

**Кузнецов Алексей Витальевич**

**Манипулирование светом в наноструктурах при помощи  
гибридного анапольного состояния**

**Специальность: 1.3.6. – Оптика**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

**Научный руководитель:** Шалин Александр Сергеевич – доктор физико-математических наук

**Ведущая организация:** Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий»

Защита состоится **24 декабря 2025 г. в 12 часов 00 минут** на заседании диссертационного совета ЛФИ.1.3.6.011, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ, Физтех)

**по адресу:** 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МФТИ, Физтех и на сайте организации <https://mipt.ru>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

**Ученый секретарь**  
диссертационного совета, к.ф.-м.н.

**Кузьмичев Павел Константинович**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В последние годы полностью диэлектрическая нанофотоника превратилась в одно из наиболее быстроразвивающихся направлений современной оптики, предлагая эффективные способы управления светом в субволновом масштабе без характерных для плазмоники потерь на нагрев. Важнейшее преимущество таких структур заключается в возможности возбуждения как электрических, так и магнитных резонансов с помощью высокоиндексных материалов, что позволило реализовать целый спектр новых эффектов – от искусственного магнетизма до оптических метаповерхностей нового поколения.

Одним из наиболее перспективных и одновременно слабоизученных режимов в диэлектрической нанофотонике является анапольное состояние, при котором наблюдается деструктивная интерференция между электрическим и тороидальным дипольными моментами. Такие состояния отличаются крайне низким рассеянием в дальнем поле при наличии насыщенных полей внутри частицы, что делает их особенно ценными для нелинейной оптики, сенсорики и управления излучением.

Совсем недавно в этой области был предложен следующий шаг – гибридное анапольное (ГА) состояние, при котором подавляются не только дипольные, но и более высокие мультипольные компоненты, включая квадруполь, за счёт их интерференции с соответствующими тороидальными аналогами. В отличие от классических метаповерхностей Гюйгенса, такие структуры демонстрируют исключительно слабое межчастичное взаимодействие, сохраняя отклик одиночного метаатома даже в сверхплотных массивах. Это открывает путь к проектированию ультракомпактных и устойчивых к беспорядку фотонных устройств с возможностью фазового управления при почти полном пропускании.

В данной работе представлены теоретическое, численное и экспериментальное исследования диэлектрических метаповерхностей в гибридном анапольном режиме. Особое внимание уделено оптическим характеристикам массивов кремниевых наночастиц, влиянию геометрии и подложки, а также возможностям эффективного фазового управления при наличии структурной неупорядоченности. Помимо метаповерхностей, в работе исследуются отдельные наночастицы усечённой конической формы, обладающие богатым набором резонансных режимов из-за нарушения осевой симметрии. Впервые показано, что такие наночастицы могут одновременно поддерживать ГА состояние и квази-связанное состояние в континууме (квази-ССК), что обеспечивает резко выраженную локализацию электромагнитной энергии при подавлении излучения. Это открывает новые возможности для создания компактных резонаторов с высокой добротностью и направленным излучением, а также для прецизионного управления оптическим откликом в зависимости от направления возбуждения.

Таким образом, в рамках настоящей диссертации была разработана и исследована платформа управления светом в наномасштабе – от единичных наночастиц до плоских метаповерхностей – основанная на физических принципах гибридного анапольного состояния и мультипольной интерференции.

**Актуальность** диссертационного исследования обусловлена необходимостью создания новых фотонных компонентов, сочетающих ультракомпактность, низкие потери и возможность точного управления фазой, амплитудой и направленностью света. Предложенный в работе подход на основе гибридных анапольных состояний предлагает альтернативу традиционным решениям, таким как метаповерхности Гюйгенса, которые ограничены межэлементным взаимодействием и чувствительностью к подложке.

Кроме того, результаты исследования расширяют фундаментальные представления о мультипольных резонансах, тороидальной оптике и связанных состояниях в открытых системах. Учитывая быстрый рост интереса к метаоптике, фотонным интегральным схемам и нанофотонным сенсорам, полученные результаты имеют как теоретическую, так и прикладную значимость, а разработанные структуры могут лечь в основу новых поколений оптических устройств.

**Целью** диссертационной работы является исследование новых оптических эффектов, возникающих при взаимодействии высокоиндексных слабопоглощающих диэлектрических наночастиц и метаповерхностей, находящихся в гибридном анапольном состоянии, со светом, а также разработка моделей нанофотонных элементов для создания высокоэффективных фотонных устройств нового поколения.

**Научные задачи**, которые необходимо решить для достижения цели:

- Разработка и численное моделирование метаповерхностей, состоящих из наночастиц в гибридном анапольном режиме, с оценкой их фазовых и пропускных характеристик.
- Изучение устойчивости метаповерхностей к беспорядку, межчастичному взаимодействию и наличию различных диэлектрических подложек.
- Оптимизация геометрии и проведение экспериментальной реализации кремниевых метаповерхностей с заданным фазовым профилем.
- Исследование уникальных режимов рассеяния в диэлектрических наночастицах конической формы, включая поперечные и обобщённые эффекты Керкера, гибридное анапольное состояние и суперрассеяние.
- Теоретическое и численное описание получения квази-связанных состояний в континууме с гибридным анапольным режимом в кремниевых наноконусах.

#### **Методы исследования**

Для проведения численного анализа использовались два подхода: метод конечных элементов с применением программного комплекса COMSOL и метод конечных разностей во временной области, реализованный в среде Ansys Lumerical. Экспериментальная реализация представляет собой многоэтапный протокол нанопроизводства, включающего процессы осаждения, шаблонизации, подъема и травления. Прямая фазовая характеристика определялась методом полиномиальной аппроксимации по функциям Цернике системных аберраций.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- Метаповерхности, сформированные из кремниевых цилиндрических наночастиц радиусом 125 нм и высотой 370 нм в гибридном анапольном

состоянии на длине волны 750 нм, сохраняют оптические характеристики единичного метаатома и обеспечивают почти полное пропускание даже при сверхплотном расположении частиц вплоть до расстояний, составляющих менее 6 % от длины волны, в разупорядоченных массивах при отклонении положения метаатомов от 0 до 100 нм от упорядоченного положения и при нанесении на подложки с показателями преломления от 1 до 2.

- Метаповерхности в гибридном анапольном состоянии обеспечивают управление фазой передаваемой электромагнитной волны при уровне пропускания света более 90% с минимальным межэлементным взаимодействием при изменении радиусов метаатомов от 120 до 140 нм на длине волны 750 нм и высоте метаатомов 370 нм, что позволяет однозначно определять величину фазового сдвига вплоть до 80 градусов.
- За счёт нарушения осевой симметрии в кремниевых наночастицах в форме усечённого конуса возможно изменять модовый состав нанорассеивателей, амплитуды и фазы мультиполей, что открывает путь к получению всех эффектов Керкера, режима суперрассеяния и гибридного анапольного состояния, а также других различных режимов рассеяния в рамках одной геометрии нанорассеивателя.
- Одиночные кремниевые нанорассеиватели в форме усечённого конуса высотой 320 нм, верхним радиусом 60 нм и нижним радиусом 180 нм обеспечивают одновременное возбуждение гибридного анапольного состояния и квази-связанного состояния в континууме на длине волны 780 нм за счёт эффективной модовой гибридизации и подавления рассеяния основных мультипольных компонент, что формирует резонансный отклик с добротностью вплоть до 40 с доминирующим магнитным квадрупольным вкладом.

#### **Научная новизна отражена в следующих пунктах:**

- Выяснено, что метаповерхности в гибридном анапольном состоянии обладают возможностью контроля фазы пройденного через структуру излучения с сохранением практически единичного пропускания и при этом практически не чувствительны к различного рода подложкам, положению метаатомов и плотности их расположения.
- Впервые экспериментально продемонстрирована возможность создания метаповерхностей в гибридном анапольном состоянии, обеспечивающих фазовое управление при практически единичном пропускании для обычной, сверхплотной и разупорядоченной конфигураций метаповерхностей.
- Показаны специфические режимы рассеяния, включая обобщённые и поперечные эффекты Керкера, гибридный анапольный режим и режим суперрассеяния в диэлектрических наночастицах усечённой конической формы.
- Продемонстрирована возможность одновременного возбуждения гибридного анапольного состояния и квази-связанного состояния в континууме в рамках одной кремниевой наночастицы в форме усечённого конуса.

**Объектом исследования** являются диэлектрические наночастицы и метаповерхности, находящиеся в гибридном анапольном состоянии, а также возникающие при их взаимодействии со светом оптические явления.

#### **Теоретическая значимость**

Результаты работы вносят вклад в развитие теории мультипольных эффектов в диэлектрических наноструктурах, обосновывает физические механизмы гибридных анапольных состояний и демонстрирует их потенциал для оптического управления в субволновом масштабе.

#### **Практическая значимость**

Полученные результаты открывают путь к созданию новых типов оптических компонентов, таких как сверхкомпактные метаповерхности, прозрачные фазовые модуляторы, интегрируемые фотонные схемы, голографических элементов и сенсоров с высокой добротностью и малым рассеянием.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается использованием различных теоретических и аналитических методов, обеспечивающих их согласованность между собой и высокую степень совпадения с экспериментальными данными. Полученные данные не противоречат результатам, представленным в работах других авторов.

#### **Апробация результатов работы**

Основные результаты работы докладывались автором лично на следующих конференциях:

- International Conference on Metamaterials and Nanophotonics «METANANO 2021». Санкт-Петербург. 12–16 сентября 2021.
- Конгресс молодых ученых, Университет ИТМО. Санкт-Петербург, Россия. 4–6 апреля 2022.
- Научная и учебно-методическая конференция ИТМО 2022. Санкт-Петербург, Россия. 2–5 февраля 2022.
- Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2022». Москва, Россия. 11–22 апреля 2022.
- Онлайн-конференция по нанофотонике и управляемым двумерным структурам: "Современная нанофотоника: достижения и перспективы". Долгопрудный, Россия. 21–22 ноября 2022.
- The 5th School on Advanced Light-Emitting and Optical Materials «SLALOM 2022». Санкт-Петербург, Россия. 30 ноября–2 декабря 2022 г.
- Winter School on Photonics. Санкт-Петербург, Россия. 12–16 декабря 2022.
- 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ. Долгопрудный, Россия. 3–8 апреля 2023.
- The 9th International Conference on Antennas and Electromagnetic Systems. Торемолинос, Испания. 5–8 июня 2023.
- XIX международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике (LLPh-2023). Иркутск, Россия. 3–8 июля 2023.
- VII международная школа молодых ученых «Нелинейная фотоника». Новосибирск, Россия. 21–25 августа 2023.

