

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.392.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»,
МИНОБРНАУКИ РОССИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 10 октября 2025 г. № 58

О присуждении **Соломатину Максиму Андреевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Высококчувствительные и высокоселективные газоаналитические однокристалльные мультисенсорные линейки на основе наноразмерных оксидных материалов» по специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств принята к защите 27 мая 2025 г. (протокол заседания № 54) диссертационным советом 24.2.392.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», Минобрнауки России, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, приказ Минобрнауки России о создании диссертационного совета от 15.02.2013 №75/нк; приказы об изменении состава совета от 15.12.2015 № 1598/нк-9, от 28.09.2016 № 1180/нк-52, от 15.02.2017 № 116/нк-38, от 26.01.2018 № 92/нк50, от 17.04.2018 № 431/нк-26, от 23.11.2018 № 301/нк-66, от 24.09.2019 №873/нк-26; приказ об установлении полномочий совета от 03.06.2021 № 561-нк (Приложение 1/597); приказы об изменении состава совета от 15.10.2021 № 1046/нк-33, от 23.05.2023 №1131/нк-39 и от 25.09.2024 № 889/нк-43.

Соискатель Соломатин Максим Андреевич, 25 сентября 1994 г. рождения, в 2018 году окончил ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (ФГБОУ ВО «СГТУ имени Гагарина Ю.А.») с присвоением квалификации магистра по направлению 16.04.01 «Техническая физика». В 2022 г. освоил программу подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре ФГБОУ ВО «СГТУ имени Гагарина Ю.А.» Минобрнауки России по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия», направленность «Физика конденсированного состояния».

Соискатель работает научным сотрудником научно-исследовательской лаборатории сенсоров и микросистем и ассистентом кафедры «Физика» ФГБОУ ВО «СГТУ имени Гагарина Ю.А.».

Диссертация выполнена на кафедре «Физика» ФГБОУ ВО «СГТУ имени Гагарина Ю.А.».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Физика» ФГБОУ ВО «СГТУ имени Гагарина Ю.А.» Сысоев Виктор Владимирович.

Официальные оппоненты:

Рябцев Станислав Викторович, доктор физико-математических наук (01.04.10), ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, научно-исследовательский институт физики, директор;

Самотаев Николай Николаевич, кандидат технических наук (05.27.01 и 05.13.05), ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, кафедра микро- и наноэлектроники института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике, доцент,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет “Московский институт электронной техники”», г. Москва, г. Зеленоград, в своем положительном отзыве, подписанном Цариком Константином Анатольевичем, кандидатом технических наук (05.27.01), директором научно-образовательного центра «Зондовая микроскопия и нанотехнология», указала, что тема диссертационной работы Соломатина М.А., заключающаяся в изучении газоаналитических мультисенсорных линеек хеморезистивного типа, изготовленных на одном кристалле, является актуальной как с фундаментальной, так и с практической точки зрения и соответствует основным тенденциям развития элементной базы микро- и наноэлектроники. Работа изложена стилистически грамотно, содержит оригинальные результаты, обладающие научной новизной, научно-практической значимостью, связанной с формированием газоаналитических однокристалльных мультисенсорных линеек с низким энергопотреблением для селективного детектирования летучих органических соединений. Диссертация соответствует пунктам 1, 4, 5 паспорта специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств и удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор, Соломатин Максим Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

Выбор официальных оппонентов обосновывается близким соответствием проводимых ими исследований теме диссертации, их высокой квалификацией в области твердотельной электроники, связанной с разработкой газовых сенсоров и мультисенсорных линеек и изучению металло-оксидных газочувствительных материалов, признанными достижениями среди специалистов, что позволяет им оценить научную и практическую значимость диссертационной работы, Выбор официальных оппонентов объясняется, кроме того, отсутствием совместных печатных работ с соискателем. Выбор ведущей организации обосновывается её высоким авторитетом среди научно-исследовательских организаций, эффективно работающих над решением актуальных задач твердотельной электроники, а также отсутствием договорных отношений с соискателем. Выбор официальных оппонентов и ведущей организации удовлетворяет критериям, сформулированным в пп. 22 и 24 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.

Соискатель имеет 39 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 23 работы, из них в рецензируемых научных изданиях – 5 работ, в том числе 4 – в изданиях, индексируемых международными базами данных и системами научного цитирования Web of Science и/или Scopus. Список публикаций также включает 7 работ в сборниках трудов всероссийских конференций, 6 патентов РФ на изобретения и 5 патентов Евразийской патентной организации на изобретения.

