

## 对于法布里珀罗腔的一些认识

### 引言

法布里珀罗腔 (Fabry-Perot cavity) 是一种光学腔, 它是由两个平行的反射面组成, 中间有一层透明介质。法布里珀罗腔可以用来构建各种光学器件, 如光栅、光谱仪、激光器等。

这种光学腔的特点是能够产生多条干涉线, 其中最明显的是中央干涉线。当光线穿过法布里珀罗腔时, 其中一条光线会在两个反射面之间反复反射, 而另一条光线则直接穿过腔体。这两条光线的相位差会导致干涉现象, 使得光强度在腔内呈现出波动。

法布里珀罗腔的长度是指两个反射面间的距离, 它与腔内光波的波长有关。当腔长与光波的波长的整数倍相等时, 干涉线会出现最大的光强。这种现象被称为谐振现象。

法布里珀罗腔的工作原理是基于干涉现象的, 因此其精度取决于反射面的平整度和光波的波长。如果反射面不平整, 则干涉线会受到影响, 导致精度降低。如果光波的波长有很大的波动, 则干涉线的形态也会受到影响, 导致精度降低。

法布里珀罗腔的精度可以通过提高反射面的平整度和稳定光波的波长来提高。此外, 法布里珀罗腔的精度还受到温度的影响, 因为温度的变化会导致介质的折射率变化, 从而影响干涉线的形态。

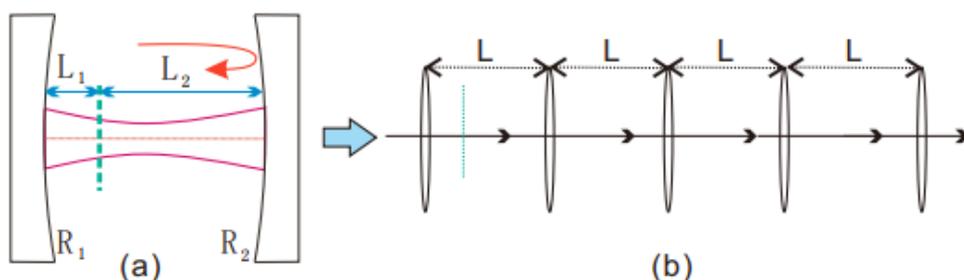


图 2.1 (a) 激光谐振腔示意图, 最基本的光学谐振腔由两个镀有高反膜的球面反射镜相对放置组成,  $R_1, R_2$  为两面腔镜的曲率半径,  $L_1, L_2$  为参考面到两个镜面中心的距离。(b) 将激光谐振腔等效为透镜阵列示意图, 其中  $L = L_1 + L_2$ 。

### 法布里珀罗干涉的基本光学原理

法布里-珀罗干涉仪中心部分为两块表面镀层的平面镜  $G_1, G_2$ , 其相对的面平行且具有高反射率, 光从  $G_1$  左表面射入, 在两平面间产生多次反射, 从而产生一系列强度逐次变减弱, 相位均匀变化的干涉光。

设两平面镜距离为  $L$ , 与空气之间振幅透射率为  $t$ , 振幅反射率为  $r$ , 入射光振幅为  $A$ , 在两个无镀层界面的损耗忽略不计。

计算得透射光振幅:

$$U_1 = Atte^{i\frac{\theta}{2}}$$

$$U_2 = Atr^2t \cdot e^{i\theta} e^{i\frac{\theta}{2}}$$

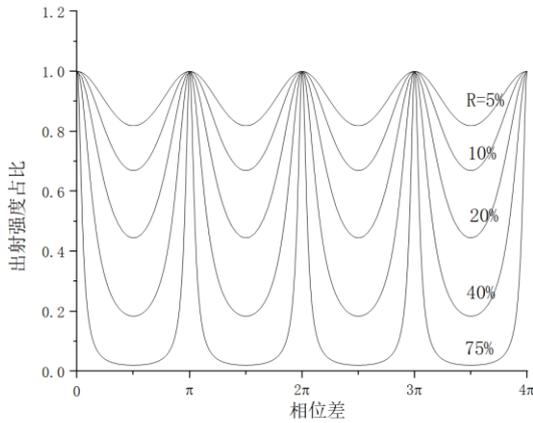
.....

