

文章编号: 1672-8785(2013)01-0016-05

新型光学吸收池的设计与数值模拟

沈 超 张玉钧 倪家正

(电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘 要: 为解决传统光学吸收池无法同时满足高光斑密度要求和低制造成本要求的问题, 根据传输矩阵理论, 提出了一种基于球面镜和柱面镜组合的新型吸收池设计。通过数值计算模拟, 分析了吸收池内光束传输次数与结构参数、镜面旋转以及出射光斜率之间的关系。结果表明球面镜和柱面镜组合具有较好的抗干扰性能。给出了一种基长为 65 mm、光程长为 10 m 的吸收池设计例子。该吸收池干涉效应较小, 所占体积仅为 0.29 L, 适用于吸收光谱学等应用。

关键词: 光学吸收池; 柱面镜; 多次反射; 传输矩阵

中图分类号: O433 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.01.03

Design and Numerical Simulation of a New Multipass Optical Absorption Cell

SHEN Chao, ZHANG Yu-jun, NI Jia-zheng

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology,
Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: To solve the problem that the traditional optical absorption cell can not meet the requirement of low cost while meets the requirement of high optical spot density, a new optical absorption cell combining spherical mirrors with astigmatic mirrors is designed according to the transfer matrix formalism. The relationship of the beam transmission number in the optical absorption cell with structure parameters, mirror rotation and emergent light slope is analyzed by numerical simulation. The results show that the combination of spherical mirrors with astigmatic mirrors has a good anti-interference capability. A design example for an optical absorption cell with the length of 65 mm and an optical path of 10 m is given. This optical absorption cell has a small interference effect. Its volume is merely 0.29 L. It is suitable for absorption spectroscopy.

Key words: optical absorption cell; cylindrical mirror; multipass; transfer matrix formalism

0 引言

光学吸收池是利用入射光在其中多次来回反射而获得所需光程的装置。这种装置能够以较短的距离提供较长的光程, 已被广泛应用在吸收光谱学、拉曼光谱学和光声光谱学技术中

[1]。常用的光学吸收池有 White 型 [2]、Herriott [3] 型和矩阵型 [4]。这些吸收池利用球面镜或像散镜组成非谐振腔, 光束在腔内经过多次反射可形成规则的光斑图案。其中, 由球面镜组成的吸收池结构简单, 容易调节和加工, 但镜面上的光斑密度较低, 镜面利用率不高。由像散镜组成的

收稿日期: 2012-12-12

作者简介: 沈超 (1989-), 男, 安徽芜湖人, 硕士研究生, 主要从事光电探测技术等方面的研究。

E-mail: zhoxue19891020@sina.com

吸收池^[5]虽然能够提供复杂的光斑图案,但由于制造和调节方面的困难,不利于广泛应用。因此,设计出同时具有结构简单和大光斑密度的特点的吸收池十分必要。

本文根据传输矩阵理论^[6],对已有的由柱面镜组成的吸收池设计^[7]进行了改进,提出了一种基于球面镜与柱面镜组合的吸收池设计。该吸收池在 6.5 m 的基本尺寸上可实现 10 m 的光程,并具有较好的稳定性和抗干扰性能。

1 理论分析

吸收池的具体结构如图 1 所示,前镜 M_1 是球面镜,焦距为 f_{sph} ,后镜 M_2 是柱面镜,沿 x 轴方向的焦距为 ∞ ,沿 y 轴方向的焦距为 f_{cyl} 。柱面镜凹面的初始位置沿 y 轴方向。 M_1 和 M_2 的中心分别在 $z=0$ 和 $z=d$ 处。 M_1 的中心处开有一个半径为 r_{hol} 的小孔,光线从小孔入射至腔内,经过 $(N-1)$ 次反射 (N 次传播) 后射出腔外。光束在腔内往返传播的规律可通过传输矩阵理论来描述。具体来说,用列向量 r_N 表示传播光束, $r_N = [x_N, x'_N, y_N, y'_N]^T$, 其中 x_N 和 y_N 是光线的 X 轴和 Y 轴坐标, x'_N 和 y'_N 是光线沿 x 和 y 方向的斜率, T 表示矩阵转置。光线在自由空间传播距离 d 的传输矩阵为

$$D(d) = \begin{bmatrix} 1 & d & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

