

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

ЗАВАЦКОГО Сергея Андреевича

«Эффекты гигантского комбинационного рассеяния света и диэлектрофореза в системах на основе наночастиц и микроэлектродов из благородных металлов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.16.08 – нанотехнологии и наноматериалы (материалы для электроники и фотоники)

1. Соответствие диссертации специальностям и отрасли науки, по которым она представлена к защите

Диссертационная работа Завацкого Сергея Андреевича «Эффекты гигантского комбинационного рассеяния света и диэлектрофореза в системах на основе наночастиц и микроэлектродов из благородных металлов» посвящена изучению вопросов, связанных с установлением закономерностей проявления эффектов диэлектрофореза (ДЭФ) и гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) света в одной системе. Проведенные исследования эффектов диэлектрофореза молекул различных органических соединений и гигантского комбинационного рассеяния света в плазмонных наночастицах благородных металлов позволили на завершающем этапе разработать экспериментальную наносенсорную платформу, в которой объединены два исследуемых эффекта, что позволило повысить чувствительность детектирования различных белков. Объект, предмет и методы исследования представленной диссертации полностью соответствуют специальности 05.16.08 – нанотехнологии и наноматериалы (материалы для электроники и фотоники) и отрасли «физико-математические науки». Представленные в диссертации результаты входят в области исследований, предусмотренные паспортом данной специальности, раздел III.2, пункты 1 – «Процессы, закономерности и методы формирования наноструктур и наноструктурированных материалов», 2 – «Свойства наноструктур и наноструктурированных материалов», 6 – «Процессы и эффекты взаимодействия наноструктур и наноматериалов с излучениями различной природы» и 7 – «Закономерности функционирования и применение наноструктур и наноструктурированных материалов».

2. Актуальность темы диссертации

В диссертационной работе изучены вопросы, связанные с установлением закономерностей проявления эффектов ДЭФ и ГКР света в одной системе, на основе которой на завершающем этапе исследований была разработана экспери-

ментальная установка, позволяющая проводить манипуляции с малым количествами вещества (микрограммы на миллилитр). Разработка подобных аналитических устройств, объединяющих в себе несколько различных функциональных составляющих, и изучение структурных параметров, оптических и электрофизических свойств микро- и наноразмерных компонентов таких систем является актуальной задачей современных научных исследований, на решение которой и была ориентирована работа соискателя. В ходе выполнения работ были установлены закономерности формирования ГКР-сигнала от различных молекул, адсорбированных на поверхности ансамблей плазмонных наночастиц из Au и Ag. При этом указанные наночастицы были получены с использованием вакуумного осаждения ультратонких (толщина несколько нанометров) пленок с последующим их отжигом для кластеризации и формирования ансамбля наночастиц. Показано, что полученные плазмонные наночастицы из благородных металлов при воздействии лазерного излучения с определенной длиной волны создают необходимые условия для детектирования и предсказания структуры различных молекул в субмолярных концентрациях, что позволило в дальнейшем использовать их в качестве фотонной составляющей наносенсорной платформы. В диссертации также были установлены закономерности генерации неоднородного электрического поля в системе из массивов металлических микроэлектродов различной геометрии при приложении к ним переменной разности потенциалов. Геометрия микроэлектродов была подобрана таким образом, чтобы они создавали необходимые условия для прецизионного управления пространственным расположением анализируемых молекул и в наносенсорной платформе играли роль электронной составляющей. Результаты, полученные с помощью численного моделирования, основанного на методе конечных элементов, и большого количества экспериментальных данных, а также их корреляция между собой позволили автору объединить эффекты ДЭФ и ГКР света в одной наносенсорной платформе, установить закономерности ее функционирования и апробировать в качестве аналитического инструмента для накопления биоорганических макрообъектов из их слабо концентрированных водных растворов в заданной области для последующего детектирования.

3. Степень новизны результатов, полученных в диссертации, и научных положений, выносимых на защиту

Диссертационная работа содержит ряд новых научных результатов, вносящих вклад в развитие аналитического инструментария на основе наносенсорной платформы. Научной новизной обладают следующие установленные закономерности и результаты:

1. Получены зависимости генерации неоднородного электрического поля

от геометрии планарных металлических микроэлектродов и параметров внешнего электрического поля, которые позволили дополнить набор традиционных геометрий микроэлектродов для диэлектрофореза разработкой их новой конфигурации на основе массива встречных зубцов, обеспечивающих пространственную вариацию величины модуля градиента квадрата напряженности электрического поля из-за изменения расстояния между ними.

2. Впервые рассчитаны молекулярные коэффициенты Клаузиуса – Моссотти для трех тестовых белков по результатам экспериментально установленной минимальной величины градиента модуля квадрата напряженности электрического поля, необходимого для их диэлектрофоретического захвата в водной среде одной из пар встречных зубцов в массиве металлических микроэлектродов, что определяет возможность управления биоорганическими макромолекулами с помощью диэлектрофореза при гораздо меньших величинах градиента модуля квадрата напряженности электрического поля по сравнению с тем, что предсказывает существующая феноменологическая теория ДЭФ.