- Конференция по нанофотонике и управляемым двумерным структурам: "Современная нанофотоника: тренды". Долгопрудный, Россия. 28–29 ноября 2023.
- The 12th Computer Science Online Conference 2023. 26–29 апреля 2023.
- The 7th Computational Methods in Systems and Software 2023 (CoMeSySo2023) conference. Онлайн. 12–14 октября 2023.
- 66-я Всероссийская научная конференция МФТИ. Долгопрудный, Россия. 5 февраля–6 марта 2024.
- Photonics and electromagnetics research symposium (PIERS 2024). Ченду, Китай. 21–25 апреля 2024.
- Meta-optics, from science to technology conference (MOST). Самарканд, Узбекистан. 8–11 октября 2024.
- Machine Learning Methods in Systems. CSOC 2024. Online. 25–28 апреля 2024.
- IV Конгресс молодых ученых. Сириус, Россия. 27–30 ноября 2024.
- Горизонты нанофотоники. Долгопрудный, Россия. 17–18 декабря 2024.
- 67-я Всероссийская научная конференция МФТИ. Долгопрудный, Россия. 3 февраля – 10 марта 2024.

**Личный вклад автора** заключался в участии в формировании целей исследования и постановке научных задач, выборе объектов изучения, выполнении теоретических разработок, численного и аналитического моделирования, интерпретации результатов, подготовке научных публикаций и материалов конференций, а также в представлении докладов на научных конференциях. Все результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично или при его определяющем участии. Рукописи статей, лежащих в основе диссертационной работы, были подготовлены при ведущем участии соискателя, что подтверждается его статусом первого автора и ключевым вкладом в научное содержание исследований.

### **Публикации**

Результаты диссертации полно и системно изложены в 16 публикациях, при этом 14 из них опубликованы в изданиях, индексируемых в базе цитирования Scopus/WoS, 2 в журналах, входящих в 1-ю квартиль (Q1).

Список публикаций в международных изданиях, индексируемых в базе данных Scopus/WoS:

- Kuznetsov A.V., Canós Valero A., Tarkhov M., Bobrovs V., Redka D., Shalin A. Transparent hybrid anapole metasurfaces with negligible electromagnetic coupling for phase engineering // *Nanophotonics*. – 2021. – Vol. 10, No. 17. – P. 4385–4398.
- Kuznetsov A.V., Canos Valero A. Non-Huygens transparent metasurfaces based on the novel hybrid anapole state // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2015, No. 1. – P. 012079.
- Kuznetsov A.V., Valero A.C., Terekhov P.D., Shamkhi H.K. Various multipole combinations for conical Si particles // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2015, No. 1. – P. 012080.

- Shalin A.S., Kuznetsov A.V., Bobrovs V., Valero A.C. Novel hybrid anapole state and non-Huygens' transparent metasurfaces // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2172, No. 1. – P. 012001.
- Kuznetsov A.V., Canós Valero A., Shamkhi H.K., Terekhov P.D., Xingjie N., Bobrovs V., Rybin M.V., Shalin A. Special scattering regimes for conical all-dielectric nanoparticles // Scientific Reports. – 2022. – Vol. 12. – Article 21904.
- Terekhov P., Kuznetsov A., Valero A.C., Shamkhi H.K., Ni X., Bobrovs V., Rybin M., Shalin A.S. Various scattering regimes of truncated cone particles // CLEO 2023, Technical Digest Series / Optica Publishing Group. – 2023. – Paper JTu2A.129.
- Kuznetsov A.V., Bobrovs V. Existence of the hybrid anapole for Si conical nanoparticles // Software Engineering Research in System Science. CSOC 2023 // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2023. – Vol. 722.
- Babich N., Kuznetsov A., Bobrovs V., Kislov D. Optomechanical manipulation of nanoparticles in hybrid anapole state // Networks and Systems in Cybernetics. CSOC 2023 // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2023. – Vol. 723.
- Kuznetsov A.V., Bobrovs V. Superscattering regime for Si conical nanoparticles for the different directions of excitation // Networks and Systems in Cybernetics. CSOC 2023 // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2023. – Vol. 723. – P. 254–258.
- Kuznetsov A.V., Bobrovs V. Transverse Kerker effects in all-dielectric conical nanoparticles // Software Engineering Methods in Systems and Network Systems. CoMeSySo 2023 // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2024. – Vol. 909. – P. 278–281.
- Kuznetsov A.V., Bobrovs V. Generalized Kerker effects in all-dielectric conical nanoparticles // Software Engineering Methods in Systems and Network Systems. CoMeSySo 2023 // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2024. – Vol. 909. – P. 283–287.
- Kuznetsov A.V., Bobrovs V. Study of the properties of selectively transparent metasurfaces tunable through external control of the properties of 2D materials // Machine Learning Methods in Systems. CSOC 2024 // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2024. – Vol. 1126. – P. 74–77.
- Medvedev I.D., Kuznetsov A.V., Bobrovs V. Exceptional points in all-dielectric structure with only in-plane symmetry breaking // Machine Learning Methods in Systems. CSOC 2024 // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2024. – Vol. 1126. – P. 184–188.
- Kuznetsov A.V., Medvedev I.D., Bobrovs V. Methods for dynamics control of the optical properties of single high-index all-dielectric nanoparticles located on substrates with 2D materials // Machine Learning Methods in Systems. CSOC 2024 // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2024. – Vol. 1126. – P. 339–343.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация содержит введение, 4 главы и заключение. Работа изложена на 171 страницах, содержит 33 иллюстраций, 3 таблицы, 81 формулу и список цитируемой литературы из 235 наименований.

## Основное содержание работы

Во **введении** представлена характеристика исследуемой области, обоснована актуальность темы, сформулирована цель исследования, а также раскрыты элементы научной новизны и обозначена практическая значимость выполненной работы.

**Первая глава** посвящена подробному исследованию как периодических, так и аperiodических массивов наночастиц в ГА состоянии при нормально падающем освещении плоской волной. Демонстрируется, как свойства ГА напрямую наследуются метаповерхностью, что позволяет обеспечить резонансное подавление отражения, инвариантность к периоду и надежную защиту от беспорядка, что является уникальной чертой представленной конструкции.

Были рассчитаны спектры пропускания ( $T$ ) для метаповерхности ГА с разделением между стенками резонаторов  $s = 300$  нм (рисунок 1б).  $\lambda_0$  указывает длину волны, характеризующуюся почти полным перекрытием дипольных и квадрупольных анаполей в одной наночастице. Подтверждая теорию, можно наблюдать широкую полосу пропускания вблизи  $\lambda_0$ . Стоит отметить, что единичное пропускание может быть достигнуто, если пренебречь потерями.

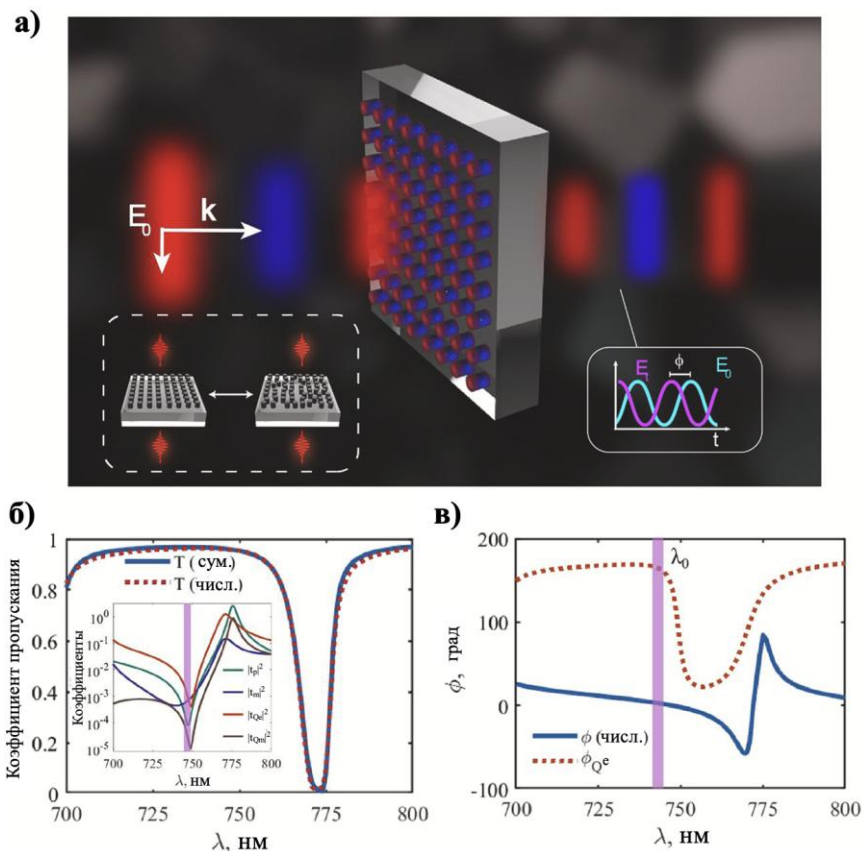


Рисунок 1 – Оптические свойства метаповерхностей из наночастиц в ГА: а – схематический обзор рассматриваемых метаповерхностей a-Si, состоящих из наночастиц ГА, б – численные и полуаналитические спектры пропускания, полученные для ГА метаповерхности с  $s = 300$  нм (вставка: абсолютные значения доминирующих мультипольных вкладов), в – общая прошедшая фаза  $\phi$ , полученная численно, и изменение фазы, испытываемое электрическим квадруполем  $\phi_{ЭК}$

Прошедшая фаза  $\varphi$  равна точно 0 на рисунке 1в и постепенно увеличивается вдоль полосы пропускания примерно на 40 градусов. Чтобы понять физическое происхождение изменения фазы, необходимо разложить комплексный коэффициент пропускания и точных выражений для мультипольных моментов в декартовых координатах [1]. Абсолютные значения мультипольных вкладов в пропускание показаны на вставке рисунке 1б. По прямой аналогии с поведением отдельной частицы наблюдается резонансная компенсация всех мультипольных моментов при  $\lambda_0$  в виде провалов, которые наблюдаются вдоль всей полосы пропускания.

Важно отметить одно из самых явных преимуществ новых не-Гюйгенсовых метаповерхностей, а именно их устойчивость к изменениям в межчастичном разделении  $s$ . Для сравнения проведены расчеты с менее эффективной не-Гюйгенсовой метаповерхностью, состоящей исключительно из наночастиц, поддерживающих электрический анаполь [2]. Из-за малых общих поляризуемостей оба исследованных случая сохраняют единичное пропускание до очень малых периодов. Тем не менее, метаповерхности на основе ГА состояний способны эффективно подавлять отражение даже при крайне малых межэлементных расстояниях, вплоть до значений менее 6% от длины падающей волны  $\lambda_0$ , что делает возможным создание сверхкомпактных структур. При этом фаза прошедшего излучения остаётся практически неизменной. Ввиду этого результата появляются возможности реализовать сверхмалые пиксели за пределами того, что было достигнуто до сих пор с другими платформами, например, для голографических приложений.

