчик В. Р., Агапов Б. Л., Лопатин С. И., Миттова И. Я. Термическое окисление GaAs с участием оксидов-активаторов (MnO + PbO и MnO + V₂O₅) при их пространственном разделении. *Журнал неорганической химии*. 2008;53(8): 1273–1277. <https://elibrary.ru/item.asp?id=11032324>
72. Миттова И. Я., Лопатин С. И., Пшестанчик В. Р., Кострюков В. Ф., Сергеева А. В., Пенской П. К. Роль инертного компонента Ga₂O₃ в композиции с оксидом-активатором Sb₂O₃ в процессе хемостимулированного окисления GaAs. *Журнал неорганической химии*. 2005;50(10): 1599–1602. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9153645>
73. Пенской П. К., Кострюков В. Ф., Пшестанчик В. Р., Миттова И. Я. Эффект совместного воздействия композиций хемостимуляторов (Sb₂O₃, Bi₂O₃, MnO₂) с инертным компонентом (Al₂O₃) в процессе термоокисидирования арсенида галлия. *Доклады Академии наук*. 2007;414(6): 765–767. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9533571>
74. Пенской П. К., Пшестанчик В. Р., Кострюков В. Ф., Кузнецова И. В., Агапов Б. В., Миттова И. Я. Неаддитивная линейность при хемостимулирующем воздействии оксидов-активаторов в композициях с инертным компонентом на процесс термического окисления GaAs. *Журнал неорганической химии*. 2008;53(2): 227–232. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9603940>
75. Пенской П. К., Миттова И. Я., Кострюков В. Ф., Кононова Е. Ю., Реутова Е. А. Влияние инертного компонента Al₂O₃ в композициях с оксидами-активаторами (Sb₂O₃, Bi₂O₃, MnO₂) на процесс термоокисидирования GaAs. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2008;10(3): 236–243. <https://elibrary.ru/item.asp?id=11688570>
76. Пенской П. К., Кострюков В. Ф., Куцев С. В., Кузнецова И. В., Пшестанчик В. Р., Миттова И. Я. Характер влияния инертных компонентов (Y₂O₃, Al₂O₃, Ga₂O₃) на хемостимулирующее действие активатора (Sb₂O₃) термического окисления GaAs. *Журнал неорганической химии*. 2009;54(10): 1639–1645. <https://elibrary.ru/item.asp?id=12902175>

