

文章编号: 0258-7025(2007)06-0748-03

# 轴移不变性的发展及其在锁模腔设计中的应用

张晓华<sup>1,2</sup>, 张光寅<sup>2</sup>, 张 骥<sup>1</sup>, 汤秀章<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国原子能科学研究院, 北京 102413; <sup>2</sup> 南开大学物理学院, 天津 300071)

**摘要** 运用传播圆-变换圆图解分析方法, 在轴移不变性的基础上发展并理论推导了轴移→旋转→轴移变换的关系, 丰富了轴移不变性的内容。通过传播圆-变换圆图解分析, 指出五镜腔为非对称腔; 并根据轴移不变性的轴移→旋转→轴移变换原理, 提出了将其谐振腔改进为近对称腔的设计方案, 从而使其性能更加优越, 运转更加稳定。

**关键词** 激光器; 轴移不变性; 传播圆-变换圆; 轴移→旋转→轴移变换

中图分类号 TN 242 文献标识码 A

## Development of Axial-Transfer Invariability and Its Application in Mode-Locking Cavity Design

ZHANG Xiao-hua<sup>1,2</sup>, ZHANG Guang-yin<sup>2</sup>, ZHANG Ji<sup>1</sup>, TANG Xiu-zhang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China  
<sup>2</sup>College of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract** Using the propagation-circle and transform-circle graphic analysis, relation of axial-transfer to rotation, and then to axial-transfer has been developed and theoretically deduced based on axial-transfer invariability, which enriched the content of axial-transfer invariability. It was pointed out that the five-mirror cavity was a asymmetric cavity. And the design-scheme of modifying the five-mirror cavity to a nearly symmetrical cavity has been put forward based on axial-transfer to rotation to axial-transfer transform. As a result, the operation performance of the modified cavity was more stable.

**Key words** lasers; axial-transfer invariability; propagation-circle and transform-circle; axial-transfer to rotation to axial-transfer transform

## 1 引言

20 世纪 60 年代, Deochamps 等<sup>[1]</sup> 和 Laures<sup>[2]</sup> 提出了描述高斯光束传播特性的图解方法——传播圆法。而后张光寅教授在此基础上提出并发展的传播圆-变换圆图解分析方法<sup>[3]</sup>, 特别适用于解决全固态激光器的高功率、热稳定和锁模特性。本文将其进一步发展, 并将其运用到超短脉冲激光器的谐振腔设计中。

## 2 轴移不变性

高斯光束通过透镜变换时的轴移不变性<sup>[3,4]</sup> 内容为: 束腰共焦参数为  $b$  的高斯光束, 通过一焦距为

$f$  的透镜  $F$  变换时, 不论其物方束腰位置离透镜  $F$  多远, 像方高斯光束在透镜  $F$  右焦点处的光束参数  $b'$  总保持不变, 即有

$$b' = f^2/b. \quad (1)$$

如图 1 所示, 在物方高斯光束的束腰附近引入一对等效共焦波面和它们的一个公共  $\sigma$  圆。两等效共焦波面的曲率半径为  $2b$ , 对称地分布在束腰的两边, 并分别交光轴于  $S_1, S_2$  点, 两点间距离等于  $2b$ ,  $\sigma$  圆的直径亦等于  $2b$ 。作一  $\pi'$  圆, 内切于  $\sigma'$  圆 ( $\sigma$  圆通过透镜  $F$  变换后的像圆), 同时切光轴于透镜  $F$  的右焦点  $O'$  处,  $\pi'$  圆的直径即为透镜  $F$  右焦点处的光束参数  $b'$ 。在  $\sigma$  圆沿轴向移动过程中,  $\pi'$  圆与  $\sigma'$  圆的切点  $F'_i$  沿  $\pi'$  圆顺时针或逆时针方向旋转, 所以称图 1

