ОУС по физическим наукам, 2025-11-18, 16:00

Исследование локализации света в новых фотонных структурах

И.В. Тимофеев

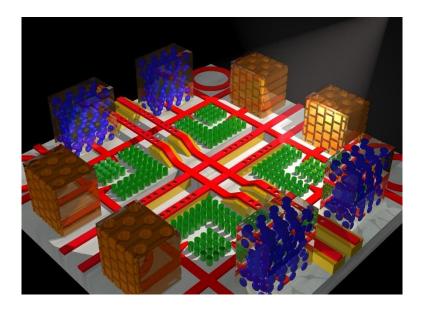




д.ф.-м.н, в.н.с., зам. дир. ИФ СО РАН, зав. лаб. Фотоники молекулярных систем, Тимофеев Иван Владимирович, tiv@iph.krasn.ru

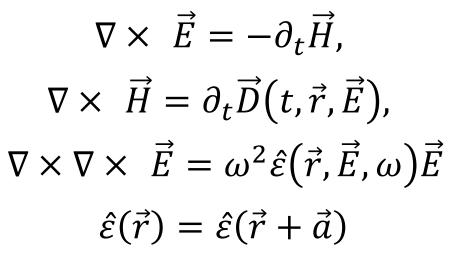
Фотонные кристаллы

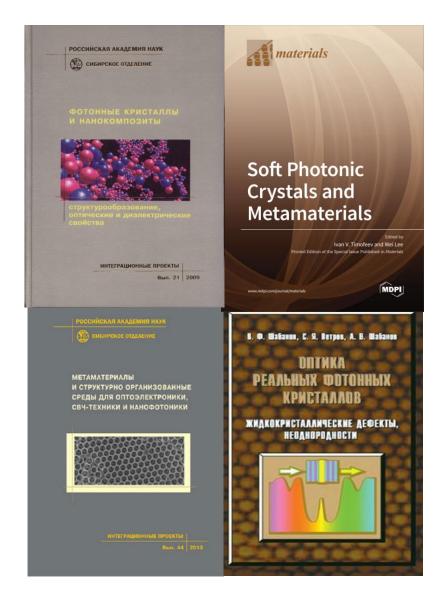




Брэгговское отражение Фотонная запрещенная зона Локализованные моды

- 1. Хиральные ТПП
- 2. Поляризационные ССК
- 3. Гибридные ТПП на ЖК





Научная школа по фотонным структурам в ИФ СО РАН



Сверхрешетки: Шабанов В.Ф., Ветров С.Я., Шабанов А.В. Оптика реальных фотонных кристаллов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. С. 239.

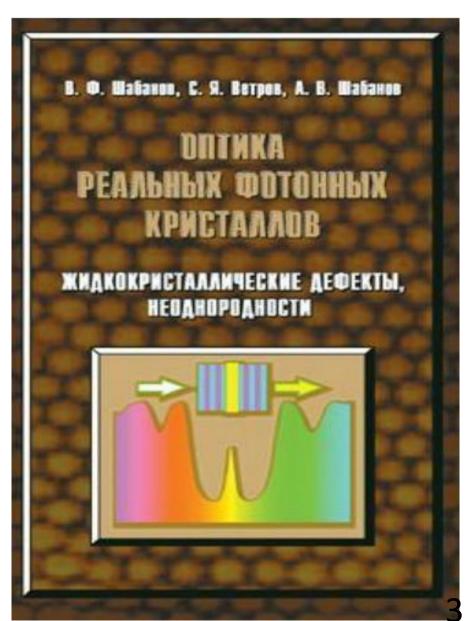
Жидкие кристаллы: Зырянов В.Я., Гуняков В.А., Мысливец С.А., Архипкин В.Г., Шабанов В.Ф., Интерференция поляризованных компонент дефектных мод в мультислойном фотонном кристалле с оптически анизотропным дефектом. Российские нанотехнологии (2008). Zyryanov V.Ya., Myslivets S.A., Gunyakov V.A., Parshin A.M., Arkhipkin V.G., Shabanov V.F., Wei Lee. Magnetic-field tunable defect modes in a photonic-crystal/liquid crystal cell. Optics Express. 2010. V. 18, No 2. P. 1283-1288.

СВЧ-радиоволны: Беляев Б.А., Ходенков С.А., Шабанов В.Ф. Исследование частотно-селективных устройств, построенных на основе микрополоскового двумерного фотонного кристалла. Доклады Академии наук. 2016. Т. 467. № 4. С. 400.

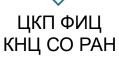
Хиральность: Ветров С.Я., Тимофеев И.В., Шабанов В.Ф. Локализованные моды в хиральных фотонных структурах. УФН. Vol. 190, № 1. Р. 37–62 (2020).

Добротность: Sadreev A.F. Interference traps waves in an open system: bound states in the continuum. Reports Prog. Phys. 84, 055901 (2021). Timofeev I.V., Maksimov D.N., Sadreev A.F. Optical defect mode with tunable Q factor in a one-dimensional anisotropic photonic crystal. Phys. Rev. B, Vol. 97, № 2. P. 24306 (2018).

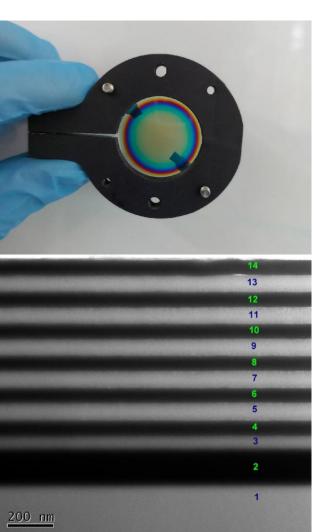
Метаповерхности: Timofeev I.V., Lee W. Soft Photonic Crystals and Metamaterials. Basel, Switzerland: MDPI, 2023. 138 p.



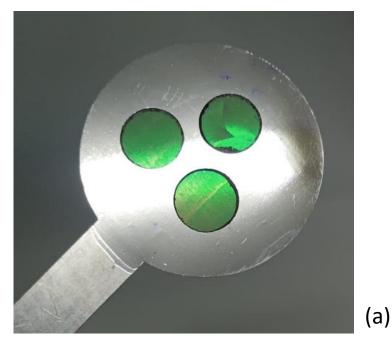
Многослойные покрытия и резонаторы. Система вакуумного напыления «EPOS-PVD-THERM-E»







Архипкин, Гуняков, Мысливец, Герасимов, Зырянов, Ветров, Шабанов // ЖЭТФ, 2008: «Авторы благодарны Гн.Н. Камаеву (ИФП СО РАН) за предоставление многослойных зеркал»



30 0,018 0,015 0,015 0,0015 0,000 V Tool 10 0,000 8500 8500

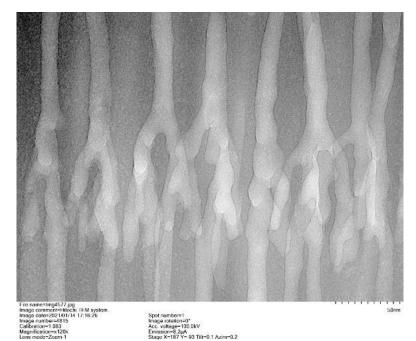
time, s

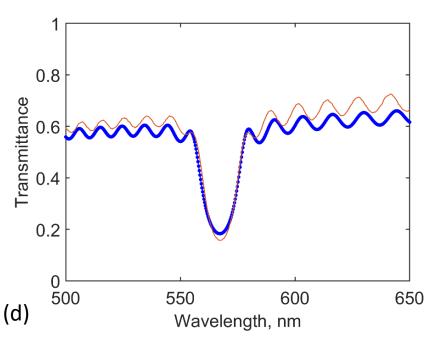
Анодирование алюминиевой фольги

- (a) Снимок фотоннокристаллической пленки на алюминиевой подложке.
- (b) Микрофотография сделанная просвечивающим электронным микроскопом. Диаметр пор 15 мн.

