

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.245.01
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР КРИСТАЛЛОГРАФИЯ
И ФОТОНИКА» РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
ПО ДИССЕРТАЦИИ АНТОНОВА АЛЕКСАНДРА АЛЕКСЕЕВИЧА НА СОИСКАНИЕ
УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 29 ноября 2023 г., протокол № 13.

О присуждении **Антонову Александру Алексеевичу**, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Диэлектрические метаповерхности для аномального преломления света и максимальной оптической хиральности» по специальности 1.3.8. – «физика конденсированного состояния» принята к защите 28.09.2023 г., протокол № 9, диссертационным советом 24.1.245.01, созданным на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН), Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), 119333, г. Москва, Ленинский проспект, дом 59. Диссертационный совет 24.1.245.01 создан приказом Федеральной службы по надзору в сфере образования и науки № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Антонов Александр Алексеевич, 07.12.1995 года рождения, в 2019 г. окончил кафедру физики микро- и наносистем Института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»» по специальности «Ядерная физика и технологии» с присвоением квалификации «магистр». В 2023 г. Антонов А.А. окончил аспирантуру ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

В настоящее время Антонов А.А. работает в отделе теоретических исследований Института кристаллографии имени А.В. Шубникова РАН, ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Федерального государственного бюджетного учреждения «Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт») в должности младшего научного сотрудника.

Диссертационная работа выполнена в отделе теоретических исследований Института кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Федерального государственного бюджетного учреждения «Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»).

Научный руководитель – **Горкунов Максим Валерьевич**, кандидат физико-математических наук, и.о. заведующего отделом теоретических исследований Института кристаллография им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

Официальные оппоненты:

Тиходеев Сергей Григорьевич – доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, профессор кафедры общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»;

Баранов Денис Григорьевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией передовой нанофотоники и квантовых

материалов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»;

— дали **положительные отзывы** на диссертацию.

Ведущая организация **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»** (г. Санкт-Петербург) в своём **положительном отзыве**, подписанном кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником, доцентом физического факультета Университета ИТМО Горлачом Максимом Александровичем, доктором физико-математических наук, профессором, главным научным сотрудником лаборатории однофотонных детекторов и генераторов Института перспективных систем передачи данных Университета ИТМО Романовым Алексеем Евгеньевичем и утвержденном доктором технических наук, профессором, проректором по научной работе Университета ИТМО Никифоровым Владимиром Олеговичем, указала, что диссертационная работа Антонова Александра Алексеевича 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.

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 дает 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, 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.

4. 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.

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, представленная работа достойна высокой оценки.

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».

По теме диссертационной работы опубликовано 5 статей в рецензируемых научных изданиях. Результаты доложены автором в виде пяти устных докладов на ведущих профильных международных конференциях. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

Наиболее значимые публикации автора по теме диссертации:

1. M. V. Gorkunov, A. A. Antonov, Y. S. Kivshar, “Metasurfaces with Maximum Chirality Empowered by Bound States in the Continuum”, *Physical Review Letters*. — 2020. — Т. 125, № 9. — С. 093903.

2. M. V. Gorkunov, A. A. Antonov, V. R. Tuz, A. S. Kupriianov, Y. S. Kivshar, “Bound States in the Continuum Underpin Near-Lossless Maximum Chirality in Dielectric Metasurfaces”, *Advanced Optical Materials*. — 2021. — Т. 9, № 19. — С. 2100797.

3. S. Kim, S. An, Y. Kim, Y. S. Shin, A. A. Antonov, I. C. Seo, B. H. Woo, Y. Lim, M. V. Gorkunov, Y. S. Kivshar, J. Y. Kim, Y. C. Jun, “Chiral electroluminescence from thin-film perovskite metacavities”, *Science Advances*. — 2023. — Т. 9, № 26.

На диссертацию и автореферат поступило **6 положительных отзывов**.

1. Жаров Александр Александрович – д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник отдела физики полупроводников Института физики микроструктур РАН, отметил следующие замечания:

1) Мне кажется, что использование термина «преломление» не вполне корректно, поскольку речь идет об эффекте рассеяния на дифракционной решетке (чем, собственно, и является метаповерхность). В данном контексте термин «преломление» отличается от его традиционного значения и может привести к неправильному пониманию эффекта «аномального преломления света».

2) Автор пишет, что рельеф метаповерхности (формула (2)) задан в виде суммы трех пространственных Фурье-гармоник. Однако, в соответствие с формулой (2), пространственных гармоник только две. Последние два члена имеют одну пространственную частоту и могут быть записаны в виде синуса (или косинуса) со сдвинутой фазой и перенормированной амплитудой.

3) В работе рассмотрен только свет ТМ поляризации. Хотелось бы понять какие качественные отличия возникнут при рассеянии волн ТЕ поляризации.

2. Дьяков Сергей Александрович – д.ф.-м.н., доцент группы теоретической нанофотоники Сколковского института науки и технологий, – **без замечаний**.

