

«Микроволновая фотоника»

5-6 октября 2023 г.

Линейная и нелинейная динамика мод шепчущей галереи на поверхности волоконных световодов

Д. Бочек, Д. Крисанов, Д. Кудашкин, З. Хан, С. Фаст, Е. Клотиц, А. Колесникова, А. Новиков, Н. Макарова, С. Спирин, С. Сучков, И. Ватник, Д. Чуркин

Новосибирский государственный университет



N. Toropov, M. Sumetsky
Aston University, Birmingham, UK

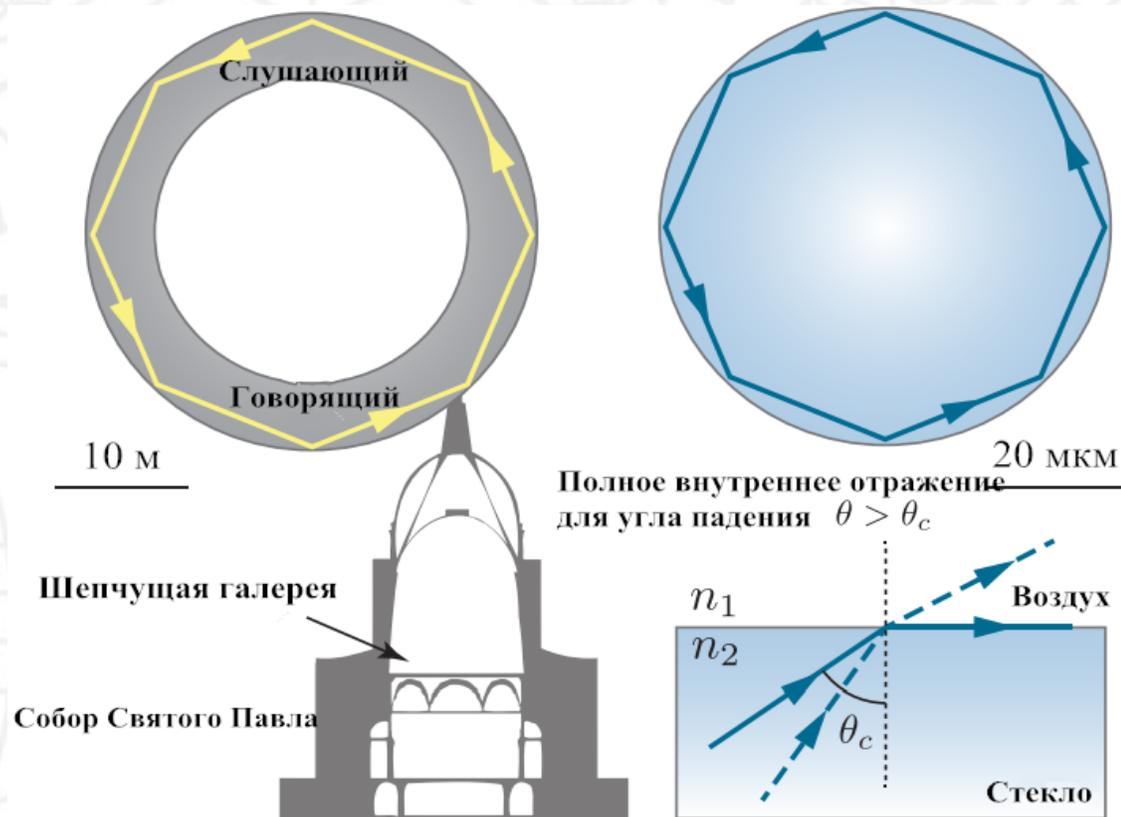


* Содержание

1. Моды шепчущей галереи (МШГ)
2. Моды шепчущей галереи на цилиндре и на волокне
 - Одномерная квантовая механика для МШГ
3. Создание и подстройка микрорезонаторов на волокнах
4. Применения МШГ на волокне:
 - Линии задержки
 - Сенсорика
 - Низкочастотные оптические гребенки

Моды шепчущей галереи

- Полное внутреннее отражение



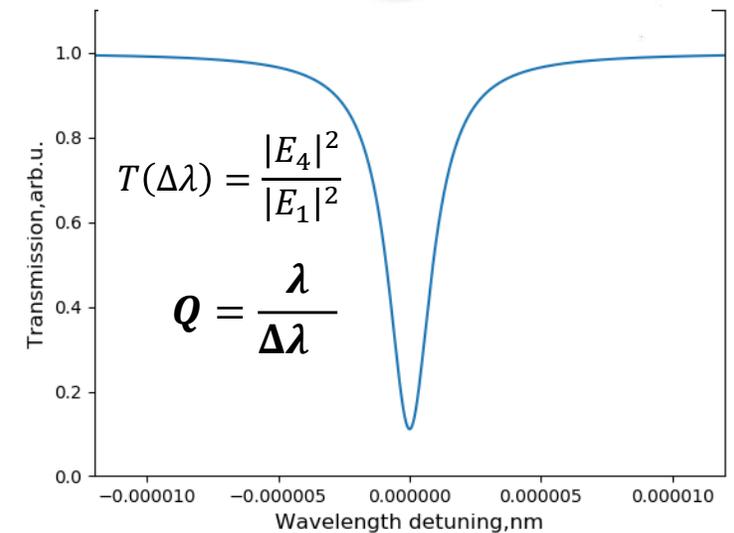
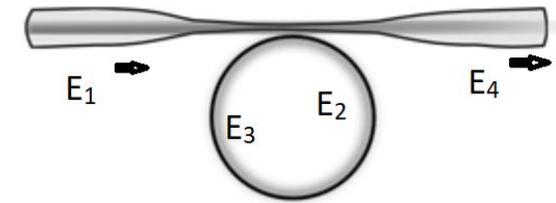
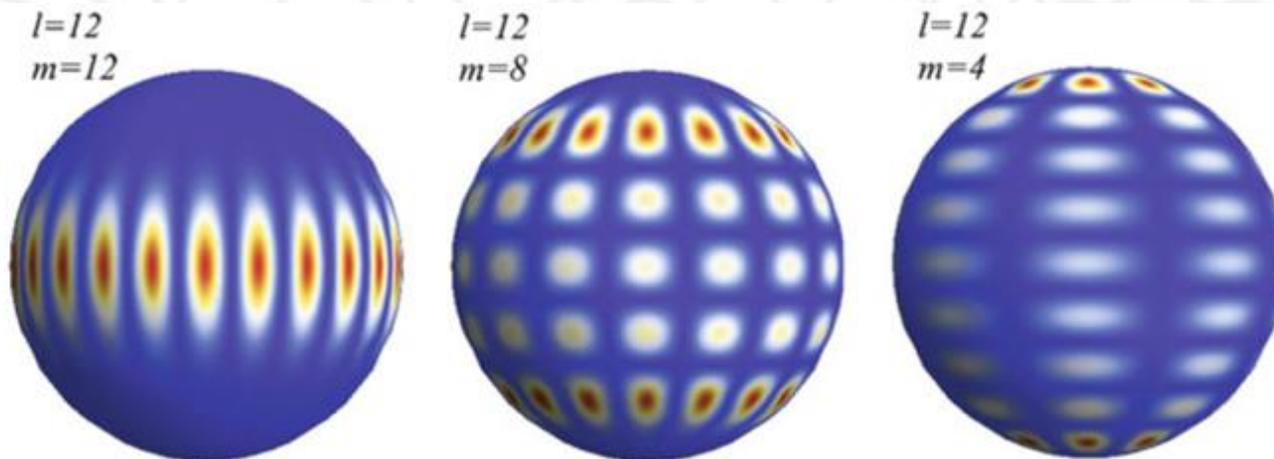
1. Rayleigh, Lord. The problem of the whispering gallery. *Philos. Mag.* 20, (1910).
2. R. D. Richtmyer, "Dielectric Resonators," *J. Appl. Phys.* 10, 391–398 (1939).
3. Garrett, C. G. B., Kaiser, W. & Bond, W. L. Stimulated emission into optical whispering modes of spheres. *Phys. Rev.* 124, 1807–1809 (1961).
4. Benner, R. E., Barber, P. W., Owen, J. F. & Chang, R. K. Observation of structure resonances in the fluorescence spectra from microspheres. *Phys. Rev. Lett.* 44, 475–478 (1980).
5. Braginsky, V. B., Gorodetsky, M. L. & Ilchenko, V. S. Quality-factor and nonlinear properties of optical whispering-gallery modes. *Phys. Lett. A* 137, 393–397 (1989).

Моды шепчущей галереи

- Условия резонанса

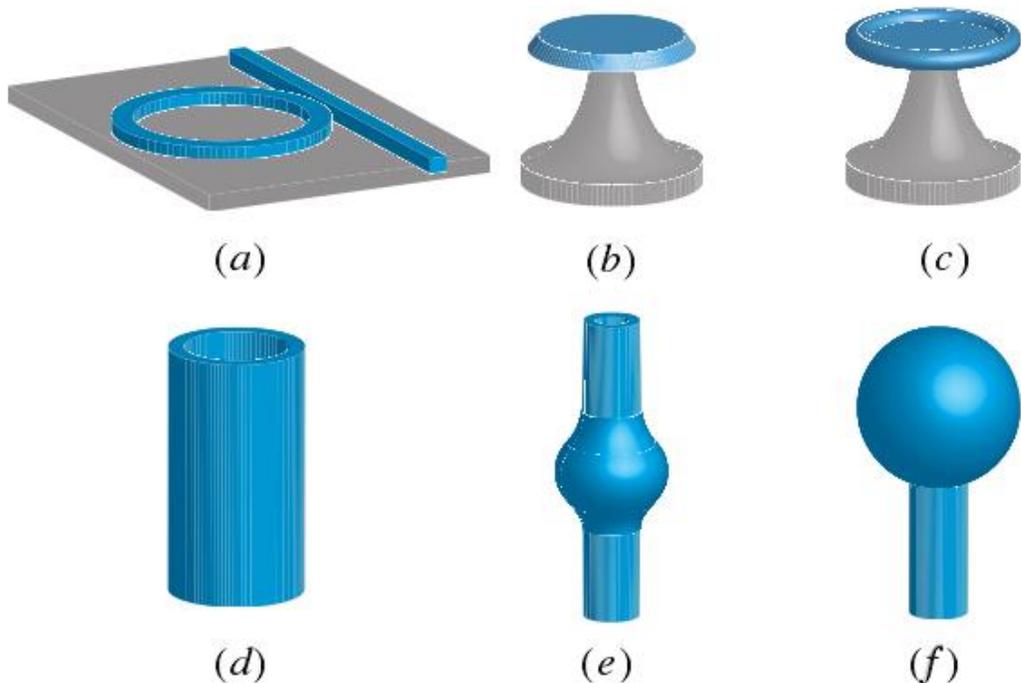
$$\lambda_m = \frac{2\pi r n}{m} \quad m - \text{азимутальное число}$$

- Другие числа : полярное l , радиальное p
- $l - |m| + 1$ – число максимумов вдоль меридиана



Городецкий М. Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью, 2012.

Микрорезонаторы МШГ



1) Компактность и малый эффективный объем мод

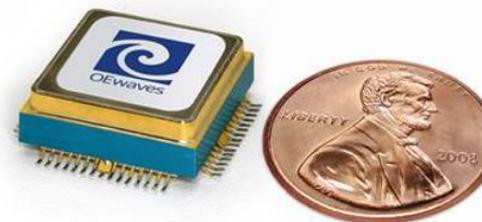
- сотни мкм^3

2) Высокая добротность

- Кварцевые сферы – до 10^{10} (@0.85 мкм)
- Кристаллические диски (CaF_2) – до 10^{11} (@1.55 мкм)

Великое разнообразие применений :

оптические фильтры, биосенсоры, нелинейная генерация, лазерная генерация и стабилизация лазерного излучения, оптические гироскопы, квантово-оптические эксперименты, оптоэлектронные осцилляторы



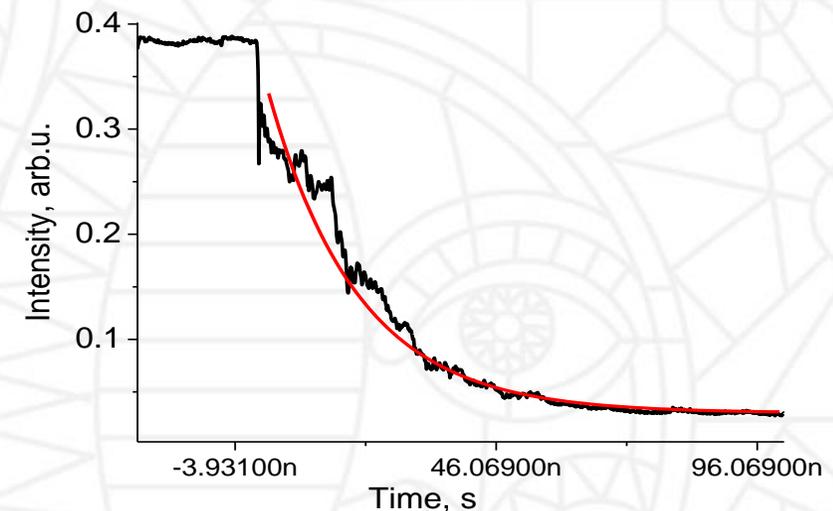
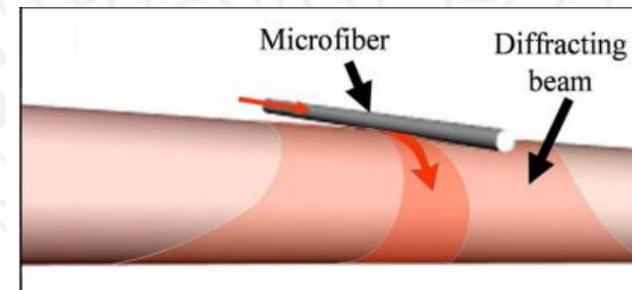
Моды шепчущей галереи на волокне

- Стандартное телекоммуникационное оптическое волокно с удаленным пластиковым покрытием как **кварцевый цилиндр**.

