

# 用于 HCN 激光器耦合输出的 F-P 腔的优化设计

周艳 焦一鸣 张清春

(核工业西南物理研究院, 成都 610041)

**提要** 本文介绍一种由双面金属栅网构成的 F-P 腔式激光耦合输出端, 改变其间距, 透过率可连续变化。将栅网等效为一导纳, 利用等效电路方法, 进行模拟计算。经优化计算得到一组最佳栅网参数。

**关键词** F-P 腔, 栅网, 耦合输出

## Optimizing design of variable metal mesh coupler for the HCN laser

ZHOU Yan, JIAO Yiming, ZHANG Qingchun

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041)

**Abstract** In this paper, a kind of laser interference filter with two metal mesh reflector grids has been investigated. By adjusting the spacing between the two parallel grids, the reflectance of the transmittance can be varied. It is shown by theoretical analysis that the transmittance with two different grids is better for the HCN laser than that with same grids. By optimizing calculation a set of grid parameters has been obtained.

**Key words** F-P interferometer, grid, coupler

## 1 引言

HCN 激光器由于其输出激光波长在远红外波段, 目前已成为托卡马克装置实验中测量等离子体电子密度的常规设备。可见光和近红外波段的激光器的输出一般是在低损耗的电介质衬底上镀多层电介质膜作输出镜进行耦合的, 但在远红外波段, 目前还不易找到合适的低损耗电介质物质, 实现所需要的膜厚度, 其制作工艺也很困难, 因此必须采用其它耦合方式, 最简单的耦合方法是在一 100% 反射率的反射镜中心开一小孔<sup>[1]</sup>, 输出光功率的大小与孔径有关, 且每改变一传输率需要换一反射镜。也有人用栅布作耦合输出<sup>[2]</sup>, 但耦合均匀性差, 吸收损耗大。还有人用线栅耦合, 它又与激光器的偏振方向有极大关系。比较好的是用金属栅网耦合<sup>[3]</sup>, 若在金属栅网的后面再加一金属栅就构成了一种 F-P 干涉仪(FPI), 通过改变其间距即可获得可

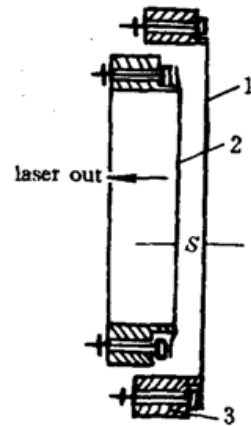
变的耦合透过率。本文讨论的就是由这种 F-P 腔制成的 HCN 激光器输出端。

## 2 原 理

可调金属 F-P 腔由两面光栅常数相同或不同的栅网组成(见图 1)。其中光栅常数相同的为对称型,不同的为非对称型。F-P 腔两面栅网之间为空气隙。

Fig. 1 Fabry-Perot interferometer (FPI) with grids

- 1—the grid near the laser resonant cavity  
2—the grid far away from the resonant cavity  
3—support rings



F-P 腔的透过率  $T_F$ , 反射率  $R_F$  和吸收率  $A_F$  与间距  $S$  的关系可用等效电路方法表示<sup>[4]</sup>

$$T_F = |(\cos KS - jy_0 \sin KS)(1 + \Gamma_1)|^2 \quad (1)$$

$$R_F = |\Gamma_1|^2 \quad (2)$$

$$A_F = 1 - T_F - R_F \quad (3)$$

其中

$$\Gamma_1 = (1 - y_0 - Y_1)/(1 + y_0 + Y_1) \quad (4)$$

$$y_0 = (1 + Y_2 + j \operatorname{tg} KS)/(1 + j(1 + Y_2) \operatorname{tg} KS) \quad (5)$$

$$Y_i = 2/[\bar{R}_i - jz_i(g_i/\lambda - \lambda/g_i)^{-1}], \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

$$z_i = 2 \ln \cos(\pi a_{\text{eff}}/g_i) \quad i = 1, 2 \quad (7)$$

$$\bar{R}_i = (g_i/4a_{\text{eff}})(c/\lambda\sigma_i)^{1/2}, \quad i = 1, 2 \quad (8)$$

$$a_{\text{eff}} = a_i + (t_i/2\pi)[1 + \ln(8\pi a_i/t_i)], \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

