

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

Ещё раз о суперрезонансных состояниях

(ответ на письмо В.В. Климова в редакцию УФН [УФН 189 (10) 1131 (2019)] с комментариями к обзору "Резонансные эффекты в фотонных кристаллах и метаматериалах"

М.В. Рыбина и М.Ф. Лимонова [УФН 189 (8) 881 (2019)])

М.В. Рыбин, М.Ф. Лимонов

В данном письме мы демонстрируем ошибочность положений и выводов, изложенных в письме в редакцию УФН В.В. Климова [УФН 189 (10) 1131 (2019)]. Автор обсуждает обзор М.В. Рыбина и М.Ф. Лимонова [УФН 189 (8) 881 (2019)] и делает ряд заключений, которые не имеют ничего общего с содержанием обзора и оригинальных работ, на которых основан обзор. Также выводы В.В. Климова противоречат хорошо известным литературным данным.

Ключевые слова: связанные состояния в континууме, суперрезонансные состояния, добротность, деструктивная интерференция, эффект антипересечения собственных мод

PACS numbers: 42.25.-p, 42.70.Qs, 78.67.-n

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.10.038679>

От редколлегии. Мы предоставляем возможность авторам обзора "Резонансные эффекты в фотонных кристаллах и метаматериалах" [УФН 189 (8) 881 (2019)] М.В. Рыбину и М.Ф. Лимонову ответить на критику, изложенную в письме В.В. Климова «О существовании "суперрезонансных" состояний в субволновых диэлектрических резонаторах и их связи со связанными состояниями в континууме». В соответствии с нашей практикой дальнейшую дискуссию по этой теме на страницах журнала *Успехи физических наук* считаем нецелесообразной.

Связанные состояния в континууме (ССК) в настоящее время являются одним из наиболее интригующих разделов современной фотоники, которому посвящена обширная литература. Этой теме уделяется особое внимание в обзоре "Резонансные эффекты в фотонных кристаллах и метаматериалах" [1], который был написан нами для специального выпуска журнала *УФН*, посвящённого 100-летию Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе. Среди прочей литературы по ССК мы представили наши с соавторами результаты, изложенные в трёх публикациях [2–4] (в обзоре ссылки [78, 117, 120] соответственно).

В октябрьском номере *УФН* опубликовано письмо в редакцию В.В. Климова под названием "О существовании "суперрезонансных" состояний в субволновых диэлектрических резонаторах и их связи со связанными состояниями в континууме" [5]. В этом письме автор

называет ошибочными наши представленные в публикациях [1, 3, 4] результаты и выводы, относящиеся к "суперрезонансным" состояниям. Предваряя основную дискуссию, сделаем два замечания. Во-первых, В.В. Климов пишет о нашем обзоре [1] как об оригинальной работе, в которой мы что-то обнаружили и что-то доказываем, хотя это не соответствует действительности: как и общепринято в обзорах, мы лишь обсуждаем опубликованные результаты. Во-вторых, в письме [5] не цитируется наша ключевая работа [2], в которой вводится и разъясняется термин "суперрезонансная" мода. Рисунок 1 поясняет смысл введения нового понятия: так как истинное ССК с бесконечной добротностью не может

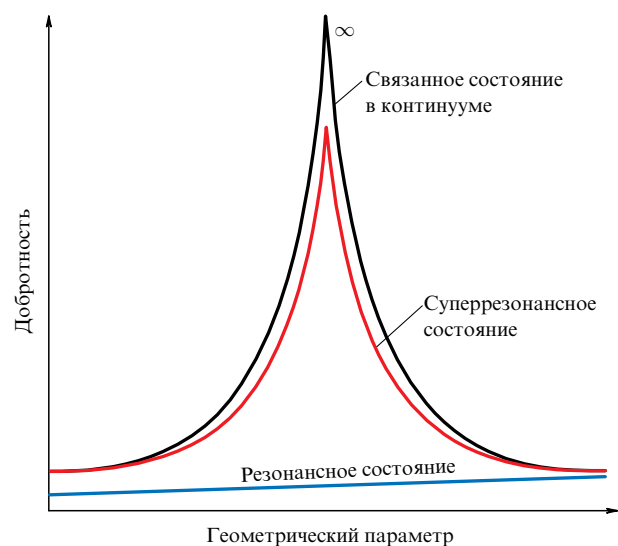


Рис. 1. Соотношение между истинным ССК, суперрезонансным состоянием и обычным резонансным состоянием. Рисунок аналогичен рис. 1 из работы [2].

