



Институт автоматике и электрометрии СО РАН

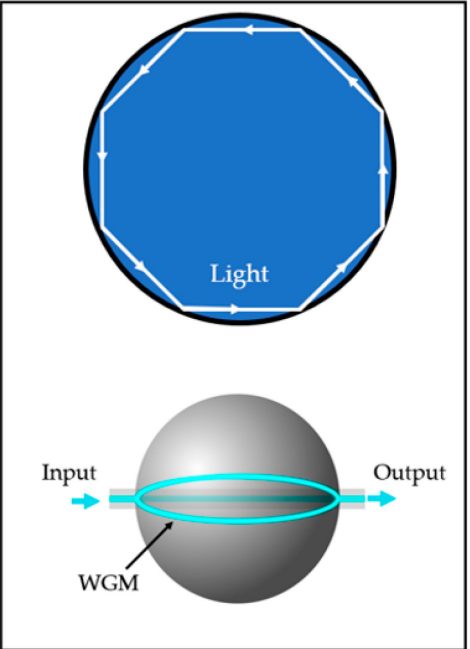
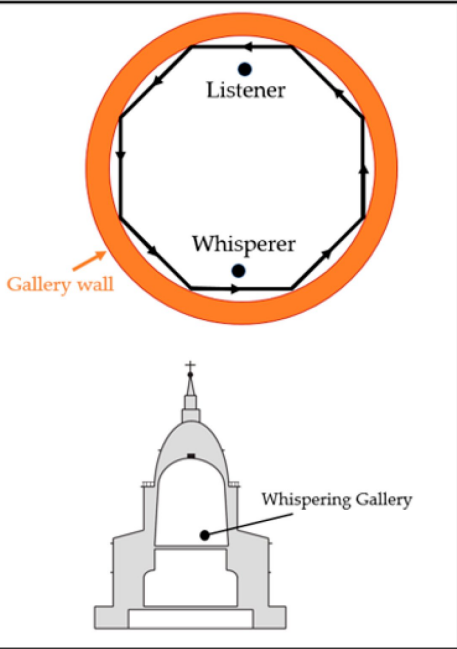
Новые методы селекции мод шепчущей галереи в сферическом резонаторе с помощью вакуумных тонкопленочных покрытий

Х. Ризк, В.А. Симонов, В.С. Терентьев, В.Е. Федяй, А.В. Достовалов, С.А. Бабин

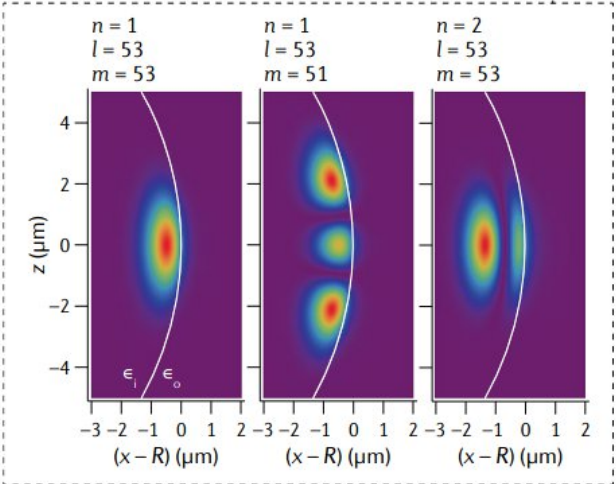
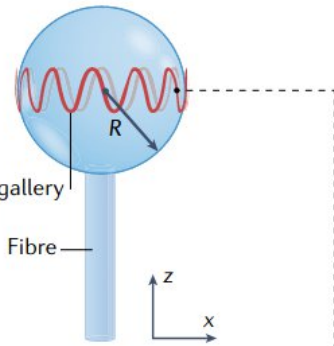
e-mail: SimonovVA@iae.nsk.su

Новосибирск, 2026

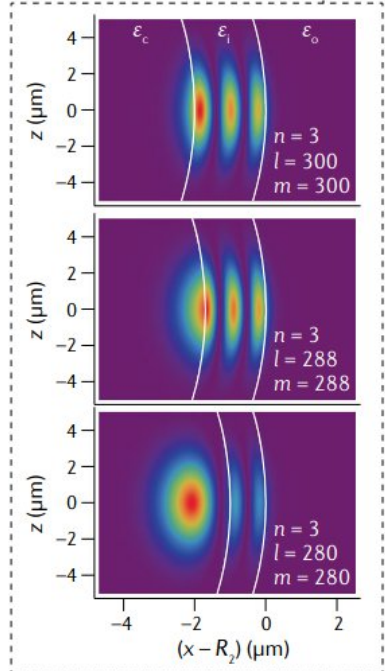
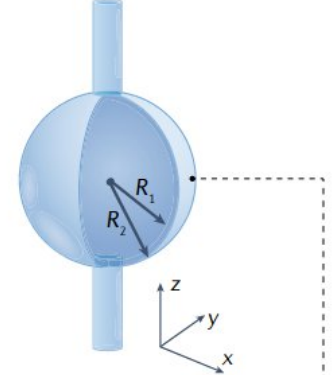
Моды шепчущей галереи



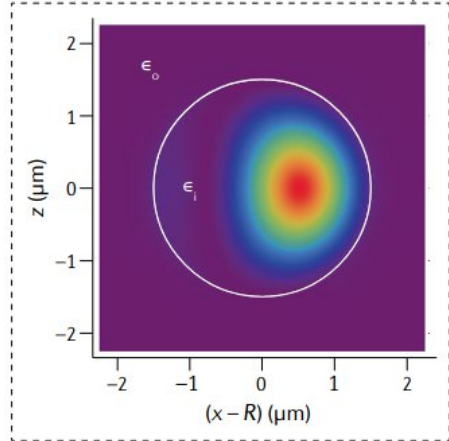
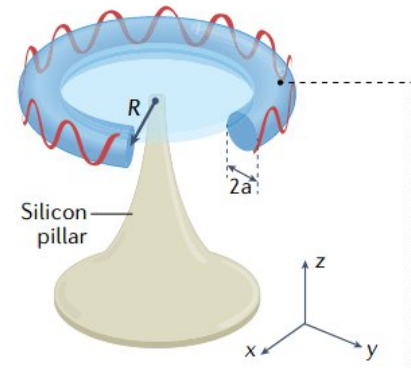
a Microsphere



b Microbubble



c Microtoroid



Селекция мод тонкой металлической пленкой

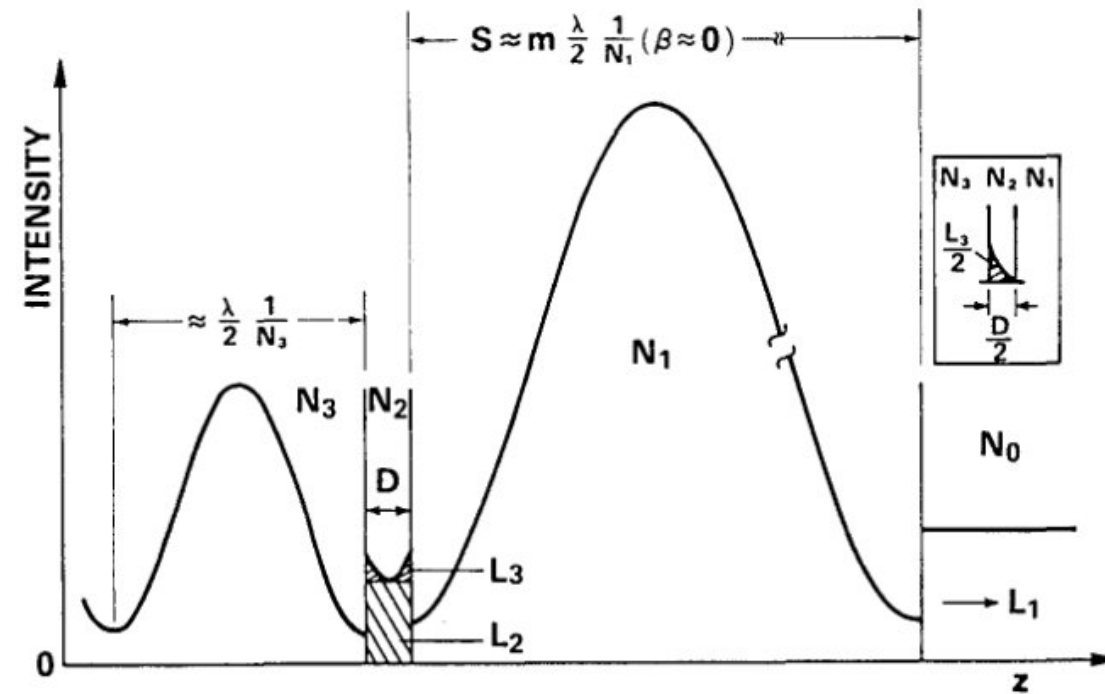
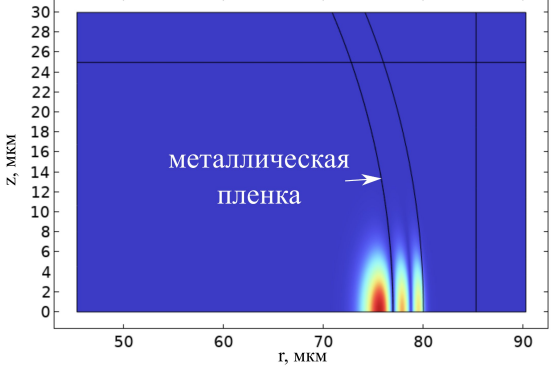
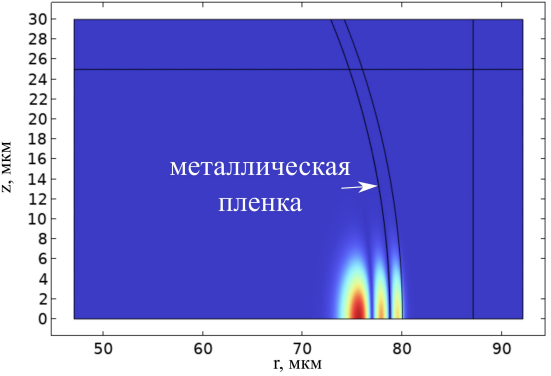
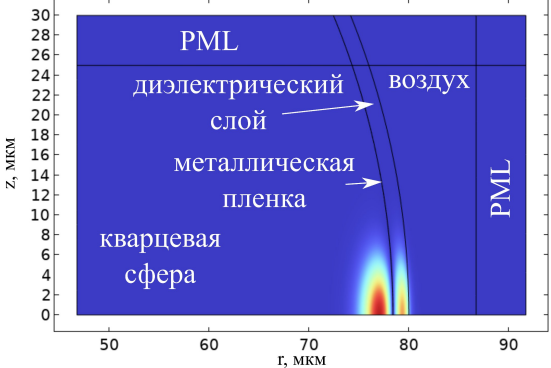
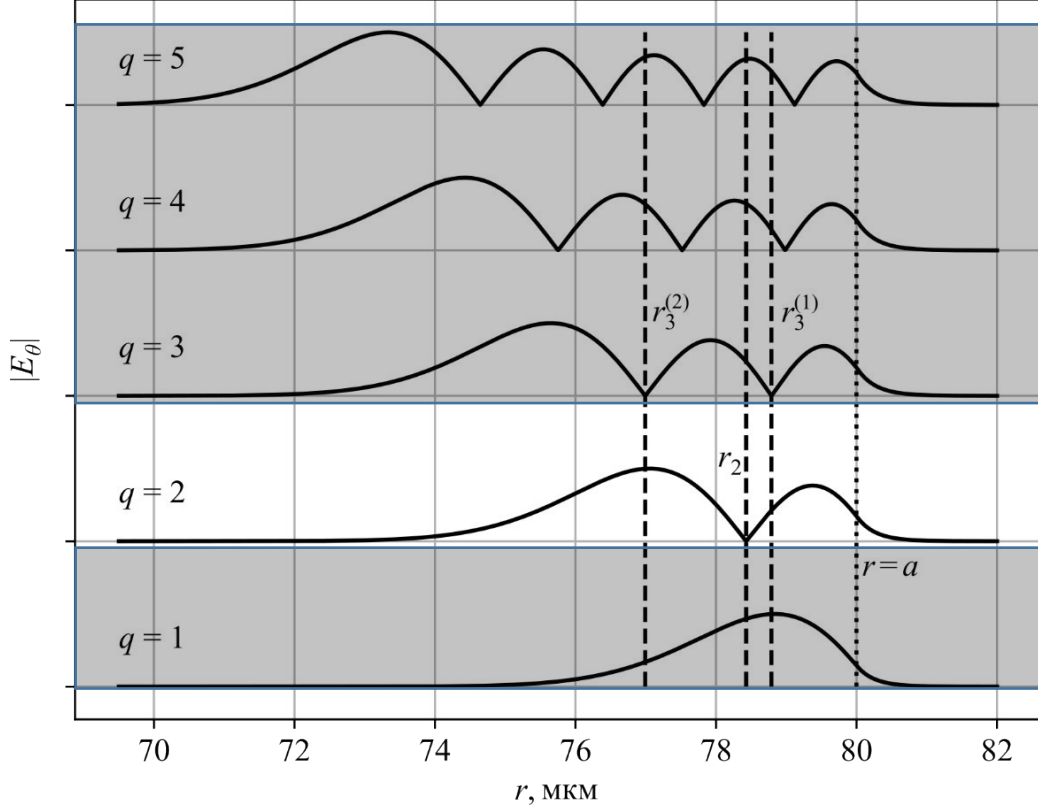
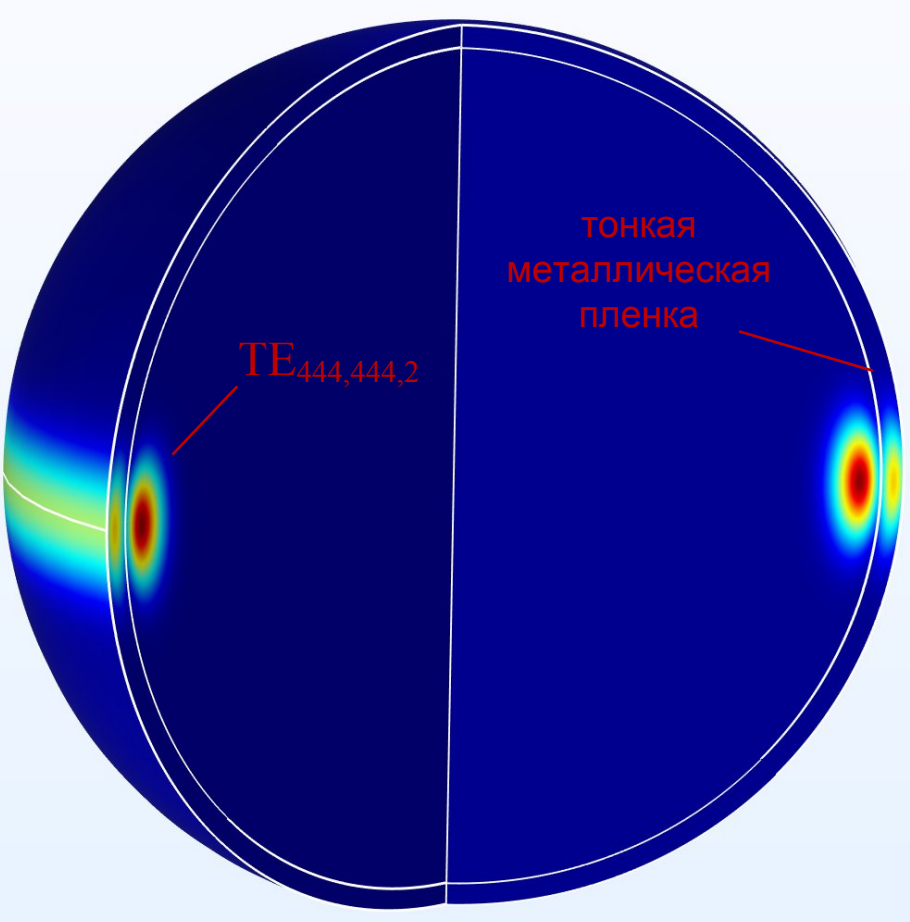