(b)

- (c) Зависимость силы тока и напряжения, подаваемого на образец, от времени
- (d) Спектр пропускания образца (синяя линия) и расчет (красная линия)

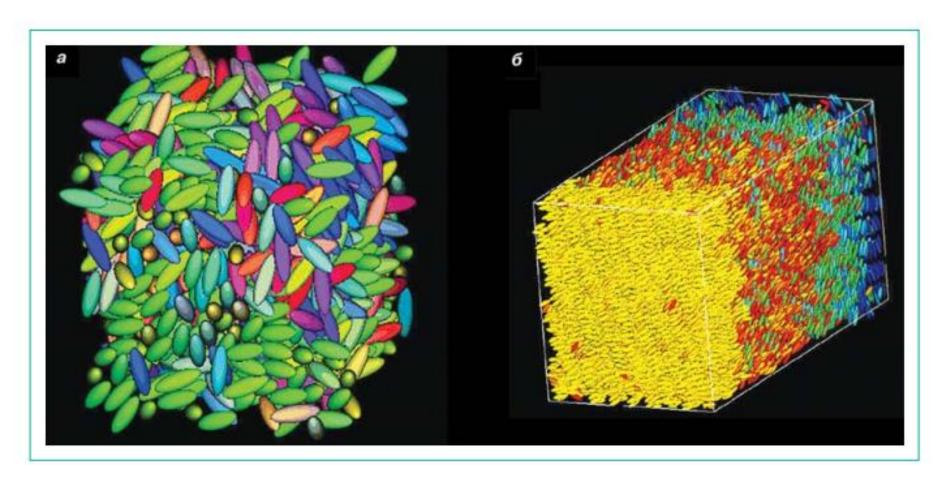


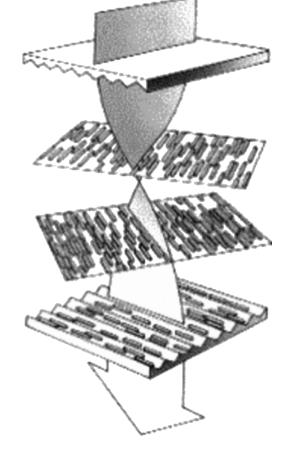


Пятнов, Волкова, Бузин, Ветров, Волочаев, Рыжков, Тимофеев // Письма в ЖЭТФ, 2025

(c)

Самособирающийся фотонный кристалл в холестерическом жидком кристалле





Изотропная жидкость

Анизотропная жидкость

Принцип работы ЖК-дисплея

Мутилин С.В. (ИФП СО РАН), Зырянов В.Я. (ИФ СО РАН) и др. Физика и технология пространственных фазовых модуляторов света на жидких кристаллах. Фотоника, 2025



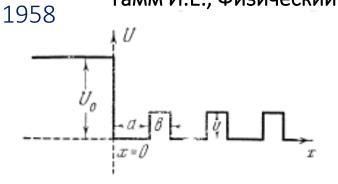




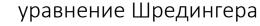
И.Е. Тамм

Таммовское электронное состояние

Тамм И.Е., Физический журнал Советского Союза. 1, 733 (1932)



Оптический аналог

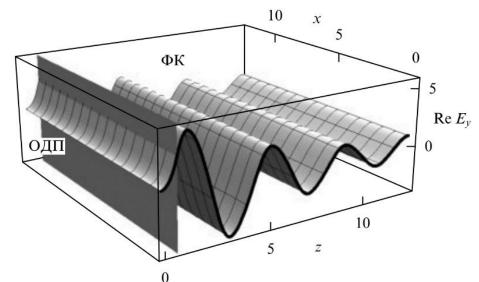


$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi + \frac{8\pi^2 m}{h^2} [W - U(x)] \Psi = 0$$

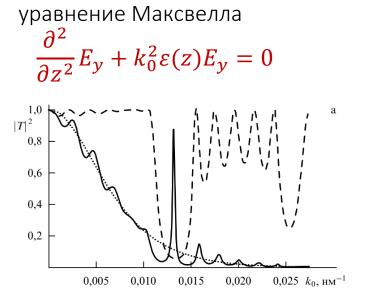


Оптическое таммовское состояние,

плазмон-поляритон



Кавокин 2005 Калитеевский 2007 Виноградов УФН 2010 Афиногенов 2013



Хиральное оптическое таммовское состояние

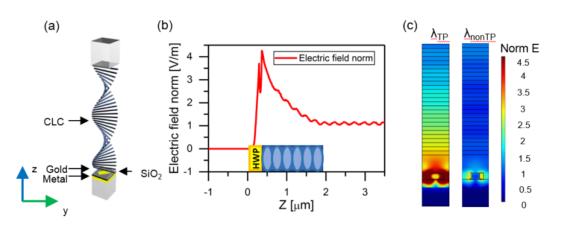


Figure 5. (a) Structure of the CLC combined with metasurfaces. (b) The maximum of the electric field near CLC-metasurface interface. (c) Distribution of normalized electric fields at the resonant and nonresonant wavelengths. Field distribution at the resonant wavelength in *x-y* plane is shown in the Supplementary Materials.

