

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 Рогова О. Ю. посвящена формированию хиральных фотонных наноструктур в тонких слоях серебра и структурах кремний на сапфире (КНС) с использованием фокусированного ионного пучка (ФИП), обладающих высоким оптическим пропусканием, круговым дихроизмом и оптическим вращением в видимом диапазоне светового спектра, и исследованию изготовленных наноструктур методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии, а также рентгеновского микроанализа. Она состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, словаря терминов, списка публикаций автора по теме диссертации из 6 наименований, списка литературы из 137 наименований, списка рисунков. Ее содержание изложено на 115 страницах, включая 43 рисунка и 1 таблицу.

Во введении диссертации обоснована актуальность выполненного исследования, направленного на изготовление с применением фокусированного ионного пучка оптических структур в субмикронном диапазоне размеров, которые обладают особыми свойствами, и характеристику полученных структур методами электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа. В нем приведены цели и задачи, сформулированы научная новизна и основные положения, выносимые на защиту, описана практическая значимость работы и ее достоверность, охарактеризован личный вклад автора, представлены сведения об апробации работы и основных публикациях.

Тема диссертационной работы О.Ю. Рогова является актуальной, поскольку в ней рассматривается формирование наноструктур, а также их периодически расположенных массивов, которые позволяют заданным образом изменять оптические характеристики

электромагнитного излучения для видимого диапазона спектра. Создание таких структур является одним из наиболее перспективных и динамично развивающихся направлений современной фотоники. Они используются для изготовления оптических спектральных и поляризационных фильтров, при решении задач усиления стимулированной эмиссии, для определения концентрации газов и др.

Эффективным методом получения указанных наноструктур является технология, основанная на применении фокусированного ионного пучка, позволяющая изготавливать наноразмерные объекты сложной трехмерной геометрической формы. Характеризация массивов сформированных наноструктур осуществляется методами растровой электронной микроскопии, а отдельных нанообъектов – методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа, которые позволяют выявить нарушения материала, возникающие при воздействии ионного пучка.

Первая глава представляет собой обзор литературных данных по тематике диссертации. В ней приведены сведения о метаматериалах на основе структурированных поверхностей, представлены методы изготовления таких материалов, включая электронную литографию, литографию наносферами, коллоидную литографию, детально рассмотрена технология фокусированного ионного пучка и ее применение для формирования наноструктур трехмерной формы, и проанализированы возникающие при этом проблемы. В главе рассмотрены использованные в работе методы исследования и характеристики метаматериалов – растровая электронная микроскопия, в том числе трехмерная реконструкция с применением ФИП, просвечивающая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ.

Вторая глава посвящена описанию изготовления фотонных наноструктур методом ФИП. В ней приведены сведения об использованных в работе образцах из благородных металлов и полупроводников, обсуждается формирование цифрового шаблона для распыления (травления) материала образца, особенности изготовления периодических массивов наноструктур для задач фотоники. В конце главы детально описана процедура изготовления трехмерных наноструктур по цифровым шаблонам, позволившая с высокой точностью сформировать заданный рельеф на поверхности образца и получить хиральные фотонные наноструктуры, представлены значения параметров работы прибора FEI Scios, при которых формировались эти наноструктуры.

В третьей главе рассматривается изготовление массива хиральных фотонных трехмерных наноструктур с периодом 375 нм в тонких свободноподвешенных пленках серебра с отдельными элементами, имеющими вид четырехзаходной спирали и обладающими точечной симметрией C_4 . Вторым типом созданных структур являются

хиральные фотонные наноструктуры с симметрией C_3 , C_4 и C_6 с периодом 360 нм в серебряной пленке толщиной 260 нм на подложке из стекла.

Для сформированных наноструктур получены их оптические характеристики: показатель пропускания, оптическое вращение и круговой дихроизм в зависимости от длины волны. Показано, что щелевые массивы хиральных наноструктур характеризуются высокими значениями оптического пропускания и экстремальными значениями кругового дихроизма и оптического вращения. Для хиральных наноструктур, изготовленных в серебряных пленках на стеклянной подложке, показатели кругового дихроизма и оптической активности достигают экстремальных значений в области низкого пропускания длин волн видимого диапазона, при этом минимальное пропускание достигается на длине волны приблизительно равной 500 нм.

В четвертой главе описано формирование оптических хиральных наноструктур в слое монокристаллического кремния, расположенного на подложке сапфира. Методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа установлено, что под воздействием ионного пучка на поверхности кремния формируется нарушенный слой, обогащенный ионами галлия. Для устранения его негативного влияния на оптические свойства наноструктур образец подвергался термическому окислению при температуре 1100° в течение примерно 25 мин, после которого оптическое пропускание массива наноструктур увеличивалось до 55% по сравнению с его значением до отжига.