77. Кожевникова Т. В., Пенской П. К., Кострюков В. Ф., Кузнецова И. В., Куцев С. В., Миттова И. Я. Выявление роли инертного компонента в композициях с оксидами марганца (II) и марганца (IV) при исследовании нелинейных эффектов в процессе термического окисления GaAs. *Журнал неорганической химии*. 2010;55(12): 1970–1975. <https://elibrary.ru/item.asp?id=15538516>
78. Кожевникова Т. В., Пенской П. К., Кострюков В. Ф., Миттова И. Я., Агапов Б. Л., Кузнецова И. В., Куцев С. В. Термическое окисление GaAs под воздействием композиций Sb_2O_3 , Bi_2O_3 , MnO , MnO_2 и V_2O_5 с оксидами алюминия и иттрия. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2010;12(3): 212–225. <https://elibrary.ru/item.asp?id=15574165>
79. Пенской П. К., Салиева Е. К., Кострюков В. Ф., Рембеза С. И., Миттова И. Я. Газочувствительность слабелегированных слоев, полученных окислением GaAs в присутствии PbO и Bi_2O_3 . *Вестник ВГУ Серия Химия. Биология. Фармация*. 2008;1: 26–31. <https://elibrary.ru/item.asp?id=11615172>
80. Кострюков В. Ф., Миттова И. Я. Газочувствительность к аммиаку тонких пленок на поверхности GaAs, выращенных под воздействием композиций $PbO+Bi_2O_3$. *Неорганические материалы*. 2015;51(5): 479–484. <https://doi.org/10.7868/S0002337X15040053>
81. Кострюков В. Ф., Миттова И. Я., Димитренко А. А. Хемостимулированный синтез тонких газочувствительных пленок на поверхности GaAs. *Неорганические материалы*. 2017;53(5): 451–456. <https://doi.org/10.7868/S0002337X1705013X>
82. Кострюков В. Ф., Миттова И. Я., Али Сауд. Газочувствительные свойства тонких пленок, полученных методом термоокислительного окисления поверхности монокристаллов InP. *Неорганические материалы*. 2020;56(1): 69–75. <https://doi.org/10.31857/S0002337X20010078>
83. Кострюков В. Ф., Миттова И. Я. Способ прецизионного легирования тонких пленок на поверхности арсенида галлия: *Патент № 2538415 РФ*. Заявл. 17.07.2013. Оpubл. 10.01.2015. Бюл. №2013133382/28 1.
84. Миттова И. Я., Кострюков В. Ф., Сладкопцев Б. В. Способ прецизионного легирования тонких пленок на поверхности InP: *Патент № 2632261 РФ*. Заявл. 17.12.2015. Оpubл. 03.10.2017. Бюл. №28.
85. Сладкопцев Б. В., Томина Е. В., Миттова И. Я., Третьяков Н. Н. Способ создания наноразмерных наноструктурированных оксидных пленок на InP с использованием геля пентаоксида ванадия: *Патент № 2550316 РФ*. Заявл. 30.12.2013. Оpubл. 10.05.2015. Бюл. № 13
86. Томина Е. В., Сладкопцев Б. В., Миттова И. Я., Зеленина Л. С., Донцов А. И., Третьяков Н. Н., Гудкова Ю. Н., Белашкова Ю. А. Воздействие поверхностных наноразмерных слоев V_2O_5 на кинетику термоокислительного окисления GaAs, состав и морфологию выращенных пленок. *Неорганические материалы*. 2015;51(11): 1228–1232. <https://doi.org/10.7868/S0002337X15110123>
87. Миттова И. Я., Томина Е. В., Лапенко А. А., Сладкопцев Б. В. Синтез и каталитические свойства наностростровков V_2O_5 , полученных электровзрывным методом на поверхности кристаллов InP. *Неорганические материалы*. 2010;46(4): 441–446. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13724729>
88. Миттова И. Я., Томина Е. В., Третьяков Н. Н., Сладкопцев Б. В. Зависимость механизма хемостимулирующего действия V_2O_5 от способа введения его в систему при термоокислительном окислении InP. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2013;15(3): 305–311. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20296106>
89. Третьяков Н. Н., Миттова И. Я., Сладкопцев Б. В., Агапов Б. Л., Пелипенко Д. И., Мироненко С. В. Морфология поверхности, состав и структура наноразмерных пленок, выращенных на InP под воздействием V_2O_5 . *Неорганические материалы*. 2015;51(7): 719–725. <https://doi.org/10.7868/S0002337X15070167>
90. Миттова И. Я., Сладкопцев Б. В., Томина Е. В., Самсонов А. А., Третьяков Н. Н., Пономаренко С. В. Синтез диэлектрических пленок термоокислительным методом $MnO_2/GaAs$. *Неорганические материалы*. 2018;54(11): 1149–1156. <https://doi.org/10.1134/S0002337X18110106>
91. Швец В. А., Рыхлицкий С. В., Миттова И. Я., Томина Е. В. Исследование оптических и структурных свойств оксидных пленок на InP методом спектральной эллипсометрии. *Журнал технической физики*. 2013;83(11): 92–99. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20326045>
92. Миттова И. Я., Швец В. А., Томина Е. В., Сладкопцев Б. В., Третьяков Н. Н., Лапенко А. А. Экспресс-контроль толщины и спектрально-эллипсометрическое исследование пленок, полученных термоокислительным методом V_xO_y/InP . *Неорганические материалы*. 2013;49(2): 173–179. <https://doi.org/10.7868/S0002337X13020140>
93. Миттова И. Я., Швец В. А., Томина Е. В., Самсонов А. А., Сладкопцев Б. В., Третьяков Н. Н. Определение толщины и оптических постоянных наноразмерных пленок, выращенных термоокислительным методом InP с магнетронно нанесенными слоями хемостимуляторов V_2O_5 , $V_2O_5 + PbO$, $NiO + PbO$. *Неорганические материалы*. 2013;49(10): 1037–1044. <https://doi.org/10.7868/S0002337X13100072>
94. Кострюков В. Ф., Миттова И. Я., Швец В. А., Томина Е. В., Сладкопцев Б. В., Третьяков Н. Н.