М.В. Рыбин*, М.Ф. Лимонов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
ул. Политехническая 26, 194021 С.-Петербург, Российская Федерация
E-mail: * m.rybin@mail.ioffe.ru

Статья поступила 21 октября 2019 г.

быть реализовано в реальных конечных структурах, его наблюдаемый экспериментально резонансный аналог, совпадающий по механизму образования, но имеющий конечную добротность, был назван суперрезонансной модой [2].

Разберём по пунктам ошибочные утверждения автора письма [5].

1. Основная ошибка В.В. Климова заключается в том, что он приписывает нам вывод об обнаружении *новых* мод (которые мы назвали "суперрезонансными"), *дополнительных к стандартному набору собственных состояний резонатора*: "Ниже будет показано, что никаких новых "суперрезонансных" мод в работах [10–12] не обнаружено", "собственные значения мод являются аналитическими функциями от формы резонатора, и это не позволяет говорить о возникновении новых мод при изменении формы субволнового резонатора (с. 1131)", "для возникновения действительно новых мод нужна новая физика резонатора (с. 1132)" и т.д.

На самом деле ни о каких дополнительных модах мы, *безусловно*, не пишем. В наших работах [3, 4] изучались

собственные моды конечного диэлектрического цилиндра, которые разделяются на моды Ми (определяются боковыми стенками цилиндра) и моды Фабри–Перо (определяются плоскими торцами цилиндра). Различная зависимость мод этих двух семейств от аспектного отношения r/l приводит к многочисленным областям антипересечения (рис. 9 в работе [4]) — явления, хорошо известного для случая сильной связи. В диапазонах параметров r/l , удалённых от областей антипересечения, высокочастотные колебания каждой интерферирующей пары мод Ми — Фабри–Перо проявляют себя как обыкновенные утекающие моды и наблюдаются в спектрах рассеяния в виде *широких интенсивных полос* (линии в прямоугольниках на рис. 2б). При приближении к области антипересечения и, соответственно, при усилении межмодового взаимодействия высокочастотные полосы *сужаются на порядки*, что и определяет резонансный рост добротности Q и переход к суперрезонансному режиму (рис. 1). Например, при диэлектрической проницаемости цилиндра $\varepsilon = 80$ суперрезонансный режим наблюдается для высокочастотной моды у пары антипересекающихся колебаний TE_{020} и TE_{012} при $r/l = 0,7$ (рис. 2б и рис. 3 в работе [3]), у пары антипересекающихся колебаний TE_{110} и TM_{111} при $r/l = 0,55$ (рис. 3 в [4]) и т.д. (рис. 9 в [4]). При этом общее число собственных мод цилиндра, естественно, остаётся *неизменным* при любых значениях аспектного отношения r/l . Возникновение множества суперрезонансных состояний связано с механизмом *деструктивной интерференции* пары утекающих мод в режиме сильной связи (антипересечение двух мод), который описан в статье [6] (ссылка [77] в обзоре [1]). Такой механизм возникновения квази-ССК наблюдался в целом ряде работ (см. обзор [7]).

2. Следующей ошибкой автора письма [5] является придуманное им самим утверждение, что в наших работах менялись условия возбуждения спектров рассеяния. В наших работах чётко указано, что все спектры и в расчётах [3, 4], и в эксперименте [4] соответствуют одной и той же геометрии рассеяния — нормальному падению плоской волны на боковую поверхность цилиндра. Для каждого набора спектров поляризации также не изменялась (в частности, не менялась ТЕ-поляризация для набора спектров на рис. 2б). Придумав ситуацию с изменением ориентации источника, В.В. Климов пишет: "В качестве подтверждения того очевидного факта, что изменение условий возбуждения может привести к уменьшению рассеяния до нуля и к "исчезновению" мод, на графике (рис. 1 в письме В.В. Климова [5] и рис. 2а в данном письме) показана нормированная мощность излучения диэлектрической сферы в зависимости от ориентации возбуждающего диполя". С этим выводом трудно спорить, однако *никакого отношения* к нашим результатам этот расчёт не имеет. Тем не менее он даёт возможность ещё раз выделить важную особенность суперрезонансной моды. Из сравнения рисунков 2а и 2б прекрасно видно, что в случае пропадания моды из-за изменения параметров источника её полуширина не меняется, в отличие от ширины линии, которая демонстрирует впечатляющее изменение в суперрезонансном режиме.

