

УТВЕРЖДАЮ

Директор государственного научного учреждения «Институт физики имени Б. И. Степанова» Национальной академии наук Беларуси

М.В. Богданович

«26» апреля 2023 г.

ОТЗЫВ

оппонирующей организации на диссертацию Завацкого Сергея Андреевича на тему **«Эффекты гигантского комбинационного рассеяния света и диэлектрофореза в системах на основе наночастиц и микроэлектродов из благородных металлов»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.16.08 – «Нанотехнологии и наноматериалы (материалы для электроники и фотоники)».

Экспертиза диссертации и автореферата проводилась в соответствии с требованиями «Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий», утвержденного Указом Президента Республики Беларусь от 17.11.2004 № 560 (в ред. Указа Президента Республики Беларусь от 02.06.2022 № 190), и «Положения о совете по защите диссертаций», утвержденного постановлением Высшей аттестационной комиссии Республика Беларусь от 22.02.2005 № 19 (в ред. постановления ВАК от 19.08.2022 № 2).

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки

В представленной диссертационной работе объектом исследования является сенсорное устройство, состоящее из массива микроэлектродов на подложках, покрытых плазмонными наночастицами из серебра или золота, функционирующее на эффектах диэлектрофореза (ДЭФ) и гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) света. Предметом исследований выступают закономерности формирования, структурные, оптические и электрофизические свойства плазмонных наночастиц из указанных металлов, взаимосвязь поляризационных, электрических, тепловых и гидродинамических процессов в массивах микроэлектродов для разработки и оптимизации методик изготовления компонентов сенсорной платформы, позволяющей одновременно диэлектрофоретически позиционировать высокомолекулярные соединения и детектировать их при помощи ГКР-спектроскопии.

Изучение материалов, представленных в диссертации и автореферате Завацкого С.А. «Эффекты гигантского комбинационного рассеяния света и диэлектрофореза в системах на основе наночастиц и микроэлектродов из благородных металлов», позволяет сделать вывод о том, что поставленные цель и задачи исследования, полученные результаты и содержание работы соответствуют профилю совета по защите диссертаций Д 02.15.07, заявленной специальности

05.16.08 – «Нанотехнологии и наноматериалы (материалы для электроники и фотоники)», в частности, областям исследований (для физико-математических наук): 1. «Процессы, закономерности и методы формирования наноструктур и наноструктурированных материалов.»; 7. «Закономерности функционирования и применение наноструктур и наноструктурированных материалов.» и отрасли физико-математических наук.

Научный вклад соискателя в решение научной задачи с оценкой его значимости

В диссертации изложены результаты работ, выполненных соискателем лично и в соавторстве. Целью диссертационного исследования являлось установление закономерностей проявления эффектов ДЭФ и ГКР света в одной системе и изучение свойств составляющих ее компонентов для позиционирования и детектирования целевых молекул в жидкостях.

Научный вклад, который внес Завацкий С.А. в решение научных задач диссертации, состоит в выявлении и обосновании максимального усиления комбинационного рассеяния света от молекул, адсорбированных на плазмонных наночастицах золота и серебра, сформированных методом кластеризации тонких пленок золота и серебра на диэлектрических подложках при их термообработке. Полученные результаты позволили создать ГКР-активное покрытие, обеспечивающее хорошо дифференцируемый ГКР-сигнал в спектрах белков (лактоферрина, гемоглобина и лизоцима) при воздействии на него лазерным излучением с пониженной с 1,96 до 0,27 Вт/см² плотностью мощности. Соискателем также была разработана модель, учитывающая величину совместного действия ДЭФ и электротермического эффекта на полистироловые частицы в системе из массива встречно-штыревых микроэлектродов на стеклянной подложке. Это позволило достичь устойчивой локализации частиц диаметром 190 и 520 нм вблизи вершин микроэлектродов и между двумя соседними микроэлектродами одного массива, соответственно, что обеспечило пространственное разделение частиц. Кроме того, Завацкий С.А. впервые определил молекулярные коэффициенты Клаузиуса – Моссотти для трех белков благодаря комплексу исследований по выполнению ДЭФ-экспериментов и определению величины градиента модуля квадрата напряженности электрического поля с помощью численного моделирования.

