

«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. Клотц, 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**

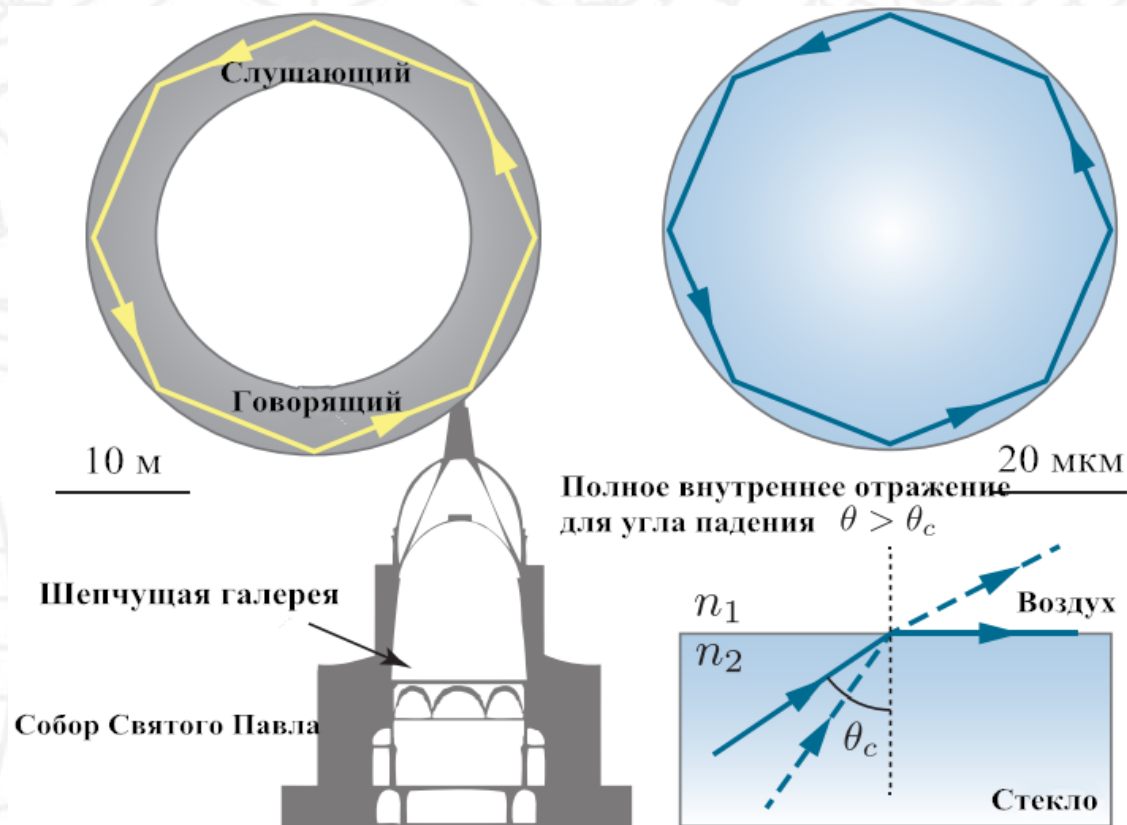


## \* Содержание

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



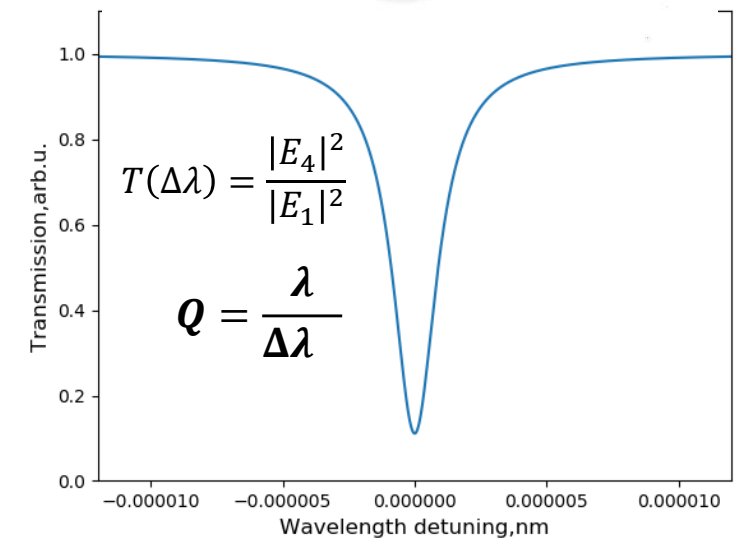
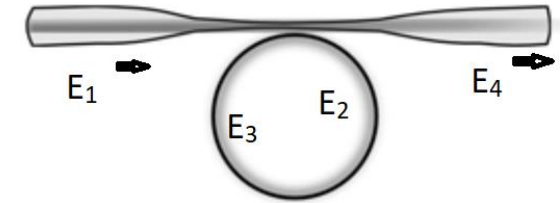
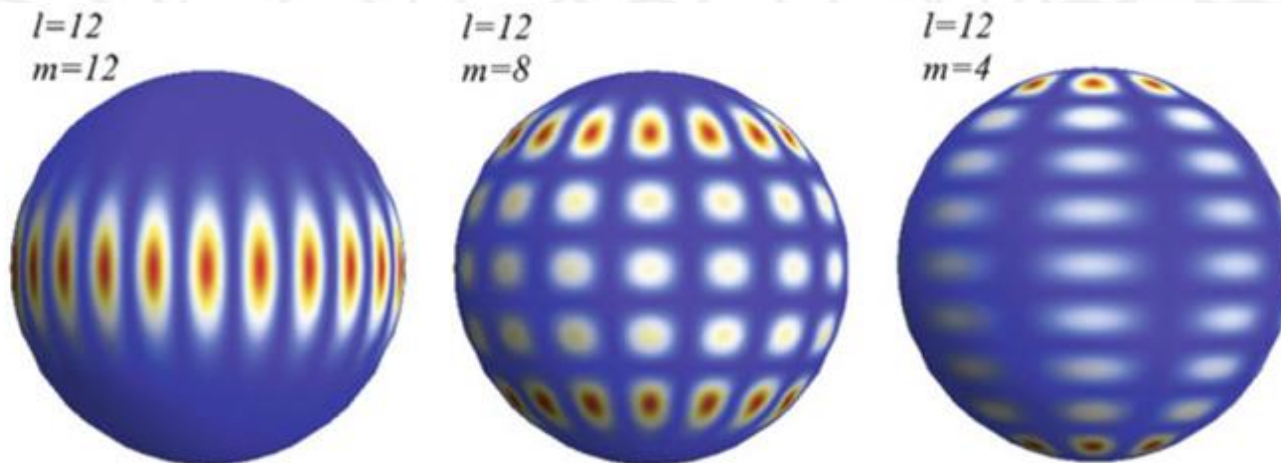
1. Rayleigh, Lord. The problem of the whispering gallery. *Philos. Mag.* 20, (1910).
2. R. D. Richtmyer, "Dielectric Resonators," *J. Appl. Phys.* 10, 391–398 (1939).
3. Garrett, C. G. B., Kaiser, W. & Bond, W. L. Stimulated emission into optical whispering modes of spheres. *Phys. Rev.* 124, 1807–1809 (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

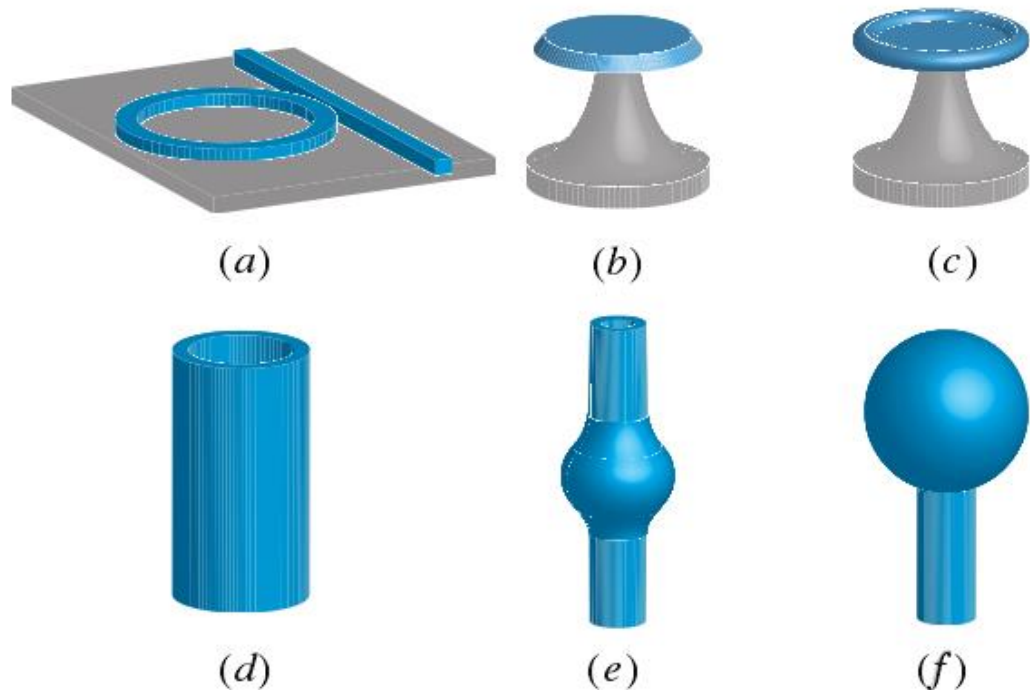
$$\lambda_m = \frac{2\pi r n}{m} \quad m - \text{азимутальное число}$$

- 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

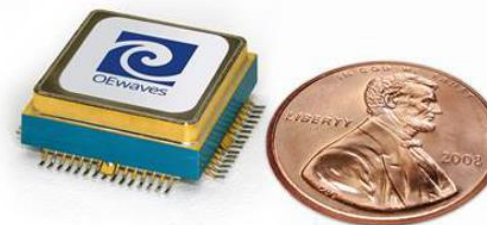
- сотни  $\text{мкм}^3$

## 2) Высокая добротность

- Кварцевые сферы – до  $10^{10}$  (@0.85  $\text{мкм}$ )
- Кристаллические диски ( $\text{CaF}_2$ ) – до  $10^{11}$  (@1.55  $\text{мкм}$ )

## Великое разнообразие применений :

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



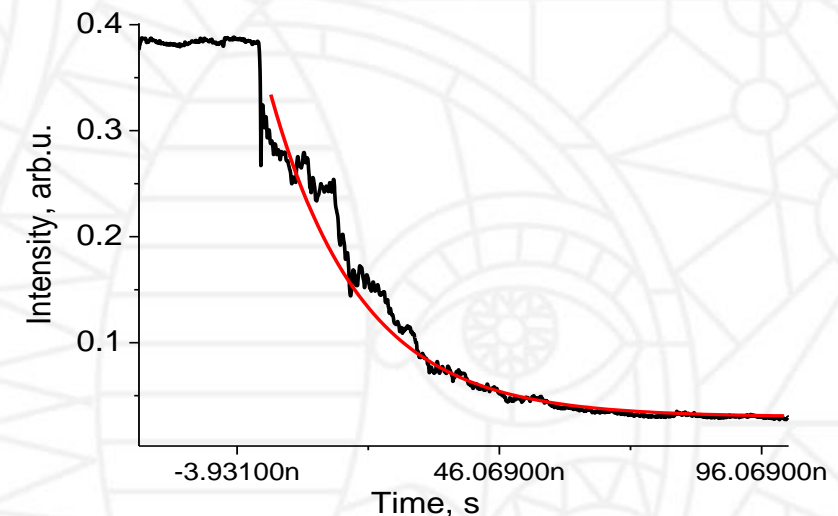
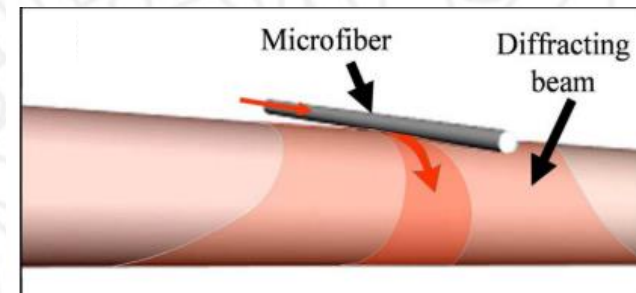
## Моды шепчущей галереи на волокне

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

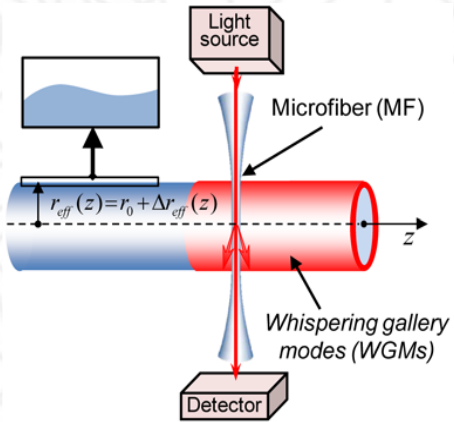
Sychugov, V. A., Torchigin, V. P. & Tsvetkov, M. Y. Whispering-gallery waves in optical fibres. *Quantum Electron.* 32, 738–742 (2002).