Была построена зависимость, отражающая связь между переданной фазой и геометрическим параметром метаатома (рисунок 2). С учетом последующей экспериментальной реализации в качестве настраиваемого параметра был выбран радиус цилиндра  $R_{cyl}$ , поскольку изменение радиуса может быть реализовано с использованием надёжных технологических методов, таких как электронно-лучевая литография в сочетании с реактивным ионным травлением [3]. Для построения карты были рассчитаны коэффициенты пропускания и фаза прошедшего излучения для ГА метаповерхности с малым межэлементным расстоянием  $s = 150$  нм при различных значениях радиуса и длины волны (рисунок 2а,б). В отличие от сферы, поведение с  $R_{cyl}$  не идентично поведению с  $\lambda$ . Это связано с тем, что ГА появляется из-за перекрытия мод Ми и Фабри-Перо (ФП), имеющих различную зависимость от  $R_{cyl}$ . Тем не менее, зафиксировав рабочую длину волны, удаётся получить чёткую фазовую модуляцию в зависимости от радиуса цилиндра в пределах прозрачного спектрального диапазона, определяемого ГА резонансом (рисунок 2в) [3,4]. Были построены две фазовые карты для различных значений межчастичного расстояния  $s$ , которые продемонстрировали практически идентичные результаты, что дополнительно подтверждает способность ГА наночастиц функционировать как независимые метаатомы.

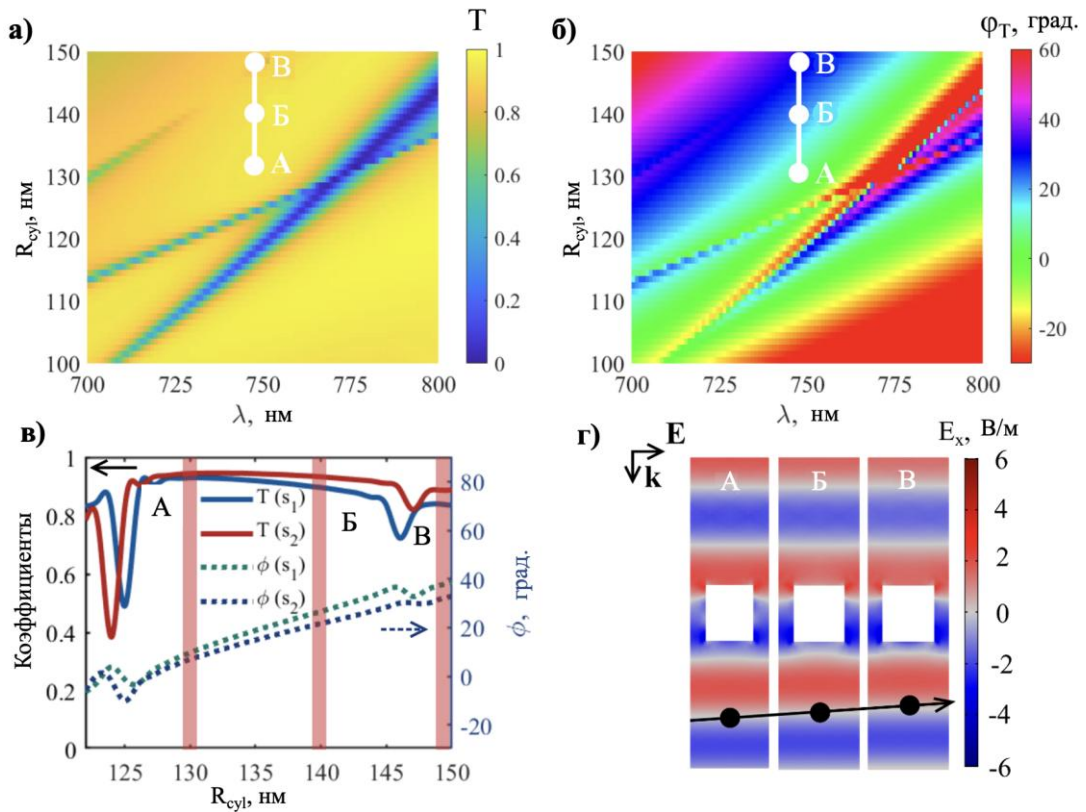


Рисунок 2 – ГА метаповерхности, обеспечивающие фазовое управление при полном пропускании: а – спектральная зависимость коэффициента пропускания от радиуса метаатома при фиксированном расстоянии между цилиндрами  $s = 150$  нм, б – фазовый сдвиг прошедшей волны, рассчитанный для тех же параметров, что и в пункте а, в – карта фазового отклика (в 0-м дифракционном порядке) для двух сверхкомпактных решёток с межэлементными расстояниями  $s = 100, 150$  нм при  $\lambda = 750$  нм, г – слева направо: x-компонента электрического поля в трёх метаповерхностях, состоящих, соответственно, из метаатомов с радиусом  $R_{cyl} = 130, 140, 150$  нм и прошедшими фазами  $\varphi_T = 10, 30, 40$  градусов, выбранных из б (обозначены как А, Б, В при  $\lambda = 750$  нм)

Построенная карта служит инструментом для подбора метаатома, обеспечивающего заданное фазовое смещение, которое полностью определяется значением радиуса  $R_{cyl}$ . На рисунке 2г представлено поведение x-компоненты полного электрического поля для трёх характерных точек А, Б и В, отмеченных на фазовой диаграмме (рисунок 2в). Как видно, при переходе от точки А к точке В в пространстве параметров происходит постепенное изменение задержки прошедшей волны относительно падающего излучения.

Хотя теме периодических решёток посвящено значительное количество исследований, их практическая реализация требует применения высокоточных методов нанолитографии. В результате реальные метаповерхности в той или иной степени неизбежно содержат элементы беспорядка. Такой беспорядок способен существенно повлиять на оптические свойства массивов, что значительно усложняет разработку прикладных устройств [5]. В общем случае различают два типа случайных отклонений [6]: флуктуации размеров элементов и позиционный беспорядок (ПБ). В данной работе внимание сосредоточено исключительно на

последнем, поскольку изучаются эффекты, обусловленные решётчатой структурой.

Для оценки устойчивости к ПБ были выполнены два набора численных экспериментов. На рисунке 3а, б показано введение беспорядка в плоскости метарешётки путём варьирования периода решётки согласно нормальному распределению со средним значением  $l$  и стандартным отклонением  $\delta l$ . Беспорядок был реализован численно при моделировании конечной структуры размером  $4 \times 4$ , после чего применялись граничные периодические условия (ГПУ), как показано на рисунке 3в. Там же представлены смещения каждого ГА метаатома относительно их положений в идеальной решётке. Аналогично, на рисунке 3г, д ПБ возбуждение производится вне плоскости, вдоль оси  $z$ , как показано на рисунке 3е, сверху и снизу располагаются идеально согласованные слои (ИСС). ПБ вне плоскости может быть связан, например, с шероховатостью поверхности.

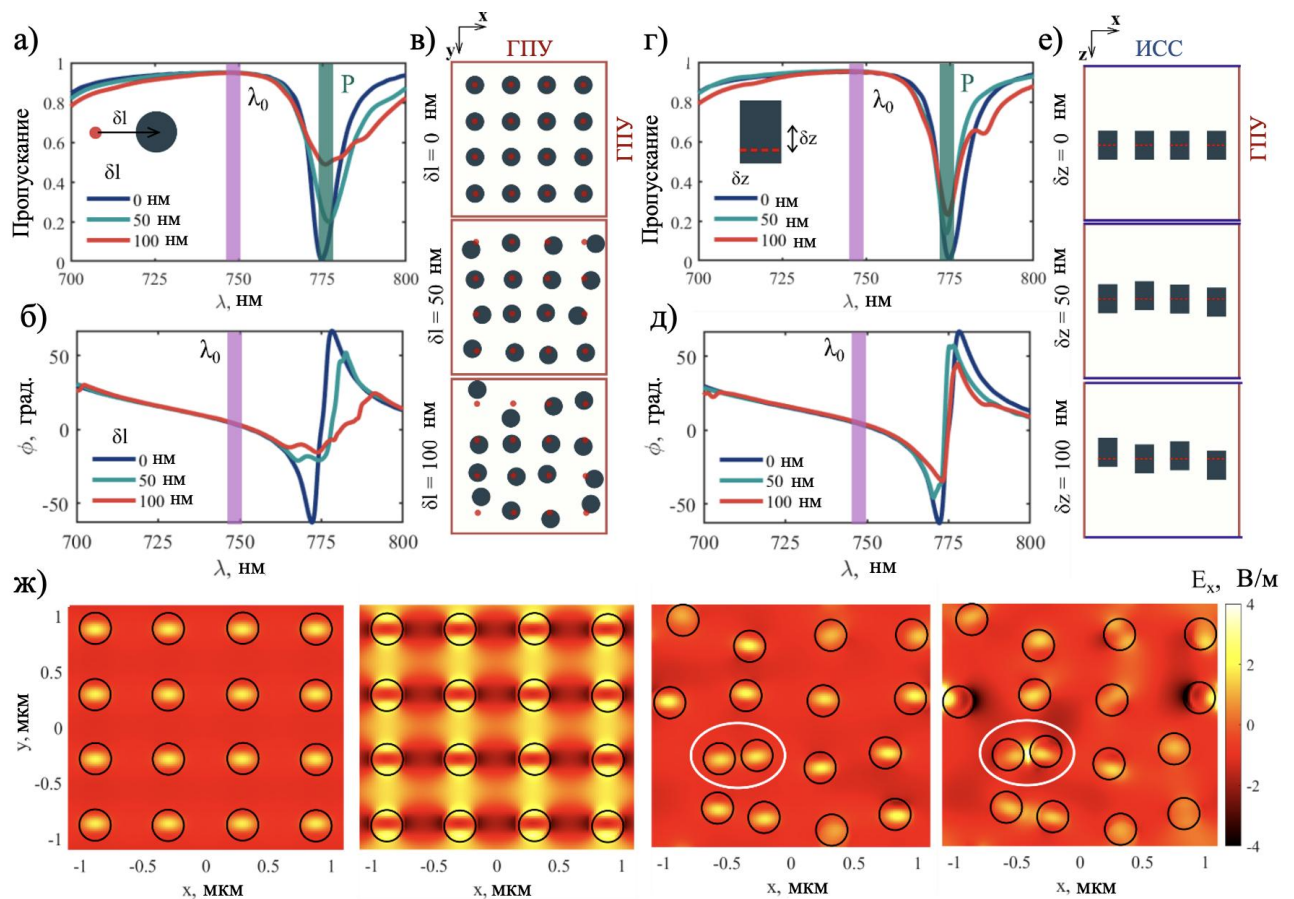


Рисунок 3 – Устойчивость ГА метаповерхностей к ПБ: а, б – зависимости коэффициента пропускания и фазового сдвига прошедшего излучения при различных степенях ПБ, характеризующихся стандартным отклонением  $\delta l$ , схематически изображенные на в, где красные точки указывают на идеальную периодическую решетку, г, д – пропускание решётки при различных степенях ПБ со стандартным отклонением  $\delta z$ , схематически показанного на е, ж – расчетные распределения  $x$ -компоненты электрического поля при  $\lambda_0$  и точке P, указанных на а и г. Слева направо: первые две карты полей соответствуют периодическому массиву при  $\lambda_0$  и точке P соответственно. Два других соответствуют тем же точкам для ПБ, заданного  $\delta l = 100$  нм

Как видно на рисунке 3а–е, в спектральной области, соответствующей ГА резонансу, наблюдаются лишь незначительные изменения в коэффициенте пропускания и фазе прошедшего излучения. Это подчёркивает высокую устойчивость структуры к значительным отклонениям от идеальной периодичности. Напротив, вне диапазона действия ГА наблюдается выраженная чувствительность к ПБ — особенно заметная в области провала пропускания (точка Р на рисунке 3а, г), где происходят существенные изменения в амплитуде передаваемого сигнала. Эти поведения также подтверждаются в распределениях ближнего поля в и в провале спектра пропускания. На крайней правой панели на рисунке 3ж (неупорядоченный массив, освещенный в точке Р), сильные затухающие поля появляются, когда частицы находятся близко друг к другу. Следует также отметить, что предложенная метаповерхность выигрывает за счёт высокой локализации электромагнитного поля, присущей анапольным резонансам. Благодаря этому неупорядоченные ГА структуры представляют собой универсальную и технологически удобную платформу для усиления светоматериальных взаимодействий на наномасштабе, не требующую сложных процедур оптимизации или точного позиционирования отдельных метаатомов.

