

07;12

Пороговая мощность вынужденного температурного рассеяния в кварцевых микрорезонаторах

© М.В. Журавлев

Raymond and Beverly Sackler Faculty of Exact Sciences, School of Chemistry, Tel-Aviv University, 69978 Tel-Aviv, Ramat-Aviv, Israel

(Поступило в Редакцию 23 сентября 2009 г.)

Представлена пороговая мощность вынужденного температурного рассеяния в зависимости от параметра дифракции и длины волны лазерной накачки, рассчитанная для двухмодового режима взаимодействия в высокодобротных сферических микрорезонаторах из плавленого кварца. Показано, что пороговая мощность по порядку величины сравнима с пороговой мощностью возбуждения рамановской генерации и тепловой неустойчивости в сферических кварцевых микрорезонаторах. Низкая пороговая мощность вынужденного температурного рассеяния порядка $100 \mu\text{W}$ для резонатора с радиусом $35 \mu\text{m}$ на длине волны лазерной накачки $0.840 \mu\text{m}$ определяет прикладное значение микрорезонаторов в качестве высокочувствительного датчика температуры, измерителя коэффициента теплопроводности, теплоемкости и стабилизатора для микролазеров.

Множество вынужденных нелинейных температурных процессов, таких как бистабильность [1,2], температурная стабилизация и неустойчивость [3,4], наблюдались в твердотельных микрорезонаторах оптического диапазона при очень низкой пороговой мощности лазерной накачки. Понижение пороговой мощности лазерной накачки является общим эффектом для нелинейных оптических процессов в микрорезонаторах, поскольку в них возбуждаются поверхностные электромагнитные моды типа „моды шепчущих галерей“ (ШГ, подобные поверхностным акустическим модам в резонаторе Гельмгольца), имеющие добротность порядка $Q \approx 10^6 - 10^8$ [5]. Низкопороговое возбуждение температурной неустойчивости было продемонстрировано в экспериментах с микрорезонаторами из плавленого кварца с радиусами в интервале $R = 100 - 150 \mu\text{m}$ на длине волны накачки $\lambda_p = 0.63 \mu\text{m}$ [1].

В микросферах из плавленого кварца с радиусом $R = 40 \mu\text{m}$ экспериментально зафиксирована рамановская генерация на модах ШГ, возбуждаемая лазерной накачкой на длине волны $\lambda_p = 1.55 \mu\text{m}$ с весьма низкой пороговой мощностью $86 \mu\text{W}$ [6].

В специфических условиях настройки и перекрытия электромагнитных мод в поверхностном слое микрорезонатора интенсивность внутреннего электромагнитного поля значительно увеличивается и эффективный объем мод ШГ обеспечивает тепловую обратную связь для возбужденных мод внутри микрорезонатора, которая приводит к температурной колебательной неустойчивости [7]. При этом в микрорезонаторах возможен и эффект вынужденного температурного рассеяния (ВТР), физическая сущность которого состоит в том, что поглощенная мощность накачки в условиях входного резонанса (частота накачки совпадает с частотой одной из собственных мод) изменяет собственные частоты мод ШГ путем нагрева объема их пространственной локализации. Запасенная энергия в эффективном объеме

моды зависит от уровня мощности лазерной накачки и от высокой добротности мод. Поглощенная пороговая мощность диэлектрических потерь приводит к нагреву и сдвигу собственных частот микрорезонатора через температурную зависимость показателя преломления в эффективном объеме моды. Таким образом, возникающая периодическая модуляция спектра собственных частот, зависящая от условий теплопереноса на поверхности резонатора, вносит дополнительную температурную комбинационную частоту как в линейный (рассеяние Ми), так и в комбинационный спектр рассеяния, что и определяет ВТР.

