

## 折迭式层状多程腔

徐毓光 余勤跃 吕波 陈守华 戎忠华

(中国科学院上海光机所, 201800)

**提要:** 描述折迭式多程腔的结构、系统的成像质量、与腔轴垂直方向扫描光束的光强均匀性, 给出腔镜反射率的高精度自检结果。

**关键词:** 折迭式层状多程腔

### Folded layered multiple-pass cavity

*Xu Yuguang, Yu Qinyue, Lü Bo, Chen Shouhua, Rong Zhonghua*

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

**Abstract:** Structure of the folded layered multiple-pass cavity and its image quality are described, uniformity of scanning beam intensity at vertical direction in the middle position of cavity axis is discussed, and the high precision result of the reflectance cavity mirror is given.

**Key words:** folded layered multiple-pass cavity

关于多程光学系统, J. U. White 和 D. R. Herriott 等均作过很多的研究, 根据不同的使用要求, 设计了许多不同结构的多程腔<sup>[1,2]</sup>。本文提出的折迭式层状多程腔, 物理实验要求在多程腔中, 光束扫描范围为  $200\text{ mm} \times 800\text{ mm}$ , 并有一定的厚度; 扫描光束在铅垂方向有一定的重迭; 腔轴中间部位铅垂方向光束强度分布不均匀性小于 50%。所以, 要求多程腔不但要有多的反射次数, 扫描光束有好的成像质量, 并需有合适的光路径迹。

我们设计的折迭式层状多程腔如图 1 所示。腔的一端是凹面镜  $M_A$ , 另一端是二块平面反射镜  $M_B$  和  $M_C$ 。腔长为  $1/2R_A$ 。扫描光束在腔中反射情况按图中所标顺序进行。光束在腔中多次反射, 像点在期间多次反演。当入射到凹面镜  $M_A$  上的光线方向和其半径方向重合时, 扫描光束从原路返回。图 2 是折迭式层状多程腔扫描光束的径迹照片。当入射光聚焦在平面镜反射平面输入时, 在凹面镜  $M_A$  上始终为一些相同直径的光斑; 而在  $M_B$  和  $M_C$  上, 是焦斑和平行光束的光斑二者相互按反射顺序交替出现, 而且, 当光束顺原路折返时, 在平面镜上光斑和焦斑位置互易。

多次反射系统的成像质量是腔的一个重要特性。当系统的像差很小时, 镜面上的物点在腔中多次反演时总是 1:1 成像, 保持原来的光束结构。假定该光学系统使用时, 输入光束聚焦在系统的入射口  $F$  点, 腔长为  $800\text{ mm}$ , 在  $L$  点形成约  $\phi 10\text{ mm}$  的光斑。从像差理论可知, 在这种情况下, 影响像质的主要像差为像散差。我们用杨氏公式<sup>[3]</sup> 由微电脑对扫描光束进行追踪计算, 求出输出光束的像散差。