Практическая реализация метаповерхностей неизбежно потребует наличия подложки. Последняя может играть немалую роль в оптическом отклике и вносит магнитоэлектрическую связь [7]. В отличие от обычных резонансов, ГА чрезвычайно устойчив при нанесении на подложку [8]. В исследуемом ГА наноцилиндре (в отличие от обычных анаполей или источников Гюйгенса) эффективно достигается за счёт перекрытия резонансных мод «Ми-подобных» и «ФП-подобных». Первый может быть связан со стоячими волнами, возникающими между боковыми стенками резонатора, тогда как второй в основном формируется из стоячих волн между верхней и нижней стенками. Таким образом, изменения отражательной способности подложки влияют в основном на амплитуду мод ФП, но моды Ми остаются почти неизменными [8]. При изменении  $n_{sub}$  ( $n_{sub}$  – показатель преломления подложки) ГА постепенно трансформируется в обычный ЭД анаполь, по-прежнему сохраняя сильное снижение рассеяния.

Было показано пропускание, отражение и поглощение в ГА режиме для метаповерхности, нанесенной на ряд гипотетических подложек с показателем преломления в диапазоне  $n_{sub} = 1, \dots, 2$ . Наблюдается постепенное сужение полосы пропускания, в основном из-за красного смещения мод Блоха высокого порядка. Важно отметить, что полное пропускание сохраняется вблизи  $\lambda_0$ , с уменьшением всего на 10% для  $n_{sub} = 2$ . Принципиально важно, что полученные результаты убедительно демонстрируют возможность прямого нанесения метаповерхности на подложку из обычного стекла без необходимости в дополнительном проектировании. При этом сохраняются характеристики полного пропускания и эффективного фазового управления в обмен на небольшое уменьшение полосы пропускания.

На основе предварительного анализа была разработана схема поиска необходимой фазы для ГА метаповерхности, нанесенной на стеклянную подложку.

Достижимая модуляция фазы составляет теперь до 80 градусов, что почти вдвое превышает соответствующий показатель для конструкции, функционирующей в вакууме. Вместе с тем, такой прирост сопровождается уменьшением диапазона допустимых радиусов (от 120 до 140 нм) при которых обеспечивается как полное пропускание, так и минимальное взаимодействие между соседними метаатомами. Удвоение диапазона управляемой фазы по сравнению со свободным пространством указывает на наличие значительного потенциала для дальнейшего усиления данного эффекта.

Далее исследуется возможность модуляции фазы сверхбыстрого гауссова импульса в режиме пропускания, используя неупорядоченный ГА массив поверх стеклянной подложки. Чтобы проиллюстрировать надежность системы, был выбран сильный беспорядок в плоскости ( $\delta l = 50$  нм), соответствующий  $\approx 20\%$  разделения между наноцилиндрами ( $s = 300$  нм). Затем выполнилось моделирование методом конечных разностей во временной области (МКРВО) входящего х-поляризованного гауссова импульса длительностью 400 фс. Плавное изменение радиуса цилиндра  $R_{cyl}$  позволяет управляемо регулировать фазу выходного импульса. Для моделирования параметр  $R_{cyl}$  варьировался в пределах от 125 до 135 нм, что соответствует диапазону, в котором реализуется ГА состояние.

Полученная от периодических и неупорядоченных метаповерхностей, практически идентична, что еще раз демонстрирует, что ГА наночастицы действительно работают почти независимо от своих соседей. Следовательно, пропускание сохраняется выше 85%, что подтверждается полными временными профилями (диссипативные потери не были проигнорированы при моделировании).

Таким образом, были предложены и подробно исследованы новые прозрачные метаповерхности, основанные на уникальных свойствах недавно обнаруженного ГА режима. В отличие от современных разработок, опирающихся, например, на поперечный эффект Керкера, предложенные структуры обеспечивают не только пропускание, близкое к единице, но и возможность управляемого фазового сдвига передаваемой волны. Что наиболее важно, они демонстрируют пренебрежимо малую межчастичную связь, преодолевая критическое место обычных источников Гюйгенса. Показано, что описанный подход обладает рядом технологических преимуществ, включая возможность создания сверхкомпактных массивов с откликом, эквивалентным одиночной частице, сохранение прозрачного спектрального окна при нанесении на различные диэлектрические подложки, а также устойчивость к высоким уровням ПБ, что существенно упрощает производственные требования. В рамках демонстрации концепции численно реализован сверхбыстрый фазовый модулятор, функционирующий как для регулярных, так и для неупорядоченных ГА массивов, при этом обе конфигурации показывают практически идентичное поведение. Важно отметить, что реализация ГА состояния не требует жёстких условий по геометрии и может быть легко достигнута, в частности, в наноструктурах из аморфного кремния, работающих в видимом диапазоне при нормальном падении плоской волны. Из вышеизложенного можно сделать вывод, что ГА наночастицы,

в отличие от элементов Гюйгенса, действительно приближаются к идеалу «метаатома», т. е. элементарной ячейки субволновой длины с уникальным фазовым отпечатком.

Во **второй главе** демонстрируется первая экспериментальная реализация кремниевых метаповерхностей, работающих в ГА состоянии для оптического фазового контроля. Экспериментальные результаты строго подтверждаются численным моделированием, обеспечивающим точную характеристику спектров пропускания и фазовых сдвигов. Этот комплексный подход не только подтверждает методологию проектирования, но и подчеркивает надежность ГА состояния при различных структурных конфигурациях. Способность поддерживать высокую передачу при настройке фазового отклика посредством контролируемых изменений размеров метаатомов представляет собой значительный прогресс в проектировании метаповерхностей. Таким образом, это исследование закладывает основу для интеграции ГА метаповерхностей в оптические устройства следующего поколения с потенциальными применениями в формировании пучка, голографии и т. д. В этой главе в качестве метаатома использовался кремниевый наноцилиндр.

Изготовление ГА метаповерхностей было реализовано на стеклянной подложке с помощью многоэтапного протокола нанопроизводства, включающего процессы осаждения, шаблонизации, подъема и травления. Основной этап работы — измерение фазового сдвига излучения, прошедшего через структуры. В этом исследовании предлагается метод, объединяющий полиномиальную подгонку Цернике с внеосевой интерферометрией для измерения фазы образцов в широкополосном спектральном диапазоне.

Экспериментально измеренные спектры пропускания и фазовые сдвиги сравнивались с теоретическими предсказаниями, полученными с помощью численного моделирования с использованием МКРВО в программном обеспечении Ansys Lumerical и метода конечных элементов (МКЭ) в COMSOL Multiphysics.

Незначительные расхождения между экспериментальными и численными результатами можно объяснить факторами, которые сложно контролировать как во время изготовления, так и во время измерения. Например, изготовленные метаатомы отклоняются от идеальной цилиндрической формы из-за небольших неровностей и шероховатости поверхности. Более того, остаточный материал между соседними метаатомами не полностью удален, и из-за несовершенств изготовления могут возникать изменения в периоде, высоте и радиусе по всему образцу. Также наклонные углы падения находятся в диапазоне от 0 градусов до 6 градусов. Хотя эти факторы могут повлиять на конечный результат, они были минимизированы в ходе этой работы. С целью контроля оптической фазы при единичном пропускании были изготовлены три типа метаповерхностей с использованием численно оптимизированных геометрий метаатомов.

Первый тип включает обычные метаповерхности в ГА состоянии, характеризующиеся расстоянием между соседними метаатомами  $s = 300$  нм. На рисунке 4 показано сравнение экспериментальных измерений и численного моделирования. Геометрические параметры близко соответствуют теоретически

предсказанным условиям для возбуждения ГА в одной наночастице, что позволяет провести первое экспериментальное исследование оптических свойств метаповерхностей, демонстрирующих это состояние.