3. Продолжая свою критику, В.В. Климов утверждает: "в случае круглого цилиндра... собственные моды должны характеризоваться распределением электромагнитных полей, экспоненциально убывающих на беско-

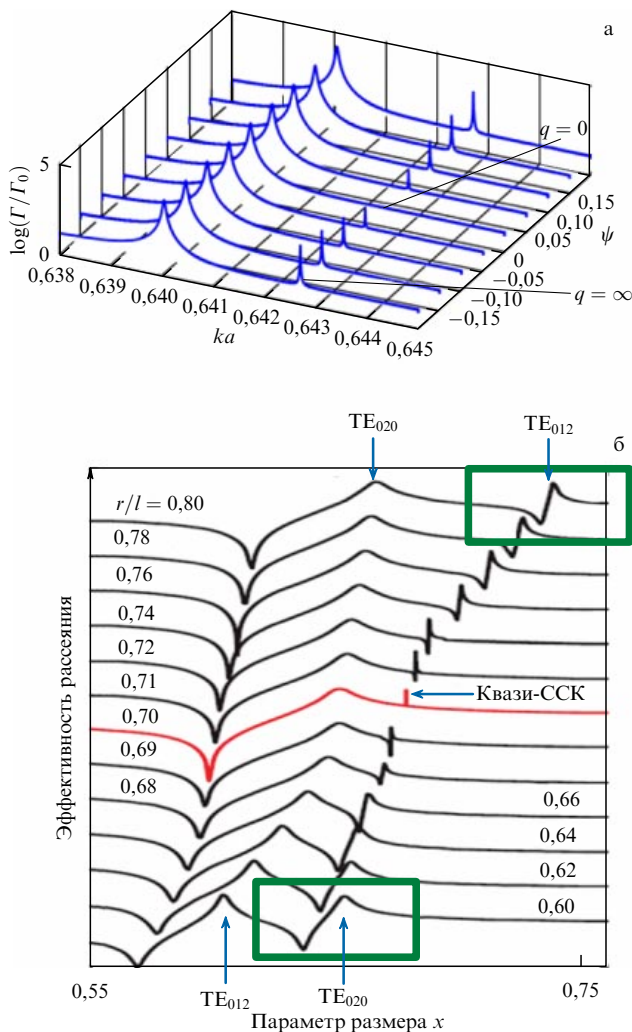


Рис. 2. (В цвете онлайн.) (а) Нормированная мощность излучения диэлектрической сферы в зависимости от ориентации возбуждающего диполя ψ при $\varepsilon = 80$ [5]. (б) Спектры рассеяния конечного диэлектрического цилиндра в зависимости от структурного параметра r/l при неизменной геометрии возбуждения ТЕ-поляризованной плоской электромагнитной волной, $\varepsilon = 80$ [3].

нечности" (с. 1131). Данное утверждение также ошибочно: диэлектрический цилиндр является открытой оптической системой, как и резонатор любой другой формы, но конечного размера. Поля собственных мод открытых пассивных систем, как широко известно [8, 9], в общем виде экспоненциально расходятся на бесконечности из-за ненулевой мнимой части собственной частоты, а не убывают, как утверждается в письме [5].

4. Далее автор письма [5] обращается к величине добротности Q , которая была определена для суперрезонансных мод цилиндра в наших работах [3, 4], и углубляется в сравнение этих значений с добротностью мод диэлектрической сферы. Вероятно, В.В. Климов невнимательно читал наш обзор, в котором на с. 887 подчёркивается: "Важно отметить, что суперрезонансные состояния — это не резонансы с рекордно высокой добротностью, а состояния, механизм возникновения которых соответствует механизму возникновения ССК."