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

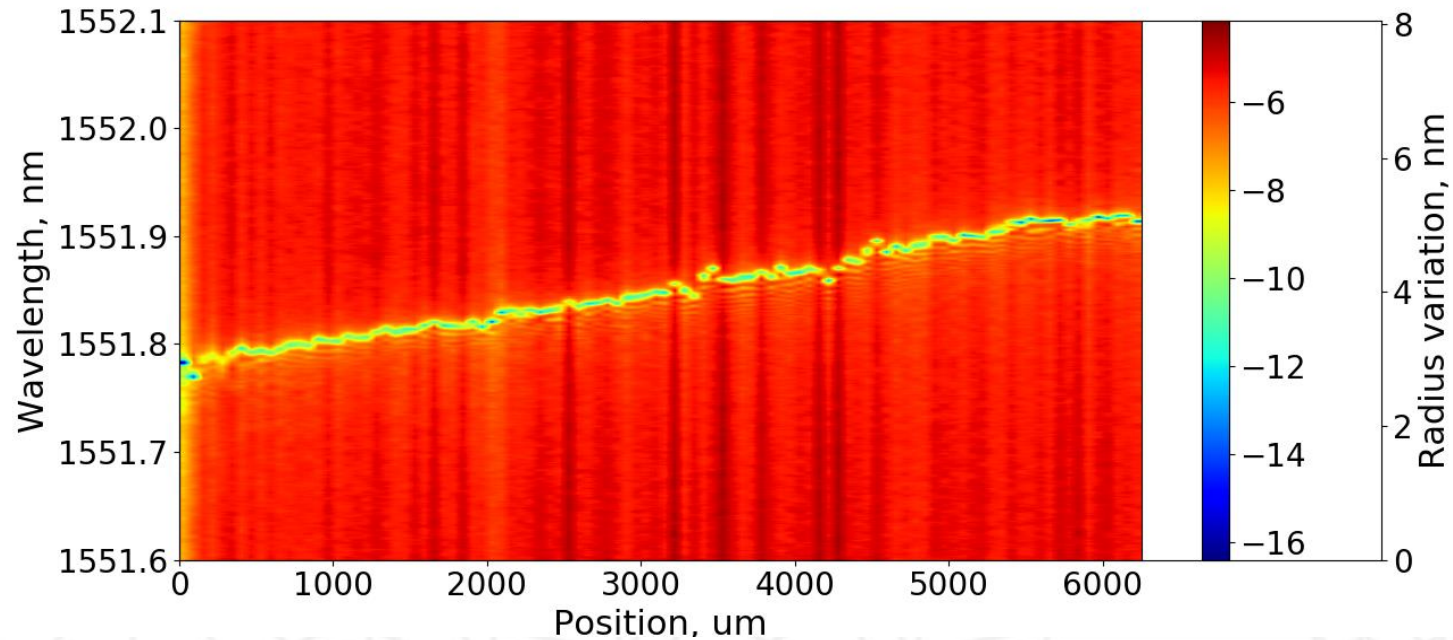
- $m=300-400$  (при диаметре кварцевой оболочки волокна 125 мкм).
- Добротность –  $10^7-8$  (@ 1550 нм)
  - Ширина резонанса  $\sim 10$  МГц (0.1 пм)
  - время жизни моды  $\sim 50$  нс



# 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

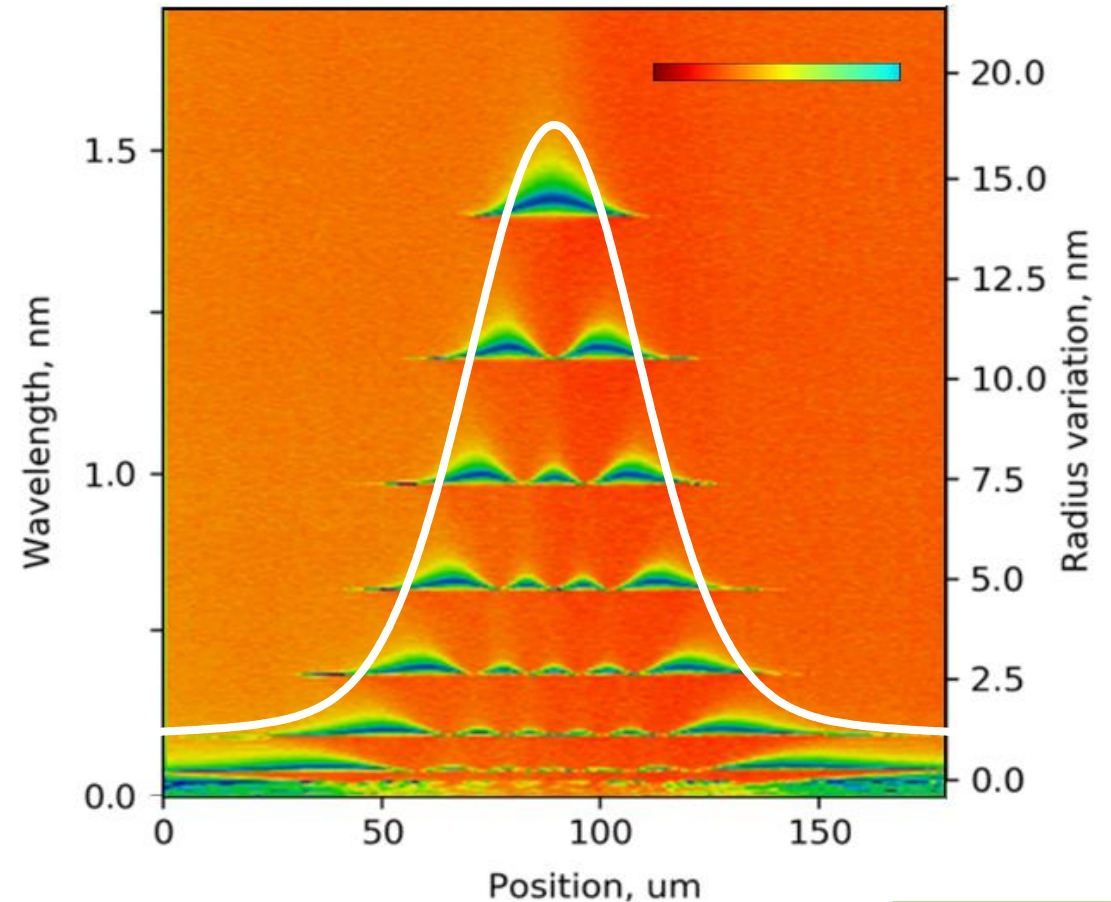
$$\frac{\partial^2 A_m(z, \omega)}{\partial z^2} + V_m(z) A_m(z, \omega) = E_m A_m(z, \omega).$$

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

Потенциал, определяющийся  
вариацией радиуса

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

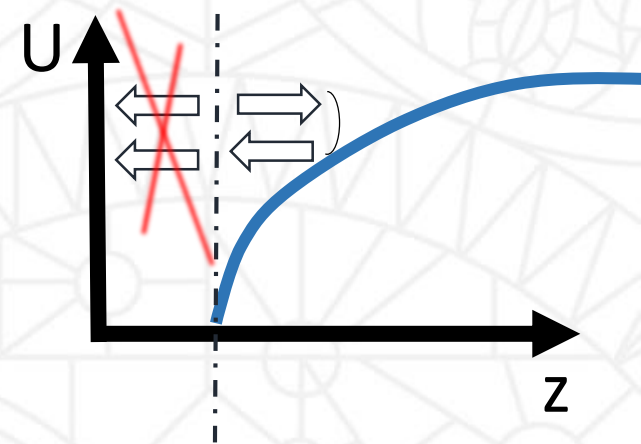
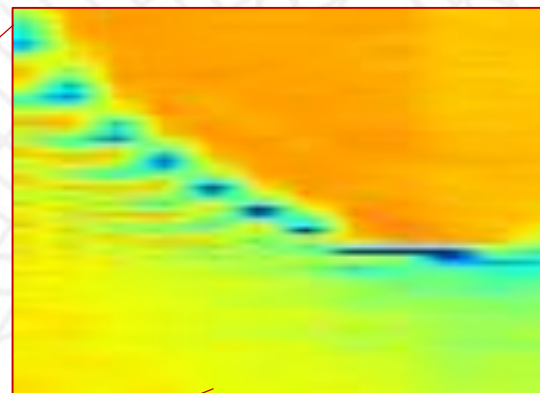
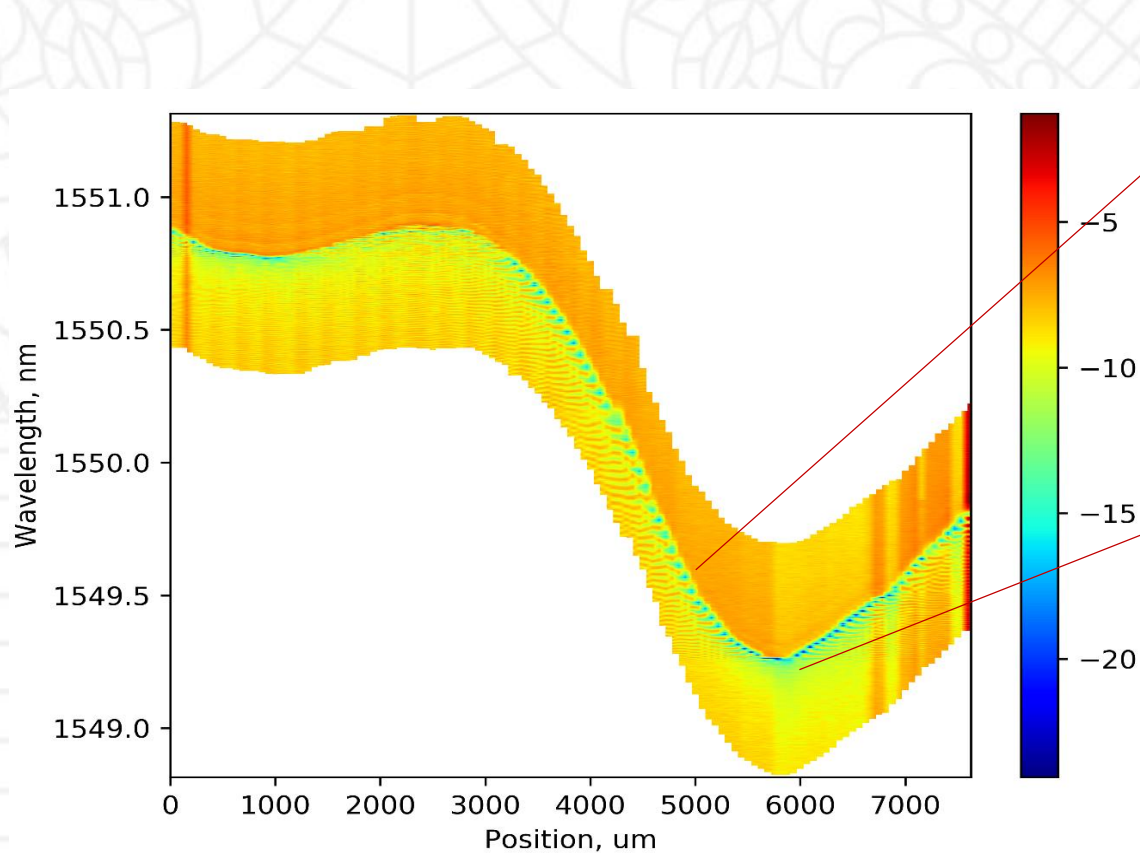
$\omega_m$  – частота резонанса МШГ для  
идеального цилиндра,  
 $\Delta \omega_m$  - частоты резонансов для  
заданной вариации радиуса