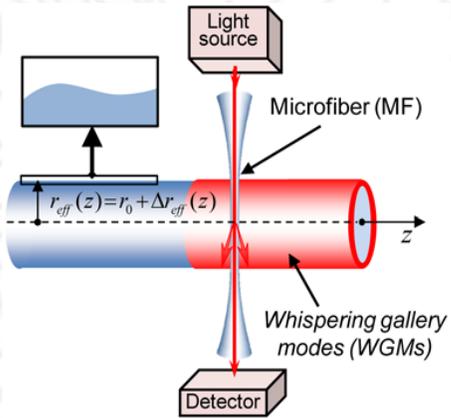
Sychugov, V. A., Torchigin, V. P. & Tsvetkov, M. Y. Whispering-gallery waves in optical fibres. *Quantum Electron.* 32, 738–742 (2002).

Sumetsky, M. Whispering-gallery-bottle microcavities: the three-dimensional etalon. *Opt. Lett.* 29, 8 (2004).

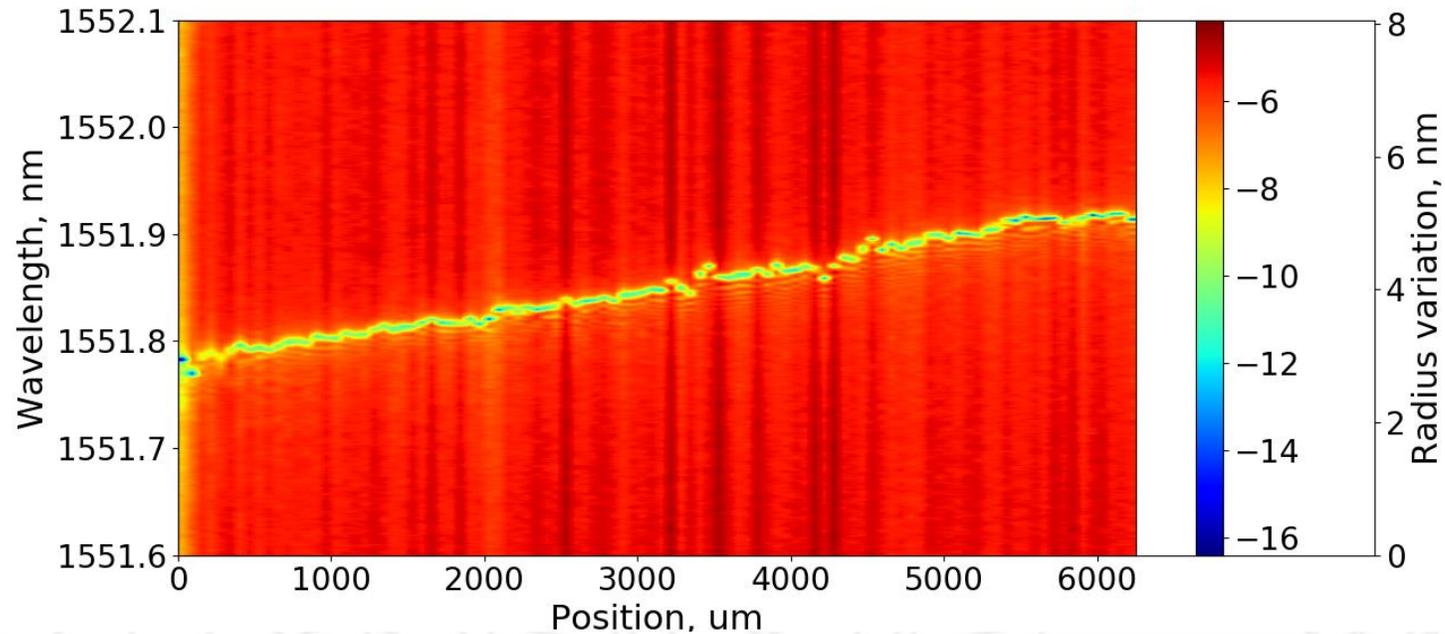
- $m=300-400$ (при диаметре кварцевой оболочки волокна 125 мкм).
- Добротность – 10^{7-8} (@ 1550 нм)
 - Ширина резонанса ~ 10 МГц (0.1 пм)
 - время жизни моды ~ 50 нс



Моды шепчущей галереи на волокне



Резонанс моды с конкретным m и p , измеренный в разных точках



$$\lambda_m = \frac{2\pi r_{eff}}{m} \Rightarrow \Delta r_{eff}(z) = r_{eff} \frac{\Delta \lambda}{\lambda}$$

- 3 нм вариации эффективного радиуса на 8 мм волокна
- Т.е. 0,001% (!) отклонения эффективного радиуса кварцевой оболочки
- Конусность - 10^{-7} радиан
- НО: шероховатость и отклонения реального радиуса могут быть БОЛЬШИМИ

Одномерная квантовая механика на поверхности волокна

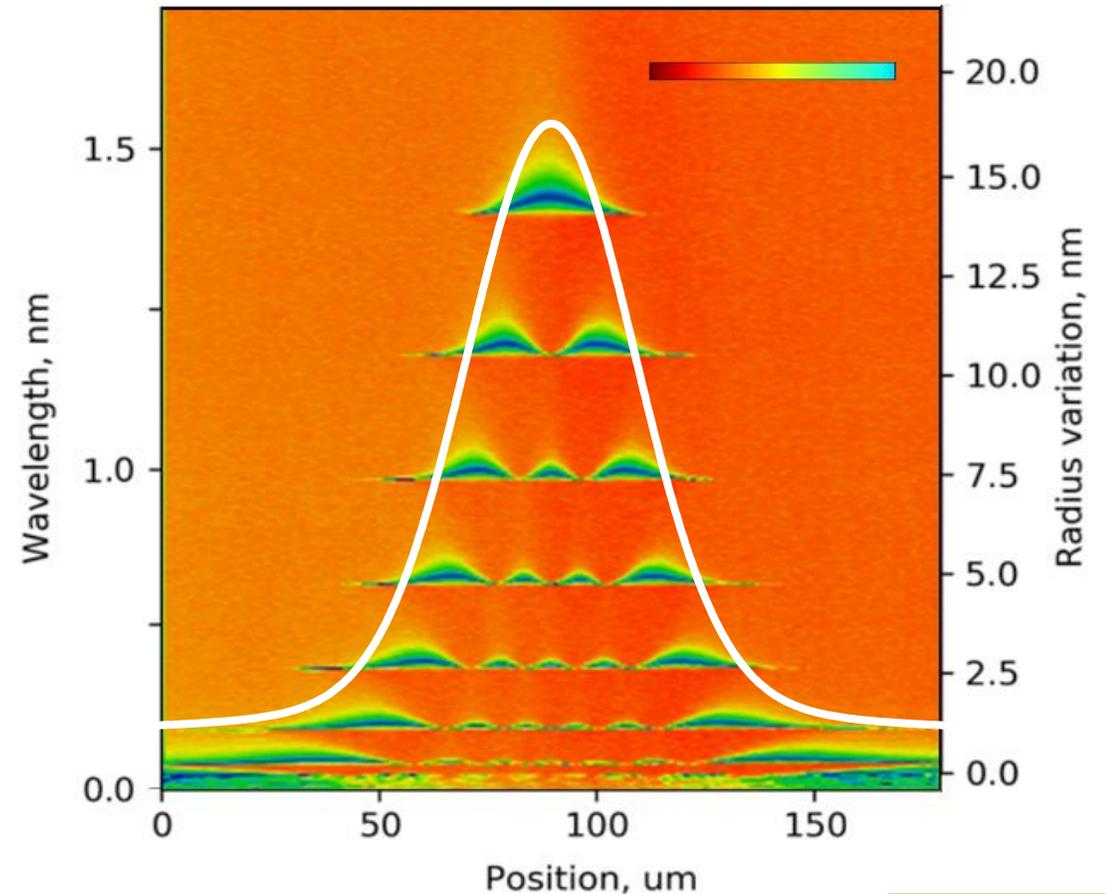
$$\frac{\partial^2 A_m(z, \omega)}{\partial z^2} + V_m(z) A_m(z, \omega) = E_m A_m(z, \omega).$$

$$V_m(z) = 2k_m^2 \frac{\Delta r_{eff}(z)}{r_{0eff}}$$

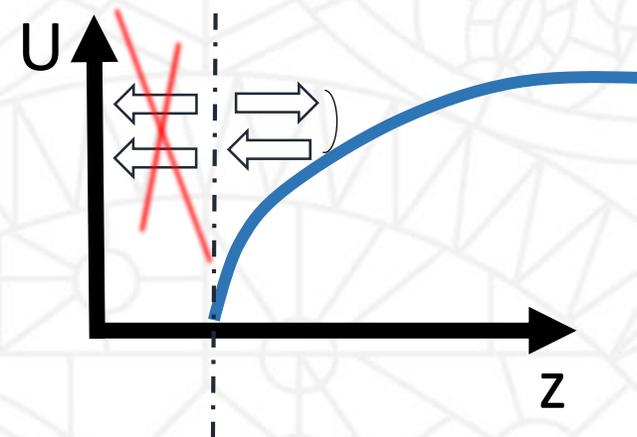
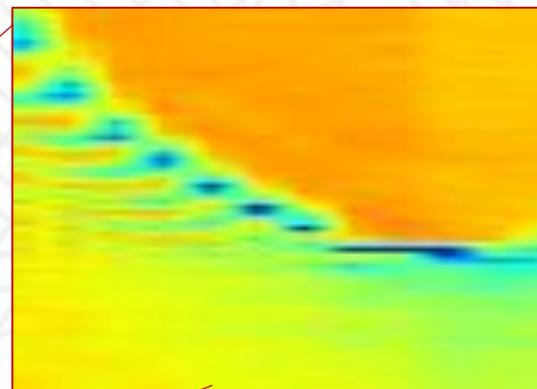
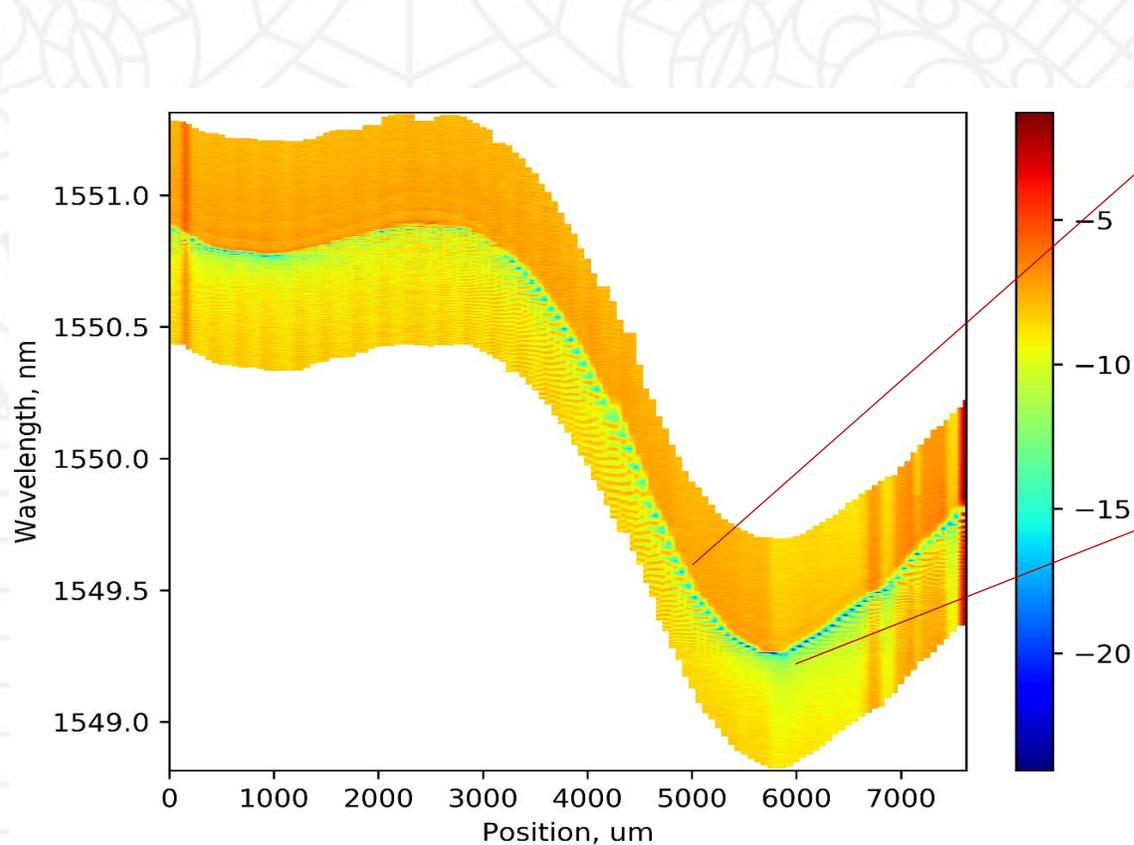
Потенциал, определяющийся
вариацией радиуса