Fig. 5. Intensity distribution within the filter. A minimum loss situation is shown, where the absorptive film is centered at an intensity minimum (distorted vertical scale, exaggerated thickness D). The distance S is approximately equal to an integer (m) multiple of half-wavelength within the medium N_1 (corresponding to $\beta \approx 0$). The inset indicates the way of calculating $L_3/2$, where β has been assumed to be exactly zero (intensity minimum at $N_2 - N_1$ boundary).

Метод селекции: одна металлическая пленка

Одна тонкая металлическая оболочка для селекции мод с $q = 2$

$$l = 455, m = 455$$



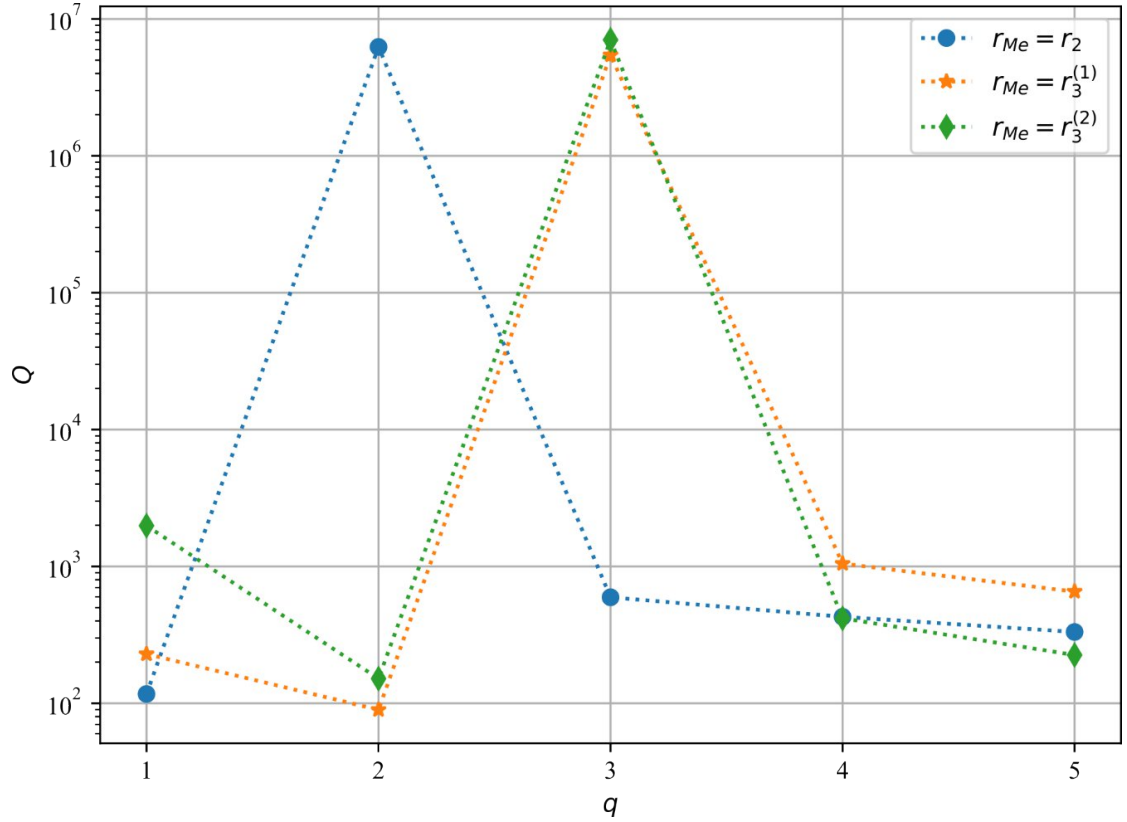
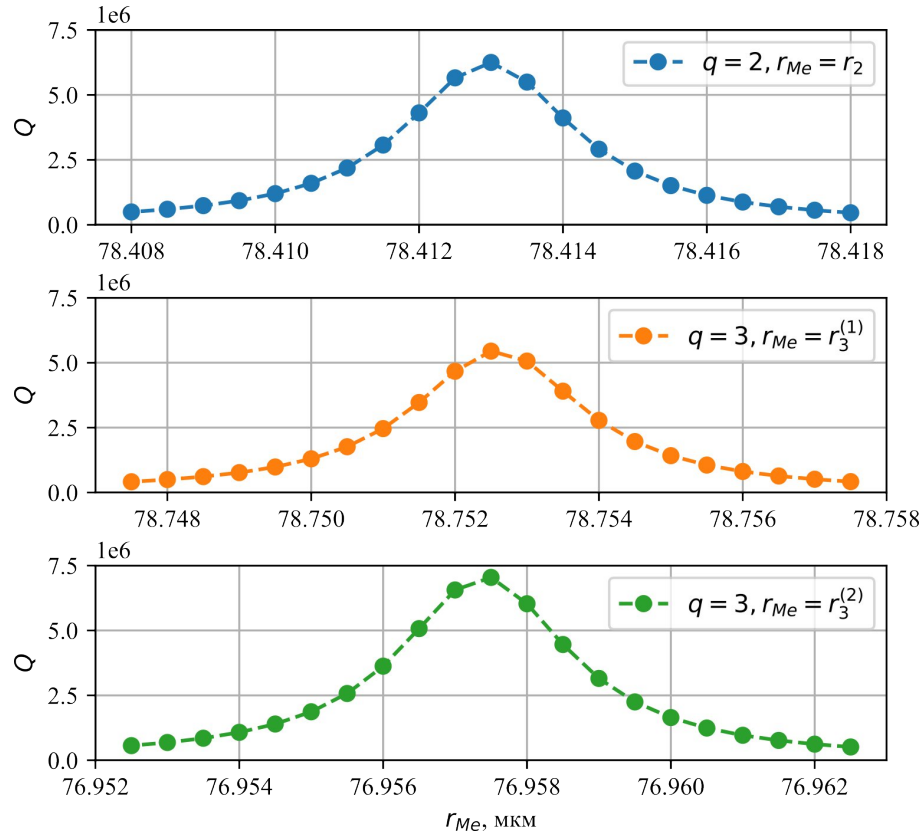
Метод селекции: одна металлическая пленка

$h_m = 5$ нм

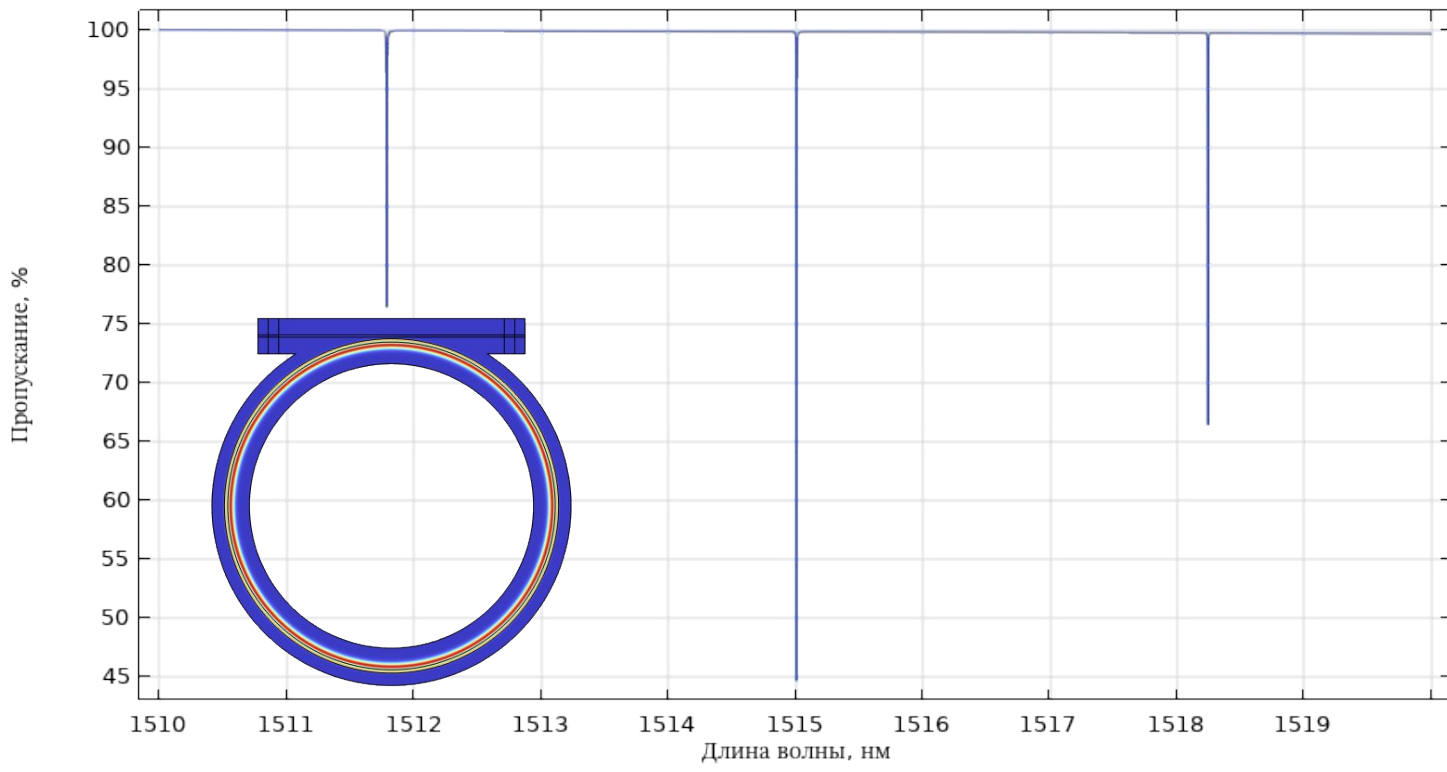
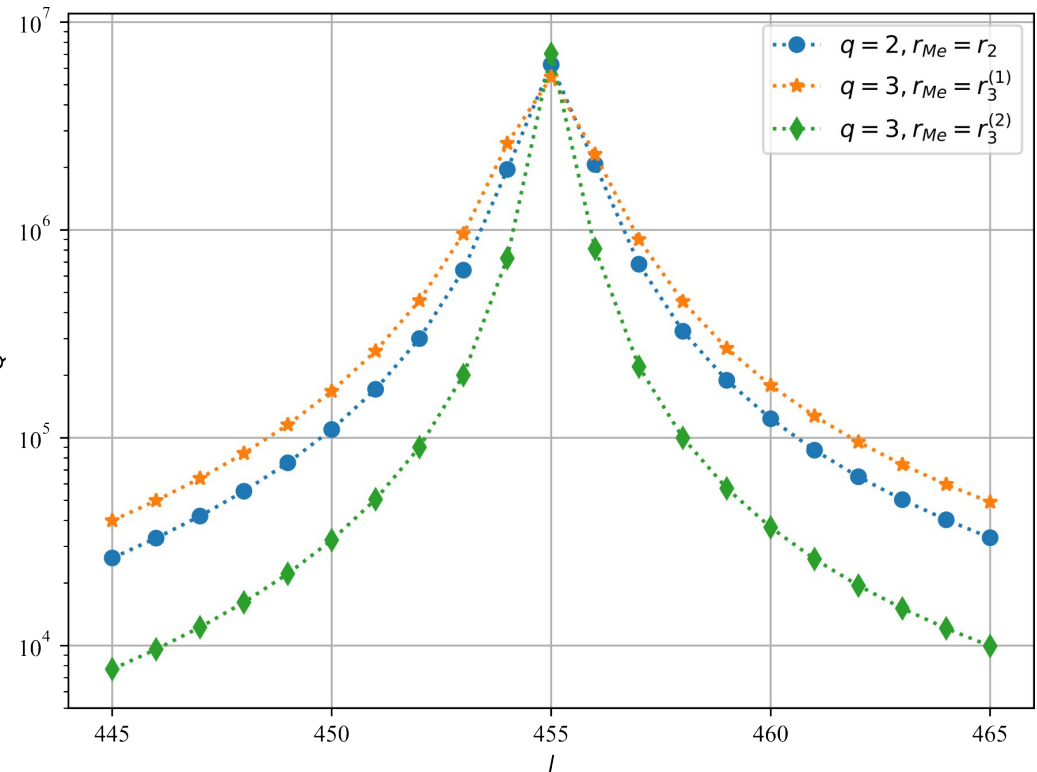
Положение пленки с точностью $\pm \frac{h_m}{2}$!

