

# 亚毫米波球面镜F-P干涉仪

丘秉生 郑兴世 罗锡璋

(无线电电子学系)

## 摘 要

本文研究了一种适于亚毫米波波段(尤其是在 $\lambda = 50\mu\text{m}$ 附近)工作的非共焦腔球面镜F-P干涉仪。通过选取反射镜及耦合孔尺寸,或采用光阑来抑制高阶次横模,达到单横模操作。对不同基片材料,不同反射镜参数组合成八个干涉仪进行了试验,用HCN激光器(谱线波长 $\lambda = 336.6\mu\text{m}$ )作光源时,测量了干涉仪的精细度,最高的达到21.6。用这种干涉仪测量HCN激光谱线波长,测量精确度优于0.2%。

## 一、概 述

法布里—珀罗(F-P)干涉仪,由于它结构相对简单,具有高分辨率,在多方面得到了广泛的应用。在可见光及近红外光谱区,干涉仪的反射器,一般是在玻璃或石英基片上用真空涂镀高反射率金属膜的方法制造,由于它们对亚毫米波的严重吸收,因而不能在亚毫米波段工作。在亚毫米波范围内使用的F-P干涉仪,自1962年K.F.Renk和L. Genzel<sup>[1]</sup>首先提出用平面金属栅网制作反射器后,已被广泛采用。然而当测量波长在 $50\mu\text{m}$ 左右的亚毫米波时,要求栅网的金属线宽小于 $5\mu\text{m}$ ,制作比较困难。

为了克服上述困难,本文根据光学谐振腔的原理,提出一种适用于亚毫米波测量的非共焦腔球面镜F-P干涉仪,它的主要特点是采用全反射的球面镜构成干涉仪的谐振腔,在反射镜中央开耦合孔实现能量耦合;通过选取反射镜及耦合孔的尺寸,或采用合适的光阑抑制高阶次横模,达到单横模操作。用HCN激光器作光源,对不同结构参数的干涉仪的精细度、分辨率等进行了测量,得到了令人满意的结果。

## 二、原 理

有耦合孔的光学谐振腔,在结构上有通过式和反射式两种,如图1所示。图中, $L$ 为腔长,全反射镜的半径为 $a_m$ ,耦合孔半径为 $a_0$ ,反射面的曲率半径为 $R$ 。

关于光学谐振腔的理论,许多学者已进行了大量的工作<sup>[2-5]</sup>。D. E. McCumber<sup>[5]</sup>详细地分析了轴对称共焦腔的本征模,以及当反射镜存在耦合孔时对本征模的影响。他

本文1982年9月收到

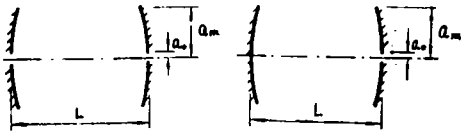


图1 球面镜谐振腔。

指出：有耦合孔的腔和无耦合孔的腔谐振条件相同，在耦合孔足够小的条件下，场振幅在镜面上的分布与无耦合孔的腔的分布很相似，可以通过微扰理论去计算衍射损耗。

当谐振腔是非共焦腔时，可以用等价共焦腔的方法加以处理<sup>(4)(6)(8)</sup>。此时谐振腔

的共振波长是：

$$\lambda = 4L \left[ 2q + (l + 2p + 1) \frac{2}{\pi} \cdot \cos^{-1} \left( 1 - \frac{L}{R} \right) \right]^{-1}, \quad (1)$$

等价共焦腔的反射镜的费涅尔数  $N_m$  为：

$$N_m = \frac{a_m^2}{\lambda l_1} \left[ \frac{l_1}{R} - \left( \frac{l_1}{R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

等价共焦腔耦合孔的费涅尔数  $N_0$  为：

$$N_0 = \frac{a_0^2}{\lambda l_1} \left[ \frac{l_1}{R} - \left( \frac{l_1}{R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