在 M_1 和 M_2 上的反射矩阵分别为 R_1 和 R_2 , 其表达式分别为

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{f_{sph}} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{f_{sph}} & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{f_{cyl}} & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

当 M_2 相对于原始坐标轴旋转 δ 角度^[8] 时,反射矩阵 R_2 变为

$$R'_2 = T(-\delta)R_2T(\delta) \quad (4)$$

式中, $T(\delta)$ 为旋转矩阵

$$T(\delta) = \begin{bmatrix} \cos(\delta) & 0 & \sin(\delta) & 0 \\ 0 & \cos(\delta) & 0 & \sin(\delta) \\ -\sin(\delta) & 0 & \cos(\delta) & 0 \\ 0 & -\sin(\delta) & 0 & \cos(\delta) \end{bmatrix} \quad (5)$$

光线往返一周的传输矩阵为

$$C = R_1D(d)T(-\delta)R_2T(-\delta)D(d) \quad (6)$$

因此经过 $\frac{N}{2}$ 次往返传播后, M_1 和 M_2 上的光线矩阵分别为

$$r_1 = D(d)T(-\delta)R_2T(-\delta)D(d)C^{\frac{N}{2}-1}r_0 \quad (7)$$

$$r_2 = D(d)C^{\frac{N}{2}-1}r_0 \quad (8)$$

式 (7) 和 (8) 中, r_0 均为从小孔入射时的光线矩阵

$$r_0 = [x_0, x'_0, y_0, y'_0]^T \quad (9)$$

通过计算上述传输矩阵,能够追踪光线在 M_1 和 M_2 上交点的坐标值。由光线在镜面上的交点组成的图案一般都为复杂的李萨如图形,这就使得在有限的镜面面积下获得长光程成为可能^[9]。有用的设计应是在 N 次传输的每一次传输中,光线都不落在镜外而且最后出射的光点都位于小孔内。假设两镜半径相同且光线从原点入射,考虑到光斑半径为 r_{spot} ,则光线在镜面上的坐标应满足下式:

$$\begin{cases} x_i^2 + y_i^2 < r_{mir}^2, i = 1, 2 \dots N \\ \sqrt{x_N^2 + y_N^2} + r_{spot} < r_{hol} \end{cases} \quad (10)$$

式中, r_{mir} 为镜面半径。理论上吸收池设计就是要根据给定的光程长度,利用约束条件式 (10),寻找出符合条件的 d 、 f_{sph} 、 f_{cyl} 和 N 。在实际设计中,由于矩阵方程过于复杂,直接求解十分困难,所以通常的作法是先取定距离 d (或焦距),再通过调整焦距 f_{sph} 和 f_{cyl} 值(或 d)来求

得符合 (10) 式的 N 。随着 d 或焦距的改变, 会出现许多不同的 N 值。此时可根据需要的光程长度和镜面光斑分布情况选择最符合设计要求的解。求解时还可利用入射光线斜率来确定光斑图案的范围^[10]。