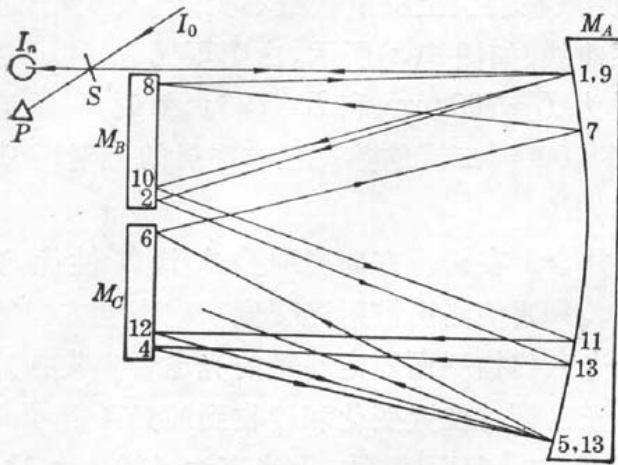


图 1 多程腔光路图

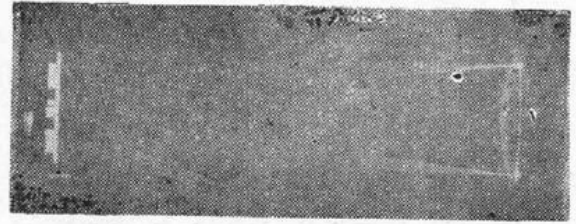


图 2 多程腔光线径迹

假定扫描光束在多程腔中反射 137 次, 光束入射条件如上述, 改变扫描高度, 观察  $(x_s - x_t)$  的变化。见图 3,  $(x_s - x_t)$  相对于扫描高度  $H$  的计算曲线, 当扫描高度  $H$  增加时, 像散差很快增加。注意我们的物理实验要求  $H = 200$ , 从图中得  $(x_s - x_t) = 126 \text{ mm}$ , 子午焦线和弧矢焦线的长度约  $1.6 \text{ mm}$ 。焦线的长短影响扫描光束的光斑大小及其结构, 考虑到该焦线是扫描光束在腔中经 137 次反射成像后最后一次成像光束的焦线, 在腔中任何一束扫描光线的焦线均比它小, 这种情况完全附合物理实验的要求。

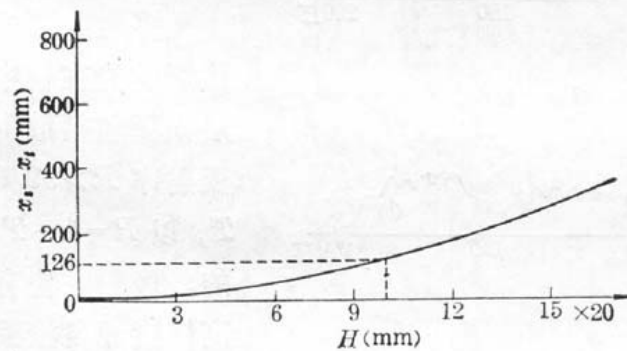


图 3 扫描高度和  $(x_s - x_t)$  曲线

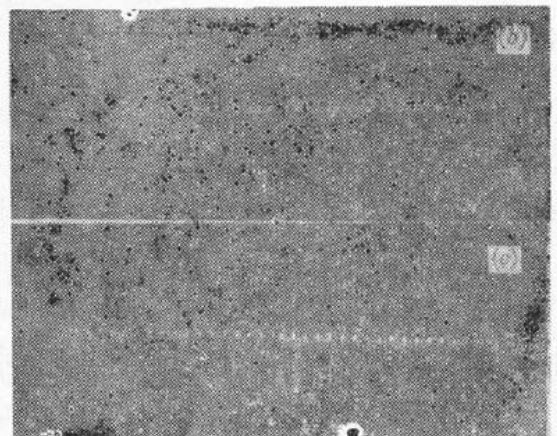
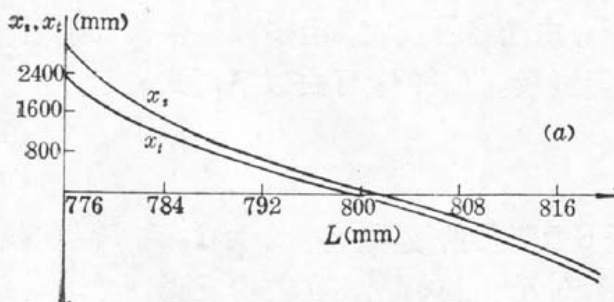


图 4

假定光束入射情况和上述相同,令扫描高度和光束在腔镜上反射次数不变,改变腔长,同样用杨氏公式追迹计算,得到腔长  $L$  和  $x_s$ 、 $x_t$  关系曲线,如图 4(a)所示。由图可见,  $x_s$  和  $x_t$  对多程腔的腔长变化是很灵敏的。图 4(b)和(c)分别为  $L=799\text{ mm}$  和  $L=796\text{ mm}$  时平面镜  $M_B$  和  $M_C$  上焦斑和光斑照片。虽腔长仅仅改变了  $4/1000$ ,二者的焦斑已有明显的区别。所以在实验中,可适当调整腔长,得到最好的像质。