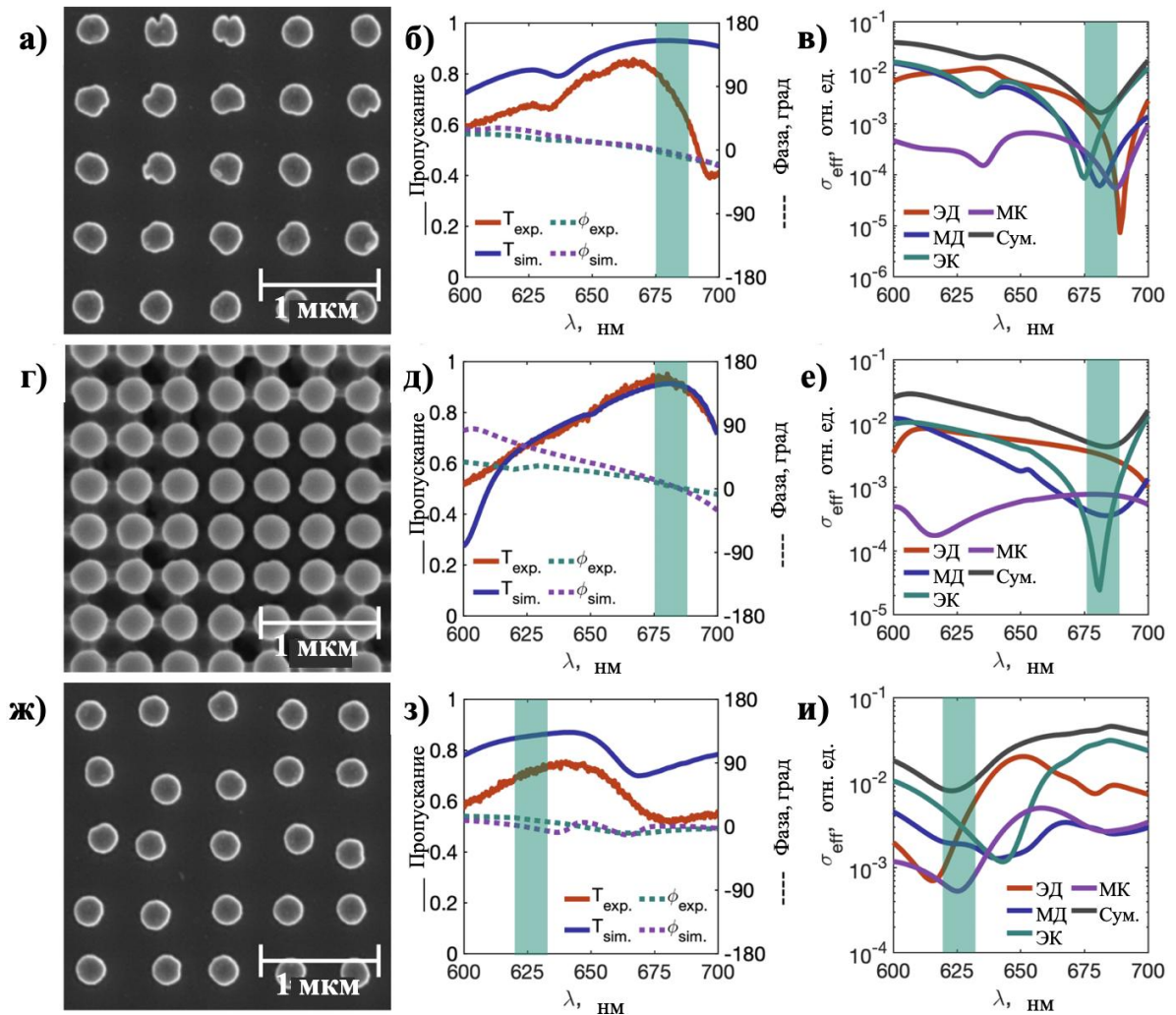


Рисунок 4 – Оптические свойства обычных метаповерхностей в ГА состоянии: а–в соответствуют метаповерхностям с радиусами метаатомов  $R_{cyl} = 120$  нм,  $H = 330$  нм и  $s = 300$  нм, г–е соответствуют метаповерхностям с радиусами метаатомов  $R_{cyl} = 125$  нм,  $H = 330$  нм и  $s = 100$  нм, а ж–и соответствуют метаповерхностям с радиусами метаатомов  $R_{cyl} = 100$  нм,  $H = 330$  нм,  $s = 300$  нм и  $\delta l = \pm 50$  нм, а, г, ж показывают изображения сверху, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), изготовленных кремниевых метаповерхностей с цилиндрическими метаатомами, б, д, з представляют спектры пропускания (сплошные линии) и сдвиги фаз излучения (пунктирные линии), сравнивая экспериментальные измерения с численным моделированием, в, е, и отображают мультипольное разложение метаатомов, при этом спектральный диапазон, соответствующий ГА состоянию, выделен зеленым цветом

Второй тип состоит из сверхплотных метаповерхностей с уменьшенным интервалом  $s = 100$  нм. На рисунке 4г–е показано сравнение между экспериментальными измерениями и численным моделированием. Как

обсуждалось ранее, ГА режим предлагает привлекательную платформу для голографических приложений, где высокая плотность пикселей имеет решающее значение. Здесь демонстрируются сверхплотные метаповерхности, достигающие отношения расстояния между частицами к длине волны приблизительно  $s/\lambda = 0,16$ , тем самым открывая новые возможности для улучшения характеристик в фотонных устройствах следующего поколения. Эти сверхплотные метаповерхности в ГА состоянии были впервые экспериментально изучены.

Третье перспективное направление в проектировании метаповерхностей включает неупорядоченные метаповерхности. В этом случае среднее расстояние поддерживается на уровне  $s = 300$  нм, но каждый метаатом случайным образом смещается на величину до  $\delta l = \pm 50$  нм в направлении  $x$  или  $y$  от своего положения в упорядоченном массиве. Эта рандомизация эффективно подавляет эффекты, связанные со структурной периодичностью, предлагая большую гибкость для индивидуального управления резонансом. Неупорядоченные метаповерхности, работающие в ГА режиме, были впервые экспериментально охарактеризованы, а на рисунке 4ж–и показано сравнение между экспериментальными данными и моделированием.

На рисунке 4а, г, ж представлены изображения, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) изготовленных метаповерхностей, соответствующих трем типам, обсуждавшимся выше. Эти изображения с высоким разрешением четко подчеркивают компактность и точность наноструктурированных массивов, подчеркивая успешную реализацию обычных, сверхплотных и неупорядоченных геометрий метаповерхностей. Хотя видны незначительные дефекты изготовления, включая остаточный материал, соединяющий соседние метаатомы, и небольшую шероховатость поверхности. Эти отклонения согласуются с типичными ограничениями методов нанопроизводства сверху вниз и не оказывают существенного влияния на оптические характеристики. Важно отметить, что характеристики ГА остаются четко различимыми для всех трех типов метаповерхностей, что указывает на высокую степень устойчивости этого оптического режима к наномасштабным структурным возмущениям. Эти наблюдения подтверждают практическую осуществимость использования ГА метаповерхностей в реальных приложениях, где незначительные дефекты часто неизбежны.

На рисунке 4б, д, з показано сравнение экспериментальных (сплошные линии) и численных (штриховые линии) спектров пропускания и фазовых сдвигов света, прошедшего через метаповерхности. В целом экспериментальные результаты демонстрируют хорошее соответствие с моделированием, причем оба демонстрируют схожие спектральные профили и фазовое поведение на всех трех типах метаповерхностей. Хотя спектральные положения анапольных особенностей слегка смещены, их характерные формы сохраняются, а фаза в точке анаполя последовательно приближается к нулю. Примечательно, что сходство спектральных откликов во всех конфигурациях предполагает, что наблюдаемые эффекты не зависят от межчастичного расстояния и от структурного расположения, включая отсутствие периодичности.

Чтобы убедиться, что наблюдаемые эффекты действительно соответствуют ГА режиму, было проведено мультипольное разложение метаатомов, как показано на рисунке 4в, е, и. По мере увеличения радиусов метаатомов минимум в общем поперечном СР постепенно смещается в сторону более длинных волн (красное смещение) и наоборот, что сопровождается соответствующими сдвигами в спектральных положениях отдельных мультипольных вкладов. Такое поведение приводит к изменению фазы излучения на исходной длине волны, связанной с ГА состоянием, тем самым позволяя настраиваемое управление фазой при сохранении высокой пропускания в пределах окна прозрачности. В случае сверхплотных метаповерхностей (рисунок 4е) ГА характер остается четко идентифицируемым, несмотря на незначительные дефекты изготовления, которые вносят небольшие искажения в мультипольный отклик [44, 52]. Важно, что минимумы отдельных мультипольных вкладов рассеяния остаются спектрально выровненными, а общее поперечное СР продолжает демонстрировать четко определенный провал, характерную черту ГА режима. Эти результаты еще раз подчеркивают устойчивость этого оптического состояния к структурным изменениям и несовершенствам.

Это исследование представляет собой первую экспериментальную демонстрацию настраиваемого фазового управления, обеспечиваемого метаповерхностью, работающей в ГА режиме. В пределах протестированного диапазона радиусов метаатомов наблюдалась фазовая модуляция приблизительно  $\approx 40^\circ$  при сохранении высокой эффективности пропускания в пределах окна прозрачности. Этот уровень модуляции, достигнутый без ущерба для оптической пропускной способности, иллюстрирует потенциал ГА метаповерхностей для приложений, требующих динамических или пространственно изменяющихся фазовых профилей. Кроме того, расширение диапазона настройки размеров метаатома может разблокировать еще более широкий фазовый контроль, тем самым расширяя функциональные возможности таких метаповерхностей в таких приложениях, как управление лучом, голография и плоская оптика.

В третьей главе обсуждается новый подход для конусных наночастиц, обеспечивающий дополнительную степень свободы — нарушение симметрии вдоль главной оси. В ходе численного моделирования, выполненного в среде COMSOL Multiphysics, были проанализированы все основные эффекты, включая эффекты Керкера, ГА состояние и режимы суперрассеяния, с использованием кремниевых рассеивателей в форме усечённых конусов. Указаны конкретные геометрические параметры, при которых наблюдаются эти явления. Представленные результаты позволяют легко адаптировать подход для других материалов, длин волн и конфигураций, что подчёркивает универсальность предложенной методики.

Эффект Керкера изначально был теоретически предсказан для сферических частиц, обладающих одинаковыми значениями диэлектрической и ЭД и МД моментов и соответствующей фазовой разности между ними возможно наблюдение направленного рассеяния — исключительно вперёд или назад [9]. Существует множество работ, показывающих экспериментальную реализацию

такого эффекта в диэлектрических наночастицах [10–12]. Со временем были обнаружены другие значимые комбинации мультиполей и разности фаз между ними, поэтому эффект Керкера пришлось «обобщить» [13,14]. В настоящее время термин «обобщенный эффект Керкера» используется, когда речь идет о выраженном прямом или обратном рассеянии.

В данной главе представлены различные типы эффектов Керкера, реализуемые для усечённых кремниевых конусов, а также сформулированы условия, необходимые для их проявления в дальней зоне и в контексте коэффициентов СР. Диаграммы направленности, полученные в результате численного моделирования в COMSOL Multiphysics, демонстрируют хорошее соответствие с теоретическими предсказаниями эффектов Керкера, полученными в приближении идеализированных точечных диполей. Несмотря на некоторые отклонения, вызванные невозможностью достижения строго идеального соотношения мультипольных вкладов в реальных структурах, эти расхождения остаются незначительными. Дополнительно, близкое совпадение между СР, рассчитанным как сумма мультипольных слагаемых, и значением, полученным через интегрирование вектора Пойнтинга по замкнутой поверхности в дальней зоне с последующей нормировкой на интенсивность падающего излучения, подтверждает отсутствие необходимости учитывать мультиполи более высокого порядка.

Другой не менее важной особенностью рассеяния является поперечный эффект Керкера, который был впервые описан в [15,16]. Поперечный эффект Керкера обусловлен специфическим сочетанием мультипольных откликов, при котором основная часть излучения направляется в боковые направления, в то время как рассеяние вперёд остаётся минимальным — в соответствии с оптической теоремой [17]. Данный эффект может быть реализован как за счёт простых комбинаций двух мультиполей [18], так и с использованием более сложных конфигураций возбуждённых мод.

В этой главе впервые продемонстрированы все известные эффекты Керкера для отдельных наносеятелей в пределах одной геометрии. Таким образом, наноконусы представляют собой универсальную, удобную для изготовления платформу для внедрения новых фотонных устройств, использующих комплексный набор инструментов мультипольных интерференционных эффектов, включая гибкую настройку схем рассеяния.

Далее было показано точное мультипольное разложение ГА режима кремниевого цилиндра, исследованного в [19,20] (рисунок 5). Можно оценить одновременное подавление каналов ЭД, магнитного диполя (МД), ЭК и магнитного квадруполья (МК) на одной и той же частоте. На вставке изображена норма электрического поля в точке спектра с наименьшим рассеянием, называемая в дальнейшем «длиной волны ГА ( $\lambda_{ГА}$ )». Из распределения поля видно, что основная часть энергии сосредоточена внутри наночастицы, где формируются две ярко выраженные горячие точки. Лишь несколько локализованных максимумов наблюдаются на поверхности, их характерный размер составляет порядка  $\lambda_{ГА}/40$ . Это указывает на то, что даже в ближнем поле вне частицы падающее излучение

практически не претерпевает искажений, вызванных рассеянием. Далее, при фиксированной высоте резонатора, проводится плавное увеличение степени конусности, определяемой как  $1 - R_{top}/R_{bottom}$ . Мультипольные разложения для трёх характерных форм конусов приведены на рисунке 5а–в. Во всех случаях рассматривается освещение, падающее сверху. Для более наглядного отображения нулей в спектрах применяется логарифмическая шкала.