Существуют моды, имеющие узел?

| q | r_{Me}, MKM | Q | $\lambda, \text{нм}$ |
|-------|----------------------|-------------------|----------------------|
| 2 | 78.413 | $6.25 \cdot 10^6$ | 1514.392 |
| 3_1 | 78.7525 | $5.44 \cdot 10^6$ | 1486.617 |
| 3_2 | 76.9575 | $7.04 \cdot 10^6$ | 1486.616 |



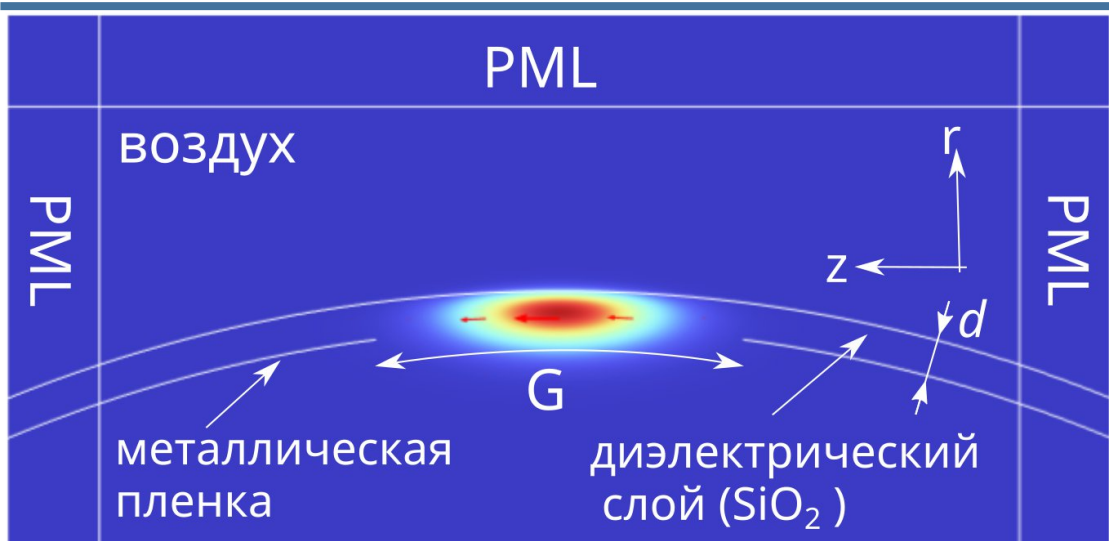
Метод селекции: одна металлическая пленка



Изменение положения узла:

- ~40 нм для $q=2$
- ~30,5 нм для первого $q=3$
- ~90 нм для второго $q=3$

Метод селекции: тонкая пленка с зазором



- Оптимальные параметры пленки:

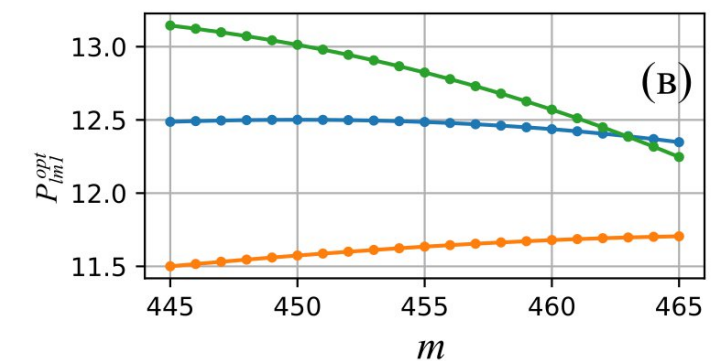
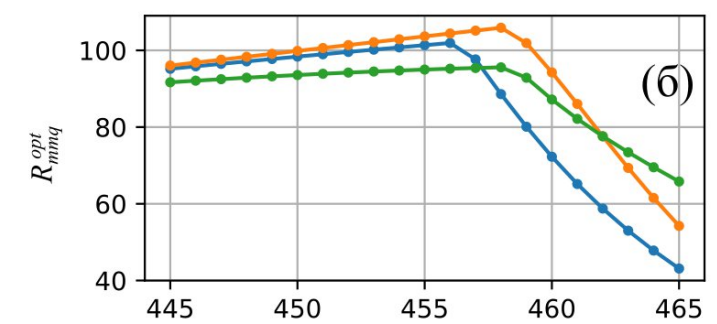
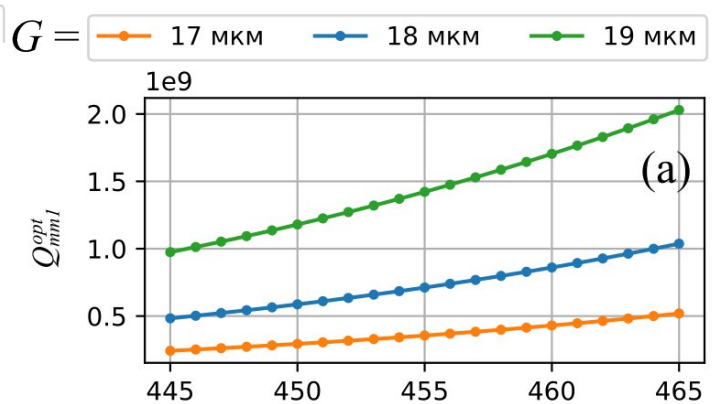
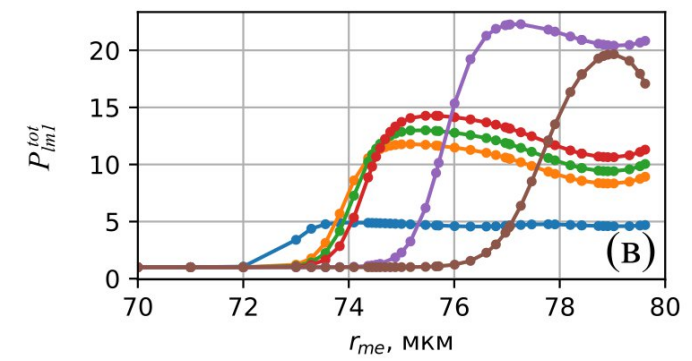
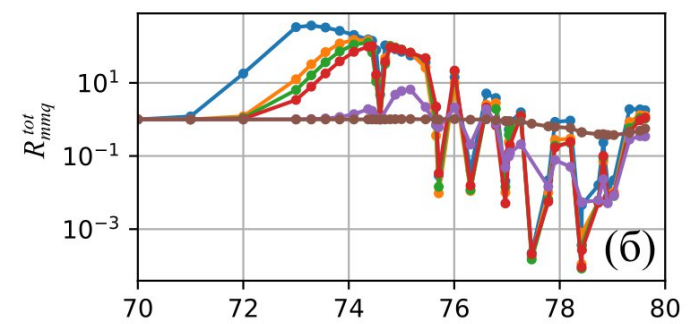
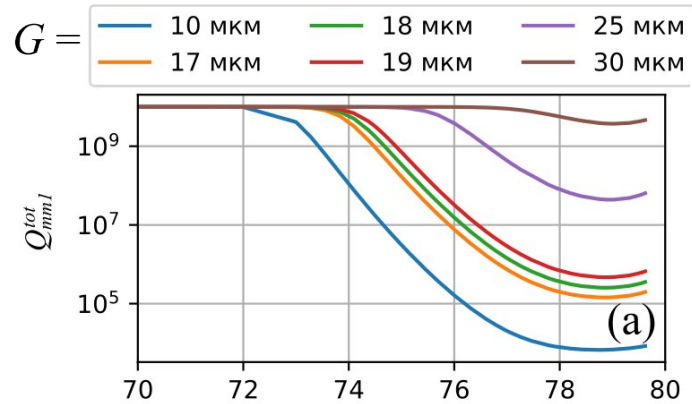
$$G^{opt} = 17 - 19 \text{ мкм}; r_{me}^{opt} = 74.78 - 75 \text{ мкм}$$

- В результате оптимальные значения:

$$Q_{mm1}^{opt} = 3.5 \cdot 10^8 - 1.5 \cdot 10^9; R_{mmq}^{opt} = 80 - 103 \text{ раз};$$

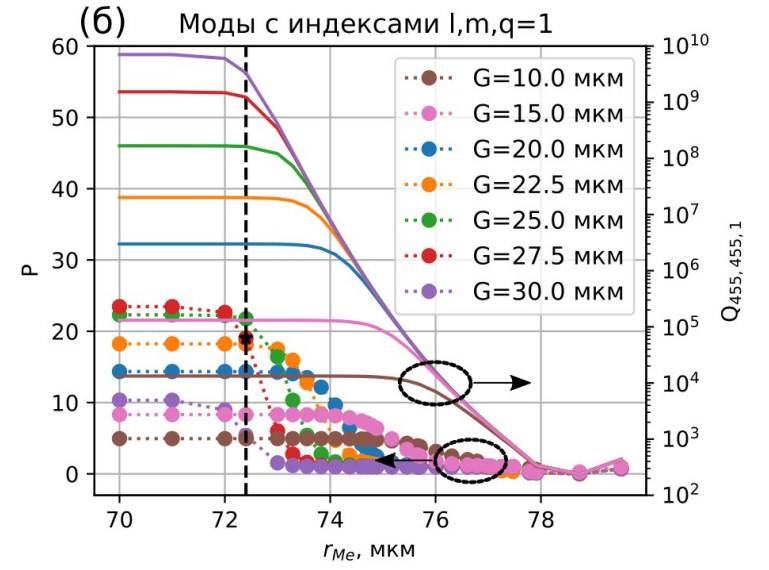
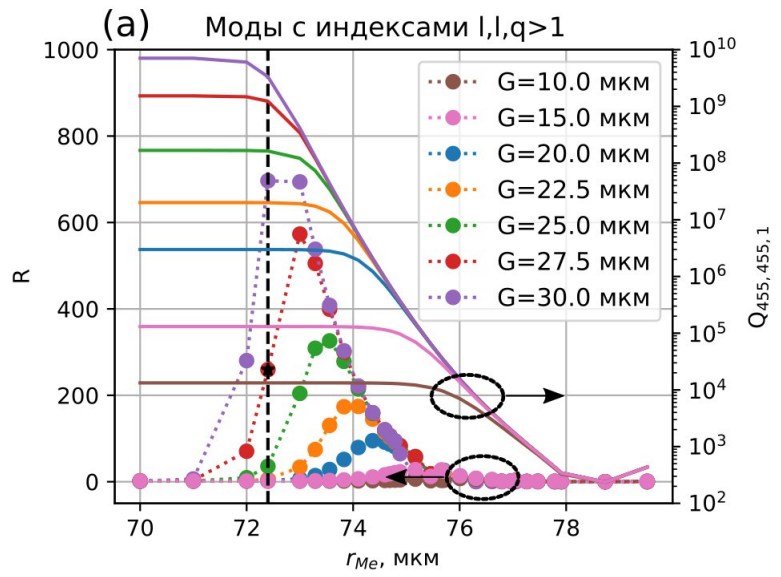
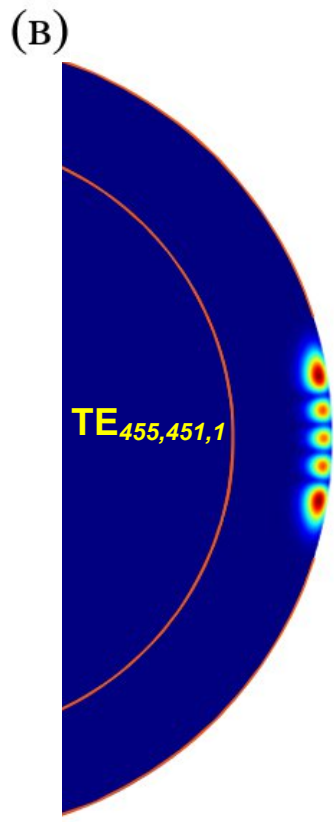
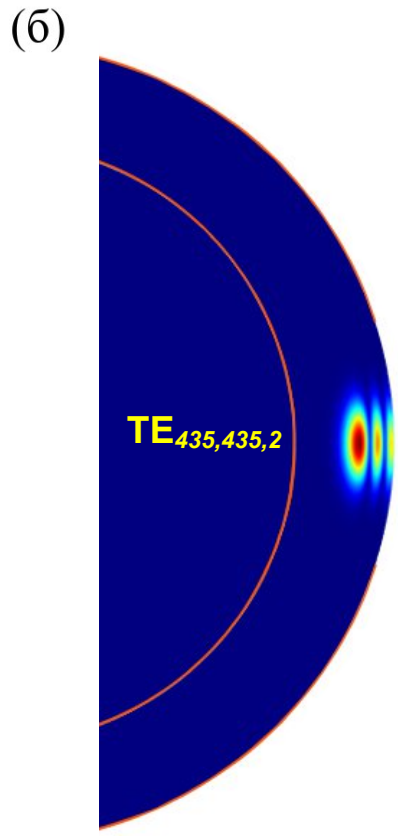
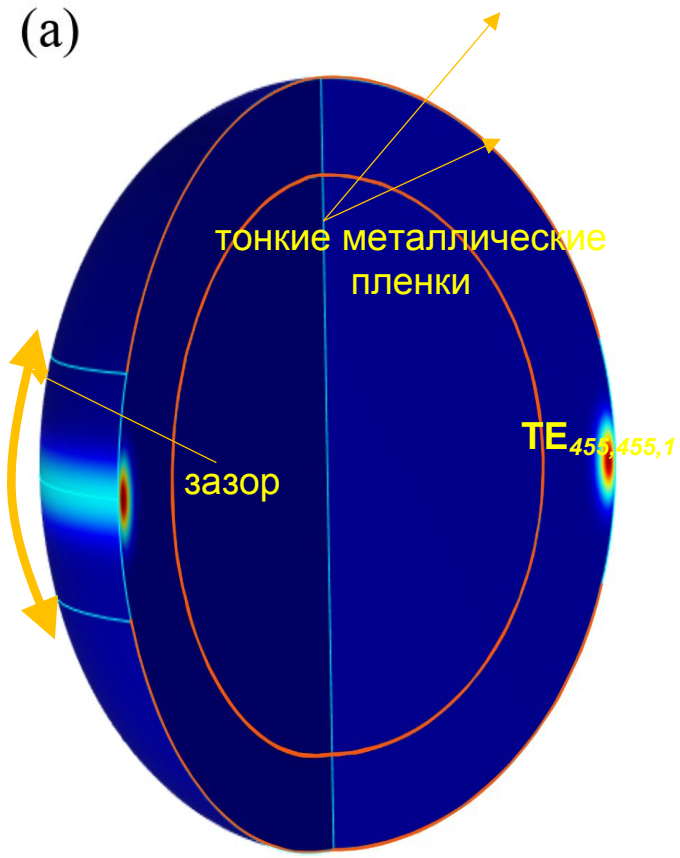
$$P_{lm1}^{opt} = 11.65 - 13.7 \text{ раз}$$