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

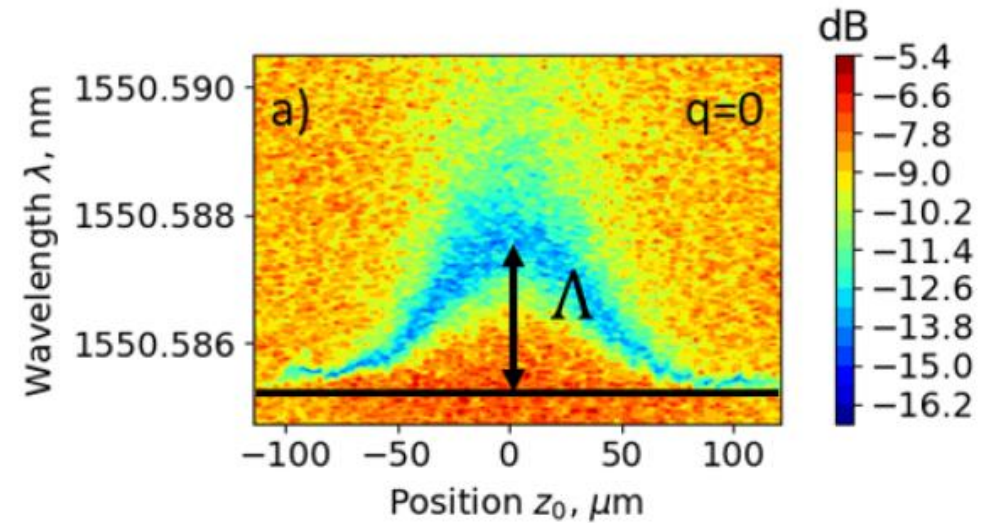
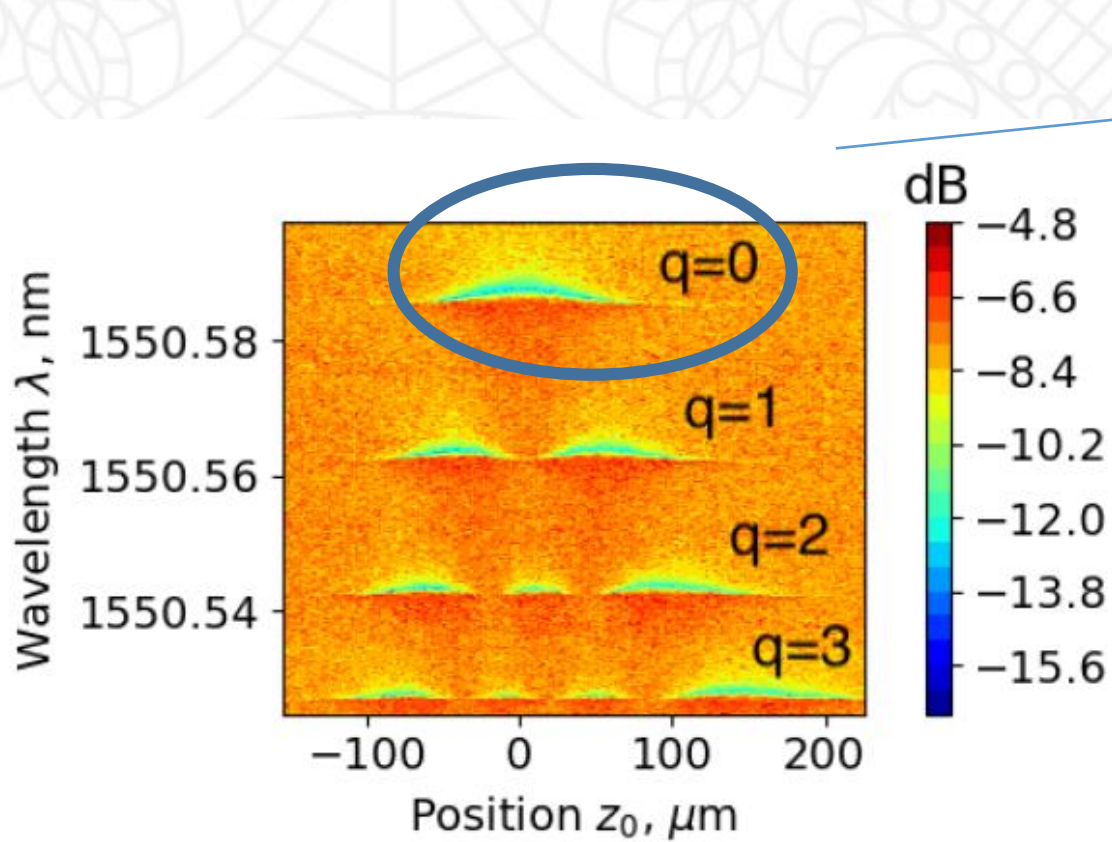


# Одномерная квантовая механика на поверхности волокна с источником



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



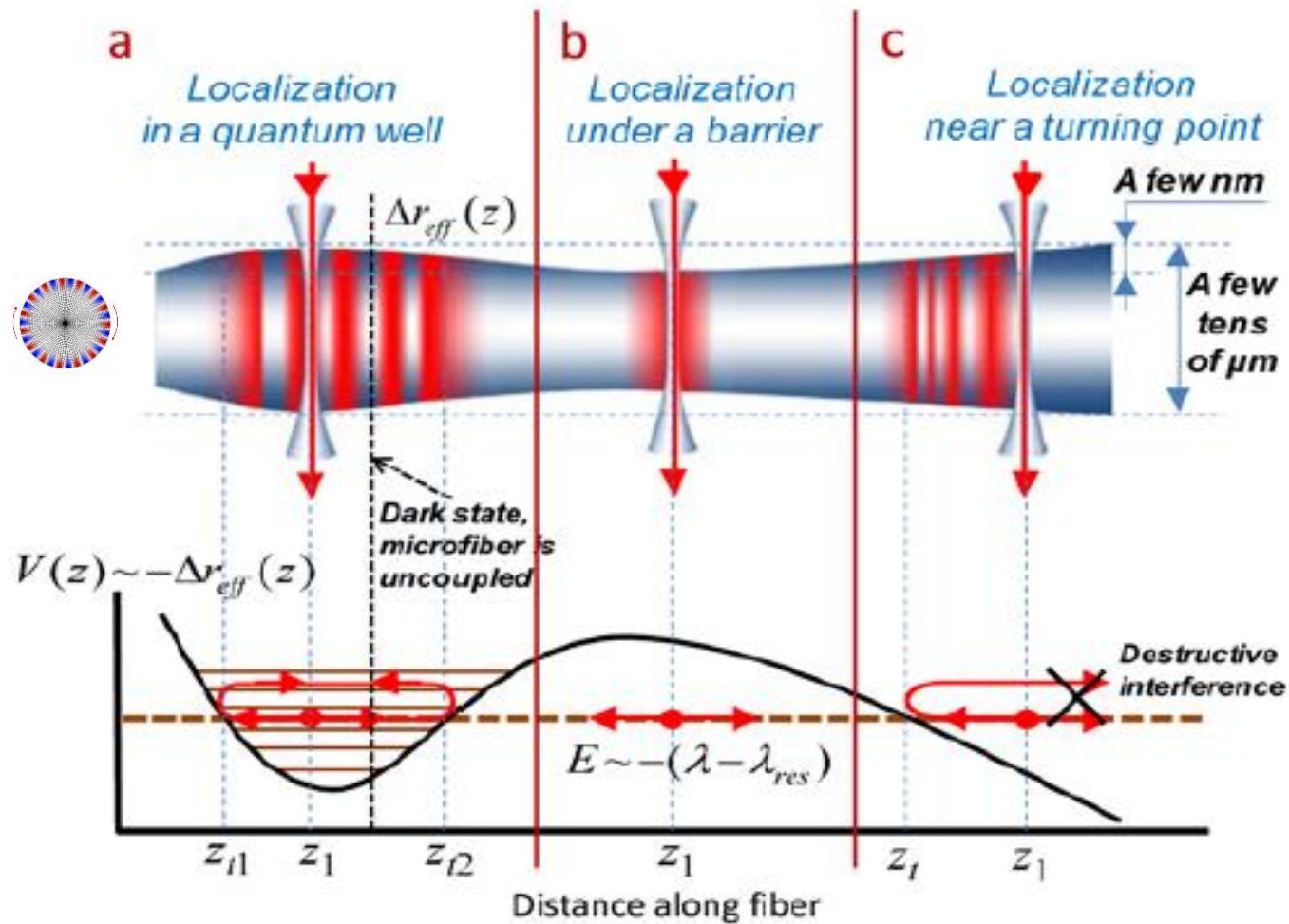
Источник (тейпер) может исказить потенциал

- 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).

