

## **Заключение диссертационного совета МГУ.014.8**

**по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук**

Решение диссертационного совета от «10» февраля 2023 г. № 133

О присуждении Леонтьеву Алексею Павловичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата химических наук.

Диссертация «Темплатное электроосаждение массивов металлических наностержней для задач фотоники» по специальностям 1.4.15 – «Химия твердого тела» и 1.4.6 – «Электрохимия» принята к защите диссертационным советом «09» декабря 2022 г., протокол № 129.

Соискатель Леонтьев Алексей Павлович, 1994 года рождения, в 2018 году с отличием окончил магистратуру факультета наук о материалах Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования (ФГБОУ ВО) «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» по специальности «Химия, физика и механика материалов». В 2022 году Леонтьев А.П. окончил очную аспирантуру факультета наук о материалах ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» по направлению «Химические науки». С октября 2020 г. по сентябрь 2022 г. работал в должности младшего научного сотрудника химического факультета МГУ, а с октября 2022 г. по настоящее время работает в должности инженера-исследователя на факультете наук о материалах МГУ.

Диссертация выполнена на кафедре электрохимии химического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова».

Научный руководитель:

**Напольский Кирилл Сергеевич** – кандидат химических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени

М.В. Ломоносова», химический факультет, ведущий научный сотрудник кафедры неорганической химии.

Официальные оппоненты:

**Волгин Владимир Мирович** – доктор технических наук, профессор, Тульский государственный университет, политехнический институт, кафедра электро- и нанотехнологии, ведущий научный сотрудник лаборатории химии композиционных и углеродных материалов,

**Козюхин Сергей Александрович** – доктор химических наук, доцент, ИОНХ РАН имени Н.С. Курнакова, главный научный сотрудник лаборатории химии координационных полиядерных соединений,

**Дронов Алексей Алексеевич** – кандидат технических наук, НИУ МИЭТ, доцент Института перспективных материалов и технологий дали положительные отзывы на диссертацию.

Соискатель имеет 28 статей, в том числе по теме диссертации 11 статей, все 11 опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальностям 1.4.15 – «Химия твердого тела» и 1.4.6 – «Электрохимия».

1. **Леонтьев А.П., Напольский К.С.** Численное моделирование вольтамперограмм и хроноамперограмм для модифицированного пористой плёнкой электрода // Электрохимия, 2022, Т. 58, С. 508 – 518. DOI: 10.31857/S0424857022090109. **Импакт-фактор РИНЦ: 0,690 (60%).**
2. Мальшева И.В., Сотничук С.В., **Леонтьев А.П., Напольский К.С., Колмычек И.А.** Магнитооптические эффекты в композитных гиперболических метаматериалах // Физика твердого тела, 2022, Т. 64, С. 1424 – 1428. DOI: 10.21883/FTT.2022.10.53084.34НН. **Импакт-фактор РИНЦ: 0,907 (10%).**

