

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., доцента Шерстюк Наталии Эдуардовны
о диссертационной работе Куликовой Дарьи Павловны
«Газохромные эффекты в наноструктурах на основе оксидов переходных металлов и металлического катализатора в водородосодержащей атмосфере»,
представленной на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика

Диссертационная работа Д.П. Куликовой посвящена актуальной теме – исследованию оптического и магнитооптического эффектов в наноструктурах на основе водородочувствительных материалов. Интерес к данной тематике связан с решением задачи обеспечения безопасности не только на производствах, где используется водород, но и в контексте развития водородной энергетики. С целью повышения чувствительности к водороду оптических структур на основе газохромного оксида вольфрама в работе впервые были определены дисперсионные зависимости оптических констант на различных стадиях его окрашивания. Предлагаемый способ применим для характеристики других материалов, диэлектрическая проницаемость которых меняется под воздействием внешних факторов (УФ-излучение, протекание электрического тока и пр.). Заслуживают внимания результаты работы по исследованию оптических и структурных свойств наноплёнок палладия, на поверхности которых с помощью отжига лазерным излучением сформированы наноструктуры из чередующихся полос Pd/PdO. Выявлены закономерности изменения данных свойств в атмосфере с повышенной концентрацией водорода. В диссертационной работе был продемонстрирован газогирохромный эффект, а именно изменение угла поворота плоскости поляризации (эффект Фарадея) для намагниченной наноплёнки окисленного пермаллоя при её взаимодействии с водородом. Данный результат интересен как с точки зрения интерпретации механизма данного явления ввиду влияния газа-восстановителя на магнитные свойства вещества, так и для приложений ввиду независимости отклика магнитооптического газового сенсора от интенсивности зондирующей электромагнитной волны.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав и заключения. Объём работы составляет 149 страниц и включает в себя 50 рисунков и 1 таблицу. Список литературы включает 181 библиографическую ссылку.

Во **введении** сформулированы актуальность темы, цели и задачи работы, научная новизна и практическая значимость диссертации, представлены положения, выносимые на защиту. Также приведена информация о публикациях соискателя и данные об апробации результатов работы.

В **первой главе** представлен обзор теоретических и экспериментальных работ, в которых исследуются газохромные оксиды и металлы и оптические и магнитооптические отклики на водород газочувствительных структур различных конфигураций.

Вторая глава посвящена определению комплексной диэлектрической проницаемости оксида вольфрама в процессе его газохромного окрашивания

в водороде. Подробно описан экспериментальный способ измерения спектров эллипсометрических параметров WO_3 в управляемой газовой среде. Полученные данные были аппроксимированы с помощью различных дисперсионных функций, описывающих оптическое поглощение вблизи границы запрещенной зоны и поглощение, обусловленное наличием дополнительных уровней внутри запрещенной зоны. По итогам анализа полученных зависимостей был сделан вывод, что газохромное окрашивание оксида вольфрама происходит ввиду формирования поверхностных и объёмных кислородных вакансий. Автором также были приведены временные зависимости комплексного показателя преломления WO_3 в процессе восстановительной реакции и показан пример применимости полученных данных для оптимизации газочувствительных резонансных структур.

В третьей главе представлено экспериментальное исследование влияния сфокусированного лазерного излучения на поверхность наноплёнок палладия. Показано, что в результате такого лазерного отжига формируются области, состоящие из оксида палладия и, соответственно, значительно отличающиеся от исходного палладия оптическими и структурными свойствами. Автором была изготовлена серия наноструктур Pd/PdO в виде меандра с различным расстоянием между полос PdO, сформированных лазерным излучением различной мощности. Установлено, что интенсивность света, рассеянного наноструктурой в обратную полусферу, необратимо меняется в воздухе с повышенной концентрацией водорода, и скорость данного изменения зависит от её структурных особенностей ввиду характера протекания автокаталитической реакции восстановления PdO. Продемонстрировано, что при повторном формировании наноструктуры Pd/PdO в одной и той же области поверхности наноплёнки скорость её отклика на водород не изменяется.