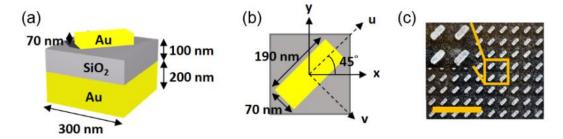
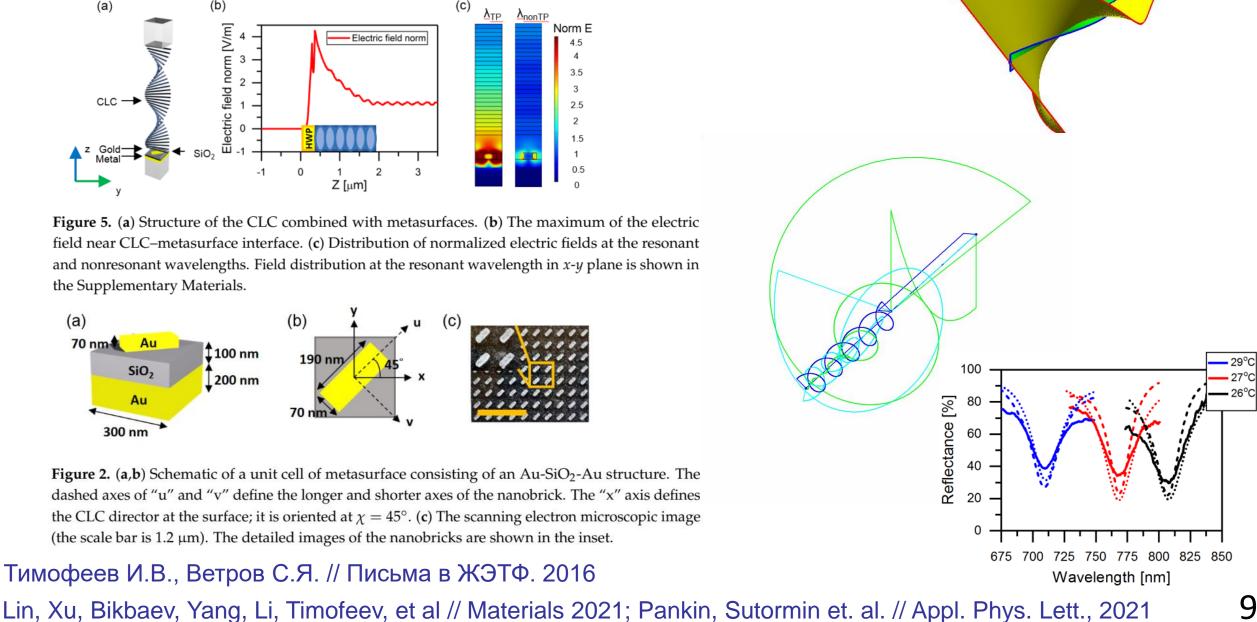
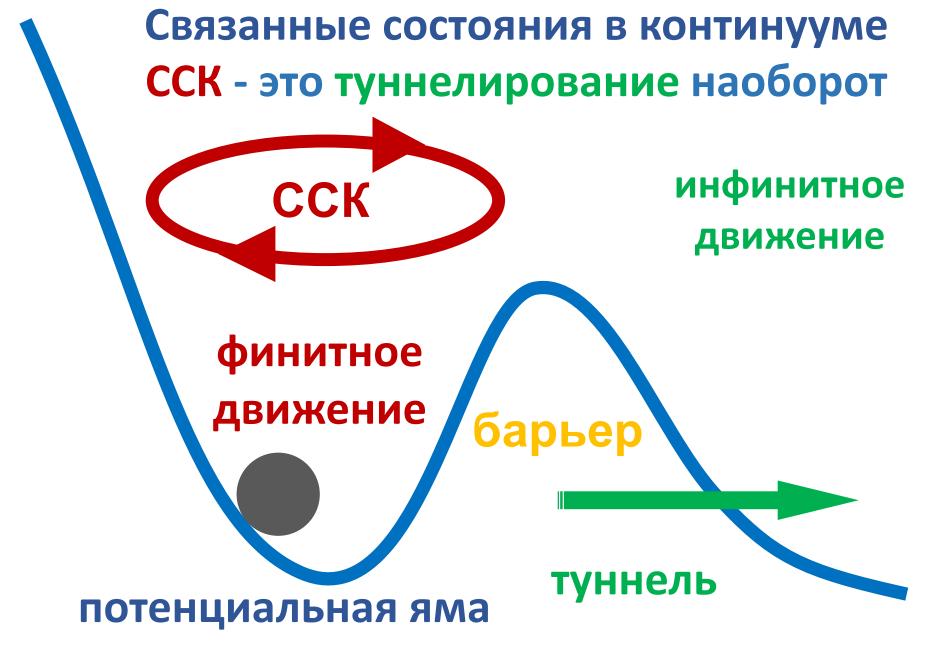


Figure 2. (a,b) Schematic of a unit cell of metasurface consisting of an Au-SiO₂-Au structure. The dashed axes of "u" and "v" define the longer and shorter axes of the nanobrick. The "x" axis defines the CLC director at the surface; it is oriented at $\chi = 45^{\circ}$. (c) The scanning electron microscopic image (the scale bar is $1.2 \mu m$). The detailed images of the nanobricks are shown in the inset.

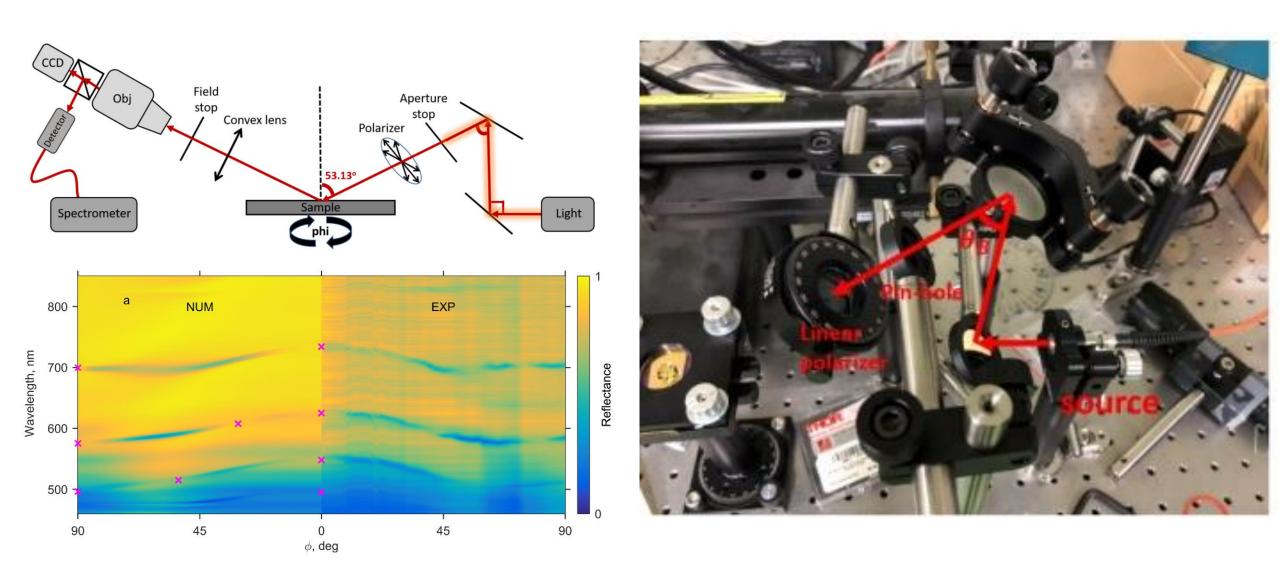
Тимофеев И.В., Ветров С.Я. // Письма в ЖЭТФ. 2016





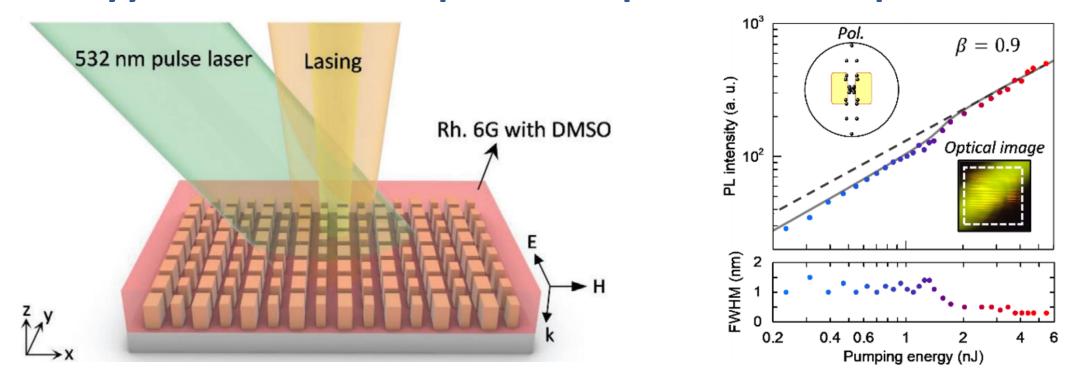
Bulgakov E.N., Sadreev A.F. // Phys. Rev. B. 2008 (sited 372 times) Timofeev I.V., Maksimov D.N., Sadreev A.F. // Phys. Rev. B. 2018.

