

РАСЧЕТ ДОБРОТНОСТИ МИКРО-КОЛЬЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА: СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И МОДЕЛЬНЫХ ОЦЕНОК

Артемов Д.Е.^{1,2*}, Бучинский А.В.³, Трещиков В.Н.¹, Федосеев А.И.², Ершов А.А.⁴,
Никитин А.А.⁴, Устинов А.Б.⁴

¹ ООО «Т8», г. Москва

² МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

³ Московский физико – технический институт, г. Долгопрудный

⁴ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова,
г. Санкт – Петербург

* E-mail: artemov.de14@physics.msu.ru DOI 10.24412/2308-6920-2023-6-137-138

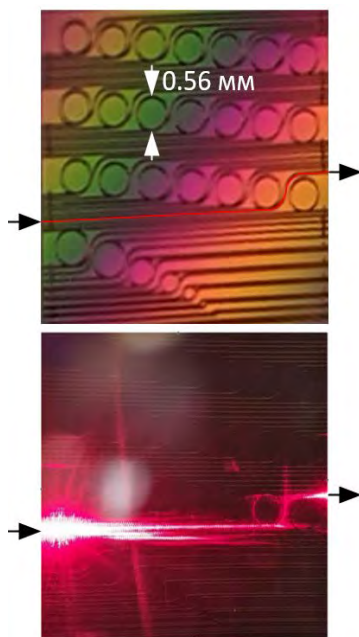


Рис. 1. Кристалл с микро-кольцевыми резонаторами (фото сверху). Стрелками показаны ввод и вывод излучения. Внизу – ввод видимого излучения в один из МКР на кристалле

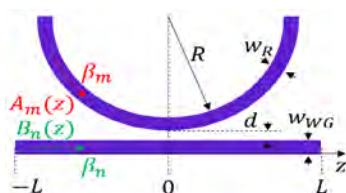


Рис. 2. Участок связи МКР и смежного волновода (вид сверху)

Микро-кольцевые резонаторы (МКР) (Рис.1) используются в составе фотонных интегральных схем для фильтрации длин волн, стабилизации лазерного излучения, а также в приложениях нелинейной оптики (генерация оптических гребенок). Для МКР, образованных многомодовым волноводом, добротность резонансов кольца определяется связью всех мод кольца и смежного волновода [1] и зависит от длины волны. На Рис. 1 изображен кристалл с различными МКР, произведенными на платформе Si_3N_4 / SiO_2 [2].

Для практических целей добротности резонансов МКР предварительно рассчитываются, часто с использованием 3-мерных моделей распространения света, реализованных в коммерческих программных пакетах (Comsol Multiphysics, Ansys Lumerical и т.п.). Недостатком использования полномасштабных 3-мерных моделей является длительность расчетов и сходимость результатов.

Для МКР нами предложена альтернативная упрощенная модель, в которой аналогичная задача решается в рамках одномерного осесимметричного приближения для медленно меняющихся комплексных амплитуд (Рис. 2). Сначала рассчитываются собственные поперечные моды волновода, образующего кольцо, и смежного волновода (задача на собственные функции и собственные значения). Для выбранного зазора d между волноводом и кольцом рассчитываются интегралы перекрытия $C_{mn}(z)$ между поперечными модами кольца и волновода [3], m, n – номера поперечных мод кольца и волновода, соответственно. Далее с использованием формализма связанных мод [4,5] рассчитывается распределение вдоль оси z медленно меняющихся комплексных амплитуд поперечных мод кольца $A_m(z)$ и мод смежного волновода $B_n(z)$, волновые фронты которых распространяются с фазовыми скоростями β_m и β_n , соответственно (рис. 2). Для каждой m – поперечной моды кольца коэффициент пропускания по амплитуде рассчитывается по формуле $t_m = \frac{A_m(L)}{A_m(-L)}$. По известным потерям

мощности для m -поперечной моды кольца α_m [м⁻¹] добротность этой же моды рассчитываются по формуле, выведенной по схеме многолучевой интерференции [6]: $Q_m = \frac{\pi n_{gr}(\lambda) L_m}{2\lambda} \cdot \arcsin\left(\frac{1 - a_m t_m}{2\sqrt{a_m t_m}}\right)$,

где $a_m \equiv e^{-\alpha_m L/2}$, $n_{gr}(\lambda) = n_{eff}(\lambda) - \lambda \frac{dn_{eff}(\lambda)}{d\lambda}$ – групповой показатель преломления, λ – длина волны излучения, $L_m = 2\pi R n_m^{eff}$ – оптическая длина МКР на длине волны λ_m (n_m^{eff} – соответствующий

эффективный показатель преломления). Все параметры, входящие в выражение для Q_m , рассчитаны для каждой геометрии МКР на кристалле (рис. 1).

