

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу

**Завацкого Сергея Андреевича**

на тему: «**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 05.16.18 «Нанотехнологии и наноматериалы (материалы для электроники и фотоники)»

### **1. Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представляется к защите**

Содержание диссертационной работы Завацкого С.А. полностью соответствует отрасли наук (физико-математические науки) и специальности 05.16.08 - «Нанотехнологии и наноматериалы (материалы для электроники и фотоники)» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. 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, 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**

Создание и исследование принципов работы устройств, совмещающих в себе компоненты электроники и фотоники, перспективны для многих практических приложений, в том числе для анализа различных веществ в жидких средах. В качестве электронного компонента таких аналитических устройств все чаще рассматривают систему планарных металлических микроэлектродов на диэлектрической подложке, обеспечивающую необходимые условия для проявления эффекта диэлектрофореза (ДЭФ). Использование явления ДЭФ позволяет улавливать, направлять и локализовать целевой объект в пространстве с высокой точностью. С другой стороны, в качестве фотонного компонента таких устройств наиболее перспективным является массив плазмонных наноструктур, способствующих возникновению эффекта гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) света от молекул, адсорбированных на их поверхности. На этом оптическом эффекте основан метод ГКР-спектроскопии, который позволяет обнаруживать и идентифицировать единичные молекулы и молекулярные ансамбли с высокой чувствительностью и точностью предсказания их структуры. В диссертации исследовалось отдельное и совместное проявление эффектов ДЭФ

и ГКР света. Результаты, полученные с помощью численного моделирования и современных экспериментальных методов исследования, включающих в себя магнетронное распыление, электронно-лучевое испарение, фотолитографию, электронную и флуоресцентную микроскопии, спектроскопию комбинационного рассеяния света, позволили автору установить физические механизмы проявления эффектов ДЭФ и ГКР света в различных условиях, а также разработать конструкцию и методики изготовления сенсорного устройства для анализа биоорганических соединений в виде белков с повышенной в сравнении с другими аналитическими подходами скоростью и чувствительностью.

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

Диссертационная работа Завацкого С.А. выполнена на высоком научном уровне и представляет собой комплексное теоретическое и экспериментальное исследование. Представленные в диссертационной работе результаты и положения, выносимые на защиту, обладают научной новизной, которая заключается в следующем:

1. Впервые совместно использованы методы статистического планирования экспериментов в нанотехнологии и численного моделирования для оптимизации процесса формирования плазмонных наночастиц из золота и серебра методом термической кластеризации их тонких пленок, демонстрирующих максимальное усиление комбинационного рассеяния света от молекул органических красителей.

2. Установлены закономерности движения полистирольных частиц разного размера за счет эффекта ДЭФ, возникающего в системах на основе планарных золотых металлических микроэлектродов со встречно-штыревой и зубчатой конфигурацией, и определены оптимальные условия для их эффективного разделения в пространстве.

3. Установлены закономерности движения молекул белков (лизоцима, альбумина, лактоферрина) за счет эффекта ДЭФ путем первой экспериментальной оценки величины их молекулярных коэффициентов Клаузиуса – Моссотти, которые показали, что для точного предсказания поведения белков под действием диэлектрофоретической силы в существующей феноменологической модели ДЭФ необходимо учитывать поляризацию среды постоянным дипольным моментом белков.

4. Предложена конструкция нового сенсорного устройства, содержащего компоненты для реализации эффектов ДЭФ и ГКР света, способное улавливать и собирать в заранее известной области пространства молекулы биоорганических соединений, а также детектировать и исследовать их структуру.



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

Полученные в диссертационном исследовании результаты обоснованы и достоверны, основываются на фундаментальных положениях электростатики, электродинамики, химии и термодинамики и не противоречат данным, представленным другими авторами в литературе. Необходимо отметить, что в ходе выполнения работы соискатель выполнил ряд важных предварительных исследований и проанализировал возможность использования наночастиц благородных металлов на наноструктурированном кремнии в качестве фотонной составляющей сенсорного устройства, в результате которых был сделан обоснованный выбор в пользу наночастиц золота и серебра с аналогичными структурными и оптическими параметрами на подложках из стекла. Все выводы, выработанные автором в процессе подготовки диссертации, касающиеся как электронной, так и фотонной составляющих сенсора аргументированы, подтверждены результатами проведенных исследований и отражают научные положения, представленные в диссертации.

#### **5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации**

*Научная значимость* результатов диссертации состоит в получении новых знаний о механизмах усиления ГКР света плазмонными наночастицами золота и серебра, полученными путем термической кластеризации их тонких пленок, величине и направлении диэлектрофоретической силы, действующей на полистирольные частицы и молекулы белков в системах планарных металлических микроэлектродов различной конфигурации.