- Спектрально-эллипсомерическое исследование тонких пленок на поверхности GaAs, выращенных методом хемостимулированного термоокисления. *Неорганические материалы*. 2014;50(9): 956–962. <https://doi.org/10.7868/S0002337X1409005X>
95. Сладкопепцев Б. В., Миттова И. Я., Томина Е. В., Заболотская А. В., Самсонов А. А., Донцов А. И. Особенности кинетики и механизма формирования пленок при окислении гетероструктур V_2O_5/InP , сформированных методами реактивного магнетронного распыления и электрического взрыва проводника. *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2014;57(7-2): 148–153. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23184829>
96. Угай Я. А., Самойлов А. М., Сыноров Ю. В., Яценко О. Б., Зуев Д. В. Получение тонких пленок теллурида свинца на кремниевых подложках. *Неорганические материалы*. 1994;30(7): 898–902. <https://elibrary.ru/item.asp?id=35103015>
97. Ugai Y. A., Samoylov A. M., Sharov M. K., Tadeev A. V. Crystal microstructure of PbTe/Si and PbTe/SiO₂/Si thin films. *Thin Solid Films*. 1998;336(1-2): 196–200. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(98\)01278-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(98)01278-4)
98. Угай Я. А., Самойлов А. М., Сыноров Ю. В., Яценко О. Б. Электрофизические свойства тонких пленок PbTe, выращенных на Si-подложках. *Неорганические материалы*. 2000;36(5): 550–555. <https://elibrary.ru/item.asp?id=35113170>
99. Угай Я. А., Самойлов А. М., Шаров М. К., Арсенов А. В., Бучнев С. А. Выращивание пленок PbTe, легированных галлием в процессе их роста, на Si-подложках при помощи модифицированного метода «горячей стенки». *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2002;3: 28–34.
100. Ugai Ya. A., Samoylov A. M., Buchnev S. A., Synorov Yu. V., Sharov M. K. Ga doping of thin PbTe films on Si substrates during growth. *Inorganic Materials*. 2002;38(5): 450–456. <https://doi.org/10.1023/A:1015410703238>
101. Ugai Ya. A., Samoylov A. M., Sharov M. K., Yatsenko O. B., Akimov B. A. Transport properties of Ga-doped PbTe thin films on Si substrates. *Inorganic Materials*. 2002;38(1): 12–16. <https://doi.org/10.1023/A:1013687024227>
102. Samoylov A. M., Buchnev S. A., Khoviv A. M., Dolgopolova E. A., Zlomanov V. P. Comparative study of point defects induced in PbTe thin films doped with Ga by different techniques. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2003;6(5-6): 481–485. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2003.07.014>
103. Samoylov A. M., Khoviv A. M., Buchnev S. A., Synorov Yu. V., Dolgopolova E. A. Crystal structure and electrical parameters of In-doped PbTe/Si films prepared by modified HWE technique. *Journal of Crystal Growth*. 2003;254(1-2): 55–64. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(03\)01022-4](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(03)01022-4)
104. Самойлов А. М., Бучнев С. А., Сыноров Ю. В., Агапов Б. Л., Ховив А. М. Выращивание модифицированным методом «горячей стенки» пленок PbTe, легированных In непосредственно в процессе синтеза. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2004;1: 86–94. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17662304>
105. Самойлов А. М., Бучнев С. А., Долгополова Э. А., Сыноров Ю. В., Ховив А. М. Кристаллическая структура пленок PbTe на Si, легированных индием в процессе роста. *Неорганические материалы*. 2004;40(4): 414–420. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17659146>
106. Долгополова Э. А., Самойлов А. М., Сыноров Ю. В., Ховив А. М. Синтез легированных In пленок PbTe с контролируемым содержанием примесных атомов и отклонением от стехиометрии. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2008;10: 17–22. <https://elibrary.ru/item.asp?id=11533187>
107. Беленко С. В., Долгополова Э. А., Самойлов А. М., Сыноров Ю. В., Шаров М. К. Область растворимости галлия в пленках теллурида свинца, выращенных на кремниевых подложках. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2010;2: 99–108. <https://elibrary.ru/item.asp?id=13044799>
108. Шаров М. К., Яценко О. Б., Самойлов А. М. Электрофизические свойства монокристаллов теллурида свинца, легированного бромом. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2010;7: 77–79. <https://elibrary.ru/item.asp?id=15142184>
109. Samoylov A. M., Agapov B. L., Belenko S. V., Dolgopolova E. A., Khoviv A. M. Electrical properties and mechanisms of the point defect formation in PbTe(In) films prepared by modified “Hot Wall” technique. *Functional Materials*. 2011;18(1): 29–36. <https://elibrary.ru/item.asp?id=18002406>
110. Samoylov A. M., Belenko S. V., Dolgopolova E. A., Khoviv A. M., Synorov Y. V. The solubility region of Ga in PbTe films prepared on Si-substrates by modified “Hot Wall” technique. *Functional Materials*. 2011;18(2): 181–188. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18002278>
111. Samoylov A. M., Belenko S. V., Sharov M. K., Dolgopolova E. A., Zlomanov V. P. The deviation from a stoichiometry and the amphoteric behaviour of Ga in PbTe/Si films. *Journal of Crystal Growth*. 2012;351(1): 149–154. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2012.01.042>
112. Наумов А. В., Самойлов А. М., Лопатин С. И. Термодинамические функции смешения жидкой фазы системы Ga – Pb. *Журнал общей химии*.

2013;83(1): 29–34. <https://elibrary.ru/item.asp?id=18651409>

113. Самойлов А. М., Беленко С. В., Сирадзе Б. А., Тореев А. С., Донцов А. И., Филонова И. В. Плотности дислокаций в пленках PbTe, выращенных на подложках Si (100) и BaF₂ (100) модифицированным методом «горячей стенки». *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2013;15(3): 322–331. <https://elibrary.ru/item.asp?id=20296109>

114. Акимов А. Н., Климов А. Э., Самойлов А. М., Шумский В. Н., Эпов В. С. Зависимость кинетики фототока в пленках Pb_{x-1}Sn_xTe от уровня освещения и времени экспозиции. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2013;15(4): 378–381. <https://elibrary.ru/item.asp?id=20931228>

