

# Исследование диэлектриков с помощью квазиоптических резонаторов Фабри-Перро

Работу выполнили:

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

Научный руководитель:

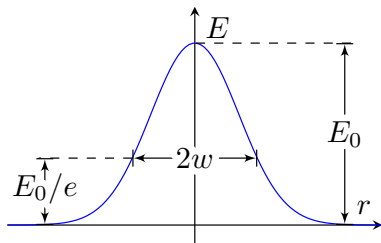
Паршин В.В.

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

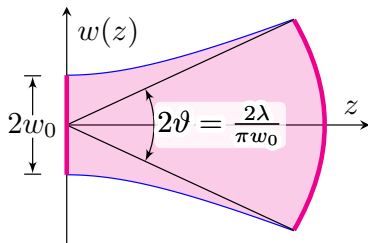
# Распределение поля в гауссовом пучке



Поперечное распределение

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

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

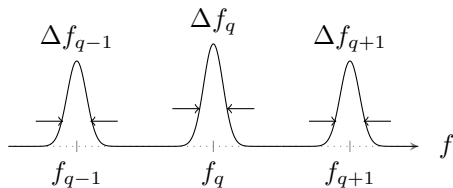


Продольное распределение

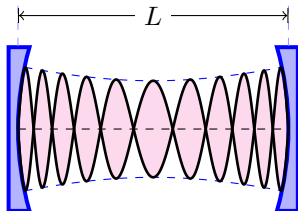
$$w^2(z) = w_0^2 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]$$

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

# Открытый резонатор Фабри-Перро



Резонансные частоты

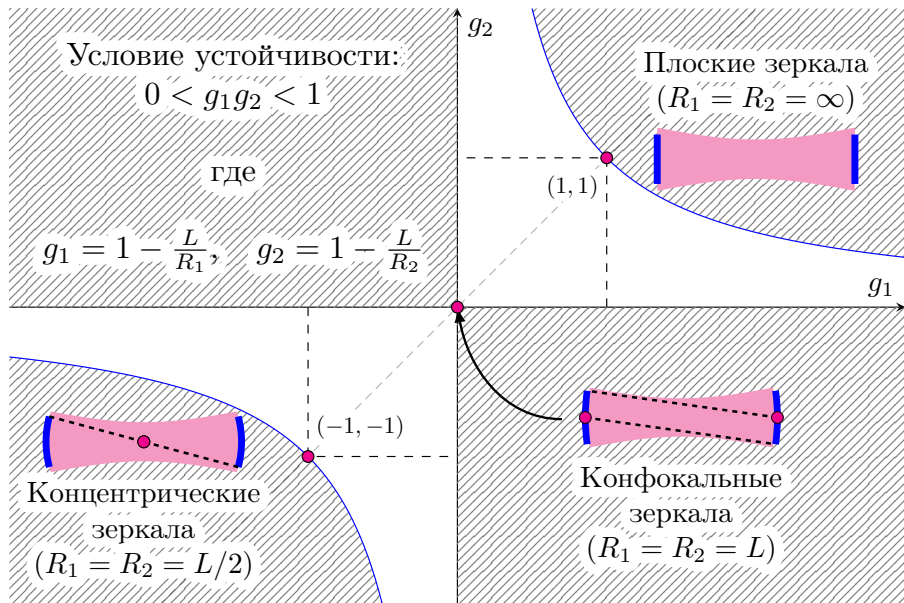


Узлы стоячей волны

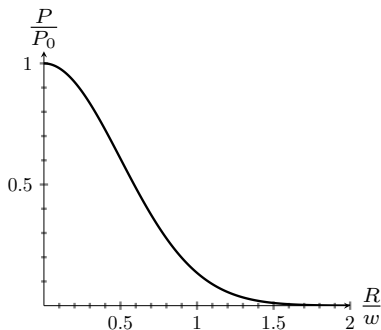
$$L_{\text{рез}} = \underbrace{\frac{\lambda q}{2}}_{\substack{q - \text{кол-во} \\ \text{полуволн}}} + \underbrace{\frac{\lambda}{2\pi} \arccos \left( 1 - \frac{L}{R} \right)}_{\substack{\text{увеличение расстояния} \\ \text{между нулями} \\ \text{в гауссовом пучке}}} - \underbrace{\frac{\lambda^2}{8\pi^2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

