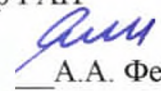


«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор – начальник Управления
научной политики и организации
научных исследований

МГУ им. М.В. Ломоносова,

д.ф.-м.н., профессор РАН



А.А. Федянин



2019 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Факультет наук о материалах, на диссертационную работу Рогова Олега Юрьевича «Формирование и исследование хиральных фотонных наноструктур методами электронной и ионной микроскопии», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 — «Физика конденсированного состояния»

Диссертация Рогова Олега Юрьевича посвящена изготовлению фотонных и хиральных наноструктур методами ионной микроскопии с помощью фокусированного ионного пучка (ФИП), и исследованию физических свойств этих наноструктур методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии. Поскольку оптические свойства таких структур в значительной мере зависят от процесса формирования структуры и точности передачи заложенного «отпечатка» ионным пучком, в диссертационной работе также исследуются современные подходы осуществления прецизионного контроля ФИП с помощью специально подготавливаемых цифровых шаблонов, определению оптимальных параметров травления ФИП и диагностике наноструктур методами трехмерной реконструкции на основе ФИП-томографии. Необходимость совершенствования существующих методов литографии оптических наноструктур, разработки новых подходов изготовления и исследования фотонных метаматериалов, рассматриваемых в работе, обладает высокой практической значимостью для задач современной фотоники.

Научная новизна рассматриваемой работы заключается в следующем:

1. Методом ФИП по запрограммированным цифровым шаблонам изготовлены массивы хиральных фотонных наноструктур в свободноподвешенной серебряной пленке с симметрией 4 порядка. Структуры обладают экстремальными значениями кругового дихроизма и оптического вращения.
2. Методом ФИП по запрограммированным цифровым шаблонам изготовлены массивы фотонных хиральных наноструктур с симметрией 3, 4 и 6 порядка в пленке серебра на подложке из стекла. Структуры обладают экстремальными значениями кругового дихроизма и оптического вращения.
3. Методом ФИП в платформе кремний-на-сапфире (КНС) изготовлены хиральные наноструктуры симметрии 4 порядка; с применением технологии термического окисления с сохранением симметрии наноструктуры получено значительное повышение оптического пропускания, оптического вращения и кругового дихроизма.
4. Методами растровой электронной и ионной, просвечивающей микроскопии и рентгеновского микроанализа выполнены исследования фотонных хиральных наноструктур на основе кремния в платформе КНС до и после их термического окисления.
5. Впервые методами трехмерной ФИП-томографии определен рельеф хиральных фотонных наноструктур в платформе КНС после термического окисления в виде трехмерной модели.

Диссертационная работа Рогова О.Ю. изложена на 115 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения, выводов и списка литературы из 137 источников.

Во введении дана оценка современного состояния методов изготовления и исследования оптических метаматериалов, обоснована актуальность работы, показана её научная и практическая значимость, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор литературы, в котором рассмотрены современные методы литографии, изготовления и диагностики оптических наноструктур. Особое внимание уделено применимости ФИП-технологий для изготовления оптически активных наноструктур, обосновано использование ФИП для быстрого и эффективного формирования хиральных фотонных наноструктур активных в оптическом диапазоне.

Вторая глава посвящена решению задач, связанных с особенностями подготовки цифровых шаблонов изготовления наноструктур оптически активных в видимом диапазоне с помощью ФИП-литографии. Особое внимание уделяется алгоритму

подготовки и программированию цифрового шаблона, приводятся результаты профилирования поверхности ионным пучком по заданному шаблону в серебряной свободно подвешенной пленке. Обоснован выбор методики формирования фотонных наноструктур с помощью ФИП-литографии по цифровым программируемым шаблонам и приведены результаты оптических экспериментов для щелевых решеток, изготовленных данным методом ФИП.

В третьей главе описываются эксперименты по изготовлению хиральных трехмерных фотонных наноструктур методом ФИП-литографии в тонких свободноподвешенных пленках серебра и в тонких пленках серебра на стекле. Особенно интересны результаты, полученные для массивов хиральных трехмерных наноструктур: оптическая диагностика сформированного метаматериала показала возможность достижения оптического вращения до 90° и кругового дихроизма до 0.9 в видимом диапазоне спектра.

