

Исследование диэлектриков с помощью квазиоптических резонаторов Фабри-Перро

Работу выполнили:

Платонова М.В., Сарафанов Ф.Г., Новиков А.Г.

Научный руководитель:

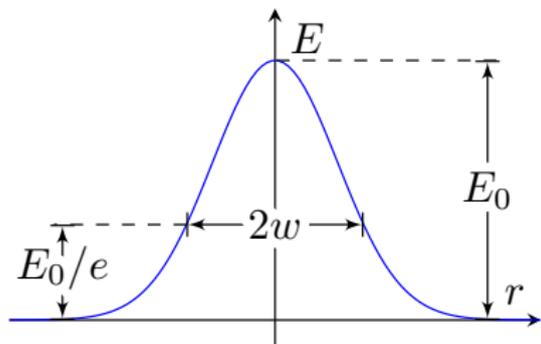
Паршин В.В.

Нижний Новгород – 2018

Цели работы

- Исследовать распространение гауссовых пучков в открытом резонаторе Фабри-Перро
- Рассмотреть применение открытых резонаторов для исследования свойств диэлектриков
- Измерить показатель преломления диэлектрической пластины (в качестве пластины – алмазное окно гиратрона) и тангенс угла диэлектрических потерь

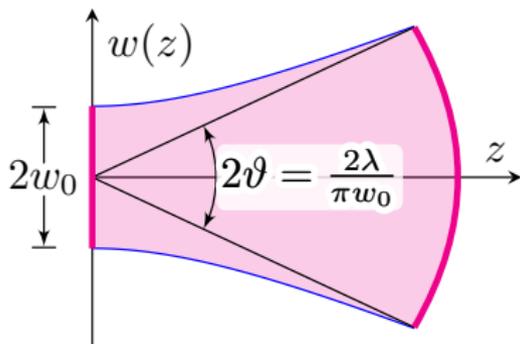
Распределение поля в гауссовом пучке



Поперечное распределение

$$E(r) = E_0 \exp \left[-\frac{r^2}{w^2} \right]$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right]$$

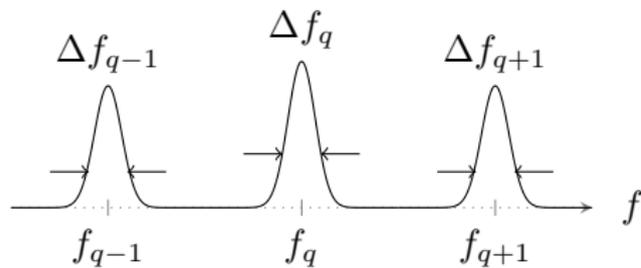


Продольное распределение

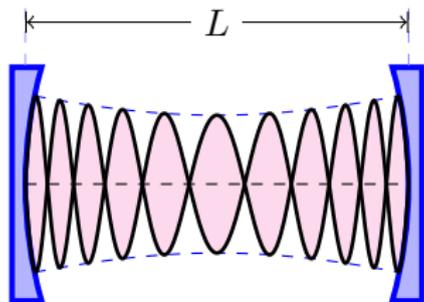
$$w^2(z) = w_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]$$