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

# Диаграмма устойчивости резонатора



# Потери в резонаторе



Дифракционные потери

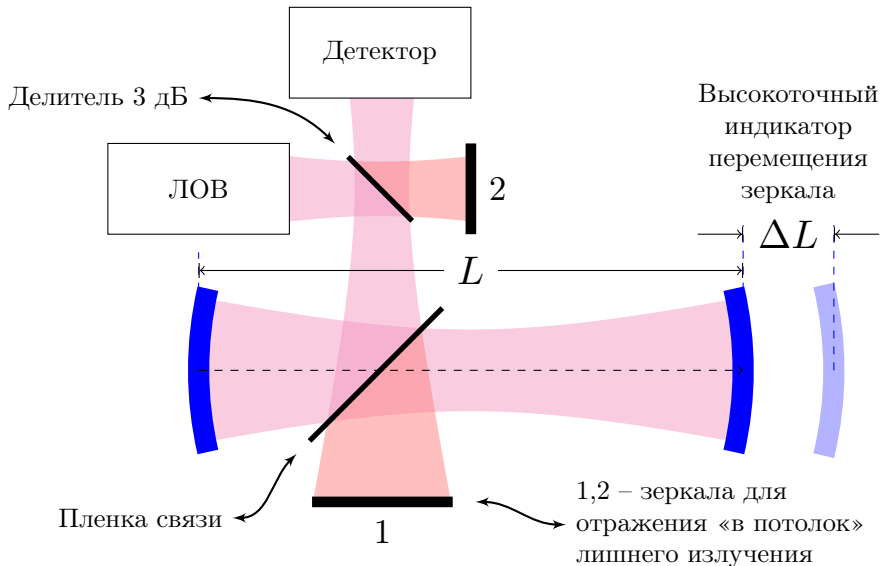
$$P_{\text{диф}} = P_0 \exp\left(-\frac{2R^2}{w^2}\right)$$

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

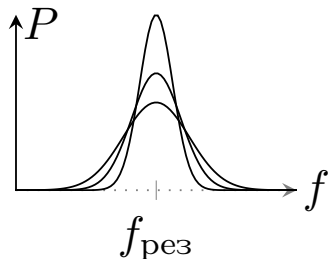
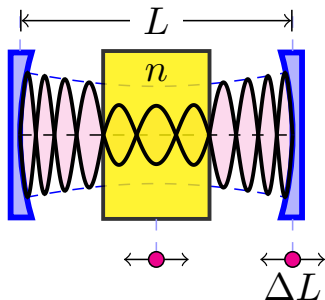
$$P_{\Sigma} = (P_{\text{связи}} + P_{\text{зерк}}) + P_{\text{зап}} + \cancel{P_{\text{диф}}}$$

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

# Схема экспериментальной установки



# Поиск резонансной частоты



- Приблизительно отцентрировали 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

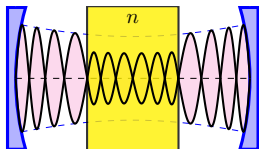
$$\begin{cases} t \cdot n = \frac{q_d \lambda_1}{2} \\ t \cdot n = \frac{(q_d + 1) \lambda_2}{2} \end{cases} \Rightarrow q_d = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

$$L_{\text{pez1}} = \frac{\lambda(q + q_d/n)}{2} + \frac{\lambda}{2\pi} \arccos \left( 1 - \frac{L_{\text{pez1}}}{R} \right)$$

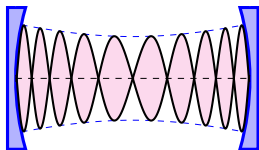
$$L_{\text{pez2}} = \frac{\lambda(q + q_d)}{2} + \frac{\lambda}{2\pi} \arccos \left( 1 - \frac{L_{\text{pez2}}}{R} \right)$$

$$n = q_d \left[ q_d - \frac{2\Delta L}{\lambda} + \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left( 1 - \frac{L_{\text{pez1}}}{R} \right) - \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left( 1 - \frac{L_{\text{pez2}}}{R} \right) \right]^{-1}$$

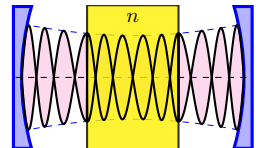
# Измерение угла потерь



Измерение  $\Delta f_-$



Измерение  $\Delta f_0$



Измерение  $\Delta f_+$

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

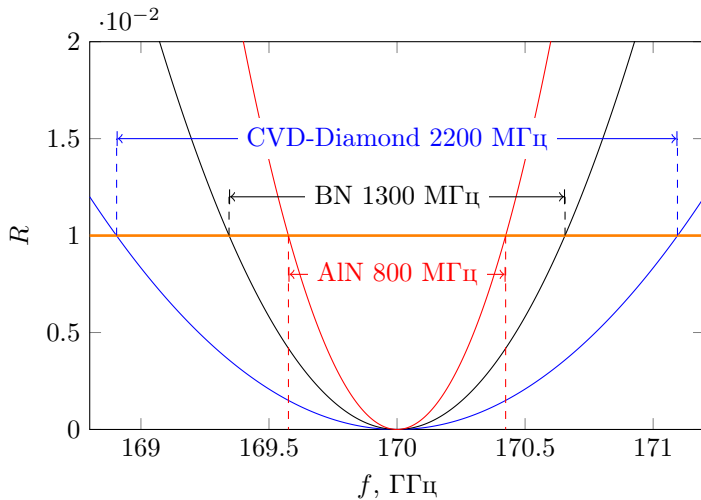
- Рассмотрен гауссов пучок и его распространение в открытом резонаторе Фабри-Перро
- Резонансным методом определен показатель преломления алмазного окна  $n = 2.3810$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\tan \delta = 9.15 \cdot 10^{-5}$
- Найдена резонансная частота окна  $f_{\text{рез}} = 139853.43$  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

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

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



Допуск по частоте для разных материалов при допустимом отражении 0.01