115. Самойлов А. М., Беленко С. В., Шаров М. К., Лопатин С. И., Сыноров Ю. В. Синтез пленок в системе Ga – Pb с прецизионным контролем количественного состава. *Журнал общей химии*. 2015;85(10): 1609–1619. <https://elibrary.ru/item.asp?id=24226946>

116. Marikutsa A. V., Romyantseva M. N., Gaskov A. M., Samoylov A. M. Nanocrystalline tin dioxide: Basics in relation with gas sensing phenomena. Part I. Physical and chemical properties and sensor signal formation. *Inorganic Materials*. 2015;51(13): 1329–1347. <https://doi.org/10.1134/S002016851513004X>

117. Иевлев В. М., Кущев С. Б., Синельников А. А., Солдатенко С. А., Рябцев С. В., Босых М. А., Самойлов А. М. Структура гетеросистем пленка SnO₂ – островковый конденсат металла (Ag, Au, Pd). *Неорганические материалы*. 2016;52(7): 757–764. <https://doi.org/10.7868/S0002337X1607006X>

118. Рябцев С. В., Шапошник А. В., Самойлов А. М., Синельников А. А., Солдатенко С. А., Кущев С. Б., Иевлев В. М. Тонкие пленки оксида палладия для газовых сенсоров. *Доклады Академии наук, серия Физическая химия*. 2016;470(5): 550–553. <https://doi.org/10.7868/s0869565216290168>

119. Marikutsa A. V., Romyantseva M. N., Gaskov A. M., Samoylov A. M. Nanocrystalline tin dioxide: Basics in relation with gas sensing phenomena. Part II. Active centers and sensor behavior. *Inorganic Materials*. 2016;52(13): 1311–1338. <https://doi.org/10.1134/S0020168516130045>

120. Ievlev V. M., Ryabtsev S. V., Shaposhnik A. V., Samoylov A. M., Kushev S. B., Sinelnikov A. A. Ultrathin films of palladium oxide for oxidizing gases detecting. *Procedia Engineering*. 2016;168: 1106–1109. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.357>

121. Ryabtsev S. V., Ievlev V. M., Samoylov A. M., Kushev S. B., Soldatenko S. A. Microstructure and electrical properties of palladium oxide thin films for oxidizing gases detection. *Thin Solid Films*. 2017;636: 751–759. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.04.009>

122. Samoylov, A. M., Gvarishvili, L. J., Ivkov, S. A., Pelipenko, D. I., Badica, P. Two-stage synthesis of

palladium (II) oxide nanocrystalline powders for gas sensor. *Research & Development in Material Sciences*. 2018;8(2): 1–7. <https://doi.org/10.31031/RDMS.2018.08.000682>

123. Ievlev V. M., Ryabtsev S. V., Samoylov A. M., Shaposhnik A. V., Kushev S. B., Sinelnikov A. A. Thin and ultrathin films of palladium oxide for oxidizing gases detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2018;255(2): 1335–1342. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.08.121>

124. Самойлов А. М., Кузьминых О. Г., Сыноров Ю. В., Ивков С. А., Агапов Б. Л., Белоногов Е. К. Морфология поверхности пленок PbTe/Si (100), синтезированных модифицированным методом «горячей стенки». *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2018;20(1): 102–114. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2018.20/483>

125. Самойлов А. М., Кузьминых О. Г., Сыноров Ю. В., Белоногов Е. К., Беленко С. В., Агапов Б. Л. Кинетика роста и микроструктура пленок PbTe, синтезированных на подложках Si и BaF₂ модифицированным методом «горячей стенки». *Неорганические материалы*. 2018;54(4): 359–369. <https://doi.org/10.7868/S0002337X18040048>

126. Samoylov A. M., Ryabtsev S. V., Popov V. N., Badica P. Palladium (II) oxide nanostructures as promising materials for gas sensors. In book: *Novel Nanomaterials Synthesis and Applications*. Edited by George Kyzas. UK, London: IntechOpen Publishing House; 2018. 211–229 p. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72323>

127. Samoylov A. M., Ryabtsev S. V., Chuvenkova O. A., Ivkov S. S., Sharov M. K., Turishchev S. Yu. Crystal structure and surface phase composition of palladium oxides thin films for gas sensors. In book: *SATF 2018. Science and Applications of Thin Films, Conference & Exhibition. Proceeding Book.: 17 to 21 September 2018*. Turkey: Izmir, Izmir Institute of Technology; 2018. p. 43–56.