3. Установлены закономерности функционирования и выполнена апробация экспериментальной наносенсорной платформы, объединяющей в себе плазмонные наночастицы и массивы зубчатых металлических микроэлектродов для применения в качестве аналитического инструмента, способного накапливать биоорганические макрообъекты из их слабо концентрированных водных растворов в заданной области с помощью диэлектрофореза и обеспечивающей условия для их детектирования методом спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Положения, выносимые на защиту, и выводы по диссертации обоснованы и достоверны, что подтверждается их согласием с известными в литературных источниках экспериментальными данными, а также корректным использованием знаний и методов физики ГКР и ДЭФ.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию

Научная значимость представляется новыми знаниями о механизмах проявления эффекта ДЭФ в белках альбумина, лизоцима и лактоферрина, установлении режимов наибольшего проявления эффектов ГКР света для молекул родамина 6 Ж, адсорбированных на наночастицах Au и белков гемоглобина, лизоцима и лактоферрина, адсорбированных на наночастицах Ag.

Практическая значимость заключается в разработке наносенсорной платформы для детектирования малого количества (микрограммы на миллилитр) вещества, включая высокомолекулярные соединения, что способствует повышению детектирующей способности нового аналитического инструмента.

Экономическая значимость полученных результатов состоит в разработке подхода, создании нового аналитического устройства и изучении закономерностей его функционирования, что позволяет выполнять анализ жидких многокомпонентных сред, включающих в том числе высокомолекулярные соединения, характеризующегося простотой технологической реализации, практического применения и потенциально сниженной себестоимостью, что может способствовать более широкому внедрению таких методов исследования в научной сфере, медицине, криминалистике, биотехнологиях и пищевой промышленности.

Социальная значимость работы состоит в использовании полученных результатов для увеличения объема знаний студентов, связанных с последними достижениями в сфере разработки методов для одновременного прецизионного пространственного управления различными объектами и их идентификации, а также освоения наиболее современных методик формирования и анализа свойств микро- и нанообъектов.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 11 научных работах, из которых 1 – коллективная монография, 4 – статьи в рецензируемых научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий (общим объемом 8,4 авт. л.), 2 – статьи в сборниках материалов научных конференций, 4 – тезисы.

Полученные в диссертации результаты докладывались и обсуждались на международных и республиканских конференциях: международной научной конференции «Материалы и структуры современной электроники» (Минск, Беларусь, 2022 г.), Шестой республиканской конференции по аналитической химии с международным участием (Минск, Беларусь, 2018 г.), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной памяти доцента Пешковой В. А. (Иркутск, Россия, 2018 г.), 61-й Международной студенческой конференции по физике и естественным наукам «Open Readings» (Вильнюс, Литва, 2018 г.), конференции материаловедческого сообщества «MRS Fall meeting & Exhibit» (онлайн, 2020 г.), 16-й Международной конференции по оптике ближнего поля, нанофотонике и смежным технологиям (онлайн, 2020 г.).

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК

Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с Инструкцией о порядке оформления диссертации, диссертации в виде научного доклада, автореферата диссертации и публикаций по теме диссертации. Ссылки в тексте с указанием авторов и источников соответствуют требованиям п. 26 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий. Автореферат полностью соответствует тексту диссертации.

8. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

Исследования Завацкого С. А. по теме диссертации проводились в рамках государственных научно-технических программ, соответствующих перечню приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь, а также гранта Швейцарской конфедерации. Завацкий С. А. показал, что способен творчески решать современные проблемы физики и техники наноструктур, владеет современными методами экспериментальных исследований и обработки результатов, обладает способностью адаптировать стандартные пакеты прикладных программ для решения конкретных задач моделирования и навыками проведения информационного поиска и анализа в области исследуемых материалов, процессов, закономерностей, явлений.

На основании вышеизложенного можно утверждать, что научная квалификация Завацкого С. А. соответствует требованиям, предъявляемым к соискателям ученой степени кандидата физико-математических наук.

9. Замечания

1. В тексте диссертации имеется ряд неточных и/или неудачных выражений. Так, в Задачах упоминается «повышение сигнала» вместо общепринятого «усиление сигнала»; в п. 3 научной новизны применяется выражение «текущая теория»; на стр. 55 используется неудачное выражение «...уравнения, представленного в формуле (2.1)»; в этом же пункте 2.4, по-видимому, вместо понятия «образец» или «моделируемая структура» используется термин «модель». В связи с этим странно читать, что «возбуждающий порт расположен над изучаемой моделью», «площадь поверхности модели» или «сторона модели». С учетом того, что в данном параграфе речь идет об описании процедуры численного моделирования, то слово «модель» в данном контексте неуместно. На стр. 55 впервые применен неудачный термин «периодические граничные условия», который далее многократно транслируется по тексту. В тексте диссертации повсеместно используется неудачный термин «деветтинг» вместо, например, «нанокластеризация», «наносегментирование», «наноагломерация» и пр.