Цель данного исследования — оценить пороговую мощность ВТР для микрорезонатора из плавленого кварца. В работе [7] для описания ВТР была получена система уравнений колебаний для амплитуд парциальных волн TE_n^1 и температурной моды $T_n^{0,1}$ совместно с интегральными коэффициентами перекрытия электромагнитной и температурной моды (двухмодовый режим взаимодействия). Амплитуда высокодобротной парциальной моды ШГ, имеющая частотную форму лоренциана, промодулирована по температурной комбинационной частоте Ω_T , и, применив к укороченной системе уравнений колебаний условие устойчивости, для пороговой мощности ВТР получим:

$$P_{\text{th}} = \frac{\omega_p \rho C_p V}{2a_\epsilon Q_f^2} \frac{1 + \tau}{1 \pm \gamma} \frac{1 + \eta^2}{2\eta}, \quad (1)$$

где:

$$\gamma = \frac{3\pi\chi^{(3)}\epsilon^2\rho C_p}{\omega_p a_\epsilon} \quad (2)$$

— коэффициент перекрытия температурной и электромагнитной моды, полученный с помощью асимптотических оценок интегральных коэффициентов взаимодействия мод с учетом нелинейности третьего порядка,

изложенных в [8],

$$\tau = \frac{2KQ_f}{\rho C_p \omega_p} \left(\frac{\mu_j}{R} \right)^2, \quad (3)$$

τ — безразмерный параметр, который имеет физический смысл отношения времени температурной релаксации к времени электрической релаксации моды. Антистоксова тепловая комбинационная частота имеет вид

$$\Omega_T = \omega_p \left[\frac{\xi_f^2/4 + \xi_0^2/4}{1 - \gamma} - \tau_t^2 \right]^{1/2}, \quad (4)$$

ω_p — частота лазерной накачки, $\eta = \xi_f/\xi_0$, $\xi_f = 1 - \omega_f^2/\omega_p^2$, $\xi_0 = 2(\tau_t + \tau_e)$ — оптимальная расстройка, $\tau_t = K(\mu_i/R)^2/\rho C_p \omega_p$ и $\tau_e = 1/2Q_f$ — безразмерное время тепловой и электрической релаксации, ω_f — частота выбранной собственной электромагнитной моды микрорезонатора TE_n^1 , V — объем микрорезонатора, μ_i — корень трансцендентного уравнения, получаемого из граничного условия третьего рода для уравнения теплопроводности на сфере [7].

В расчетах использовались следующие параметры, взятые из экспериментальных работ [1–6]: плотность $\rho = 2.21 \text{ g/cm}^3$, коэффициент теплопроводности $K = 1.4 \cdot 10^{-2} \text{ W/cm} \cdot \text{K}$, теплоемкость $C_p = 0.67 \text{ W} \cdot \text{s/gK}$, $a_\varepsilon = 1.45 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, нелинейность третьего порядка $\chi^{(3)} = 5 \cdot 10^{-15}$, $\varepsilon^{1/2} = 1.46$. Пороговая мощность определена для следующих случаев:

- 1) эффективное резонансное поглощение и перекрытие мод;
- 2) эффективный теплообмен на границе резонатора;
- 3) оптимальная расстройка $\xi_0 = \xi_f$, а также высокая добротность мод $Q_f = 10^8$ [5] обеспечивают линейность диэлектрических потерь.

Пороговая мощность ВТР, вычисленная при оптимальной расстройке ξ_0 в условиях входного резонанса

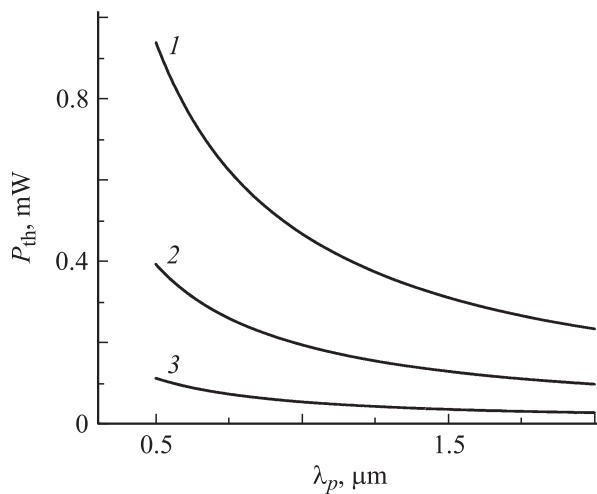


Рис. 1. Пороговая мощность ВТР в зависимости от резонансной длины волны накачки. Микрорезонатор из плавленного кварца с радиусом $r = 20$ (1), 15 (2), $10 \mu\text{m}$ (3), $TE_n^1 - T_1^1$, $n \approx \rho$.