5. Автор [5, с. 1131] пишет следующее: "Выбор цилиндрического резонатора для поиска высокодобротных мод вряд ли можно назвать удачным, так как в общем случае наличие рёбер приводит к дополнительному рассеянию полей и снижению добротности". Это утверждение лишено смысла по отношению к теме публикаций [2–4] — связанным состояниям в континууме. Во-первых, механизм возникновения ССК Фридриха – Винтгена [6] сводится к деструктивной интерференции двух утекающих мод в режиме сильной связи и не определяется наличием либо отсутствием рёбер. Более того, многие фотонные диэлектрические структуры, на которых экспериментально или в расчётах наблюдались связанные состояния в континууме (точнее, близкие к ним, т.е. суперрезонансные моды), образованы цилиндрами [7]. Это связано, в частности, с тем, что, в отличие от сферических частиц, цилиндрические микро- и нанообъекты с правильной геометрической формой можно изготовить с помощью доступных на сегодняшний день технологиче-

ских методик. Среди рассматриваемых в литературе структур, у которых наблюдались квази-ССК-состояния, можно перечислить систему цилиндрических нанорезонаторов, образующих квадратную решётку [10], фотонную мембрану с цилиндрическими отверстиями (т.е. структуру инвертированных цилиндров) [11], цепочку диэлектрических цилиндров [12], систему двух параллельных рядов, образованных цилиндрами [13].

Мы можем отметить, что в наших работах [3, 4] суперрезонансный (квази-ССК) режим впервые наблюдался на уединённом цилиндре. Именно поэтому работы [3, 4] вызвали большой интерес и характеризуются высокой цитируемостью. При этом основные критические замечания, изложенные в письме [5], либо не имеют ничего общего с содержанием обзора [1] и результатами оригинальных работ [3, 4], либо являются ошибочными.

В заключение мы благодарим наших соавторов по работам [2–4] А.А. Богданова, Ю.С. Кившара, К.Л. Кошелева и К.Б. Самусева за обсуждение данного письма.

Список литературы

1. Рыбин М В, Лимонов М Ф *УФН* **189** 881 (2019); Rybin M V, Limonov M F *Phys. Usp.* **62** 823 (2019)
2. Rybin M, Kivshar Yu *Nature* **541** 164 (2017)
3. Rybin M V et al. *Phys. Rev. Lett.* **119** 243901 (2017)
4. Bogdanov A A et al. *Adv. Photon.* **1** 016001 (2019)
5. Климов В В *УФН* **189** 1131 (2019); Klimov V V *Phys. Usp.* **62** (10) (2019) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2019.05.038619>
6. Friedrich H, Wintgen D *Phys. Rev. A* **32** 3231 (1985)
7. Hsu C W et al. *Nature Rev. Mater.* **1** 16048 (2016)
8. Gamow G Z. *Phys.* **51** 204 (1928)
9. Зельдович Я Б *ЖЭТФ* **39** 776 (1960); Zel'dovich Ya B *Sov. Phys. JETP* **12** 542 (1961)
10. Kodigala A et al. *Nature* **541** 196 (2017)
11. Hsu C W et al. *Nature* **499** 188 (2013)
12. Sadrieva Z F et al. *Phys. Rev. A* **99** 053804 (2019)
13. Ndagali R F, Shabanov S V *J. Math. Phys.* **51** 102901 (2010)

Once again about supercavity modes

(a response to the letter to the editors of *Physics–Uspekhi* from V.V. Klimov [*Phys. Usp.* **62** (10) (2019); *Usp. Fiz. Nauk* **189** (10) 1131 (2019)] with comments on the review by M.V. Rybin and M.F. Limonov "Resonance effects in photonic crystals and metamaterials" [*Phys. Usp.* **62** (8) 823 (2019); *Usp. Fiz. Nauk* **189** (8) 881 (2019)])

M.V. Rybin*, M.F. Limonov

Ioffe Institute, ul. Polytekhnicheskaya 26, 194021 St. Petersburg, Russian Federation

*E-mail: *m.rybin@mail.ioffe.ru*

In this letter, we demonstrate the fallacy of the provisions and conclusions set forth in the letter to the editors of *Physics–Uspekhi* by V.V. Klimov [*Phys. Usp.* **189** (10) 1131 (2019)]. The author discusses the review by M.V. Rybin and M.F. Limonov [*Phys. Usp.* **189** (8) 881 (2019)] and makes a number of conclusions that have nothing to do with the content of the review and the original works on which the review is based. Also, the conclusions of V.V. Klimov contradict well-known literature data.

Keywords: bound states in the continuum, supercavity modes, quality factor, destructive interference, regime of avoided resonance crossing

PACS numbers: **42.25. – p**, **42.70.Qs**, **78.67. – n**

Bibliography — 13 references

Received 21 October 2019

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **189** (12) 1364–1366 (2019)

Physics–Uspekhi **62** (12) (2019)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.10.038679>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2019.10.038679>