$$E_m = -2k_m^2 \frac{\Delta \omega_m}{\omega_m}$$

ω_m – частота резонанса МШГ для
идеального цилиндра,
 $\Delta \omega_m$ - частоты резонансов для
заданной вариации радиуса

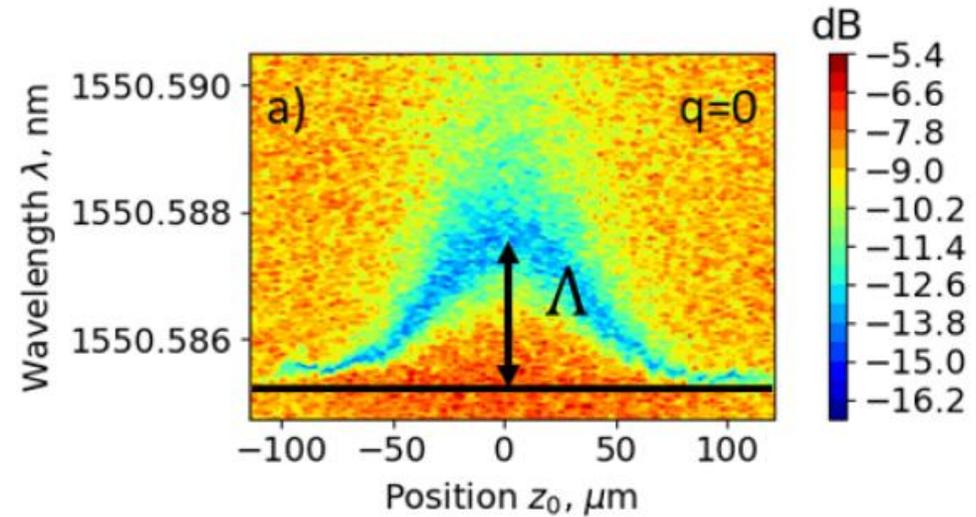
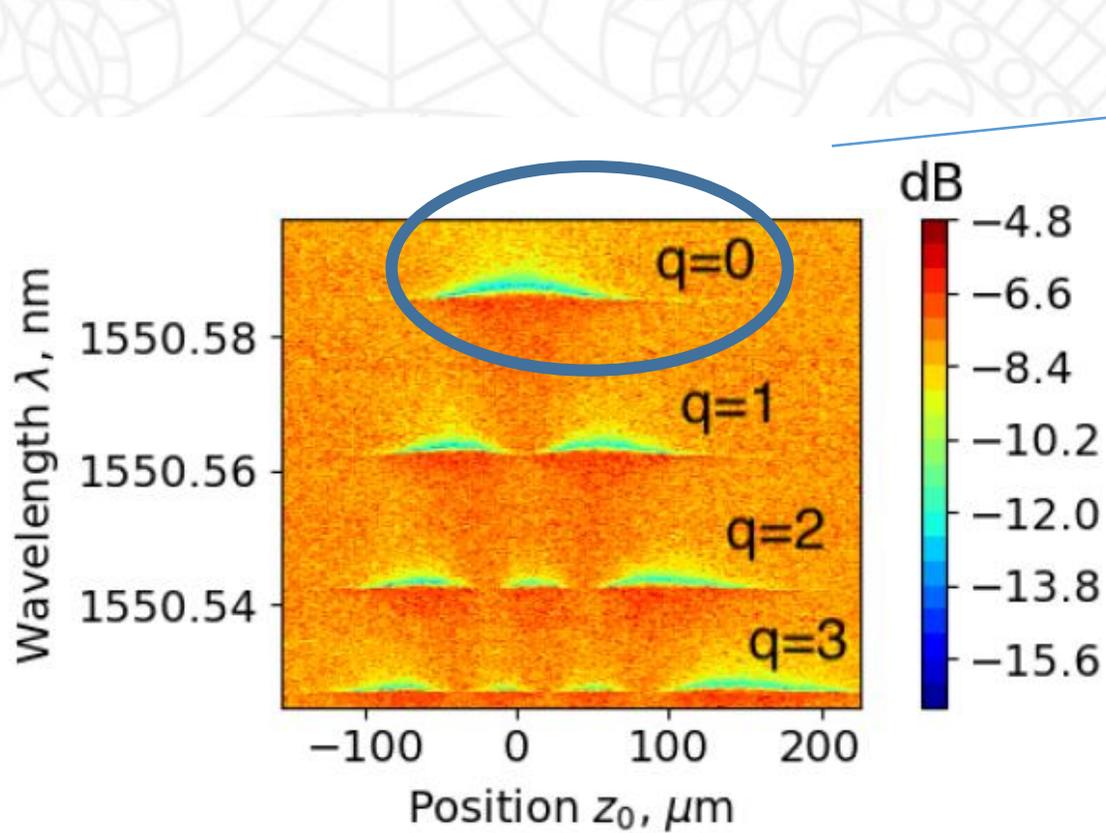


Одномерная квантовая механика на поверхности волокна с источником



Источник испускает волны в обоих направлениях \Rightarrow
при определенных отстройках (аксиальных волновых векторах) –
деструктивная интерференция переотраженных волн

Одномерная квантовая механика на поверхности волокна с ИСТОЧНИКОМ



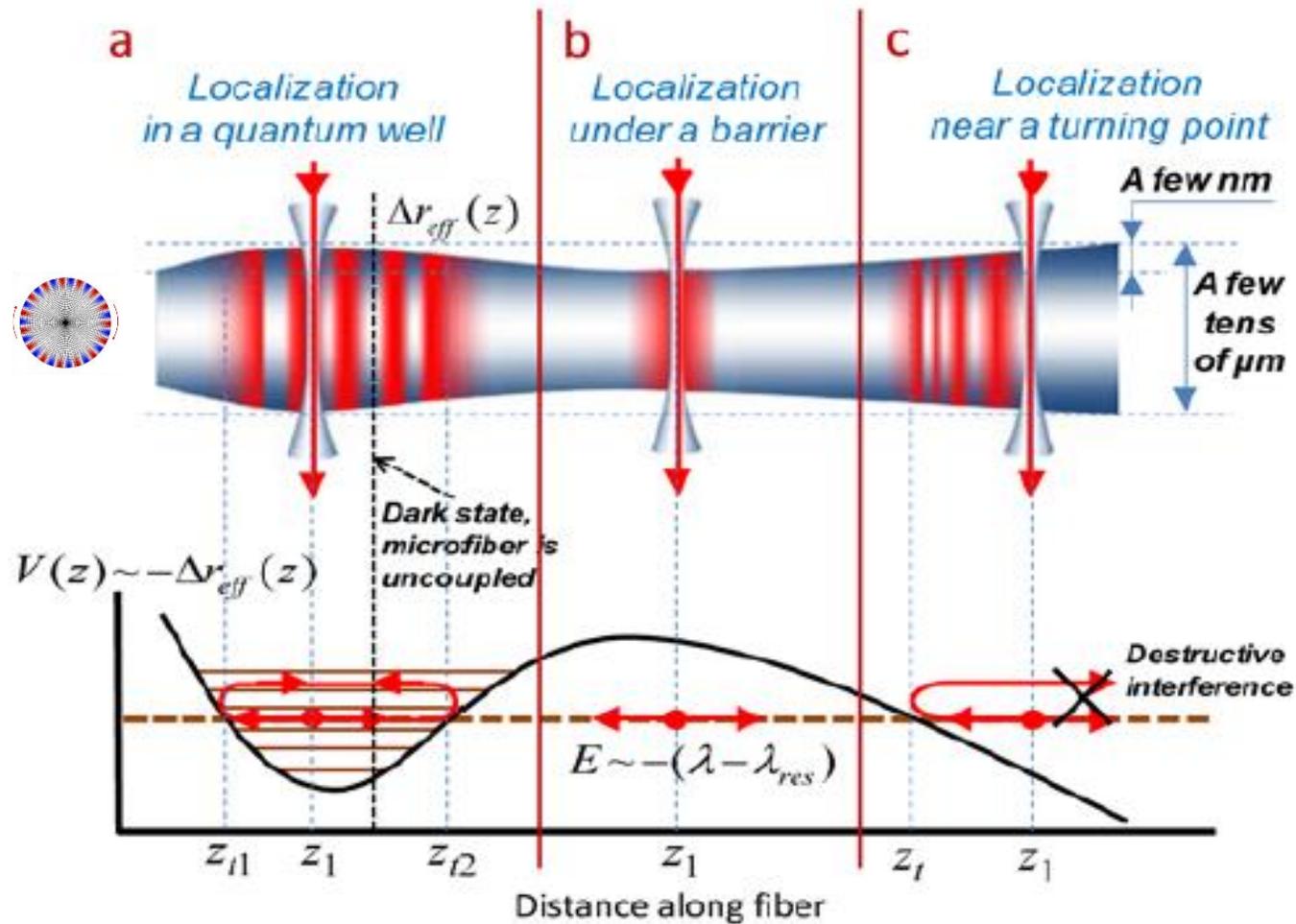
Источник (тейпер) может исказить потенциал