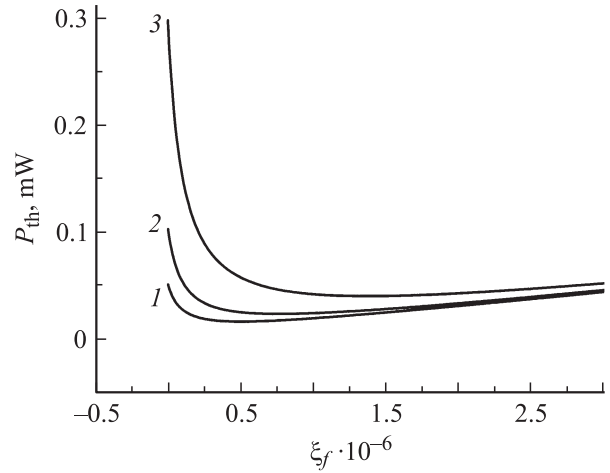


Рис. 2. Пороговая мощность ВТР как функция расстройки ε_f с резонансным радиусом микросферы из плавленного кварца $R = 35 \mu\text{m}$ на длине волны накачки: 1 — $\lambda_p = 0.532 \mu\text{m}$, $TE_{420}^1 - T_1^0$; 2 — $\lambda_p = 0.840 \mu\text{m}$, $TE_{260}^1 - T_1^0$; 3 — $\lambda_p = 1.55 \mu\text{m}$, $TE_{142}^1 - T_1^0$ (взаимодействие $TE_n^1 - T_1^0$, $n \approx \rho$).

как функция резонансной длины волны лазерной накачки λ_p представлена на рис. 1. Взаимодействующие электромагнитные моды E_n^1 соответствуют модам ШГ, $n \approx 2\pi R/\lambda_p$, где R — радиус микрорезонатора.

Пороговая мощность ВТР в зависимости от расстройки ξ_f представлена на рис. 2. Как видно из рис. 2 оптимальные условия для настройки мод (или выбора мод) при $\xi_0 = \xi_f$ обеспечивает минимум пороговой мощности ВТР. Поскольку наилучшие условия для экспериментального наблюдения ВТР реализуются в сферическом микрорезонаторе при том, что лазерная накачка возбуждает в микрорезонаторе множество мод, одна антистоксова мода совпадает по частоте с одной из незатухающих мод накачки, и взаимодействует с температурной модой, — при этом достигаются наибольший коэффициент перекрытия мод и оптимальная настройка резонатора.

Пороговая мощность, рассчитанная при возбуждении одной моды в зависимости от длины волны накачки, представлена на рис. 3. Минимум пороговой мощности достигается настройкой моды в резонанс с накачкой $\lambda_p = 0.532 \mu\text{m}$ и составляет $50 \mu\text{W}$ (кривая 1), что по порядку величины соответствует порогу бистабильности и меньше, чем порог рамановской генерации [6]. Вычисленный порог мощности ВТР варьируется от 5 до $50 \mu\text{W}$ (кривые 1–3).

Расчет тепловой комбинационной антистоксовой частоты, выполненный для сферических частиц радиусом $R = 2 - 10 \mu\text{m}$ (размер соответствует взвешенному искусственному атмосферному аэрозолю, состоящему из микрорезонаторов), представлен на рис. 4. Ω_T варьируется от 2 до 15 МГц и обеспечивает температурную модуляцию пиков в спектре вынужденного рамановского рассеяния и лазерной генерации в микросферах. Следует

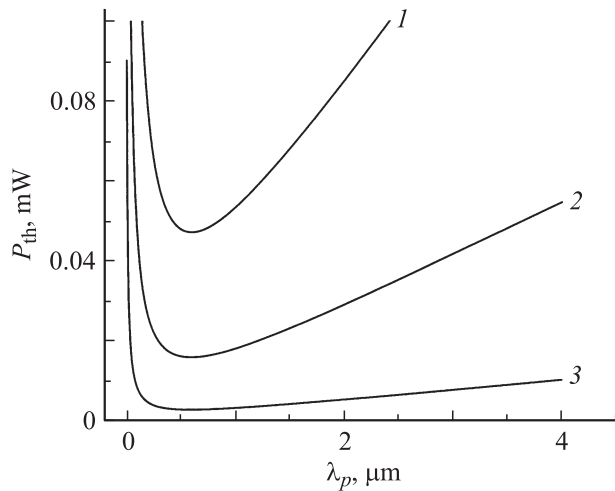


Рис. 3. Минимум пороговой мощности ВТР для микросфер из плавленого кварца. Длина лазерной накачки $\lambda_p = 0.532$, $R = 70$ (1), 50 (2), 45 μm (3).