Пятая глава посвящена определению формы хиральных наноструктур в кремнии на сапфире методом ФИП-томографии. Его применение позволило установить рельеф поверхности и приповерхностных слоев образца и построить трехмерную модель наноструктуры после термического окисления. Оптические исследования показали, что после окисления восстанавливается прозрачность хиральных наноструктур в видимом диапазоне светового спектра. Форма поверхности кристаллического кремния в наноструктурах, формирующаяся после окисления, была использована для численного моделирования теоретических спектров пропускания, поглощения и оптического вращения, которые качественно согласуются с экспериментальными данными.

Характеризуя диссертационную работу в целом, следует отметить, что она представляет собой законченное исследование, выполненное с использованием оборудования последнего поколения, современных методов получения и обработки экспериментальных данных. В ней получены новые результаты, связанные с формированием с помощью ФИП обладающих особыми оптическими свойствами массивов фотонных хиральных наноструктур в свободноподвешенной серебряной пленке, пленке серебра на подложке из стекла, монокристаллическом кремнии на сапфире, а также их исследованием

методами электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа. Отметим наиболее важные из них.

1. Показано, что применение метода ФИП с программируемыми цифровыми шаблонами для формирования хиральных фотонных наноструктур обеспечивает экстремальные показатели кругового дихроизма и оптического вращения. Такие структуры были изготовлены в свободноподвешенной серебряной пленке для симметрии 4 порядка, в тонкой пленке серебра на подложке из стекла для симметрии 3, 4, 6 порядка и в эпитаксиальной структуре кремний на сапфире для симметрии 4 порядка.

2. Развита методика, позволяющая уменьшить негативное влияние нарушенного слоя кремния, возникающего при формировании массива хиральных фотонных наноструктур с применением фокусированного пучка ионов галлия, на их оптические свойства, а также определить форму отдельных наноструктур методом ФИП-томографии.

3. Практически важным результатом работы является предложенный комплекс методов разработки, изготовления и диагностики оптических наноструктур, включающий метод фокусированного ионного пучка, растровую и просвечивающую электронную микроскопию, рентгеновский микроанализ и трехмерную ФИП-томографию.

Результаты диссертационной работы получены при непосредственном участии ее автора. Хиральные фотонные наноструктуры формировались методом фокусированного ионного пучка с применением хорошо апробированных процедур. Полученные структуры исследовались оптическими и электронно-микроскопическими методами, обладающими высокой степенью достоверности. Экспериментально найденные оптические характеристики для хиральных наноструктур, изготовленных в кремнии на сапфире, сопоставлены и качественно согласуются с расчетными данными.

Основные научные положения и результаты диссертации опубликованы в 12 работах, включая 6 тезисов докладов на различных конференциях и симпозиумах и 6 статьях в рецензируемых зарубежных журналах, все из которых входят в Перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и реферируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

В диссертационной работе имеется ряд недочетов, перечисленных ниже.

1. Для оптических хиральных наноструктур, изготовленных в свободноподвешенных серебряной пленке и пленке серебра на стекле, остается неясным, насколько точно воспроизводится задаваемая форма таких структур при их формировании методом фокусированного ионного пучка.

2. В диссертации не описаны процедуры подбора оптимальных режимов травления фокусированным ионным пучком, а также определения времени экспозиции для различных материалов образца.

3. В работе отсутствуют оценки точности определения формы кристаллического кремния методом ФИП-томографии для хиральных наноструктур, изготовленных на платформе кремний на сапфире и подвергнутых окислению для трансформации нарушенного слоя кремния в SiO_2 .

4. Хотя диссертация неплохо оформлена и достаточно ясно изложена, в ее тексте встречаются погрешности, например, на стр. 9 написано, что она состоит из трех глав, а их пять, многократно вводится аббревиатура ФИП, имеются стилистические и грамматические ошибки на стр. 53, 65 и др.

Отмеченные недостатки не влияют на значимость полученных в диссертационной работе результатов и ее общую положительную оценку.

Текст автореферата полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Рогов О. Ю. полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, и ее автор заслуживает присуждения ему искомой степени.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой общей физики

Национального исследовательского университета «МИЭТ»

Н.И. Боргардт

Подпись Николая Ивановича Боргардта заверяю,

ученый секретарь МИЭТ,
кандидат технических наук, профессор



Н.М. Ларионов

14.01.2020 г.

Сведения о месте работы оппонента:

124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Заведующий кафедрой общей физики

Начальник научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии

Телефон: (499) 720-85-58

Электронная почта: borgardt@miee.ru