3. **Leontiev A.P.**, Napolskii K.S. Probing barrier oxide layer of porous anodic alumina by in situ electrochemical impedance spectroscopy // Journal of The Electrochemical Society, 2021, V. 168, 071511. DOI: 10.1149/1945-7111/ac131e. **Импакт-фактор Web of Science: 4,371 (60%).**
4. Колмычек И.А., Малышева И.В., Новиков В.Б., Майдыковский А.И., **Леонтьев А.П.**, Напольский К.С., Мурзина Т.В. Оптические свойства гиперболических метаматериалов (Миниобзор) // Письма в "Журнал экспериментальной и теоретической физики", 2021, Т. 114, С. 727 – 739. DOI 10.31857/S1234567821230026. **Импакт-фактор РИНЦ: 0,464 (10%).**
5. Malysheva I.V., Kolmychek I.A., Romashkina A.M., **Leontiev A.P.**, Napolskii K.S., Murzina T.V. Magneto-optical effects in hyperbolic metamaterials based on ordered arrays of bisegmented gold/nickel nanorods // Nanotechnology, 2021, V. 32, P. 305710, DOI 10.1088/1361-6528/abf691. **Импакт-фактор Web of Science: 3,953 (15%).**
6. Kolmychek I.A., Pomozov A.R., **Leontiev A.P.**, Napolskii K.S., Murzina T.V. Magneto-Optical Effects in Au/Ni Based Composite Hyperbolic Metamaterials // Physics of Metals and Metallography, 2019, V. 120, P. 1266 – 1269, DOI 10.1134/S0031918X19130131. **Импакт-фактор Web of Science: 1,319 (10%).**
7. Kolmychek I.A., Pomozov A.R., Novikov V.B., **Leontiev A.P.**, Napolskii, K.S. Murzina T.V. Anomalous birefringence and enhanced magneto-optical effects in hyperbolic metamaterials based on nanorod arrays // Optics Express, 2019, V. 27, P. 32069 – 32074, DOI 10.1364/OE.27.032069. **Импакт-фактор Web of Science: 3,833 (10%).**
8. **Leontiev A.P.**, Roslyakov I.V., Napolskii K.S. Complex influence of temperature on oxalic acid anodizing of aluminium// Electrochimica Acta, 2019, V. 319, P. 88 – 94, DOI 10.1016/j.electacta.2019.06.111. **Импакт-фактор Web of Science: 7,336 (60%).**

9. **Leontiev A.P.**, Volkova O.Yu, Kolmychek I.A., Venets A.V., Pomozov A.R., Stolyarov V.S., Murzina T.V., Napolskii K.S. Tuning the Optical Properties of Hyperbolic Metamaterials by Controlling the Volume Fraction of Metallic Nanorods // *Nanomaterials*, 2019, V. 9, P. 739 – 749, DOI 10.3390/nano9050739. **Импакт-фактор Web of Science: 5,719 (30%).**
10. Kolmychek I.A., Pomozov A.R., **Leontiev A.P.**, Napolskii K.S., Murzina T.V. Magneto-optical effects in hyperbolic metamaterials // *Optics Letters*, 2018, V. 43, P. 3917 – 3920, DOI 10.1364/OL.43.003917. **Импакт-фактор Web of Science: 3,560 (15%).**
11. Помозов А.Р., Колмычек И.А., Ганьшина Е.А., Волкова О.Ю., **Леонтьев А.П.**, Напольский К.С., Мурзина Т.В. Оптические эффекты в магнитных гиперболических метаматериалах // *Физика Твёрдого Тела*, 2018, Т. 60, С. 2224 – 2228, DOI 10.21883/ФТТ.2018.11.46667.09NN. **Импакт-фактор РИНЦ: 0,907 (10%).**

На автореферат диссертации поступило пять дополнительных отзывов, все положительные.

Выбор официальных оппонентов обосновывался их высокой квалификацией и опытом научной работы в областях химии твёрдого тела и электрохимии, что подтверждается наличием публикаций в высокорейтинговых журналах. Волгин Владимир Мирович является автором ряда публикаций по теме темплатного электроосаждения нанонитей. Козюхин Сергей Александрович имеет большой опыт получения и исследования наноматериалов, перспективных для использования в области фотоники. Дронов Алексей Алексеевич является специалистом в области плёнок анодных оксидов алюминия и титана. Большая часть публикаций официальных оппонентов близка по своей направленности к теме рассмотренной диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что представленная диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук является научно-

квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований:

1. Впервые методом спектроскопии электрохимического импеданса *in situ* изучена эволюция границы раздела металл/оксид/электролит на начальных стадиях роста пористой плёнки анодного оксида алюминия.
2. Установлены основные закономерности влияния температуры электролита и толщины оксидной плёнки на морфологию пористой структуры анодного оксида алюминия.
3. С помощью компьютерного моделирования определены требования к нанокompозитам на основе анодного оксида алюминия для использования в качестве гиперболических метаматериалов. Разработаны эффективные методики подготовки темплатов для получения нанокompозитов с заданной объёмной долей металла методом темплатного электроосаждения. На основе результатов компьютерного моделирования темплатного электроосаждения разработана неразрушающая электрохимическая методика определения геометрической площади поверхности электрода, на которой происходит рост наностержней, что позволяет более точно управлять их длиной посредством ограничения протекшего электрического заряда. Результаты использования предложенного метода удовлетворительно согласуются с данными растровой электронной микроскопии.
4. Впервые на основе массива наностержней переменной длины получен градиентный гиперболический метаматериал, который позволяет в зависимости от задачи и длины волны падающего излучения в широком диапазоне настраивать положение полосы плазмонного резонанса, перемещая зондирующий пучок света по поверхности образца.