В четвёртой главе изучены оптические и магнитооптические свойства наноплёнок пермаллоя, отожжённых в воздухе в диапазоне температур вплоть до $475\text{ }^\circ\text{C}$ в течение часа. Показано, что по мере увеличения температуры отжига происходит рост магнитооптической добротности наноплёнок. Однако для температур свыше $450\text{ }^\circ\text{C}$ наблюдалась обратная картина. Автором диссертации предложена интерпретация явления, связывающая увеличение пропускания и фарадеевского вращения материала с образованием в плёнке оксидной магнитной фазы, которая характеризуется магнитооптической активностью в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне. Во второй части главы представлены экспериментальные результаты, доказывающие факт изменения угла фарадеевского вращения окисленного пермаллоя в водороде и возможность накопления величины данного изменения в многопроходных схемах.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы, списки публикаций автора по теме диссертации и цитируемой литературы.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, в достаточной степени апробирована публикациями в авторитетных научных журналах и докладами на известных конференциях различного уровня. В ка-

честве основных **достоинств работы** можно выделить следующие:

- Представлено высококачественное и подробное экспериментальное исследование частотной дисперсии диэлектрической проницаемости оксида вольфрама в процессе протекания окислительно-восстановительной реакции, результаты которого применимы во многих задачах изучения оптических материалов и структур;
- С помощью сфокусированного лазерного излучения сформированы наноструктуры на основе Pd и PdO, характеризующиеся не только конкурентоспособным по скорости откликом на водород, но и возможностью их многократного использования;
- Обнаружен рост магнитооптической добротности наноплёнок пермаллоя в случае их термического окисления в воздухе и взаимное изменение угла фарадеевского вращения в водороде для наноплёнки окисленного пермаллоя, покрытой каталитическим слоем.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

В то же время к работе имеется ряд замечаний:

1. При описании результатов, представленных на рис. 2.2 и 2.3, использовалась модель эффективной среды Бруггемана. Ее использование в данном случае оправдано, однако в тексте работы обоснование ее выбора сделано, на мой взгляд, слишком конспективно, и оставляет вопросы. В частности, не ясно, как участвует в модели 2 (рис. 2.2) слой палладия толщиной 0 нм, называемый поглотителем: на первый взгляд поглощение в таком слое невозможно ввиду его отсутствия. Не ясно также, как (и был ли) учтен деполярирующий фактор. Возможно, следовало бы уделить рассмотрению данной модели больше внимания.
2. На рисунке 3.4 АСМ-карты поверхности НС и их сечения по выделенным направлениям представлены в различных пределах: высота на АСМ-изображении (рис. 3.4 (а)) представлена в диапазоне 0 – 16 нм, и она же на рис.3.4(б) – в диапазоне от -4 до +4 нм. Такое представление требует пояснений.
3. Хотя представленные результаты имеют фундаментальный характер, их практическое применение предполагает соблюдение определенных требований: быстрое действие, чувствительность к примесям, устойчивость к внешним воздействиям и др. Было бы уместно сравнить полученные параметры наблюдаемых эффектов с существующими аналогичными датчиками/системами, которые используются для детектирования водорода.

При этом указанные замечания не снижают ценности результатов диссертационной работы, заслуживающей высокой оценки.

Общее впечатление о диссертационной работе Д.П. Куликовой положительное. Считаю, что диссертация «Газохромные эффекты в наноструктурах на основе оксидов переходных металлов и металлического катализатора в водородосодержащей атмосфере» соответствует специальности 1.3.6. «Оптика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определённым пп. 2.1–2.5 «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к кандидатским диссертациям, и оформлена согласно приложениям № 8 и 9 «Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова», а её автор — Куликова Дарья Павловна — заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. «Оптика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры нанoeлектроники Института перспективных технологий и индустриального программирования МИРЭА – Российского технологического университета

Шерстюк Наталия Эдуардовна

«26» ноября 2024 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (499) 600-80-80 (доб. 23026)

E-mail: rector@mirea.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская диссертация:

05.27.01 — «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»

Адрес места работы:

119454, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА)

Телефон: +7 (499) 600-80-80; e-mail: rector@mirea.ru