- Локально увеличивается потенциал
- Локально увеличиваются потери

D. L. P. Vitullo, S. Zaki, D. E. Jones, M. Sumetsky, and M. Brodsky, Opt. Express **28**, 25908 (2020).

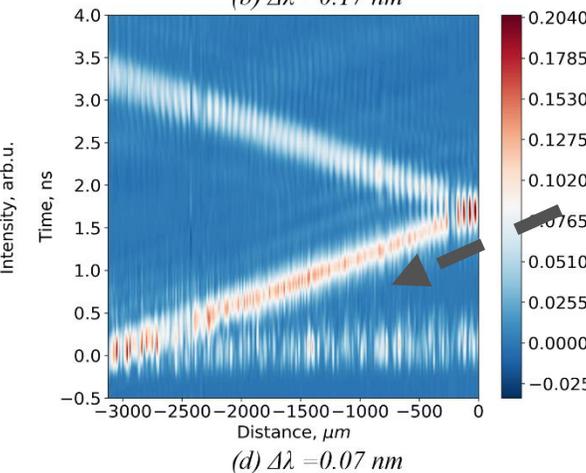
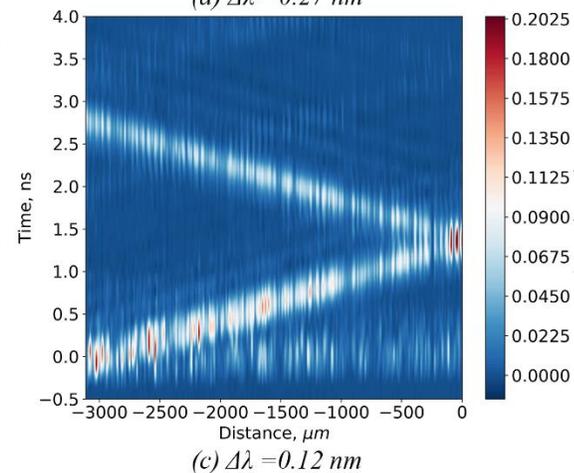
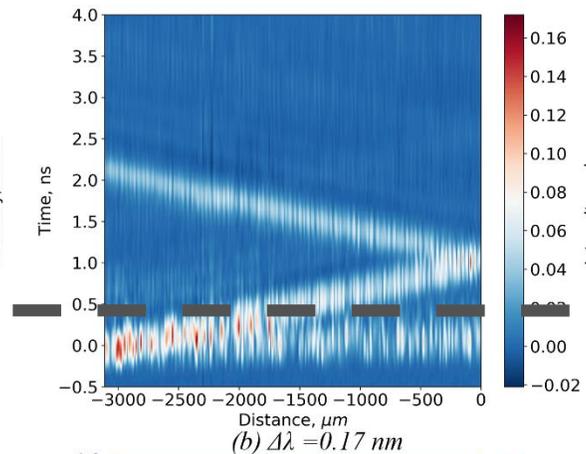
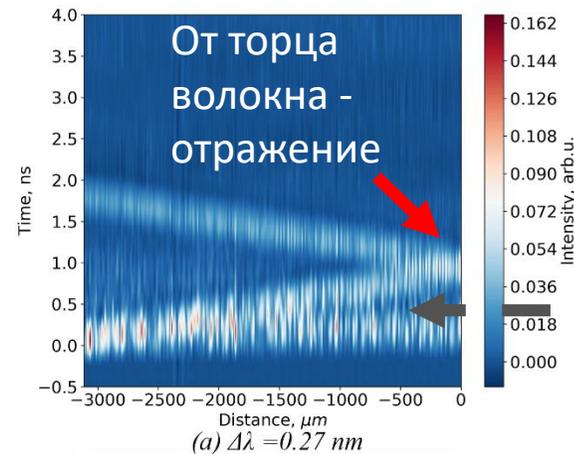
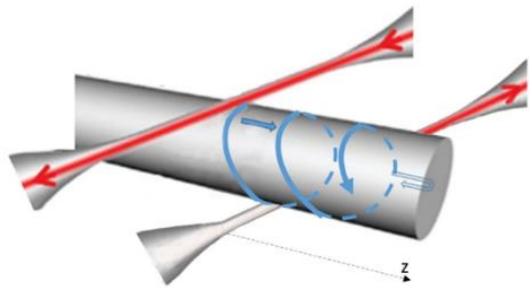
A. Y. Kolesnikova and I. D. Vatnik, PRA. (2023).

Одномерная квантовая механика на поверхности волокна



M. Sumetsky, J.M. Fini "Surface nanoscale axial photonics," Opt. Express **19**(27), 26470 (2011).

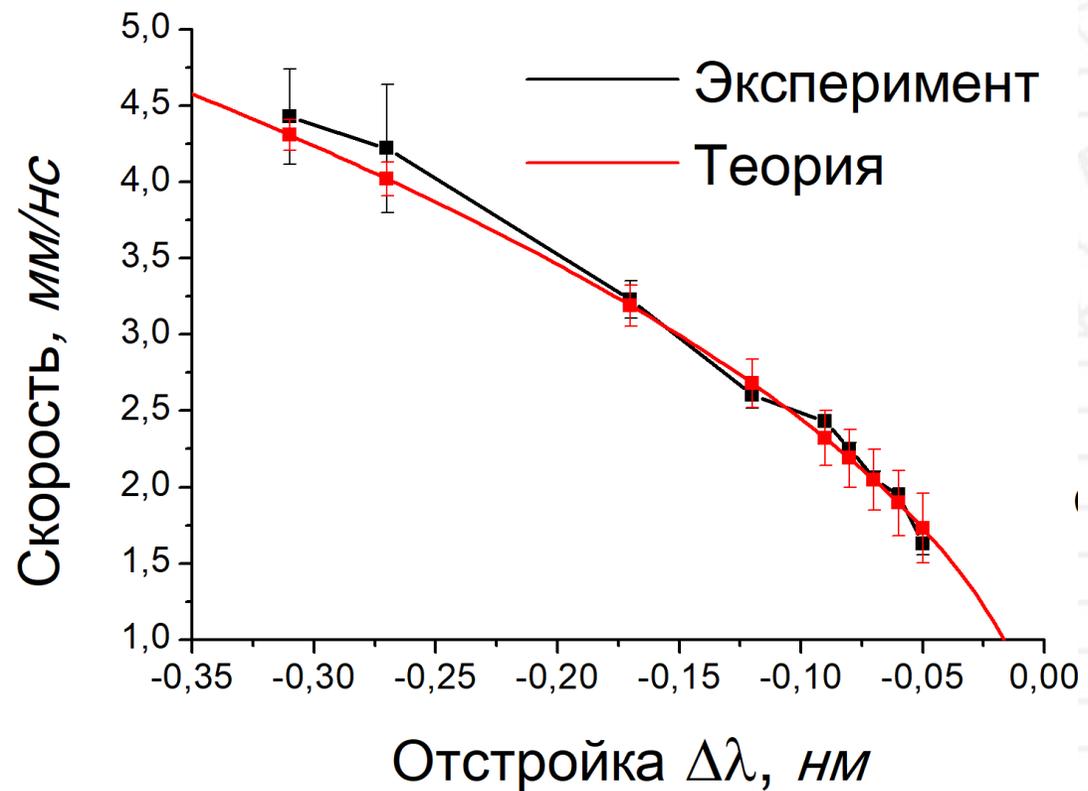
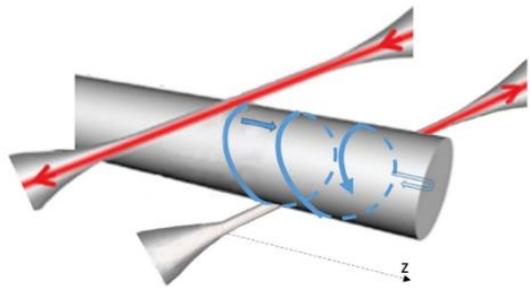
Пример: возбуждение мод непрерывного спектра



- Больше энергия «частицы» - выше скорость

- Меньше «энергия частицы» - ниже скорость

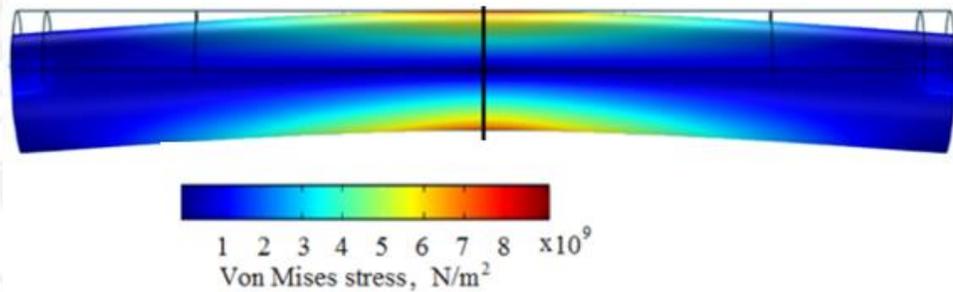
Пример: возбуждение мод непрерывного спектра



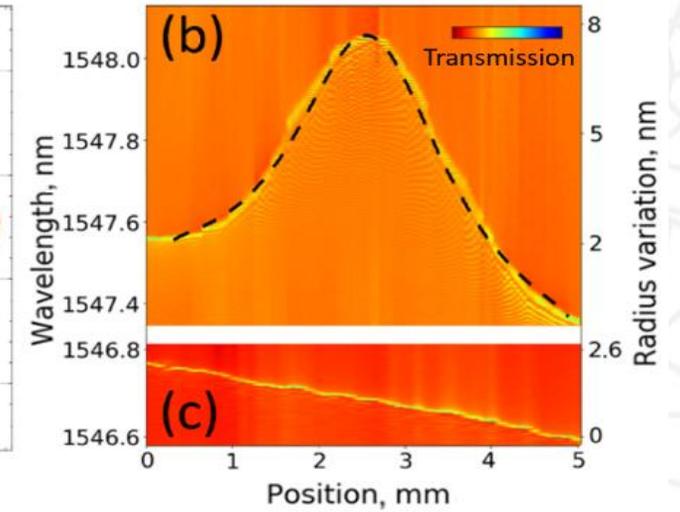
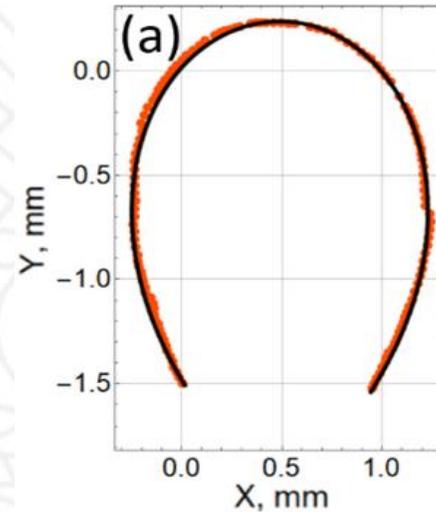
Параболический закон для групповой скорости

$$V_{gr} = \frac{\partial\omega}{\partial\beta_{ax}} = \frac{c}{n} \sqrt{\frac{-2\Delta\lambda}{\lambda_{m,p}}}$$

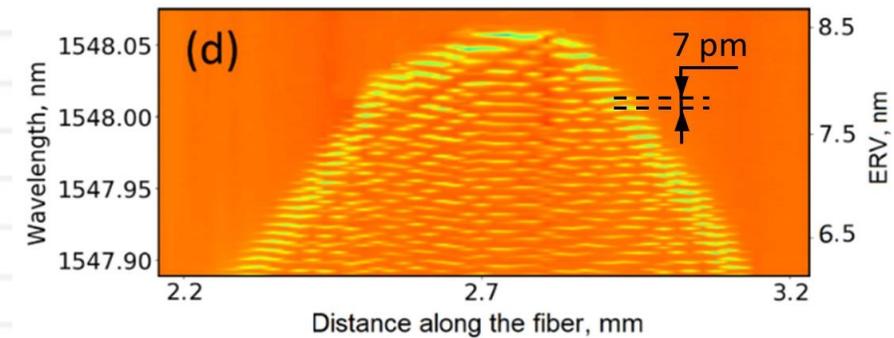
Создание оптического потенциала изгибом



- Изменения показателя преломления из-за фотоупругого эффекта
- Изменение геометрического радиуса