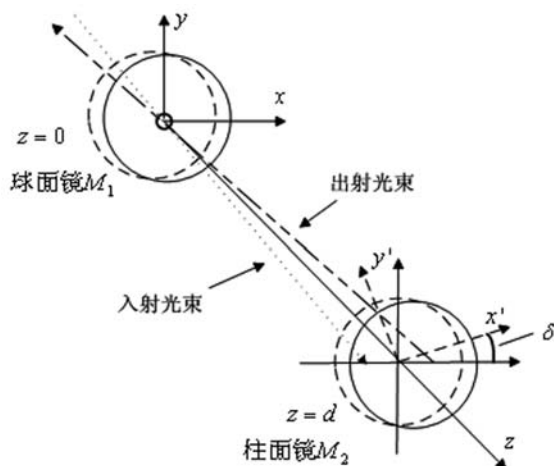


图1 吸收池几何结构示意图

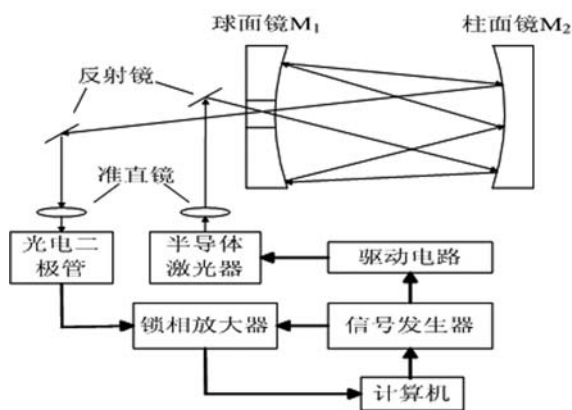


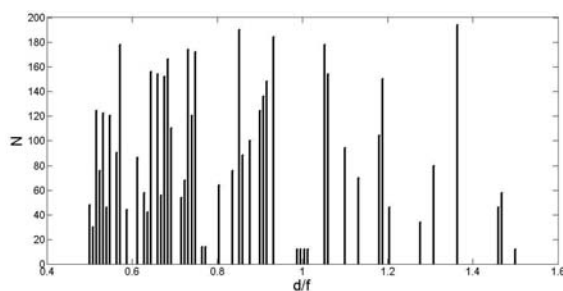
图2 系统原理图

2 计算模拟

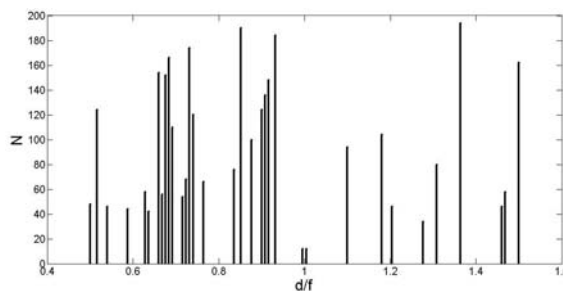
2.1 结构参数对传输次数 N 的影响

在吸收池基长 d 一定的情况下, 吸收池光程长度主要由光束传输次数 N 决定。为了研究 N 值与结构参数 d 、 f_{sph} 和 f_{cyl} 之间的关系, 计算了不同 d/f 值下符合 (10) 式的 N 值, 其中 f 是 f_{sph} 和 f_{cyl} 的平均。采用 MATLAB 语言编写计算程序, 取 $f_{sph}=f_{cyl}$, $r_{spot} = 0.5\text{mm}$,

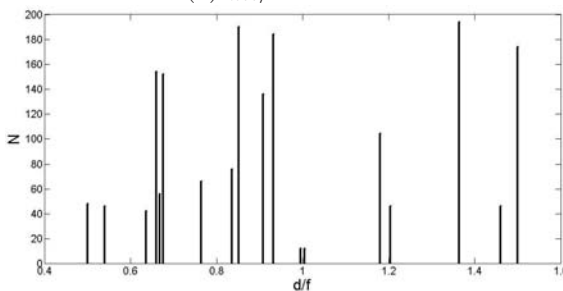
$r_0 = [0, 0.1, 0, 0.1]^T$, 结果如图 2 所示。图 2 中的 (a)、(b)、(c) 分别对应小孔半径与镜面半径之比 0.05、0.04 和 0.03; d/f 范围在 0.5 到 1.5 之间, 间隔取 0.008; 上限值取 200。由图 2 可以看出, 随着 d/f 值的不同, N 解的变化很大。这说明可以通过改变 d/f 值来改变 N , 从而得到不同的光程。随着光线在吸收池内的往返传播, 其在镜面上的交点位置也在不断变化。小孔半径决定了光线交点落在小孔内的概率。 r_{hol} 越大, 光线就越容易落在小孔内, 因而满足条件的 N 值也就越多。因此随着 r_{spot}/r_{mir} 值的变小, 满足条件的 N 解会变少。



