

# 改进的 Herriott 型光学长程池\*

郝绿原\*\*, 吴国荣, 史强, 李琦, 林海, 朱清时

(中国科学技术大学, 中国科学院选键化学开放研究实验室 合肥 230026)

**摘要:** 用凹面反射镜和平面反射镜组成结构简单、光路易调的光多次反射装置, 计算了这种光学系统的稳定性条件。考虑实际入射光束的直径和发散角, 给出了最大反射次数的求法。制成适用于钛宝石激光声光谱仪的光 56 次通过的长程池。理论计算的反射光斑分布与实验观测一致。这个技术有利于提高光声光谱和吸收光谱的探测灵敏度。

**关键词:** 光学长程; 稳定性条件; 光声光谱

中图分类号: O43 文献标识码: A

## 1 引言

光学长程池是入射光在其中来回反射、有效光程显著增大的装置。反射光斑在反射镜上形成规则的图形。在传统的吸收光谱<sup>[1]</sup>、拉曼光谱<sup>[2]</sup>和光声光谱<sup>[3]</sup>, 特别是高分辨光谱<sup>[4, 5]</sup>的实验中, 为了提高探测灵敏度, 人们研制出多种光学长程池以增大入射光同样品的作用长度。常用的光学长程池有 White 型<sup>[1]</sup>、矩阵型<sup>[6]</sup>和 Herriott 型<sup>[7]</sup>。前两种长程池的特点是孔径角较大, 适用于普通光源和激光光源, 但所用反射镜较多, 至少三块。Herriott 型长程池的光学系统由两个凹面反射镜组成, 其特点是结构简单, 光路调节相对容易, 但孔径角较小, 适用于激光光源。在一些特殊的场合, 如用激光声光谱研究气体分子局域模振动<sup>[8, 9]</sup>, 经常使用的样品, 如 AsH<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>Se、SiH<sub>4</sub> 等, 都具有腐蚀性, 反射镜易受污染, 反射率降低, 探测灵敏度下降。反射镜使用一段时间后需清洗、重新镀膜, 再安装。这就要求光学长程池的光学系统结构简单, 便于安装、调节。

在激光声光谱实验中, 光源是激光, 发散角较小, 无需使用孔径角较大、结构复杂的长程池。Herriott 型长程池要求两个等焦距凹面镜平行且同轴。然而在实际应用中两个凹面镜安装在仪器上, 没有光学平台和可调节光具座, 不易使两凹面镜的主光轴重合, 难以使反射光斑的分布对称于镜中心以充分利用镜子的尺寸得到最多的光反射次数。为此, 根据电子光学重复聚焦的原理<sup>[10]</sup>, 我们改进了 Herriott 型长程池, 用平面镜取代其中一块凹面镜。在这种由一块凹面镜和一块平面镜构成的光具组中, 只需调节两镜相对平行即可。光学长程池便于安装, 光路易调。本文给出这种光具组的等价光学系统, 计算了光束在其中的稳定性条件, 求出了镜面上反射光斑的座标。在反射镜间距和口径给定的条件下, 考虑实际激光束的截面和发散角, 得出最多的反射次数并由此求出凹面镜焦距。研制出 56 次通过、适用于光声池的光具组。实验观测到的反射镜上光斑的分布与理论计算一致。

\* 国家自然科学基金资助项目(29703007)。

\*\* 通讯联系人, Email: hly@ustc.edu.cn

收稿日期 2000-06-14; 修回日期: 2000-09-10。

### 2 反射镜上光斑的位置

改进的 Herriott 型长程池的光学系统如图 1 所示。M<sub>1</sub> 是焦距为 f 的凹面反射镜, M<sub>2</sub> 是平面反射镜。两镜平行, 面间距为 d。凹面镜 M<sub>1</sub> 上开一小孔, 孔的坐标为 (x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>)。光线从该孔入射, 斜率为 x<sub>0</sub>' = dx/dz, y<sub>0</sub>' = dy/dz。入射光与 M<sub>1</sub> 的交点定义为 (x<sub>2n</sub>, y<sub>2n</sub>), 与 M<sub>2</sub> 的交点定义为 (x<sub>2n+1</sub>, y<sub>2n+1</sub>), n ≥ 0。根据几何光学, 图 1 所示的光具组等价于间距为 2d、焦距为 f 的共轴薄透镜组 (见图 2)。