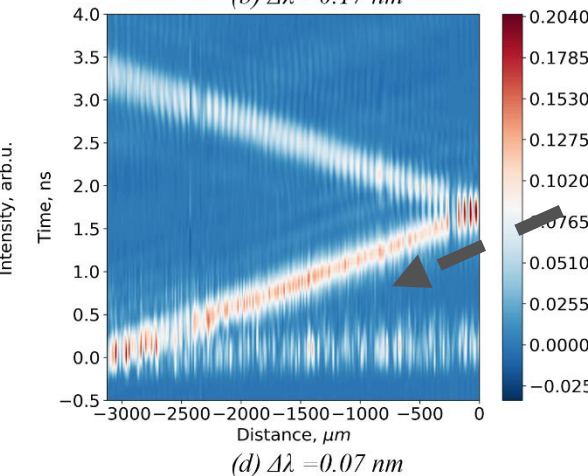
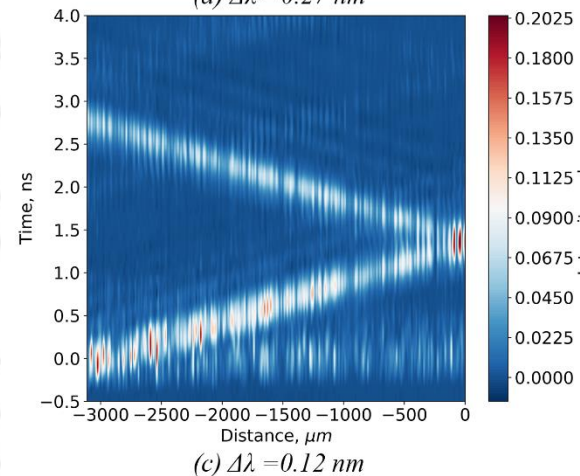
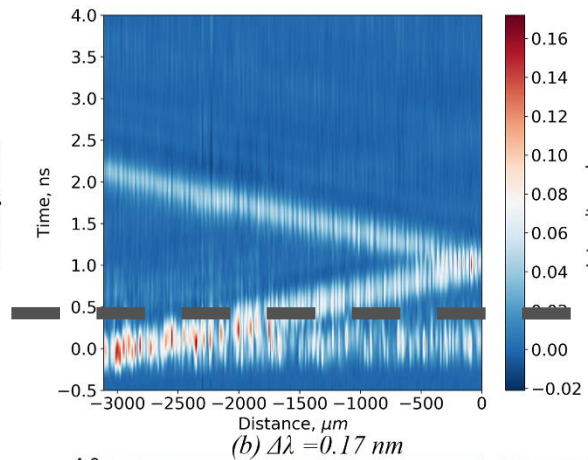
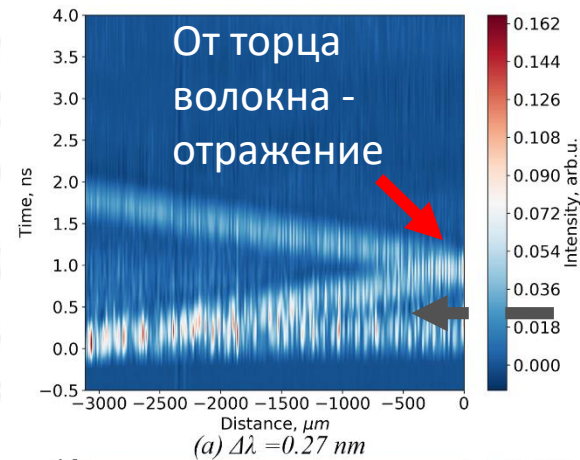
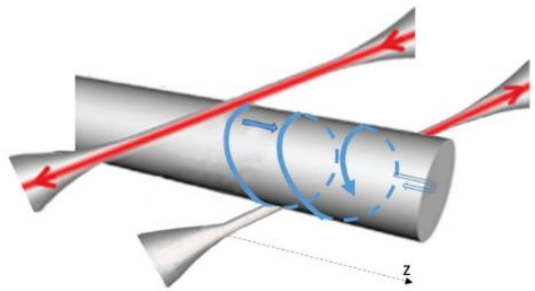
A. Y. Kolesnikova and I. D. Vatnik, PRA. (2023).

# Одномерная квантовая механика на поверхности волокна



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

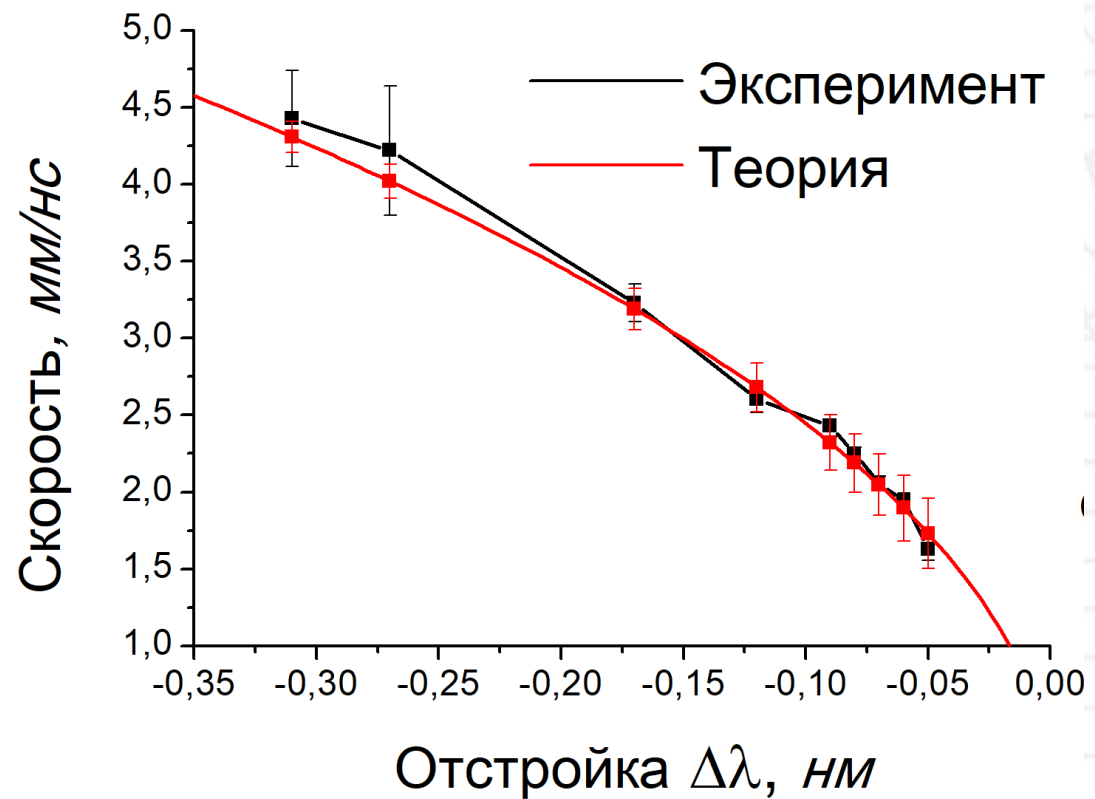
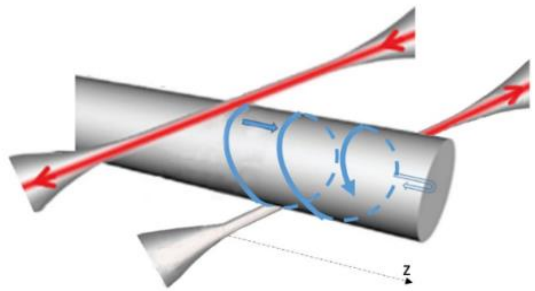
# Пример: возбуждение мод непрерывного спектра



- Больше энергия «частицы» - выше скорость

- Меньше «энергия частицы» – ниже скорость

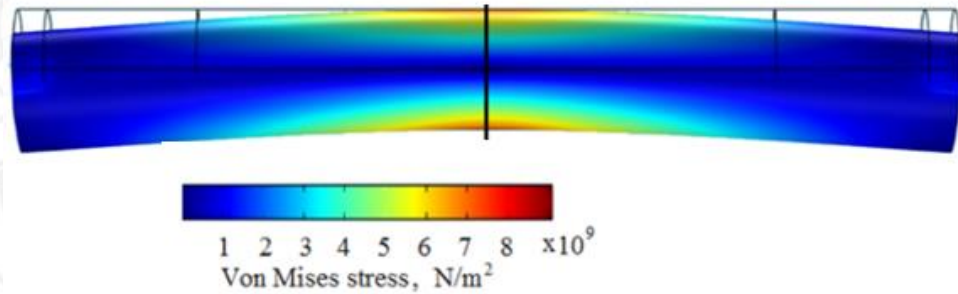
## Пример: возбуждение мод непрерывного спектра



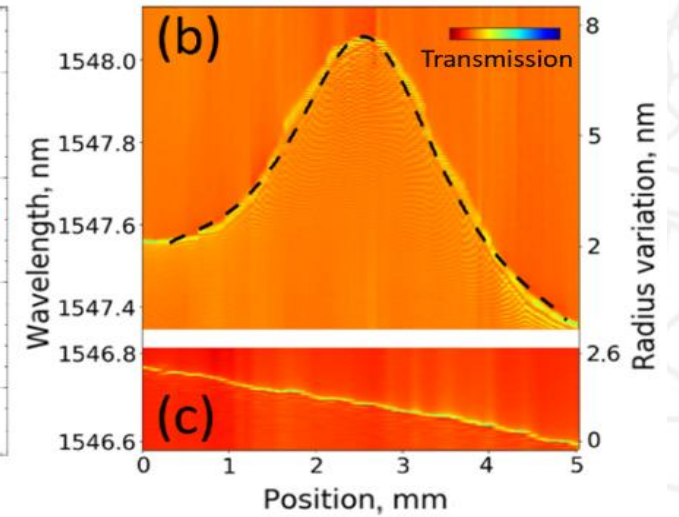
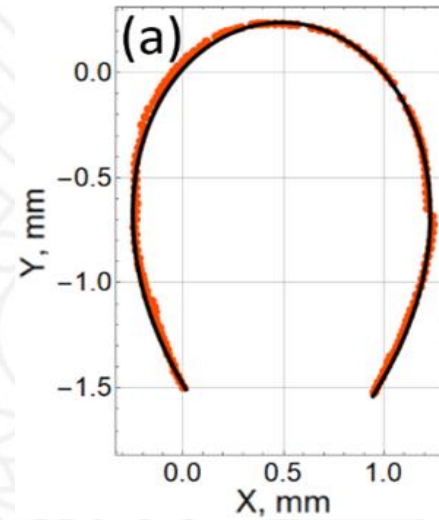
Параболический закон для групповой скорости

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

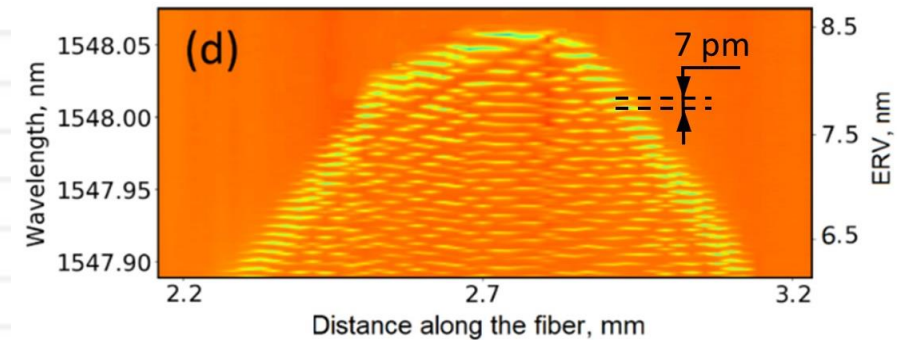
# Создание оптического потенциала изгибом



