

УДК 537.87

**ФОТОННЫЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА,
ИНДУЦИРОВАННЫЕ ГИБРИДИЗАЦИЕЙ ОРБИТАЛЬНЫХ МОД**

Мазанов М. (Физико-технический факультет Университета ИТМО)

Научный руководитель – к. ф.-м. н., с.н.с., доцент Горлач М. А.

(Физико-технический факультет Университета ИТМО)

Мы исследуем возможность создания топологических состояний высокого порядка в эффективно двумерных фотонных структурах за счёт гибридизации различных орбитальных мод в составляющих их элементах. Мы демонстрируем две модели, поддерживающие новые типы топологических состояний высокого порядка, а также подтверждаем наши предсказания в численном расчёте.

Введение. Топологические состояния высокого порядка (ТСВП) в последнее время вызывают широкий интерес в фотонике и в физике конденсированного состояния из-за их сильной локализации и устойчивости к беспорядку и дефектам. ТСВП являются следующим шагом в быстро развивающейся физике топологических состояний, после широко известных фотонных аналогов квантового и спинового квантового эффекта Холла. Хотя отдельные системы, поддерживающие ТСВП, были предложены в 2010-х годах, это направление начало активно развиваться только в 2017-м году после теоретического предсказания квадрупольных топологических изоляторов, и получило новый импульс в 2019-м году после построения теории ТСВП, существование и устойчивость которых обеспечивается симметрией кристаллической решётки. Обнаружение таких необычных состояний в фотонных системах, благодаря их высокой настраиваемости и контролируемости, оказалось проще, чем в аналогичных твердотельных системах.

Современные исследования по этой тематике направлены на обобщение известных ТСВП на случай дополнительных степеней свободы (таких как спин в теории конденсированного состояния и поляризация света в фотонных системах), поиск ТСВП в неэрмитовых системах, а также на нахождение фундаментально новых способов получения ТСВП. Среди последних, в частности, плодотворным оказался способ, использующий системы с бианизотропным откликом, развитый недавно в Университете ИТМО.

С другой стороны, в связи с недавним теоретическим предсказанием топологических состояний в одномерных цепочках резонаторов с вырожденными орбитальными модами, возникает естественный вопрос о возможности использовать гибридизацию орбитальных мод в двумерных системах для реализации топологических состояний высокого порядка. До сих пор такая возможность остаётся практически неизученной. Дополнительная мотивация возникает также в более широком контексте двумерных систем с орбитальной гибридизацией. Известно, что такие системы могут иметь экзотические зонные структуры, такие как конусы Дирака и плоские зоны, а также могут поддерживать ТСВП, если вырождение орбитальных мод возникает на уровне метаатома (нескольких элементарных ячеек) и защищено симметрией решетки. Кроме того, известны некоторые решёточные модели с гибридизацией мод, изначально предложенные в оптических решётках из холодных атомов, поддерживающие стандартные топологические состояния.

Основная часть. В предлагаемой работе мы доказываем, на примере двух решёточных моделей с сильной связью, что ТСВП возможно создать даже в относительно простых решётках за счёт гибридизации орбитальных мод в узлах решётки, и предлагаем фотонные реализации этих моделей на основе систем туннельно связанных волноводов. При этом, требования к симметрии решётки оказываются ослабленными, а защищённость топологических мод частично обеспечивается симметриями вырожденных орбитальных мод.

Первая модель основана на квадратной решётке с вырожденными s и d орбиталями, тогда как вторая – на решётке кагоме с вырожденными s и f орбиталями. Обе предложенные модели обладают уникальной топологией, не сводимой к ранее известным типам топологии высокого порядка. Исходя из аналогии с двумерным квантовым спиновым эффектом Холла, мы интерпретируем первую модель как квантовый спиновый эффект Холла высокого порядка. Кроме того, мы показываем, как топология нового типа отражается в квантованном спиновом транспорте в модулируемой двумерной модели, и предлагаем реализацию необходимой модуляции на платформе туннельно связанных искривлённых волноводов с переменным сечением. Вторая из предложенных моделей не распадается на сумму известных ТСВП-моделей, и представляет собой новый двумерный «октупольный» топологический изолятор высокого порядка, который можно рассматривать как обобщение так называемых квадрупольных изоляторов. Однако, в отличие от последних, наша вторая модель не требует внешних магнитных полей. Кроме того, при определённых тонко настроенных параметрах связи решетки, мы предсказываем возможность наблюдения редкого явления в двумерных решётках – так называемой полной локализации Ааронова-Бома, при которой поле любого локального возмущения остаётся «запертым» в ограниченной области решётки. Хотя это сопутствующее явление не носит топологический характер, его предсказание является качественно новым предложением, поскольку предлагаемый метод не использует внешние магнитные поля и основан на достаточно простых решётках.

Кроме теоретического исследования новых ТСВП, мы подтверждаем их реализуемость с помощью численного моделирования для системы туннельно связанных керамических волноводов с вырождением мод на определённой частоте порядка нескольких гигагерц.

Выводы. В предлагаемой работе мы предсказываем и изучаем два новых типа топологических состояний света, основанных на гибридизации орбитальных мод. Мы надеемся, что в будущем будут найдены многие другие модели, основанные на предлагаемом принципе, а также что результаты можно будет обобщить и на трёхмерные системы резонансных частиц. Актуальность результатов определяется возможностью создания широкого класса нанофотонных структур, основанных на предлагаемом принципе, включая топологические резонаторы, волноводы и делители, работа которых будет устойчива к различным типам беспорядка в структуре.

Мазанов М. (автор)

Подпись

Горлач М. А. (научный руководитель)

Подпись