Одномерные фотонные связанные состояния в континууме



Pankin P.S. et al // Photonics Nanostructures - Fundam. Appl. 2025
Pankin P.S., Wu B.-R., Yang J.-H., Chen K.-P., Timofeev I. V., Sadreev A.F. // Nat. Commun. Phys. 2020

Низкопороговый микролазер на основе связанного состояния в континууме на метаповерхности с решеточным резонансом



Метаповерхность нано-параллелепипедов из нитрида кремния высотой 227 нм с периодом 300 нм, погруженная в диметилсульфоксид, допированный родамином 6G, с гибридным решеточным резонансом на основе квази-связанного состояния в континууме с длиной волны 605 нм (слева). Измеренная зависимость интенсивности и ширины линии фотолюминесценции от энергии импульса накачки, сплошная серая линия получена из решения скоростных уравнений, на вставках — поляризационная диаграмма и изображение в оптическом микроскопе (справа)

Yang, Huang, Maksimov, Pankin, Timofeev,.. Chen // LPR, 2021; Bergman, Stockman // Phys. Rev. Lett., 2003 Arkhipkin V.G., Korsukov D.G., Popov A.K., Shalagin A.M., Streater A.D. // Phys. Rev. A, 1990

Хиральное оптическое таммовское состояние и поляризационное связанное состояние в континууме

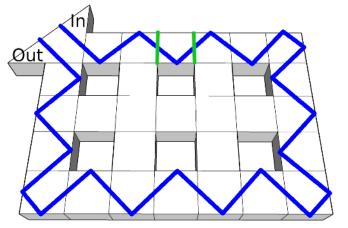
Предсказано и экспериментально обнаружено хиральное оптическое таммовское состояние на границе хиральной и зеркально-симметричной фотонных структур. В качестве зеркально-симметричной структуры для эксперимента было выбрано сохраняющее хиральность зеркало на основе метаповерхности, состоящей из золотых нанокирпичей. В роли хиральной среды использован холестерический жидкий кристалл. На основе оптического таммовского состояния показана возможность создания низкопороговых микролазеров, электрически управляемых фильтров и сенсоров.

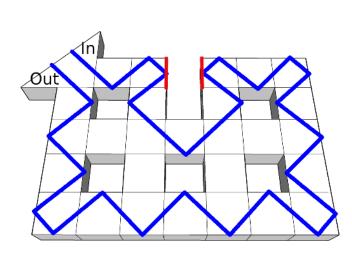
Предсказано и экспериментально обнаружено связанное состояние в континууме в одномерной слоистой анизотропной оптической структуре. Показан резкий рост добротности соответствующего оптического резонанса. Продемонстрирован новый низкопороговый микролазер.

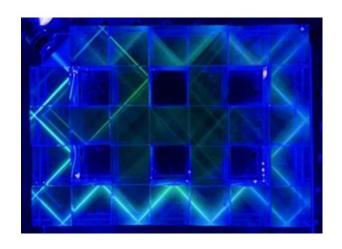
Фотонный топологический изолятор на полном внутреннем отражении в массиве связанных призменных резонаторов

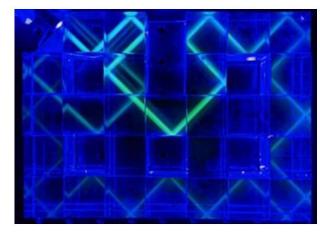
В топологическом изоляторе существует устойчивая поверхностная волна, или луч.

Существует сильный параллелизм между квазиклассическим приближением квантовой механике и приближением геометрической общей оптики динамике волн... слабая дисперсия волнового пакета позволяет применить приближение, В котором вместо волнового пакета динамики рассматривается динамика значительно более простого объекта, частицы или луча





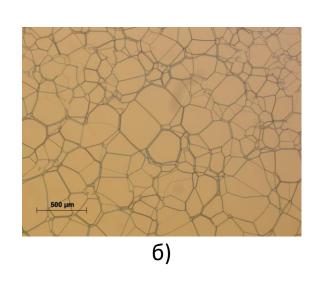


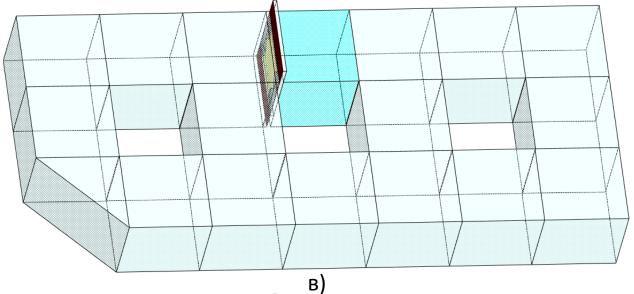


Абдуллаев, Заславский, Классические нелинейная динамика и хаос лучей в задачах распространения волн в неоднородных средах // УФН 1991; Заславский Г.М., Чириков Б.В. // УФН 1971;

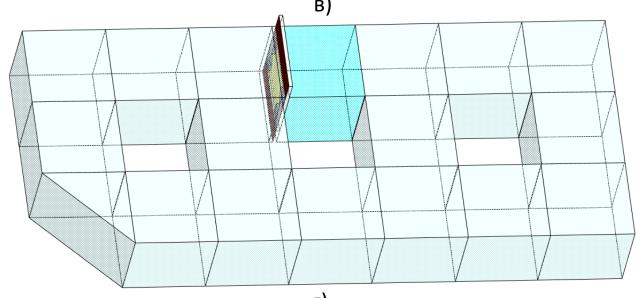
ЖК-дефект в фотонном топологическом изоляторе



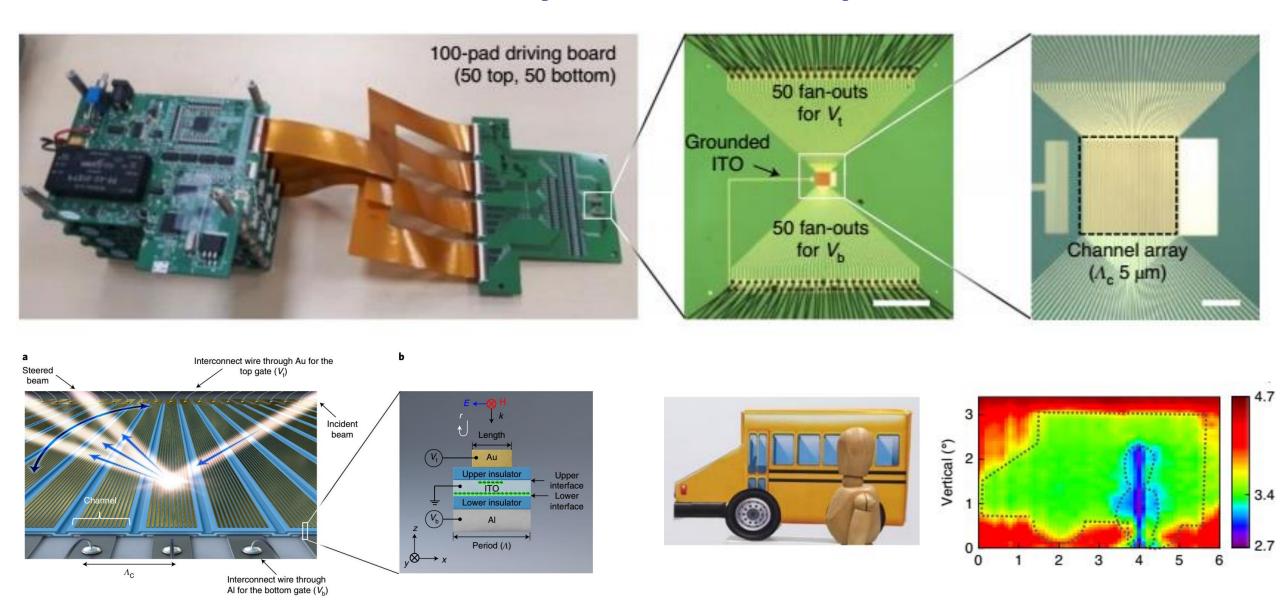




(а) Ячейка с холестериком выполняет роль управляемого затвора для лазерного луча. (б) Ярко выраженная доменная структура вызвана большим углом закрутки холестерика. (в) Мозаичный фотонный топологический изолятор с ЖК-дефектом. (г) Траектория светового пучка в массиве резонаторов топологически устойчива к включению электроуправляемого дефекта.

