

多程反射室光路设计的简化及特性

李 黎

(四川大学物理系)

提要: 本文介绍一种简单的由两球面镜组成的多程反射室光路设计, 讨论了多程反射光束的主要特性, 并对误差作了估计。理论计算与实验结果很好地吻合。

Simplified optical-path design and the characters of a multipass reflective cell

Li Li

(Department of Physics, Sichuan University)

Abstract: The simplified optical-path design of a multipass reflective cell made of two spherical mirrors is described. The major characters of the multipass reflective beam are discussed and the errors estimated. The calculated results are in fair agreement with the experimental ones.

一、引言

1964年, Herriott 等人设计了作为激光谐振装置的多程室(MPC: Multiple-Pass-Cell)系统^[1]。对许多激光应用, 特别是对高分辨激光光谱, 激光喇曼光谱和受激喇曼散射等研究提供了很大的方便。目前, MPC 更多被用于 SRS (Stimulated Raman Scattering)^[2~5], 采用 MPC 作为受激转动喇曼散射获得 16 微米激光输出的 H₂ 喇曼室, 得到 55% 的能量转换效率和 85% 的量子转换效率^[2]。

本文讨论了 MPC 光路设计的简化处理和它的主要特性。对双光束或多光束在同一个 MPC 中经过同等反射次数的情况也作了考虑。

二、多程闭合光路的简化处理

当光束在两球面镜之间往返传播时, 若其衍射损失较小, 可以看成光线通过一薄透镜序列的传播。光束经过 n 个透镜, 相当于在镜面上反射 n 次。为了简化, 我们取两反射镜的曲率半径

$$R_1 = R_2 = R。$$

在二维坐标下, 光线经 n 次反射后, 在出射镜面上与轴相距 x_n, y_n , 一般用已知的坐标 x_0, y_0 和斜率 x'_0, y'_0 来表示。利用序列透镜的矩阵表示法很容易得到下式:

$$x_n = x_0 \cos n\theta + \sqrt{\frac{d}{4f-d}} \times (x_0 + 2fx'_0) \sin n\theta, \quad (1)$$

收稿日期: 1982年6月25日。

$$y_n = y_0 \cos n\theta + \sqrt{\frac{d}{4f-d}} \times (y_0 + 2fy'_0) \sin n\theta, \quad (2)$$

其中 x_0 、 y_0 是入射光线与轴间距, n 是反射次数, d 是腔长, R 是反射镜曲率半径, x'_0 、 y'_0 是入射光线与轴的斜率。 θ 由下式给出:

$$\cos \theta = \left(1 - \frac{d}{R}\right) \quad (3)$$

并满足稳定条件: $\left(0 < \frac{d}{f} < 4\right)$ 。

在一般情况下, 光线在镜面上的光斑成一个椭圆图形。方程(1)、(2)又可写成以下形式:

$$\begin{cases} x_n = A \sin(n\theta + \alpha) & (4) \\ y_n = B \sin(n\theta + \beta) & (5) \end{cases}$$

此时, 光路描述起来较为复杂。当设

$$A = B \quad (6)$$

$$\alpha = \beta \pm \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

光斑图形成一个圆。

$$x_n = A \cos(n\theta + \alpha) \quad (8)$$

$$y_n = A \sin(n\theta + \alpha) \quad (9)$$

其中 A 为光斑图形的圆半径, 由下式给出:

$$A = \frac{x_0}{\cos \operatorname{tg}^{-1} \left[-\sqrt{\frac{d}{2R-d}} \left(1 + R \frac{x'_0}{x_0}\right) \right]} = \frac{x_0}{\cos \alpha} \quad (10)$$

$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1} \left[-\sqrt{\frac{d}{2R-d}} \left(1 + R \frac{x'_0}{x_0}\right) \right] \quad (11)$$

作了这种假定后, 当反射次数 n 给定, 同时确定镜半径 R 和腔长 d 时, 入射和出射光束在两反射镜面上各耦合孔的坐标, 由原来用 x_0 、 y_0 、 x'_0 、 y'_0 表示的, 简化为只需由 x_0 、 x'_0 来确定, 大大简化了设计、安装和调试。

为了获得一个光路闭合系统, 光束经 n 次反射后, 沿原入射孔位置出射, n 、 θ 还需满足闭合条件:

$$\theta = \pi - \left(\frac{2\pi}{n}\right) \quad (12)$$

要使(12)式中的 n 成为通过多程室的总反射次数, 其中 n 还需满足:

$$n\theta = 2\nu\theta = 2\pi\mu \quad (13)$$

$$\nu = 1, 2, 3, \dots; \mu = 1, 2, \dots, (\nu - 1);$$

这里 2ν 是光路闭合后在两反射镜之间往返的次数, 系指 n 是一个偶整数。 μ 是一个方位旋转数, 它的实际意义将在下面谈到。方程(13)说明在 MPC 内的光束反射 n 次后, 光线沿原入射孔出射, 即 $x_n = x_0$, $y_n = y_0$ 。而取 $(n-1)$ 次后, 光线在另一镜上的 (x_{n-1}, y_{n-1}) 位置由小孔耦合输出。