Значительное подавление высших радиальных и полярных мод достигается в широком диапазоне длин волн



Метод селекции: две тонких металлических пленки

Селекция основной моды

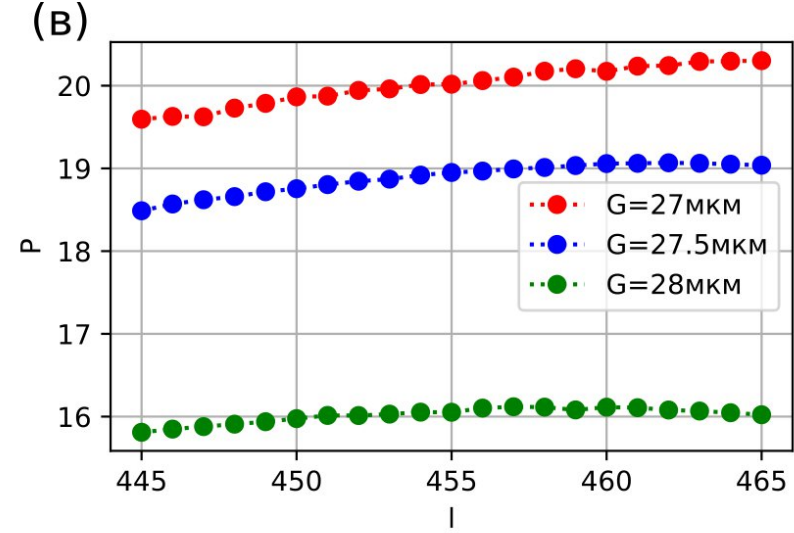
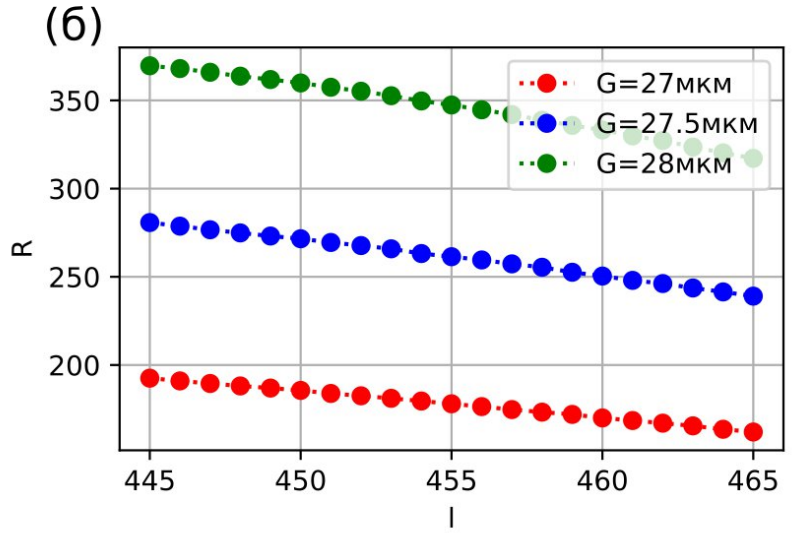
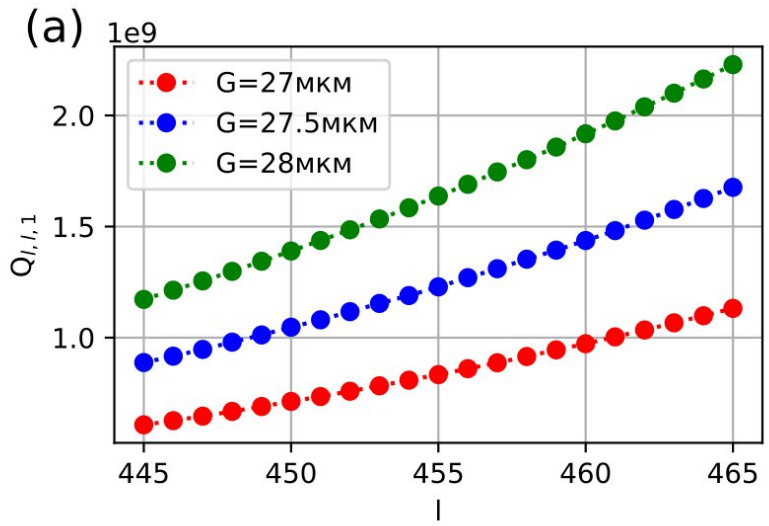


Метод селекции: две тонких металлических пленки

Оптимальные параметры:

- $r_{me}^{opt} = 72.4 \mu\text{мкм}$ и $G^{opt} = 27.5 \mu\text{мкм}$

| Параметр | Одна пленка с зазором | Две пленки |
|-------------|-----------------------|------------------|
| $Q_{l,l,q}$ | $1,5 \cdot 10^9$ | $1,2 \cdot 10^9$ |
| R | 100 | 260 |
| P | 10 | 19 |



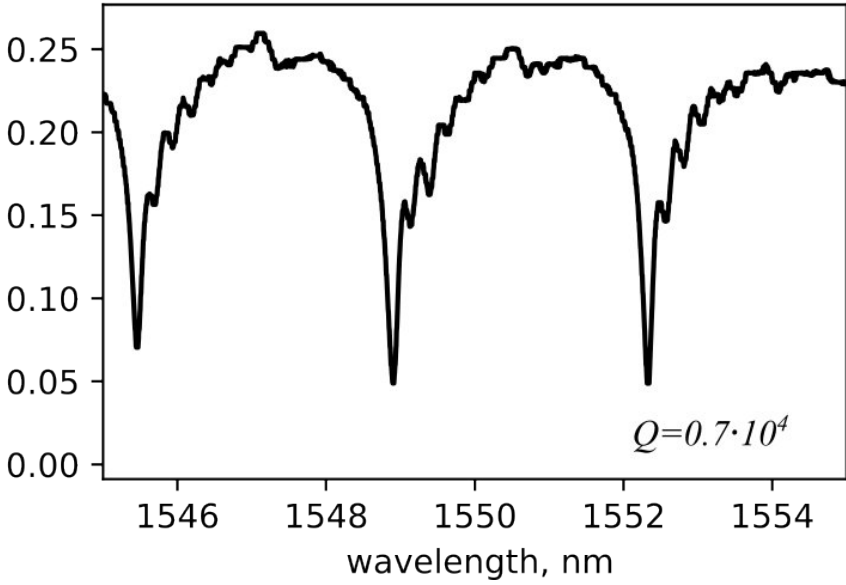
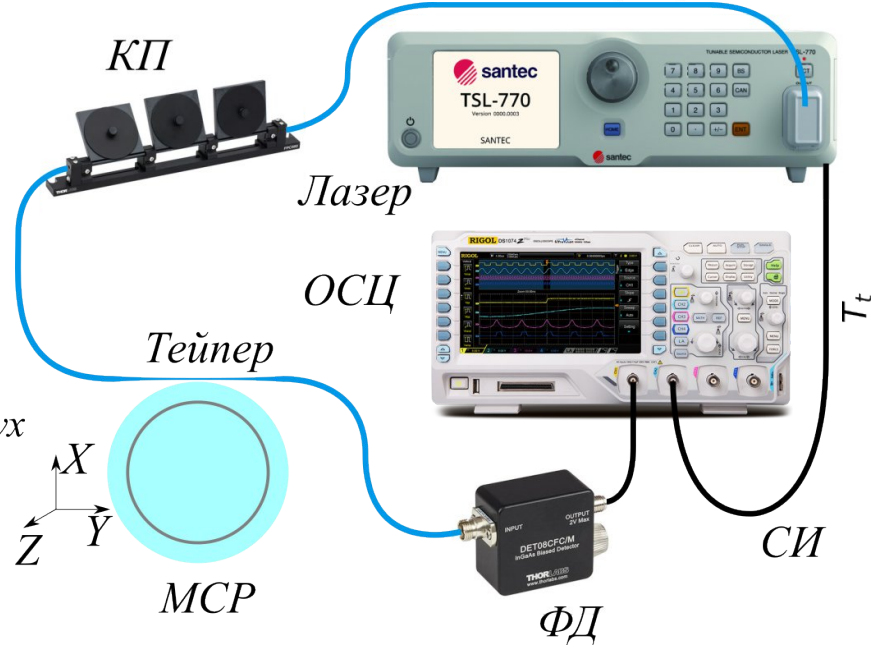
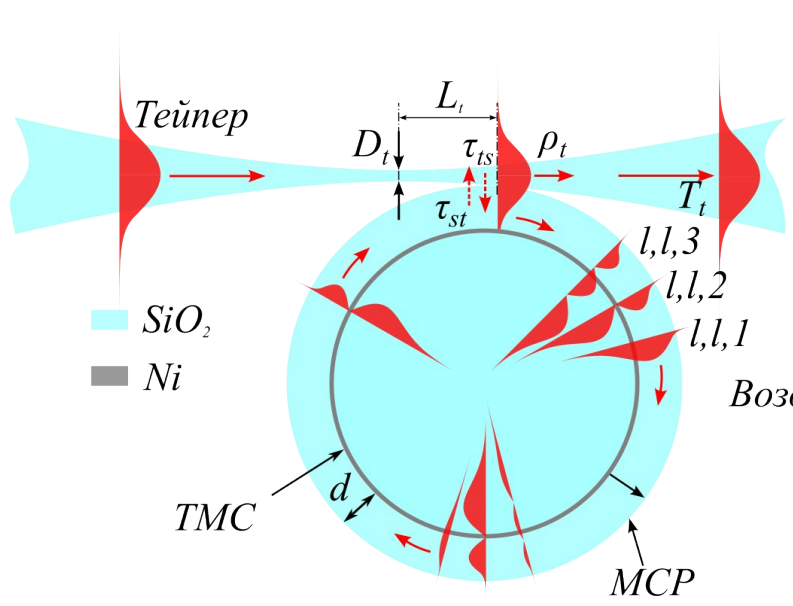
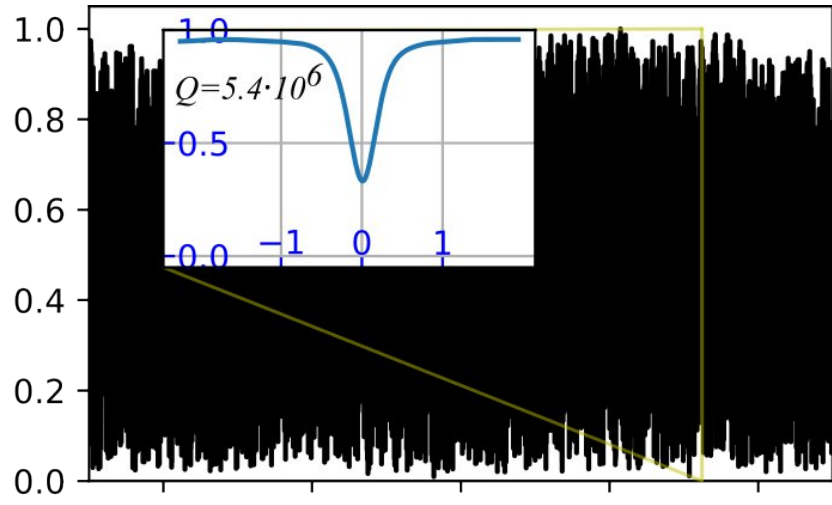
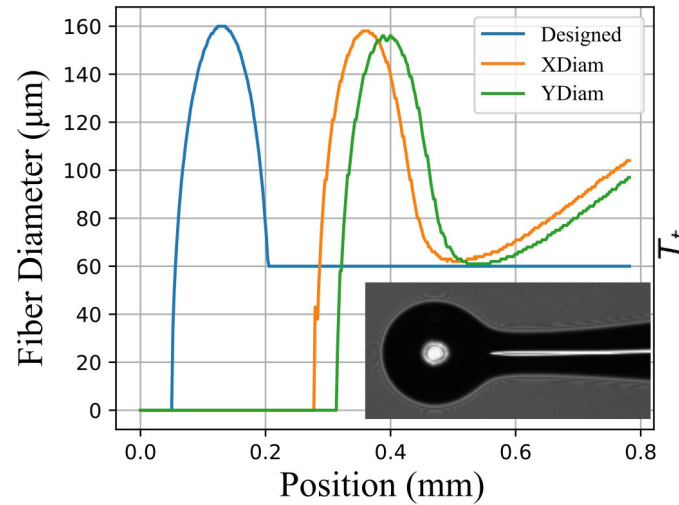
Эксперимент: одна металлическая пленка