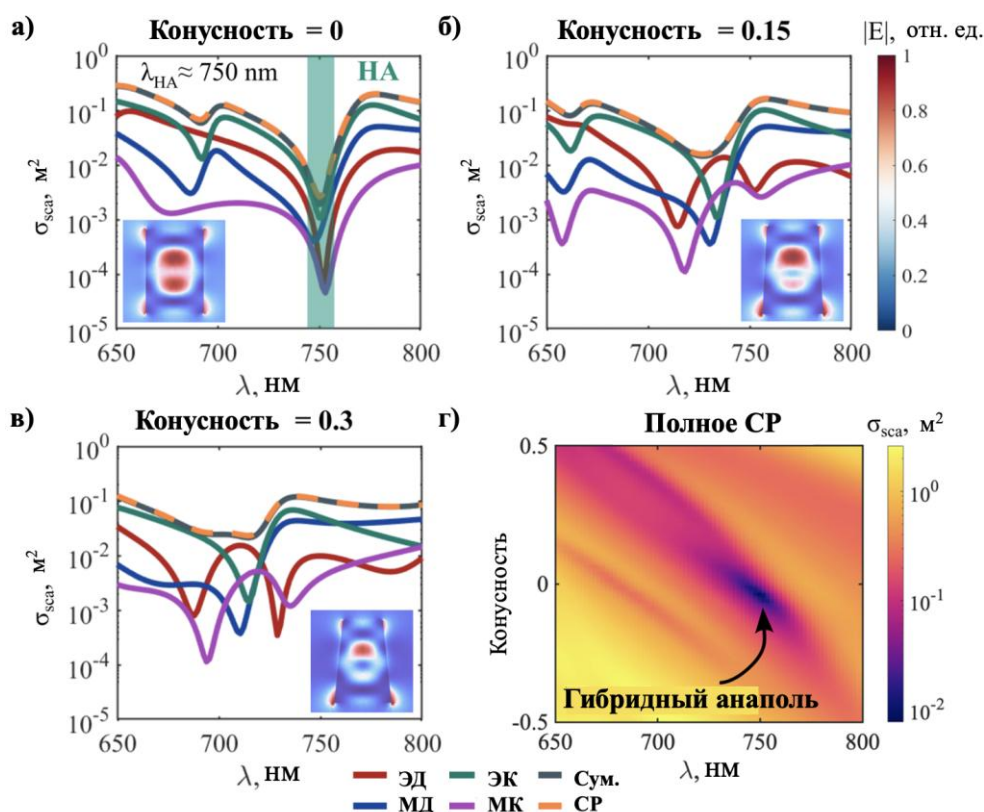


Рисунок 5 – Эволюция ГА в зависимости от конусности и длины волны: а–в – мультипольные разложения СР (полулогарифмический масштаб) для выбранных конусностей, при высоте частицы  $H = 370$  нм и нижнем радиусе  $R_{bottom} = 130$  нм.

Во всех расчетах высота наночастицы сохранялась постоянной. Вставки: распределение нормы электрического поля на  $\lambda_{ГА}$ , г – общее СР в зависимости от конусности и длины волны

Во-первых, наблюдаются спектральное смещение в синюю область спектра всех резонансов. Это ожидаемо вследствие общего уменьшения поперечных размеров резонатора. Во-вторых, оригинальные анаполи МК и ЭД смещаются быстрее, чем ЭК и МД. В результате четыре анаполя перестают накладываться в спектре, и рассеиватель становится менее «прозрачным» для падающего освещения. Это демонстрируют расчеты общего СР в зависимости от конусности (рисунок 5г).

При увеличении конусности также наблюдается постепенное формирование новых анапольных состояний в спектрах СР ЭД и МК, обозначенных соответственно красной и фиолетовой сплошными линиями. Эти состояния спектрально совпадают с максимумами в СР ЭК и МД вблизи ГА. Новые особенности становятся всё более выраженными по мере роста конусности.

Примечательно, что их появление сопровождается «расщеплением» — появлением двух близко расположенных анапольных состояний в ранее невозмущенных ЭД и МК резонансах (рисунок 5в).

Проведённое в данной главе исследование выявило влияние даже незначительного изменения конусности, которое может оказывать действие на резонансные состояния, отвечающие за формирование ГА режима. Такие геометрические возмущения нарушают исходную симметрию структуры и активируют ранее запрещённые модовые каналы, что приводит к дополнительным межмодовым взаимодействиям. Эти особенности могут оказаться ключевыми для будущих приложений, использующих уникальные свойства ГА, включая проектирование метаповерхностей, сенсорику и другие нанопотонные технологии. Кроме того, в рамках данной работы впервые продемонстрирована возможность реализации ГА состояния в наноконических структурах. Таким образом, была расширена библиотека полностью диэлектрических наноструктур, поддерживающих ГА, за пределы цилиндров [20] и эллипсоидов [21]. Конические наноструктуры вновь проявляют себя как простая и технологически удобная платформа для реализации эффектов, основанных на мультипольной интерференции.

В данной главе также продемонстрирован режим суперрассеяния, принципиально отличающийся от ГА состояния: он характеризуется значительным усилением рассеяния от субволновой наночастицы. Этот необычный режим уже нашёл применение в ряде современных задач, включая, в частности, оптическое зондирование [22], сбор энергии [23], обман радаров [24] и т.д. Обычно считается, что для усиления рассеяния необходимо спектрально перекрывать резонансные частоты нескольких квази-нормальных мод (КНМ), рассеивающихся на разных мультиполях [25].

Систематическое исследование суперрассеяния, проведённое в данной главе на основе проектирования конической геометрии, выявило новый эффективный подход к управлению характеристиками этого явления. Основное внимание было уделено согласованию двух мод цилиндрической структуры, расположенных в спектральной близости, пространственно локализованных в пределах резонатора и обладающих различной четностью. Такой подход позволяет целенаправленно усиливать эффект суперрассеяния за счёт контролируемого межмодового взаимодействия. Эта стратегия может быть достаточной, но не обязательной для достижения суперрассеяния в рассматриваемой геометрии. Однако исследованный механизм подчеркивает важные особенности суперрассеяния в конусе.

Хотя возможны и другие подходы к реализации суперрассеяния, оптимизированная коническая структура, исследованная в данной работе, позволила выявить ряд ключевых особенностей, присущих конической геометрии. Показано, что благодаря гибкости конструкции и действию симметричных правил, управляющих поведением таких структур, можно достичь высокоточного управления характеристиками рассеяния. В частности, настройка всего одного геометрического параметра — степени конусности — способна вызвать сильное взаимодействие между двумя КНМ с противоположной четностью, как было

недавно продемонстрировано в [26]. Это взаимодействие может быть эффективно использовано для усиления рассеяния и управления диаграммой направленности вблизи резонанса, обеспечивая её выраженную направленность. Такой подход открывает широкие перспективы для оптимизации усечённых конических структур в задачах прикладной оптики.

В **четвертой главе** исследуется связь между ГА и квази-ССК. Демонстрируется, что при соответствующем проектировании кремниевой наночастицы, поддерживающей спектрально изолированный квази-ССК, рассеяние от нескольких мультиполей может быть резонансно подавлено, что приводит к ГА. Всесторонне анализируется мультипольный и модовый состав этого эффекта при различных направлениях возбуждения и геометриях. Сочетание ГА и квази-ССК имеет значительные перспективы для приложений в проектировании наноантенн, сверхчувствительных метаповерхностей, голографии и широком спектре новых нанопотонных устройств.

В этой главе демонстрируется ГА в кремниевом усеченном наноконусе с чистейшими МК откликом, тем самым открывая совершенно новое направление для применения анаполей (рисунок 6а, б).

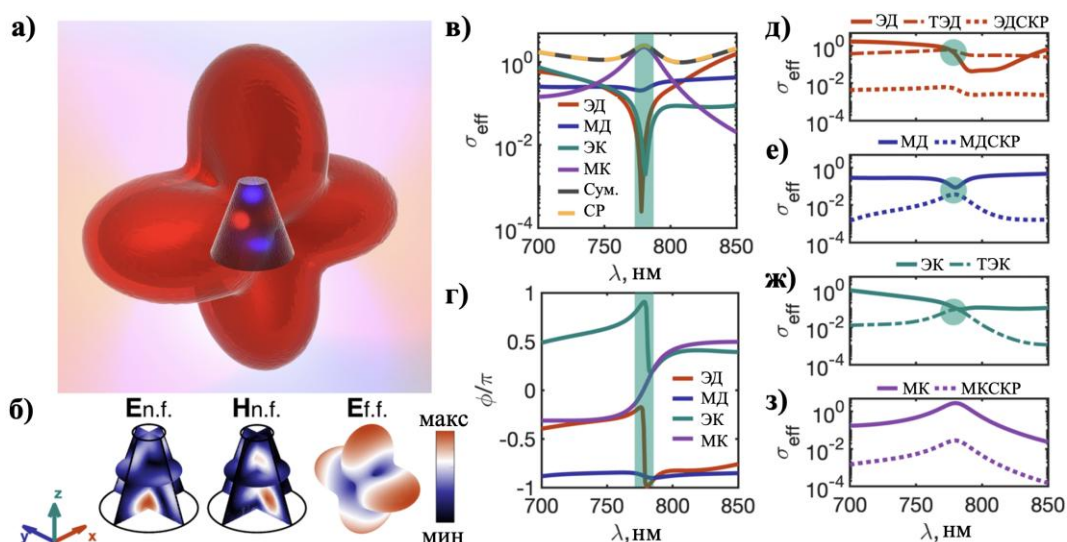


Рисунок 6 – Мультипольное разложение СР: а – художественное изображение частиц кремниевых наноконусов, б – распределения электрического и магнитного полей в ближней зоне, а также диаграмма направленности электрического излучения в дальней зоне на исследуемой длине волны, в – точные мультипольные разложения СР в полулогарифмическом масштабе [1] для кремниевого усеченного конуса, г – фазовый анализ мультипольных вкладов, д) – з) Мультипольные разложения СР, включая вклады тороидальных моментов и среднеквадратичных радиусов (СКР), отображенные в полулогарифмическом масштабе [1]

Для подтверждения анапольной природы провала спектра резонансного мультиполя была проанализирована зависимость СР декартовых мультиполей от длины волны, включая среднеквадратичные радиусы (СКР) и тороидальные моменты [27], а также их фазы, наряду с СР сферических мультиполей [1], до МК

порядка (рисунок б). Необходимость рассмотрения мультиполей более высокого порядка сводится на нет из-за сильного соответствия между суммой СР мультиполей (Сум.) и полным СР, вычисленным путем интегрирования вектора Пойнтинга по замкнутой поверхности в дальней зоне, нормализованного к интенсивности падающего поля (рисунок бс).