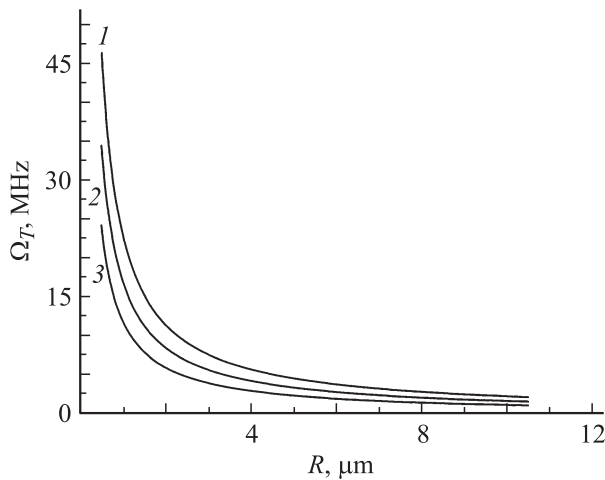


Рис. 4. Зависимость тепловой комбинационной антистоксовой частоты ВТР от радиуса R микросферы из плавленого кварца при $\lambda_p = 1.550 \mu\text{m}$, $TE_{41}^1 - T_1^0$ (1), $TE_{24}^1 - T_1^0$ (2), $TE_{12}^1 - T_1^0$ (3).

отметить, что комбинационная частота Ω_T может изменяться в широких пределах в зависимости от условий теплообмена на поверхности микрорезонатора. Ширина Ω_T обеспечивается резонансными условиями и большим количеством возбуждаемых электромагнитных мод (эквидистантным спектром для микросферы).

Вычисленная пороговая мощность ВТР меньше, чем пороговая мощность вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна, которая составляет 160 W [9]. Следовательно, необходимо принимать во внимание в опытах с микрорезонаторами наличие температурных расстройек мод ШГ и возможность проявления ВТР. Нелинейное взаимодействие температурной и электромагнитной моды может проявляться при весьма низких пороговых мощностях лазерной накачки, которая как показано на рис. 1–3, составляет 20–500 μW . Коэффици-

циент усиления при рамановской генерации в микросферах будет зависеть от температурной комбинационной частоты и комбинаций взаимодействующих электромагнитных температурных мод.

По низкороговому возбуждению температурной модуляции (или температурного сдвига, который определяет аperiодический колебательный режим) собственных частот можно определить температуру и химический состав поверхностного слоя микрорезонатора. Таким образом, микрорезонатор можно рассматривать как высокочувствительный датчик для измерения микрофизических параметров вещества.

Список литературы

- [1] Fomin A.E., Gorodetsky M.L., Grudinin I.S., Ilchenko V.S. // J. Opt. Soc. Am. B. 2005. Vol. 22. P. 459–465.
- [2] Rokhsari H., Spillane S.M., and Vahala K.J. // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 85. P. 3029–3032.
- [3] Carmon T., Yang L., and Vahala K.J. // Opt. Expr. 2004. Vol. 12. P. 4742–4749.
- [4] Mazumder Md.M., Hill S.C., Chowdhury D.Q., Chang R.K. // J. Opt. Soc. Am. B. 1995. Vol. 12. P. 297–310.
- [5] Gorodetsky M.L., Ilchenko V.S., and Savchenkov A.A. // Opt. Lett. 1996. Vol. 21. P. 453–456.
- [6] Spillane S.M., Kippenberg T.J., and Vahala K.J. // Nature. 2002. Vol. 415. P. 621–623.
- [7] Белокопытов Г.В., Журавлев М.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43. № 2. С. 162–173.
- [8] Белокопытов Г.В. // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия. 1997. Т. 3. С. 11–17.
- [9] Chitanvis S.M. and Cantrell C.D. // J. Opt. Soc. Am. V. 1989. Vol. 6. P. 1326–1331.