收稿日期: 2006-08-31; 收到修改稿日期: 2007-01-30

作者简介: 张晓华(1976—), 女, 山东人, 博士, 主要从事超短脉冲激光的研究。E-mail: xhnankai@126.com

导师简介: 张光寅(1932—), 男, 教授, 主要从事固态光子学和凝聚态光谱研究。E-mail: zhanggy@nankai.edu.cn

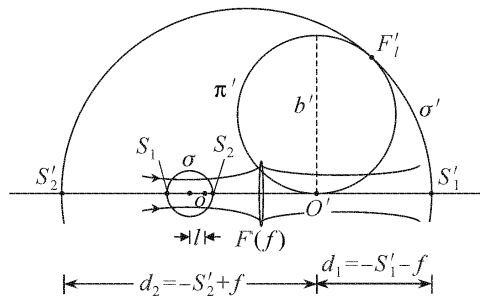


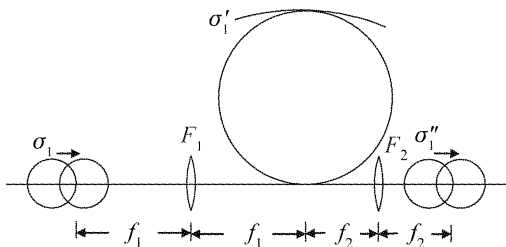
图 1 高斯光束通过透镜变换时的轴移不变性图解

Fig. 1 Axial transfer invariability of Gaussian beam

中的关系为轴移→旋转变换。这一特性对于解决固体激光器的热透镜效应、进一步提高高功率固体激光器的输出功率等有着极其重要的作用。

### 3 轴移不变性的发展和证明

将轴移→旋转变换反过来就得到了旋转→轴移变换。如果将两变换关系进行串接,就得到图 2 所示的轴移→旋转→轴移变换,即令透镜  $F_1$  和  $F_2$  为共焦的关系,就可使物圆  $\sigma_1$  的轴移,经共焦透镜  $F_1, F_2$  作用后,变换至像圆  $\sigma''_1$  的轴移。

图 2  $\sigma_1$  圆的轴移→ $\sigma''_1$  圆的轴移变换Fig. 2 Axial-transfer transform of circles  $\sigma_1$  to  $\sigma''_1$ 

其证明为:假设图 2 中  $\sigma_1$  圆上有任意某点  $A$ ,其相对于透镜  $F_1$ (焦距  $f_1$ ) 的距离为  $u_1$ ,那么点  $A$  经过  $F_1$  变换后的像  $A'$ (位于圆  $\sigma'_1$  上)至  $F_1$  的距离为  $v_1$ ,则  $u_1$  和  $v_1$  满足

$$\frac{1}{u_1} + \frac{1}{v_1} = \frac{1}{f_1}, \quad (2)$$

可得

$$v_1 = \frac{u_1 f_1}{u_1 - f_1}, \quad (3)$$

所以点  $A'$  相对于透镜  $F_2$ (焦距  $f_2$ ) 的物距  $u_2$  为

$$u_2 = f_1 + f_2 - v_1 = f_1 + f_2 - \frac{u_1 f_1}{u_1 - f_1}, \quad (4)$$

然后它再经过  $F_2$  变换后的像距为

$$v_2 = \frac{u_2 f_2}{u_2 - f_2}, \quad (5)$$

将(4)式代入(5)式,得到

$$v_2 = \left(1 + \frac{f_2}{f_1} - \frac{u_1 f_2}{f_1^2}\right) f_2, \quad (6)$$

所以,当  $\sigma_1$  圆由位置  $P$  沿光轴移动到位置  $P'$  时,其上  $A$  点到  $F_1$  的距离也由原来的  $u_1$  变为  $u'_1$ ,它经透镜  $F_1, F_2$  变换后的像点位置也由原来的  $v_2$  变为  $v'_2$ ,那么

$$\Delta v = v'_2 - v_2 =$$

$$\left(1 + \frac{f_2}{f_1} - \frac{u'_1 f_2}{f_1^2}\right) f_2 - \left(1 + \frac{f_2}{f_1} - \frac{u_1 f_2}{f_1^2}\right) f_2 = \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2 (u_1 - u'_1), \quad (7)$$

