ОТЗЫВ

официального оппонента, к.ф.-м.н. Баранова Дениса Григорьевича 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»

Актуальность работы. Метаповерхности представляют собой периодические, регулярные наноструктуры, оптический отклик которых определяются геометрией и взаимным расположением примитивных элементов (наноантенн). Метаповерхности значительно расширяют возможности по управлению электромагнитным, в частности, видимым излучением далеко за пределами тех опций, которые предлагает «традиционная» оптика.

В данной работе изучаются теоретически экстремальные режимы работы диэлектрических метаповерхностей. Исследования посвящены сразу двум оптическим эффектам, которые обеспечивают метаповерхности: аномальному преломлению света и максимальной оптической хиральности.

Структура и содержание работы. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав и заключения. Работа изложена на 101 странице, содержит 19 рисунков и 2 таблицы. Список литературы состоит из 157 позиций.

Во введении представлена актуальность, ясно поставлены цель и задачи, кратко описаны новизна и практическая значимость проведённого исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Глава 1 содержит довольно подробный литературный обзор научных работ в исследуемой области.

В Главе 2 решается задача об аномальном преломлении света под скользящими углами с помощью Фурье-метаповерхностей.

Автором показано, что высокая эффективность преломления света может быть достигнута при использовании простых структур – диэлектрических слоёв с периодическим рельефом. Рельеф записывается в виде суммы нескольких Фурье-гармоник, что и определяет название метаповерхностей. Развитая в работе полуаналитическая теория на основе приближений гипотезы Рэлея позволяет довольно точно описать взаимодействие света с кремниевыми Фурье-метаповерхностями. Также сформулированы пределы применимости гипотезы для подобных структур.

Развивая идею об аномальном преломлении света под скользящими углами, автор демонстрирует структуры, позволяющие отклонять преломленный свет на большие углы за счёт наклона падающего света или изменения диэлектрической проницаемости подложки. Для данных Фурье-метаповерхностей также применима полуаналитическая теория на основе приближений гипотезы Рэлея.

Глава 3 посвящена максимальной оптической хиральности. Показано, что единичная разница между коэффициентами пропускания волн с левыми и правыми круговыми поляризациями может быть достигнута при точной настройке связанных состояний в континууме – специфичных высокодобротных резонансов метаповерхности. В работе как с помощью теории, так и с помощью численного моделирования показана принципиальная разница между максимально хиральными метаповерхностями с разными элементами точечной симметрии.

Отдельный раздел главы посвящён внешней хиральности – разному взаимодействию нехиральной метаповерхности из треугольных кремниевых призм с наклонно падающим светом с левыми и правыми круговыми поляризациями.

В заключении подведены итоги проведённой работы, а также обсуждаются практические перспективы предложенных метаповерхностей.

Диссертация написана грамотно и последовательно. Приведённые графики и рисунки отлично дополняют основное содержание работы. Оформление диссертации соответствует требованиям ВАК РФ.

Достоверность и обоснованность результатов

Одинаковые результаты, относящиеся к аномальному преломлению света, были получены как с помощью полуаналитической теории в рамках гипотезы Рэлея, так и с помощью численного моделирования.

Максимальная оптическая хиральность метаповерхностей была подтверждена с помощью модельного эксперимента в СВЧ диапазоне. Внешняя хиральность треугольных кремниевых призм отлично согласуется с проведённым экспериментом о хиральной электролюминесценции метарезонатора.

Все результаты диссертационной работы были опубликованы в международных научных журналах.

Практическая значимость полученных результатов

Фурье-метаповерхности, предложенные в данной диссертации, крайне перспективны для элементной базы современной оптики и нанофотоники. Подобные структуры могут быть использованы для создания эффективных металинз с большой числовой апертурой, кодирующих голограмм и разнообразных детекторов оптического излучения.

Максимально хиральные метаповерхности являются базовым элементом для создания сенсоров молекулярной хиральности. Высокодобротные хиральные резонансы делают подобные структуры крайне перспективными для устройств нелинейной оптики.