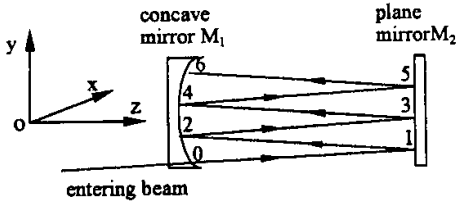


图 1 长程池的光学系统

Fig.1 Optical arrangement for obtaining a long absorbing path

入射光与薄透镜的交点就是入射光与 M<sub>1</sub> 的交点。平面反射镜 M<sub>2</sub> 相当于平板玻璃, 插在薄透镜之间, 如图 2 的一组虚线所示。入射光与平板玻璃的交点就是入射光与 M<sub>2</sub> 的交点。根据图 2, 先求入射光与 M<sub>1</sub> 的交点。

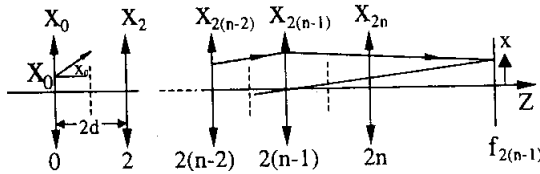


图 2 等间距等焦距共轴薄透镜组

Fig.2 Series of equally spaced thin lenses

交点的 x 分量与 y 分量等价, 先讨论 x 分量。根据图 2, 在近轴物近轴光线条件下, 可求得

$$x_{2n} = (2 - \frac{2d}{f})x_{2(n-1)} - x_{2(n-2)} \tag{1}$$

根据组合数学<sup>[11]</sup>, 递推关系式(1)的特征多项式是:

$$\alpha(x) = x^2 + (\frac{2d}{f} - 2)x + 1 \tag{2}$$

当  $\alpha(x)=0$  的判别式  $\Delta = (\frac{2d}{f} - 2)^2 - 4 = 4 \frac{d}{f}(d - 2f) \geq 0$  时,  $x_{2n}$  随 n 增大而增大。这就是说  $x_{2n}$  发散。所以  $d \geq 2f$  的共轴薄透镜组不稳定。当  $\alpha(x)=0$  的判别式  $\Delta = (\frac{2d}{f} - 2)^2 - 4 = 4 \frac{d}{f}(d - 2f) < 0$  时 (2) 式有一对共轭复根  $e^{\pm i2\theta}$ , 其中

$$\cos(2\theta) = 1 - \frac{d}{f} \tag{3}$$

这时方程(1)的解为

$$\begin{aligned} x_{2n} &= c_1 \cos(2n\theta) + c_2 \sin(2n\theta) \\ &= A \sin(2n\theta + \alpha) \end{aligned} \tag{4}$$

常数  $A$ 、 $\alpha$  由初始条件  $x_0$ 、 $x_0'$  确定。

$$n = 0 \text{ 时 } \quad x_0 = A \sin \alpha \quad (5)$$

$$n = 1 \text{ 时 } \quad x_2 = x_0 + 2dx_0' = A \sin(2\theta + \alpha) \quad (6)$$