$$U_n = Atr^{2n}t \cdot e^{i(n-1)\theta} e^{i\frac{\theta}{2}} \quad (\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2n_0L)$$

故有叠加振幅:  $U_T = \frac{Att}{1-r^2e^{i\theta}} e^{i\frac{\theta}{2}}$ , 由光强反射率  $R=r^2$ ,

$$\text{得光强 } I_T = U_T \cdot U_T^* = \frac{I_0}{1 + \frac{4R}{(1-R)} \sin^2\left(\frac{2\pi L}{\lambda}\right)}$$

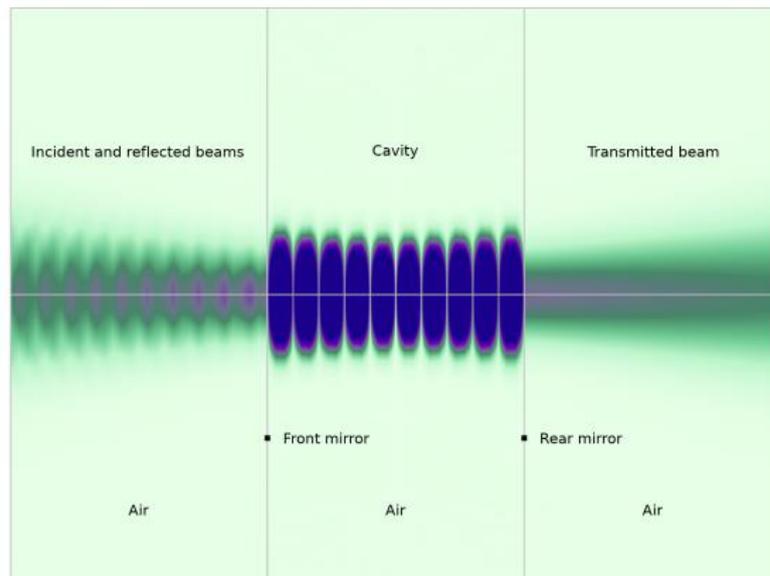
利用所得公式绘图得：



可见在反射系数足够高的情况下，透射光强度随相位差变化剧烈，故产生的干涉条纹可具有很高的衬比度。

### 研究法布里-珀罗谐振器的传输特性，并将其与解析解进行比较

谐振器由弯曲的前视镜和后视镜组成。空腔内部(位于反射镜之间)和空腔外部有空气。入射高斯光束从左向右传播。因此，在空腔的左侧有入射光束和反射光束。在空腔内有一个左右传播光束。在空腔的右侧，只有透射光束。



图：法布里-珀罗谐振器的几何结构

两个半径为  $\rho_1$  和  $\rho_2$  的反射镜相隔距离  $L$ ，如果它们满足稳定性标准  $0 < g_1 g_2 < 1$ ，则可以创建稳定的光学谐振器，其中  $g_{1,2} = 1 - L/\rho_{1,2}$  是两个反射镜的稳定性参数。一个稳定的光学谐振器定义了一组空间模式，每个模式都具有定义的模式形状。如果我们想激发谐振器的空间模式，我们还必须考虑两个反射镜的距离产生了一个谐振条件，该条件需要满足特定的空间模式。虽然可以在谐振时具有高透射率，但谐振器对于非谐振频率具有高反射性。

我们可以定义谐振器的自由光谱范围 $\Delta\nu_{FSR}$ 和精细度 $F$ ，其中 $c$ 是光速， $R_1$ 和 $R_2$ 是各自的反射镜反射率。

法珀腔的自由光谱范围 $FSR$ (Free Spectrum Range)的概念，即光源光谱的 $m$ 级长波长 $\lambda_2$ 和 $(m+1)$ 级短波长 $\lambda_1$ 的干涉极大值正好重合，而在波长差 $\delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ 范围以内的光波长都不会发生重合，这个波长差就被定义为自由光谱范围。

干涉条纹的精细度的概念就是指的在一个自由光谱范围 $FSR$ 可以有多少个半高全宽的共振峰 $\Delta$ ，就是两个相邻峰之间的间距除以峰宽，

$$\Delta\nu_{FSR} = \frac{c}{2L} \quad F = \frac{\pi(R_1 R_2)^{0.25}}{1 - \sqrt{R_1 R_2}}$$