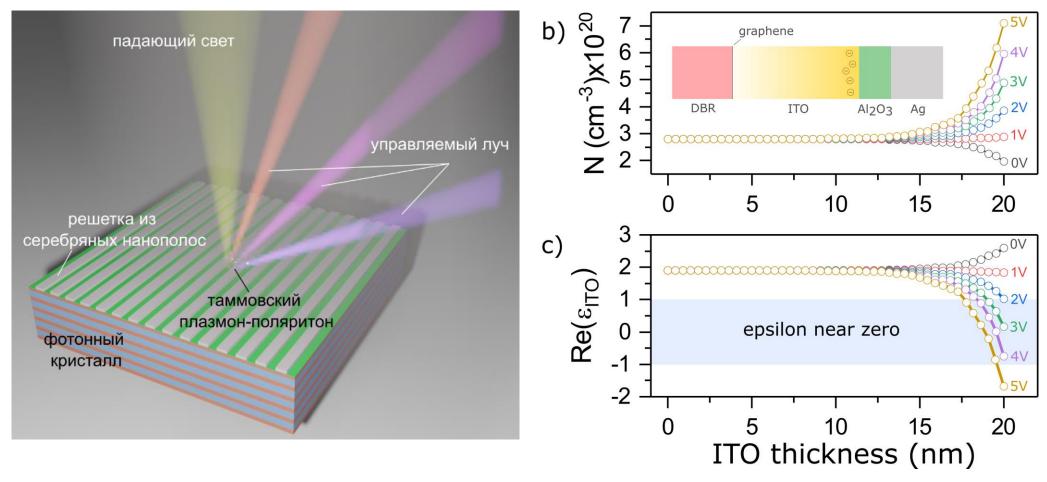


Отклонение пучка метаповерхностью



Park Junghyun et al 2021 Nature Nanotech - All-solid-state spatial light modulator for LIDAR

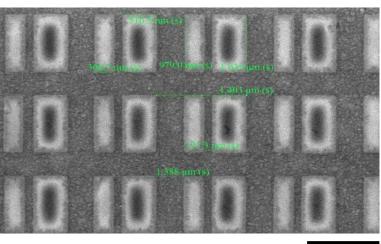
Управлении пучком света с помощью метаповерхности на основе таммовского плазмон-поляритона

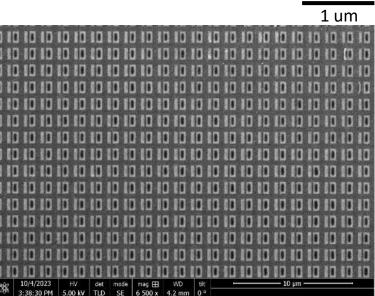


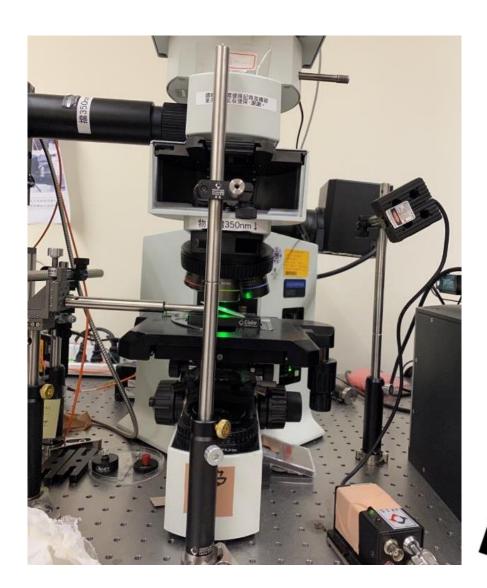
(a) Схематическое изображение исследуемой структуры. (b,c) Распределение носителей заряда и диэлектрической проницаемости по толщине пленки ITO в зависимости от прикладываемого напряжения

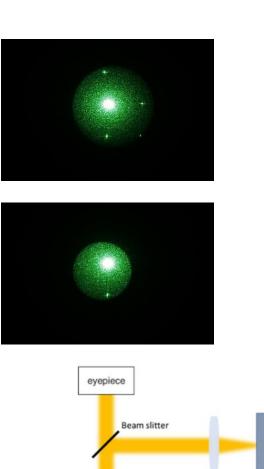
Bikbaev R.G., Maksimov D.N., Chen K.-P. and Timofeev I.V. Double-Resolved Beam Steering by Metagrating-Based Tamm Plasmon Polariton // Materials (Basel), 2022, V. 15, P. 6014. (IF WoS/SJR – 3.623/ 3.682, Q1)

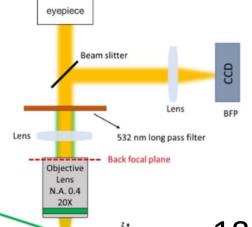
Отклонение пучка метаповерхностью из антимонита Sb₂S₃











Ye, Bikbaev, Pankin, Chen, Chiu, Timofeev, Chen, Ishii, Chen // Adv. Opt. Mater. 2025

ЖК-вращатель поляризации монохроматического света

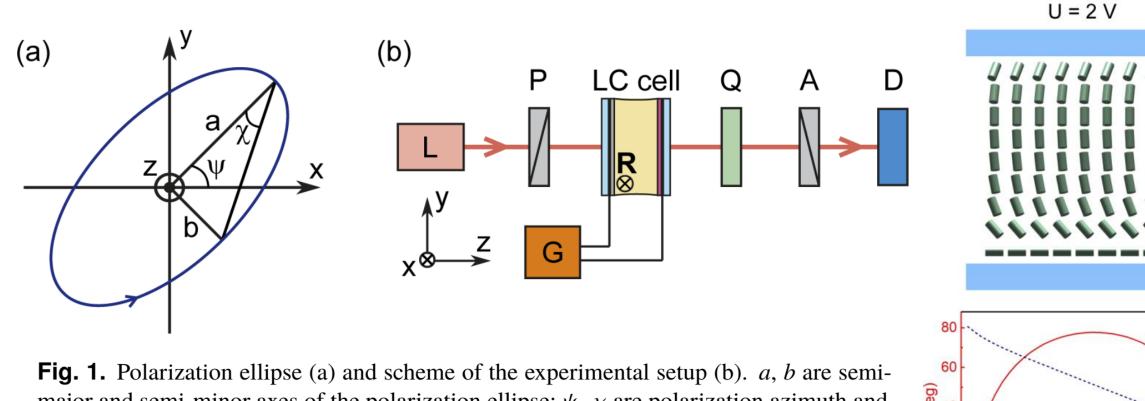
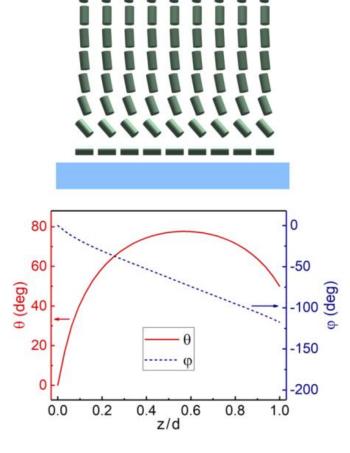
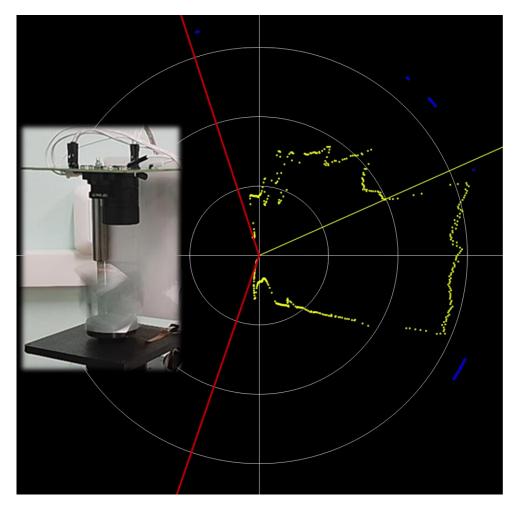