**Практическая значимость** работы Леонтьева А.П. заключается в разработке эффективной методики получения гиперболических

метаматериалов на основе массивов металлических наностержней в темплатах из анодного оксида алюминия. Разработан подход компьютерного моделирования, упрощающий воспроизводимое получение образцов нанокompозитов с заданными составом и структурой. Экспериментально изучены оптические, магнитооптические и нелинейно-оптические свойства новых гиперболических метаматериалов, обладающих потенциалом практического применения в нанофотонике, в частности при производстве сверхтонких поляризаторов света с настраиваемым непосредственно в процессе использования рабочим диапазоном.

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

1. Морфология барьерного слоя, находящегося на интерфейсе металл – пористый слой оксида, не изменяется после завершения анодной поляризации электрода; локальный максимум тока в процессе первой стадии анодирования обусловлен максимальной площадью электроактивной поверхности алюминия при перестройке пористой структуры. Увеличение температуры электролита в ходе анодирования алюминия при постоянном напряжении в кинетическом режиме приводит к росту доли диффузионного тока и, при одинаковой толщине формирующихся плёнок, уменьшает степень упорядочения пористой структуры.
3. Увеличение напряжения анодирования в процессе формирования анодного оксида алюминия позволяет контролируемо изменять соотношение доступных и недоступных для электролита пор и тем самым задавать долю металлического компонента в нанокompозитах на основе таких темплатов.
4. Использование ионного травления барьерного слоя в вакууме для подготовки темплатов приводит к воспроизводимому получению

- анодного оксида алюминия с минимально возможной пористостью.
5. Хроноамперограммы электроосаждения линейризуются в координатах обратного квадрата тока от времени. Угловой коэффициент не зависит от потенциала осаждения и определяется геометрической площадью поверхности электрода доступной для электроосаждения. Это позволяет использовать хроноамперометрию *in situ* в качестве неразрушающего метода для корректировки заряда осаждения, необходимого для получения массива наностержней заданной длины.
  6. Зёрнистая структура осаждаемых в порах темплата наностержней эволюционирует при электроосаждении, что проявляется в существенном росте размеров кристаллитов, длина которых к концу процесса существенно превышает диаметр пор темплата.
  7. Использование нанокompозитов на основе анодного оксида алюминия, содержащих ферромагнитный компонент в виде дополнительного сегмента наностержней или сплошного слоя на поверхности, позволяет контролировать положение точки нулевого значения диэлектрической проницаемости с помощью внешнего магнитного поля.
  8. Приложение латеральной разности потенциалов при темплатном электроосаждении позволяет формировать массив металлических наностержней переменной длины и создавать градиентный гиперболический метаматериал на основе нанокompозита металл – анодный оксид алюминия, оптические свойства которого можно контролируемо настраивать в широком диапазоне непосредственно при использовании материала.

На заседании 10 февраля 2023 г. диссертационный совет принял решение присудить Леонтьеву А.П. ученую степень кандидата химических наук по специальностям 1.4.15 – «Химия твердого тела» и 1.4.6 – «Электрохимия».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в

количестве 23 человек, из них 10 докторов наук по специальности 1.4.15 – «Химия твёрдого тела» и 4 доктора наук по специальности 1.4.6 – «Электрохимия», участвовавших в заседании, из 33 человек, входящих в состав совета (дополнительно введены на разовую защиту 4 человека), проголосовали: за 23, против нет, недействительных бюллетеней нет.

Заместитель председателя

диссертационного совета МГУ.014.8

д.х.н., проф., член-корр. РАН

Шевельков А.В.

Ученый секретарь

диссертационного совета МГУ.014.8

к.х.н.

Еремина Е.А.