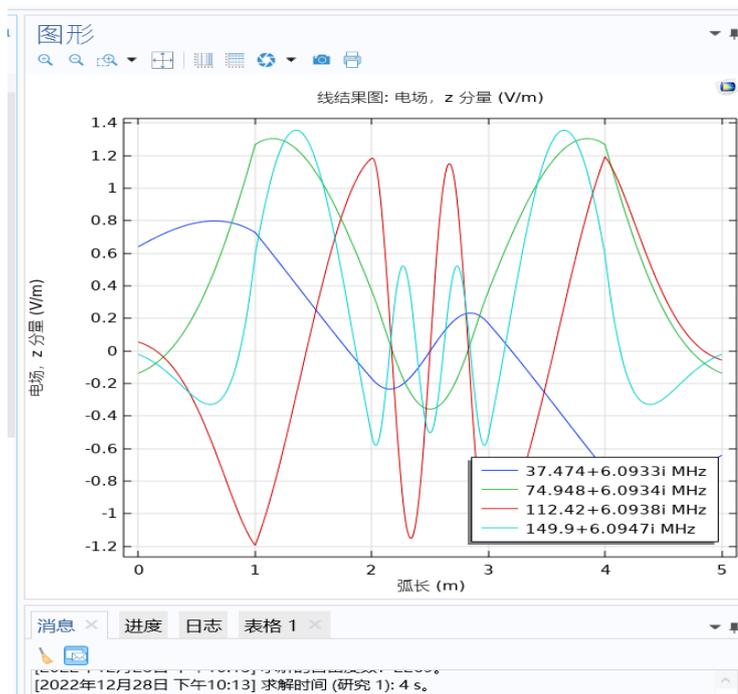
光学谐振腔的线宽就是共振峰的半高全宽，谐振的线宽 $\delta\nu$ 定义为

$$\delta\nu = \frac{\Delta\nu_{FSR}}{F}$$

根据腔体配置，不同的空间模式可以呈现不同的共振频率。任何输入场都可以分解为谐振器的空间模式。因此，谐振器将起到空间滤波器和频率滤波器的作用。我们将在这里集中于有效激发谐振器的基本模式

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{L\lambda}{\pi} \left( \frac{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}{(g_1 + g_2 - 2g_1 g_2)^2} \right)^{\frac{1}{4}}}$$

谐振器的基本模式可以通过光速腰来描述，对于反射镜曲率半径相等的情况， $\rho_1 = \rho_2$ ，光速腰位于谐振器的中心。下图为对另一谐振腔特征频率的求解。



光学谐振腔的品质因子 $Q$ (Quality Factor)，是衡量光学谐振腔的储能和选择频率的能力，其大小为

$$Q = \frac{V}{\delta\nu} = \frac{FL}{\lambda/2}$$

为了有效地模拟 50mm 长法布里-珀罗谐振器的全波解，使用了双向公式中的电磁波、波束包络界面。第一波和第二波是真空中两个反向传播的平面波。该几何结构由分隔两个反射镜和两个外部区域的空腔组成，一个在空腔前面，一个位于空腔后面。

反射镜近似为高反射薄电介质层，使用过渡边界条件建模。为了计算薄电介质层的反射率  $R_0$ （过渡边界条件-TBC），我们假设该层具有折射率，并且周围层分别具有折射率  $n_1$  和  $n_2$ 。