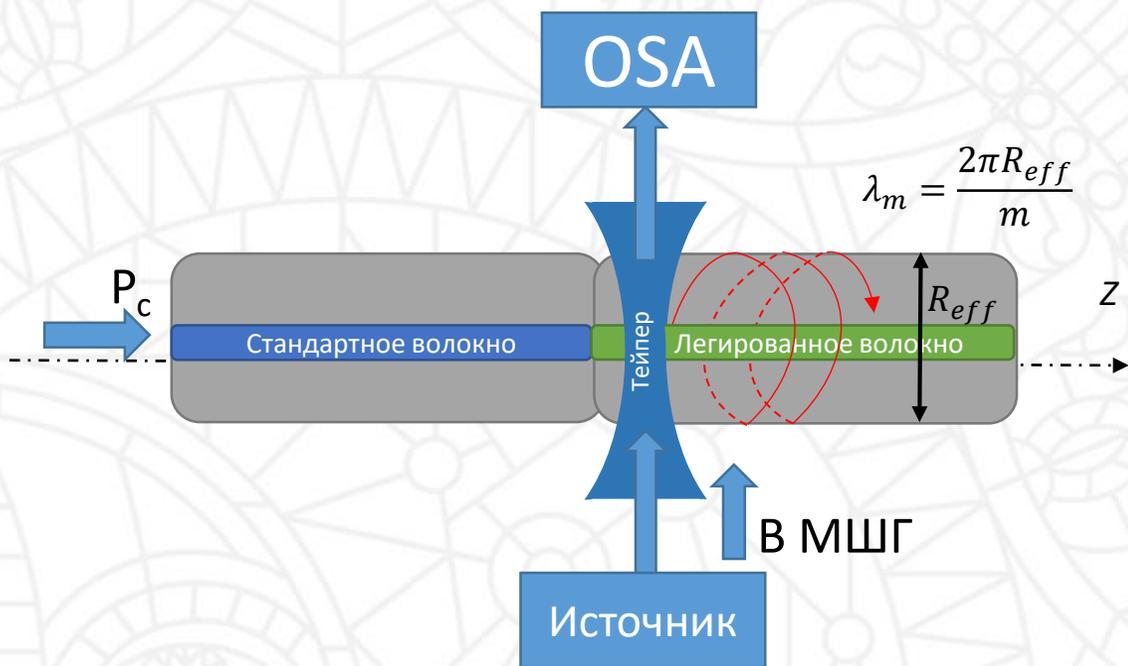


- Изменение эффективного радиуса линейно зависит от локальной кривизны

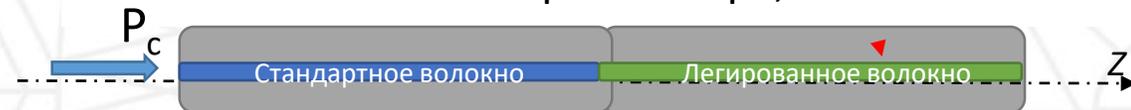
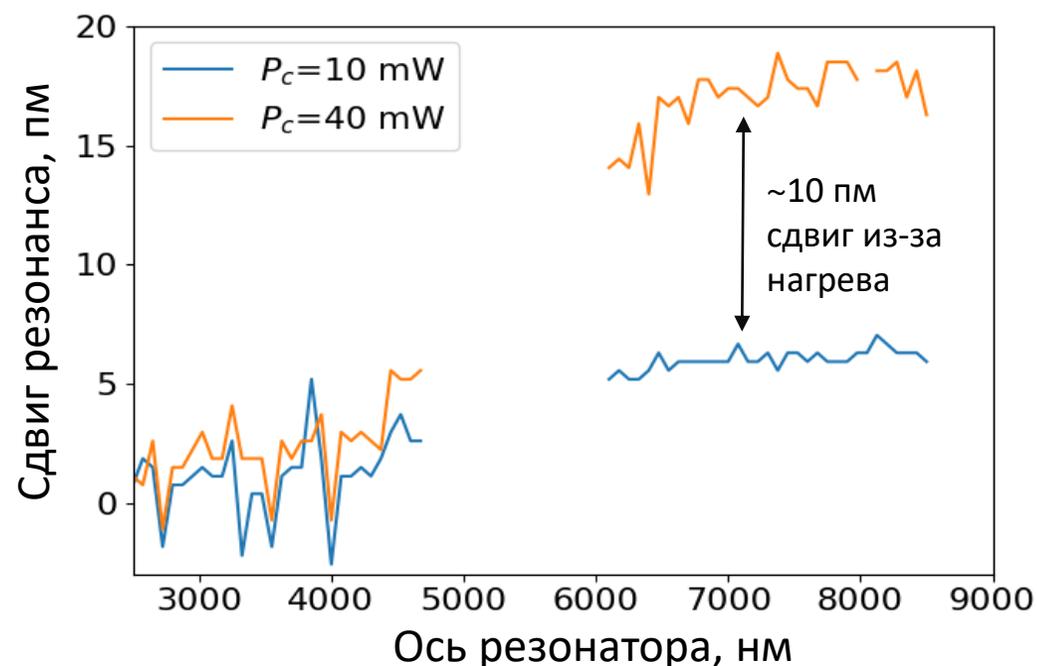


Bochek, D., Toropov, N., Vatnik, I., Churkin, D. V. & Sumetsky, M. SNAP microresonators introduced by strong bending of optical fibers. *Opt. Lett.* **44**, 3218 (2019).

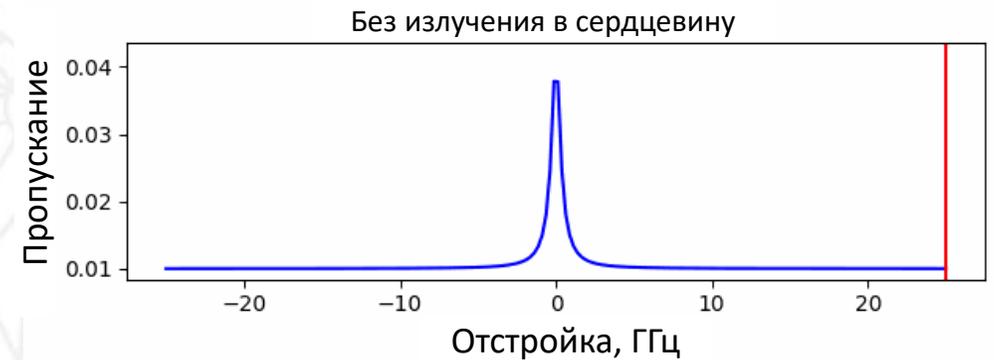
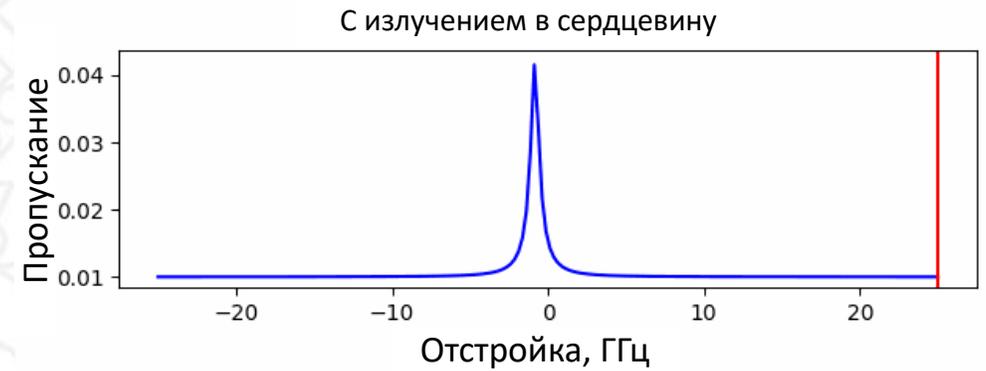
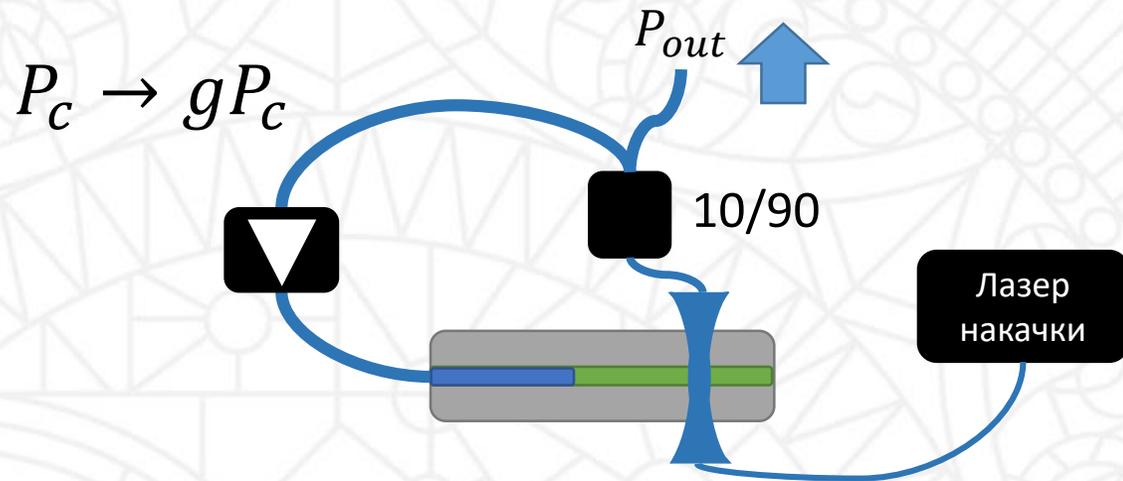
Перестройка излучением в сердцевину волокна



Излучение поглощается в сердцевине -> волокно нагревается -> эффективный радиус увеличивается -> МШГ резонанс сдвигается



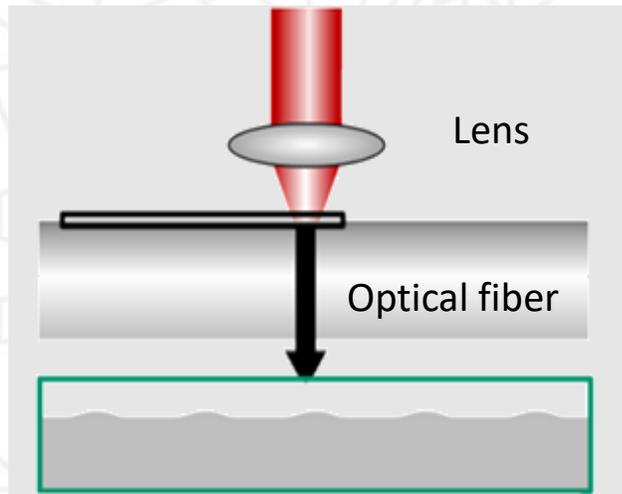
Перестройка излучением в сердцевину волокна: тепловая самостабилизация



- Используется один лазер для накачки в сердцевину и для возбуждения МШГ

Внесение вариаций: нагрев излучением CO₂ лазера

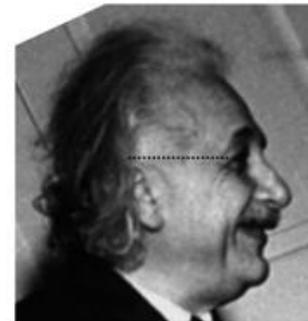
Сфокусированный пучок CO₂ лазера



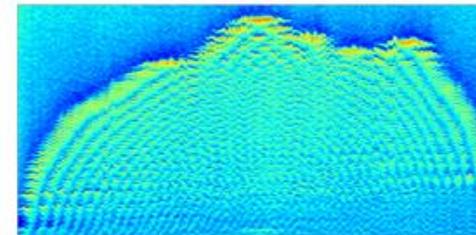
- Релаксация замороженных напряжений приводит к изменению радиуса и показателя преломления
- Вносимые изменения эффективного радиуса до 10 нм

Sumetsky, M. and Dulashko, Y., "SNAP: Fabrication of long coupled microresonator chains with sub-angstrom precision," *Opt. Express* **20**(25), 27896 (2012).

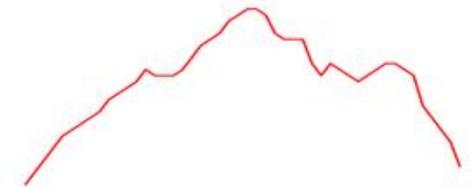
D. V. Krisanov, A. S. Nesterok, and I. D. Vatnik, "Shaping Optical Microresonators on the Surface of Optical Fibers With Negative Effective Radius Variations," *IEEE Photonics J.* **13**, 1–4 (2021).