物理实验要求多程腔中心部位扫描光束能充分叠合,在铅垂方向光强分布均匀性优于 50%。我们知道,散射光的强度和光束强度成正比。只要能测出散射光强度在腔高度方向的变化,即可知光强在高度方向的变化。我们用离开光束扫描平面固定间距的光电管接收扫描光束的散射光,并使光电管在高度方向进行扫描,将光电管的位置变化和接收到的光强信号同时输入  $x-y$  函数记录仪的二臂,当入射光聚焦在腔入射口,凹面镜  $M_A$  上光斑为  $\phi 10\text{ mm}$  时,光强  $I$  和高度  $H$  的关系曲线如图 5 所示。图 5(a)显示光束在腔中反射 137 次并顺原路折返时,垂直方向不同部位相对光强比约 52%。调整反射镜俯仰角,增加光束在腔内的反射次数和叠合程度,光强分布越来越均匀,相对光强比越来越接近 1。如输入光束情况不变,反射次数增加到 177 次和 209 次时,相对光强比分别达到 63% 和 82%。如图 5(b)和(c)所示。当

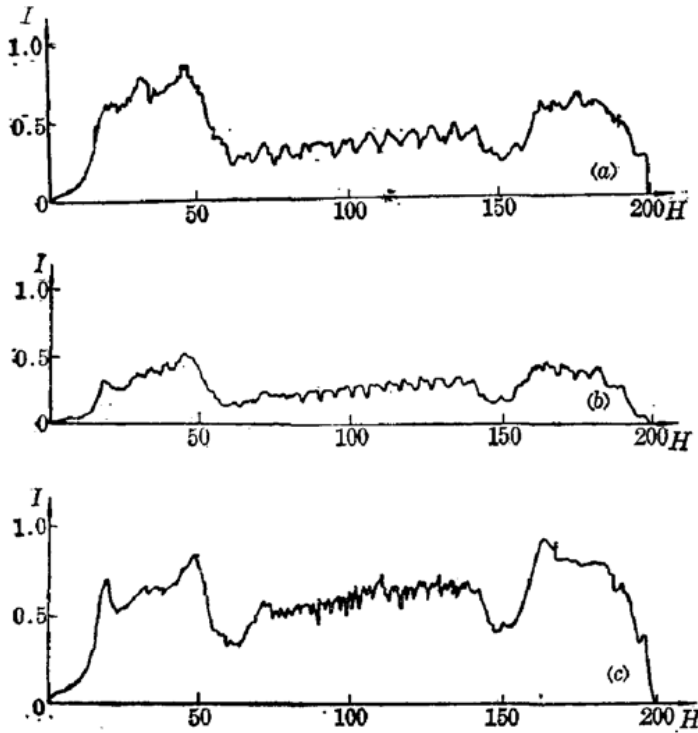


图 5 光强相对于腔高曲线

然,光束反射次数不能无限制地增加,它受入射焦斑大小的制约。图 6、7 反映了光束在腔中反射 137 次时,整个扫描平面和腔中间部位光强分布情况。

多程腔两端反射镜的膜层反射率直接影响光在腔中的损耗和反射次数。膜层损耗包括散射、吸收、透过等,当膜层反射率  $R > 99\%$  时,用常规的测透过率  $T$ ,以  $R = 1 - T$  来确定反射率是不确切的。多程腔特有的多次反射特性可用来高精度地自检腔镜的膜层反射率<sup>[4]</sup>。我们用直接测量入射和反射光的强度来检测膜层的反射率,消除了膜层散射、吸收对测量带来的影响。