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

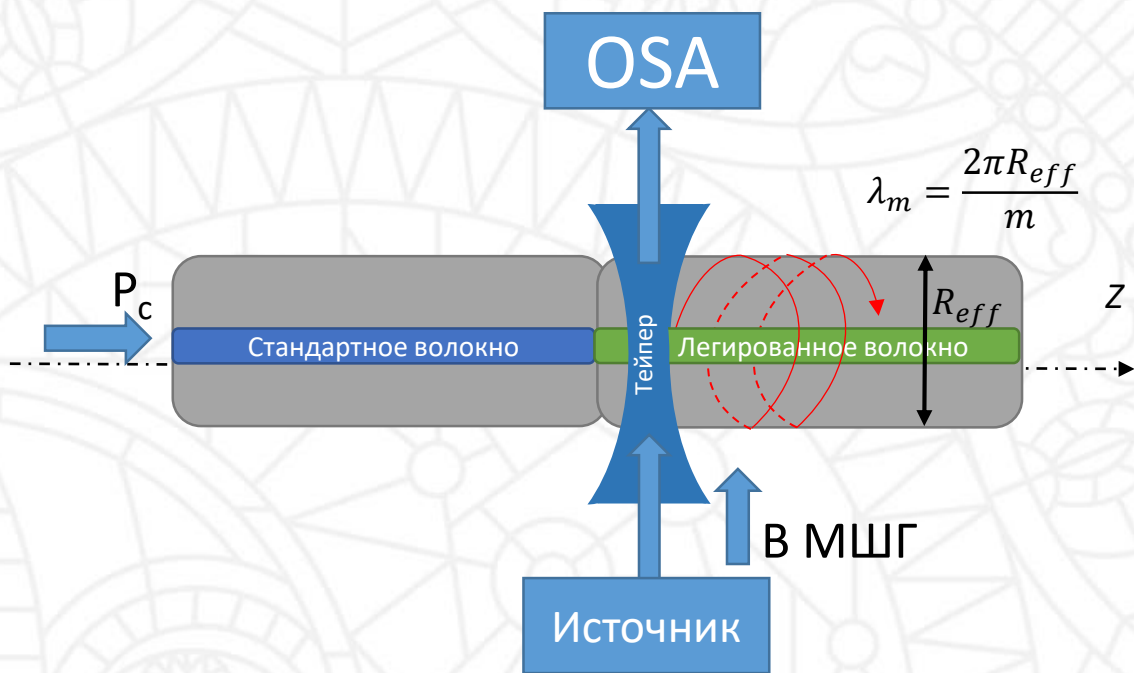


- Изменение эффективного радиуса линейно зависит от локальной кривизны

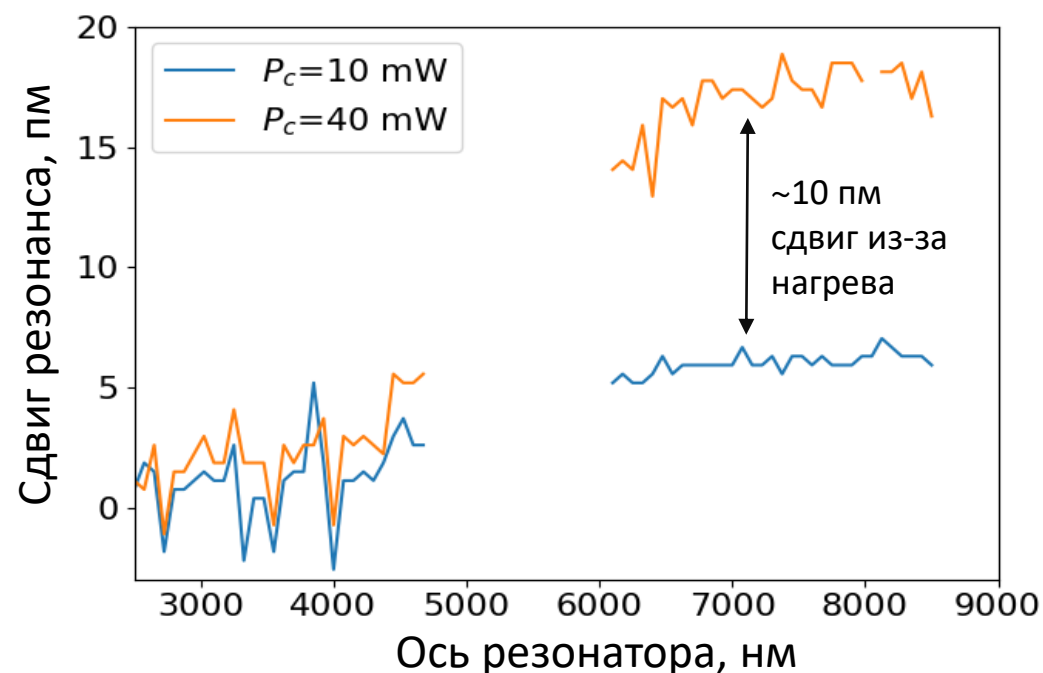


Bochek, D., Toropov, N., Vatnik, I., Churkin, D. V. & Sumetsky, M. SNAP microresonators introduced by strong bending of optical fibers. *Opt. Lett.* **44**, 3218 (2019).

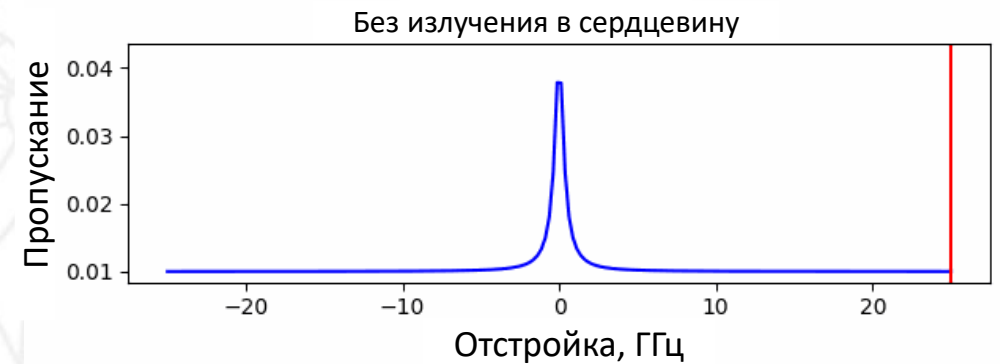
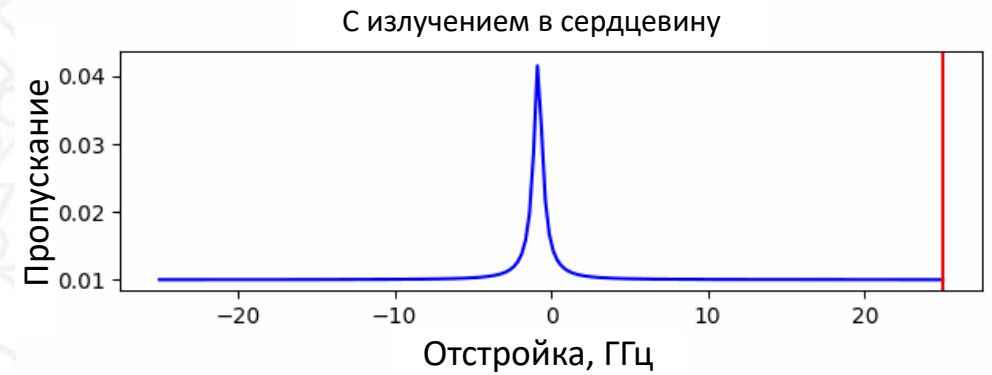
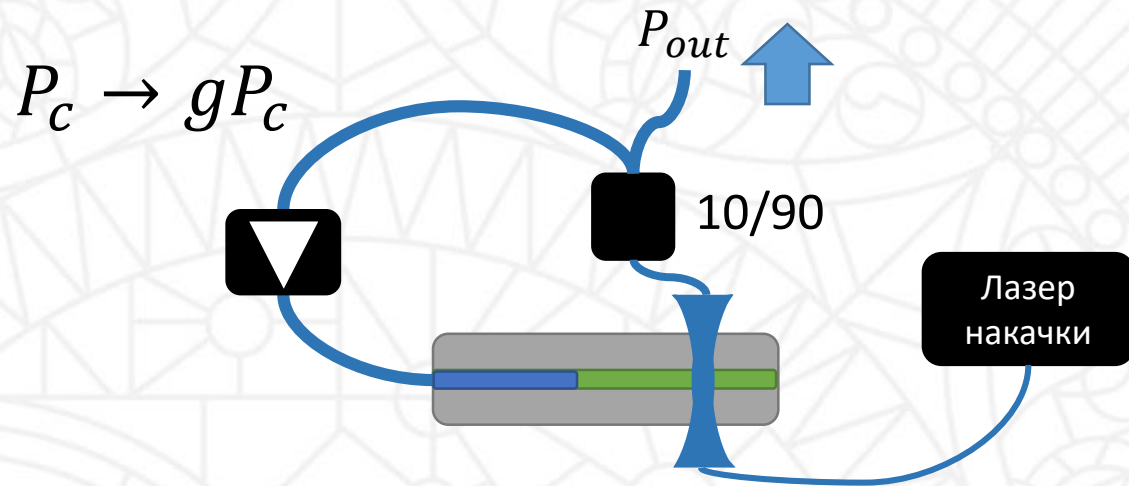
# Перестройка излучением в сердцевину волокна



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



# Перестройка излучением в сердцевину волокна: тепловая самостабилизация

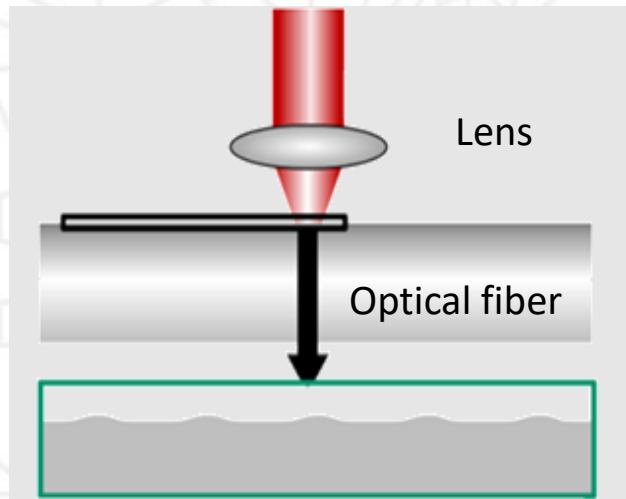


- Используется один лазер для накачки в сердцевину и для возбуждения МШГ



# Внесение вариаций: нагрев излучением CO<sub>2</sub> лазера

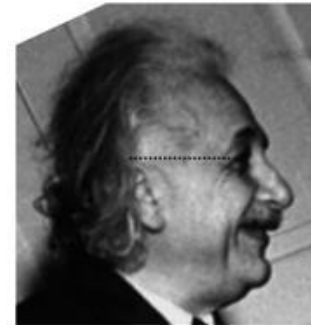
## Сфокусированный пучок CO<sub>2</sub> лазера



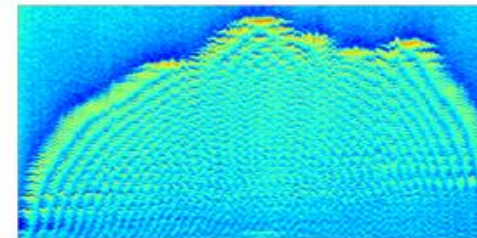
- Релаксация замороженных напряжений приводит к изменению радиуса и показателя преломления
- Вносимые изменения эффективного радиуса до 10 нм

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

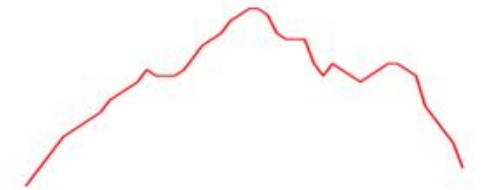
D. V. Krisanov, A. S. Nesterok, and I. D. Vatnik, "Shaping Optical Microresonators on the Surface of Optical Fibers With Negative Effective Radius Variations," *IEEE Photonics J.* **13**, 1–4 (2021).