由式 (5) (6) 得

$$A = \sqrt{\frac{2f}{2f-d} (x_0^2 + 2dx_0x_0' + 2dfx_0'^2)^{1/2}} \quad (7)$$

$$\text{tg } \alpha = \frac{\sqrt{2f/d-1}}{1 + 2f(x_0'/x_0)} \quad (8)$$

由 (4) 式看出 随着  $n$  的增大  $|x_{2n}|$  总是小于  $A$ 。这表明入射光束在光具组内来回反射而不从镜边沿射出。所以图 1 所示光具组的稳定性条件是  $0 < d < 2f$ 。同理

$$y_{2n} = B \sin(2n\theta + \beta) \quad (9)$$

与 (7) (8) 式一样 常数  $B$ 、 $\beta$  由初始条件  $y_0$ 、 $y_0'$  决定。

根据图 2 光线与平面镜  $M_2$  的交点为：

$$\begin{aligned} x_{2n+1} &= \frac{1}{2} [x_{2n} + x_{x_{n+1}}] \\ &= A \cos \theta \sin[(2n+1)\theta + \alpha] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} y_{2n+1} &= \frac{1}{2} [y_{2n} + y_{x_{n+1}}] \\ &= B \cos \theta \sin[(2n+1)\theta + \beta] \end{aligned} \quad (11)$$

交点就是镜面上的反射光斑。由式 (4) 和 (9) (10) 和 (11) (7) 和 (8) 可以看出以下两点：(1) 一般情况下 反射镜上反射光斑的分布  $(x_k, y_k)$  为一椭圆；(2) 改变入射光的初始位置  $(x_0, y_0)$  或斜率  $(x_0', y_0')$ ，可以使  $A = B$ ， $\alpha = \beta \pm \frac{\pi}{2}$ ，这时  $(x_k, y_k)$  形成一个圆。(4) (9) (10) (11) 式可改写为：

$$x_{2n} = A \sin(2n\theta + \alpha) \quad (12)$$

$$y_{2n} = A \cos(2n\theta + \alpha) \quad (13)$$

$$x_{2n+1} = A \cos \theta \sin[(2n+1)\theta + \alpha] \quad (14)$$

$$y_{2n+1} = A \cos \theta \cos[(2n+1)\theta + \alpha] \quad (15)$$

这是一种有用的反射方式 反射光斑等间隔地分布在反射镜边缘 镜面利用率高 可以得到较多的光反射次数。如图 3 所示 这种情况下  $2\theta$  是反射镜  $M_1$  (或  $M_2$ ) 上相邻光点之间的夹角。

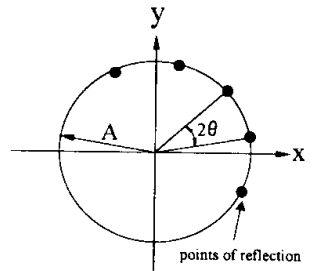


图 3 镜面上反射光斑分布为圆圈时 相邻光斑的相对位置

Fig.3 Reflecting points  $(x_n, y_n)$  lying on circle

### 3 激光束的截面和发散角对光反射次数的影响

根据前面的讨论  $d$ 、 $f$  固定时若反射光斑在镜面上的分布为一圆 反射次数最多 反射镜上相邻光斑的夹角由 (3) 式确定。由 (3) 式看出 当  $d$  一定时  $f$  越大  $\theta$  越小 反射次数越多。但是实际的激光束并非一条几何直线 而有一定的截面和发散角  $\varphi$ 。 $\theta$  小 相邻光斑间距小 一定大小的反射光斑会从入射孔射出。 $f$  大 聚焦能力弱。随着反射次数的增加 反射镜上的光斑将变大。光斑的变大会使反射的激光束从反射镜的边沿射出光具组。所以在设计光具组时要考虑入射激光束的截面和发散角对光反射次数的影响。

如图 4 所示, 设激光束在  $x$  方向的轮廓线为  $L_1$  和  $L_2$ 。  $L_1$  和  $L_2$  在入射孔处的坐标分别为  $x_{01}$ 、  $x_{02}$  相应的斜率  $\frac{dx}{dz}$  为  $x_{01}'$ 、  $x_{02}'$ 。 近轴条件下, 光束发散角  $\varphi = \frac{1}{2}(x_{01}' - x_{02}')$  用

$$M = \left| \frac{x_{k1} - x_{k2}}{x_{01} - x_{02}} \right|$$

表示光束在此光学系统中的发散程度的变化。

当  $k = 2n$  时, 利用(12)式得

$$\begin{aligned} x_{k1} - x_{k2} &= x_{2n1} - x_{2n2} \\ &= A_1 \sin(2n\theta + \alpha_1) - A_2 \sin(2n\theta + \alpha_2) \\ &= \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \sin(2n\theta + \varphi) \end{aligned}$$