Научная значимость результатов диссертационного исследования заключается в получении новых знаний о закономерностях формирования, оптических и электрофизических свойствах микро- и наноразмерных компонентов сенсорной системы, обеспечивающей условия наблюдения эффектов ДЭФ и ГКР анализируемых образцов, предложении способа повышения сигнала ГКР света в спектрах высокомолекулярных соединений, представленных молекулами белков (лактоферрина, гемоглобина и лизоцима), установлении взаимосвязи электростатических, тепловых и поляризационных процессов и их совместного влияния на ДЭФ полистирольных частиц и белков.

Практическая значимость полученных результатов заключается в разработке сенсорной системы, работающей на принципах совместного действия эффектов ДЭФ и ГКР света, и реализации с помощью нее способа быстрого накопления молекул белка (бычьего сывороточного альбумина) в заданной области пространства при подаче

внешнего переменного напряжения с последующим детектированием накопленного аналита путем непрерывного воздействия на эту область лазерным излучением с длиной волны, принадлежащей видимому диапазону спектра, и регистрации стоксовой стоксовой компоненты рассеянного излучения.

Практическая значимость полученных в диссертации результатов подтверждается опытно-промышленными испытаниями в лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка «Объединенного института ядерных исследований» (г. Дубна, Россия) и оценкой возможности их использования, выполненной национальным исследовательским университетом «МИЭТ» (г. Зеленоград, г. Москва, Россия), о чем свидетельствуют соответствующие акты, а также актом их внедрения в учебный процесс учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» на кафедре микро- и нанoeлектроники для подготовки инженеров по специальностям 1-41 01 02 «Микро- и нанoeлектронные технологии и системы» и 1-41 01 03 «Квантовые информационные системы».

Конкретные научные результаты, за которые соискателю может быть присуждена искомая ученая степень

Диссертация Завацкого С.А. представляет собой квалификационную работу, включающую комплексные теоретические и экспериментальные исследования, выполненные на высоком научном уровне. Соискателю может быть присуждена искомая ученая степень за следующие основные научные результаты:

1. Оптимизацию и модельное обоснование достижения максимальной интенсивности ГКР-спектров молекул органических соединений, адсорбированных на поверхности наночастиц из золота и серебра, полученных путем термической кластеризации тонких пленок из соответствующих металлов.

2. Установление закономерностей протекания электрических, тепловых и гидродинамических процессов в системах из планарных золотых микроэлектродов для диэлектрофореза со встречно-штыревой и зубчатой конфигурацией, а также условий доминирования ДЭФ силы над другими силами в указанных системах, действующими на целевой объект, что позволило достичь устойчивой локализации сферических полистирольных частиц диаметром 190 нм и 520 нм, соответственно в областях максимального и минимального градиента модуля квадрата напряженности электрического поля.

3. Качественное и количественное описание с применением численных методов моделирования и флуоресцентной микроскопии движения молекул белков (лизоцима, бычьего сывороточного альбумина и лактоферрина) в ходе ДЭФ в системе зубчатых металлических микроэлектродов из золота с переменным расстоянием между каждой парой встречных зубцов и впервые выполненную экспериментальную для этих белков оценку молекулярного коэффициента Клаузиуса – Моссотти.

4. Установление закономерностей проявления эффектов ДЭФ и ГКР света в сенсорной системе на основе золотых микроэлектродов и серебряных наночастиц, расположенных на поверхности подложки из боросиликатного стекла, и экспериментальную демонстрацию накопления и детектирования в режиме реального времени молекул альбумина из его водного раствора с концентрацией 100 мкг/мл.