Наиболее значительные научные работы по теме диссертации:

1. Fedorov F.S, **Solomatin M.A.**, Uhlemann M., Oswald S., Kolosov D.A., Morozov A., Varezchnikov A.S., Ivanov M.A., Grebenko A.K., Sommer M., Glukhova O.E., Nasibulin A.G., Sysoev V.V. Quasi-2D Co₃O₄ nanoflakes as an efficient gas sensor versus alcohol VOCs // Journal of Material Chemistry A. – 2020. – V. 8. – P. 7214–7228.

2. **Solomatin M.A.**, Glukhova O.E., Fedorov F.S., Sommer M., Shunaev V.V., Varezchnikov A.S., Nasibulin A.G., Ushakov N.M., Sysoev V.V. The UV effect on the chemiresistive response of ZnO nanostructures to isopropanol and benzene at ppm concentrations in mixture with dry and wet air // Chemosensors. – 2021. – V. 9. – Article 181.

3. **Solomatin M.A.**, Radovic M., Petrunin A.A., Kirilenko D.A., Varezchnikov A.S., Dubourg G., Vasilkov M.Yu., Bainyashev A.M., Nesterovic A., Kiselev I., Kostin K.B., Martynyuk Y.P., Gorokhovskiy A.V., Volchkov S.S., Zimnyakov D.A., Ushakov N.M., Goffman V.G., Rabchinskii M.K., Glukhova O.E., Sysoev V.V. Towards electronic smelling of ketones and alcohols at sub- and low ppms by pinky-sized on-chip sensor array

with SnO₂ mesoporous layer gradually engineered by near IR-laser // *Chemical Engineering Journal*. – 2023. – V. 474. – Article 145934.

4. **Solomatin M.A.**, Fedorov F.S., Kirilenko D.A., Trouillet V., Varezchnikov A.S., Kiselev I.V., Geckle U., Sommer M., Bainyashev A.M., Artemov V., Ushakov N.M., Goffman V.G., Rabchinskii M.K., Nasibulin A.G., Sysoev V.V. Bottom-up designing nanostructured oxide libraries under a lab-on-chip paradigm towards a low-cost highly-selective E-nose // *Analytica Chimica Acta*. – 2025. – V. 1333. – Article 343387.

На автореферат поступило 9 положительных отзывов из: Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН (г. Москва) от Анисимкина В.И., д.ф.-м.н. (01.04.10); Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» от Мошникова В.А., д.ф.-м.н. (01.04.10) и Налимовой С.С., к.ф.-м.н. (01.04.10); Пензенского государственного университета от Кревчика В.Д., д.ф.-м.н. (01.04.10) и Карманова А.А., к.ф.-м.н. (01.04.10); из ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (г. Минск, Республика Беларусь) от Мухурова Н.И., д.т.н. (05.27.01) и Гасенковой И.В., д.ф.-м.н. (05.27.01); из Южного федерального университета (г. Таганрог) от Петрова В.В., д.т.н. (05.27.01); из Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова от Румянцевой М.Н., д.х.н. (02.00.01 и 02.00.21); из Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I от Шапошника А.В., д.х.н. (02.00.02); из Новосибирского государственного технического университета от Баннова А.Г., д.х.н. (2.6.12); из Института химии твердого тела Уральского отделения РАН (г. Екатеринбург) от Захаровой Г.С., д.х.н. (02.00.04).

В отзывах на автореферат сделаны замечания: а) об отсутствии результатов исследований долговременной стабильности разработанных сенсорных элементов; объяснения увеличения отклика слоя ZnO к изопропанолу при относительной влажности в сравнении с сухим воздухом; пояснения, как достигается локальное электрохимическое осаждение оксидов при формировании мульти-оксидной линейки; сравнения полученных результатов по газочувствительности и селективности с результатами, известными из литературы; информации о кристаллической фазе оксидов кобальта и марганца; пояснения физического смысла рассчитанной энергии активации из температурных зависимостей характерного времени хеморезистивного отклика; информации о точности измерения температуры и выходных характеристик мультисенсорных линеек; данных по воспроизводимости изученных газочувствительных пленок; объяснения природы существенного различия отношения сигнал/шум при контакте с кетонами и спиртами; б) о недостаточно полном изучении физико-химических и электрофизических свойств оксидов, полученных электрохимическим методом; в) о неубедительности

утверждения, что геометрия молекул ацетона затрудняет их доступ к дисперсной поверхности диоксида олова по сравнению с этанолом; тезиса о связи величин межкристаллитных барьеров и селективности ввиду отсутствия обоснованных погрешностей оценки величин потенциальных барьеров; г) о необходимости пояснения процесса восстановления SnO_2 до SnO при обработке ИК-лазером; д) о роли наночастиц чувствительного слоя сенсора в химических реакциях спиртов или кетонов при температурах 200 °C и выше; е) редакционные замечания.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