其中常数

$$u_1 = \sqrt{\frac{d}{2f-d}} [(x_{01} - x_{02}) + 4f\varphi] \quad (16)$$

$$u_2 = x_{01} - x_{02}$$

$$\sin \varphi = \frac{u_2}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2}} \quad (17)$$

所以:

$$\begin{aligned} M_{2n} &= \left| \frac{x_{2n1} - x_{2n2}}{x_{01} - x_{02}} \right| \\ &= \left| \frac{\sqrt{u_1^2 + u_2^2} \sin(2n\theta + \varphi)}{u_2} \right| \\ &= \left| \frac{\sin(2n\theta + \varphi)}{\sin \varphi} \right| \end{aligned} \quad (18)$$

同理, 当  $k = 2n + 1$  时, 由(14)式得

$$M_{2n+1} = \cos \theta \left| \frac{\sin(2n\theta + \varphi)}{\sin \varphi} \right| \quad (19)$$

由(18)(19)式可以看出, 镜面上光斑的大小按正弦规律变化。在实际应用中, 为得到尽可能多的反射次数,  $\theta$  总是比较小的。  $2n\theta + \varphi$  可以取到一个很接近  $\pi$  的值, 所以镜面上有一个非常小的光斑。  $2n\theta + \varphi$  也可以取到  $\pi/2$  和  $3\pi/2$ , 由此求得  $M$  的最大值为

$$M_{\max} = \left| \frac{1}{\sin \varphi} \right| \quad (20)$$

#### 4 实际多次反射光具组的设计和实验

由于平面镜便于调节, 而且将(14)(15)和(19)式与(12)(13)和(18)式对比可知, 平面镜上光斑构成的圆比凹面镜上的圆小, 所以将入射孔开在凹面镜上。这样即使两镜的中心对得不准, 也容易使反射点都落在平面镜上。光声信号正比于光声池内的光强, 所以要求光在池内的反射次数尽量多并且光不从反射镜边沿射出。这就要求最大的一个反射光斑落在镜面内。于是反射镜实际可用的有效直径  $2R_{\text{eff}}$  小于口径  $2R$ ,

$$R_{\text{eff}} = R - \frac{u_2}{2} M_{\max} \quad (21)$$

同时要求反射的光束不从入射孔中漏出, 即要求第二个光斑与入射孔不重叠, 即

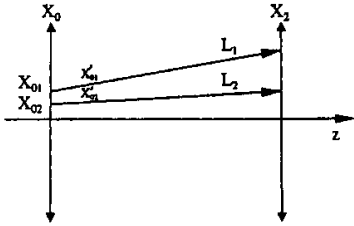


图 4 具有一定截面和发散角的激光束的入射

Fig. 4 Entering beam with ray diameter and divergence angle

$$2R_{\text{eff}}\sin \theta \geq \frac{u_2}{2}(1 + M_2)$$

$$= \frac{u_2}{2} \left[ 1 + \frac{\sin(2\theta + \varphi)}{\sin \varphi} \right] \quad (22)$$

