

## СЕЛЕКЦИЯ РАДИАЛЬНЫХ И ПОЛЯРНЫХ МОД ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ В МИКРОСФЕРЕ С ПОМОЩЬЮ ТОНКОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ С ЗАЗОРОМ\*

✉ Х. А. Ризк<sup>1,2</sup>, В. А. Симонов<sup>1</sup>, В. С. Терентьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

✉ k.rizk@g.nsu.ru

Оптические резонаторы моды шепчущей галереи — это резонаторы осесимметричной формы (сферической, дисковой, цилиндрической и др.), удерживающие свет за счет полного внутреннего отражения на границе раздела двух сред. Благодаря достаточно высоким характеристикам по степени фильтрации и плотности внутрирезонаторной энергии (характерные величины добротности  $Q > 10^6$ ) их практическое применение можно разделить на две большие области: сенсорные приложения [1] и нелинейное преобразование излучения [2].

Одним из существенных недостатков такого типа микрорезонаторов является наличие очень большого количества возбуждаемых мод. Зачастую это приводит к зашумлению спектральной характеристики и может затруднять анализ экспериментальных данных. В данной работе с помощью численного моделирования в программном пакете COMSOL Multiphysics 6.1 (модуль «Волновая оптика») демонстрируется метод селекции по добротности радиальных и полярных оптических мод в сферическом микрорезонаторе, основанный на эффекте поглощения в тонкой металлической пленке с зазором. Эффект селекции мод достигается за счет увеличения омических потерь для тех мод, для которых металлическая пленка расположена в области большего значения электрического поля. Если же поглощающий слой попадает в окрестность, где величина поля близка к нулю, то потери для такой моды снижаются. Ранее подобный метод использовался для селекции мод в объемных резонаторах типа Фабри — Перо [3].

Радиус микросферы выбран равным 80 мкм, азимутальный индекс  $l = 455$ , что соответствует длине волны резонанса вблизи 1550 нм для основной (радиальной и полярной) моды  $TE_{455,455,1}$ , в качестве материала поглощающей металлической пленки выбран никель, а толщина

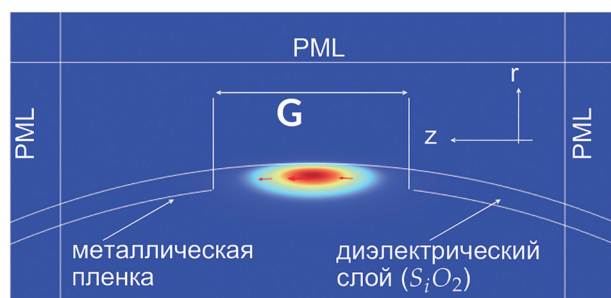


Рис. 1. Расчетная геометрия и распределение поля основной моды

пленки — 5 нм с точки зрения доступности технологического изготовления методом вакуумного напыления и внесения небольших потерь для селектируемой моды. В качестве переменных использовались два основных параметра: положение металлической пленки по радиусу ( $r_{me}$ ) и ширина зазора ( $G$ ).

На рис. 1 показана расчетная геометрия модели: в двумерном осесимметричном режиме, ось симметрии  $r = 0$ . В направлениях  $\pm z$  и  $+r$  помещены идеально согласованные слои

\* Исследование выполнено в рамках государственного задания Института автоматики и электрометрии СО РАН (№ 124041700065-2). Использован вычислительный комплекс с лицензированным ПО COMSOL ЦКП «Спектроскопия и оптика» (ИАиЭ СО РАН).

© Х. А. Ризк, В. А. Симонов, В. С. Терентьев, 2024

(Perfectly Matched Layer, PML) для подавления рассеянного излучения. Пленка никеля задавалась условием Transition Boundary Condition. Модуль «Волновая оптика» программного пакета COMSOL Multiphysics позволяет проводить численное моделирование электромагнитных явлений. В данной задаче методом конечных элементов ищется решение уравнения Максвелла в цилиндрической системе координат, удовлетворяющее поставленным граничным условиям. Для случая невозмущенного металлической пленкой резонатора длины волн резонансов совпадают с аналитическим решением с точностью  $\sim 10^{-7}$ .