128. Самойлов А. М., Ивков С. А., Пелипенко Д. И., Шаров М. К., Цыганова В. О., Агапов Б. Л., Тутов Е. А., Petre Badica. Трансформация кристаллической структуры наноразмерных пленок палладия в процессе термического оксидирования. *Неорганические материалы*. 2020;56(10): 1074–1080. <https://doi.org/10.31857/S0002337X20100139>

129. Самойлов А. М., Пелипенко Д. И., Кураленко Н. С. Расчет области нестехиометрии нанокристаллических пленок оксида палладия (II). *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021;23(1): 62–72. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3305>

130. Пономарева Н. И., Попрыгина Т. Д., Лесовой М. В., Карпов С. И. Влияние ализаринового красного С на рост кристаллов гидроксиапатита. *Журнал общей химии*. 2008;78(4): 538–543. <https://elibrary.ru/item.asp?id=11517706>

131. Пономарева Н. И., Попрыгина Т. Д., Карпов С. И., Лесовой М. В., Агапов Б. Л. Микроэмульсионный способ получения гидроксипатита. *Журнал общей химии*. 2010;80(5): 735–738.
132. Пономарева Н. И., Попрыгина Т. Д., Лесовой М. В., Карпов С. И., Агапов Б. Л. Исследование композитов гидроксипатита с биополимерами. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2009;11(3): 239–243. <https://elibrary.ru/item.asp?id=12971539>
133. Пономарева Н. И., Попрыгина Т. Д., Лесовой М. В., Соколов Ю. В., Агапов Б. Л. Кристаллическая структура и состав биокомпозитов гидроксипатита, полученных при избытке иона кальция. *Журнал общей химии*. 2009;79(2): 198–202. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17824980>
134. Пономарева Н. И., Попрыгина Т. Д., Карпов С. И., Соколов Ю. В. Исследование микротвердости композитов гидроксипатита с биополимерами. *Вестник ВГУ, Серия «Химия. Биология. Фармация»*. 2012;2: 45–50.
135. Пономарева Н. И., Попрыгина Т. Д., Лесовой М. В., Соколов Ю. В. Влияние примесей железа на получение и характеристики апатитовых покрытий титановых имплантантов. *Системный анализ и управление в биомедицинских системах*. 2010;9(2) 448–451. <https://elibrary.ru/item.asp?id=14749925>
136. Пономарева Н. И., Попрыгина Т. Д. Получение кальцидных и апатитовых покрытий на титане. *Журнал неорганической химии*. 2011;56(11): 1–4. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17057414>
137. Пономарева Н. И., Попрыгина Т. Д. Способ нанесения покрытий на изделия из титана: *Патент № 2453630 РФ*. Заявл. 11.01.2011. Опубл. 20.06.2012. Бюл. №17.
138. Пономарева Н. И., Попрыгина Т. Д., Солдатенко С. А. Исследование резорбируемости гидроксипатита в составе импрегнированных углеродистых имплантантов. *Журнал общей химии*. 2012;82(9): 1412–1416. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17951874>
139. Пономарева Н. И., Попрыгина Т. Д., Карпов С. И., Самодай В. Г. Влияние ионов марганца на синтез и характеристики гидроксипатита в составе импрегнированных углеродистых имплантантов. *Апробация*. 2013;5(8): 21–23. <https://elibrary.ru/item.asp?id=23216891>
140. Xu C., Yang Y., Wang S., Duan W., Gu B., Bellaiche L. Anomalous properties of hexagonal rare-earth ferrites from first principles. *Physical Review B*. 2014;89(20): 205122. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.89.205122>
141. Mahalakshmi S., SrinivasaManja K., Nithyanantham S. Electrical properties of nanophase ferrites doped with Rare Earth Ions. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 2014;27(9): 2083–2088. <https://doi.org/10.1007/s10948-014-2551-y>
142. Фахльман Б. *Химия новых материалов и нанотехнологии*. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект»; 2011. 463 с.
143. Гусев А. И. *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии*. М.: Физматлит; 2005. 416 с.
144. Maiti R. Basu S., Chakravorty D. Synthesis of nanocrystalline YFeO₃ and its magnetic properties. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2009;321(19): 3274–3277. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2009.05.061>
145. Kolb E. D. The hydrothermal growth of rare earth orthoferrites. *Journal of Applied Physics*. 1968;39(2): 1362–1364. <https://doi.org/10.1063/1.1656305>
146. Cheng Z. X., Shen H., Xu J., Liu P., Zhang S. J., Wang J. L., Wang X. L., Dou S. X. Magnetocapacitance effect in nonmultiferroic YFeO₃ single crystal. *Journal of Applied Physics*. 2012;111(3): 34103.1–5. <https://doi.org/10.1063/1.3681294>
147. Racu A. V., Ursu D. H., Kuliukova O. V., Logofatu C., Leca A., Miclau M. Direct low temperature hydrothermal synthesis of YFeO₃ microcrystals. *Materials Letters*. 2015;140(1): 107–110. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.10.129>
148. Duan L., Jiang G.-J., Peng W., Cheng M., Wang X.-J. Influence of reaction conditions on the phase composition, particle size and magnetic properties of YFeO₃ microcrystals synthesized by hydrothermal method. *Journal of Synthetic Crystals*. 2015;44(8): 2144–2149.
149. Popkov V. I., Almjasheva O. V. Formation mechanism of YFeO₃ nanoparticles under the hydrothermal condition. *Nanosystems: physics, chemistry, mathematics*. 2014;5(5): 703–708. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22415667>
150. Tang P., Sun H., Chen H., Cao F. Hydrothermal processing-assisted synthesis of nanocrystalline YFeO₃ and its visible-light photocatalytic activity. *Current Nanoscience*. 2012;8(1): 64–67. <https://doi.org/10.2174/1573413711208010064>
151. Попков В. И., Альмяшева О. В., Гусаров В. В. Исследование возможностей управления структурой нанокристаллического ортоферрита иттрия при его получении из аморфных порошков. *Журнал прикладной химии*. 2014;87(10): 1416–1420. <https://elibrary.ru/item.asp?id=43059374>
152. Попков В. И., Альмяшева О. В. Формирование нанопорошков ортоферрита иттрия YFeO₃ в условиях глицин-нитратного горения. *Журнал прикладной химии*. 2014;87(2): 185–189. <https://elibrary.ru/item.asp?id=42837771>
153. Mathur S., Veith M., Rapalaviciute R., Shen H., Goya G. F., Martins Filho W. L., Berquo T. S. Berquo Molecule derived synthesis of nanocrystalline YFeO₃