Четвертая глава посвящена решению задачи формирования хиральных фотонных наноструктур в эпитаксиальной структуре кремний-на-сапфире. Рассматривается исследование и оценка влияния имплантации галлия на формирование нарушенного слоя аморфного кремния. На основании результатов ПЭМ-исследования с применением рентгеновского микроанализа, позволившего количественно оценить глубину имплантации галлия в процессе ионной литографии, предложена методика термического окисления кремния. Предложенный автором подход обеспечивает сохранение хиральности наноструктуры и симметрии элементов массива с повышением оптической прозрачности ФИП-обработанного КНС.

В пятой главе рассмотрена задача определения рельефа хиральных фотонных наноструктур в КНС, решаемая методами РЭМ-ФИП трехмерной реконструкции. Реконструкция выполнена для изготовленных ФИП наноструктур до и после их термического окисления. Комплекс методов трехмерной реконструкции позволяет проводить исследование образца с высоким для РЭМ разрешением исследуемого объема образца, создавая трехмерные модели на основе полученных серий РЭМ изображений, а также дополнить полученной АСМ-топографию поверхности кремния до термического окисления образца. В результате обработки изображений автором получена трехмерная модель, позволяющая сделать выводы о целостности слоев и форме наноструктуры после термического окисления. Ценность полученных автором результатов заключается в применимости использования созданных методами трехмерной ФИП-реконструкции трехмерных моделей слоев образца в задачах численного моделирования, что подтверждается сопоставлением экспериментов оптической диагностики наноструктур и

соответствующих теоретических расчетов для оптических спектров пропускания, кругового дихроизма и оптического вращения.

В заключении приведены основные результаты проведенных исследований и сделаны выводы.

Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Практическая значимость работы достаточно велика за счет предложенного комплекс методов разработки, изготовления и диагностики наноструктур для видимого диапазона. Полученные в ходе работы результаты применимы для промышленного изготовления оптических метаматериалов с экстремально высокими показателями оптического вращения и кругового дихроизма. Вместе с тем, исследование влияния имплантации галлия при использовании ФИП для обработки эпитаксиальных структур КНС и предложенный технологический подход к уменьшению нарушенного слоя в кремнии с сохранением симметрии наноструктур обладают высоким прикладным потенциалом для создания новых функциональных материалов и решения широкого спектра практических задач в современной фотонике.

По диссертации Рогова О.Ю. можно сделать следующие замечания:

1. В работе не обсуждается количественное соответствие геометрии цифровых шаблонов ФИП-литографии и формируемых данным методом хиральных наноструктур. В то же время именно количественно соответствие этих данных является ключевым аспектом и основой для применения разрабатываемого метода при промышленном изготовлении метаматериалов.
2. Недостаточно полным кажется изложение методической части работы в части характеристики оптических свойств сформированных массивов наноструктур. Так, в работе указано, что измерения оптического пропускания, оптического вращения и кругового дихроизма выполнены на эллипсометре с размером фокусированного пучка 50 мкм, при размере образцов, составляющем 30 мкм, а нормировка спектров выполнена на спектр пропускания квадратного отверстия размером 30 мкм. В работе не приведено сопоставления спектров, обуславливающих применимость данного подхода при условии малой толщины и частичной прозрачности тонких пленок, а также возможного рассеяния излучения на образцах.
3. Из текста диссертации не ясно, чем в большей степени определяются оптические свойства формируемых массивов: хиральной структурой единичных объектов или периодом/решеткой структур в массиве? При обсуждении оптических свойств не выделены коллективные интерференционные эффекты между наноструктурами и эффекты от единичных структур. При этом структуры симметрии C_4 созданы в

квадратной решетке, а С3/С6 в гексагональной, что только затрудняет интерпретацию данных. В работе даже представлены образцы с варьируемым расстоянием между центрами наноструктур (для шаблонов КНС), однако оптические характеристики данных массивов не обсуждаются. При этом спектральное положение аномалий в спектрах ОВ/КДД для данных образцов позволило бы с легкостью разделить эффекты. В целом, несмотря на общую сходимость с результатами моделирования, интерпретация оптических характеристик кажется излишне упрощенной. В работе имеются указания на формирование автором нехиральных массивов, однако не приведено сопоставления оптических свойств хиральных и нехиральных массивов.

