

СВЯЗАННЫЕ СОСТОЯНИЯ В КОНТИНУУМЕ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРАХ И КОЛЬЦАХ*

✉ Д. В. Бочек¹, К. Б. Самусев^{1,2}, М. Ф. Лимонов^{1,2}, А. Б. Певцов²

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

✉ dashabocheck@gmail.com

Связанные состояния в континууме (ССК) — это общее волновое явление, которое было предсказано в 1929 г. фон Нейманом и Вигнером [1] для электронных состояний и в дальнейшем рассматривалось для других типов волн. Фотонные ССК сосуществуют с распространяющимися электромагнитными волнами и лежат внутри континуума, но остаются полностью ограниченными без излучения [2–4]. Теоретически ССК имеют бесконечное время жизни и могут реализоваться, если хотя бы одно измерение структуры простирается на бесконечность [2] или когда диэлектрическая проницаемость стремится к нулю [5, 6]. Для моделирования ССК можно варьировать геометрические и диэлектрические параметры резонатора до тех пор, пока система не будет наиболее точно удовлетворять условию, требуемому для ССК в соответствующей бесконечной системе. ССК достигается, когда добротность больше не изменяется медленно при варьировании параметра, как в обычном резонаторе, а вместо этого стремительно растет, пока не достигнет своего максимального значения из-за конечного размера резонатора [7]. В конечных реальных системах говорят о квази-ССК. Особый интерес представляют случаи, когда квази-ССК наблюдается в простейшем объекте, например одиночном диэлектрическом цилиндре [8, 9]. Показано, что при различных геометрических параметрах в цилиндре наблюдается квази-ССК в соответствии с теорией Фридриха — Винтгена [10], обусловленный сильным взаимодействием мод Ми и Фабри — Перо [8, 9].

В данной работе мы трансформировали топологию цилиндра, добавив внутрь коаксиальное воздушное отверстие, и постепенно увеличивали его радиус, осуществляя переход к тонкому кольцу. Приведены результаты численных расчетов, демонстрирующие закономерности изменения квази-ССК при расширении отверстия в цилиндре и изменении собственных мод диэлектрического кольца. Мы провели расчет спектров рассеяния кольца в зависимости от его соотношения радиуса к длине R/L для набора радиусов отверстия r , начиная с $r = 0$. Мы проанализировали моды, возбуждаемые плоской ТЕ-поляризованной волной, при значении диэлектрической проницаемости $\epsilon = 80$, следуя работам. Возбуждающиеся моды имеют симметрию $TE_{1,1,0}$ (медленно меняющаяся мода Ми) и $TM_{1,1,1}$ (быстро меняющаяся мода Фабри — Перо). Из-за разных спектральных сдвигов мод Ми и Фабри — Перо при изменении аспектного отношения R/L моды с одним и тем же азимутальным индексом взаимодействуют, за счет чего возникает режим антипересечения при особых значениях параметра R/L с резким сужением высокочастотной линии, что соответствует квази-ССК, как показано ранее в [11]. Гладкие зависимости всех функций не оставляют сомнения в том, что квази-ССК сохраняется в случае пересечения ветвей Ми и Фабри — Перо и далее с ростом r/R , когда частота квази-ССК моды Ми оказывается ниже резонансной частоты Фабри — Перо.

© Д. В. Бочек, К. Б. Самусев, М. Ф. Лимонов, А. Б. Певцов, 2022

* Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (№ 20-12-00272).