$h_m = 3 \text{ нм}, h_{SiO_2} = 1644 \text{ нм}$

$L_t = 2.5 \text{ mm}$

Плотность резонансов 1000->10

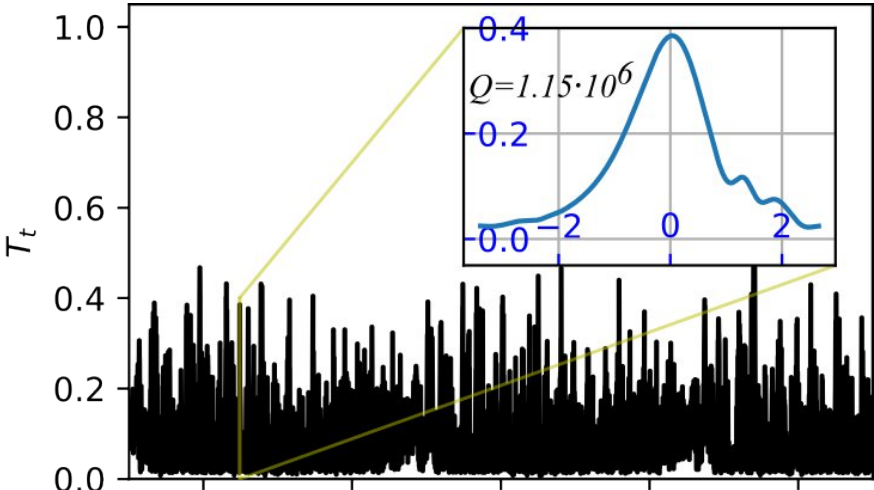
Влияние нанесения диэлектрика: $Q = 3.2 \cdot 10^6 \rightarrow 0.65 \cdot 10^6$



H.A. Rizk, V.A. Simonov, V.S. Terentyev, S.A. Babin. "Selection of whispering gallery modes in a spherical microresonator using a thin metal film".

// Optics & Laser Technology, 2026, V. 193, Part A, DOI: 10.1016/j.optlastec.2025.114146.

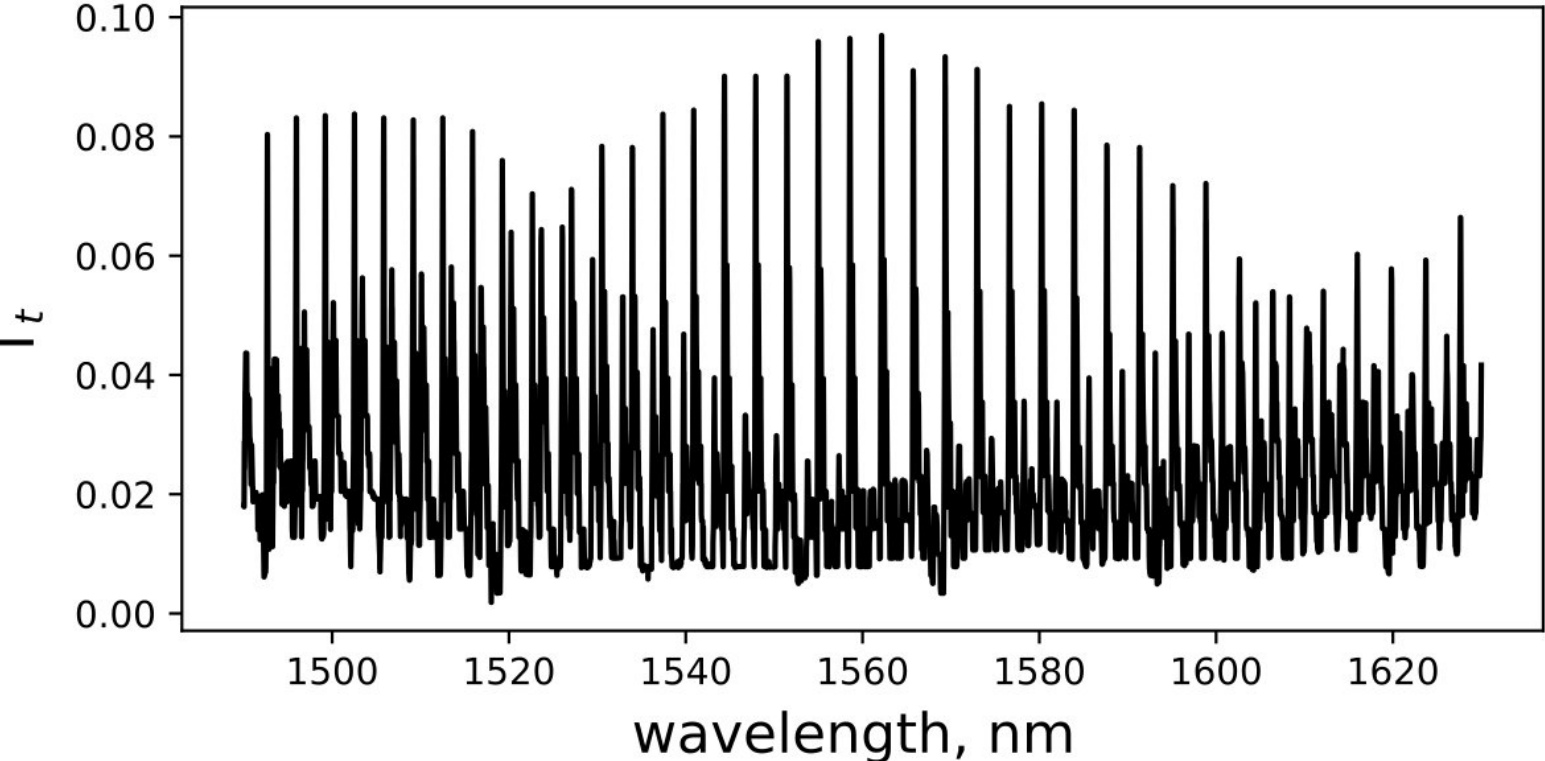
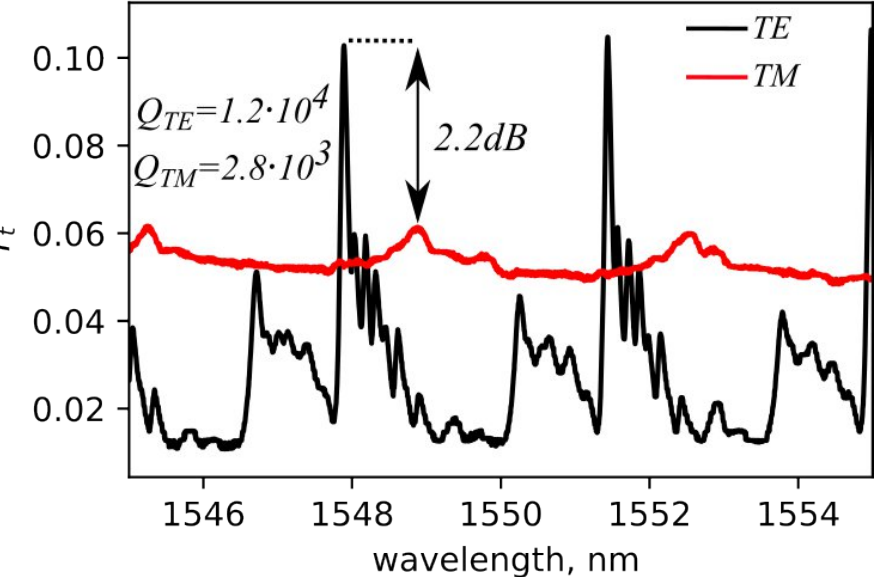
Эксперимент: спектры пропускания тейпера



$L_t = 0$ mm

Плотность резонансов 550->10

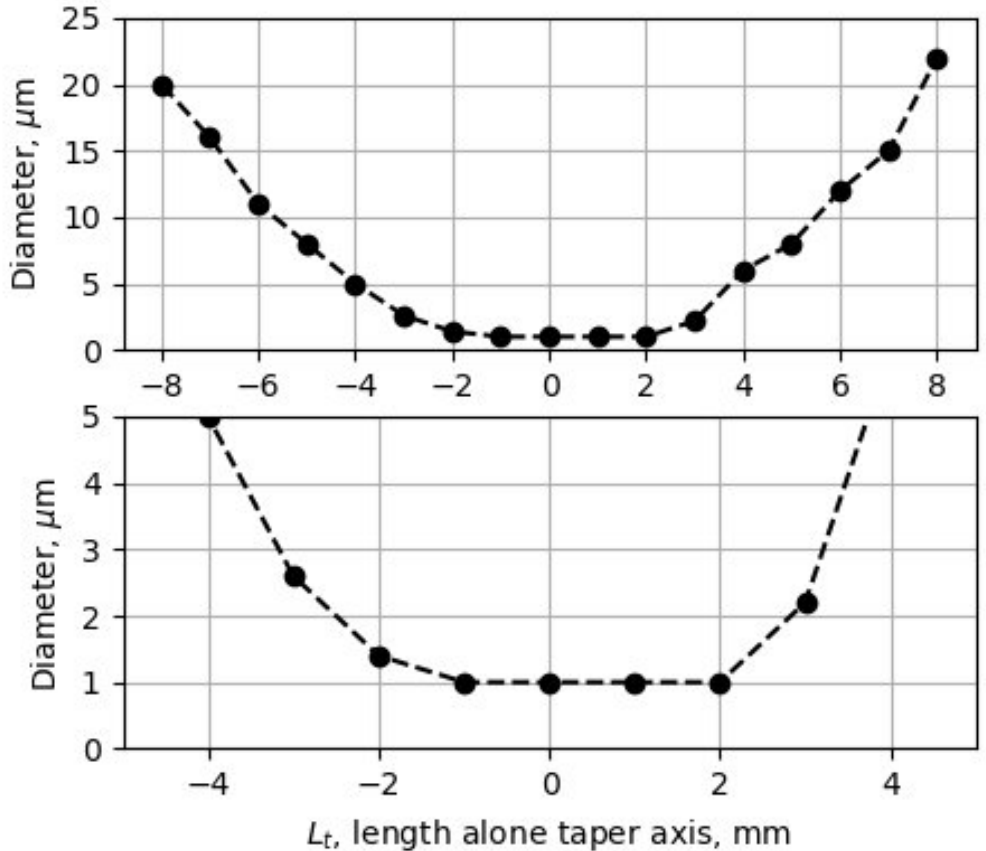
Для TM мод узлы компонент r и θ не совпадают и поле не зануляется -> Q ниже в 5 раз, соотношение 2.2 дБ