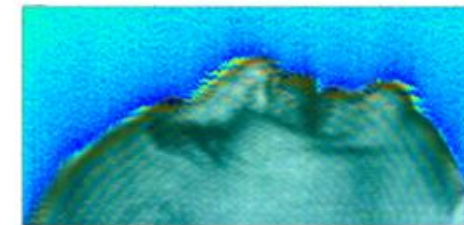
а



в



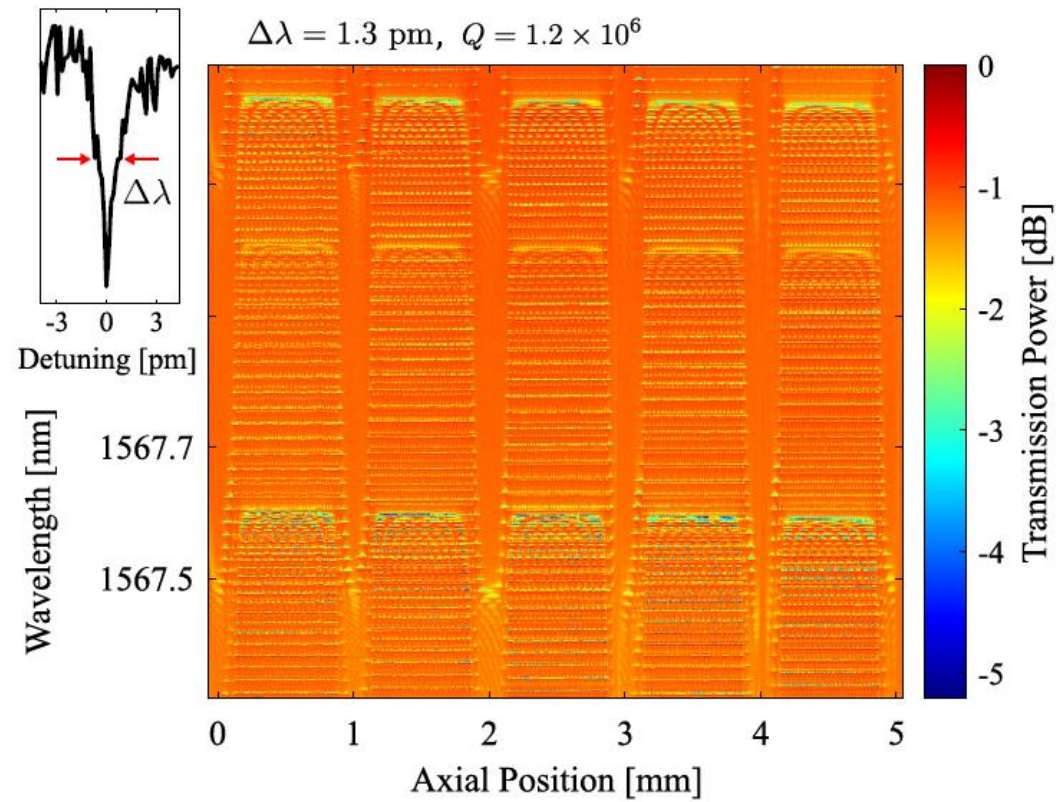
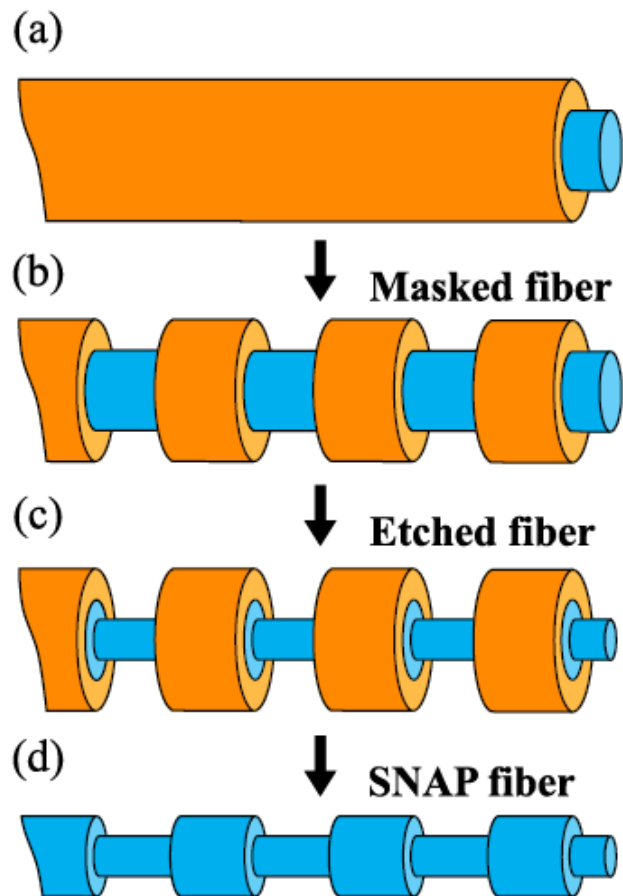
б



г

Контроль эффективного радиуса с точностью до 0,1 нм

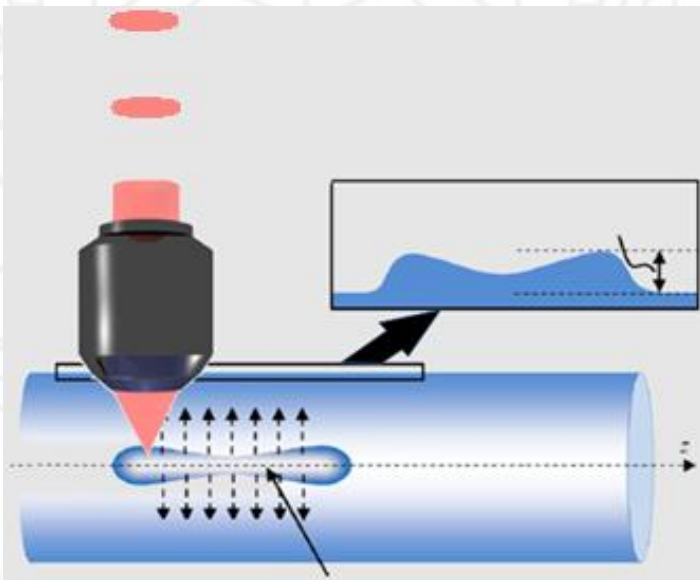
# Запись потенциала литографическим методом



- Можно травить **глубоко**

## Другие способы модификации

### Фемтосекундные лазерные импульсы

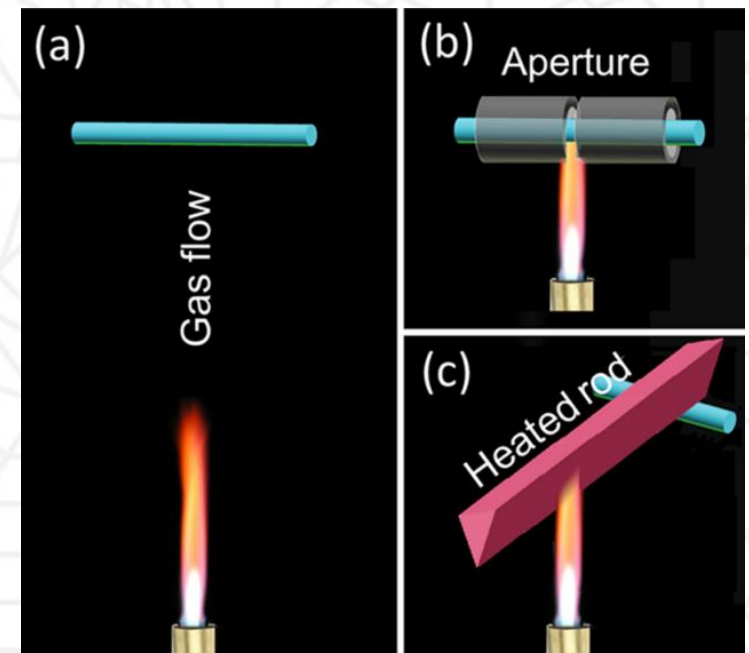


Фемтосекундные импульсы приводят к структурным изменениям в сердцевине волокна. Деформация внутри ⇒ вариации радиуса

**Вносимые изменения эффективного радиуса до 50 нм**

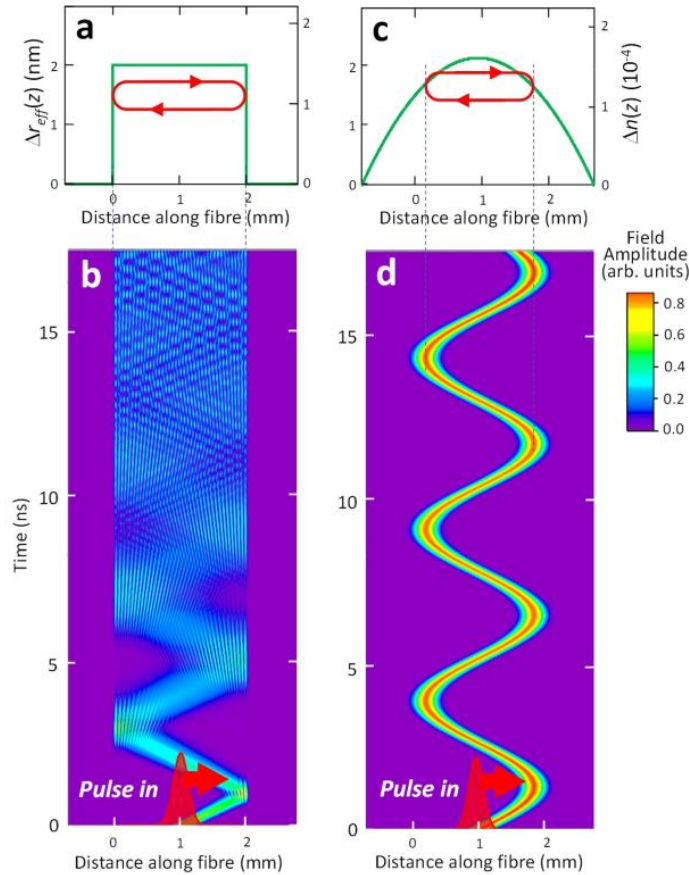
F. Shen et al. "Fabrication of surface nanoscale axial photonics structures with a femtosecond laser," *Opt. Lett.* **41**(12), 2795 (2016).