式中  $q$  为纵模指数， $q = \frac{2L}{\lambda}$ ； $p, l$  为横模指数， $l_1 = \frac{1}{2}L$ 。

干涉仪的  $Q$  值，即腔的  $Q$  值，反映干涉仪的分辨本领，可表示为：

$$Q = \frac{2\pi L}{\alpha \lambda} = F \cdot q, \quad (4)$$

这里  $F$  称为反射精细度，

$$F = \frac{\pi}{\alpha}. \quad (5)$$

$\alpha$  是谐振腔各种腔模单程损耗之和。这些损耗包括：镜面吸收和透射损耗，腔内介质吸收和散射损耗，以及衍射损耗，其中衍射损耗是主要的。对于给定模的振荡，其单程衍射损耗为  $\alpha_{lp}$ ， $\alpha_{lp}$  的大小和腔体结构参数，横模场  $(l, p)$  以及耦合孔大小  $(N_0)$  有关。

一般说来，光学谐振腔是在多横模状态下工作的，当作干涉仪使用时，应采取必要措施抑制高阶次横模，以获得单横模 (TEM<sub>00</sub> 模或称基模) 操作。在 D. E. McCumber 工作的基础上，我们提出两种抑制高阶次横模的方法：

(1) 在耦合孔足够小的范围内，(存在这样一个耦合孔临界费涅尔数  $N_{0c}$ ，当耦合孔的  $N_0 = N_{0c}$  时，有衍射损耗  $\alpha_{00} = \alpha_{10}$ ， $N_0 < N_{0c}$  时，基模的衍射损耗比其他较高阶次横模的衍射损耗都要小，这个  $N_{0c}$  值就是耦合孔足够小的标志。) 选取反射镜和耦合孔的尺寸，使谐振腔工作时，基模对耦合孔很敏感，且它的衍射损耗小，其他较高阶次横模都对耦合孔不敏感而且有很高的衍射损耗，这样基模能够建立振荡，且有足够高的  $Q$  值和足够大的输出，而较高阶次横模不能或不容易建立振荡，相应的  $Q$  值极低且输出能量极少，于是高阶次横模被抑制，从而达到单横模操作。

(2) 采用光阑。当两个反射镜尺寸相同，耦合孔足够小的情况下，光腰在谐振腔的中央，在这里，较高阶次的横模有较大的横截面。如果在光腰处安装光阑并调节它的口径，使它让基模几乎不受阻碍地通过，而对所有其他模式的损耗却有明显的增加，从而达到抑制高阶次横模的目的。光阑实际上起着减少反射镜有效尺寸的作用。

第一种抑制高阶横模的方法，需要反射镜尺寸和耦合孔大小固定配合，在较宽的使用波长范围内，很难兼顾到单横模操作和高精细度(从而高 $Q$ )的要求。采用光阑选模，原则上仍按方法(1)进行考虑，只是实际应用时，反射镜的尺寸比方法(1)计算的值要大一些，通过改变光阑的口径，可在很宽的波长范围内得到单横模、高精细度的操作。光阑口径的确定，可参考由方法(1)所定出的反射镜尺寸。

### 三、实验部份

对于球面镜F-P干涉仪，一般要求单横模操作，精细度和 $Q$ 值尽可能高，在尽可能宽的波长范围内适用，操作方便。腔体结构参数的选择，应根据上述原则考虑。

设计的一般步骤是：从文献[5]分别查出通过式和反射式谐振腔不同的 $N_m$ 所对应的 $N_{oc}$ ；查出(或由微扰式子算出) $N_0$ 取值 $N_{oc}$ 附近时几个低阶横模所对应的单程衍射损耗 $\alpha_{1p}$ 的值；在保证获得单横模操作及精细度尽可能高的要求下，确定 $N_m$ 和 $N_0$ 的值；根据使用的波长范围，由(2)、(3)式确定谐振腔的结构参数( $R, a_m, a_0, L$ 和光阑口径等)。