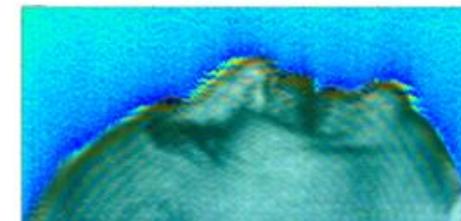
а



в



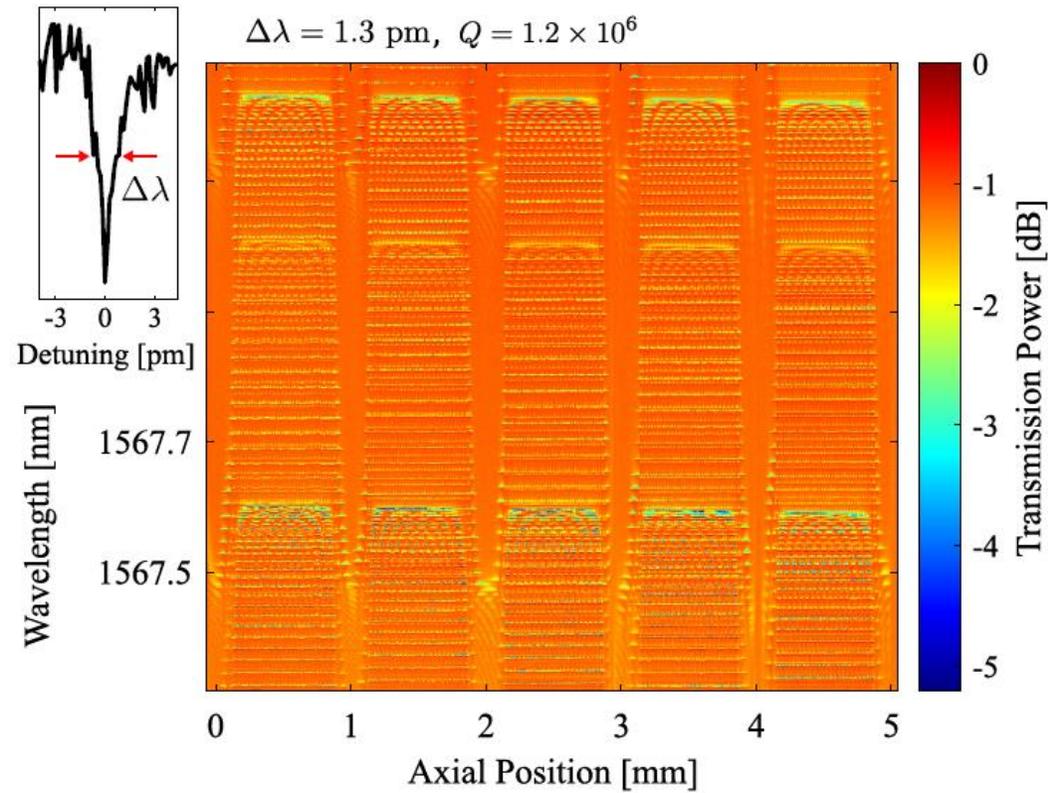
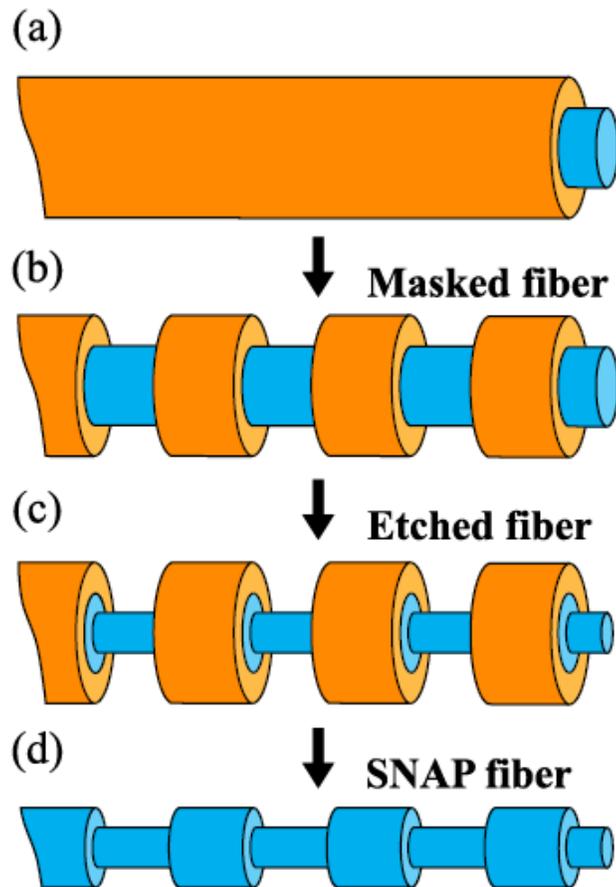
б



г

Контроль эффективного радиуса с точностью до 0,1 нм

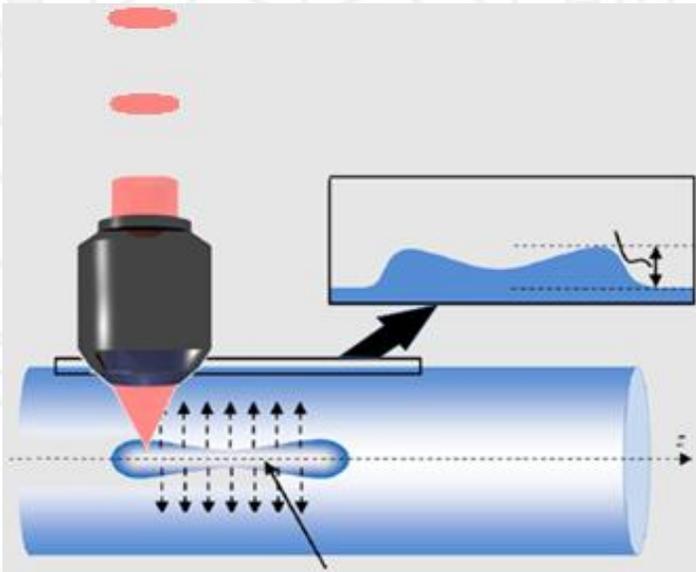
Запись потенциала литографическим методом



- Можно травить глубоко

Другие способы модификации

Фемтосекундные лазерные импульсы

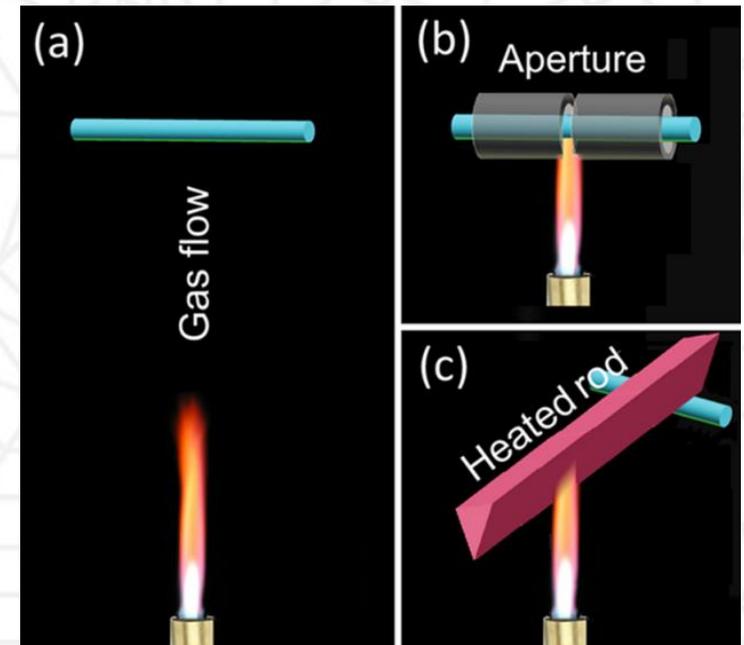


Фемтосекундные импульсы приводят к структурным изменениям в сердцевине волокна. Деформация внутри ⇒ вариации радиуса

Вносимые изменения эффективного радиуса до 50 нм

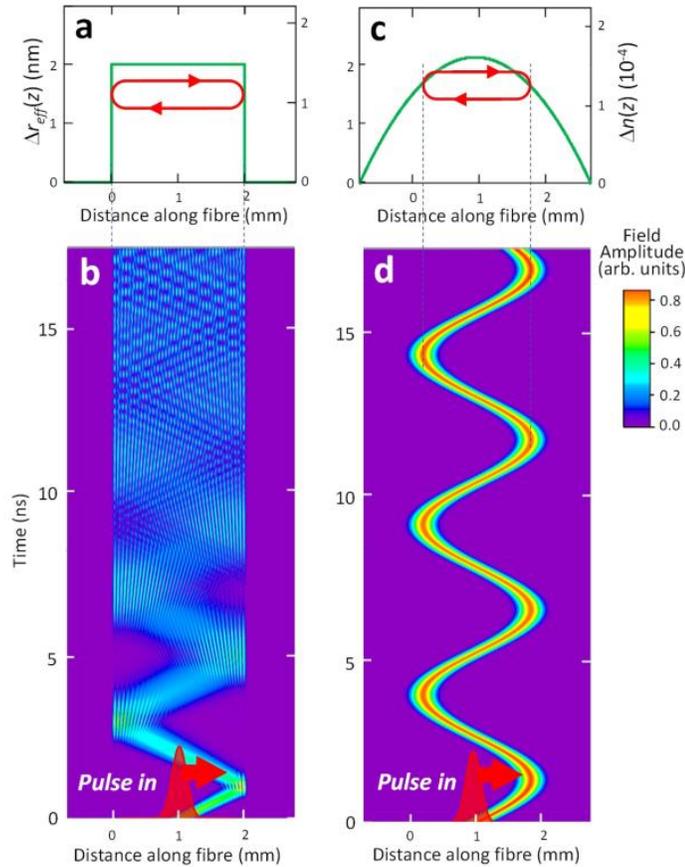
F. Shen et al. "Fabrication of surface nanoscale axial photonics structures with a femtosecond laser," *Opt. Lett.* **41**(12), 2795 (2016).

Пламя или нагрев металлической проволокой

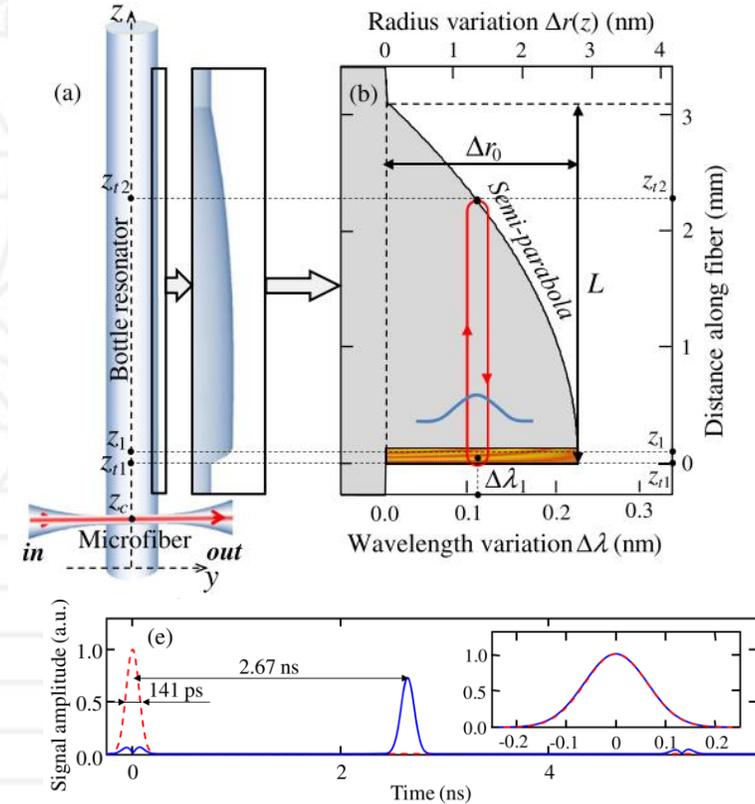


Простой и доступный способ

Применения: линия задержки



- Дисперсия среды определяется вариациями эффективного радиуса
- Бездисперсионный режим для параболической формы потенциала

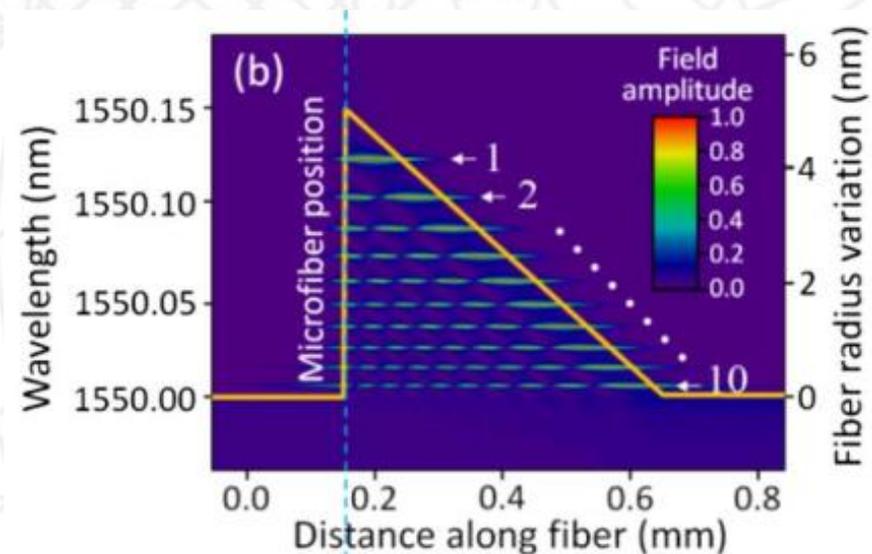
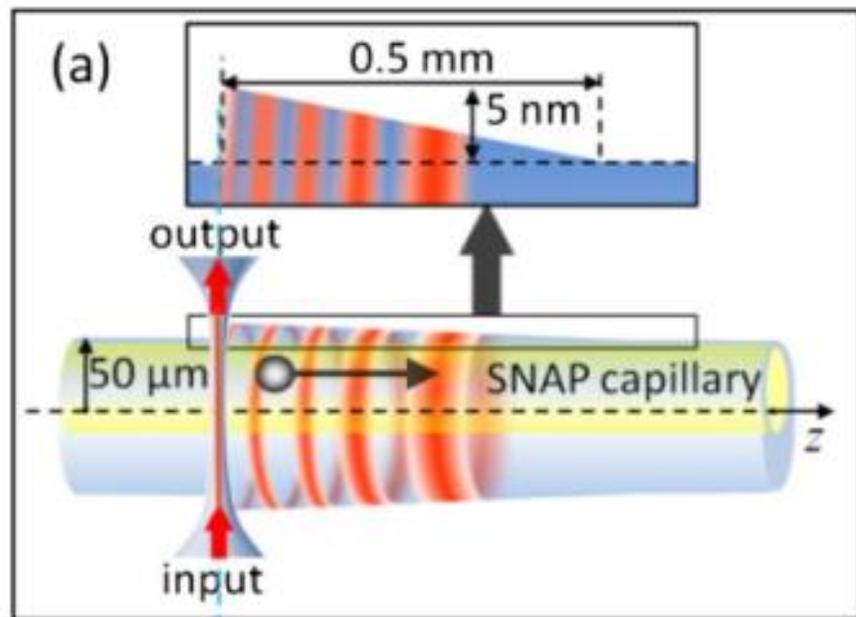


Sumetsky, M., "Microscopic optical buffering in a harmonic potential," *Sci. Rep.* **5**, 18569 (2015).