4. В работе не обосновывается выбор толщины наноструктур серебра и КНС (хотя их толщина существенно варьируется). Из текста диссертации следует, что попытки формирования структур различной толщины и изучения их оптических характеристик предпринимались в работе (наличие ссылки на рисунок 3.6а), однако указанные данные на рисунке отсутствуют (приведены спектры лишь для одной толщины пленки). В выводах к главе 3 также указана возможность возбуждения плазмонного резонанса Фано, однако из данных приведенных в главе неясно, в каких условиях он наблюдается и интерференцией каких процессов он обусловлен.
5. В качестве пожелания, при проведении дальнейших работ, хотелось бы отметить целесообразность исследования свободностоящих хиральных наноструктур серебра с помощью энергодисперсионной просвечивающей микроскопии (EFTEM) или картирования энергетических потерь электронов в низкоэнергетической области с целью визуализации плазмонных возбуждений в наноструктурах подобного рода.

Отмеченные недостатки не снижают высокой научной и практической ценности работы, не влияют на общее впечатление о работе и на ее положительную оценку. Выводы диссертационной работы достоверны, подтверждены количественными оценками и не вызывают сомнений. Диссертация Рогова Олега Юрьевича “Формирование и исследование хиральных фотонных наноструктур методами электронной и ионной микроскопии”, соответствует паспорту специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния в части 1 «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры

и давления», части 6 «Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами» и части 7 «Технические и технологические приложения физики конденсированного состояния».

Материал диссертации изложен последовательно, рисунки, графики и таблицы хорошо иллюстрируют содержание текста. Сформулированные выводы к каждой главе позволяют целостно воспринимать материал. Диссертация представляет собой цельную научно-исследовательскую работу по актуальной тематике и обладает существенной практической значимостью. Материалы диссертационной работы Рогова О.Ю. опубликованы в виде 6-и статей в высокорейтинговых рецензируемых международных журналах, (включены в Web of Science) и прошли апробацию в докладах на 6-и международных и всероссийских конференциях в форме устных докладов. Опубликованные работы подтверждают новизну работы, обоснованность выводов и свидетельствуют о признании работы научным сообществом.

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой содержится решение актуальных задач современной фотоники, разработаны новые методические приемы получения фотонных метаматериалов и проведено их исследование методами электронной и ионной микроскопии, оптическими методами, в результате чего получены новые результаты, имеющие научную и практическую значимость. Полученные результаты обладают научной и практической значимостью и могут быть использованы в научных учреждениях: МГУ им. Ломоносова, СПбГУ, НИЯУ «МИФИ», учреждениях Российской академии наук: ИВС РАН, ИОНХ РАН и др.

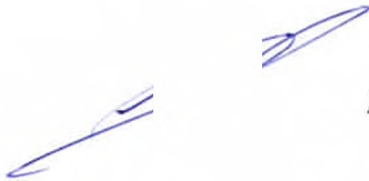
Диссертация Рогова О. Ю. полностью соответствует требованиям раздела II, п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2014 г. (ред. от 01.10.2018), а её автор, Рогов Олег Юрьевич, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – "Физика конденсированного состояния".

Доклад и отзыв по диссертационной работе Рогова О.Ю. «Формирование и исследование хиральных фотонных наноструктур методами электронной и ионной микроскопии» заслушаны и обсуждены на заседании кафедры наноматериалов факультета наук о материалах Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова 26 ноября 2019 г., протокол № 57.

Отзыв составил:

Доцент факультета наук о материалах

к.х.н



А.А. Елисеев

Зав. кафедры наноматериалов факультета наук о материалах

д.х.н. чл.- корр. РАН



Е.А. Гудилин

Зам. декана по научной работе факультета наук о материалах

д.х.н. чл.- корр. РАН



А.В. Лукашин

119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д.1 корп.3, МГУ имени М.В. Ломоносова,
Химический факультет, кафедра неорганической химии.

Тел: +7(495)9328877

Email: eliseev@inorg.chem.msu.ru