

# Связанные состояния в континууме в трёхволновом интерферометре Фабри–Перо

Д.А. Быков<sup>1,2</sup>, Е.А. Безус<sup>1,2</sup>, Л.Л. Досколович<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королёва, Московское шоссе 34а, Самара, Россия, 443086

## Аннотация

В работе изучаются резонансные оптические свойства трёхволновых интерферометров Фабри–Перо, которые также известны как матричные или обобщенные интерферометры Фабри–Перо. В отличие от обычного (одноволнового) интерферометра, в рассматриваемых структурах между границами раздела распространяются несколько пар волн с разными волновыми числами. Предложена модель связанных волн, описывающая оптические свойства рассматриваемых структур и предсказывающая существование связанных состояний в континууме (ССК). На основе строгого моделирования показано, что предложенная модель может быть использована для описания ССК в различных оптических структурах, включая высококонтрастные решетки, резонансные волноводные дифракционные решетки и интегральные резонаторы.

## Ключевые слова

Связанные состояния в континууме, резонанс, дифракционная решётка

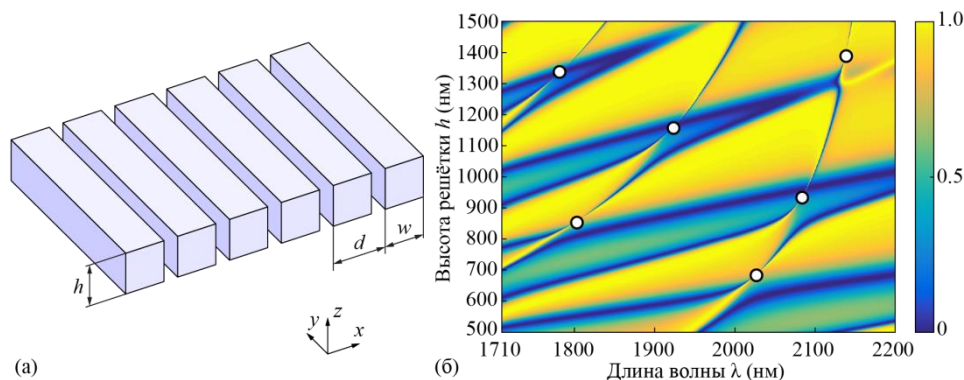
## 1. Введение

Связанные состояния в континууме (ССК) — это моды структуры с открытыми каналами рассеяния, имеющие бесконечную добротность [1]. В последние годы исследование таких состояний привлекло большое внимание из-за возможных применений в лазерных резонаторах, оптических сенсорах и фильтрах [2].

В большинстве известных работ ССК исследуются на основе численного моделирования, а существование ССК подтверждается расчётом добротности моды, которая при изменении тех или иных параметров структуры неограниченно возрастает при приближении к параметрам, обеспечивающим ССК. В недавней статье [3] авторы настоящей работы предложили простую модель связанных волн, предсказывающую положение ССК в структурах, в которых существует два вида взаимодействующих мод. В настоящей работе предложено развитие данного подхода на случай большего числа взаимодействующих мод. Показано, что при ряде разумных допущений интерференция трёх мод также может приводить к существованию ССК. Получены простые аналитические выражения, описывающие положение ССК в пространстве параметров.

## 2. Результаты

На Рисунке 1(а) представлена геометрия рассматриваемой структуры — высококонтрастной дифракционной решётки ( $d = 1000$  нм,  $w = 700$  нм, показатель преломления — 3.5). На Рисунке 1(б) представлен спектр отражения плоской волны (угол падения  $45^\circ$ ), рассчитанный по методу фурье-мод. На рисунке видны резонансные линии минимумов отражения, ширина которых меняется при изменении параметров структуры. Точки, в которых ширина резонансной линии обращается в ноль, соответствуют случаю бесконечной добротности, то есть ССК.



**Рисунок 1:** (а) Геометрия рассматриваемой дифракционной решётки. (б) Строго рассчитанный спектр отражения в зависимости от высоты решётки и длины волны падающего света. Кружочками отмечены положения ССК, предсказанные предложенной моделью

В рассматриваемом диапазоне длин волн ступеньки решётки допускают существование трёх видов мод, распространяющихся в положительном и отрицательном направлениях оси  $z$ . Указанные моды взаимодействуют при дифракции на верхней и нижней границах решётки. Данное взаимодействие можно описать матрицами рассеяния, связывающими комплексные амплитуды мод, распространяющихся внутри структуры, а также комплексные амплитуды падающей, отражённой и прошедшей плоских волн [3]. Такой подход позволил получить простые уравнения связанных волн, описывающие оптические свойства рассматриваемой структуры. Решая полученные уравнения, можно вывести явные выражения для коэффициентов отражения и пропускания. Анализ этих выражений позволяет доказать существование ССК и предсказать положение ССК в пространстве параметров. Как показано на Рисунке 1(б), предсказанные положения ССК хорошо согласуются с результатами строгого моделирования.

Предложенная модель связанных волн также позволяет ввести так называемый топологический заряд ССК, который описывает взаимодействие и аннигиляцию нескольких ССК при изменении параметров структуры. Наличие топологического заряда доказывает устойчивость ССК к небольшим изменениям параметров структуры.

### 3. Заключение

Предложена модель связанных волн, описывающая возникновение ССК в структурах, допускающих распространение трёх видов мод. Частными случаями таких структур являются высококонтрастные дифракционные решетки, волноводные резонансные дифракционные решетки и интегрированные резонаторы в виде ступенек на поверхности волновода.

### 4. Благодарности

Работа выполнена за счёт гранта РФФИ 19-19-00514.

### 5. Литература

- [1] von Neumann, J. Uber merkwürdige diskrete Eigenwerte / J. von Neumann, E. Wigner // Phys. Zeit. – 1929. – Vol. 30. – P. 465.
- [2] Hsu, C.W. Bound states in the continuum / C.W. Hsu, B. Zhen, A.D. Stone, J.D. Joannopoulos, M. Soljačić // Nat. Rev. Mat. – 2016. – Vol. 1. – P. 16048.
- [3] Bykov, D.A. Coupled-wave formalism for bound states in the continuum in guided-mode resonant gratings / D.A. Bykov, E.A. Bezus, L.L. Doskolovich // Phys. Rev. A. – 2019. – Vol. 99. – P. 063805.