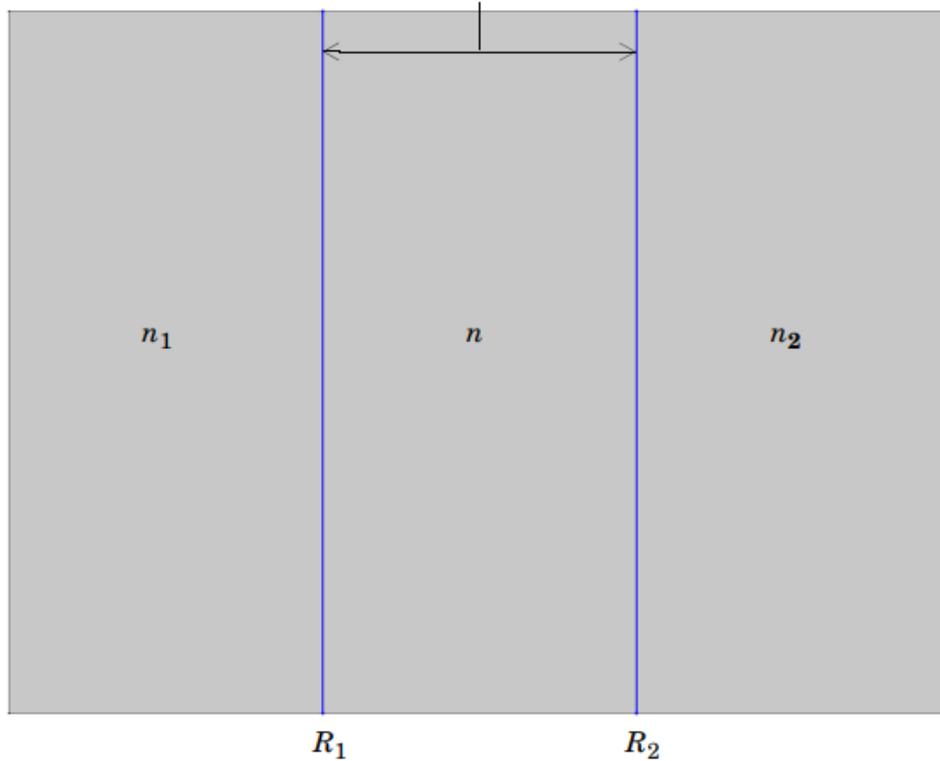


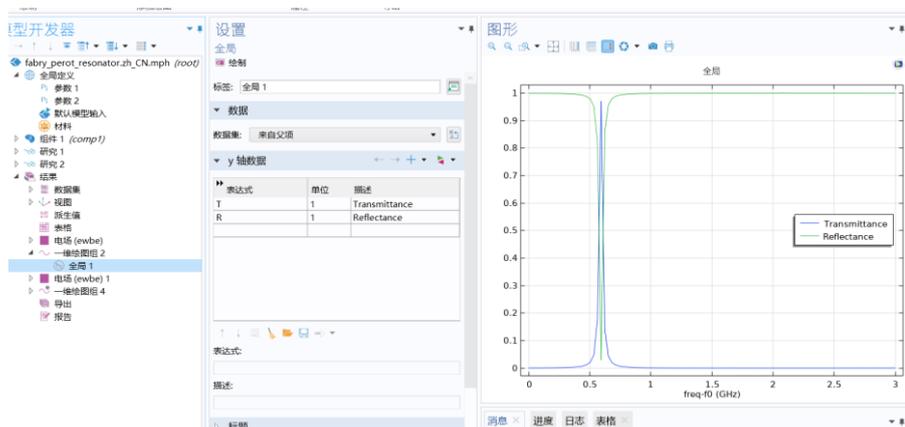
图 2：反射镜模型为折射率为  $n$  的薄电介质层，分别由折射率为  $n_1$  和  $n_2$  的材料包围。每个接口的反射率  $R_1$  和  $R_2$  显示在图片底部。每个镜像都使用过渡边界条件功能进行建模。

由于干涉导致的薄膜反射率  $R_0$  为  $R = \left| \frac{\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2} e^{-2i\phi}}{1 - \sqrt{R_1 R_2} e^{-2i\phi}} \right|^2$ ，其中  $\phi$  是穿过该层时的累积相位  

$$\phi = 2\pi n d / \lambda$$

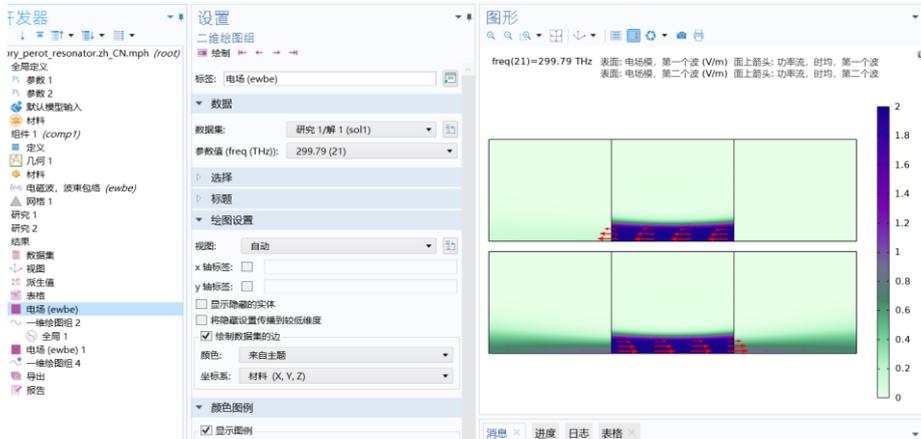
使用厚度  $d = \lambda / 100$  和折射率  $n = 15$  和  $n_1 = n_2 = 1$ ，两个反射镜的反射率均为 0.973。这对应于  $F = 116.2$  的精细度。

