



МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА  
(МГУ)



ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Ленинские горы, Москва, ГСП-1, 119991  
Телефон: 939-3160, Факс: 932-8820

№ \_\_\_\_\_  
На № \_\_\_\_\_

**Отзыв научного консультанта на диссертационную работу Икрамовой  
Салтанат Бауыржанқызы «Влияние пористости на электрические и оптические  
свойства наноструктурированных полупроводниковых сенсоров», представленную  
на соискание ученой степени доктора философии PhD по специальности «6D071900 -  
Радиотехника, электроника и телекоммуникации»**

Кремниевые нанонити и металлические плазмонные наночастицы в настоящее время являются перспективными нанообъектами для применения в полупроводниковой электронике и оптоэлектронике, а также в различных сенсорах и устройствах, в частности индикаторах обнаружения минимальных концентраций активных молекул, а также оптических системах передачи и обработки информации. Сенсорные кремниевые нанонити и пористые пленки привлекают исследовательский интерес в качестве шаблонов для SERS-диагностики химически активных молекул и биомолекул из-за высокого отношения поверхности к объему, шероховатости и возможности перестройки размеров пор. Большой интерес сенсорному элементу на основе кремниевых нанонитей и плазмонных наночастиц обусловлен не только их ценными для практического применения свойствами, но и в связи с научными проблемами, такими как взаимовлияние усиленных электрических полей от полупроводниковых и металлических наноструктур на формирование электрических и оптических откликов в нанокompозитных системах. В этой связи не до конца определена природа электромагнитного усиления в SERS-эффекте в структурах кремниевых нанонитей с осажденными на их поверхности металлическими плазмонными наночастицами, а также слабо изучены сенсорные применения таких структур, в частности не исследовано влияние пористости на их электрические и оптические характеристики.

Поэтому в диссертационной работе Икрамовой Салтанат Бауыржанқызы была поставлена следующая цель: экспериментальное исследование влияния пористости на электрические и оптические сенсорные отклики полупроводниковых сенсорных элементов на основе слоев кремниевых нитевидных наноструктур с осажденными на их поверхность наночастицами золота.

Вышеизложенное позволяет утверждать, что тема диссертационной работы Икрамовой Салтанат Бауыржанқызы актуальна как в общенаучном, так и прикладном плане.

Новизна данной работы заключается в том, что экспериментально исследованы влияние пористости на электрические сенсорные отклики полупроводниковых чувствительных материалов на основе кремниевых нанонитей с осажденными наночастицами золота в парах газообразного аммиака и выявлено оптимальное значение пористости около 70 % для достижения максимальной чувствительности; исследованы оптические сенсорные отклики от молекул органических красителей в наноструктурированных сенсорных материалах и установлено, что оптимальная пористость таких структур для оптического детектирования молекул составляет около 50%;

установлено, что сенсорные материалы можно использовать для оптического детектирования молекул органических красителей при концентрации порядка  $10^{-15}$  моль.

Безусловно, результаты, полученные в диссертационной работе, способствуют лучшему пониманию электрических и оптических откликов сенсорных элементов на основе пористых кремниевых нанонитей и могут быть применены при изготовлении новых типов молекулярных сенсоров и повышения эффективности их работы.

Диссертационная работа состоит из 5 глав. В первой главе представлен теоретический обзор принципа работы газовых сенсоров на основе полупроводников, роли пористой наноструктуры в сенсорной технологии, методов получения пористых кремниевых наноструктур, типов пористости, электрических и оптических свойств газовых сенсоров, созданных на основе пористой кремниевой наноструктуры, эффекта поверхностного комбинационного рассеяния света (SERS).

Во второй части рассказывается о методах проведения экспериментов и основных измерительных установках. Показаны принципиальная схема каждого метода и основные параметры установок, использованных в диссертационном исследовании.

В третьей части проанализированы результаты полученных в работе экспериментальных данных по морфологии кремниевых нанонитей и размеру металлических наночастиц, элементному составу наноструктур и значениям пористости.

В четвертой части приведены результаты измерения электрических сенсорных откликов образцов чистых кремниевых нанонитей (SiNWs), а также нанонитей с осажденными на их поверхность наночастицами золота (SiNWs: Au-NPs), при их нахождении в парах аммиака, а также определены оптимальные значения пористости наноструктур и длины кремниевых нанонитей, которые обеспечивают высокие значения их электропроводности и сенсорного отклика. Доказано, что присутствие наночастицы золота на поверхности кремниевой нанонити увеличивает электропроводность сенсорного элемента.

В пятой части обсуждаются результаты измерения оптических откликов для чувствительных элементов на основе SiNWs и SiNWs: Au-NPs при детектировании молекул метиленового синего и родамина В. Установлено, что максимальный сенсорный отклик (сигнал SERS) достигается для чувствительного элемента SiNWs: Au-NPs с длиной порядка  $35 \mu\text{m}$ , пористостью  $55 \pm 5\%$ , для которых с коэффициентом усиления порядка  $10^5$  можно детектировать молекулы аналита с порогом обнаружения 1 фМ. При этом, коэффициент усиления для сенсорного элемента SiNWs: Ag-NPs оказался даже больше, однако стабильность сенсорных характеристик была ниже.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обусловлена проведением исследований на современном сертифицированном оборудовании с привлечением современных методик. Полученные результаты апробированы докладами на профильных международных конференциях, публикациями в международных научных журналах, входящих в базу Web of Science и/или Scopus с импакт факторами: 6,628, 2,921. На момент представления диссертации имеются уже 6 цитирований статей с полученными результатами в реферируемых журналах по направлению исследования. Диссертационная работа также выполнена в рамках НИР по программе грантового финансирования научных исследований КОКНВО РК по теме: «Взаимосвязь нелинейных электрических, оптических и фрактально-геометрических характеристик наноструктурированных полупроводников», № ГР 0118РК00200 (в 2018 - 2020 г) и программы совместных исследований Назарбаев Университета (CRP) «Разработка и валидация гибридной спектроскопии Бриллюэна-Рамана для неинвазивной оценки механохимических свойств белков мочи как биомаркеров заболеваний почек» № 091019CRP2105 (2020-2022 г.).

Соискатель проходила стажировку в лаборатории перспективных исследований материалов и лазерных технологий (AMRELAT) Назарбаев Университета г. Астана под руководством профессора Утегулова Ж. Н. в течение 5 месяцев и работала там в должности младшего научного сотрудника. В процессе работы соискатель проявил себя наилучшим

образом. Соискателем в составе исследовательской группы отработана технология получения и методика структурной и плазмонной модификации электронных и оптических свойств тонких пленок кремниевых нанонитей. Я высоко ценю ее качества как ученого и исследователя, продолжаю научное сотрудничество с ней в настоящее время .

В заключении отмечу, что Икрамова Салтанат Бауыржанкызы выполнила все поставленные перед ней задачи, цель диссертационной работы достигнута полностью. На основании выше изложенного считаю, что диссертационная работа Икрамовой С.Б. «Влияние пористости на электрические и оптические свойства наноструктурированных полупроводниковых сенсоров» отвечает всем предъявленным требованиям «Правил присуждения ученых степеней», а ее автор Икрамова С.Б. заслуживает присуждения искомой степени доктора философии PhD по специальности «6D071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации».

Зарубежный научный консультант  
Тимошенко Виктор Юрьевич,  
доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры физики низких температур и сверхпроводимости  
физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