三、多程反射特性

1. MPC 有效利用

为了有效利用吸收室的空间, 首先考虑的是入射光束的直径 ϕ 。若以最小间隔排布一周, 则在某一镜面上光斑分布为:

$$2\pi R \approx N\phi \quad (14)$$

从而可以定出最大利用空间 n 的取值 ($n = 2N$), 再由 $2\pi R$ 确定吸收室的直径。

2. μ 的物理意义

μ 为围绕 MPC 轴往返传播光束的方位旋转数。由(13)式可以看出 μ 越大, 光束第 n 次和第 $n+1$ 次之间的旋转角就越大, 反射光线通过 MPC 所经过的相交点就越多。对某些应用, 如用作喇曼增益室, 光束在 MPC 中交叉引起的相互作用导致喇曼激光斯托克斯输出脉冲的压缩^[3]。因此, 在设计时可以根据实际应用的需要选取 μ 值的大小, 但需注意以下几种情况:

a. 由腔稳定条件 $0 < \frac{d}{f} < 4$, 可得 θ 角的变化范围, $0 < \theta < \pi$ 。由(13)式得到

$$\theta = \frac{2\pi\mu}{2\nu},$$

因而可知 μ 的最大取值范围为 $(\nu - 1)$ 。

b. $\frac{\mu}{\nu} = \frac{1}{2}$, 此时有 $d=R$, MPC 为共焦腔。光线相交于 MPC 的纵向平面内。

c. $\mu=1$, 光线在 MPC 内不存在相交。

d. μ 取值越大, 光束在 MPC 内形成的旋转双曲球壳体积的“腰”越细 (参看图 1 的 (a) 和 (b))。在需要这种“细腰”光路时, 可取 $\mu = \nu - 1$, 相应地用稳定条件来最后确定 d 和 R 的取值。

3. 反射程数 n 可调

实验中我们观察到, 反射程数随腔长 d 的增大而增大。公式 (3) 和 (12) 表明, 光束反射的次数仅由反射镜间距与曲率半径之比来确定。当 $d \rightarrow 4f$, $n \rightarrow \infty$, 最终将由反射镜的反射率所限制。一般情况下, 取 $f \leq d < 4f$ 范围。利用这一特性, 可以精确地测量反射镜的反射率。在图 2 中我们给出一组各种不同的腔长所对应的不同反射程数的光斑图形照片。从实验数据中看到, 在 $R=1$ 米时, 腔长在略大于 f 的范围内变化, 引起反射程数的变化不显著。而当 d 在接近 $2f$ 范围内作一微小变化时, n 的改变较为明显。

四、误差估计

实验中我们发现球面反射镜倾角的误差最为重要。倾角有微小变化, 将引起镜面上光斑图形发生畸变。如果超出了倾角误差范围, 光线将射出镜外。

设镜 1 的倾角为 φ_1 , 镜 2 的倾角为 φ_2 , 光线经 n 次反射后, 由 φ_2 角在镜 1 上引起光斑图形与原来的位置偏差为^[4]:

$$\Delta x_n = \frac{d\varphi_2}{1-g^2} (\cos n\theta - 1) \quad (15)$$

由 φ_1 角在镜 1 上引起的偏差为:

$$\Delta x_n = \frac{d\varphi_1}{1-g^2} [\cos(n+1)\theta - g] \quad (16)$$

这里 $g = \left(1 - \frac{d}{R}\right)$, 由倾角在镜 2 上引起的偏差类似。在镜 1、2 上的最大公差角由下式

给出:

$$\varphi_{1,\max} = \frac{r(1-g)}{d} \quad (17)$$

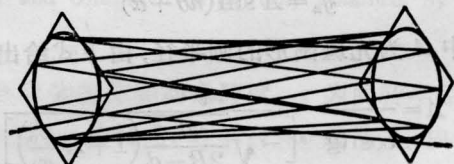
$$\varphi_{2,\max} = \frac{r(1-g^2)}{2d} \quad (18)$$

其中 r 为一个光点的位移。例如当 $R=100$ 厘米, $d=61$ 厘米, $n=16$, r 在 8 毫米内变化, 从公式 (17)、(18) 中得知, φ_1 、 φ_2 角在 $27'$ 内变化。实验结果表明最大倾角变化范围约为 $25'$ 。

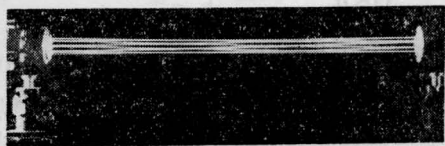
五、结果与讨论

本实验采用 He-Ne 激光源, 两镀金全反射镜的曲率半径 $R_1=R_2$, 镜直径 $\phi=50$ 毫米。在入射镜 x_n, y_n 位置上有 $\phi 8$ 毫米小孔作为耦合输入。在出射镜 x_{n-1}, y_{n-1} 位置上有 8 毫米孔作为耦合输出。