Тривиальные анаполи, возникающие в результате деструктивной интерференции мультиполей и их СКР в пределах одних и тех же семейств, отличаются от нетривиальных анаполей, которые, напротив, могут возбуждаться мультиполями, принадлежащими к разным семействам [21]. Формулы, используемые для расчета декартовых и сферических мультипольных моментов, приводились ранее.

Для удобства СР была нормирована на геометрическое сечение нанорассеивателя с использованием формулы  $\sigma_{eff} = \frac{\sigma_{sca}}{\pi R_{bottom}^2}$ . Показатель

преломления кремния был задан с действительной частью  $n_p = 3,65$  и мнимой частью  $k_p = 0,01$  для приближения условий потенциальной экспериментальной реализации.

На рисунке б представлено мультипольное разложение СР для кремниевого усеченного наноконуса. Зеленая линия/круг выделяет область вокруг длины волны  $\lambda = 780$  нм, где наблюдаются резонансные мультипольные минимумы, соответствующие ГА. Однако, в отличие от типичного сценария, когда все мультиполи демонстрируют минимумы одновременно [20], МК демонстрирует резонансный максимум. Рисунок бд–ж представляет амплитуды и фазы четырех ключевых мультиполей, которые в основном вносят вклад в процесс рассеяния. Эти результаты подтверждают выполнение обобщенного анапольного условия для каждой пары мультиполей. Примечательно, что все мультиполи, за исключением МК, демонстрируют идентичные амплитуды СР, охватывающие их СКР и тороидальные компоненты (рисунок бд–з). Они также демонстрируют фазу 180 градусов вблизи резонансной длины волны  $\lambda = 780$  нм (рисунок бг), что приводит к деструктивной интерференции в дальней зоне и образованию ГА, что впервые было показано в [20]. Напротив, МК не пересекается с СКР и сохраняет фазовый сдвиг 0 градусов (рисунок бж).

Таким образом, впервые такое состояние было продемонстрировано в кремниевом усеченном наноконусе, где в рамках одного нанорассеивателя возможно достижение провалов в СР для всех мультиполей, кроме МК. Эта частица демонстрирует наиболее чистый отклик МК на длине волны, соответствующей ГА.

Достижение квази-ССК по своей сути связано с точной настройкой геометрии нанорассеивателя. Такая настройка позволяет контролировать положения мод нанорезонатора и их взаимную связь. Например, в наноцилиндре изменение радиусов и высот может обеспечить этот контроль [28]. В этом разделе применяется модовый анализ для выяснения характера взаимосвязи между квази-ССК и ГА.

Стратегия проектирования, которая позволяет полностью контролировать расстройку и силу связи между мультипольными модами в усеченном наноконусе,

была продемонстрирована в [29]. В этой конфигурации резонансные частоты мод можно регулировать, изменяя радиус наноконуса. Напротив, все четные и нечетные моды в нанодиске, возбужденные нормально падающей плоской волной, следуют одному и тому же правилу настройки и, таким образом, не могут быть объединены. Эффективным методом управления межмодовой связью является нарушение зеркальной симметрии — это достигается путем изменения конусности, определяемой как  $1 - R_{top}/R_{bottom}$ . При этом цилиндр (конусность = 0) преобразуется в конус (конусность = 1). Примечательно, что возникающие новые моды имеют смешанный электрический и магнитный характер, что облегчает их взаимную связь.

На рисунке 7 показана эволюция мод наноцилиндра в зависимости от нижнего радиуса и конусности. Рисунок 7а наглядно демонстрирует, что изменение радиуса частицы смещает частоту моды, в то время как изменение конусности влияет на связь между этими модами. Все точки, соответствующие  $R_{bottom} = 180$  нм, помечены буквами, представляющими различные значения конусности: А – 0,05, Б – 0,4, В – 0,7, Г – 1. Состояние, показанное ранее, где присутствуют ГА и магнитный резонанс, соответствует точке В.

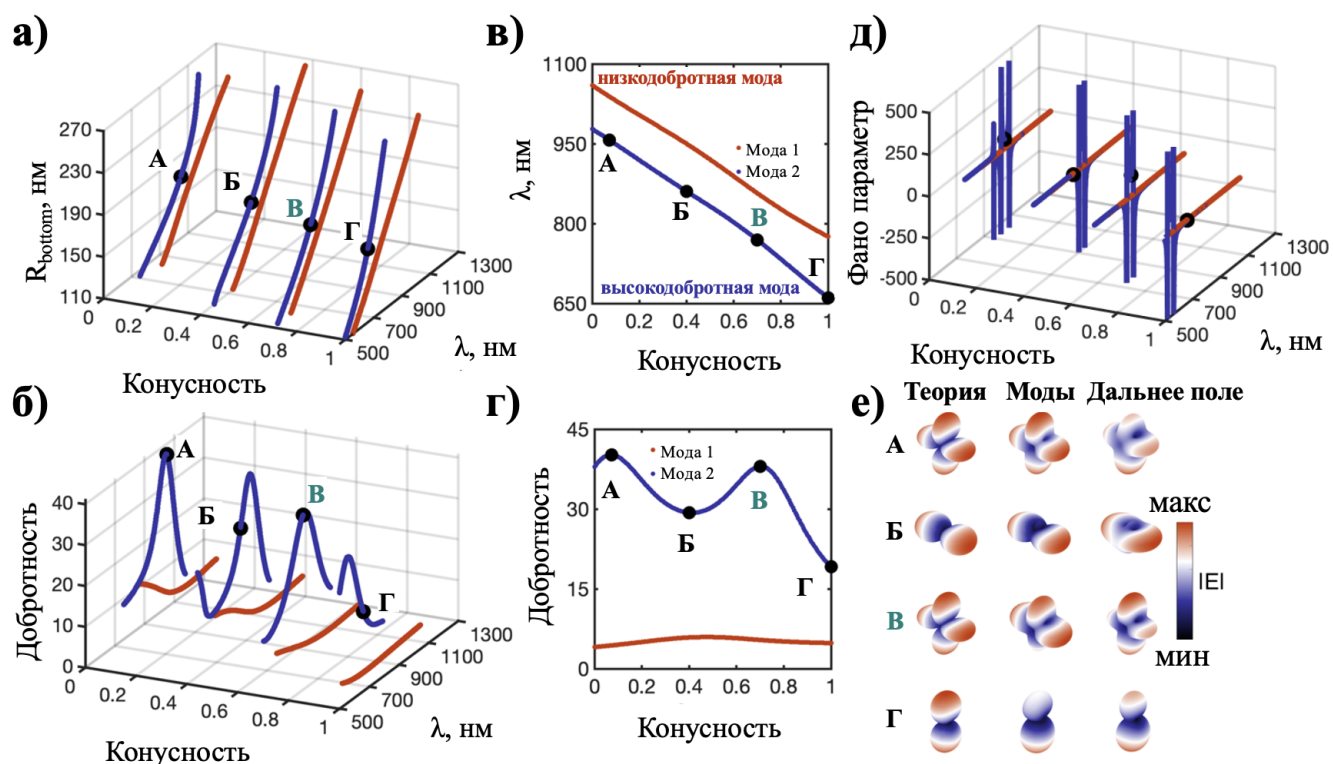


Рисунок 7 – Анализ мод квази-ССК с использованием кремниевого усеченного конуса: а – расчетные положения мод, б – добротности в зависимости от конусности и  $R_{bottom}$  нанорезонатора, в – срез положения мод, г – их добротности в зависимости от конусности для нижнего радиуса  $R_{bottom} = 180$  нм, д – Фано параметр представленных мод, е – дальнее поле для точек для теоретических, модовых и полных расчетов поля

Квази-ССК для одиночной диэлектрической частицы характеризуется резонансным режимом с резко возросшей добротностью. Особое значение имеет взаимодействие между двумя модами — одной высокодобротной и одной низкодобротной, — которое проявляется через эффект антипересечения. При изменении параметров системы частотные зависимости этих мод демонстрируют избегаемое пересечение, что указывает на сильное взаимное влияние. В этом сценарии высокодобротный режим из-за эффективного подавления потерь на излучение развивает практически локализованное распределение энергии, в то время как низкодобротный режим вводит дополнительный канал диссипации. Это межмодовое взаимодействие приводит к характерному профилю Фано в спектральном отклике [30–33].

На рисунке 7д показан параметр Фано мод. Особое значение в этом исследовании имеет взаимодействие между двумя различными собственными модами — одной высокодобротной и другой низкодобротной, которое становится очевидным через характерное поведение антипересечения. При изменении таких параметров системы, как геометрия или длина волны, собственные частоты этих мод демонстрируют избегаемое пересечение, что свидетельствует о сильной связи и взаимном влиянии. В этом режиме мода с высоким коэффициентом качества, извлекая выгоду из эффективного подавления потерь на излучение, образует квазилокализованное распределение поля с минимальной утечкой, тогда как мода с низким коэффициентом добротности служит дополнительным путем рассеивания, способствуя утечке энергии из системы. Связь между этими модами приводит к эффектам интерференции, которые проявляются как выраженный резонанс Фано в спектральном отклике, характеризующемся асимметричной формой линии. Это взаимодействие играет решающую роль в настройке общего поведения рассеяния и является ключом к пониманию и проектированию передовых фотонных функций, основанных на гибридизации мод.

Важно отметить, что квази-ССК с высокой добротностью и темная мода с исчезающей интенсивностью происходят при разных соотношениях сторон. Это противоречащее интуиции открытие показывает, что квази-ССК существенно отличаются от настоящих ССК, поддерживаемых несвязанными структурами, которые всегда являются темными модами. Хотя истинные ССК невидимы в спектре рассеяния, квази-ССК можно легко отслеживать, контролируя формы пиков в СР [34].

В представленном случае наблюдается «чистый» квази-ССК для почти невозмущенного цилиндра. Добротность моды, отмеченной синим цветом, резко увеличивается, в то время как добротность второй моды, отмеченной красным цветом, резко уменьшается — они представляют моды с высокой и низкой добротностью соответственно (рисунок 7а). Изменяя конусность, сохраняя при этом нижний радиус  $R_{bottom}$  постоянным, можно эффективно перемещаться вокруг резонанса для тонкой настройки взаимодействия между модами (рисунок 7б). Рисунки 7в, г иллюстрируют поведение отсечки с точки зрения резонансных длин волн и конусности.

Таким образом, путем тонкой настройки спектрального положения и гибридизации мод путем изменения геометрии нанорассеивателя удалось получить смешанную моду, дающую высокодобротный чистый квадрупольный отклик в дальнем поле. Кроме того, показано, что путем изменения конусности становится возможным управление фазами мультиполей, входящих в моду, что может приводить к получению различных фотонных эффектов, например, поперечного Керкера.

Также было показано, что в пределах одной и той же геометрической конфигурации можно добиться различных комбинаций мультипольных вкладов и, следовательно, различных картин рассеяния в дальней зоне путем изменения направления освещения.