上述的设计考虑完全适用于整个亚毫米波段，包括短波如 $50\mu\text{m}$ 附近的亚毫米波波长测试。由于目前暂缺波长在 $50\mu\text{m}$ 左右的激光器作为检验设计的讯号源，因此，干涉仪的各参数的选择及测试工作均在波长为 $336.6\mu\text{m}$ 的条件下进行。设计成的干涉仪的谐振腔有通过式和反射式两种，反射镜分别用铜镜和镀金玻璃镜作试验，用不同基片材料及不同结构参数组合成八个干涉仪进行测试和比较，其中编号为3,4,5的三个干涉仪，腔长分别为90mm, 45mm和180mm，其他结构参数则完全相同。

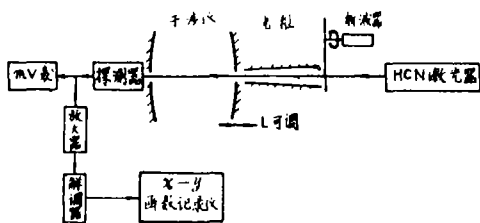


图2 通过式球面镜干涉仪的测量装置。

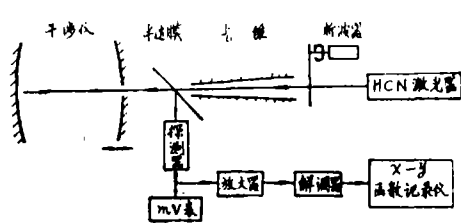


图3 反射式球面镜干涉仪的测量装置。

球面镜F-P干涉仪的实验装置如图2、3所示。干涉仪采用光阑选模，扫描腔长工作方式，谐振腔长度的改变，可以通过手动方式或用马达带来实现。

实验记录到的单横模干涉图样见图4和图5。由干涉图可以算出干涉仪的精细度F, 分辨率Q和激光波长 $\lambda$ , 结果列于表1。

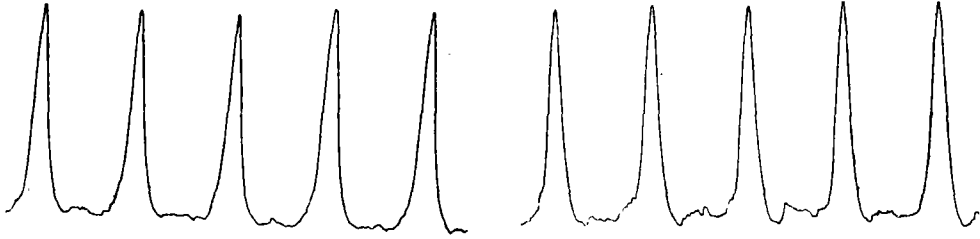


图4 编号No.1通过式干涉仪的干涉图样。

图5 编号No.5反射式干涉仪的干涉图样。

表1. 八个球面镜F-P干涉仪的实验结果

干涉仪编号	1	2	3	4	5	6	7	8	
型式	通过式	通过式	通过式	通过式	通过式	通过式	反射式	反射式	
测量结果	精细度 F	6.8 (12.5)	7.3 (15.3)	9.9 (18.7)	8.5	12	10.6 (21.6)	6.9	8.1
	分辨率 Q	3630 (6680)	3900 (8170)	5290 (10,000)	2270	12860	11500 (23100)	3685	4330
	波长 $\lambda(\mu\text{m})$	336.8	336.5	337.0	336.4	336.0	336.7	337.0	336.8
	波长测量 相对误差	$5.9 \times 10^{-4}$	$3.0 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-3}$	$5.9 \times 10^{-4}$	$1.8 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-3}$	$5.9 \times 10^{-4}$