(a) $r_{hol}/r_{mir} = 0.05$



(b) $r_{hol}/r_{mir} = 0.04$



(c) $r_{hol}/r_{mir} = 0.03$

图3 N 与 $\frac{d}{f}$ 之间的关系图

2.2 镜面旋转对出射光斑位置 (x_N, y_N) 的影响

镜面的旋转会改变反射矩阵 R 的表达式, 从而对 N 值造成影响。通过计算镜面旋转角度 δ 后出射光束的光斑位置变化, 可以得到吸收池与镜面旋转角度 δ 之间的关系, 从而判断系统的稳定性和抗干扰性。由于 M_1 关于旋转轴 (z 轴) 完全对称, 所以只需要对 M_2 应用式 (5) 即可。对 N 取 76、120 和 174 的三种情况分别进行计算, δ 取值范围为 $[0^\circ, 90^\circ]$, 间隔为 1° , 计算结果如图 3 所示, “+”号表示 $\delta = 0^\circ$ 时的出射点位置。从图 3 中可以看出, 随着 δ 的变化, 出射点的运动轨迹形成一个圆形, 但是大部分出射点仍然落在小孔范围内, 因而仍满足出射条件。可见, 与柱面镜组成的系统常利用旋转来进行曲率半径误差补偿不同^[11], 球-柱面镜系统对柱面镜的旋转并不敏感。主要原因是球面镜具有完全的对称特性。虽然不具有旋转带来的自由度, 但吸收池的稳定性和抗干扰能力却因此得到了提高。

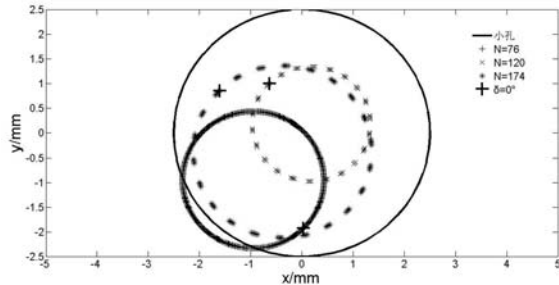


图 4 出射点位置随 δ 变化关系图

2.3 不同的 N 解对出射斜率 (x'_N, y'_N) 的影响

由于采用单孔入射和出射设计, 为了方便后续信号探测和处理, 出射光束应具有一定的斜率以便和入射光束分开。通过计算不同的 N 解与出射光束斜率之间的关系, 可以为吸收池参数选择提供参考。计算条件与图 2(a) 相同, 结果如图 4 所示。图 4 中灰色圆斑代表出射光点在离入射点 10 cm 平面处的位置, 圆斑大小按照 R^N 规律分布以反映实际传输规律, R 是镜面反射率, 取值为 0.98。圆斑附近的数字代表相应的 N

解, “+”号表示入射点。图 4 反映了同样的入射矩阵 r_0 条件下不同 N 解与 (x'_N, y'_N) 之间的关系, 从图中可以方便地找到满足需要的 N 解。

综上所述, 只要确定了光程长度, 完全可以通过求解矩阵方程得到相应的 d 、 f_{sph} 和 f_{cyl} 值。当焦距参数已经确定时, 通过微调基长 d 可以获得更多的 N 解。由球面镜和柱面镜组成的吸收池完全可以投入实际使用。图 5 和图 6 所示为一种可行的设计, 图中较大的圆圈代表镜面, 较小的圆圈代表小孔, “+”号表示出射点位置, 光斑大小仍然按照指数规律显示。具体结构参数如表 1 所示。

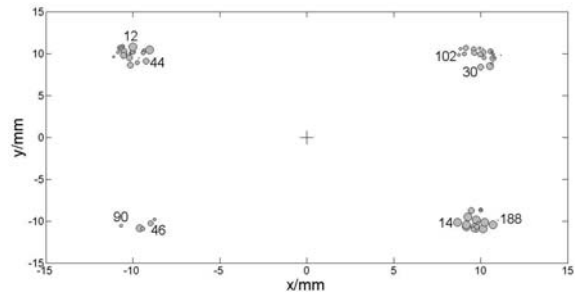


图 5 N 值与出射位置关系图

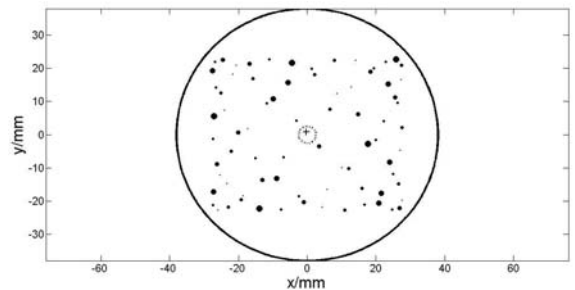


图 6 M_1 上的光斑图案

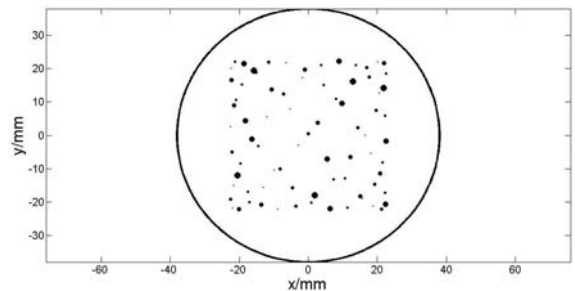


图 7 M_2 上的光斑图案

表 1 设计参数 (单位: mm)