$a, g, t$  为栅网常数(见图 2), 将(4)~(9)式代入(1)~(3)式, 可见  $T_F, R_F, A_F$  是关于间距  $S$  的周期函数, 周期为  $\lambda/2$ 。改变  $S, T_F$  可连续周期变化。

## 3 F-P 腔的优化设计

F-P 腔通过调节间距  $S$  来达到变化耦合透过率的目的, 且对单面栅网的平面度和双面栅网间的平行度要求很高。F-P 腔设计的  $T_F$  随  $S$  的变化越平缓, 对栅网平行度的要求可放宽, 这也有利于实际 F-P 腔的制作和使用。

### 3.1 确定 HCN 激光器耦合透过率的范围

要寻找透过率  $T_F$  随  $S$  变化平缓的 F-P 腔, 首先必须确定  $T_F$  的变化范围。任何激光器都存在一最佳透过率。本实验室 HCN 激光器根据 Véron 的定标定律, 耦合透过率的设计值为 7%, 实际调试用单面栅网耦合输出, 发现 16 L/mm 的栅网耦合效果最好, 其透过率为 18.5%, 但



Fig. 2 Metal grids

还不是最佳值。由于诸多实验因素的影响,理论与实际的最佳透过率有一定偏差,只能给出一个范围。再加之一般 HCN 激光器的透过率不可高于 20%, 所以将耦合透过率范围定在 2~20% 之间。

### 3.2 优化的方法及对称型与非对称型栅网 F-P 腔的比较

从公式(1)中可以得到透过率  $T_F$  与间距  $S$  的关系曲线(见图 3)。从中可以看出  $T_F$  与  $S$  为略微不对称的周期函数。这是由于吸收率  $A_F$  的不对称性造成的。当忽略栅网的吸收时,  $T_F$  与  $S$  为周期性的对称曲线且周期为  $\lambda/2$ 。利用最小二乘法, 作一直线  $y = [(T_{Fmax} - T_{Fmin}) / (S_{max} - S_{min})] S$ , 选择栅网常数  $g, a, t$  使它们组成的 F-P 腔的  $T_F$  尽量趋近于所设直线。即在  $T_{Fmax}$  和  $T_{Fmin}$  所对应的  $S$  区间均分成  $n$  等份, 使等分点上  $S_i$  对应的  $y_i, T_{Fi}$  满足  $\varepsilon = \sum_{i=1}^n (y_i - T_{Fi})^2$  为最小, 则这时的栅网对参数  $g, a, t$  为最优选择。

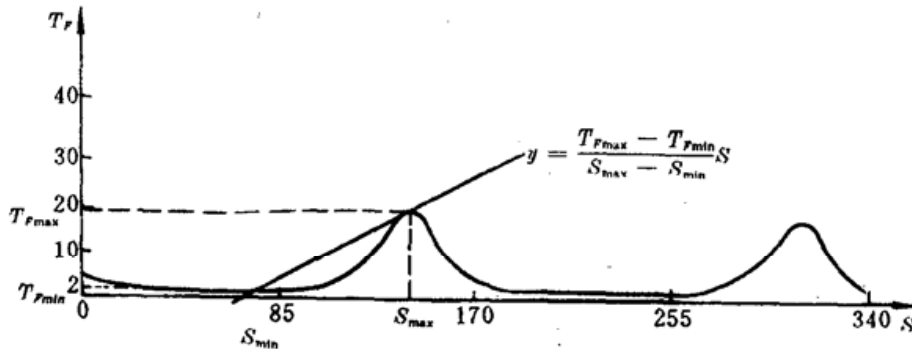


Fig. 3 The power transmittance  $T_F$  of the FPI plotted as functions of the reflector spacing  $S$