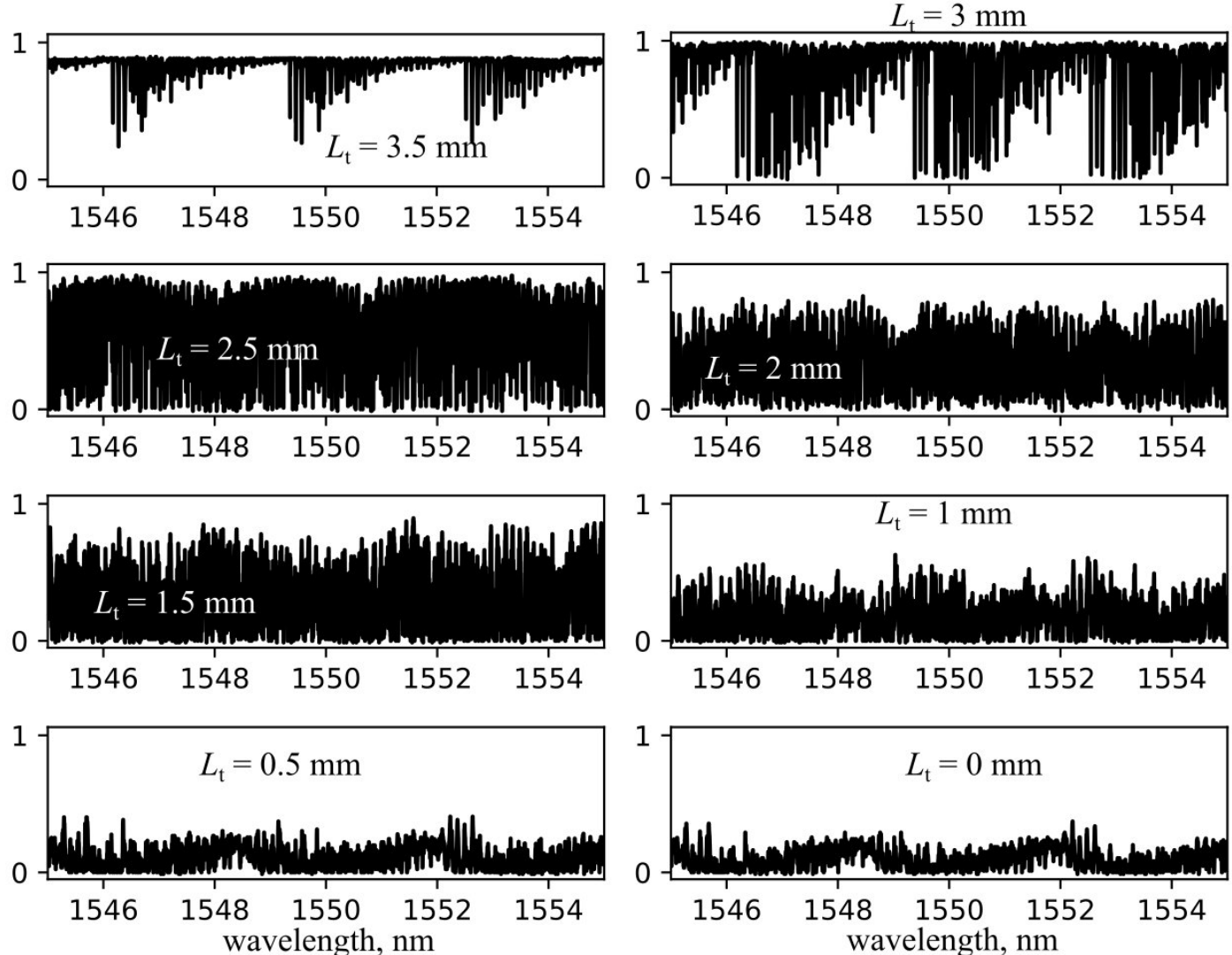
Эксперимент: обращение картины

Невозмущенная микросфера.

Зависимость пропускания тейпера от диаметра тейпера в точке касания с микросферой.



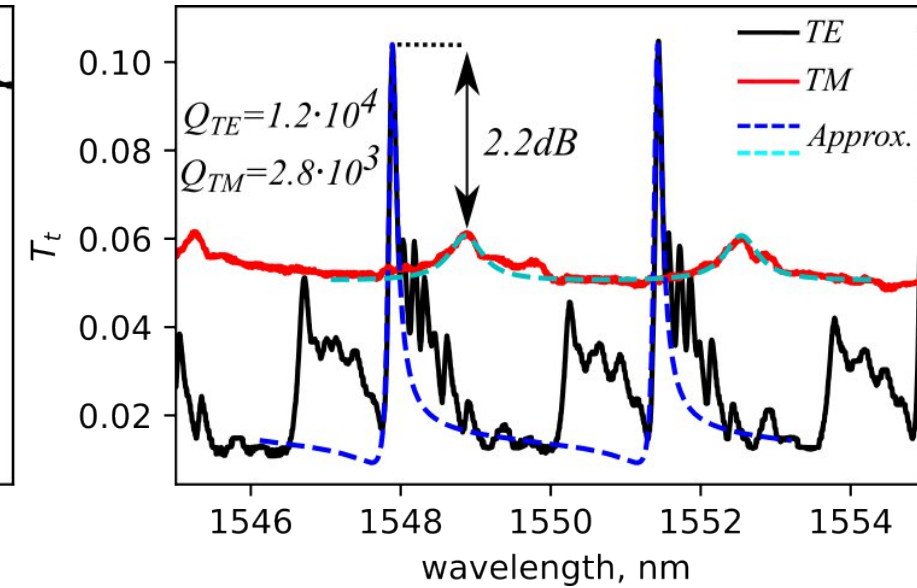
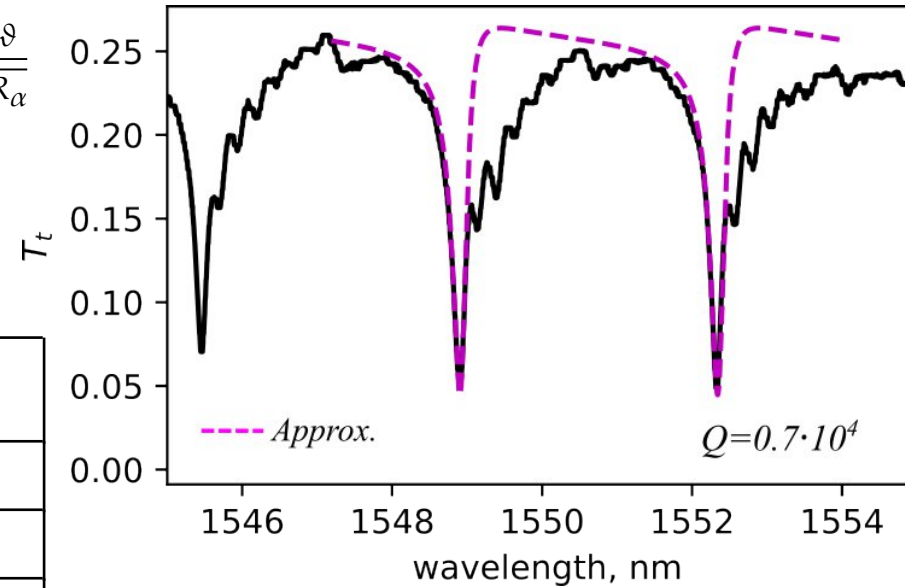
Без металлического слоя



Теоретическое описание эксперимента

$$T_t = R_t + 2T_{st}\sqrt{R_t R_\alpha} \frac{\cos(\vartheta + \varphi) - \sqrt{R_s R_\alpha} \cos \vartheta}{1 + R_s R_\alpha - 2 \cos(\varphi) \sqrt{R_s R_\alpha}} + \frac{R_\alpha T_{st}^2}{1 + R_s R_\alpha - 2 \cos(\varphi) \sqrt{R_s R_\alpha}}$$

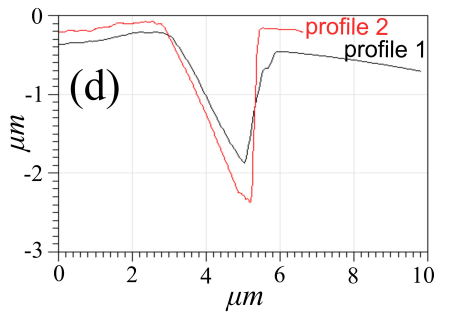
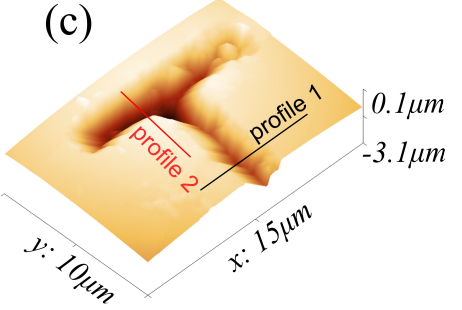
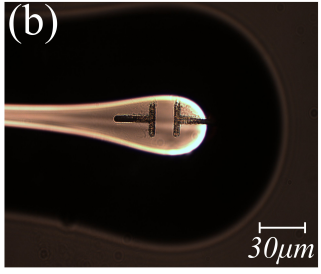
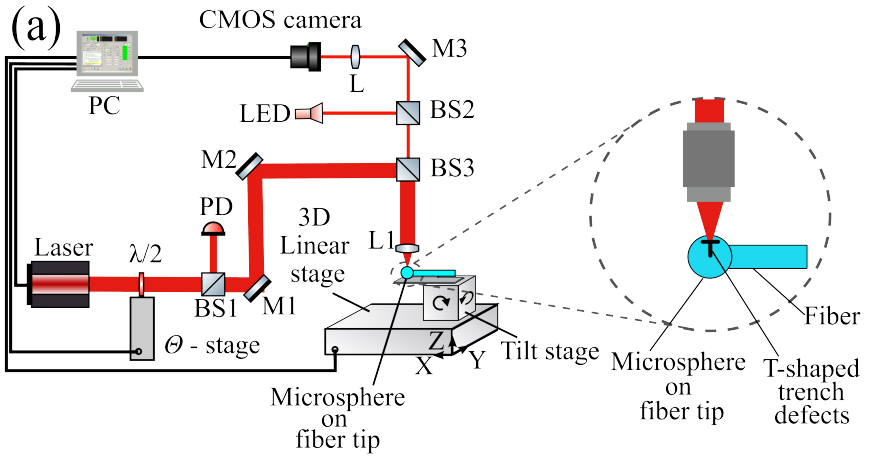
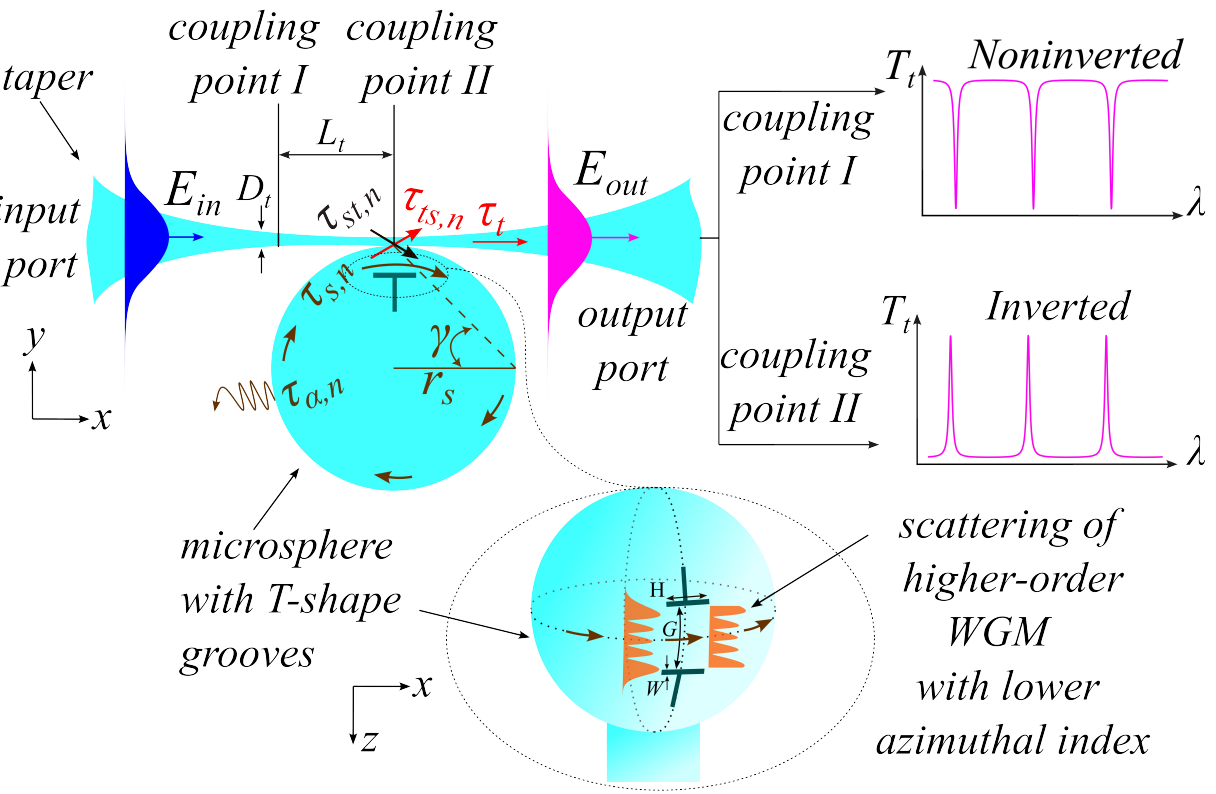
| | TE необр. | TE обр. | TM обр. |
|---------------------|------------------|------------------|------------------|
| R_t | 0.23 | 0.01 | 0.053 |
| R_s | 0.88 | 0.9 | 0.98 |
| T_{st} | 0.058 | 0.045 | 0.01 |
| R_α | 0.76 | 0.87 | 0.406 |
| L_s , МКМ | 697.58 | 678.58 | 651.44 |
| FSR , nm | 3.43 | 3.54 | 3.65 |
| α , m^{-1} | 577.99 | 277.99 | 1989.44 |
| ϑ , rad | -1.09π | -1.17π | 0 |
| Q_α | $1 \cdot 10^4$ | $2 \cdot 10^4$ | $2.9 \cdot 10^3$ |
| Q | $0.7 \cdot 10^4$ | $1.2 \cdot 10^4$ | $2.8 \cdot 10^3$ |



