

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

**Рогова Олега Юрьевича**

**«Формирование и исследование фотонных наноструктур методами**

**электронной и ионной микроскопии»,**

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности

01.04.07 - Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа О. Ю. Рогова посвящена вопросам формирования хиральных фотонных наноструктур в тонких слоях серебра и эпитаксиальных структурах кремний-на-сапфире (КНС) с использованием фокусированного ионного пучка (ФИП), исследованию изготовленных наноструктур методами растровой электронной микроскопии (РЭМ), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и рентгеновского микроанализа.

Работа О. Ю. Рогова является актуальной, поскольку в ней исследуются особенности изготовления хиральных фотонных метаматериалов с применением прецизионного контроля ФИП, что обеспечивает применимость сформированных данным методом наноструктур для решения широкого спектра практических задач в современной оптике.

Работа состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы, определены научная новизна, практическая и теоретическая значимость результатов исследования, перечислены методы исследования, изложены выносимые на защиту научные положения, аргументирована достоверность полученных результатов. Здесь же дана информация об апробации и личном вкладе автора диссертации, публикациях по теме исследования, кратко описаны структура и содержание диссертации.

Первая глава представляет собой обзор литературы и посвящена анализу

результатов, полученных в предметной области к моменту начала исследований по тематике диссертации. Обсуждаются и самые современные технологические подходы изготовления метаматериалов различного практического назначения. На основе литературного обзора автором сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена описанию методики проведения экспериментов с помощью растровой электронной и ионной микроскопии. Здесь обсуждаются подходы к формированию единичных наноструктур и их двумерных массивов в тонких пленках серебра толщиной менее 300 нм. Поясняются детали подготовки шаблонов и выбора оптимальных параметров ионного пучка для травления материала образца. Рассматривается изготовление наноструктур в виде щелевых массивов и обсуждается их оптическая диагностика.

Третья глава посвящена изготовлению хиральных фотонных наноструктур различной симметрии в тонких серебряных пленках. Изложены результаты экспериментов по формированию хиральных фотонных наноструктур в свободно подвешенных серебряных мембранах и наноструктур в серебряных пленках на стеклянной подложке. Рассмотрены результаты оптической диагностики наноструктур симметрии 3, 4 и 6 порядка, изготовленных в серебряной пленке на стеклянной подложке и наноструктур симметрии 4 порядка, сформированных в свободно подвешенной серебряной мембране. Особо хочу отметить исследования автора в свободно подвешенной серебряной мембране, это сложная задача, которая потребовала от Рогова О. Ю. большого искусства в экспериментальных навыках.

Четвертая глава посвящена вопросам изготовления хиральных фотонных наноструктур в эпитаксиальных структурах кремний-на-сапфире. Отмечено снижение оптического пропускания в видимом диапазоне светового спектра вследствие формирования нарушенного слоя в кремнии. На основании данных, полученных по результатам ПЭМ исследований и рентгеновского

микроанализа поперечных срезов массива хиральных наноструктур, автором предложена методика повышения оптического пропускания в видимом диапазоне образца КНС путем термического окисления относительно показателей исходного образца.

Пятая глава посвящена решению задачи определения рельефа поверхности хиральных фотонных наноструктур в КНС методами трёхмерной ФИП-томографии. Ценность результатов заключается в применимости полученных трехмерных моделей в задачах численного моделирования оптических спектров. Отмечается согласованность результатов оптической диагностики наноструктур и теоретических спектров пропускания, кругового дихроизма и оптического вращения.

В заключительной части автор резюмирует основные результаты работы.

#### **Замечания по диссертационной работе:**

- 1) В Главе 2 речь идет об использовании численных алгоритмов «разложения траектории луча в пиксельный растр», как можно оценить их точность?
- 2) В обсуждении оптической диагностики наноструктур (Глава 3, раздел 3; Глава 5, раздел 4) описание теоретической модели изложено кратко. Здесь можно было не экономить место и время, поскольку это представляется важным, так как геометрия профиля метаматериала определяет его оптические характеристики.
- 3) В Главе 5 при описании ФИП-томографии для определения рельефа метаматериала следовало бы подробнее обозначить ограничения используемого метода сегментации. Насколько применим данный метод для структур другой микрогеометрии и периодичности, нужно было указать?
- 4) При достаточно высоком качестве оформления работы следует отметить ряд неточностей, которые могут быть отнесены к опечаткам. Например, одновременное использование терминов «переосаждение» и

«перепыление» материала (стр. 70) и некоторые другие.

В целом работа Рогова О. Ю. вызывает интерес у физиков, занимающихся электронной микроскопией или имеющих дело с микроструктурой вещества, она содержит обзор современных технологических подходов изготовления метаматериалов и ценные сведения о формировании хиральных фотонных наноструктур в тонких слоях серебра и эпитаксиальных структурах кремний-на-сапфире с использованием фокусированного ионного пучка.

Указанные замечания не снижают высокой значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования. Диссертация изложена ясным физическим языком, выполнена на высоком уровне и представляет собой законченное научное исследование на актуальную тему. Диссертация Рогова О. Ю. является законченным самостоятельным научным исследованием и содержит новые научно обоснованные решения важных научных и практических проблем.

Результаты работы, включая содержание защищаемых положений, в достаточной степени опубликованы в ведущих рецензируемых журналах с высоким импакт-фактором, апробированы на Всероссийских и Международных конференциях по микроскопии. Автореферат точно и полно отражает содержание диссертации, характеризуют результаты проведенных исследований. Личный вклад автора и его высокая квалификация не вызывает сомнения. По объему и научному уровню выполненных исследований, новизне и обоснованности положений и выводов, их научной и практической значимости диссертационная работа Рогова О. Ю. «Формирование и исследование фотонных наноструктур методами электронной и ионной микроскопии» полностью удовлетворяет всем требованиям, «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени

кандидата наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния, а ее автор, Рогов Олег Юрьевич, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени.

Официальный оппонент

Доктор физ.-мат. наук,

Заведующий лабораторией физического

материаловедения полупроводников

ФИАН им. П. Н. Лебедева РАН

Б. А.

Аронзон Борис Аронович

« 18 » декабря 2019 г.

ФГБУН Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН г. Москва,  
Ленинский проспект, д. 53

тел.: +7 (499) 135-14-29

e-mail: [aronzon@mail.ru](mailto:aronzon@mail.ru)

Подпись Аронзона Б. А. заверяю,

Ученый секретарь ФИАН им. П. Н. Лебедева



Колобов А. В.