也就是说,当  $\sigma_1$  圆上任一点沿光轴的位置改变量为  $|u'_1 - u_1|$  时,相应地它经共焦透镜  $F_1, F_2$  变换后的像点的位置改变量为  $(f_2/f_1)^2 |u'_1 - u_1|$ ,即像点的位置改变量为物点位置改变量  $|u'_1 - u_1|$  的  $(f_2/f_1)^2$  倍。也即:当  $\sigma_1$  圆的位置改变量为  $|u'_1 - u_1|$  时,相应地它经共焦透镜  $F_1, F_2$  作用后的像圆的位置改变量为  $|u'_1 - u_1| (f_2/f_1)^2$ 。

轴移→旋转变换、旋转→轴移变换以及轴移→旋转→轴移变换统称为高斯光束的轴移不变性。

### 4 轴移不变性在锁模腔设计中的应用

文献[5]的谐振腔采用了图 3 所示的五镜腔结构,  $M_1 \sim M_4$  分别是曲率半径为 100 mm 的凹面镜,  $M_5$  是透过率为 3% 的楔形输出镜,  $P_1 \sim P_4$  均为用以补偿色散的棱镜。  $M_1, M_2$  间距约为 150 mm ( $M_1$  的位置可调),在  $M_1 \sim M_2$  间距离为 150.3 ~ 150.8 cm 时可实现锁模运转。取  $M_2 \sim M_3$  间距离为 600 mm,  $M_4 \sim M_5$  间距离为 800 mm。根据传播圆-变换圆原理,图 3 的等效光路如图 4 所示。  $F_2, F_3, F_4$  分别为腔镜  $M_2, M_3, M_4$  的等效透镜,其焦距分别为相应腔镜曲率半径的一半;  $F_1$  是晶体的等效热透镜;圆  $\sigma_1$  是  $M_1$  的传播圆,它是过光轴与  $M_1$  的交点以及  $M_1$  右焦点的圆。根据模像理论和式(2),  $\sigma_1$  圆依次经过  $M_2, M_3$  变换后的像圆  $\sigma'_1$  的直径为  $R_{\sigma'_1} = 6$  mm。而  $M_5$  的  $\sigma_5$  圆为一位于  $M_5$  镜面处且平行于镜面的直线<sup>[6]</sup>,它经等效透镜  $F_4$  作用后的像圆  $\sigma'_5$  的直径为 3.333 mm,比  $\sigma'_1$  圆的直径小得多,因而此谐振腔与两臂非对称的四镜腔等价(简称非对称腔)。根据文献[6]的变换圆图解分析,此谐振腔实现锁模所需的克尔效应较强,不易实现锁模运转,并且易于受环境影响而失稳。所以此腔虽然通过合理调节各棱镜位置及  $M_1, M_2$  间距离,能够有效地展宽