- and investigations on its weak ferromagnetic behavior. *Chemistry of Materials*. 2004;16(10): 1906–1913. <https://doi.org/10.1021/cm0311729>
154. Tret'yakov Yu. D. Development of inorganic chemistry as a fundamental for the design of new generations of functional materials. *Russian Chemical Reviews*. 2004;73(9): 831–846. <https://doi.org/10.1070/RC2004v073n09ABEH000914>
155. Niepce C. J., Stuerger D., Caillot T., Clerk J.P., Granovsky A., Inoue M., Perov N., Pourroy G. The magnetic properties of magnetic nanoparticles produced by microwave flash synthesis of ferrous alcoholic solutions. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2002;38(51): 2622–2624. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2002.801963>
156. Zou J., Gong W., Ma J., Li L., Jiang J. Efficient catalytic activity BiFeO₃ nanoparticles prepared by novel microwave-assisted synthesis. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2015;15(2): 1304–1311. <https://doi.org/10.1166/jnn.2015.9074>
157. Томина Е.В., Перов Н. С., Миттова И. Я., Алехина Ю. А., Стеклёнова О. В., Куркин Н. А. Микроволновый синтез и магнитные свойства нанопорошка феррита висмута, допированного кобальтом. *Известия Академии наук. Серия химическая*. 2020;5: 941–946. <https://doi.org/10.1007/s11172-020-2852-1>
158. Томина Е. В., Даринский Б. М., Миттова И. Я., Чуркин В. Д., Бойков Н. И., Иванова О. В. Синтез нанокристаллов YCo_xFe_{1-x}O₃ под воздействием микроволнового излучения. *Неорганические материалы*. 2019;55(4): 421–425. <https://doi.org/10.1134/S0002337X19040158>
159. Динь В. Т., Миттова В. О., Миттова И. Я. Влияние содержания лантана и температуры отжига на размер и магнитные свойства нанокристаллов Y_{1-x}La_xFeO₃, полученных золь-гель методом. *Неорганические материалы*. 2011;47(5): 590–595. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16339649>
160. Нгуен А. Т., Миттова И. Я., Солодухин Д. О., Альмяшева О. В., Миттова В. О., Демидова С. Ю. Золь-гель формирование и свойства нанокристаллов твердых растворов Y_{1-x}Ca_xFeO₃. *Журнал неорганической химии*. 2014;59(2): 166–171. <https://doi.org/10.7868/S0044457X14020159>
161. Динь В. Т., Миттова В. О., Альмяшева О. В., Миттова И. Я. Синтез и магнитные свойства нанокристаллического Y_{1-x}Cd_xFeO_{3-δ} (0 ≤ x ≤ 0.2). *Неорганические материалы*. 2011;47(10): 1251–1256. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16893013>
162. Нгуен А. Т. Синтез, структура и свойства нанопорошков La(Y)_{1-x}Sr(Ca)_xFeO₃ (x = 0.0; 0.1; 0.2; 0.3). *Дисс. ... канд. хим. наук / Воронеж: Воронежский государственный университет; 2009. 153 с. Режим доступа: https://www.dissercat.com/content/sintez-struktura-i-svoistva-nanoporoshkov-lay1-xsrcaxfeo3-x-00-01-02-03*
163. Полежаева О. С., Долгополова Е. А., Баранчиков А. Е., Иванов В. К., Третьяков Ю. Д. Синтез нанокристаллических твердых растворов на основе диоксида церия, допированного РЗЭ. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2010;12(2): 154–159. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15176050>
164. Бацанов С. С. *Структурная химия. Факты и зависимости*. М.: Диалог – МГУ; 2000. 292 с.
165. Бережная М. В., Альмяшева О. В., Миттова В. О., Нгуен А. Т., Миттова И. Я. Синтез золь-гель методом и свойства нанокристаллов Y_{1-x}Ba_xFeO₃. *Журнал общей химии*. 2018;88(4): 539–544. <https://doi.org/10.1134/S1070363218060464>
166. Бережная М. В., Миттова И. Я., Перов Н. С., Альмяшева О. В., Нгуен А. Т., Миттова В. О., Бессалова В. В., Вирютина Е. Л. Формирование нанопорошков феррита иттрия, допированного цинком, золь-гель методом. *Журнал неорганической химии*. 2018;63(6): 706–711. <https://doi.org/10.1134/S0036023618060049>
167. Миттова И. Я., Солодухин Д. О., Миттова В. О., Демидова С. Ю., Кнурова М. В. Способ получения нанокристаллического магнитного порошка допированного ортоферрита иттрия. *Патент №2574558 РФ*. Заявл. 04.12.2013. Опубл. 10.02.2016. Бюл. №4.
168. Нгуен А. Т., Миттова В. О., Миттова И. Я., Динь В. Т. Синтез нанопорошков La_{1-x}Sr(Ca)_xFeO₃ (x = 0; 0.1; 0.2; 0.3) золь-гель методом. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2010;12(1): 56–60. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15164382>
169. Бережная М. В., Перов Н. С., Альмяшева О. В., Миттова В. О., Нгуен А. Т., Миттова И. Я., Дружинина Л. В., Алехина Ю. А. Синтез и магнитные свойства нанокристаллического ортоферрита лантана допированного барием. *Журнал общей химии*. 2019;89(3): 458–463. <https://doi.org/10.1134/S00444460X19030193>
170. Кнурова М. В., Миттова И. Я., Перов Н. С., Альмяшева О. В., Нгуен А. Т., Миттова В. О., Бессалова В. В., Вирютина Е. Л. Влияние степени допирования на размер и магнитные свойства нанокристаллов La_{1-x}Zn_xFeO₃, синтезированных золь-гель методом. *Журнал неорганической химии*. 2017;62(3): 275–282. <https://doi.org/10.7868/S0044457X17030084>
171. Lin Q., Xu J., Yang F., Yang X., He Y. The influence of Ca substitution on LaFeO₃ nanoparticles in terms of structural and magnetic properties. *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*. 2018;16(1S): 17–25. <https://doi.org/10.1177/2280800017753948>