Fig. 1. Polarization ellipse (a) and scheme of the experimental setup (b). a, b are semimajor and semi-minor axes of the polarization ellipse; ψ , χ are polarization azimuth and ellipticity angle. L is He-Ne laser, P is polarizer, Q is quarter-wave plate, A is analyzer, D is photodetector, G is generator, G is rubbing direction of PVA film. The light propagates along the z-axis. The indicated polarization is left-handed.

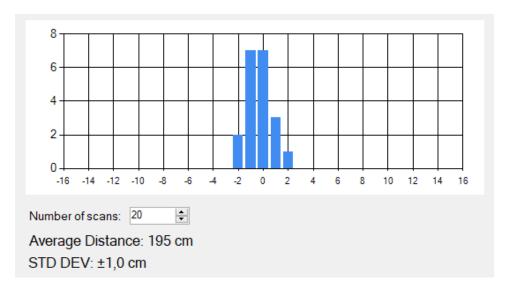


Времяпролетный лидар. Режим сканирования



Основые параметры сканирования:

- Скорость сканирования: 15 оборотов/сек.
- Частота измерений: 11 кГц
- Угловое разрешение: 0.5 градуса
- Диапазон сканируемых углов: 240 градусов



На черном экране серые круги шкалы имеют радиусы 1, 2 и 3 метра. Желтые точки — очертания сканируемой плоскости. Две ноги экспериментатора перемещаются по комнате. Синие точки — измерения с большой погрешностью. Красные лучи — область опорного экрана. Вставка — внешний вид лидара

Топологическая фотоника и восстановление линии оптической связи

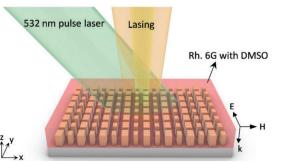
Предсказано и экспериментально обнаружено топологически устойчивое состояние на границе периодического массива, состоящего из стеклянных резонаторов в виде квадратных либо гексагональных призм. Продемонстрирован перспективный метод восстановления поврежденной линии оптической связи при подаче электрического напряжения. При этом свет огибает поврежденный резонатор. Линия связи возвращается в рабочее состояние и тем самым демонстрирует топологическую устойчивость. Показана возможность создания лазера на основе нового типа фотонных топологических изоляторов.

Также предсказан и экспериментально обнаружен аномальный спектральный сдвиг пиков пропускания фотонного кристалла, обусловленный закручиванием слоев нематического жидкого кристалла в плоскости, ортогональной направлению распространения света, что объясняется вкладом неадиабатической топологической фазы. Обзор результатов по локализованным модам в хиральных фотонных структурах опубликован в журнале «Успехи физических наук». На основе топологической фазы показана возможность создания пространственных модуляторов света и вращателей плоскости поляризации, получен патент.

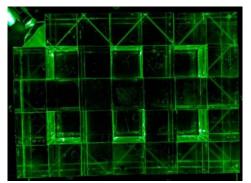




9 0 0 0 0 725 750 775 800 825 850 Wavelength [nm]







Экспериментально реализованные идеи в лаборатории фотоники молекулярных систем

1. Хиральные оптические таммовские состояния и геометрическая фаза

- И. В. Тимофеев, С. Я. Ветров // Письма в ЖЭТФ 104, 393–397 (2016).
- M.-Y. Lin, W.-H. Xu, R. G. Bikbaev, J.-H. Yang, C.-R. Li, I. V. Timofeev, et al // Materials (Basel). 14, 2788 (2021).

2. Поляризационные связанные состояния в континууме

- I. V. Timofeev, D. N. Maksimov, and A. F. Sadreev // Phys. Rev. B 97, 024306 (2018).
- J. H. Yang, Z. T. Huang, D. N. Maksimov, P. S. Pankin, I. V. Timofeev et al // Laser Photonics Rev. 2100118 (2021).

3. Анодированные фотонные кристаллы

• Пятнов, Волкова, Бузин, Ветров, Волочаев, Рыжков, Тимофеев // Письма в ЖЭТФ, 2025

4. Мозаичные фотонные топологические изоляторы

P. N. Kim, D. P. Fedchenko, N. V. Rudakova, I. V Timofeev // Appl. Sci. 13, 4004 (2023).

Благодарю за внимание!

Количественные показатели Лаборатории фотоники молекулярных систем

| Показатель | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Участие в публикациях | 19 | 25 | 24 | 24 | 22 | 22 |
| Привлеченные средства, млн. р. | 4 | 5 | 5 | 12 | 11 | 17 |

При поддержке ГЗ (FWES-2019-0001, FWES-2022-0006, FWES-2025-0003) и трех РНФ-проектов ОНГ (22-42-08003, 24-12-20007, 24-12-00236)

Преподавательская деятельность

- Тимофеев И.В. является профессором кафедры теоретической физики и волновых явлений Сибирского федерального университета; читал лекционные курсы «Механика», «Молекулярная физика», «Дискретная математика», «Концепции современного естествознания», «Optical Physics», читает лекционные курсы «Теория вероятности и математическая статистика», «Оптика фотонных кристаллов». Непосредственно руководит научной работой трех аспирантов и четырех студентов. Одному из них, Киму П.Н., в 2023 году присуждена медаль Российской академии наук с премией для обучающихся по программам высшего образования.
- Под руководством Тимофеева И.В. защищены **три кандидатские диссертации**, четвертая утверждена к защите в декабре 2025 года; еще пять аспирантов работают в лаборатории под руководством учеников Тимофеев И.В.
- Неоднократно выступал с приглашенными докладами на международных конференциях в зарубежных научных центрах (Китай, Испания, Германия, Япония). Дважды проходил стажировку в Китае; читал курсы лекций для студентов и аспирантов китайских университетов. Тимофеев И.В. выдвинут кандидатом на присвоение звания «Профессор РАН» по Отделению физических наук РАН в 2022 и 2025 годах

Организационная деятельность

- Член **научных комитетов** школы-семинара «Волновые явления: физика и применения» им. А.П. Сухорукова при МГУ, конференций "Photoptics", **научного и организационного комитетов** конференции «Енисейская фотоника».
- Тимофеев И.В. докладывал результаты своих научных работ в ведущих научных институтах и университетах в России и за рубежом, включая ИАиЭ СО РАН, СПбАУ РАН, МГУ, Университет ИТМО, МИРЭА, Университет Пёрдью (Индиана, США дистанционно), Университет Чун-Юань (Китай), Университет Ян-Мин Чао-Тун (Китай).
- Тимофеев И.В. является руководителем проекта государственного задания ПФНИ ГАН и проекта ОНГ РНФ. Ранее руководил проектами РНФ и РФФИ (в том числе в рамках сотрудничества с Министерством науки и технологий Тайваня (Китай)), Президента Российской Федерации, Красноярского краевого фонда науки. За последние 10 лет участвовал в 10 проектах РНФ, РФФИ, Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Программ Президиума РАН и СО РАН, в семи из которых являлся руководителем.

