



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский университет  
ИТМО»

Д. т. н., профессор  
Никифоров В.О.

«07» 11 2023 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» на диссертационную работу

**Антонова Александра Алексеевича**

**«Диэлектрические метаповерхности для аномального преломления света и максимальной оптической хиральности»,**

представленную на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.8. - «Физика конденсированного состояния»

Диссертационная работа Антонова А.А. посвящена изучению взаимодействия света с диэлектрическими метаповерхностями.

**Актуальность работы.** Метаповерхности представляют собой упорядоченные искусственные структуры, физические свойства которых во многом определяются геометрией и взаимным расположением составных элементов. Такой подход к созданию новых функциональных материалов актуален для современной физики конденсированного состояния и позволяет создавать структуры с механическими, акустическими или оптическими свойствами, качественно отличающимися от традиционных материалов. Особую важность имеют теоретические исследования физических основ достижения максимально возможных функциональных характеристик метаповерхностей. В данной работе рассматриваются диэлектрические метаповерхности, обладающие уникальными оптическими свойствами. Исследования посвящены сразу двум характеристикам, приближенным к соответствующим фундаментальным пределам: аномальному преломлению света под скользящими углами и максимальной оптической хиральности.

**Структура и содержание работы.** Диссертационная работа Антонова Александра Алексеевича состоит из введения, трёх глав и заключения. Объём работы составляет 101 страницу, включая 19 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 157 наименований.

**Во введении** представлены актуальность, цель и задачи проведённого исследования, новизна и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, личный вклад и информация об апробации.

**В Главе 1** приведён подробный обзор существующих научных работ в исследуемой области.

**Глава 2** посвящена диэлектрическим Фурье-метаповерхностям для аномального преломления света под скользящими углами. Продемонстрировано, что для достижения высокой эффективности преломления можно использовать относительно простые структуры, представляющие собой слои диэлектрика с периодическим рельефом в виде конечной суммы Фурье-гармоник. Особое внимание уделено приближенной полуаналитической теории на основе гипотезы Рэлея. Автором продемонстрировано, что с помощью теории можно довольно точно описать оптические свойства Фурье-метаповерхности из кремния. Также в Главе показано, как с помощью Фурье-метаповерхностей добиться управляемого отклонения света в широком угловом диапазоне.

**В Главе 3** развиты теоретические основы достижения максимальной оптической хиральности. Автор демонстрирует, как, используя особый класс собственных состояний – связанные состояния в континууме – можно добиться селективного взаимодействия структуры со светом разных круговых поляризаций. Также исследованы проявления внешней оптической хиральности, состоящей в различном взаимодействии нехиральной структуры с волнами левой и правой круговой поляризации за счёт геометрии эксперимента, в частности – наклонного падения света на метаповерхность.

**Заключение** содержит краткие итоги проведённой работы, а также описание перспектив исследованных диэлектрических метаповерхностей.

Материал диссертационной работы изложен грамотно и последовательно, с использованием научной терминологии. Графики и рисунки хорошо иллюстрируют и дополняют содержание текста. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ.

### **Основные научные результаты, полученные автором, и их новизна**

1. Продемонстрировано, что диэлектрические Фурье-метаповерхности с относительно простой геометрической формой могут обеспечить аномальное преломление света под скользящими углами. Оптимизация таких структур может быть проведена с помощью приближенной полуаналитической теории на основе гипотезы Рэлея. Продемонстрированы диэлектрические структуры, для которых разработанная теоретическая модель даёт корректные предсказания.
2. В работе предложена и исследована теоретически идея управляемого отклонения света в широком угловом диапазоне. Представленные кремниевые Фурье-метаповерхности аномально преломляют свет под скользящими углами в противоположные дифракционные каналы в разных оптических режимах. Переключение между режимами осуществляется за счёт небольших изменений оптической системы: наклона падающего света или изменения диэлектрической проницаемости подложки.
3. Наглядно показано, как связанные состояния в континууме (ССК) небольшими нарушениями симметрии трансформируются в максимально хиральные квази-ССК, не взаимодействующие с волнами определённых круговых поляризаций. На основе данной идеи с помощью численного моделирования продемонстрированы метаповерхности, состоящие из пар диэлектрических стержней, полностью прозрачные для света с правой круговой поляризацией. Также показано, что в зависимости от симметрии метаповерхности прохождение света с левой круговой поляризацией будет полностью блокироваться либо за счёт поглощения, либо за счёт отражения. Подобная оптическая

хиральность хорошо согласуется с теоретическими предсказаниями, полученными в рамках метода S-матрицы и теории связанных мод.

- Используя метод мультипольного разложения, дано объяснение максимальной внешней хиральности кремниевой метаповерхности с зеркальными плоскостями симметрии. Представленные нехиральные треугольные призмы селективно взаимодействуют с наклонно падающими волнами за счёт суперпозиции двух компонент электрического дипольного момента, лежащего в плоскости структуры, а также магнитного дипольного момента, направленного по нормали к метаповерхности.

#### **Достоверность и обоснованность результатов**

В Главе 2, посвящённой аномальному преломлению света, достоверность аналитических результатов, полученных с помощью полуаналитической теории, подтверждается совпадением с результатами, полученными с помощью полномасштабного численного моделирования.

В Главе 3, посвящённой оптической хиральности, основные выводы подтверждаются экспериментами, проведёнными ведущими мировыми экспериментальными группами. Результаты численного моделирования находятся в хорошем согласии с наблюдаемыми оптическими свойствами как хиральных метаповерхностей, так и структур с зеркальными плоскостями симметрии.