3. Мартынов Игорь Леонидович – к.ф.-м.н., доцент отделения нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике офиса образовательных программ Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», отметил следующие замечания:

1) В автореферате при обсуждении аномального преломления света кремниевой Фурье-метаповерхностью идет речь о длинах волн видимого спектрального диапазона вблизи длины волны второй гармоники Nd:YAG лазера – 532 нм. Вместе с тем с точки зрения практических применений было бы интересно обсудить возможно использования подобной метаповерхности на длинах волн, используемых в телекоммуникационных приложениях, ≈ 850 нм и 1550 нм.

2) Также было бы интересно обсудить влияние естественного оксидного слоя на работу кремниевых Фурье-метаповерхностей.

4. Тищенко Алексей Александрович – к.ф.-м.н., доцент отделения нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике офиса образовательных программ и ведущий научный сотрудник международной научно-исследовательской лаборатории «Излучение заряженных частиц» Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», отметил следующие замечания:

1) В первом из положений, выносимых на защиту, указано, что аномальное преломление реализуется для Фурье-метаповерхностей из материала с диэлектрической проницаемостью больше 5. При этом при обсуждении рис. 2 отмечено, что два примененных метода оптимизации дают различные результаты при диэлектрической проницаемости меньше 14. Тогда, правильно ли утверждение, что в диапазоне значений диэлектрической проницаемости от 5 до 14, корректными следует признать оба метода оптимизации, но для разной глубины рельефов? Если так, остается неясным, чем обусловлена такая чувствительность данных методов оптимизации к глубине рельефа поверхности.

2) Со ссылкой на раздел 2.3 диссертации сказано, что при закрытии доминирующего дифракционного канала энергия перераспределяется между оставшимися открытыми каналами. Однако, вообще говоря, допустим и иной сценарий: закрытие одного из каналов дифракции ведет к убыванию суммарной интенсивности преломленного света, то есть уменьшению эффективности оптической системы. В автореферате не указано, было ли показано сохранение суммарной интенсивности преломленного света?

5. Максимов Дмитрий Николаевич – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории теории нелинейных процессов Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН, отметил следующие замечания:

1) Скучное содержание параграфа Методология и Методы Исследования. Так соискателем упоминаются “численные оптимизации с помощью стандартных программ MATLAB”. Остается непонятным, что подразумевается под “стандартными программами MATLAB”? MATLAB является эффективным матричным процессором, позволяющим реализовать огромное множество алгоритмов, использующих матричную форму записи обрабатываемых данных. Вместе с тем, сам по себе MATLAB всего лишь удобный инструмент для численного моделирования и обработки данных, упоминание которого не несет содержательной информации о научной работе, проделанной соискателем. Какие именно алгоритмы были использованы соискателем? Почему соискатель применяет термин “стандартный”? Как выбор тех или иных алгоритмов соотносится с целью и задачами диссертационного исследования?

2) В описательной части автореферата, соответствующей разделу 3.2 диссертационного исследования, приведена формула (5) для квадратов амплитуд пропускания. При этом при обсуждении формулы (5) отсутствуют определения коэффициентов связи, появляющихся в числителе резонансного вклада в амплитуды рассеяния. Такое описание затрудняет понимание физической природы эффекта без непосредственного обращения к оригинальной публикации. Теория связанных мод (ТСМ), приводящая к формуле (5) для режима резонансного рассеяния лишь кратко упомянута в автореферате. Полученное из ТСМ соотношение между коэффициентами связи и временем жизни радиационной моды, являющиеся ключевым в теоретическом описании эффекта хиральности, не освещено исчерпывающим образом.

6. Тимофеев Иван Владимирович – д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории фотоники молекулярных систем Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН, отметил следующие замечания:

1) В разделе 2.2 показано, какие диэлектрические материалы можно использовать для достижения аномального преломления света под скользящими углами. Оптимизация проводилась для длины волны 532 нм. Насколько эффективно предложенный метод оптимизации может быть обобщен на ультрафиолетовый и инфракрасный спектральные диапазоны, какова роль поглощения в материале?

2) В разделе 3.4 указано, что помимо численного моделирования был проведен эксперимент, подтверждающий высокую степень круговой поляризации от хиральной метаповерхности. В каком спектральном диапазоне проведено сравнение? Каковы оказались погрешности при сравнении экспериментальных данных с расчетными? Чем вызваны эти погрешности?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что оппоненты являются ведущими специалистами в области физики конденсированного состояния, метаповерхностей и нанофотоники, а в ведущей организации активно проводятся теоретические и экспериментальные работы по созданию метаповерхностей с уникальными электромагнитными свойствами.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований предложены и теоретически исследованы диэлектрические метаповерхности для аномального преломления света под скользящими углами и для максимальной оптической хиральности. Метаповерхности являются искусственными периодическими структурами, физические свойства которых в большей степени зависят от формы составных элементов с характерными размерами, соизмеримыми с рабочими длинами

волн. Подобные структуры обладают уникальными электромагнитными, акустическими или механическими свойствами, превосходящими по своим параметрам традиционные материалы. Теоретические работы, посвященные направленному конструированию метаповерхностей с максимально возможными функциональными характеристиками, имеют особую значимость.