$$\Phi(z) = \arctg \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)$$

Открытый резонатор Фабри-Перро



Резонансные частоты

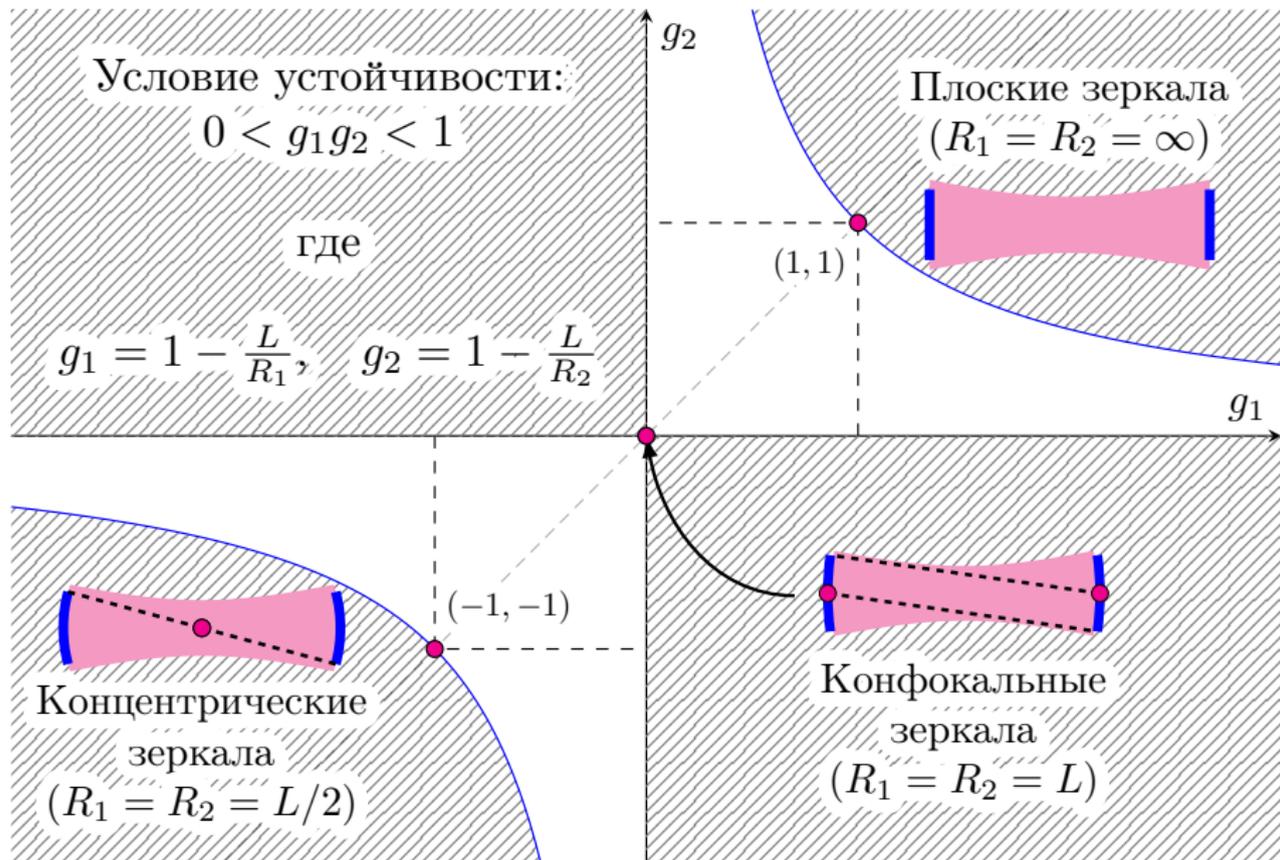


Узлы стоячей волны

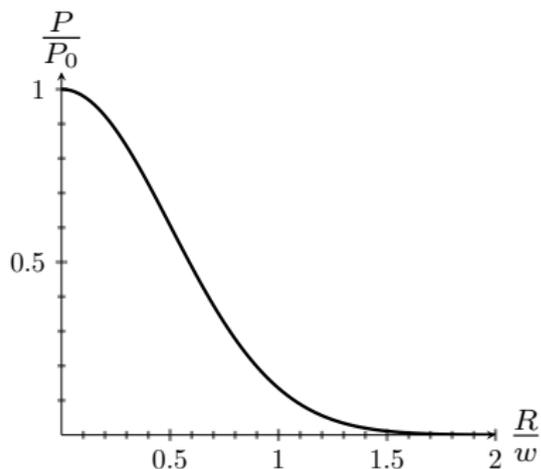
$$L_{\text{рез}} = \underbrace{\frac{\lambda q}{2}}_{q - \text{кол-во полуволн}} + \underbrace{\frac{\lambda}{2\pi} \arccos\left(1 - \frac{L}{R}\right)}_{\text{увеличение расстояния между нулями в гауссовом пучке}} - \underbrace{\frac{\lambda^2}{8\pi^2 R}}_{\text{учет несферичности волнового фронта}}$$

$$f_{\text{рез}} = \frac{c}{2L} \cdot \left[q + \frac{1}{\pi} \arccos\left(1 - \frac{L}{R}\right) \right]$$