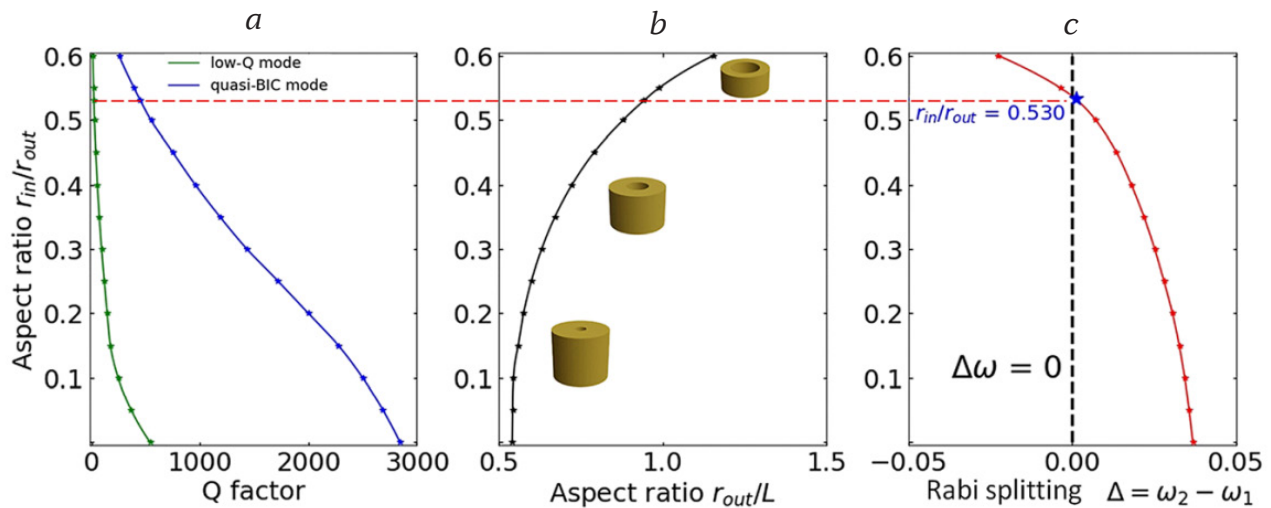


Рис. 1. Связанные состояния в континууме в диэлектрических кольцах: *a* — эволюция добротности для ветвей с квази-ССК (синяя кривая) и без него (зеленая кривая); *b* — преобразование формы кольца (отношения L , R и r) с квази-ССК для пары мод $TE_{1,1,0}$ и $TM_{1,1,1}$; *c* — зависимость расщепления Раби ($\Delta = \omega_2 - \omega_1$) между ветвью с квази-ССК и без него от соотношения r/R

В заключение мы обнаружили, что высокодобротные квази-ССК существуют не только в диэлектрических цилиндрах, но и в кольцевых резонаторах в широком диапазоне размеров внутреннего отверстия. Численно исследовано поведение $TE_{1,1,0}$ -резонансов типа Ми и $TM_{1,1,1}$ типа Фабри — Перо в структурах с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_1 = 80$. Деструктивная интерференция противофазных волн в дальней зоне приводит к квази-БИК, а конструктивная интерференция синфазных волн — к снижению добротности.

Список литературы

1. von Neumann J., Wigner E. // Phys. Z. 1929. Vol. 30. P. 465.
2. Hsu C. W., Zhen B., Stone A. D., Joannopoulos J. D. and Soljačić M. // Nat. Rev. Mater. 2016. Vol. 1. P. 16048.
3. Monticone F., Doeleman H. M., Den Hollander W., Koenderink A. F. and Alù A. // Laser Photonics Rev. 2018. Vol. 12. P. 1700220.
4. Azzam S. I., Kildishev A. V. // Adv. Optical Materials. 2021. Vol. 9. P. 2001469.
5. Monticone F., Alù A. // Phys. Rev. Lett. 2014. Vol. 112. P. 213903.
6. Silveirinha M. G. // Phys. Rev. A. 2014. Vol. 89. P. 023813.
7. Rybin M., Kivshar Y. // Nature. 2017. Vol. 541. P. 164.
8. Rybin M. V., Koshelev K. L., Sadrieva Z. F. et al. // Phys. Rev. Lett. 2017. Vol. 119. P. 243901.
9. Bogdanov A. A., Koshelov K. L., Kapitanova P. V. et al. // Adv. Photonics. 2019. Vol. 1. P. 016001.
10. Friedrich H., Wintgen D. // Phys. Rev. A. 1985. Vol. 32. P. 3231.
11. Solodovchenko N., Samusev K., Bochek D., Limonov M. // Nanophotonics. 2021. Vol. 10. P. 4347–4355.