В работе показано, как хиральная фото- и электролюминесценция может быть получена с помощью резонаторов, составной частью которых являются метаповерхности с внешней оптической хиральностью.

Замечания по диссертации

1) Глава 2 представляет устройство метаповерхности для аномальной дифракции света с на большой угол. Однако, автором не обсуждается физический механизм, лежащий в основе столь высокой эффективности дифракции на большие углы преломления.
2) Обращенный во времени процесс падения на метаповерхность p-поляризованной волны под большим углом и ее почти полное пропускание в верхнее полу-пространство в некоторой степени похож на явление угла Брюстера. Интересно узнать, есть ли возможность провести строгую параллель между этими явлениями?
3) В разделе 2.2.4 обсуждается эффект диэлектрической проницаемости метаповерхности на достижимую эффективность аномального преломления. Автор приводит значения эффективности для различных действительных констант, однако не исследуется и не обсуждается эффект поглощения, которое в той или иной степени присуще многим из упомянутых материалов в данном спектральном диапазоне.
4) В разделе 2.3 обсуждается интригующий эффект сильного отклонения преломленного поля при небольшом отклонении поля падающего. Данное явление очень похоже на эффект суперпризмы, рассмотренной в известной и высокоцитируемой работе [Kosaka et al., “Superprism phenomena in photonic crystals”, Phys Rev B (1998)].
5) Раздел 3.1.2 посвящен выводу матрицы рассеяния хиральной суб-дифракционной метаповерхности на основе зарекомендовавшей себя теории связанных мод. В основе данного подхода лежит описание линейной резонансной оптической системы с помощью набора амплитуд квазинормальных мод (КНМ) системы, каждая из которых испытывает гармонические колебания в ответ на внешнее монохроматическое поле. Эффективный гамильтониан системы (ур.

3.15), описывающий динамику амплитуд КНМ, содержит в себе резонансные частоты системы и их коэффициенты затухания вследствие потерь на излучение. В то же самое время, хорошо известно (см. работу [144] из списка литературы диссертации), что при наличии нескольких неортогональных КНМ – то есть таких мод, которые испытывают интерференцию в каналах рассеяния – эффективный гамильтониан *должен* содержать недиагональные элементы чтобы удовлетворить закон сохранения потока электромагнитной энергии. Сам автор делает такой комментарий на с. 44. В дальнейшем автором рассматривается именной такой случай системы с несколькими КНМ. Однако, точный вид эффективного гамильтониана вместе с недиагональными элементами не приводится в ур. 3.15. Лишь Ур. 3.23 содержит явный вид эффективного гамильтониана для системы из двух КНМ, однако данное выражение не содержит недиагональных элементов. Означает ли это, что автор на протяжении Главы 3 имеет дело с системой, включающей строго ортогональные КНМ?

6) В главе 3 символ **p** используется как для обозначения амплитуд КНМ, так и для обозначения величин феноменологических дипольных моментов в разделе 3.2.2. Подразумевается, что величину дипольного момента можно поставить в соответствие амплитуде КНМ системы?
7) Планарный резонатор для усиления хиральной электролюминесценции работает «нужным» образом только в определенном подпространстве волновых векторов $k_y = 0, k_x < 0$. В то же самое время, спонтанное излучение слоя перовскита будет содержать все возможные волновые вектора в своем пространственном спектре. Можно ли сделать какие-либо выводы о степени хиральности ЭЛ при работе, например, в подпространстве волновых векторов $k_y \neq 0, k_x = 0$?

Заключение

Подводя итог, диссертация Антонова А.А. является завершённой научно-квалификационной работой, содержащей новые результаты в области диэлектрических метаповерхностей.

Проведенные исследования представляют большой интерес для научного сообщества, что демонстрирует высокая цитируемость некоторых научных статей с результатами диссертации. Отмеченные недостатки и замечания не снижают высокой оценки работы.

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».

к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник
заведующий лабораторией_____ Баранов Д. Г.
подпись

08.11.2023

Подпись Баранова Д. Г. заверяю

Учёный секретарь ученого совета МФТИ_____ Евсеев Е. Г.
подпись