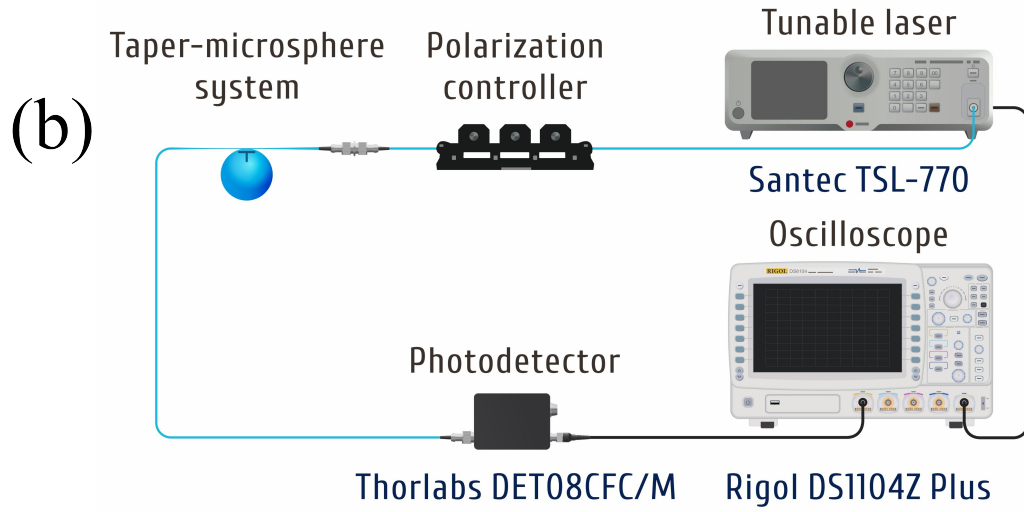
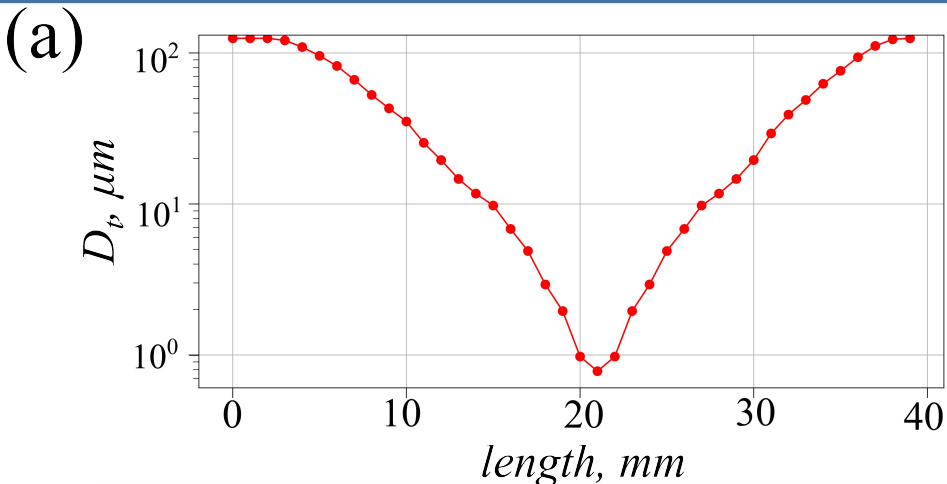
Функция типа Ами позволяет хорошо описывать как обращенные, так и необращенные резонансы в спектральных профилях пропускания МСР без решения уравнения связанных мод

Метод селекции: абляционные канавки на поверхности

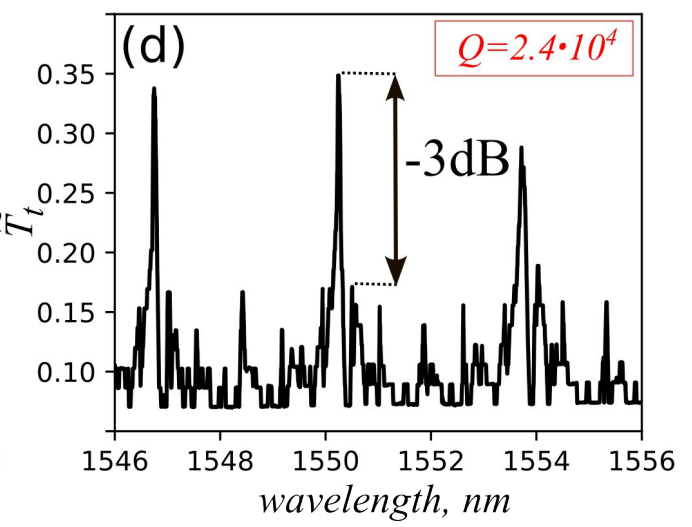
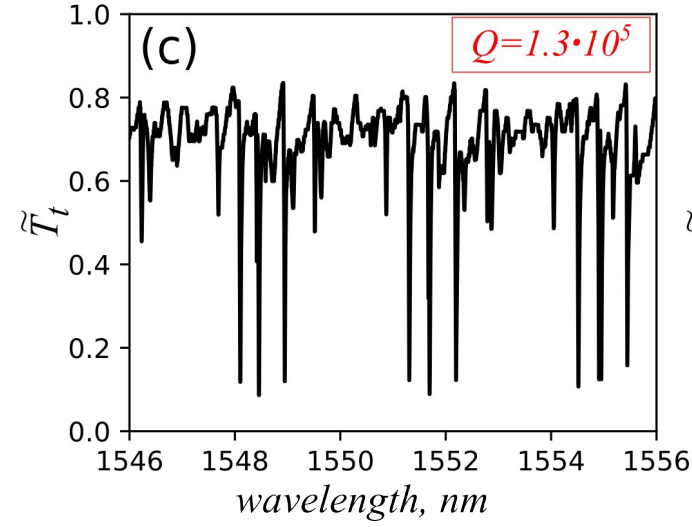
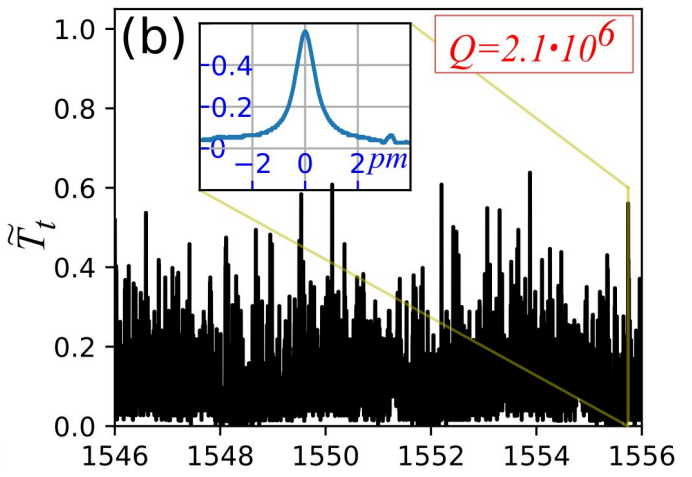
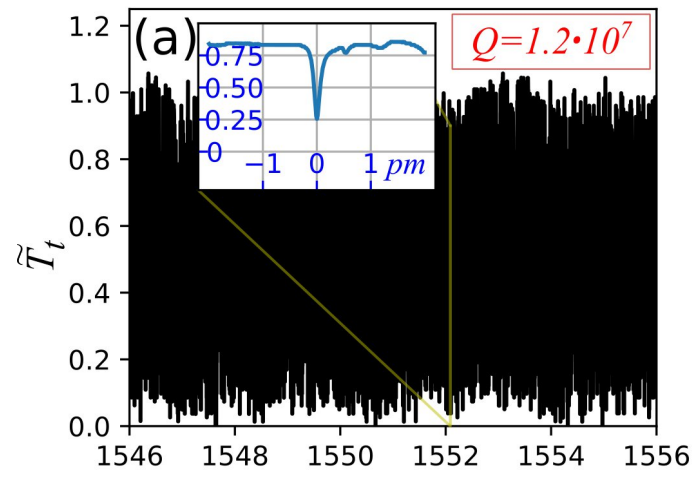
- Селекция группы мод с максимальным азимутальным индексом



Эксперимент: абляционные канавки на поверхности



Снижение плотности резонансов:

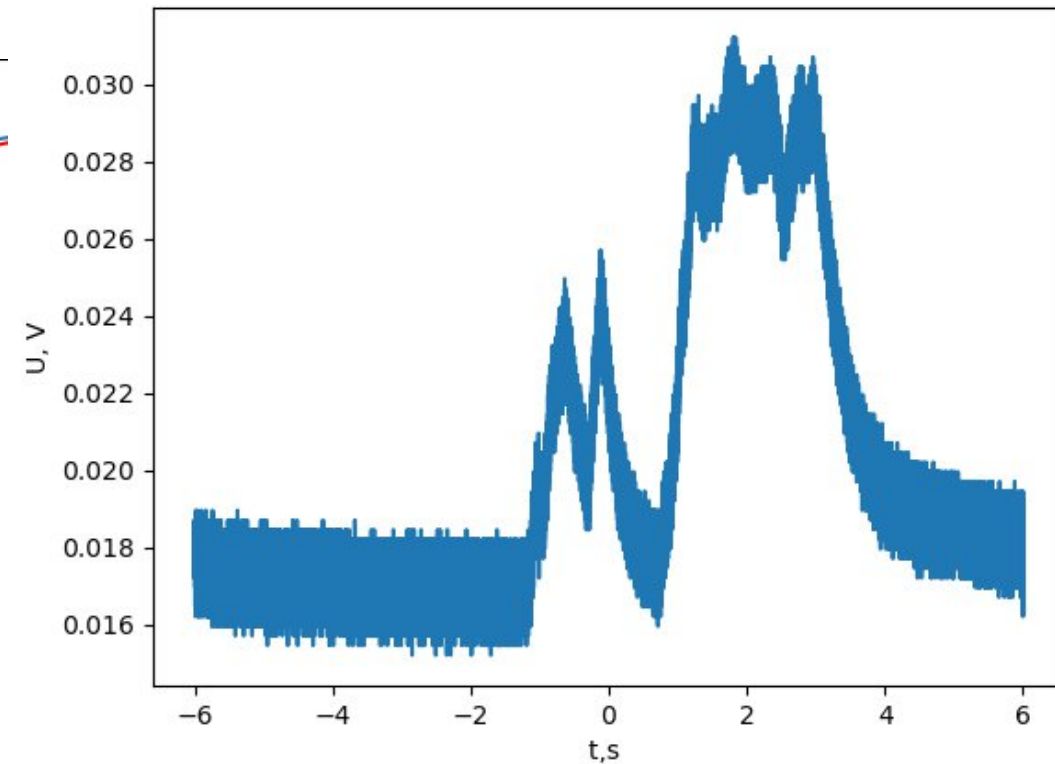
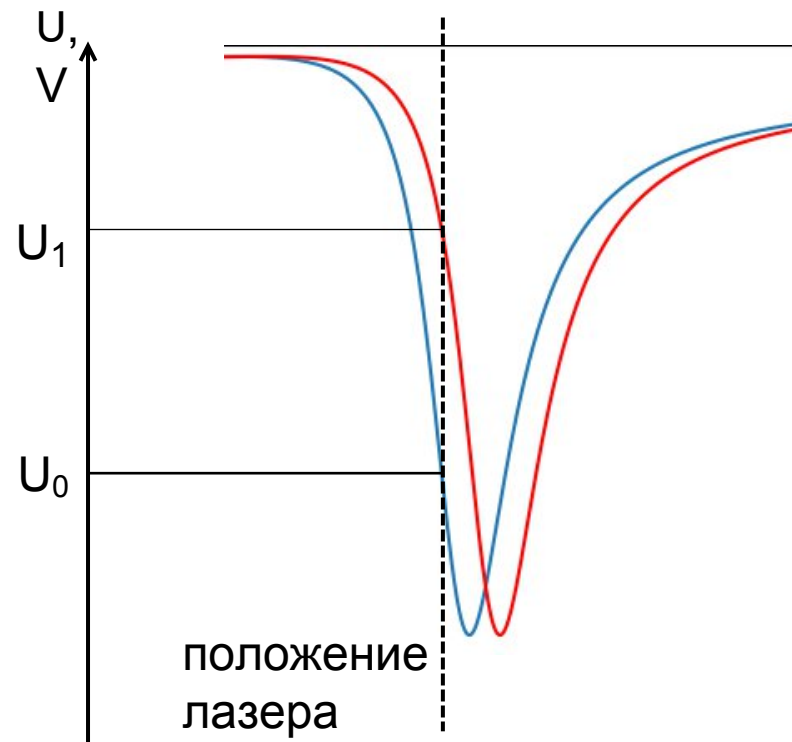


в 180 раз

в 60 раз

Зачем?

- Низкая добротность не позволяет использовать в нелинейных задачах
- Сенсорные применения: металлический слой открывает дополнительные возможности
- Меньшие требования к юстировке



Спасибо за внимание!