Экспертная деятельность

- Выступил в качестве оппонента на защитах 3 докторских и 9 кандидатских диссертаций. Является экспертом РАН, экспертом РНФ; входит в экспертный совет Красноярского краевого фонда науки, в ГЭК Университета ИТМО; председатель ГЭК Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва. Является членом диссертационных советов №24.1.228.02 при Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН и №16.24.00 при Университете ИТМО.
- Тимофеев И.В. рецензент научных журналов «Письма в ЖЭТФ», «Письма в ЖТФ», "Phys. Rev. Letters", "ACS Photonics", "Optics Letters", "Scientific Reports" и др. (более 100 рецензий); член редакционной коллегии и тематической консультативной группы MDPI Photonics; гостевой редактор журнала "MDPI Materials".

Направления работ по Фотонике молекулярных систем

• Новые оптические материалы

Фотонные кристаллы: слоистые среды, опалы Сохраняющие поляризацию анизотропные зеркала Люминофоры, полимеры, жидкие кристаллы, нанокомпозиты

• Солнечная энергетика

Фотовольтаика – солнечные батареи Фотокатализ

• БиоФотоника

Фотосинтез АгроФотоника Нейрофотоника. Оптогенетика Медицинская фотоника





• Оптоинформатика

Микро-лидары — аграрные гиперспектральные, беспилотники, транспорт Фотонный щит: датчики, приемопередатчики Очки виртуальной реальности + Квантовая оптоинформатика

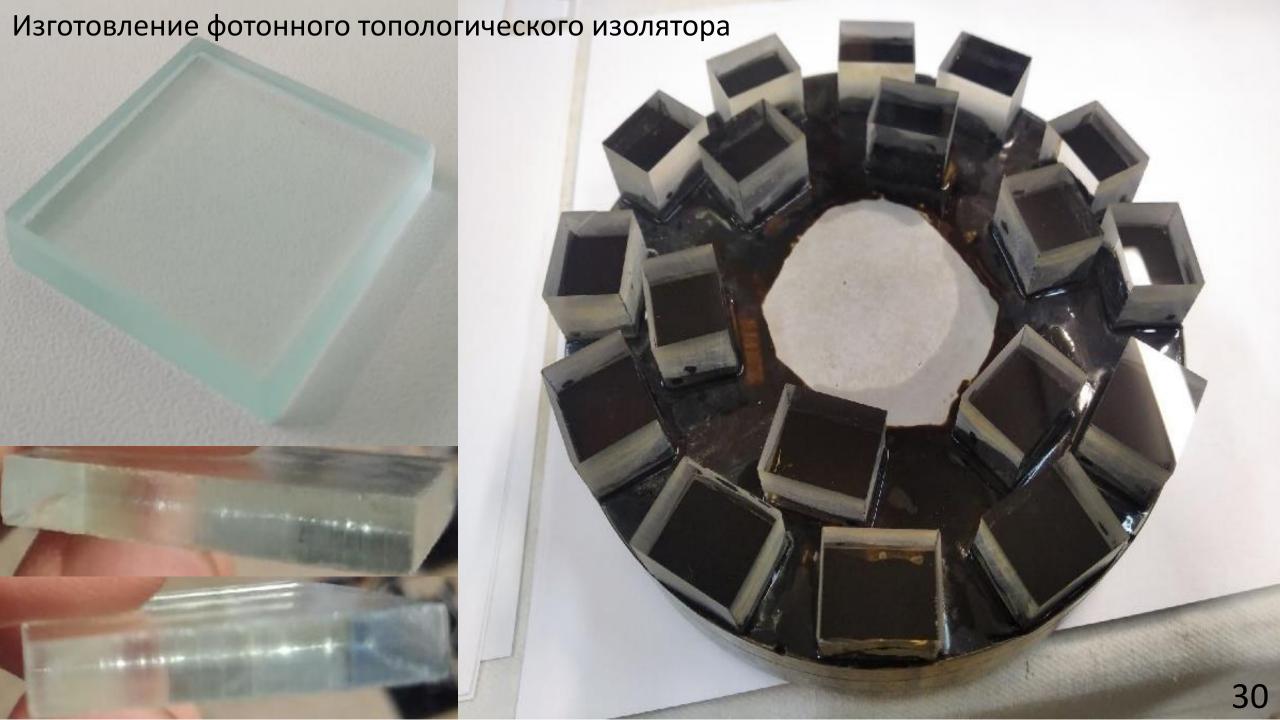
- . СС
- + 6G, терагерцы

• Математическая Фотоника

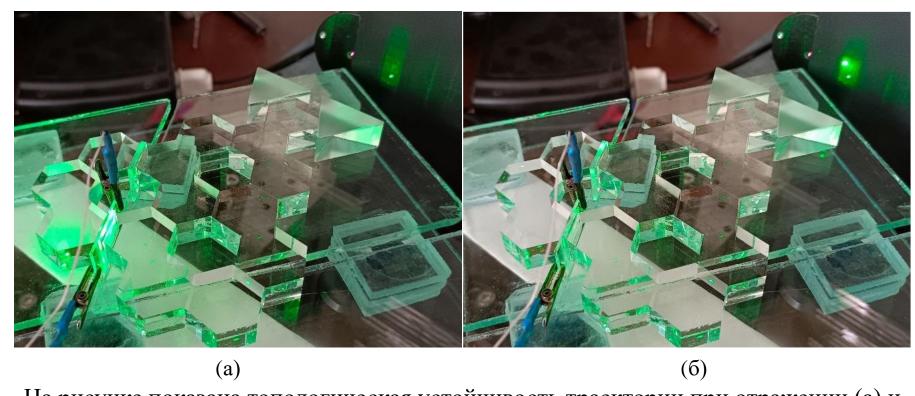
Топологическая фотоника Фотонные связанные состояния в континууме Молекулярная динамика Квантово-химические методы расчета поглощения и люминесценции

• Нанофотоника и наноэлектроника

Фотодетекторы
Оптические таммовские состояния
Фотонные интегральные схемы
Двухфотонная фотолитография и микроскопия