Рекомендации по практическому использованию результатов диссертации

Результаты диссертационной работы могут найти свое практическое применение при разработке нового типа сенсорных устройств, работающих на эффектах ДЭФ и ГКР.

Замечания и предложения по диссертации

1. В диссертационной работе содержится ряд стилистических неточностей и опечаток.

2. В главе 3 представлены результаты оптимизации условий формирования плазмонных наночастиц из золота и серебра термической кластеризацией пленок из этих металлов для получения с помощью них максимального сигнала в ГКР-спектрах органических красителей, который, как утверждается, зависит от размера полусферических наночастиц и расстояния между их границами. Однако оптимизация была выполнена исключительно путем изменения различных параметров кластеризации по протоколу, установленному статистическими методами планирования экспериментов. В диссертации отсутствуют результаты по исследованию механизма кластеризации и его ключевых аспектов, определяющих конечную морфологию массива.

3. В главе 3 на с. 101 диссертации сказано, что ГКР-спектры белков, представленные на рисунке 3.17, получены путем усреднения сигнала в 49 разных точках, зарегистрированных на поверхности массива наночастиц из серебра. Однако, в диссертации отсутствует информация об интенсивности и спектральном положении колебательных полос в каждом отдельном ГКР-спектре, что не позволяет оценить их воспроизводимость по поверхности ГКР-активной структуры.

4. В статьях 3-А и 5-А рассматривается формирование ГКР активных структур на подложке из пористого кремния, а не на стекле как в диссертации. Поэтому включение указанных статей в число публикаций по теме диссертации является нецелесообразным, хотя и свидетельствует о квалификации диссертанта.

5. В главе 4 и 5 диссертации отсутствуют результаты моделирования тепловых и гидродинамических процессов для трехмерной геометрии системы на основе зубчатых микроэлектродов из золота.

Приведенные выше замечания не снижают научной и практической ценности полученных результатов.

Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

На основе анализа содержания диссертации и полученных результатов, а также обсуждения доклада соискателя на научном семинаре можно сделать вывод, что соискатель имеет высокий уровень профессиональной подготовки, глубоко знает предмет и проблематику исследования, умеет анализировать теоретический и экспериментальный материал. Диссертационная работа Завацкого С. А. «Эффекты гигантского комбинационного рассеяния света и диэлектрофореза в системах на основе наночастиц и микроэлектродов из благородных металлов» является комплексной, самостоятельно выполненной и законченной научной работой и

соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а соискатель Завацкий С. А. достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы (материалы для электроники и фотоники).

Диссертация и отзыв заслушаны и обсуждены на основании доклада соискателя Завацкого С. А. на объединенном семинаре научных центров «Нелинейная оптика и активированные материалы», «Физика плазмы», «Нанофотоника» и «Фотоника и фотохимия молекул» ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси» (протокол № 1 от 18 апреля 2023 года). Заседание семинара проведено в соответствии с приказом директора ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси» № 52 от 05 апреля 2023 г. об отзыве на диссертационную работу Завацкого С. А..

На заседании присутствовало 20 сотрудников, из них 16 с ученой степенью. Отзыв принят открытым голосованием. В голосовании приняли участие 16 человек: 5 докторов наук (О.Н. Третинников, А.Н. Чумаков, Б.М. Джагаров, В.А. Орлович, Н.В.Тарасенко) и 11 кандидатов наук (О.С. Кулакович, Д.В. Новицкий, М.И. Неделько, И.А. Ходасевич, Н.А. Босак, М.В.Пархоц, С.В. Лепешкевич, А.И. Водчиц, В.В. Ковгар, Т.А. Павич, А.В. Бондаренко).

Результаты голосования:

«за» – 16, «против» – 0, «воздержались» – 0 .

Председатель научного собрания
доктор физико-математических наук,
профессор

В.А. Орлович

Эксперт
доктор физико-математических наук,
профессор

Н.В.Тарасенко

Секретарь научного собрания
кандидат физико-математических наук

Д.В. Новицкий