

ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ ЗАРЯД СВЯЗАННЫХ СОСТОЯНИЙ В КОНТИНУУМЕ НА МУЛЬТИПОЛЬНЫХ РЕШЕТКАХ

Шалев А.Н. (Университет ИТМО)

Научный руководитель – доцент, канд. физ.-мат. наук, Лобанов И.С.
(Университет ИТМО)

Введение. Управление электромагнитными волнами и, в частности, их локализация в веществе, является популярной темой среди исследователей. Локализация света лежит в основе работы оптических резонаторов, которые находят применение в лазерах, биосенсорах и при генерации второй оптической гармоники. Основным параметром резонатора, который описывает его эффективность, является добротность. Есть несколько способов достичь высокой добротности резонатора:

- за счет увеличения размера резонатора;
- за счет использования фотонного кристалла в виде нанорезонатора или планарного фотонного кристалла в виде мембраны в резонаторе;
- за счет использования эффекта полного внутреннего отражения в резонаторах с модами шепчущей галереи [1];
- использование относительно новых физических явлений, например связанных состояний в континууме (ССК), которые могут значительно увеличить добротность системы [2].

ССК были предсказаны еще в первой половине прошлого столетия Вигнером и Нейманом для квантово-механической системы [3]. Оптические ССК были экспериментально продемонстрированы в планарном фотонном кристалле только в 2014 году, где также была введена классификация ССК в зависимости от условий их обнаружения [2]. Тот же коллектив показал, что и защищенные симметрией и «случайные» ССК являются вихревыми центрами вектора поляризации электрического поля в дальней зоне, а устойчивость ССК связана с целочисленным параметром — топологическим зарядом, который определяется направлением вращения и числом оборотов вектора поляризации вокруг вихревого центра [4]. Позже Е. Булгаков и Д. Максимов, активно занимающиеся исследованием оптических ССК, в своей работе [5] показали, что ССК являются вихревыми центрами коэффициента связи квазинормальных мод — комплексных собственных мод открытого резонатора. В данном подходе ССК также характеризуются топологическим зарядом, который определяется аналогичным образом. За счет топологических зарядов можно описать процессы возникновения, изменения и исчезновения ССК, так как они строго подчиняются закону сохранения заряда [4].

Основная часть. Двумя вышеупомянутыми способами были определены топологические заряды защищенных симметрией и незащищенных симметрией ССК в двумерной периодической системе резонансных мультиполей X_s , где X — векторная сферическая функция (ВСФ), которая описывает поле излучения системы в дальней зоне, а s — набор индексов, описывающих ВСФ. Для определения коэффициента связи квазинормальных мод была использована программа с открытым исходным кодом MULTEM [6,7], которая позволяет определять коэффициенты отражения, прохождения и поглощения бесконечной 2D периодической структуры. В данном подходе коэффициент связи квазинормальных мод представляет из себя амплитудный коэффициент отражения системы. Всего было рассмотрено 4 системы $X_{-103}, X_{-133}, X_{-144}, X_{-105}$. Было показано, что в данных системах оба рассматриваемых подхода дают аналогичный результат при определении топологических зарядов защищенных симметрией ССК. Также было продемонстрировано, что для решеток X_{-103}, X_{-105} незащищенные симметрией ССК образуют непрерывную линию в k -пространстве, что требует развития подходов к определению топологического заряда таких линейных особенностей. Было установлено, что аргумент коэффициента связи

квазинормальных мод показывает дополнительные особенности в k -пространстве, не связанные с ССК обоих типов. Вероятнее всего, данные особенности связаны со скачкообразным изменением аргумента амплитудного коэффициента отражения в окрестностях резонанса системы, что требует дальнейшего исследования.

Выводы. Описаны два подхода к определению топологического заряда ССК на основе поляризации электромагнитного поля в дальней зоне и аргумента амплитудного коэффициента отражения. Топологические заряды защищенных симметрией ССК, рассчитанные двумя подходами, совпадают. На основе сравнения двух методов предложен способ определения топологического заряда ССК при помощи аргумента коэффициента связи квазинормальных мод, так как он позволяет получить более полную картину особенностей рассеянного поля.

Список использованных источников:

1. Vollmer F. Whispering-Gallery-Mode Biosensing. Label-Free Detection Down to Single Molecules / Frank Vollmer, Stephen Arnold // Nature methods. — 2008. — 08. — Vol. 5. — P. 591.
2. C. W. Hsu, B. Zhen, A. D. Stone, J. D. Joannopoulos, and M. Soljacic Bound states in the continuum // Nat. Rev. Mater. 1, 1 (2016).
3. J. von Neumann, E. P. Wigner, Uber merkwurdige diskrete eigenwerte // Phys. Z. , 467 (1929).
4. B. Zhen, C. W. Hsu, L. Lu, A. D. Stone, and M. Soljacic Topological nature of optical bound states in the continuum // Phys. Rev. Lett. 113, 257401 (2014).
5. Bulgakov, E. N., & Maksimov, D. N. Topological Bound States in the Continuum in Arrays of Dielectric Spheres // Phys. Rev. Lett., 118(26), 267401.
6. Stefanou, N., Yannopapas, V., Modinos, A. Heterostructures of photonic crystals: frequency bands and transmission coefficients // Comput. Phys. Commun., 113(1), 49–77.
7. Stefanou, N., Yannopapas, V., Modinos, A. MULTEM 2: A new version of the program for transmission and band-structure calculations of photonic crystals // Comput. Phys. Commun., 132(1), 189–196.