光具组的设计就是求出凹面反射镜的最佳焦距  $f$ , 使激光能量尽可能集中在长程池内。设计步骤如下: ① 已知激光束的发散角  $\varphi$ , 测量光束在入射孔处的直径  $u_2$ 。② 根据实验需要和光声池的大小确定两块反射镜的口径  $2R$  和间距  $d$ 。③ 设镜面上反射光斑数为  $n$ , 则  $2\theta = \frac{360}{n+1}$ 。再由  $\cos(2\theta) = 1 - \frac{d}{f}$  求凹面反射镜的焦距  $f$ 。④  $u_2$ 、 $\varphi$ 、 $f$ 、 $d$  代入(16)式求  $u_1$ ; 由  $u_1$ 、 $u_2$  代入(17)式求  $\sin \varphi$ ; 再由(20)式得反射光斑的放大率  $M_{\text{max}}$ 。⑤  $R$ 、 $u_2$ 、 $M_{\text{max}}$  代入(21)式求反射镜的有效半径  $R_{\text{eff}}$ 。⑥ 由上面求出的数据判断(22)式是否成立。若成立, 可增大  $n$ , 直至(22)式恰好成立, 这时的  $n$  即为  $R$ 、 $d$  和激光器一定时的最大光反射次数。按与  $n$  相应的  $f$  加工凹面反射镜, 若不成立, 则减小  $n$ , 直至(22)式恰好成立, 这时的  $n$  即为最大光反射次数。同样按与  $n$  相应的  $f$  加工凹面反射镜。

钛宝石激光器光束直径  $u_2 = 0.4 \text{ cm}$ , 发散角  $\varphi = 1.7 \text{ mrad}$ 。选择反射镜  $R = 3.05 \text{ cm}$ ,  $d = 40 \text{ cm}$ 。由上述步骤算出  $\varphi = 13.43^\circ$ ,  $n = 27$ ,  $2\theta = 12.86^\circ$ , 相应的  $f = 1595 \text{ cm}$ 。 $n = 27$  是  $u_2$ 、 $\varphi$ 、 $R$  和  $d$  一定时的最大光反射次数。光在反射镜之间的通过次数为  $2(n+1)$ 。根据公式(12)、(13)和(18)式计算出反射镜  $M_1$  上的光斑分布, 如图 5 所示。为了拍照, 用氦氖激光代替钛宝石激光。图 6 是  $M_1$  上实际光斑分布的照片, 与图 5 一致。两幅图都清楚地显示出反射光斑的大小周期性改变。

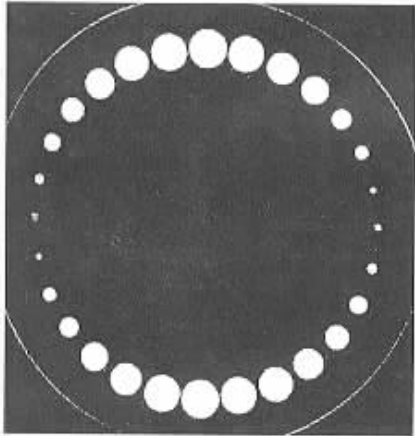


图 5 理论计算的反射镜  $M_1$  上的光斑分布

Fig.5 The calculated spot pattern on  $M_1$  surface

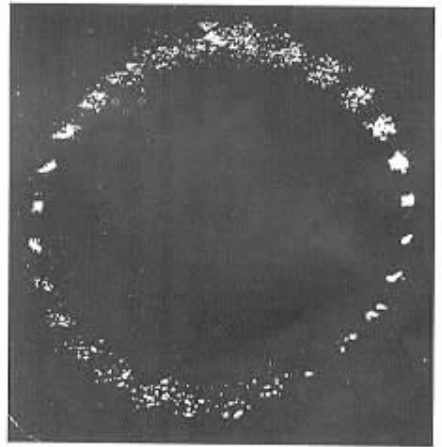


图 6 凹面镜上反射光斑分布的照片

Fig.6 Photograph of the distribution of spots on  $M_1$  surface

## 5 总 结

由平面反射镜和凹面反射镜构成的光具组在满足稳定性条件时是一稳定的光学系统。射入其中的光束被重复聚焦, 不同于在自由空间传播。在传统的 Herriott 型长程池<sup>[7]</sup>中,