Диаграмма устойчивости резонатора



Потери в резонаторе



Дифракционные потери

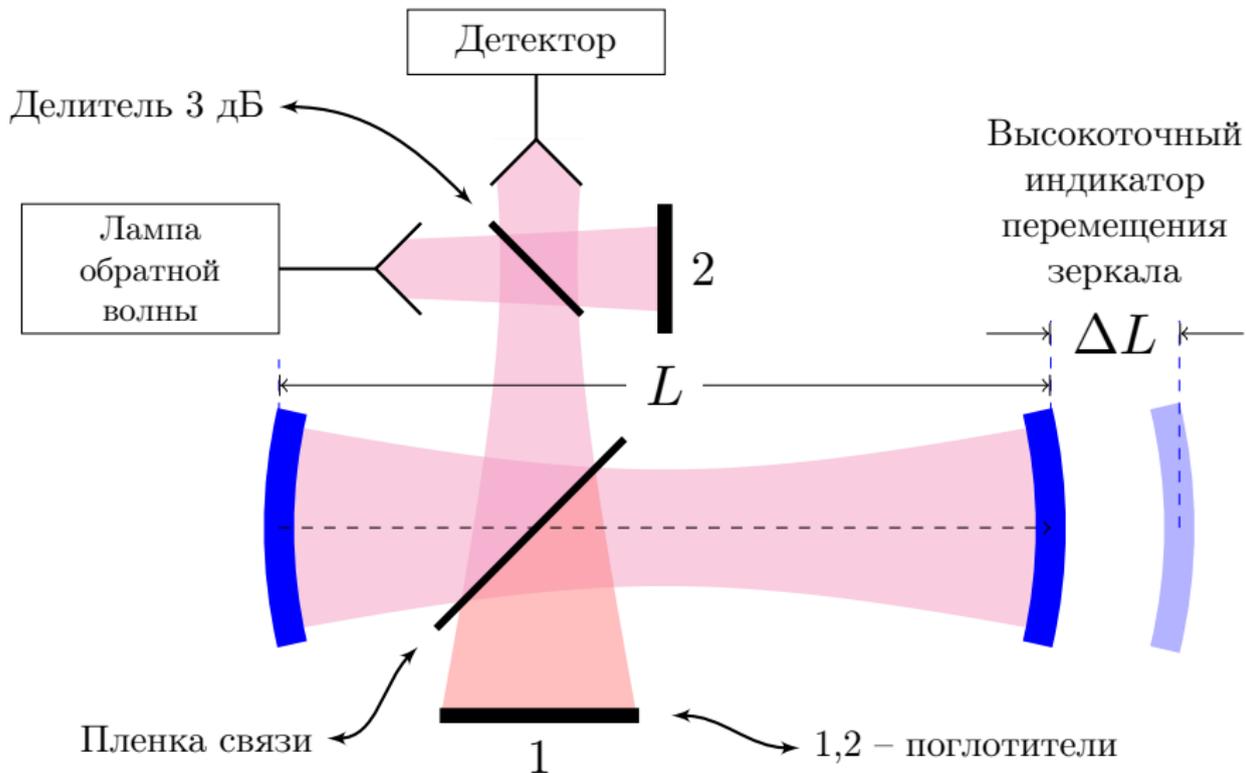
$$P_{\text{диф}} = P_0 \exp\left(-\frac{2R^2}{w^2}\right)$$

| | | | |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| $P_{\text{диф}}/P_0$ | 10^{-1} | 10^{-3} | 10^{-5} |
| R/w | 1.07 | 1.86 | 2.4 |