当  $A_F = 0$  时,  $R_F$  的极值<sup>[4]</sup>为

$$R_{Fmin} = 1 - T_1 T_2 / (1 - R)^2 \quad (10)$$

$$R_{Fmax} = 1 - T_2 T_1 / (1 + R)^2 \quad (11)$$

其中  $R = (R_1 R_2)^{1/2}$ ,  $R_1, R_2, T_1, T_2$  分别代表各单栅的反射率与透过率。

当  $R_{Fmax}$  一定时, 分别对  $R_{F对称型}, R_{F非对称型}$  求导, 可得

$$\frac{dR_{F对称型}}{dS} > \frac{dR_{F非对称型}}{dS}$$

即非对称型栅网 F-P 腔在间距  $S$  方面的敏感度小于对称型的, 因此前者在实际制作时的限制比后者小。

### 3.3 F-P 腔的相位变化与吸收

在调节 F-P 腔时, 间距  $S$  的改变, 不仅使其透过率发生变化, 反射波与入射波之间的相位差也会发生变化。其大小可表示为<sup>[5]</sup>

$$\Delta\phi = \text{tg}^{-1} \frac{\sum_{n=1}^{\infty} [(R_1 R_2)^{n-1} \sin(n\delta)]}{\sum_{n=1}^{\infty} \{ (R_1 R_2)^{n-1} \cos n\delta - R_1 / [R_2 (1 - R_1^2)] \}} \quad (12)$$

式中  $\delta = 4\pi S / \lambda$ ,  $R_1$  为靠近谐振腔的栅网反射率,  $R_2$  为远离谐振腔的栅网反射率。

$\Delta\phi$  的变化引起激光谐振腔等效腔长发生变化, 输出激光的频率随之也会改变。从式(12)中可以看出, 若要  $\Delta\phi$  小则式中分母应很大, 即  $R_1 / [R_2 (1 - R_1^2)] \rightarrow \infty$ , 则  $R_2 \rightarrow 0$  或  $R_1 \rightarrow 1$ 。因此只有非对称栅网对才能满足, 且反射率大的一面栅网应置于靠近激光腔的一端。

目前用于 HCN 激光器耦合输出的金属栅网一般为 Ni 栅和 Cu 栅。由式(3)计算可知 Ni 栅

的最大吸收率大于 1.1%，Cu 栅的最大吸收率为 0.5% 左右。因此实验中可以选用 Cu 栅，以减少激光能量的损失。

根据以上各点，在一定光栅参数范围： $g = 50 \sim 200 \mu\text{m}$ ， $t = 10 \sim 14 \mu\text{m}$ ， $a = g/12 \sim g/8 \mu\text{m}$  进行编程计算，优化处理，得到一组最佳结果：

$$\begin{cases} g_1 = 76 \mu\text{m} & a_1 = 9.5 \mu\text{m} & t_1 = 10 \mu\text{m} & T_1 = 4.93 \% \\ g_2 = 190 \mu\text{m} & a_2 = 23.25 \mu\text{m} & t_2 = 10 \mu\text{m} & T_2 = 57.378 \% \end{cases}$$

图 4 为此栅网对与 Ulrich 所做的相同栅网对的  $T_F, R_F, A_F$  的对比曲线。从图中可以看出，在 2~20% 之间， $T_{F\text{非对称型}}$  比  $T_{F\text{对称型}}$  平滑得多，且  $\Delta\phi_{\text{max非对称型}} = 4.7^\circ$ ， $\Delta\phi_{\text{max对称型}} = 70.9^\circ$ ， $A_{F\text{max非对称型}} = 0.48\%$ ， $A_{F\text{max对称型}} = 2.67\%$ （均为 Cu 栅）。