Расчеты проведены для МКР при фиксированной толщине волноводов [2] и геометрических параметрах, выбранных при изготовлении (см. Рис. 2). По результатам расчетов сделана модельная оценка добротности $Q_m(\lambda)$ одной фундаментальной поперечной моды МКР с наименьшим затуханием α_m ($m=1$). Нами исследован спектр пропускания кольца, в котором наблюдаются выраженные резонансы. В эксперименте спектры пропускания МКР были измерены на установке для неразрушающего контроля параметров фотонных интегральных схем [7]. На Рис. 3 изображен измеренный спектр пропускания по мощности $T = P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$. В резонансах (красные точки) световая мощность сосредоточена в микро-кольцевом резонаторе, поэтому пропускание снижено. Ширина резонансов определяется их добротностями. На вставке на рис. 3 показан спектр пропускания вблизи одного из резонансов. Для приближенной оценки добротности резонанса кольца может быть использован профиль Лоренца с разумно подобранными параметрами [4].

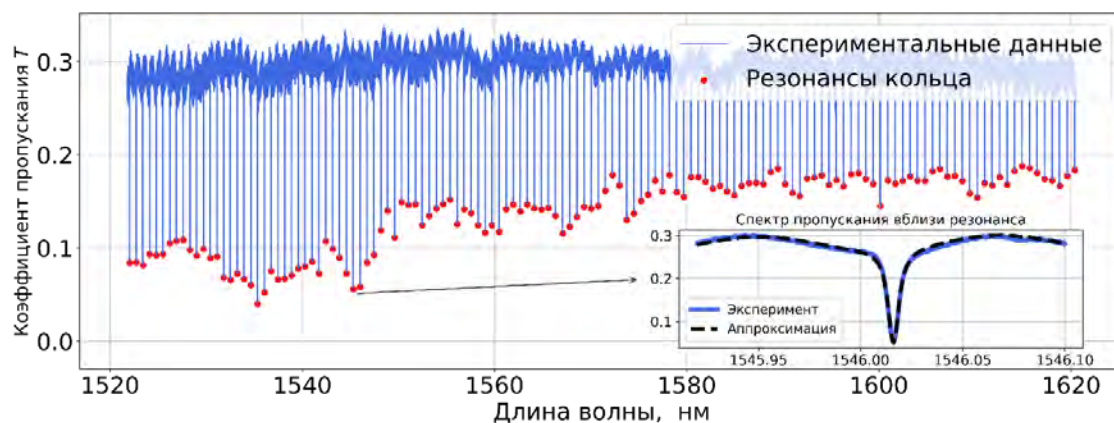


Рис. 3. Спектр пропускания исследуемого микро-кольцевого резонатора

На Рис. 4 показаны результаты расчета добротности фундаментальной моды кольца $Q_{m=1}(\lambda)$ по описанной методике (сплошная кривая) и экспериментальные оценки добротности резонансов кольца (красные точки). Даже без учета погрешности выдерживания зазора d между кольцом и волноводом в процессе производства [2] модельные и экспериментальные результаты хорошо согласуются между собой, корреляция Пирсона составляет 81%.

Предложенная модель может быть использована для оценки добротности микро-кольцевых резонаторов в составе фотонных интегральных схем.

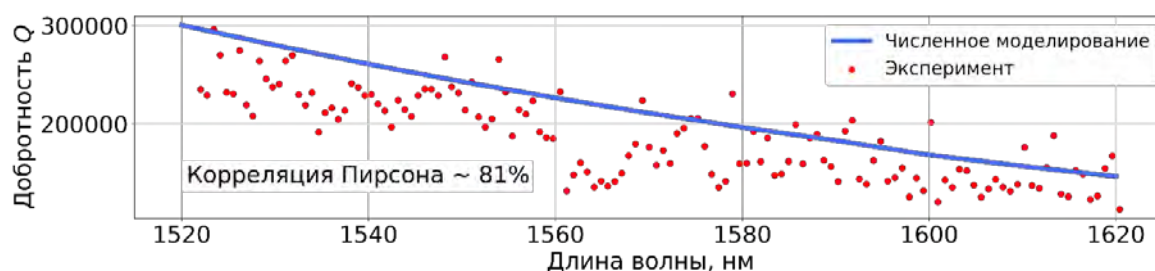


Рис. 4. Оценка добротности резонансов на основе экспериментальных данных и численного моделирования

Литература

1. Pfeiffer M. H. P. et al. *Physical Review Applied*. 7, 024026 (2017)
2. Pfeiffer M. H. P. et al. *Optica* 3, 20-25 (2016)
3. Снайдер А., Лав Д. *Теория оптических волноводов. – Радио и связь, (1987)*
4. Gorodetsky M. L., Ilchenko V. S. *JOSA B*. 16, 147-154 (1999)
5. Matsuhara M., Watanabe A. *JOSA*. 65, 163-168 (1975)
6. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики (1973)*
7. Ershov A.A. et al. *Microw. Opt. Technol. Lett.* 65, 2451-2455 (2023)