f_{sph}	f_{cyl}	d	r_{mir}	r_{hol}	r_0	N/ 次
98.1	108	64.75	38	2.5	$[0, 0.2, 0, 0.25]^T$	154

3 结论

提出了一种基于球面镜和柱面镜组合的吸收池设计并论证了设计的可行性。首先利用传输矩阵方法对该吸收池设计进行了数值计算模拟,分析了吸收池的 N 解与 d 、 f_{sph} 和 f_{cyl} 之间的关系,并讨论了镜面旋转对 N 解的影响。然后从实际应用角度考虑,计算了同一入射矩阵 r_0 条件下,不同的 N 解对出射斜率 (x'_N, y'_N) 的影响。最后给出了一种基长为 6.5 cm,光程长度为 10 m 的吸收池设计,其他可行的设计可通过改变距离 d 得到。该吸收池具有体积小 (0.29 L) 和干涉影响低的特点,适用于吸收光谱学等应用领域。

参考文献

- [1] 郝绿原, 吴国荣, 史强, 等. 改进的 Herriott 型光学吸收池 [J]. 化学物理学报, 2001, 14(2): 147-153.
- [2] White J U. Long Optical Paths of Large Aperture [J]. Opt Soc Am 1942, 32: 285-288.
- [3] Herriott. Off-axis Paths in Spherical Mirror Interferometers [J]. Applied Optics, 1964, 3(4): 524-526.

- [4] Chernin S M, Barskaya E G. Optical Multipass Matrix Systems [J]. Applied Optics, 1991, 30(1): 51-58.
- [5] Herriott D R, Schulte J. Folded Optical Delay Lines [J]. Applied Optics, 1965, 4(8): 883-891.
- [6] Kogelnik H, Li T. Laser Beams and Resonators [J]. Applied Optics, 1966, 5(10): 1550-1567.
- [7] Hao L Y, Shi Q, Wu G R, et al. Cylindrical Mirror Multipass Lissajous System for Laser Photoacoustic Spectroscopy [J]. Review of Scientific Instruments, 2002, 73(5): 2079-2085.
- [8] Kasyutich V L, Martin P A. Multipass Optical Cell Based Upon Two Cylindrical Mirrors for Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy [J]. Applied Physics, 2007, 88: 125-130.
- [9] McManus J B. Astigmatic Mirror Multipass Absorption Cells for Long-path-length Spectroscopy [J]. Applied Optics, 1995, 34(18): 3336-3348.
- [10] Silver J. Simple Dense-pattern Optical Multipass Cells [J]. Applied Optics, 2005, 44(31): 6545-6556.
- [11] Kasyutich V L. Laser Beam Patterns of an Optical Cavity Formed by Two Twisted Cylindrical Mirrors [J]. Applied Physics, 2009, 96: 141-148.

新闻动态 News

美国 Bodkin 设计与工程公司开始研制用于无人机系统的具有模式切换功能的偏振相机

据 www.vision-systems.com 网站报道, 美国 Bodkin 设计与工程公司最近从美国空军获得了一份合同, 他们将研制一种可以使红外相机从高分辨率红外成像模式切换到红外偏振成像模式的偏振元件。

利用偏振成像技术可以对某一场景中各点发出的光的偏振状态进行测量。这种信息 (特别是在红外波段) 有助于人们在遥感与军事应用中对感兴趣的材料和物体进行分类和识别。例如, 通过用一台偏振敏感相机, 可以增强监视活动中

对位于树冠下、采取伪装措施以及处于杂乱环境中的目标的探测能力。

相关人员表示, 这种新的偏振元件将使得现有的相机能够在偏振成像模式与高分辨成像模式之间进行快速切换。

这个为期 9 个月的研制项目是由美国小企业创新研究 (SBIR) 计划资助的。



□ 岳桢干

<http://journal.sitp.ac.cn/hw>