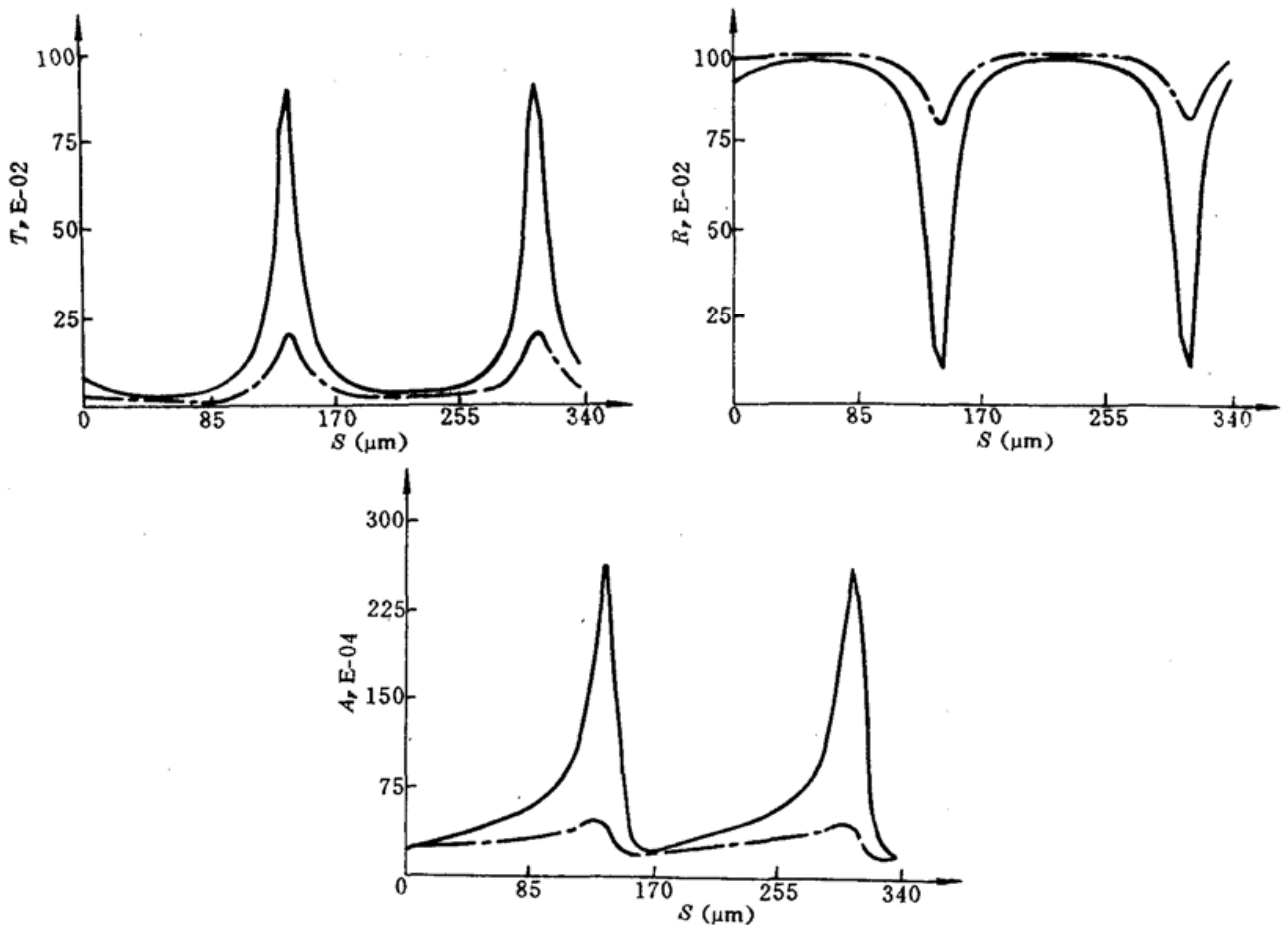


Fig. 4  $R_F, T_F, A_F$  of the FPI plotted as functions of the reflector spacing  $S$

—: two same grids  $g = 102 \mu\text{m}$ ,  $a = 9.4 \mu\text{m}$ ,  $t = 5 \mu\text{m}$

- - -: two different grids  $g_1 = 76 \mu\text{m}$ ,  $a_1 = 9.5 \mu\text{m}$ ,  $t_1 = 10 \mu\text{m}$ ,  $g_2 = 190 \mu\text{m}$ ,  $a_2 = 23.25 \mu\text{m}$ ,  $t_2 = 10 \mu\text{m}$

本项工作得到邓中朝的热情支持和指导，黄克强提供绘图程序，在此一并感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Mecumber D. E. et al., *Bell Systems Tech. J.*, **48**, 1919(1969)
- 2 Yamanaka M. et al., *Japan J. Appl. Phys.*, **7**, 250(1968)
- 3 Ulrich R. et al., *IEEE Trans.*, **MTT-11**, 363(1963)
- 4 Ulrich R. et al., *Appl. Opt.*, **9**(11), 2511(1970)
- 5 王端峰 et al., *激光*, **9**(8), 515(1982)