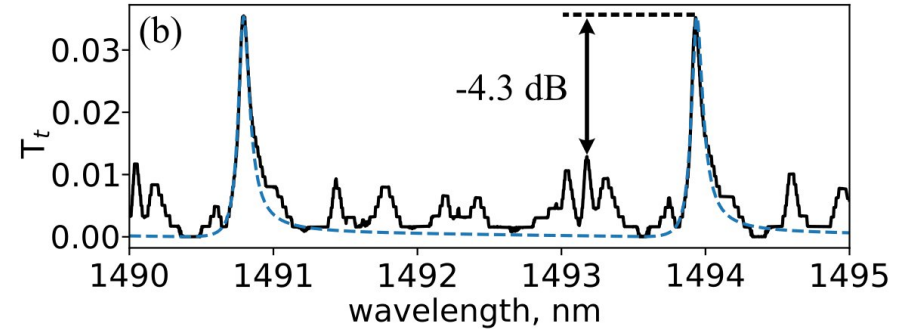
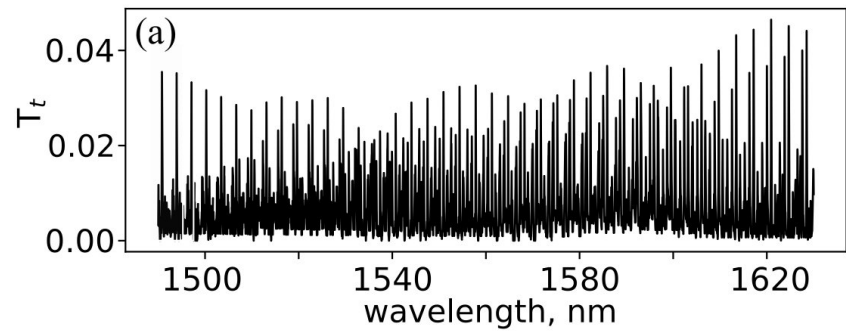
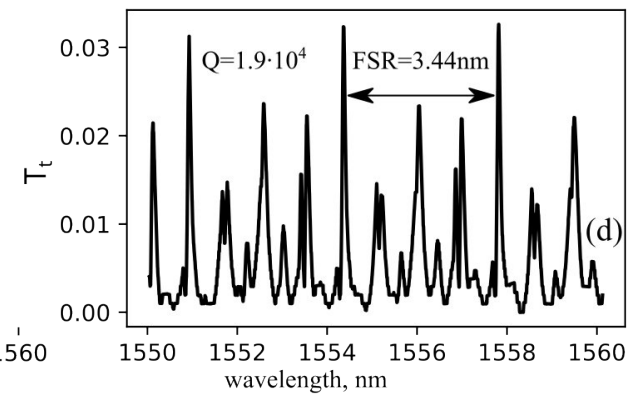
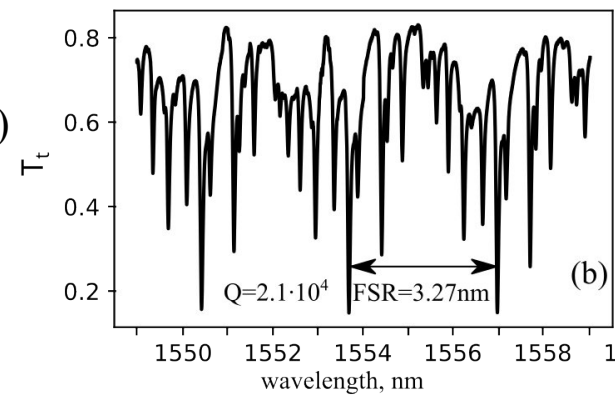
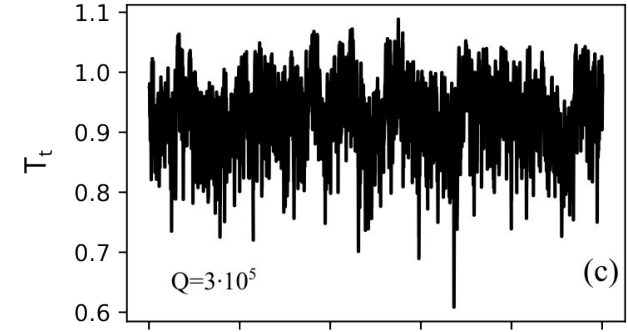
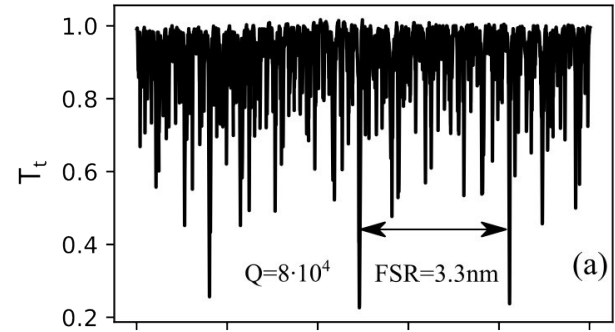
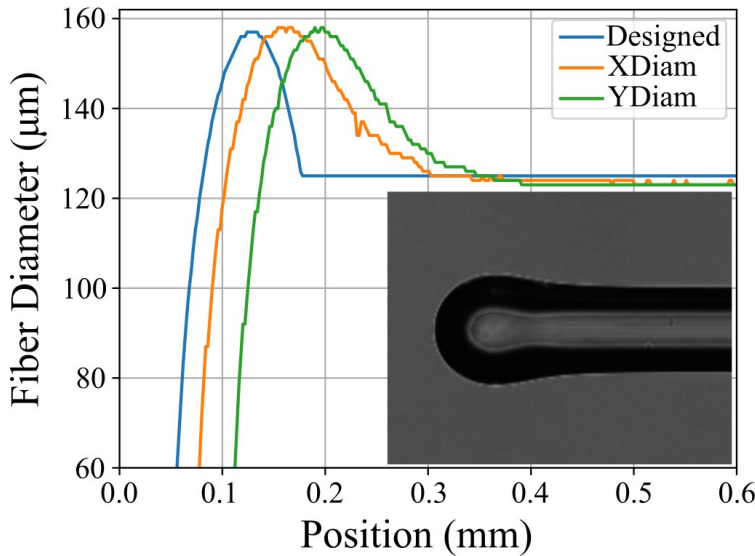
Эксперимент 2: спектры пропускания

$h_m = 2 \text{ нм}, h_{SiO_2} = 1600 \text{ нм}$

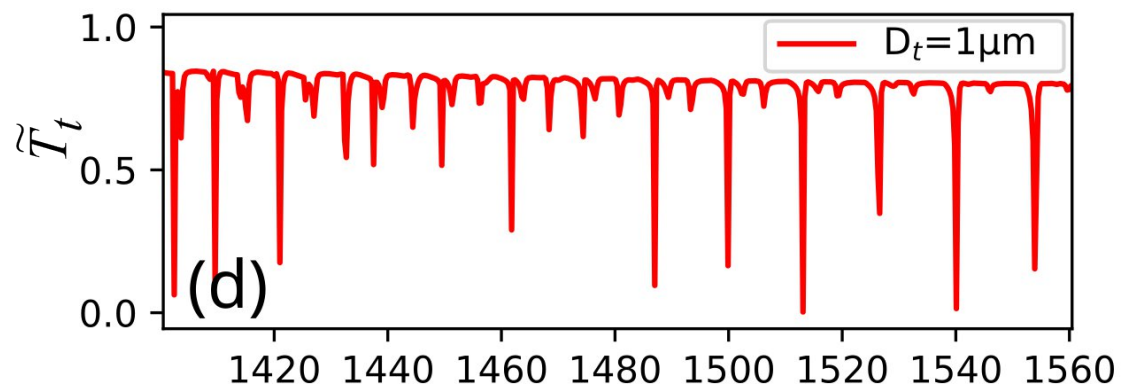
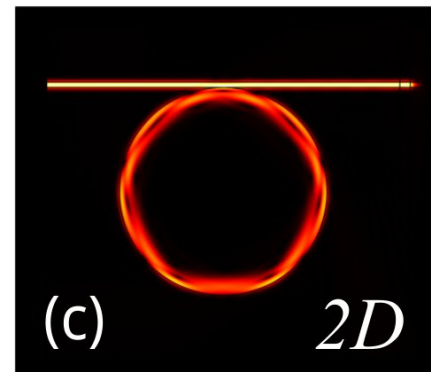
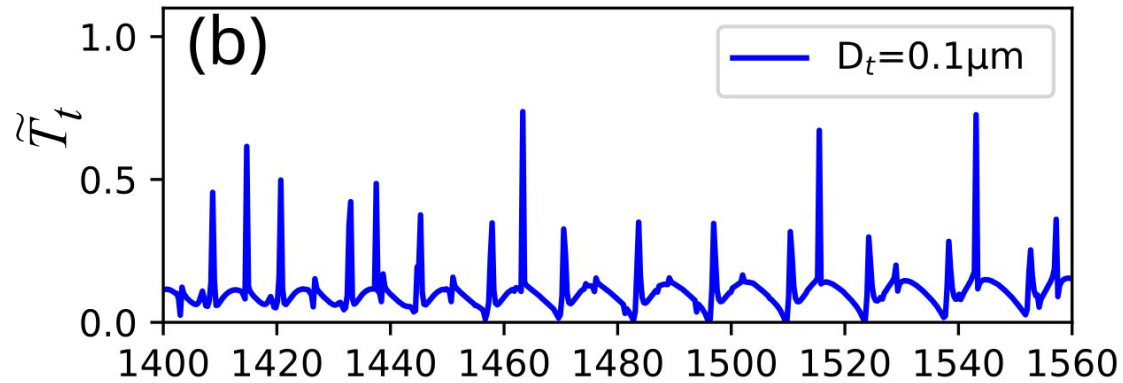
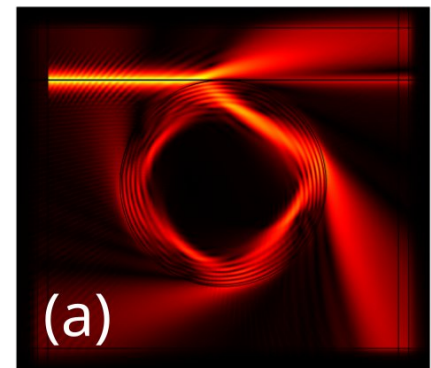
$L_t = 0 \text{ мм}$ и $L_t = 4,5 \text{ мм}$

Плотность резонансов $250 \rightarrow 10$

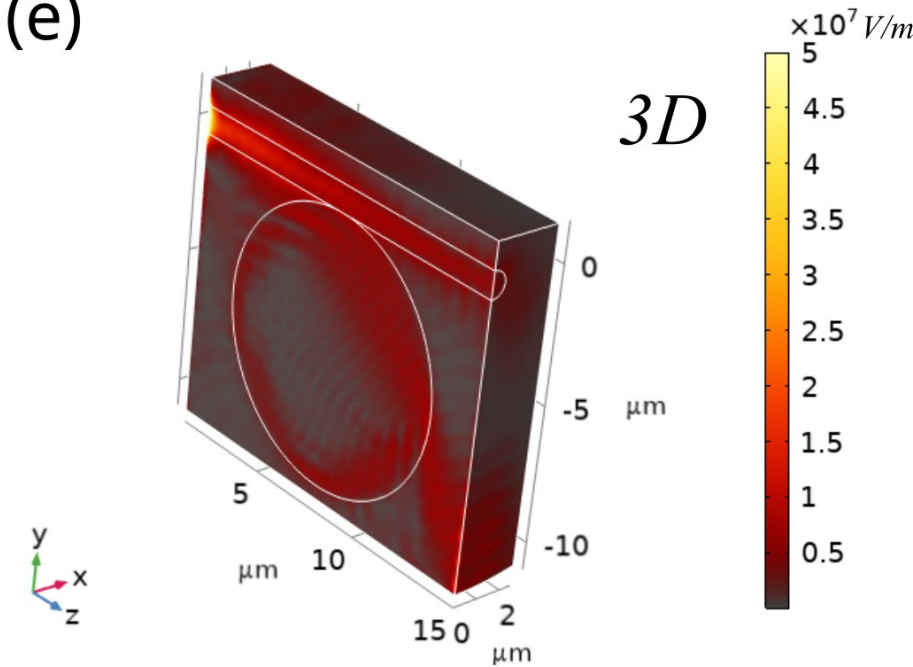
$R_t = 9 \cdot 10^{-4}, R_s = 0.967$
 $T_{st} = 0.016$
 $R_\alpha = 0.869 (\alpha = 278.52 \text{ м}^{-1})$
 $\vartheta = -1.5\pi \text{ рад}$
 $L_s = 710.2 \text{ мкм}$
 $Q_l \approx 1.63 \cdot 10^4$
 $Q_\alpha \approx 2.02 \cdot 10^4$



Почему обращается?

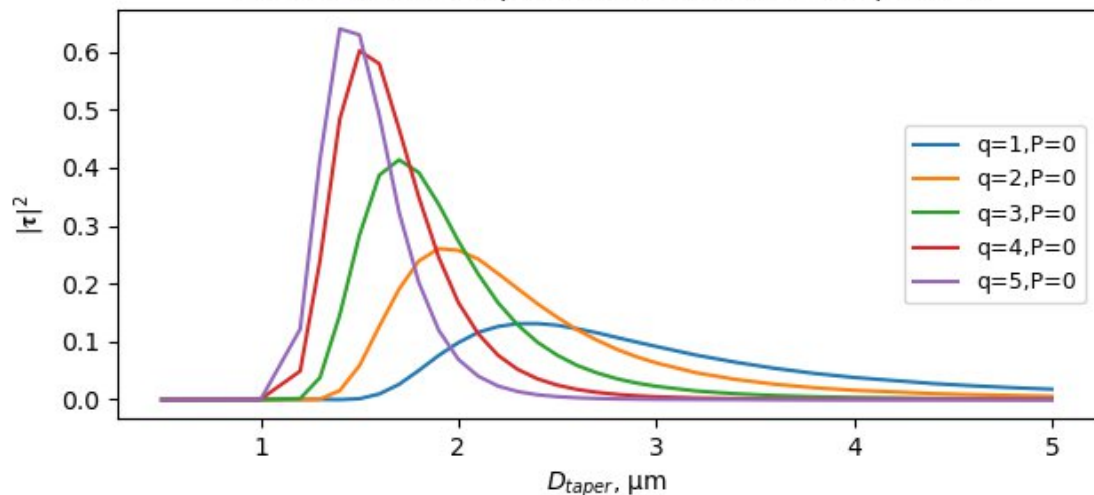


(e)



Taper diameter = $1 \mu\text{m}$
Microsphere diameter = $10 \mu\text{m}$

сила связи LP_{01} с радиальными модами при $G=0$



сила связи LP_{01} с полярными модами при $G=0$