172. Белов К. П. *Магнитострикционные явления и их технические приложения*. М.: Наука; 1987. 160 с.
173. Mukhopadhyay K., Mahapatra A. S., Chakrabarti P. K. Multiferroic behavior, enhanced magnetization and exchange bias effect of Zn substituted nanocrystalline LaFeO_3 ($\text{La}_{1-x}\text{Zn}_x\text{FeO}_3$, $x=0.10$, and 0.30). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2013;329: 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2012.09.063>
174. Mukhopadhyay K., Mahapatra A. S., Chakrabarti P. K. Enhanced magneto-electric property and exchange bias effect of Zn substituted LaFeO_3 ($\text{La}_{0.50}\text{Zn}_{0.50}\text{FeO}_3$). *Materials Letters*. 2015;159: 9–11. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.06.059>
175. Bhat I., Husain S., Khan W. Structural and Dielectric Properties of $\text{LaFe}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 0.3$). *AIP Conference Proceedings*. 2013;1512: 968–969. <https://doi.org/10.1063/1.4791364>
176. Bhat I., Husain S., Khan W., Patil S. I. Effect of Zn doping on structural, magnetic and dielectric properties of LaFeO_3 synthesized through sol-gel auto-combustion process. *Materials Research Bulletin*. 2013;48(11): 4506–4512. <https://doi.org/10.1016/j.materbull.2013.07.028>
177. Альмяшева О. В., Смирнов А. В., Федоров Б. А., Томкович М. В., Гусаров В. В. Особенности строения наночастиц переменного состава со структурой типа флюорита, сформированных в гидротермальных условиях на основе систем ZrO_2 - Y_2O_3 и ZrO_2 - Gd_2O_3 . *Журнал общей химии*. 2014;84(5): 711–716. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21456359>
178. Tugova E. A., Gusarov V. V. Structure peculiarities of nanocrystalline solid solutions in GdAlO_3 – GdFeO_3 system. *Nanosystems: physics, chemistry, mathematics*. 2013;4(3): 352–356. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19412861>
179. Маренкин С. Ф., Изотов А. Д., Федорченко И. В., Новоторцев В. М. Синтез магнитогранулированных структур в системах полупроводник-ферромагнетик. *Журнал неорганической химии*. 2015;60(3): 343–348. <https://doi.org/10.7868/S0044457X15030149>
180. Gupta A. K., Gupta M. Synthesis and surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications. *Biomaterials*. 2005;26(18): 3995–4021. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.10.012>
181. Shen H., Xu J., Jin M., Jiang G. Influence of manganese on the structure and magnetic properties of YFeO_3 nanocrystal. *Ceramics International*. 2012;38(2): 1473–1477. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.09.030>
182. Ma Y., Wu Y. J., Lin Y. Q., Chen X. M. Microstructures and multiferroic properties of $\text{YFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ ceramics prepared by spark plasma sintering. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2010;21(8): 838–843. <https://doi.org/10.1007/s10854-009-0004-3>
183. Nguyen T. A., Pham V. N. T., Le H. T., Chau D. H., Mittova V. O., Tr Nguyen L. T., Dinh D. A., Hao T. V. N., Mittova I. Ya. Crystal structure and magnetic properties of $\text{LaFe}_{1-x}\text{Ni}_x\text{O}_3$ nanomaterials prepared via a simple co-precipitation method. *Ceramics International*. 2019;45(17): 21768–21772. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.07.178>
184. Nguyen A. T., Pham V., Chau D. H., Mittova V. O., Mittova I. Ya., Kopeychenko E. I., Nguyen L. T. Tr., Bui V. X., Nguyen A. T. P. Effect of Ni substitution on phase transition, crystal structure and magnetic properties of nanostructured YFeO_3 perovskite. *Journal of Molecular Structure*. 2020;1215: 12829. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.128293>
185. Nguyen A. T., Pham V. N. T., Nguyen T. T. L., Mittova V. O., Vo Q. M., Berezhnaya M. V., Mittova I. Ya., Do Tr. H., Chau H. D. Crystal structure and magnetic properties of perovskite $\text{YFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ nanopowders synthesized by co-precipitation method. *Solid State Sciences*. 2019;96: 105922. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2019.06.011>
186. Копейченко Е. И., Миттова И. Я., Петров Н. С., Нгуен А. Т., Миттова В. О., Алехина Ю. А., Фам В. Синтез, состав и магнитные свойства нанопорошков феррита лантана, допированного кадмием. *Неорганические материалы*. 2021;57(4): 388–392. <https://doi.org/10.31857/S0002337X21040072>
187. Нгуен А. Т., Бережная М. В., Фам Л. Т., Миттова В. О., Во К. М., Нгуен Т. Ч. Л., До Ч. Х., Миттова И. Я., Вирютина Е. Л. Синтез и магнитные характеристики нанопорошков феррита неодима со структурой перовскита. *Журнал прикладной химии*. 2019;92(4): 458–464. <https://doi.org/10.1134/S00444461819040054>
188. Nguyen T. A., Pham V., Pham T. L., Nguyen L. T. T., Mittova I. Ya., Mittova V. O., Lan N. V., Nguyen B. T. T., Bui V. X., Viryutina E. L. Simple synthesis of NdFeO_3 nanoparticles by the co-precipitation method based on a study of thermal behaviors of Fe (III) and Nd (III) hydroxides. *Crystals*. 2020;10(3): 219. <https://doi.org/10.3390/cryst10030219>
189. Nguyen A. T., Nguyen V. Y., Mittova I. Ya., Mittova V. O., Viryutina E. L., Hoang C. Ch. T., Nguyen Tr. L. T., Bui X. V., Do T. H. Synthesis and magnetic properties of PrFeO_3 nanopowders by the co-precipitation method using ethanol. *Nanosystems: physics, chemistry, mathematics*. 2020;11(4): 463–473. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2020-11-4-468-473>
190. Nguyen A. T., Tran H. L. T., Nguyen Ph. U. T., Mittova I. Ya., Mittova V. O., Viryutina E. L., Nguyen V. H., Bui X. V., Nguyen T. L. Sol-gel synthesis