Sumetsky, M., "Delay of Light in an Optical Bottle Resonator with Nanoscale Radius Variation: Dispersionless, Broadband, and Low Loss," *Phys. Rev. Lett.* **111**(16), 163901 (2013).

Сенсор положения частицы

- Частица возмущает только часть уровней
- Смотрим, какие именно уровни сместились

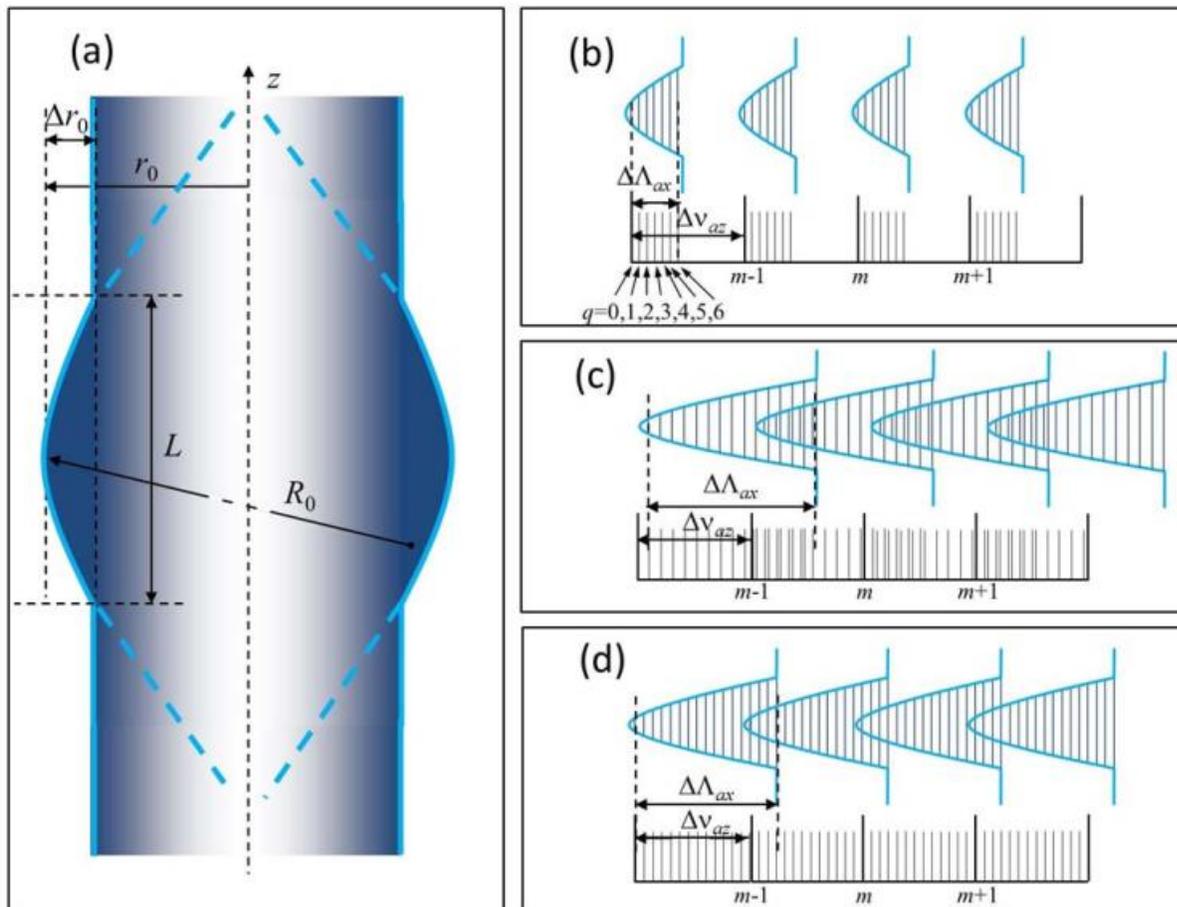


НО: чувствительность невысокая, только для крупных частиц.

Sumetsky, M., "Slow light optofluidics: a proposal," *Opt. Lett.* **39**(19), 5578 (2014).

A. Y. Kolesnikova, D. V. Kudashkin, I. D. Vatnik, and D. V. Churkin, «Single-particle sensing capabilities of cylindrical microresonators based on optical fibers» (SPIE, 2021)

Генерация оптических комбов



- Между аксиальными модами – малая частотная отстройка \Rightarrow низкочастотная оптическая гребенка (~ 100 МГц)
- Потенциально - синхронизация семейств разных аксиальных мод

Dvoyrin, V. V. & Sumetsky, M. Bottle microresonator broadband and low-repetition-rate frequency comb generator. *Opt. Lett.* **41**, 5547 (2016).

Генерация оптических комбов - модель

$$E(\vec{r}, t) = \sum_{m,n} A_{m,p}(z, t) \exp(i\omega_{m,p}t) e_{m,p}(r, \varphi) + c.c. \quad - \text{ поле мод шепчущей галереи}$$

$$e_{m,p}(r, \varphi) = A_i(-2m^2)^{1/3}(r-r_0)/r_0 + \alpha_p e^{im\varphi}$$

m - азимутальное квантовое число
 $p = 1$ - радиальное квантовое число

Из уравнений Максвелла получена система уравнений динамики азимутальных мод :

$$i \frac{\partial A_m}{\partial t} - \frac{\omega_m}{2\beta_m^2 K_m} \frac{\partial^2 A_m}{\partial z^2} - \frac{\omega_m}{K_m} \frac{\Delta r_{eff}(z)}{r_0} A_m + i\Gamma A_m - \frac{3\omega_m \chi^{(3)}}{K_m 2n_m^2 S_m^{(eff)}} F_m(\vec{A}) + D_m f_p(z) A_m = C_m f_p(z) e^{i\Delta\omega_p t}$$

↑
Дифракция

↑
Потенциал

↑
Потери в резонаторе

↑
Нелинейность

↑
Потери на элементе связи

↑
Источник

$$F_i(\vec{A}) = (V_{iiii}|A_i|^2 + 2 \sum_{j \neq i} V_{jjii}|A_j|^2) A_i + \frac{(\omega_i + \Delta\omega_{ijkl})^2}{\omega_i^2} \sum_{\substack{j \neq i \\ k \neq i}} V_{ijkl} A_j A_k A_l^* e^{i(\Delta\omega_{ijkl})t}$$

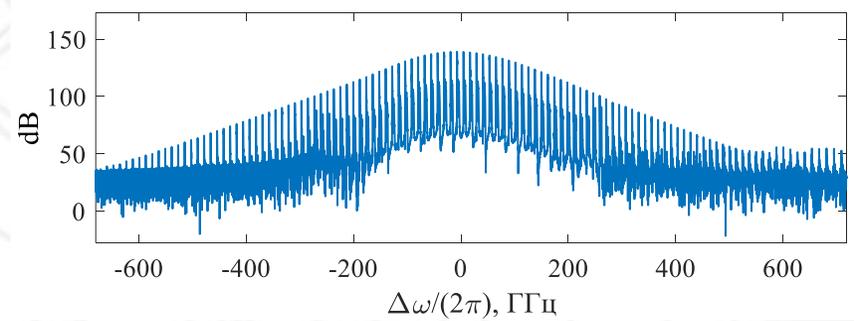
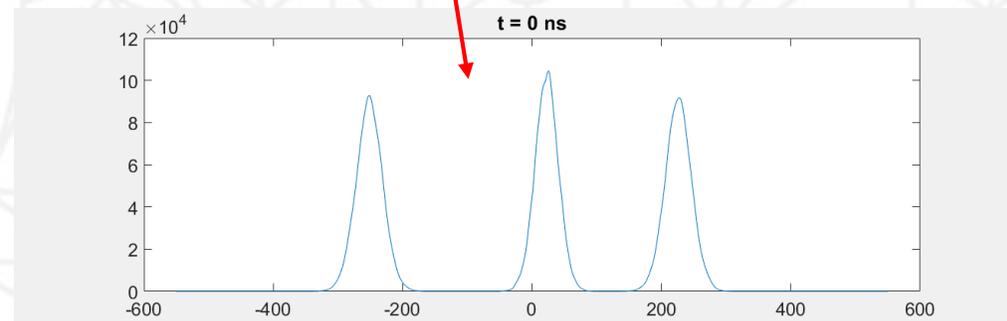
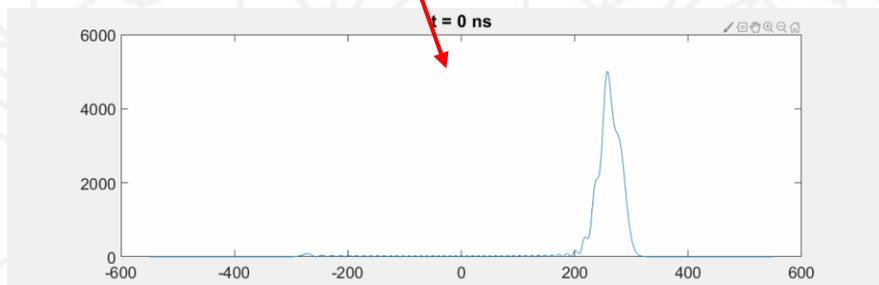
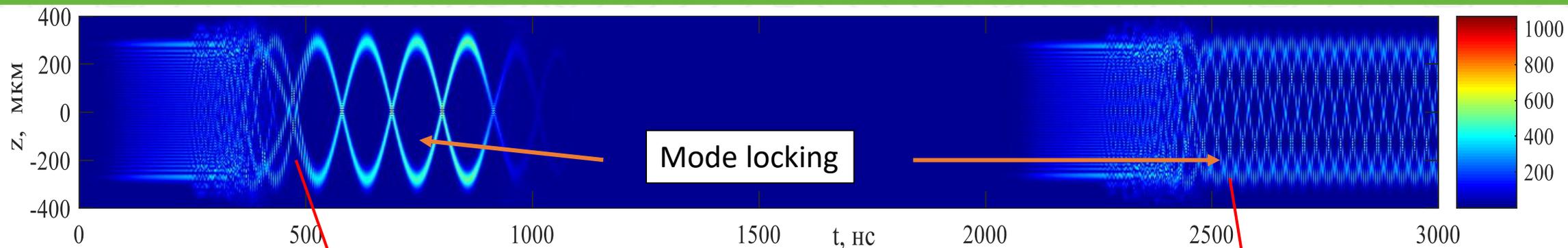
↑
Самомодуляция

↑
Кросс-модуляция

↑
Четырехволновое взаимодействие

A. Y. Kolesnikova and I. D. Vatnik, PRA (2023).

Генерация оптических комбов - модель



- Частота повторения 12 ГГц – удвоенная ОСД
- Длительность импульса - 10 пс

A. Y. Kolesnikova, S. V. Suchkov, and I. D. Vatnik, Opt. Express **30**, 10588 (2022).

Нелинейная генерация – управление порогами

- Минимальный порог для наблюдения нелинейных эффектов:

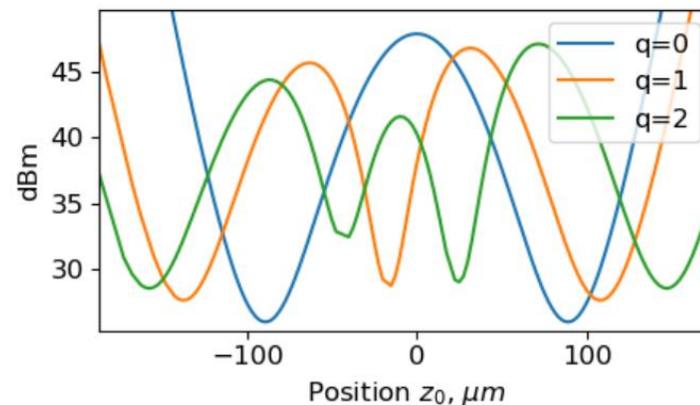
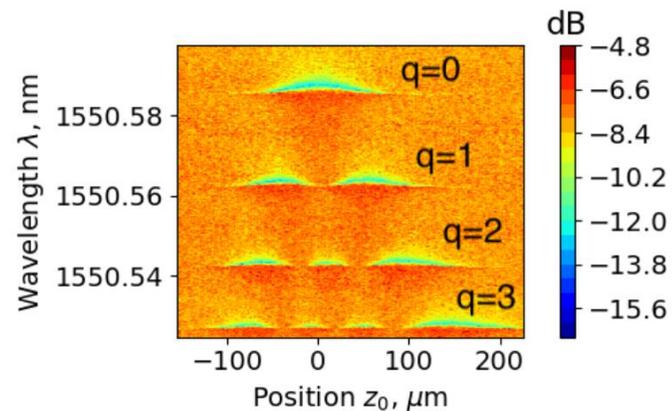
Макс. мощность в резонаторе, т.е.