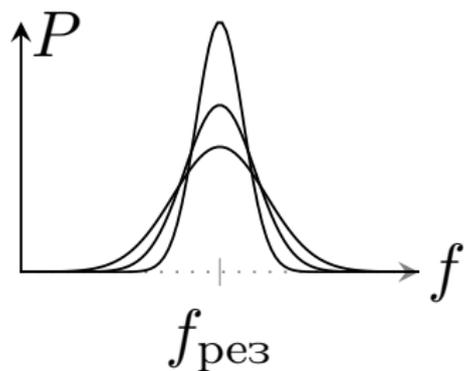
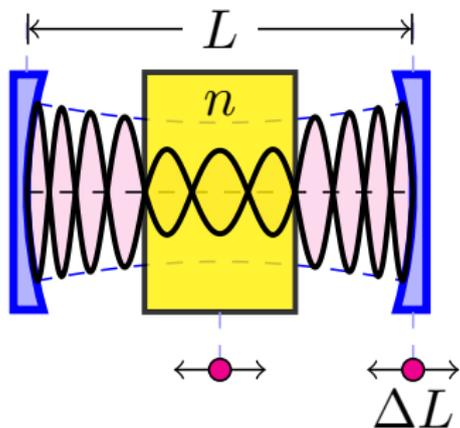
$$P_{\Sigma} = (P_{\text{связи}} + P_{\text{зерк}}) + P_{\text{зап}} + \cancel{P_{\text{диф}}}$$

- Дифракционные потери можно сделать пренебрежимо малыми
- Собственные потери резонатора можно найти в ненагруженном режиме

Схема экспериментальной установки



Поиск резонансной частоты



- Приблизительно отцентровали диэлектрик на оси резонатора
- Одновременно перестраивая пределы свипа по частоте источника и изменяя длину резонатора, нашли резонансную частоту, при которой смещение диэлектрика не вызывает смещения резонансного пика

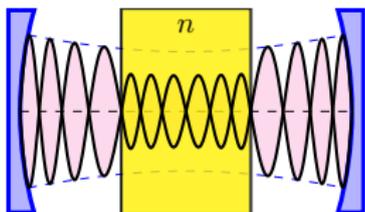
Расчет показателя преломления

$$\begin{cases} t \cdot n = \frac{q_d \lambda_1}{2} \\ t \cdot n = \frac{(q_d + 1) \lambda_2}{2} \end{cases} \Rightarrow q_d = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

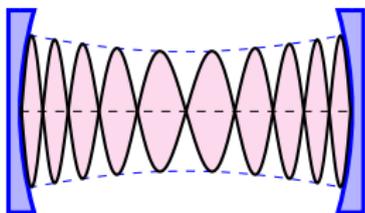
$$\begin{cases} L_{\text{рез1}} = \frac{\lambda(q + q_d/n)}{2} + \frac{\lambda}{2\pi} \arccos \left(1 - \frac{L_{\text{рез1}}}{R} \right) \\ L_{\text{рез2}} = \frac{\lambda(q + q_d)}{2} + \frac{\lambda}{2\pi} \arccos \left(1 - \frac{L_{\text{рез2}}}{R} \right) \end{cases}$$

$$n = q_d \left[q_d - \frac{2\Delta L}{\lambda} + \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left(1 - \frac{L_{\text{рез1}}}{R} \right) - \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left(1 - \frac{L_{\text{рез2}}}{R} \right) \right]^{-1}$$

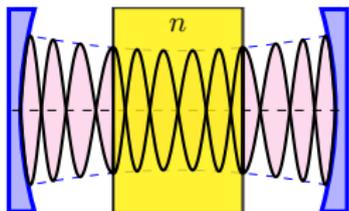
Измерение угла диэлектрических потерь



Измерение Δf_-



Измерение Δf_0



Измерение Δf_+

Упрощённый расчет $\tan \delta$:

$$\tan \delta = \frac{L \cdot (\Delta f_- - \Delta f_0)}{t f}$$

$$\tan \delta = \frac{L \cdot (\Delta f_+ - \Delta f_0)}{t f n^2}$$

$$\tan \delta = \frac{L \cdot (\Delta f_+ - \Delta f_-)}{t f (n^2 - 1)}$$

Тройное измерение дает
относительную точность $\sim 10\%$

Выводы

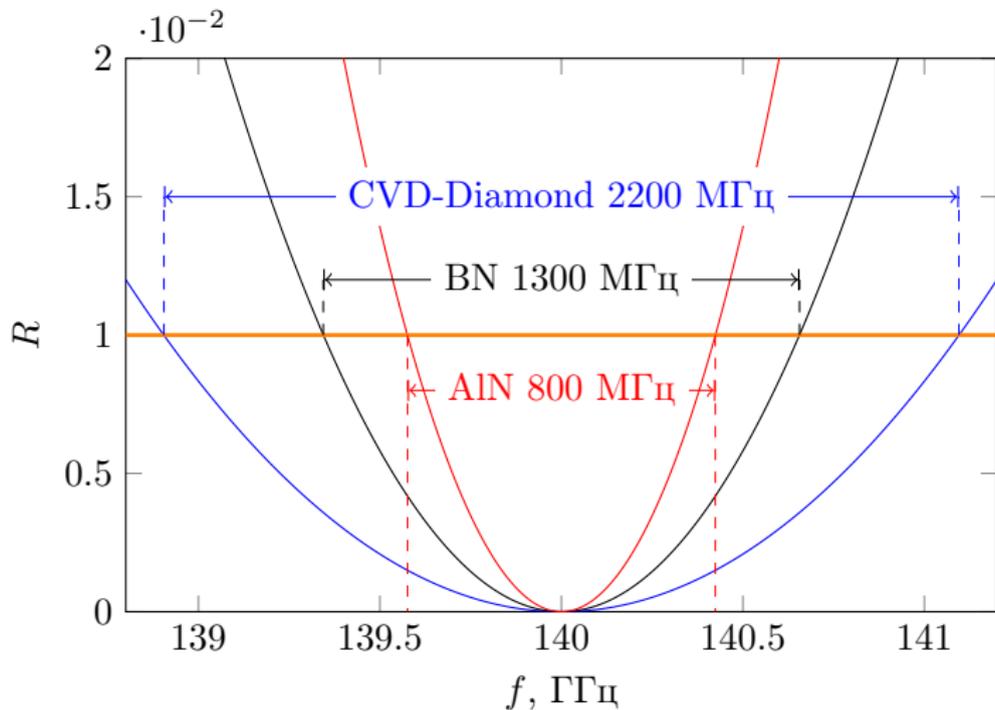
- Рассмотрен гауссов пучок и его распространение в открытом резонаторе Фабри-Перро
- Резонансным методом определен показатель преломления алмазного окна $n = 2.38$ и тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta = 9.7 \cdot 10^{-6}$
- Определена резонансная частота окна $f_{\text{рез}} = 139853$ МГц
- Рассчитано, насколько нужно изменить толщину окна t , чтобы оно стало резонансным на частоте $f = 140$ ГГц:
 $\Delta t = -1.7$ мкм

Спасибо за внимание!

Презентация подготовлена в издательской
системе LaTeX с использованием пакетов
PGF/TikZ и Beamer

$$I = I_0 \cdot \exp \left[\frac{-2r^2}{w^2} \right]$$

$$\begin{aligned} P_{\text{диф}} &= \int_{r>R} I(r) \cdot dS = [dS = 2\pi r dr] = \int_R^{\infty} I_0 \cdot \exp \left[\frac{-2r^2}{w^2} \right] 2\pi r dr = \\ &= \pi I_0 \int_{R^2}^{\infty} \exp \left[\frac{-2r^2}{w^2} \right] d[r^2] = \left[x = \left[\frac{-2r^2}{w^2} \right] \right] = \\ &= \frac{-\pi I_0 w^2}{2} \int_{-2R^2/w^2}^{-\infty} e^x dx = \\ &= \frac{\pi I_0 w^2}{2} \exp \left(-\frac{2R^2}{w^2} \right) = P_0 \exp \left(-\frac{2R^2}{w^2} \right) \end{aligned}$$



Допуск по частоте для разных материалов при допустимом отражении 0.01