2. При описании процесса моделирования в п. 2.4 не указаны направления декартовых осей координат, начало их системы отсчета. Рассматривается трехмерная модель, вместе с тем используется термин «двумерная элементарная ячейка». Непонятно, почему электрический потенциал рассчитывался только вдоль оси «X». Все численные расчеты проводились либо с использованием специальных пакетов прикладных программ, либо в Matlab. Следовало бы для каждого конкретного случая вынести в приложения адаптированные коды и/или конкретные используемые в расчетах параметры.

3. При описании рис. 3.2 упоминается некая синяя линия, в действительности имеем прямую красную. В целом по параграфу 3.2, в котором идет речь о планировании эксперимента, имеется ряд вопросов. Самый главный из них – каким образом были получены точки на рис. 3.2 и по какой причине выбраны те или иные сочетания экспериментальных величин и почему не указаны смысл точек, которые не отклоняются от красной прямой? Отсутствие ответов на эти вопросы затрудняет восприятие материала и понимание того, как была построена регрессионная модель.

4. При описании рис. 3.9 не указаны абсолютные значения напряженности электрического поля E , падающего на наночастицу. Как эта величина соотносится с реальными значениями напряженности электрических полей в эксперименте? Можно ли скалировать используемое при моделировании значение E на реальные величины и какова зависимость степени возбуждения локализованного поверхностного плазмона от величины E ?

5. При описании формирования наносенсорной платформы, гл. 6, не обоснован выбор снижения скорости нагрева печи до величины $5,7^\circ\text{C}/\text{мин}$. Насколько критично выдерживать этот параметр с точностью до десятых долей градуса? Какова скорость осаждения пленки Ag в этом случае, когда применялось не магнетронное распыление, а электронно-лучевое испарение материала? Как это согласуется с ранее подробно описанным в гл. 2 методом оптимизации параметров получения наночастиц серебра? Замена метода нанесения материала на электронно-лучевой неизбежно должно привести к тому, что все оптимизированные для магнетронного распыления параметры модели должны «поплыть».

Указанные замечания не влияют на новизну и достоверность выносимых на защиту положений, полученных результатов и основных выводов и не снижают научный уровень диссертации.

10. Заключение

Диссертационная работа Завацкого Сергея Андреевича «Эффекты гигантского комбинационного рассеяния света и диэлектрофореза в системах на основе наночастиц и микроэлектродов из благородных металлов», подготовленная под научным руководством кандидата технических наук, доцента Бондаренко А. В., является завершенной самостоятельно выполненной квалификационной работой. Ее содержание отвечает требованиям п. 21 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Считаю, что Завацкий Сергей Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.16.08 – нанотехнологии и наноматериалы (материалы для электроники и фотоники) за получение новых научных результатов, включающих:

– развитие представлений о механизме диэлектрофореза в веществах с высокой диэлектрической поляризацией, заключающихся в учете дополнительной поляризации среды постоянным дипольным моментом вещества, что приводит к аномально большим коэффициентам Клаузиуса-Моссотти, до 400 вместо 1 в обычном случае;

– установление механизмов и закономерностей устойчивой локализации сферических диэлектрических частиц за счет эффекта диэлектрофореза и определение оптимальной удельной проводимости водных сред (менее 10^{-2} См/м) и площади поверхности микроэлектродов для повышения сил трения и преодоления сил миграционного потока жидкости вследствие электротермического эффекта;

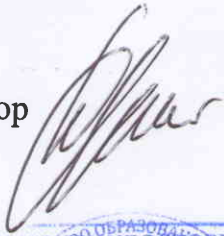
– установление оптимальных топологических параметров ансамбля наночастиц Au и Ag (диаметр и расстояние между наночастицами) и плотности мощности зондирующего лазерного излучения для получения максимального сигнала гигантского комбинационного рассеяния света за счет интерференции локальных соседних электрических полей, возбуждаемых лазерным излучением с длиной волны 633 нм для Au и 532 нм для Ag при определении малого количества (микрограммы на миллилитр) родамина 6 Ж, белков гемоглобина, лизоцима и лактоферрина, что является вкладом в физику диэлектрофореза и гигантского комбинационного рассеяния света, а именно, развивает представления о механизмах усиления диэлектрофоретической силы в сильно поляризованных средах, о связи ди-

электрофоретической силы, плазмонных эффектов и гигантского комбинационного рассеяния света в наноразмерных материалах, нанесенных на наносенсорную платформу, представляющую собой новый аналитический инструмент.

Официальный оппонент –

профессор кафедры защиты информации
учреждения образования «Белорусский
государственный университет информатики
и радиоэлектроники»,

доктор физико-математических наук, профессор

 С.Л. Прищеп



Совет по защите
диссертаций при БГУИР
«26» апреля 2023 г.
Вх. № 05.02-Н/65