光源为HCN激光器,  $\lambda = 336.6 \mu\text{m}$ 谱线。括号内的数字是手动扫描腔长的测量结果。

## 四、讨论

### 1. 谐振腔长度选择对干涉仪的精细度、分辨率和自由光谱范围的影响

干涉仪实际应用时, 反射镜上的耦合孔要经常改变是不现实的, 因此在选定耦合孔大小的情况下讨论腔长选择带来的影响。

由(3)式, 对于给定的耦合孔半径 $a_0$ , 随腔长 $L$ 的增加,  $N_0$ 至少随 $\sqrt{L}$ 反比例地下降, 若保持 $N_m$ 不变(由(2)式 $a_m$ 相应地会加大)基模的单程衍射损耗将明显地减少, 而其他较高阶次横模的衍射损耗也会减少但趋于无耦合孔的腔体的单程衍射损耗, 其结果是基模的干涉条纹将变得更锐(从而精细度增加), 而其他高阶次横模仍保持极低的Q值且干涉峰更弱, 这样谐振腔长度增加, 将导致精细度增加, 而分辨率  $Q = F \frac{2L}{\lambda}$  将增加得更快。(反射镜曲率半径 $R$ 增大也有类似的结果。)但腔长增加将使自由光谱范围下降, 因此, 必须按实际需要来确定腔长。

表1中, 3, 4, 5号干涉仪的实验结果和上述的理论预期是相符合的。

## 2. 记录装置对精细度测量的影响

记录装置包括放大器、解调器和  $x-y$  函数记录仪。放大器、解调器有一定的时间常数，记录仪有一定的机械惯性。在记录高分辨干涉图样时，必须注意腔长扫描的速度与记录装置相配合，如果腔长扫描速度不够慢，以致记录装置反应速度跟不上干涉峰的变化，在这种情况下，记录到的干涉图形将失真，算出的精细度会偏低。表 1 中，手动扫描腔长和自动扫描腔长结果的差异，经过分析，是由于我们制作的解调器的时间常数较大，而扫描速度又未能很好配合的结果。

## 3. 波长复盖范围

对于一个给定的球面镜干涉仪(结构参数定)，由(3)式，当测量的波长越长， $N_0$ 却反比例地减少，(适当增大光阑口径，可以维持  $N_m$  不变)， $N_0$  减少的结果将导致较高阶次横模进一步受抑制，基模的干涉条纹更锐，从而仪器有更高的精细度。因此，为某一波长设计的球面镜 F-P 干涉仪，完全适于更长波长的测量使用，这种“长波通”的特性，使得有可能设计一个复盖整个亚毫米波段的干涉仪。

# 五、结 束 语

本文提出的带耦合孔的非共焦腔球面镜干涉仪适合于亚毫米波测量，实验结果和理论计算基本符合，使用效果令人满意。由于球面镜加工容易，球面镜腔的调节要求较低，这种干涉仪复盖的波长范围较宽，因而它将是测量亚毫米波的良好工具。

## 参 考 文 献

- [1] K. F. Renk and L. Genzel, *Appl. Opt.*, 1(1962), 643.
- [2] A. G. Fox and T. Li, *B.S.T.J.*, 40 (1961), 435.
- [3] G. D. Boyd and J. P. Gordon, *B.S.T. J.*, 40 (1961), 489.
- [4] G. D. Boyd and H. Kogelnik, *B.S.T. J.*, 41 (1962), 1347.
- [5] D. E. McCumber, *B.S.T. J.*, 44 (1965), 333.  
*B.S.T. J.*, 48 (1969), 1919.
- [6] R. L. Rork, D. R. Herriott and H. Kogelnik, *Appl. Opt.*, 8 (1969), 1471.
- [7] 天津大学精仪系, 《激光技术》, 科学出版社, 1977, 611—612页。
- [8] 中国科学院上海光学精密机械研究所《激光物理学》编写组, 《激光物理学》, 第三章, 人民出版社, 1975。

## A Spherical Mirror F-P Interferometer in Submillimeter Wave Region

*Qiu Bingshen, Zheng Xingshi, Luo Xizhang*

### Abstract

In this paper, a type of spherical mirror F-P interferometer with nonconfocal resonator for submillimeter wavelength (especially in the region near  $\lambda=50\mu\text{m}$ ) has been studied. In order to get single mode operation, we can select the radii of the reflectors, coupling holes, or use iris technique to suppress the higher order transverse modes. Using a HCN laser ( $\lambda=336.6\mu\text{m}$ ) as a radiation source, eight interferometers constructed by reflectors of different materials and sizes have been tested, the highest reflecting finesse of the interferometer is 21.6. For the strongest laser line of HCN laser, the wavelength measurement accuracy of the interferometer is better than 0.2%.