### Пламя или нагрев металлической проволокой

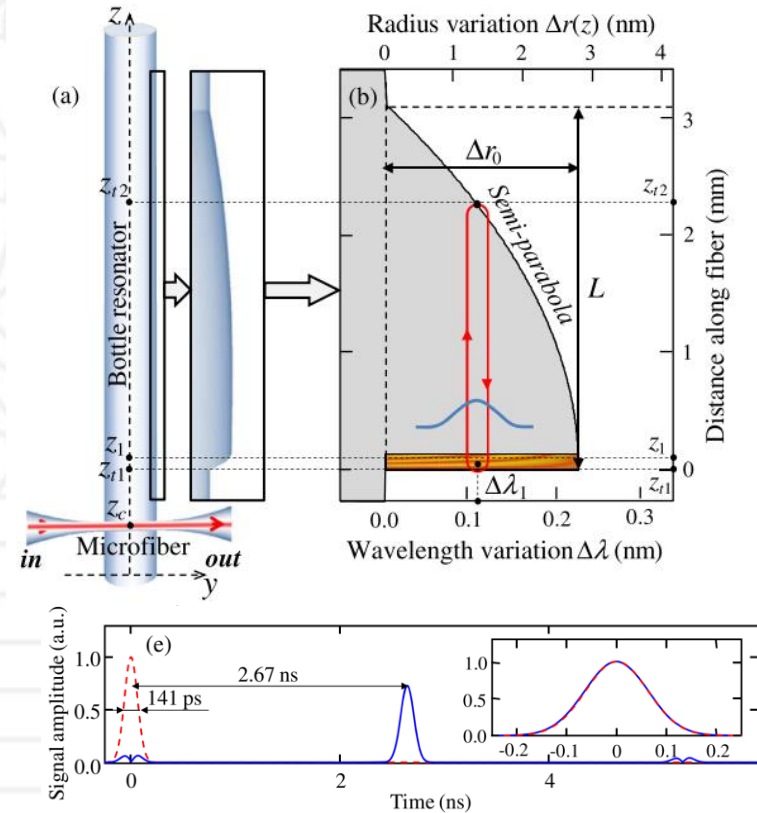


Простой и доступный способ

# Применения: линия задержки



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

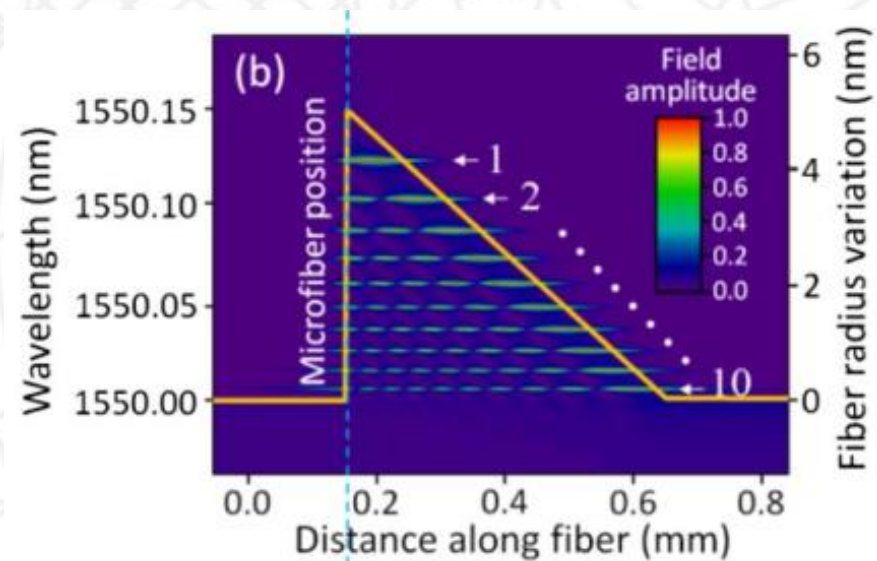
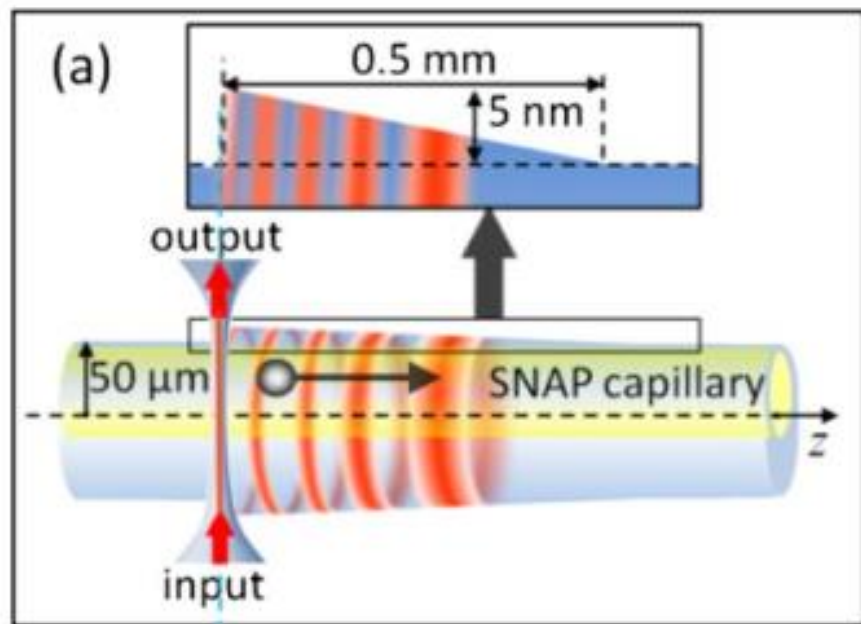


Sumetsky, M., "Microscopic optical buffering in a harmonic potential," Sci. Rep. **5**, 18569 (2015).

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

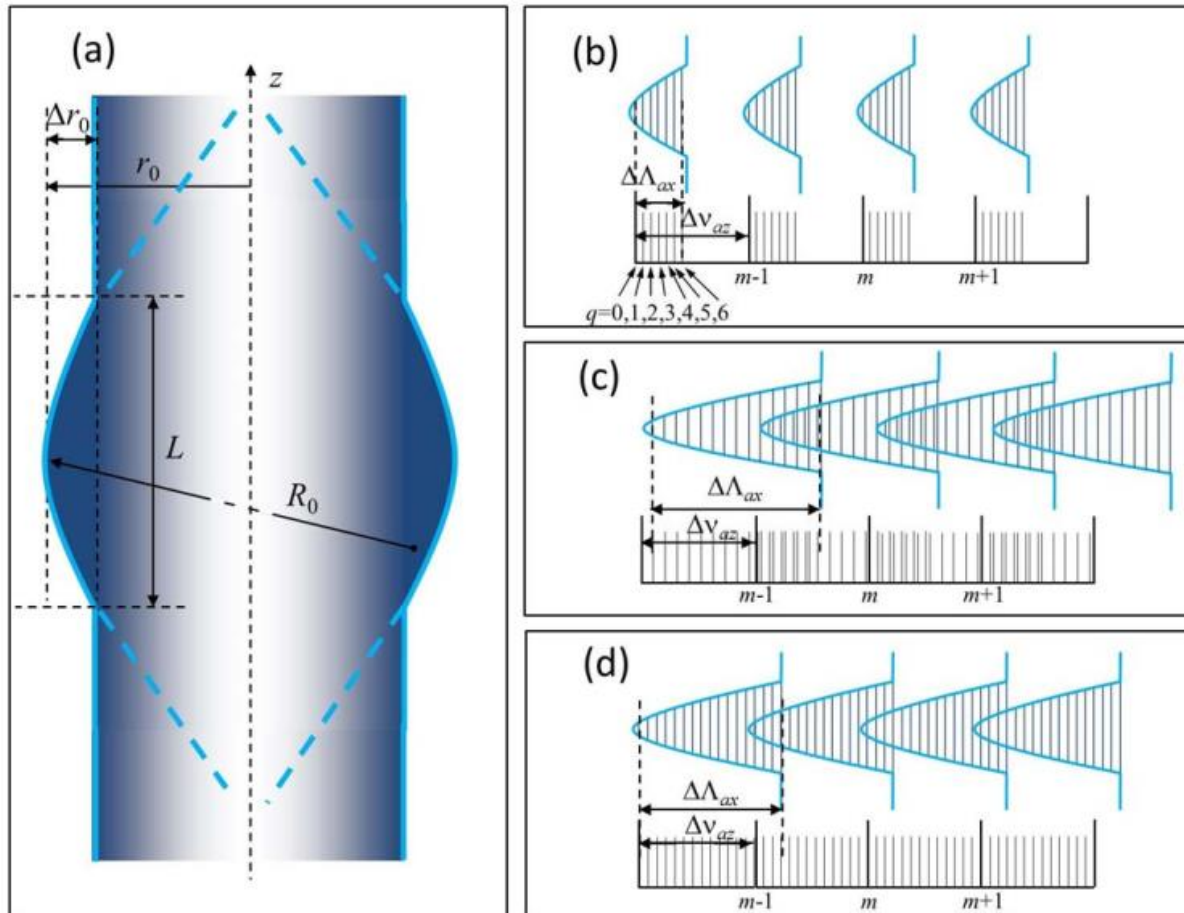


НО: чувствительность невысокая, только для крупных частиц.

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 ( $\sim 100$  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

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

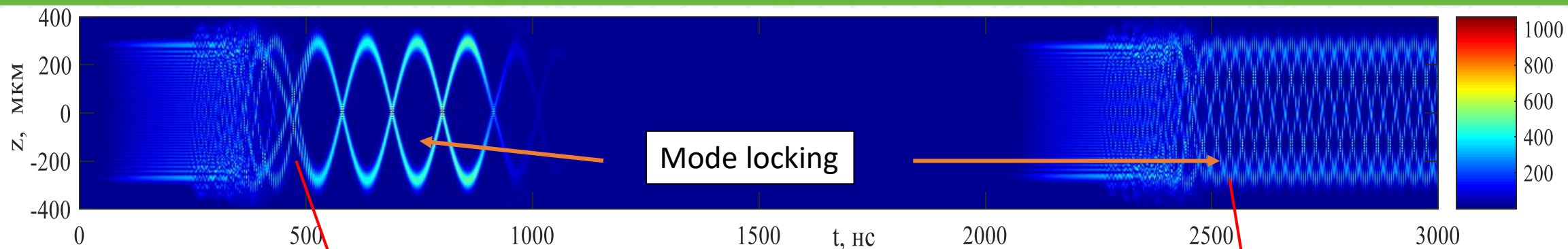
↑  
Самомодуляция

↑  
Кросс-модуляция

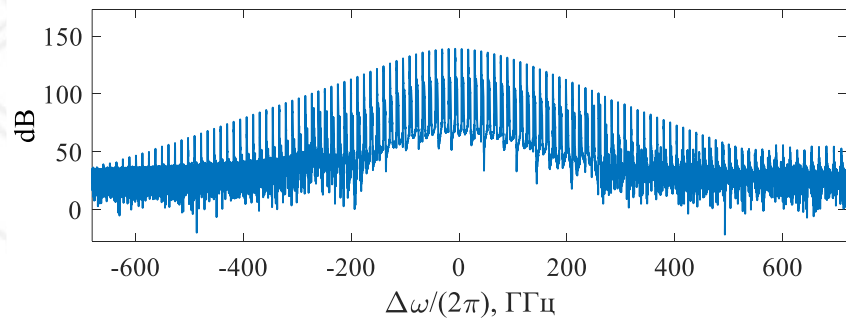
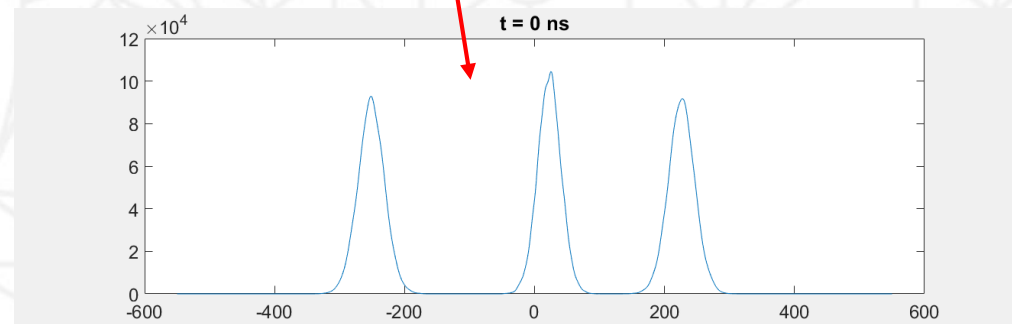
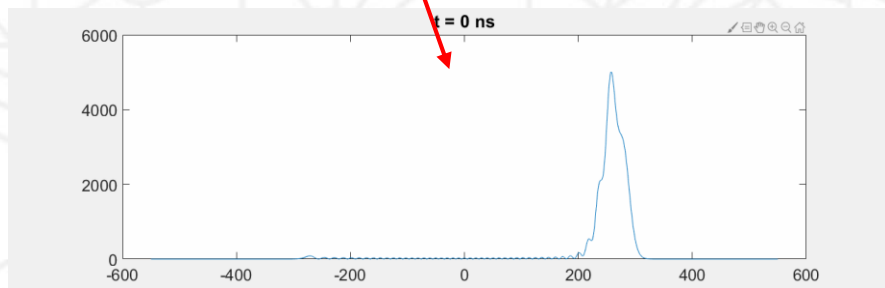
↑  
Четырехволновое взаимодействие

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

# Генерация оптических комбов - модель



Mode locking



- 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:

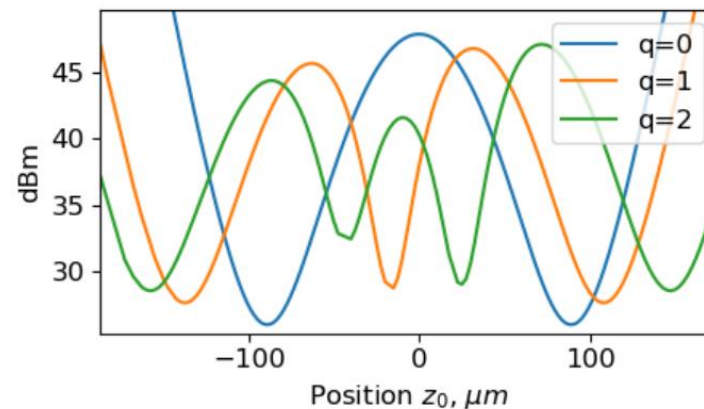
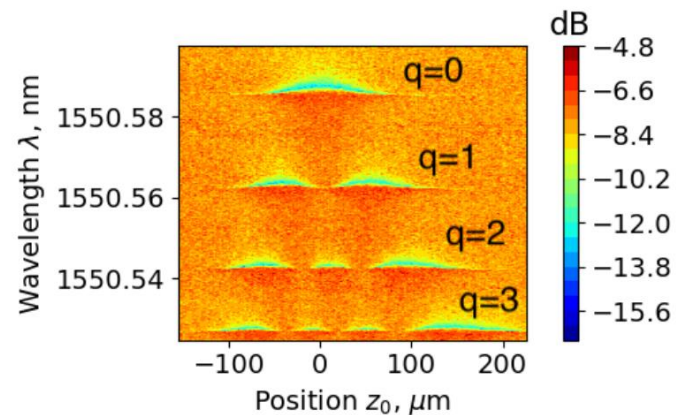
Макс. мощность в резонаторе, т.е.