**В заключении** собраны основные результаты работы:

- Предложены прозрачные метаповерхности, использующие гибридный анапольный режим, обеспечивающие одновременно высокое пропускание и управляемость фазы, при этом обладающие минимальным межэлементным взаимодействием. Это позволило преодолеть ограничение, присущее традиционным источникам Гюйгенса, и продемонстрировать технологические преимущества, включая возможность реализации компактных массивов, совместимость с различными типами подложек и устойчивость к внешним воздействиям.
- Проведена первая экспериментальная демонстрация метаповерхностей, функционирующих в гибридном анапольном режиме. Разработаны и охарактеризованы обычные, сверхплотные и неупорядоченные массивы метаатомов, подтверждена возможность фазового модулирования без ухудшения пропускной способности. Данные результаты подтверждены численным моделированием и демонстрируют перспективность применения таких структур в задачах волновой инженерии.
- Введена коническая геометрия наночастиц как универсальная платформа для воспроизведения широкого класса оптических эффектов, включая все известные эффекты Керкера, режимы суперрассеяния и гибридные анапольные состояния. Показана возможность точной настройки модового состава посредством геометрических параметров рассеивателей, что расширяет спектр применений нанофотонных компонентов.
- Проведён анализ возможности сопряжения гибридного анапольного режима с квази-связанным состоянием в континууме в одной наночастице на основе нарушения зеркальной симметрии. Показано, что интеграция этих эффектов позволяет реализовать высокодобротные резонансы, востребованные в наноантеннах, метаповерхностях и других фотонных структурах, требующих точного управления светом.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ  
ДИССЕРТАЦИИ

- Kuznetsov A.V., Canós Valero A., Tarkhov M., Bobrovs V., Redka D., Shalin A. Transparent hybrid anapole metasurfaces with negligible electromagnetic coupling for phase engineering // *Nanophotonics*. – 2021. – Vol. 10, No. 17. – P. 4385–4398.
- Kuznetsov A.V., Canos Valero A. Non-Huygens transparent metasurfaces based on the novel hybrid anapole state // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2015, No. 1. – P. 012079.
- Kuznetsov A.V., Valero A.C., Terekhov P.D., Shamkhi H.K. Various multipole combinations for conical Si particles // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2015, No. 1. – P. 012080.
- Shalin A.S., Kuznetsov A.V., Bobrovs V., Valero A.C. Novel hybrid anapole state and non-Huygens' transparent metasurfaces // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2022. – Vol. 2172, No. 1. – P. 012001.
- Kuznetsov A.V., Canós Valero A., Shamkhi H.K., Terekhov P.D., Xingjie N., Bobrovs V., Rybin M.V., Shalin A. Special scattering regimes for conical all-dielectric nanoparticles // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12. – Article 21904.
- Terekhov P., Kuznetsov A., Valero A.C., Shamkhi H.K., Ni X., Bobrovs V., Rybin M., Shalin A.S. Various scattering regimes of truncated cone particles // *CLEO 2023, Technical Digest Series / Optica Publishing Group*. – 2023. – Paper JTu2A.129.
- Kuznetsov A.V., Bobrovs V. Existence of the hybrid anapole for Si conical nanoparticles // *Software Engineering Research in System Science. CSOC 2023 // Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2023. – Vol. 722.
- Babich N., Kuznetsov A., Bobrovs V., Kislov D. Optomechanical manipulation of nanoparticles in hybrid anapole state // *Networks and Systems in Cybernetics. CSOC 2023 // Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2023. – Vol. 723.
- Kuznetsov A.V., Bobrovs V. Superscattering regime for Si conical nanoparticles for the different directions of excitation // *Networks and Systems in Cybernetics. CSOC 2023 // Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2023. – Vol. 723. – P. 254–258.
- Kuznetsov A.V., Bobrovs V. Transverse Kerker effects in all-dielectric conical nanoparticles // *Software Engineering Methods in Systems and Network Systems. CoMeSySo 2023 // Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2024. – Vol. 909. – P. 278–281.
- Kuznetsov A.V., Bobrovs V. Generalized Kerker effects in all-dielectric conical nanoparticles // *Software Engineering Methods in Systems and Network Systems. CoMeSySo 2023 // Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2024. – Vol. 909. – P. 283–287.
- Kuznetsov A.V., Bobrovs V. Study of the properties of selectively transparent metasurfaces tunable through external control of the properties of 2D materials

- // Machine Learning Methods in Systems. CSOC 2024 // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2024. – Vol. 1126. – P. 74–77.
- Medvedev I.D., Kuznetsov A.V., Bobrovs V. Exceptional points in all-dielectric structure with only in-plane symmetry breaking // Machine Learning Methods in Systems. CSOC 2024 // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2024. – Vol. 1126. – P. 184–188.
  - Kuznetsov A.V., Medvedev I.D., Bobrovs V. Methods for dynamics control of the optical properties of single high-index all-dielectric nanoparticles located on substrates with 2D materials // Machine Learning Methods in Systems. CSOC 2024 // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2024. – Vol. 1126. – P. 339–343.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alaei R., Rockstuhl C., Fernandez-Corbaton I. An electromagnetic multipole expansion beyond the long-wavelength approximation // *Opt Commun. Elsevier Ltd.*, 2018. Т. 407, № May 2017. С. 17–21.
2. Miroschnichenko A.E. и др. Nonradiating anapole modes in dielectric nanoparticles // *Nat Commun.* 2015. Т. 6. С. 1–8.
3. Decker M. и др. High-Efficiency Dielectric Huygens' Surfaces // *Adv Opt Mater.* 2015. Т. 3, № 6. С. 813–820.
4. Gigli C. и др. Fundamental Limitations of Huygens' Metasurfaces for Optical Beam Shaping // *Laser Photon Rev.* 2021. С. 2000448.
5. Czajkowski K.M., Antosiewicz T.J. Electromagnetic Coupling in Optical Devices Based on Random Arrays of Dielectric Nanoresonators // *The Journal of Physical Chemistry C.* 2020. Т. 124, № 1. С. 896–905.
6. Zakomirnyi V.I. и др. Collective lattice resonances in disordered and quasi-random all-dielectric metasurfaces // *Journal of the Optical Society of America B.* 2019. Т. 36, № 7. С. E21.
7. Miroschnichenko A.E. и др. Substrate-Induced Resonant Magnetoelectric Effects for Dielectric Nanoparticles // *ACS Photonics.* ACS Publications, 2015. Т. 2, № 10. С. 1423–1428.
8. Canos Valero A. и др. Theory, observation and ultrafast response of novel hybrid anapole states // *ArXiv.* 2020. № September.
9. Kerker M., Wang D.S., Giles C.L. Electromagnetic Scattering By Magnetic Spheres. // *J Opt Soc Am.* 1983. Т. 73, № 6. С. 765–767.
10. Luk'yanchuk B.S. и др. Optimum Forward Light Scattering by Spherical and Spheroidal Dielectric Nanoparticles with High Refractive Index // *ACS Photonics.* 2015. Т. 2, № 7. С. 993–999.
11. Fu Y.H. и др. Directional visible light scattering by silicon nanoparticles // *Nat Commun.* 2013. Т. 4. С. 1–6.
12. Person S. и др. Demonstration of zero optical backscattering from single nanoparticles // *Nano Lett.* 2013. Т. 13, № 4. С. 1806–1809.
13. Liu W., Kivshar Y.S. Generalized Kerker effects in nanophotonics and meta-optics [Invited] // *Opt Express.* 2018. Т. 26, № 10. С. 13085.
14. Alaei R. и др. A generalized Kerker condition for highly directive nanoantennas // *Opt Lett.* 2015. Т. 40, № 11. С. 2645.
15. Terekhov P.D. и др. Multipolar response of nonspherical silicon nanoparticles in the visible and near-infrared spectral ranges // *Phys Rev B.* 2017. Т. 96, № 3. С. 1–8.
16. Shamkhi H.K. и др. Transverse scattering and generalized kerker effects in all-dielectric mie-resonant metaoptics // *Phys Rev Lett.* American Physical Society, 2019. Т. 122, № 19. С. 193905.
17. Evlyukhin A.B. и др. Optical theorem and multipole scattering of light by arbitrarily shaped nanoparticles // *Phys Rev B.* 2016. Т. 94, № 20. С. 1–7.
18. Zhang X., Bradley A.L. Wide-angle invisible dielectric metasurface driven by transverse Kerker scattering // *Phys Rev B.* American Physical Society, 2021. Т. 103, № 19. С. 1–8.

19. Kuznetsov A. V. и др. Transparent hybrid anapole metasurfaces with negligible electromagnetic coupling for phase engineering // *Nanophotonics*. 2021. Т. 10, № 17. С. 4385–4398.
20. Canós Valero A. и др. Theory, Observation, and Ultrafast Response of the Hybrid Anapole Regime in Light Scattering // *Laser Photon Rev*. 2021. Т. 15, № 10. С. 2100114.
21. Ospanova A.K. и др. Generalized hybrid anapole modes in all-dielectric ellipsoid particles [Invited] // *Opt Mater Express*. 2021. Т. 11, № 1. С. 23.
22. Xu W., Xie L., Ying Y. Mechanisms and applications of terahertz metamaterial sensing: A review // *Nanoscale*. Royal Society of Chemistry, 2017. Т. 9, № 37. С. 13864–13878.
23. Green M.A., Pillai S. Harnessing plasmonics for solar cells // *Nat Photonics*. 2012. Т. 6, № 3. С. 130–132.
24. Kozlov V., Vovchuk D., Ginzburg P. Broadband radar invisibility with time-dependent metasurfaces // *Sci Rep. Nature Research*, 2021. Т. 11, № 1. С. 14187.
25. Ruan Z., Fan S. Superscattering of light from subwavelength nanostructures // *Phys Rev Lett*. 2010. Т. 105, № 1. С. 1–4.
26. Canós Valero A. и др. Magnetolectric Exceptional Points in Isolated All-Dielectric Nanoparticles // *ArXiv*. 2022.
27. Gurvitz E.A. и др. The High-Order Toroidal Moments and Anapole States in All-Dielectric Photonics // *Laser Photon Rev*. 2019. Т. 13, № 5. С. 1–13.
28. Rybin M. V. и др. High-Q Supercavity Modes in Subwavelength Dielectric Resonators // *Phys Rev Lett*. 2017. Т. 119, № 24. С. 243901.
29. Canós Valero A. и др. Bianisotropic exceptional points in an isolated dielectric nanoparticle // *Phys Rev Res*. 2024. Т. 6, № 1. С. 013053.
30. Wu T. и др. Modal analysis of electromagnetic resonators: User guide for the MAN program // *Comput Phys Commun*. 2023. Т. 284. С. 108627.
31. Sauvan C. и др. Normalization, orthogonality, and completeness of quasinormal modes of open systems: the case of electromagnetism [Invited] // *Opt Express*. 2022. Т. 30, № 5. С. 6846.
32. Melik-Gaykazyan E. и др. From Fano to Quasi-BIC Resonances in Individual Dielectric Nanoantennas // *Nano Lett*. 2021. Т. 21, № 4. С. 1765–1771.
33. Gladishev S., Frizyuk K., Bogdanov A. Symmetry analysis and multipole classification of eigenmodes in electromagnetic resonators for engineering their optical properties. 2020. С. 1–13.
34. Bogdanov A.A. и др. Bound states in the continuum and Fano resonances in the strong mode coupling regime // *Advanced Photonics*. 2019. Т. 1, № 01. С. 1.