*Практическая значимость* заключается в разработке нового типа сенсорного устройства для анализа различных веществ в медицине, биологии и экологии. Представленные в диссертации результаты по объединению эффектов ДЭФ и ГКР света в одном устройстве для детектирования и идентификации молекул бычьего сывороточного альбумина свидетельствуют о перспективности использования таких устройств для аналитических приложений.

Полученные результаты диссертационного исследования были применены при выполнении научно-исследовательских работ в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна, Россия) и Национальном исследовательском университете «МИЭТ» (г. Зеленоград, Россия), что подтверждено соответствующими актами.

*Экономическая значимость* полученных результатов заключается в повышении производительности, сокращении трудозатрат и себестоимости аналитических исследований с использованием новых сенсорных устройств, объединяющих в себе компоненты для реализации эффектов ДЭФ и ГКР света, которые могут производиться в больших масштабах.

*Социальная значимость* результатов диссертационного исследования заключается в использовании полученных результатов для подготовки научных и инженерных кадров путем увеличения объема их знаний в области разработки методов пространственного управления различными объектами и их обнаружения, а также методик формирования и исследования свойств микро- и наноразмерных объектов.

## **6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати**

Представленные в диссертационной работе научные результаты опубликованы в 11 научных работах, включая одну коллективную монографию, 4 статьи в рецензируемых научных журналах в соавторстве, в том числе, международных с высоким рейтингом (*Analytical Chemistry, Microporous and Mesoporous Materials, Journal of Raman Spectroscopy, Biosensors*), что отражает высокий уровень полученных научных результатов, 2 статьи и 4 тезиса докладов в сборниках материалов научных конференций.

Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, составляет 8,4 авторского листа. Материалы, опубликованные в перечисленных работах, и личный вклад в них соискателя достаточно полно отражают научные и практические результаты диссертации.

Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы, выводам и положениям, которые выносятся на защиту.

## **7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК**

Оформление диссертации и автореферата полностью соответствует требованиям ВАК. Рассматриваемая диссертация представляет собой цельную законченную работу с логическим и последовательным изложением материала.

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

Анализ содержания диссертационной работы и автореферата, наличие публикаций в научно-технических журналах высокого уровня, доклады по теме диссертации на научных международных конференциях и участие соискателя в исследованиях в рамках государственных научных программ, договоров с БРФФИ и Министерством образования Республики Беларусь, соответствующих перечню приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь, позволяют заключить, что научная квалификация соискателя Завацкого С.А. полностью соответствует ученой степени кандидата физико-математических наук по заявленной специальности.



## 9. Замечания

1. В диссертационной работе большое внимание уделено влиянию толщины пленок золота и серебра на морфологию, размеры и плотность наночастиц металлов. Однако в работе не указан метод определения толщины пленок.

2. В работе не проведен анализ морфологии, сплошности исходных пленок металлов, которые могут оказывать влияние на формирование наночастиц.

Приведенные выше замечания не затрагивают основных положений и выводов, содержащихся в диссертации, и не снижают научной, практической, экономической и социальной ценности полученных результатов.

## 10. Заключение

Диссертация Завацкого С. А. «Эффекты гигантского комбинационного рассеяния света и диэлектрофореза в системах на основе наночастиц и микроэлектродов из благородных металлов» является завершенной самостоятельной квалификационной работой, соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, содержит новые научно обоснованные результаты, совокупность которых имеет важное научное значение для развития методов аналитических исследований целевых веществ в жидких многокомпонентных средах.

Считаю, что Завацкий С. А. в соответствии с требованиями п. 21 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы (материалы для электроники и фотоники) за следующие новые научно обоснованные результаты, включающие:

1. установленные особенности получения максимальных сигналов гигантского комбинационного рассеяния света на массивах наночастиц золота (серебра) размером 14-28 нм (30-64 нм) с расстоянием между их границами 12-118 нм (35-53) нм для излучения лазера с длиной волны 633 нм (532 нм) от молекул радомина 6Ж

2. установленные особенности локализации сферических частиц из полистирола диаметром 190 нм в областях с максимально достижимым градиентом напряженности электрического поля, а диаметром 520 нм – при его отсутствии, за счет действия на них диэлектрофоретической силы, создаваемой неоднородным электрическим полем между встречно-штыревыми электродами (из золота) при приложении к ним переменного напряжения амплитудой 10 В и частотой от 1 до 5 МГц, которые зависят от силы трения, вызванной миграцией потоков жидкости за счет электротермического эффекта, и могут быть

подавлены путем использования водных сред с удельной проводимостью менее  $10^{-2}$  См/м и уменьшения площади поверхности микроэлектродов на 36 %.

Официальный оппонент –  
директор государственного центра  
«Белмикроанализ» открытого  
акционерного общества  
«ИНТЕГРАЛ» - управляющая  
компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,  
кандидат физико-математических наук



Петлицкий А. Н.

*Будущее Белмикроанализа А.Н.  
уверено.  
Вер. с. Белмикроанализ УП ОАО «Интеграл»  
А.Н. Ясун*