$$\cos \theta = 1 - \frac{d}{2f} \quad (23)$$

此处的  $f$  是 Herriott 型长程池中凹面镜的焦距。  $d$  固定时, 设两凹面镜构成的光具组与平面

镜、凹面镜构成的光具组有相同的  $\theta$  ,则由(3)式和(23)式可得

$$f_{\text{平凹}} = \frac{1}{2}f_{\text{双凹}}$$

这说明与 Herriott 型长程池相比 ,平面镜、凹面镜构成的光具组中光的聚焦次数减少 ,但凹面镜的焦距变短 ,聚焦性能变好。与(18)式的推导类似 ,可求出 Herriott 型长程池中光束发散的表达式  $M_{\text{双凹}}$ 。使用同一光源 ,在  $d$ 、 $\theta$  相同且  $\theta$  较小(即反射次数较多)的条件下 ,可证明

$$\frac{M_{\text{平凹}}}{M_{\text{双凹}}} = \sqrt{\frac{2}{1 + \cos\theta}} \approx 1$$

所以改进的 Herriott 型长程池的聚焦性能与 Herriott 型长程池相当。由于不必考虑平面镜、凹面镜的光轴 ,改进的 Herriott 型长程池更便于安装和调节光路。

本工作为光声池设计光多次通过光学系统 ,所以只关心光的反射次数而不要求绝对光程 ,因为光声信号正比于池内的光功率。等比例增大反射镜间距  $d$  和反射镜口径  $2R$  ,反射次数不变而光程增大 ,有利于吸收光谱的测量。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] White J U. *J. Opt. Soc. Am.* , 1942 , **32** : 285
- [ 2 ] Trutna W R , Byer R L. *Appl. Opt.* , 1980 , **19** : 301
- [ 3 ] Koch K P , Lahmann W. *Appl. Phys. Lett.* , 1978 , **32** : 289
- [ 4 ] Davidsson J , Gutow J H , Zare R N. *J. Phys. Chem.* , 1990 , **94** : 4069
- [ 5 ] Hornberger Ch , Konig M , Rai S B , *et al.* . *Chem. Phys.* , 1995 , **190** : 171
- [ 6 ] Chermis S M , Barskaya E G. *Appl. Opt.* , 1991 , **30** : 51
- [ 7 ] Herriott D , Kogelnik H , Kompfner R. *Appl. Opt.* , 1964 , **3** : 523
- [ 8 ] Ulenikov O N , Onopenko G A , HaiLin , Jinhui Zhang , Zeyi Zhou , Qingshi Zhu , Tolchenov R N. *J. Mol. Spectro.* , 1998 , **189** : 29
- [ 9 ] Jiaxiang Han , Ulenikov O N , Sergi Yurchinko , Luyuan Hao , Xiaogang Wang , Qingshi Zhu. *Spectrochim. Acta* , 1997 , **53A** : 1705
- [ 10 ] Pierce J R. *Theory and Design of Electron Beams* , Van Nostrand , New York , 1954 , Chap. 11 : 194
- [ 11 ] Lu Kacheng. *Combinatorics* , Qinhua University Press ( 北京大学出版社 ) , Beijing ( 北京 ) , 1995 : 74

## An Advantaged Multiple – pass Herriott Cell \*

Hao Luyuan \*\*, Wu Guorong , Shi Qiang , Li Qi , Lin Hai , Zhu Qingshi  
( *Laboratory for Bond – selective Chemistry , Chinese Academy of Science , Department of  
Chemical Physics , University of Science and Technology of China , Hefei 230026* )

**Abstract** A multiple – pass geometry for simple structure and easy adjustment is designed , which consists of only a concave mirror and a plane mirror. The stability condition of this optical system is worked out. A design procedure for maximum number of reflection is described that includes a consideration of input ray diameter and divergence angle. A 56 – pass cell is constructed for Ti : sapphire ring laser photoacoustic spectrometer. The calculated spot pattern is in good agreement with the experimental observation. This technique is useful for photoacoustic spectroscopy and long path absorption.

**Key words** Multipass , Stability condition , Photoacoustic effect

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( 29703007 ).

\*\* To whom correspondence should be addressed , Email : hly@ustc.edu.cn