На рис. 2 показаны результаты моделирования с учетом предельных добротностей для чисто кварцевых резонаторов ( $Q \sim 10^{10}$ ), ограниченных собственным поглощением и рэлеевским рассеянием. Сплошные линии (правая шкала) показывают добротность основной моды  $Q_{455,455,1}$ , а кружки с пунктирными линиями (левая шкала) — во сколько раз добротность основной моды превышает максимальную добротность среди мод с более высоким радиальным  $R_{l,m,q} = Q_{l,m,q} / \max_i(Q_{l,m,i}), i > 1$  (см. рис. 2, а) и полярными индексом  $P_{l,m,q} = Q_{l,m,q} / \max_i(Q_{l,m-i,q}), i > 0$  (см. рис. 2, б).

Большой разброс значений для радиальных мод (см. рис. 2, а) в области  $r_{me} > 74$  мкм вызван тем, что пленка попадает в ноль радиального распределения поля одной из высших мод, приводя к уменьшению потерь для нее. Этот эффект был продемонстрирован ранее для случая сплошной металлической пленки [4].

Для рассчитанных параметров пленки наиболее выгодна величина зазора  $G = 20$  мкм при радиальном положении  $r_{me} = 75$  мкм, где достигается максимальное подавление высших радиальных мод в 71,6 раза, а подавление полярных мод близко к максимуму и составляет 13,7.

Экспериментальная реализация резонатора предложенной конфигурации возможна с применением технологии магнетронного осаждения в вакууме для формирования металлического и диэлектрического слоев, а также литографии или лазерной абляции для создания зазора требуемого размера в металлической пленке.

## Литература

1. Foreman M. R., Swaim J. D., Vollmer F. Whispering gallery mode sensors // Ad. Opt. Photon. 2015. Vol. 7. P. 632–634.
2. Kippenberg T. J., Spillane S. M., Vahala K. J. Kerr-Nonlinearity Optical Parametric Oscillation in an Ultrahigh-Q Toroid Microcavity // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 93. P. 083904.
3. Автономов В. П., Антропов Е. Т., Соболев Н. Н., Троицкий Ю. В. Выделение вращательных линий CO<sub>2</sub>-лазера пленочным селектором в резонаторе // Кв. эл. 1972. Т. 3. С. 112–115.
4. Terentyev V. S., Simonov V. A. Mode Selection Method in Spherical Optical Cavities with Thin Metal Film // Photonics. 2023. Vol. 10. P. 789.

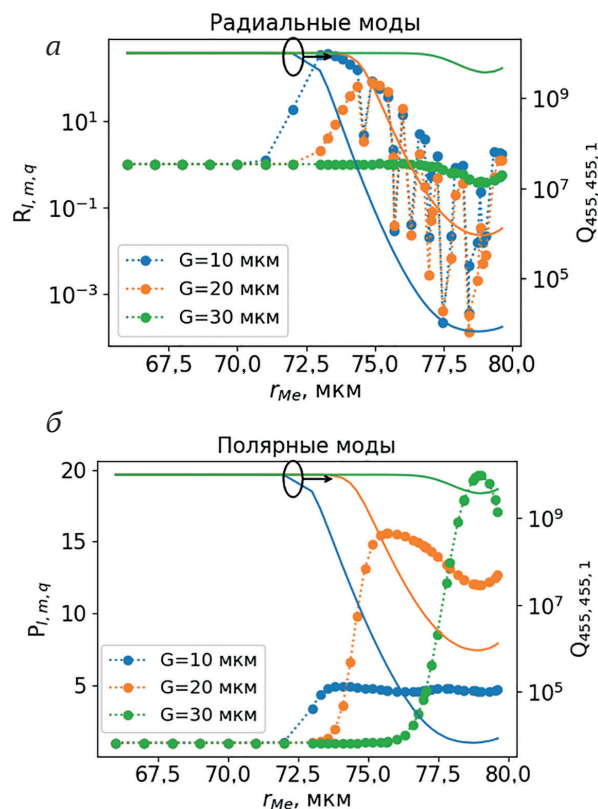


Рис. 2. Зависимость добротности основной моды и фактора подавления высших радиальных  $R_{l,m,q}$  (а) и полярных  $P_{l,m,q}$  (б) мод от положения пленки