установлено, что воздействие ИК-излучения на поликристаллический слой SnO_2 приводит к его травлению и появлению дополнительной фазы SnO , что значительно влияет на величину его хеморезистивного отклика к спиртам и кетонам;

показано, что характерные времена хеморезистивного отклика и восстановления, рассчитанные в рамках формализма Лэнгмюра-Хиншельвуда, для поликристаллического слоя SnO_2 при воздействии спиртов и кетонов независимо от его обработки ИК-лазером снижаются с увеличением температуры нагрева слоя в диапазоне 68-350 °C;

определено, что величина хеморезистивного отклика и скорость реакции поликристаллического слоя SnO_2 при воздействии паров спиртов и кетонов достигает наибольших значений при температурах 260-350 °C, в то время как более высокое отношение сигнал/шум наблюдается при УФ-облучении с длиной волны 366 нм при температуре 68 °C.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

продемонстрировано, что электронный транспорт носителей заряда в поликристаллическом слое SnO_2 может быть корректно описан в рамках механизма коррелированных барьерных прыжков, при котором величина потенциальных барьеров уменьшается при воздействии газов-восстановителей, что определяет увеличение проводимости слоя как основы хеморезистивного эффекта;

выявлено, что УФ-облучение при температуре до 150 °C эффективно для активации хеморезистивного эффекта в наноструктурированных слоях ZnO малой толщины, сформированных при временах электрохимического осаждения 400-700 с, что объясняется достаточным проникновением излучения в слой;

показано, что увеличение времени электрохимического осаждения ZnO в диапазоне 250-1150 с приводит к увеличению величины его хеморезистивного отклика на примере паров спиртов при нагреве до 300 °C, что объясняется увеличением в сформированном наноструктурированном слое отношения поверхности к объему;

обнаружено, что хеморезистивный эффект в мезо-наноструктурированных слоях оксидов Zn, Mn, Ni и Co, выращенных методом электрохимического осаждения, проявляется при тепловой активации в диапазоне температур 200-350 °С, при этом тип хеморезистивного отклика в присутствии паров спиртов совпадает с типом изменения полного импеданса этих слоев.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны физико-технологические основы формирования газоаналитической однокристалльной мультисенсорной линейки на основе поликристаллического слоя диоксида олова, обработанного ИК-лазером, характеризующейся селективностью к спиртам и кетонам при пониженном энергопотреблении;

продемонстрирована возможность уменьшения температуры функционирования мультисенсорной линейки на основе мезо-наноструктурированных слоев оксида цинка, синтезированных методом электрохимического осаждения, к значениям ниже 200 °С путем дополнительной активации хеморезистивного эффекта через УФ-облучение с длиной волны 380 нм;

предложен способ увеличения селективности мульти-оксидной однокристалльной мультисенсорной линейки на основе оксидов кобальта, никеля, марганца и цинка, сформированной методом электрохимического осаждения, на примере воздействия паров различных спиртов, при приложении пространственно-неоднородного нагрева в диапазоне 290-350 °С;

разработаны мультисенсорные линейки на основе мезо-наноструктурированных слоев оксидов металлов, повышающие устойчивость газовых детекторов к деградации газочувствительного материала в условиях их практической эксплуатации с целью достижения стабильного хеморезистивного отклика;

результаты исследований использовались при выполнении НИР, поддержанных стипендией Президента РФ для аспирантов СП-2391.2022.1, госзадания Минобрнауки России в рамках проектной части № 16.1119.2017/ПЧ, грантом РНФ № 19-72-10052, грантом Минобрнауки России № 075-15-2022-1230.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

проведенные исследования выполнены с использованием сертифицированного измерительного и аналитического оборудования и с применением общепринятых развитых методик;

использованы математически обоснованные численные методы и алгоритмы, широко апробированные и хорошо зарекомендовавшие себя при исследовании газочувствительных и селективных характеристик сенсорных элементов;

установлено, что результаты моделирования эквивалентными схемами сенсорных элементов на основе металло-оксидных структур физически корректно воспроизводят экспериментальные данные спектроскопии импеданса;

результаты, представленные в диссертации, качественно и количественно согласуются с ранее представленными в научной литературе результатами других авторов по данной тематике и соответствуют современным представлениям о физических процессах в полупроводниковых сенсорах.