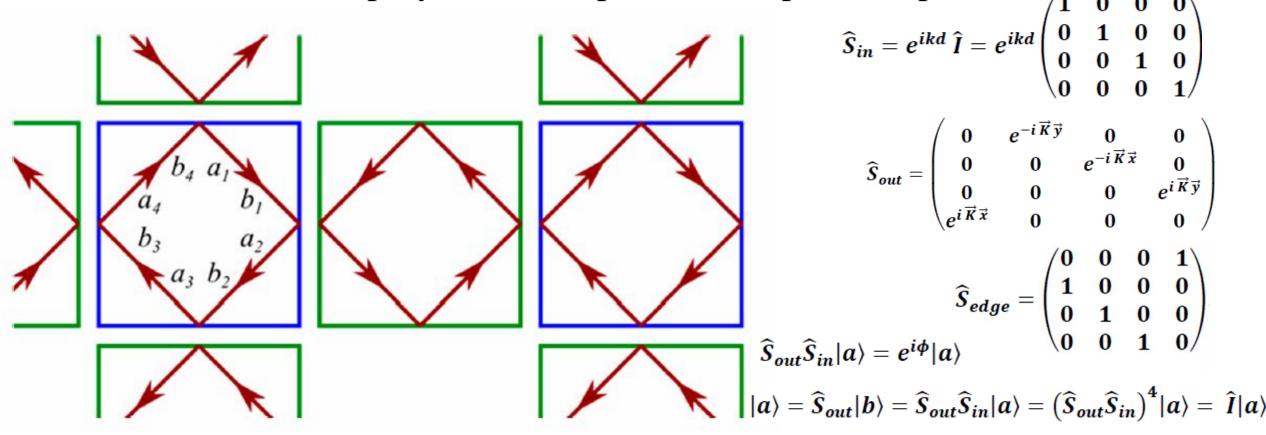
Эксперимент с гексагональным массивом



На рисунке показана топологическая устойчивость траектории при отражении (а) и пропускании (б) лазерного луча от ХЖК. Из-за большого количества переотражений от границ призм луч при пропускании через ХЖК выходит немного выше отраженного

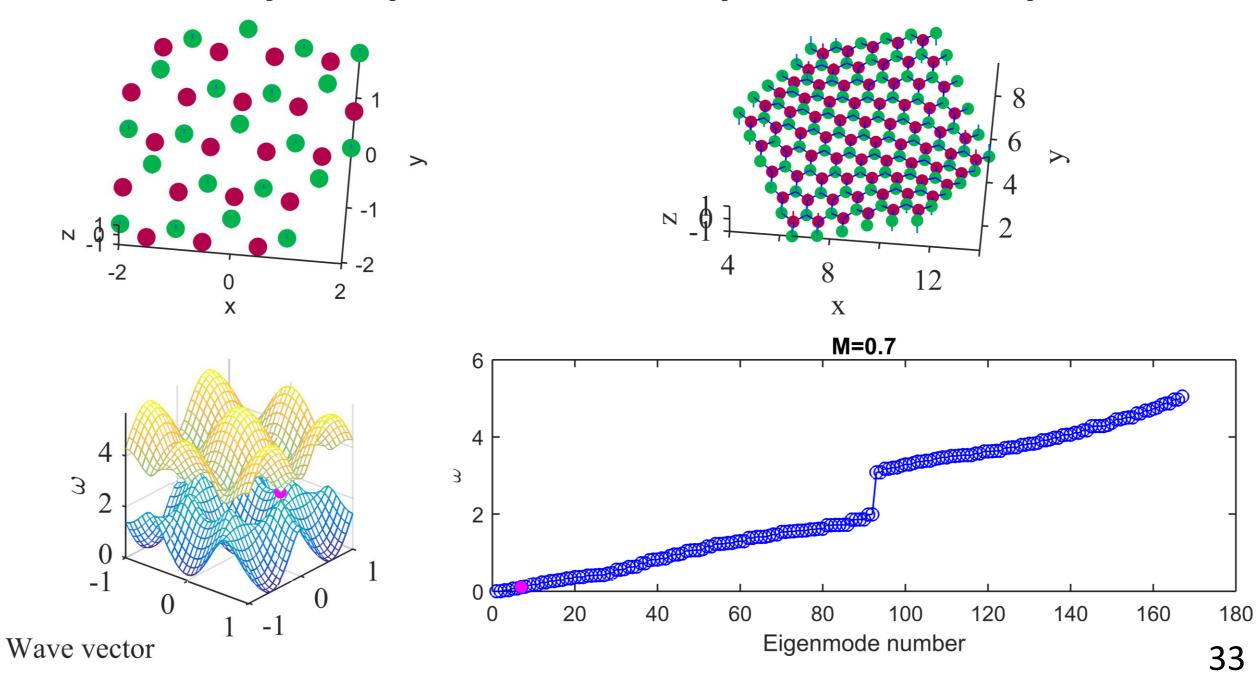


Мозаичный фотонный топологический изолятор на полном внутреннем отражении в массиве четырехугольных призменных резонаторов

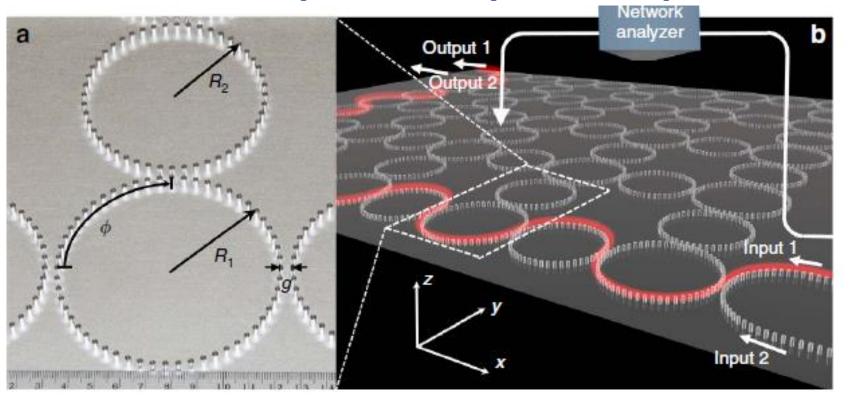


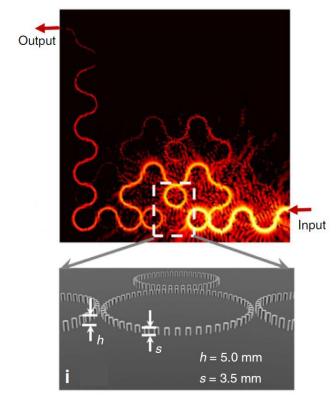
Матрица рассеяния. Основные призменные резонаторы окрашены в синий цвет, соединительные резонаторы – в зеленый. Красные стрелки показывают псевдоспин внутри резонатора. Амплитуды обозначены как а - входящие, b -исходящие. Четыре индекса соответствуют направлениям ±x,y.

Расчет дисперсионной кривой и топологического инварианта для гексагональной решетки



Кольцевые резонаторы – сохранение псевдоспина





Фотография металлических стержней диаметром 2,5 мм и высотой 5,0 мм, распределенных с расстоянием между центрами 5,0 мм на плоской металлической поверхности. Решетчатое кольцо, образованное 56 металлическими стержнями, имеет радиус R1=44,56 мм. Соединительное кольцо, образованное 48 металлическими стержнями, имеет радиус R2=38,2 мм. Расстояние между кольцами равно g=5,0 мм. ϕ обозначает фазовую задержку электромагнитных волна вдоль четверти кольца решетки. Красная извилистая кривая над структурой представляет граничные состояния

Gao, F.; Gao, Z.; Shi, X.; Yang, Z.; Lin, X.; Xu, H.; Joannopoulos, J.D.; Soljačić, M.; Chen, H.; Lu, L.; et al. Probing topological protection using a designer surface plasmon structure. Nat. Commun. 2016, 7, 11619.