

РАСЧЕТ ДОБРОТНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ИЗ СПЕКТРА ПРОПУСКАНИЯ МИКРОКОЛЬЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА

✉ Д. Е. Артемов^{1,2}, В. Н. Трещиков¹, А. И. Федосеев²,
А. А. Ершов³, А. А. Никитин³, А. Б. Устинов³

¹ООО «Т8», Москва

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

³Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В. И. Ульянова, Санкт-Петербург, Россия

✉artemov.de14@physics.msu.ru

Микрокольцевые резонаторы (МКР) используются в составе фотонных интегральных схем для фильтрации длин волн, стабилизации лазерного излучения и в приложениях нелинейной оптики (генерация оптических гребенок). Для задач уменьшения фазовых шумов лазерных источников, в которых МКР выступает в качестве дополнительного резонансного отражателя [1], ключевыми характеристиками являются добротность и коэффициент отражения резонансов МКР. Для оценки характеристик МКР могут быть использованы спектры пропускания $T(\lambda)$, измеренные экспериментально в схеме, изображенной на рис. 1, и аппроксимированные модельными функциями.

В качестве модельных функций могут быть использованы профиль Лоренца T_L [2] и профиль Эйри T_A [3], а параметры, входящие в эти профили, могут применяться для оценки добротностей и коэффициента отражения резонансов МКР

$$T_L(\omega) = \left| \frac{(\delta_0 - i\Delta\omega_{MRR})^2 - \delta_c^2 + g^2}{(\delta_0 + \delta_c - i\Delta\omega_{MRR})^2 + g^2} \right|^2, \quad (1)$$

$$T_A(\omega) = 1 - \frac{I_0}{1 + \frac{4at}{(1-at)^2} \sin^2 \left(2\pi \frac{\Delta\omega_{MRR}}{\Delta\omega_{FSR}} \right)}. \quad (2)$$

$$Q_L = \frac{\omega_{MRR}}{2(\delta_0 + \delta_c)}, \quad (3)$$

$$Q_A = \frac{\pi n_{gr}(\lambda_{MRR}) L_{MRR}}{2\lambda_{MRR}} \bigg/ \arcsin \left(\frac{1-at}{2\sqrt{at}} \right). \quad (4)$$

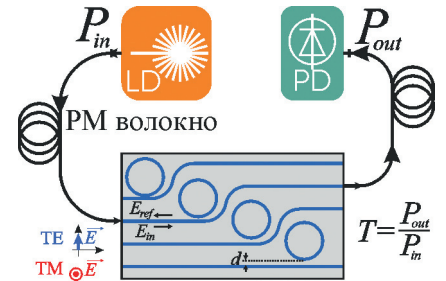


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения спектра пропускания МКР

Здесь $\Delta\omega_{MRR} = \omega - \omega_{MRR}$ [$2\pi \cdot \Gamma\mu$] — отстройка от резонанса МКР, $n_{gr}(\lambda_{MRR})$ — групповой показатель преломления на резонансной длине волны, L_{MRR} — геометрическая длина МКР. В случае профиля Лоренца для спектра пропускания может быть также оценен коэффициент отражения резонансов МКР κ (см. рис. 1) [2]:

$$\kappa = \left| \frac{E_{ref}}{E_{in}} \right|_{res} = \frac{2\delta_c g}{(\delta_c + \delta_0)^2 + g^2}. \quad (5)$$

В данной работе измерены спектры пропускания 4 образцов МКР в двух ортогональных поляризациях (рис. 2, а), по которым рассчитаны добротности и коэффициенты отражения наблюдаемых резонансов (см. рис. 2, б–г). Образцы различаются зазором d между МКР и прилегающим прямым волноводом.

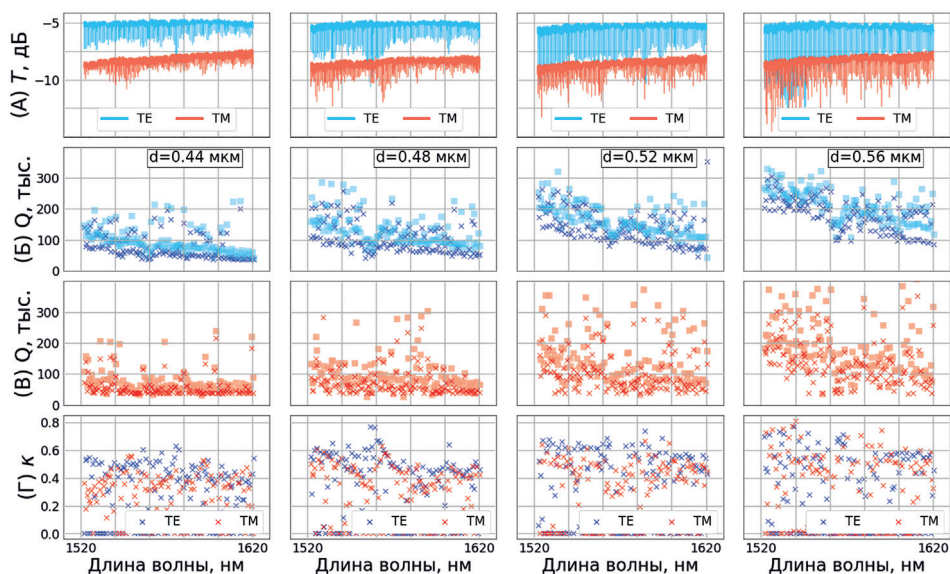


Рис. 2. Экспериментально измеренные спектры пропускания 4 образцов МКР в двух ортогональных поляризациях (а); значения добротностей резонансов фундаментальных ТЕ-мод (б) и фундаментальных ТМ-мод (в) МКР с указанием значения зазора d при аппроксимации профилем Лоренца (крестики) и Эйри (квадраты); значения коэффициента отражения k резонансов фундаментальных ТЕ- и ТМ-мод (г). Каждый столбец графиков соответствует одному образцу МКР с известным d

Ближкие значения Q_L и Q_A позволяют заключить, что спектр пропускания высокодобротных МКР может быть равносильно описан профилем Лоренца и профилем Эйри. При этом параметры, входящие в (2) и (4), могут быть рассчитаны теоретически [3] для МКР с заданной геометрией и известным затуханием в волноводе.

Оценки коэффициента отражения k имеют большой разброс и близки к нулю для некоторых резонансов, что объясняется недостаточно точным подбором параметра g , входящего в (5), в процессе аппроксимации из-за слабого влияния параметра g на $T_L(\omega)$ (1).

Таким образом, показано, что значения добротности резонансов спектра пропускания МКР, рассчитанные по формулам (2) и (3) при их аппроксимации профилем Лоренца (1) и профилем Эйри (2), дают близкие результаты в случае высокодобротных МКР. Несовпадение объясняется допущением существования единственной поперечной моды в МКР и близлежащем волноводе в случае профиля Лоренца [2] и отсутствием такого допущения в случае профиля Эйри [3]. Рассчитанные значения Q и k могут быть использованы для анализа возможности уменьшения фазовых шумов лазерных источников с помощью высокодобротных МКР [1].

Литература

1. Kondratiev N. M. et al. Recent advances in laser self-injection locking to high-Q microresonators // Front. Phys. 2023. Vol. 18 (2). P. 21305.
2. Городецкий М. Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью. М.: Физматлит, 2011.
3. Артемов Д. Е. и др. Расчет добротности микро-кольцевого резонатора: сравнение экспериментальных и модельных оценок // Фотон-экспресс. 2023. Т. 6 (190).