使用散射边界条件发射高斯光束。输入光束束腰对应于腔模的解析解，束腰位于腔的中心。在一个自由光谱范围内的扫描仅显示一个共振（图 3）。这表明只有一个空间模式被激发。



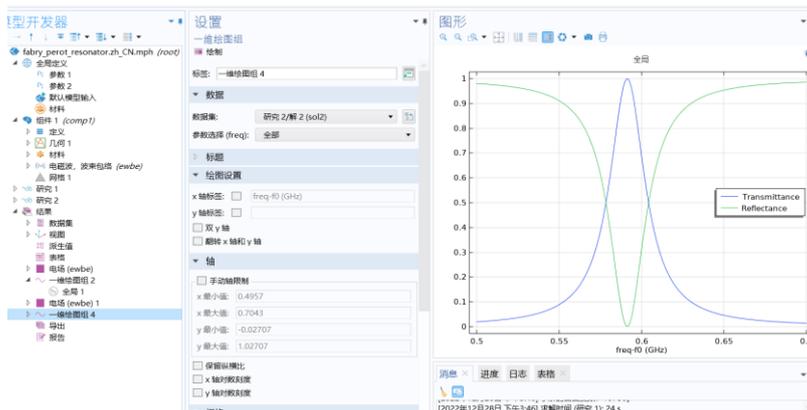
3、

图 4 显示了共振时第一波和第二波的电场大小。第一波从左向右传播，第二波从右向左传播。很明显，在共振时，腔中的场比腔外的场大得多。此外，谐振时几乎没有反射波，所有功率都被传输。



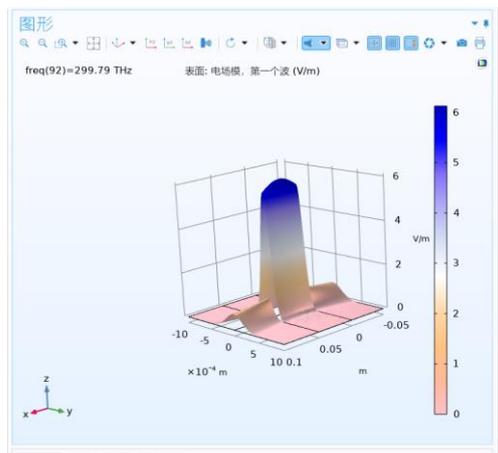
4、

图 5 共振峰上的频率扫描。对空腔共振进行了更精细的扫描。在共振时，所有的光都通过腔体传输，这是为了实现良好的模式匹配。



5、

图 6 显示了共振时第一波的电场大小。这证实了谐振时腔内的场远高于腔外的场。



研究参数:

rho1	100[mm]	0.1 m	反射镜 1 的曲率半径
rho2	100[mm]	0.1 m	反射镜 2 的曲率半径
l_cav	50[mm]	0.05 m	腔体长度
g1	$1-l_{cav}/\rho_1$	0.5	稳定性参数 1
g2	$1-l_{cav}/\rho_2$	0.5	稳定性参数 2
w0	$\sqrt{l_{cav} \cdot l_{da0}}$	1.174E-4 m	束腰半径
w1	$\sqrt{l_{cav} \cdot l_{da1}}$	1.3556E-4 m	左镜的光束半径
w2	$\sqrt{l_{cav} \cdot l_{da2}}$	1.3556E-4 m	右镜的光束半径
FSR	$c_{const}/(2 \cdot l_{cav})$	2.9979E9 1/s	自由光谱范围
F	$\pi \cdot (R \cdot R)^{1/4}$	116.2	精细度
R	$\text{abs}(\sqrt{Rl} - e^{-\dots})$	0.97333	反射镜层的反射率
phi	$2 \cdot \pi \cdot d \cdot n / l_{da0}$	0.94248	通过反射镜层的相位延迟
d	$l_{da0}/100$	1E-8 m	反射镜层厚度
n	15	15	反射镜层折射率
n1	1	1	反射镜层前的折射率
n2	1	1	反射镜层后的折射率
r1	$(n_1 - n) / (n_1 + n)$	-0.875	第一反射镜层界面的反射..
r2	$(n - n_2) / (n + n_2)$	0.875	第二反射镜层界面的反射..
Rl	$r_1^2$	0.76563	第一层反射镜界面的反射..
Rr	$r_2^2$	0.76563	第二层反射镜界面的反射..
df	FSR/F	2.5801E7 1/s	频率宽度
l_da0	1[um]	1E-6 m	波长
f0	$c_{const}/l_{da0}$	2.9979E14 1/s	频率
h_cav	2[mm]	0.002 m	域高度
l_in	5[cm]	0.05 m	腔前长度
l_out	5[cm]	0.05 m	腔后长度
l_total	$l_{cav} + l_{in} + l_{out}$	0.15 m	总长度

### 法布里珀罗腔的实践应用

在通信领域，法布里珀罗腔可以用来构建光纤通信系统中的光栅，用来调节光信号的频率。在生物医学领域，法布里珀罗腔可以用来构建光谱仪，用来分析物质的光谱。在激光领域，法布里珀罗腔可以用来构建激光器，用来产生单色的激光光束。在天文学领域，法布里珀罗腔可以用来构建光学望远镜，用来观测天体。

法布里珀罗腔在构建光学器件时非常有用，因为它可以用来调节光强度和频率。此外，法布里珀罗腔也常用于激光器的调谐，因为它可以用来控制激光光束的波长。

在光学实验中，因为单色光的应用很广，而一般光源发出的光是连续谱线，这时可以利用法布里珀罗干涉腔对光波信号进行处理。能够得到多束频率相对独立，有一定区分度的光线。如果再进行进一步的筛选，就能够得到半值宽度小，单色性好的光源。更进一步地说，将一般激光器产生的激光通过法布里珀罗腔，处理为窄线宽激光，就可以应用其单色性好、稳定度高、相干长度长等优点，用于光电检测等领域，实践中有人将腔长 100mm，由一对反射率 99.9885%的平面镜和凹面镜构成的 f-p 腔用于 632.8nm 激光的线宽压窄，并成功地由原有的约 300kHz 压窄到了 10kHz 量级。

法布里珀罗腔是一种物理学实验装置，用于研究离子的行为。它由一个金属管和两个金属板组成，其中一个金属板有一个小孔。当离子进入法布里珀罗腔时，它们会在两个金属板之间反弹，并在这个小孔内形成一个轨道。这个轨道的形状取决于离子的质量和能量以及法布里珀罗腔的尺寸。

法布里珀罗腔的固有频率是指离子在法布里珀罗腔内振动的频率。这个频率取决于法布里珀罗腔的尺寸和电场的强度。因此，法布里珀罗腔的固有频率是一个物理量，但是它不是一个固定的值，而是依赖于法布里珀罗腔的参数而变化的。

总之，法布里珀罗腔是一种重要的光学器件，其广泛应用于各种领域，如通信、生物医学、激光、天文学等。

## 结论

法布里珀罗腔是一种结构较为简单的光学器件，主要利用多束光干涉的原理工作，能够对光的频率进行筛选、改变光场性质，在实验和实践中都有广泛应用。

## 参考文献

- [1]程则迪. 简并光学谐振腔的实验研究以及应用[D]. 中国科学技术大学.
- [2]周坤. 超高精细度光纤法珀微腔的实验制备与应用研究[D]. 中国科学技术大学.
- [3] Jose C. Gallego Fernández, Strong Coupling between Small Atomic Ensembles and an Open Fiber Cavity
- [4]梁猛. 光纤光栅 F-P 腔特性分析[J]. 光电子·激光, 2001(8):821-824.
- [5]张乐, 吴波, 叶雯,等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔锁频原理的高灵敏度光纤振动传感器[J]. 光学学报, 2011, 31(4):5.

搭建的 comsol 模型

[..\..\..\..\Desktop\FP 腔分布.mph](#)

[..\..\..\..\Downloads\fp 腔.mph](#)