Все представленные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

#### **Практическая значимость полученных результатов**

Исследованные в диссертации Фурье-метаповерхности перспективны для современной оптики. Структуры с аномальным преломлением света под скользящими углами могут быть использованы для создания металинз с большой числовой апертурой, детекторов излучения, а также диэлектрических волноводов. Структуры с управляемым отклонением света в широком угловом диапазоне могут быть перспективны для лидаров и линз с перестраиваемым фокусным расстоянием.

Максимально хиральные метаповерхности необходимы для сенсоров молекулярной хиральности и фотодетекторов. Такие структуры с высокодобротными хиральными резонансами также чрезвычайно перспективны для устройств, генерирующих лазерное излучение и высшие гармоники.

В работе показано, что метаповерхности с внешней хиральностью были применены для создания метарезонаторов, позволяющих получить хиральную фото и электролюминесценцию.

#### **Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы**

Полученные в диссертации результаты представляют научный интерес для специалистов, работающих в области нанофотоники, метаповерхностей и метаматериалов, а также физики конденсированного состояния.

Развитые методы конструирования метаповерхностей могут быть обобщены для получения структур с уникальными свойствами не только в оптическом, но и инфракрасном, ультрафиолетовом и СВЧ диапазонах.

Использование предложенных диэлектрических метаповерхностей вместе с другими материалами, например, металлами или жидкими кристаллами, позволит на практике создать устройства с уникальными характеристиками.

Некоторые из результатов исследования могут быть использованы в образовательном процессе, при обучении студентов по направлениям «Физика конденсированного состояния», «Оптика», «Физика».

### **Публикации и апробация результатов работы**

Материалы диссертационной работы опубликованы в 5 научных изданиях, рецензируемых и индексируемых международными базами Web of Science, Scopus и рекомендованных ВАК.

Основные результаты работы также были доложены автором в виде 5 устных докладов на профильных международных конференциях: METANANO 2020, V International Conference on Metamaterials and Nanophotonics, Online; OSA Advanced Photonics Congress 2021, Online; METANANO 2021, VI International Conference on Metamaterials and Nanophotonics, Online; Days on Diffraction 2023, Санкт-Петербург, Россия (два устных доклада).

### **Замечания и комментарии по диссертации**

1. В диссертационной работе автор использует концепцию максимальной хиральности, соответствующей селективному взаимодействию структуры со светом правой и левой круговой поляризации. В связи с этим вопрос: характеризует ли концепция максимальной хиральности исключительно метаповерхность или же систему из метаповерхности и окружающей среды? Представляется правдоподобным, что зануление коэффициента прохождения для заданной круговой поляризации достигается на различных длинах волн в зависимости от показателя преломления среды, в которой находится метаповерхность. Рекомендуем уточнить этот момент и подтвердить сделанный вывод расчетом.

2. Соискателем продемонстрирована возможность существенного изменения направления преломленной волны за счет изменения угла падения волны на Фурье-метаповерхность на считанные градусы. Полезно прокомментировать, насколько ухудшается результат для прошедшей волны при учете небольших флуктуаций профиля метаповерхности из-за неидеальностей изготовления. Расчет для конкретной модели беспорядка позволил бы прояснить ситуацию.

3. В тексте диссертации содержатся некоторые опечатки (например, подпись рис.3.1 или неправильные номера формул на рис. 3.9), что не умаляет общего положительного впечатления от работы.

### **Заключение**

Подводя итог, диссертация Антонова А.А. является завершённой научно-квалификационной работой, содержащей новые результаты, относящиеся к диэлектрическим метаповерхностям, а также управлению светом при их помощи.

Полученные результаты являются достоверными и обоснованными, а отмеченные недостатки не снижают общей ценности и высокой оценки представленной работы.

Тематика выполненных Антоновым А.А. исследований соответствует паспорту специальности 1.3.8. – «Физика конденсированного состояния» по следующим направлениям исследований:

1. Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств упорядоченных и неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и

квантовые жидкости, стекла различной природы, дисперсные и квантовые системы, системы пониженной размерности.

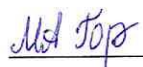
2. Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами.

Диссертационная работа «Диэлектрические метаповерхности для аномального преломления света и максимальной оптической хиральности» полностью соответствует критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, установленным согласно разделу 2 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» от 24 сентября 2013 г. №842, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации, а её автор, Антонов Александр Алексеевич, заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. – «Физика конденсированного состояния».

Отзыв составлен, обсужден и утвержден на основании рассмотрения текста диссертации, автореферата, а также по результатам доклада Антонова А.А. «Диэлектрические метаповерхности для аномального преломления света и максимальной оптической хиральности» на научном семинаре физического факультета Университета ИТМО « 1 » ноября 2023 г. протокол № 2023-11 . Отзыв составил председатель семинара, к.ф.-м.н., доцент, ведущий научный сотрудник Горлач Максим Александрович.

Старший научный сотрудник, доцент

Кандидат физ. – мат. наук

 Горлач М.А.

Главный научный сотрудник, профессор

Доктор физ. – мат. наук

 Романов А.Е.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Почтовый адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А.

Телефон: +7 (812) 607-02-83

Адрес электронной почты: [od@itmo.ru](mailto:od@itmo.ru)

Web-сайт организации: <https://itmo.ru/>