В диссертационной работе Антоновым А.А. была теоретически решена проблема достижения высокоэффективного аномального преломления нормально падающего света под скользящими углами. Для это были предложены Фурье-метаповерхности – тонкие слои диэлектрика с периодическим рельефом. Автором развита полуаналитическая теория на основе приближений гипотезы Рэлея, которая позволила воспроизвести оптические свойства Фурье-метаповерхностей из кремния. Также в работе продемонстрированы границы применимости такой теории для метаповерхностей из других технологичных диэлектрических материалов. Развивая идею об аномальном преломлении света под скользящими углами, автор демонстрирует, как с помощью соответствующих метаповерхностей добиться управляемого отклонения преломленного света в широком угловом диапазоне за счёт небольшого наклона падающей волны или малого изменения диэлектрической проницаемости подложки.

Вторая половина диссертационного исследования посвящена диэлектрическим метаповерхностям с максимальной оптической хиральностью. Автор демонстрирует, как последовательными нарушениями симметрии и тщательной настройкой специфических собственных состояний метаповерхности - связанных состояний в континууме, добиться прозрачности структуры для света с одной круговой поляризацией и полного блокирования света с противоположной поляризацией. В зависимости от наличия или отсутствия вращательной симметрии метаповерхности, блокируемый свет либо полностью поглощается, либо отражается, что было наглядно продемонстрировано как численным моделированием, так и результатами, полученными в рамках формализма S-матрицы и теории связанных мод.

С практической точки зрения полученные соискателем теоретические результаты имеют большое прикладное значение для конструирования устройств современной нанофотоники. В частности, предложенные автором Фурье-метаповерхности могут быть использованы для создания металинз с большой числовой апертурой, устройств голографии и детекторов излучения. Управляемое отклонение света в широком угловом диапазоне требуется для лидаров и варифокальных металинз.

Максимально хиральные метаповерхности перспективны в качестве компонентов сенсоров молекулярной хиральности и поляризационно-чувствительных фотодетекторов. Структуры с высокодобротными хиральными резонансами также перспективны для устройств нелинейной оптики. Предложенные метаповерхности с максимальной внешней хиральностью были успешно использованы при создании фото- и электролюминесцентных источников света с высокой степенью круговой поляризации.

Достоверность полученных результатов, относящихся к оптической хиральности, подтверждается хорошим совпадением теоретических и экспериментальных данных. Одинаковые оптические свойства диэлектрических Фурье-метаповерхностей с аномальным преломлением света были получены как с помощью полуаналитической теории на основе приближений гипотезы Рэлея, так и с помощью полномасштабного численного моделирования методом конечных элементов. Все представленные результаты работы опубликованы в профильных международных рецензируемых изданиях.

Личный вклад соискателя состоит в создании метода оптимизации диэлектрических метаповерхностей на основе приближений гипотезы Рэлея. Автор выполнил расчёты оптимальной формы Фурье-метаповерхностей, аномально

преломляющих свет под скользящими углами, а также метаповерхностей, отклоняющих преломленный свет в широком угловом диапазоне за счёт небольшого изменения оптической системы. Определены границы применимости гипотезы Рэля для Фурье-метаповерхностей из разных технологичных оптических материалов. Автором продемонстрировано, как нарушениями симметрии добиться максимальной хиральности квази-связанных состояний в континууме. В рамках численного моделирования показано, что максимальная хиральность может быть обеспечена с помощью диэлектрических метаповерхностей, поглощающих или отражающих свет с определённой круговой поляризацией, в зависимости от наличия или отсутствия у них вращательной симметрии. Проведён численный анализ мультипольного состава собственных состояний ахиральной метаповерхности и дано объяснение её максимальной внешней хиральности в широком диапазоне углов падения света.

В ходе защиты диссертации не было высказано **критических замечаний** по содержанию работы. Соискатель Антонов А.А. ответил на все заданные ему в ходе заседания уточняющие вопросы.

Диссертация отвечает на ключевые вопросы поставленной научной проблемы и соответствует критерию внутреннего единства. Объединяющим фактором и основной идейной линией является теоретическое исследование диэлектрических метаповерхностей с уникальными оптическими функциональностями, приближенными к соответствующим фундаментальным пределам. В работе развиты относительно простые методы конструирования метаповерхностей с аномальным преломлением света под скользящими углами и с максимальной оптической хиральностью. Результаты диссертации имеют большое значение для нанофотоники и физики конденсированного состояния.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая полностью соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции).

На заседании 29 ноября 2023 года диссертационный совет принял решение присудить Антонову Александру Алексеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. – «физика конденсированного состояния».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 6 докторов наук по специальности 1.3.8. – «физика конденсированного состояния», участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 17, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Заместитель председателя диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор

И.С. Любутин

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

К.В. Фролов

«29» ноября 2023 г.

Ученый секретарь
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН
кандидат физико-математических наук



А.Е. Крюкова