Сила связи  $\delta_c \sim$  собственные потери  $\delta_0$

Можно управлять  $\delta_c$  и  $\delta_0$  (и уменьшать порог), передвигая тейпер **вдоль** моды.

Но пороги не маленькие:  $\sim 100$  мВт для кварцевых волокон

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



Порог для разных мод в зависимости от точки касания

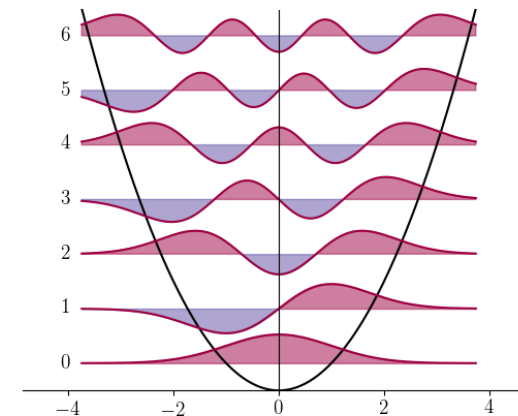
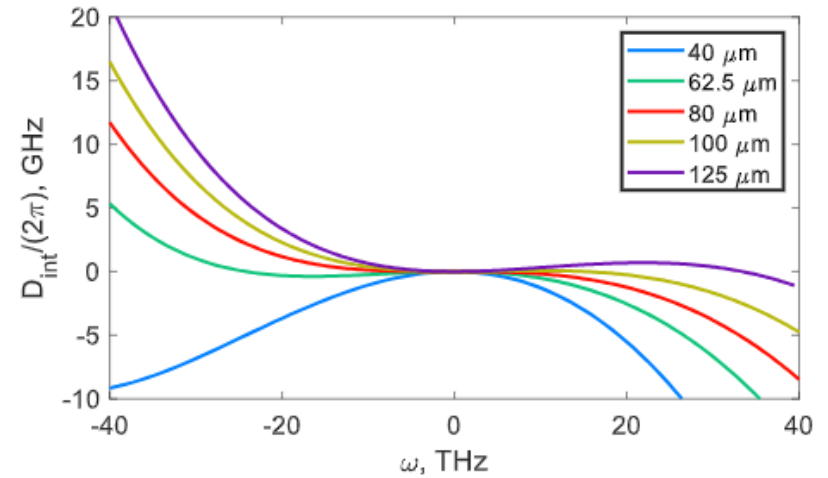
## Нелинейная генерация – управление дисперсией

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

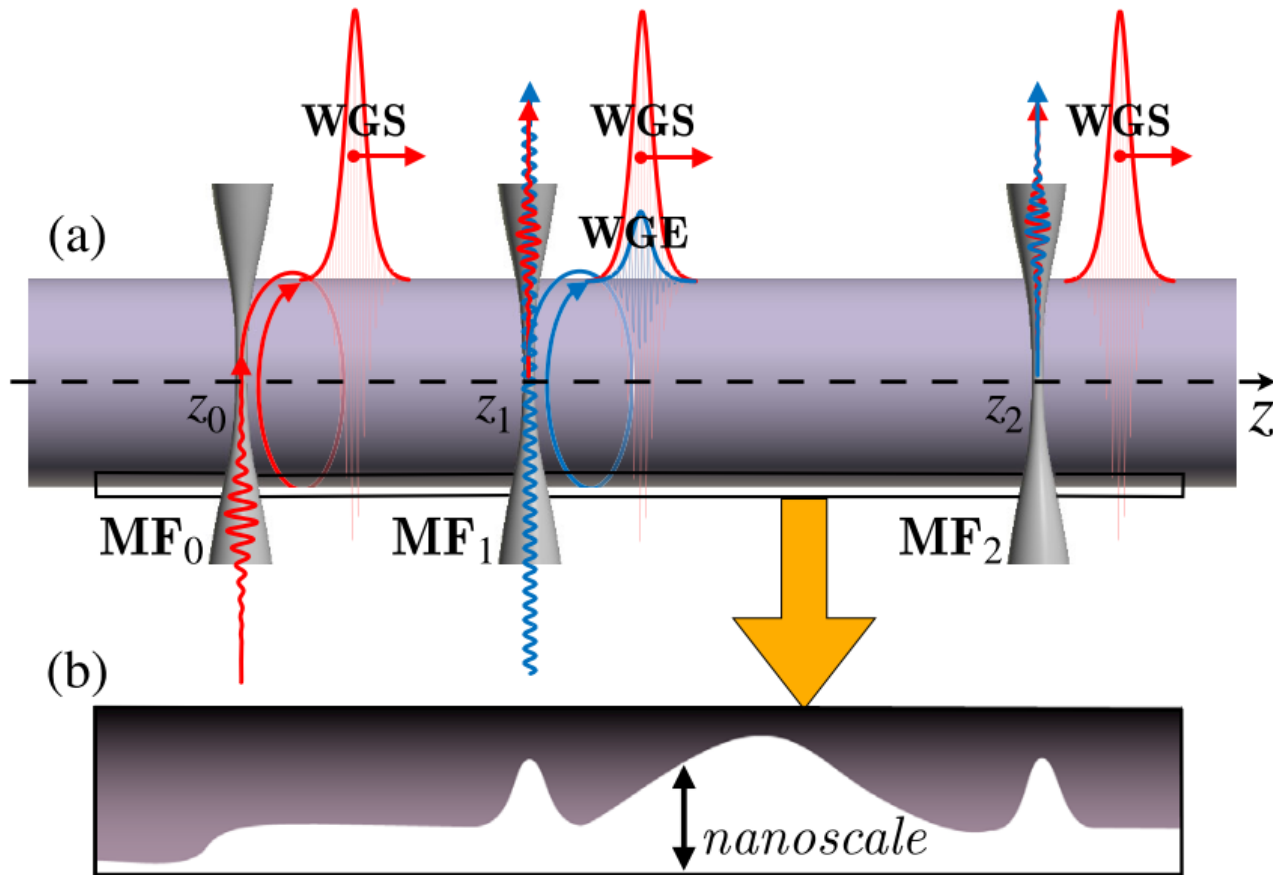
Увеличение диаметра до 80 мкм  $\rightarrow$  нужная нам аномальная дисперсия

- 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



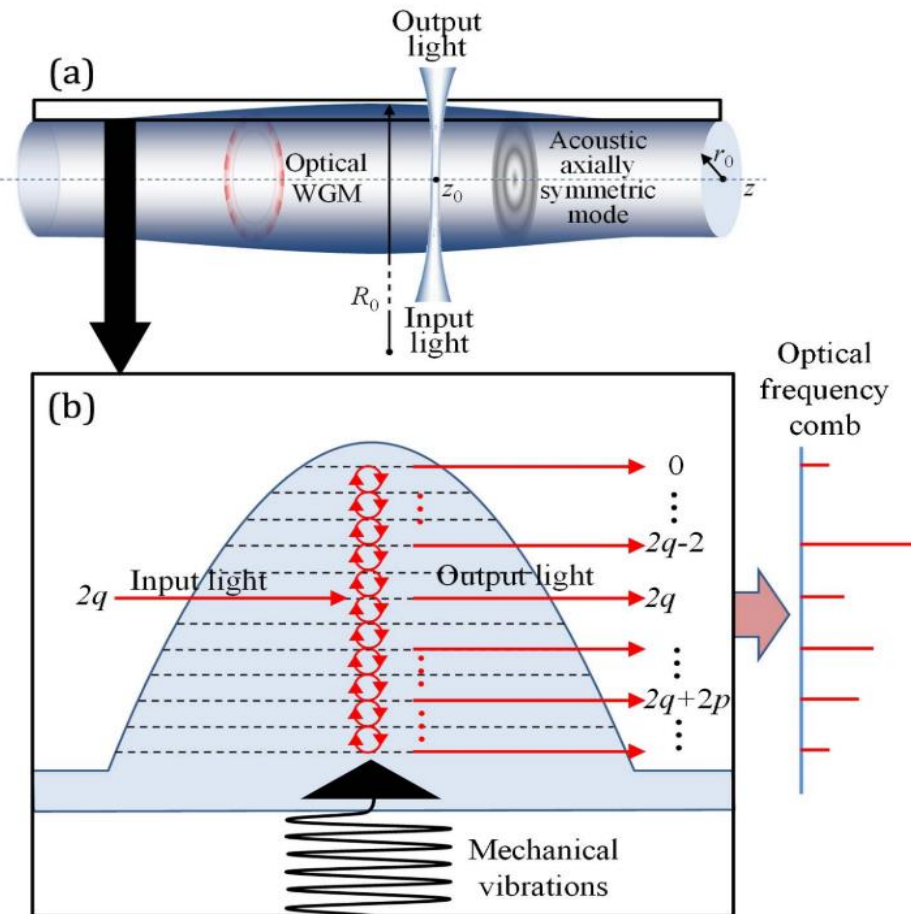
# «Оптический грузовичок»



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

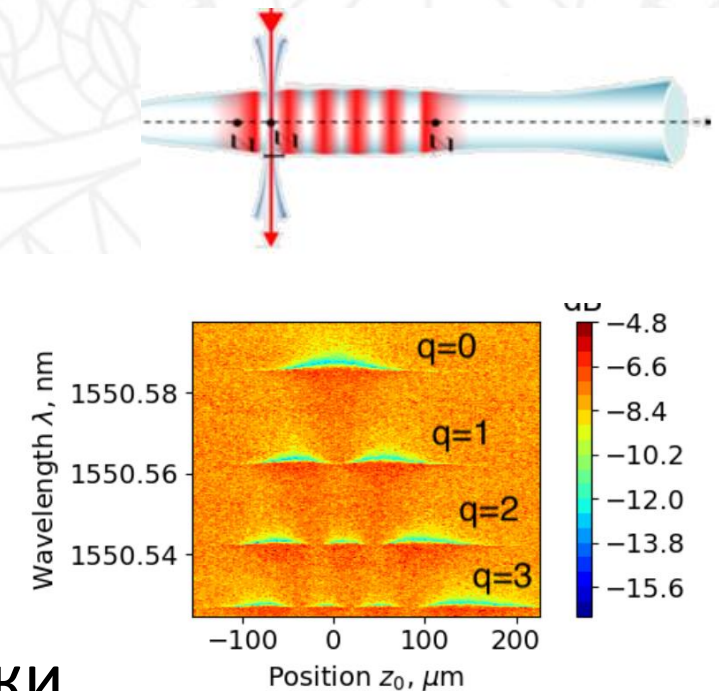


Гармонически возмущаемый потенциал  $\Rightarrow$  перенос энергии между модами

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!**