Сила связи $\delta_c \sim$ собственные потери δ_0

Можно управлять δ_c и δ_0 (и уменьшать порог), передвигая тейпер **вдоль** моды.

Но пороги не маленькие: ~ 100 мВт для кварцевых волокон

A. Y. Kolesnikova and I. D. Vatnik, PRA (2023).



Порог для разных мод в зависимости от точки касания

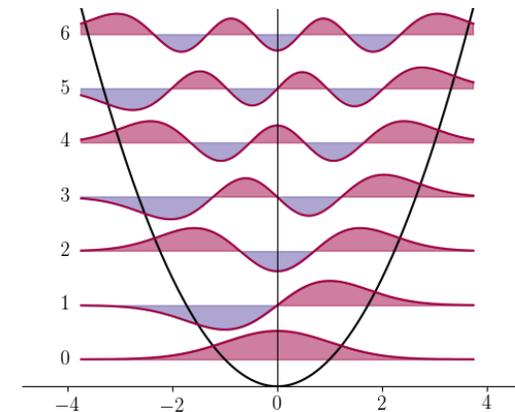
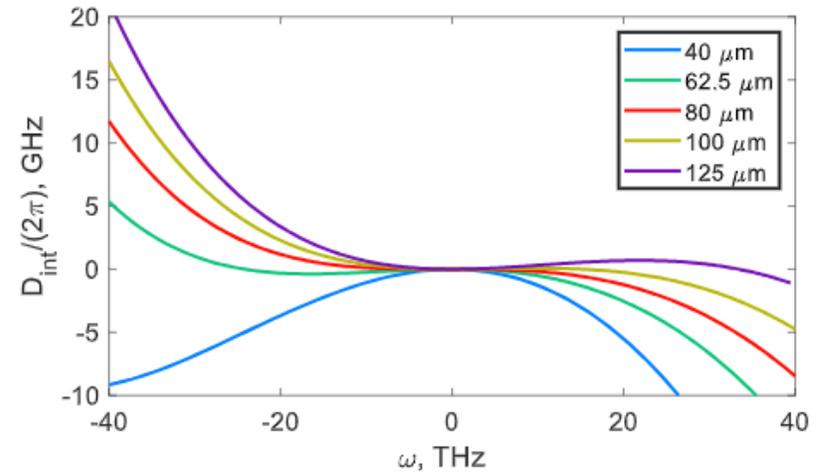
Нелинейная генерация – управление дисперсией

- Азимутальная дисперсия для мод на стандартном волокне $\rightarrow -0$.

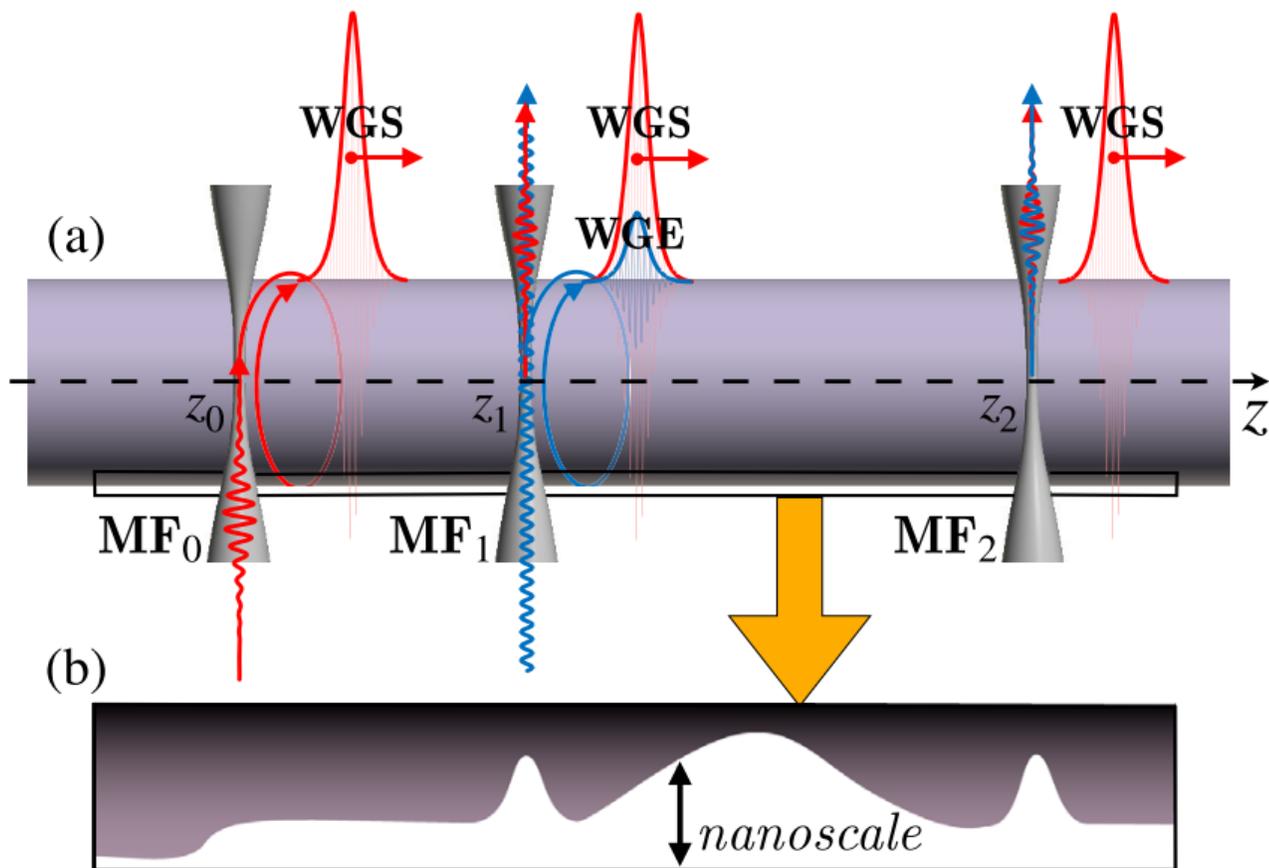
Увеличение диаметра до 80 мкм \rightarrow нужная нам аномальная дисперсия

- Для аксиальных мод – дисперсия определяется потенциалом.

Но:
а) Разные аксиальные моды перекрываются плохо
б) Разные аксиальные моды по-разному нагружены тейпером
 \Rightarrow Нужна определенная величина аномальной дисперсии



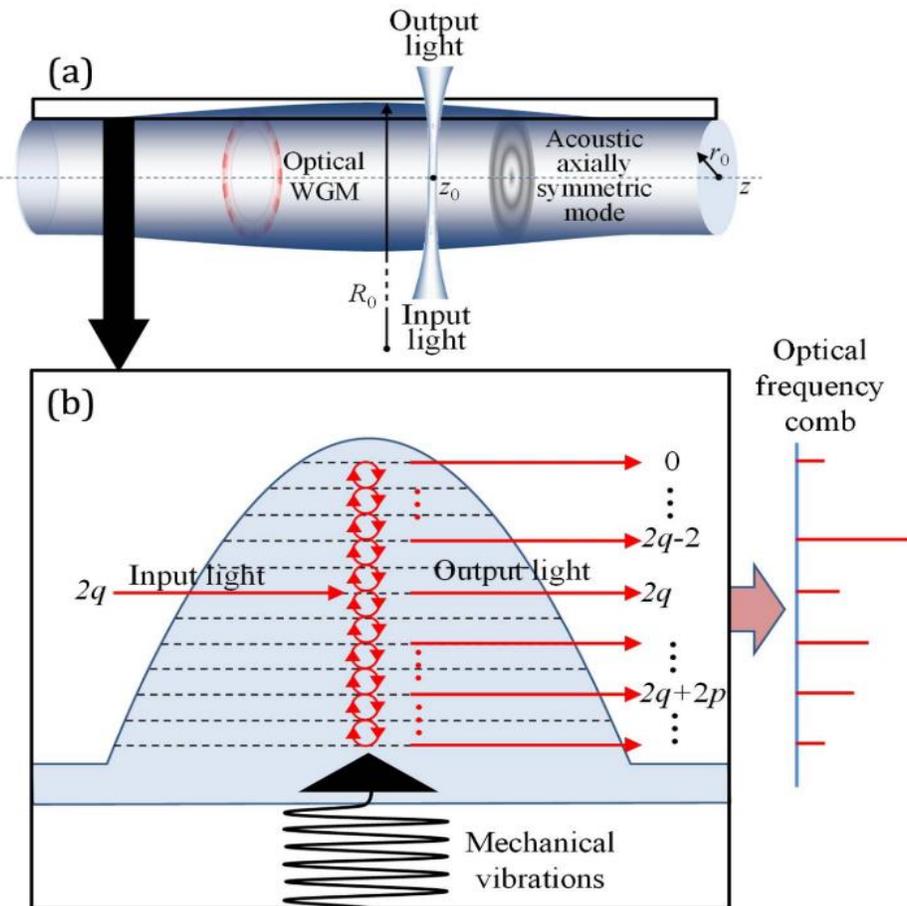
«Оптический грузовичок»



Свет «везет» свет

Crespo-Ballesteros, M. & Sumetsky, M. Controlled Transportation of Light by Light at the Microscale. *Phys. Rev. Lett.* **126**, 153901 (2021).

Параметрически генерируемые комбы

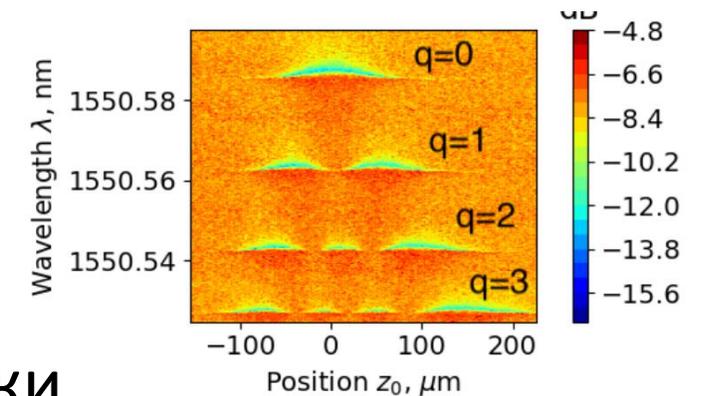
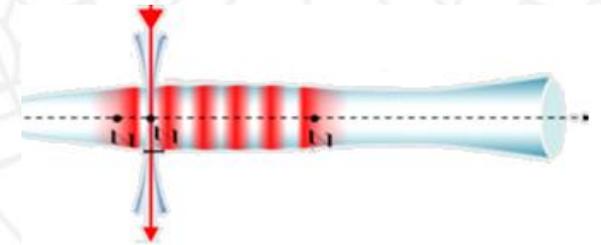


Гармонически возмущаемый потенциал \Rightarrow перенос энергии между модами

1. Sumetsky, M. Optical frequency combs generated mechanically. *Opt. Lett.* **42**, 3197 (2017).
1. Crespo-Ballesteros, M., Matsko, A. B. & Sumetsky, M. Optimized frequency comb spectrum of parametrically modulated bottle microresonators. *Commun. Phys.* **6**, 52 (2023).

Заключение

- На поверхности оболочки оптического волокна существуют высокодобротные моды шепчущей галереи ($Q > 10^7$)
- Малые изменения радиуса – существенное изменение динамики мод
- Среди возможные применений – линии задержки, низкочастотные оптические гребенки, биосенсоры



Спасибо за внимание!