Личный вклад соискателя. Все основные защищаемые результаты, включенные в диссертацию, получены лично соискателем. Соискателем выполнены экспериментальные исследования электрофизических, газочувствительных и селективных характеристик сформированных мультисенсорных однокристалльных линеек и проведен анализ полученных данных при помощи общепринятых математических методов. Постановка исследовательских задач, обсуждение и интерпретация результатов осуществлялись совместно с научным руководителем, а также с соавторами опубликованных работ.

Результаты работы рекомендуются к использованию в научно-исследовательских учреждениях и производственных организациях: в Институте радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН (г. Москва) и его Саратовском филиале, Институте проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН (п. Черноголовка, Московская область), Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург), ФГУП «СПО «Аналитприбор» (г. Смоленск), НПЦ «Газотрон-С» (АО «НПП «Алмаз») (г. Саратов), ООО «Геофизмаш» (г. Саратов), ООО Завод «Газпроммаш» (г. Саратов), АО «Микрон» (г. Зеленоград), АО «Ангстрем» (г. Зеленоград), ООО «НМ-Тех» (г. Зеленоград).

Результаты рекомендуются к внедрению в учебный процесс в высших учебных заведениях, ведущих подготовку в области микро- и нанoeлектроники – в Национальном исследовательском университете «Московский институт электронной техники», в Московском физико-техническом институте (национальном исследовательском университете), в Саратовском национальном исследовательском государственном университете имени Н.Г. Чернышевского, в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ», в Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А. и др.

Содержание диссертации удовлетворяет пп. 9–11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания: 1) о необходимости пояснения сущности хеморезистивного эффекта в оксидах металлов; 2) о необходимости пояснения наличия оптимальной температуры функционирования мультисенсорной линейки на основе поликристаллического слоя SnO_2 ; 3) о необходимости пояснения различия в понятиях «чувствительность» и «хеморезистивный отклик»; 4) о необходимости пояснения влияния размера оксидного кристаллита на величину хеморезистивного отклика в поликристаллическом слое.

Соискатель Соломатин М.А. ответил на замечания, содержащиеся в отзывах ведущей организации, отзывах официальных оппонентов, отзывах на автореферат, и на заданные ему в ходе заседания вопросы дал необходимые пояснения: 1) пояснил, что хеморезистивный эффект заключается в изменении сопротивления металло-оксидного слоя при взаимодействии с газами-аналитами вследствие изменения концентрации свободных носителей заряда, которая определяется поверхностными реакциями с участием хемосорбированных ионов кислорода, электронов, локализованных в приповерхностной области, и молекул газов-аналитов, или прямым электронным обменом в системе адсорбат/адсорбент; 2) пояснил, что наличие оптимальной температуры для проявления хеморезистивного эффекта в поликристаллическом слое SnO_2 связано с возможностью агломерации кристаллитов, стимулированной нагревом, и увеличением их характерного размера, в результате чего соотношение между приповерхностной областью пространственного заряда и размером кристаллита уменьшается, и поверхностные окислительно-восстановительные реакции начинают вносить менее значительный вклад в общую проводимость полупроводника, что прямым образом влияет (уменьшает) на величину хеморезистивного отклика при более высоких температурах, при этом низкие температуры являются менее эффективными для хемосорбционных процессов газов-аналитов на поверхности; 3) пояснил, что понятие «чувствительность» является часто более обширным качественным понятием, включающим в себя понятие «хеморезистивный отклик», оценивающее количественно относительное изменение концентрации свободных носителей заряда вследствие взаимодействия с молекулами газов-аналитов; 4) пояснил, что при малых размерах кристаллита его обеднение свободными носителями заряда и образование приповерхностной области

пространственного заряда вследствие наличия хемосорбированных ионов кислорода вносит в величину общей проводимости более существенную роль, в то время как при увеличении размера кристаллита проводимость определяется преимущественно шунтирующим слоем в объеме.

На заседании 10 октября 2025 года диссертационный совет принял решение за решение актуальной задачи твердотельной микро- и наноэлектроники по формированию газоаналитических однокристалльных мультисенсорных линеек, предназначенных для селективного детектирования летучих органических соединений, в том числе при относительно низких функциональных температурах, присудить Соломатину М. А. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человека (19 человек находились в месте проведения заседания, 2 человека участвовали в заседании совета в удаленном интерактивном режиме), из них 6 докторов по специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств, участвовавших в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 21, против – НЕТ, недействительных бюллетеней – НЕТ.

Председатель
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета

10 октября 2025 г.


Аникин Валерий Михайлович


Слепченков Михаил Михайлович