如图 1 所示,从光源来的光  $I_0$  经分光板  $S$  输入多次反射系统,调整  $M_B$ , 使

光束扫描后沿原光路返回,经分光板  $S$  输入积分球  $I_n$ ,由光电管接收,经多程腔多次反射后输出光强称为  $I$ ;入射光  $I_0$  透过分光板后由光电接收器测量。 $I$  和  $I_0$  可由以下两式表示:

$$I_0 = I_p \alpha_p \quad (1)$$

$$I = I_n \alpha_n \quad (2)$$

式中,  $I_p$ 、 $I_n$  分别为输入和输出多程腔光束经分光板  $S$  后测得的读数,  $\alpha_p$ 、 $\alpha_n$  为  $I_p$  和  $I_n$  探测器及分光板分光系数的定标值。令  $R$  为腔镜平均反射率,  $N$  为扫描光束在腔内反射次数。可得

$$I = I_n \alpha_n = I_p \alpha_p R^N$$

即

$$I_n / I_p = (\alpha_p / \alpha_n) R^N$$



图 6 腔内光强分布

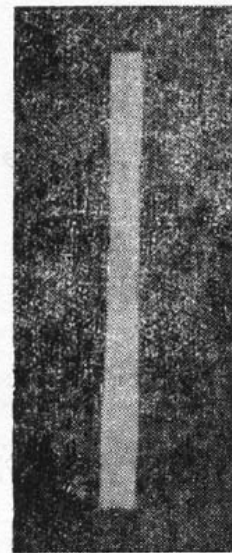


图 7 腔轴中间处光强随高度的分布

等式二边取对数:

$$\ln(I_n/I_p) = N \ln R + b \quad (3)$$

(3)式中  $b = \ln(\alpha_p/\alpha_n)$  为常数。用最小二乘法进行直线拟合, 直线斜率  $K$  即为  $\ln R$ 。  $R = e^K$ , 得

$$\Delta R = e^K \Delta K = R \Delta K \quad (4)$$

$\Delta R$  可由实验数据对拟合曲线的离散确定, 由拟合提供的偏差计算得。表 1 是对折迭式多程腔的一组测量数据。将上述数据用最小二乘法拟合, 结果见图 8。求得腔镜平均反射率为  $R =$

表 1

序号	$I_p$	$I_n$	反射次数 $N$
1	7.6	240	73
2	7.7	210	97
3	7.7	180	121
4	7.5	150	153
5	7.6	127	185

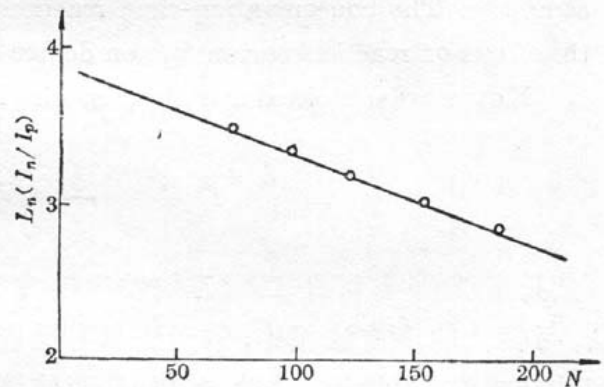


图 8

$0.99438 \pm 4 \times 10^{-5}$ 。

折迭式层状多程腔光学元件少, 结构简单, 调整方便, 光束质量好, 扫描次数和光斑叠合程度随意可调, 腔内光强分布较均匀。使激光与腔内有一定厚度呈平面分布的介质有较均匀的相互作用机会, 并可利用顺原路返回光束对激光和物质相互作用作一些诊断工作。折迭式层状多程腔是光束层状扫描较理想的系统。

## 参 考 文 献

- 1 J. U. White, *J. Opt. Soc. Am.*, **6**(5), (1976)
- 2 D. R. Herriott, H. J. Schulte, *Appl. Opt.*, **4**(8), 883~889(1965)
- 3 王之江, 光学设计理论基础(第二版), 科学出版社, 北京, 1985
- 4 R. S. Hernicz, D. P. Dewitt, *Appl. Opt.*, **12**(10), 2454~2460(1973)