and the investigation of the properties of nanocrystalline holmium orthoferrite. *Nanosystems: physics, chemistry, mathematics*. 2020;11(6): 698–704. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2020-11-6-698-704>

191. Nguyen A. T., Nguyen T. D., Mittova V. O., Berezhnaya M. V., Mittova I. Ya. Phase composition and magnetic properties of $Ni_{1-x}Co_xFe_2O_4$ nanocrystals with spinel structure, synthesized by co-precipitation. *Nanosystems: physics, chemistry, mathematics*. 2017;8(3): 371–377. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2017-8-3-371-377>

192. Nguyen T. A., Nguyen L. T. Tr., Bui V. X., Nguyen D. H. T., Lieu H. D., Le L. M. T., Pham V. Optical and magnetic properties of $HoFeO_3$ nanocrystals prepared by a simple co-precipitation method using ethanol. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;834: 155098. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155098>

Информация об авторах

Миттова Ирина Яковлевна, д. х. н., профессор, профессор кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: imittova@mail.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6919-1683>.

Сладкопевцев Борис Владимирович, к. х. н., доцент кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: dp-kmins@yandex.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0372-1941>.

Миттова Валентина Олеговна, к. б. н., доцент кафедры биохимии Воронежского государственного медицинского университета имени Н. Н. Бурденко Министерства здравоохранения Российской Федерации, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: vmittova@mail.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9844-8684>.

Поступила в редакцию 22.06.2021; одобрена после рецензирования 15.07.2021; принята к публикации 15.08.2021; опубликована онлайн 25.09.2021.