(1) 取 $R=32$ 厘米, 腔长 $d=61$ 厘米, $\mu=7$, $n=16$, 理论计算光路图由计算机绘出 (图 1(a)), 图 1(b) 是实验得到的多次反射光路照片。



(a)



(b)

图 1

(2) 在 $R=100$ 厘米, $\mu=3$ 的情况下, 通过改变腔长 d 而使 n 变化的一组反射镜面上的实际光斑图形, 见图 2。从图 2 结果看到, 改变腔长 d 可使光束反射次数显著增减。

(3) 光线经 n 次反射后, 当 $d \gg \phi$ (ϕ 为镜直径), 总光程长:

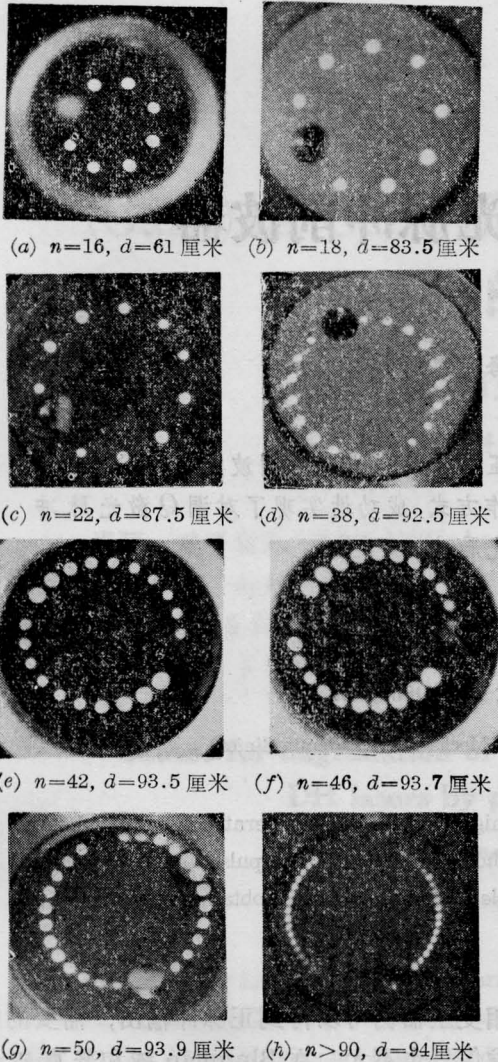


图 2

(上接第 357 页)

条件下,若选择性地激发萃取体系中 $^{235}\text{UO}_2^{2+}$ 基团的 ν_a , 则根据上述各式可分别估算出其单级的 β 、 β' 和 α 值, 结果列于表 3。显然, 表中所预期的铀同位素分离系数已经达到具有实用意义的数值范围。

对欧·格伦华特教授所给予的有益讨论和布朗达斯大学提供研究仪器设备表示感谢。

参 考 文 献

[1] Е. К. Карлова и др.; *Письма В ЖЭТФ*, 1975, **22**,

$$L \gtrsim nd \quad (19)$$

故当 $n=100$, 则有效光程可提高 100 倍, 并且由于凹面反射镜的不断聚焦, 使出射光束和入射光束的横截面积近似相等。因此可以说 MPC 还有效地控制了光束的发散。

(4) 利用光斑点的等间距性, 实现了双光束多程反射, 计算光路由计算机绘出图形。在双光束多程反射情况中, 具体的分析计算都是相同的, 只要适当地选取 x_n 、 y_n 、 X_n 、 Y_n 的位置, 便可得到 λ 光和 λ' 光在同一个旋转单叶双曲球壳上来回反射 n 次, 在各自的耦合孔输出, 以至不会被其它的孔耦合出去。同时 MPC 也适用于多光束多程反射情况。这为激光化学中的许多研究提供了较为理想的光学系统。

感谢四川大学物理系匡一中同志对本文的指教。感谢大连化物所陈锡荣、沈云焯、周传君同志对本工作大力支持和帮助。

参 考 文 献

[1] D. Herriott *et al.*; *Appl. Opt.*, 1964, **3**, 523.
 [2] P. Rabinowitz *et al.*; 1979, **35**, 739.
 [3] B. Perry *et al.*; *Opt. Lett.*; 1980, **5**, 288.
 [4] W. R. Trutna, R. L. Byer; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, 301.

459.

[2] G. L. Depoorter *et al.* *J. Inorg. Nucl. Chem.*, 1977, **39**, 2061.
 [3] Е. К. Карлова и др.; *Кван. электр.* 1979, **6**, №10, 2190.
 [4] S. K. Patil *et al.*; *J. Inorg. Nucl. Chem.*, 1973, **35**, 2537.
 [5] Е. М. Шусторович; “Химические связи в координированных соединениях”, Знание, Москва (1975).
 [6] E. Rabinowitch *et al.*; “Spectroscopy and Photochemistry of Uranyl Compounds”, pp. 6~7, 50~51, Macmillan, New York (1964).