光谱范围,缩短脉冲宽度,但其锁模区宽度很窄,稍有调节不当便不能得到稳定的锁模状态,因而对光路调节精度要求很高。

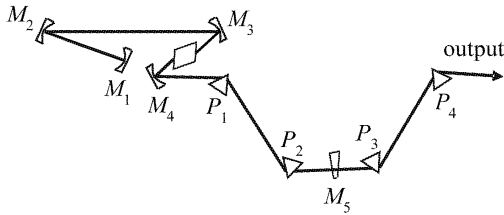


图3 五腔镜结构图

Fig. 3 Structure of five-mirror cavity

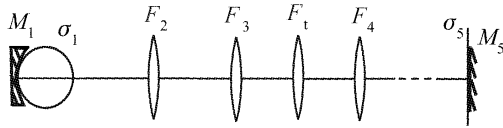


图4 五镜腔的等效光路

Fig. 4 Equivalent light-path of the five-mirror cavity

飞秒谐振腔一般采用X型或Z型四镜腔结构,其锁模通过改变两折叠腔镜间距离实现,锁模区是指其相应的锁模范围。由于近对称腔对调整精度要求低<sup>[6,7]</sup>,锁模易于启动且运转性能稳定。利用轴移不变性的轴移→旋转→轴移变换原理,将图3所示五镜腔改进为等价近对称腔。除了将 $M_1, M_2$ 换成曲率半径分别为50 mm和400 mm的球面镜,且 $M_2, M_4$ 两镜构成共焦系统的关系外,其余参数均不变。根据轴移不变性的轴移→旋转→轴移变换原理(7)式, $\sigma'_1$ 圆的直径为

$$R_{\sigma'_1} = \left(\frac{f_3}{f_2}\right)^2 R_1 = \left(\frac{5}{20}\right)^2 \times 5 \text{ cm} = 3.125 \text{ mm}, \quad (8)$$

并且在 $M_1$ 沿光轴方向移动过程中保持不变,而像圆 $\sigma'_5$ 的直径仍为3.333 mm。如果将共焦系统 $M_2, M_3$ 的等效透镜 $F_2, F_3$ 看作一个透镜 $F_{2,3}$ ,那么由于圆 $\sigma'_1$ 与 $\sigma'_5$ 直径接近相等,此谐振腔便等价于由 $M_1, M_{2,3}, M_4, M_5$ 组成的近对称四镜腔(图5)。

由于这里是通过沿光轴改变 $M_1$ 的位置实现锁模的,因而锁模区是指改变 $M_1$ 实现锁模的区域。如果在 $M_1$ 沿光轴的移动过程中,图5中 $\sigma'_1$ 圆的位置改变量为 $\Delta l' = 1 \text{ mm}$ ,那么根据轴移不变性, $\sigma'_1$ 圆的位置变化反映到 $M_1$ 镜的位置变化为

$$\Delta l = (R_2/R_3)^2 \cdot \Delta l' = 16 \text{ mm}, \quad (9)$$

这样,通过物像关系将锁模区宽度放大为传统锁模区的16倍,从而在光路调节中不易错过最佳锁模位置;并且我们的谐振腔为近对称型,具有比非对称腔

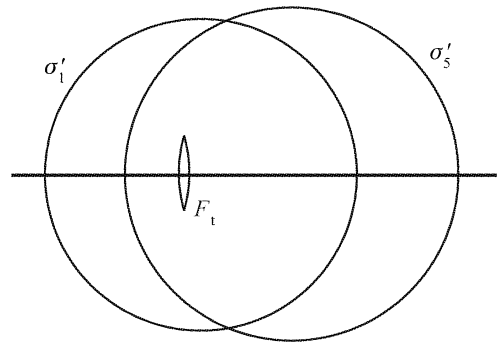


图5 等价近对称腔变换圆图解

Fig. 5 Transform-circle graphic of the nearly symmetrical cavity

优越的工作性能<sup>[6]</sup>,不易受环境的影响而偏离最佳工作点,从而使得谐振腔的运行更加稳定。

## 5 结 论

在轴移不变性的基础上发展并推导了轴移→旋转→轴移变换的关系,使轴移不变性的内容更加丰富完整。分析并指出五镜腔为非对称腔,利用轴移不变性的轴移→旋转→轴移变换原理,提出了将其谐振腔进一步改为性能优越的近对称腔的设计方案。

## 参 考 文 献

- 1 G. A. Deochamps, P. E. Mast. Proceedings of the Symposium on the Quasi-Optics [M]. New York: Polytechnic Press, 1964. 379
- 2 Pierre Laures. Geometrical approach to Gaussian beam propagation [J]. *Appl. Opt.*, 1967, **6**(4):747~755
- 3 Zhang Guangyin, Guo Shuguang. Graphic Analysis and Design Method of Optical Resonator [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003  
张光寅,郭曙光. 光学谐振腔的图解分析与设计方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2003
- 4 Zhang Guangyin. Thermal focusing & axial-transfer compensation and wide-area thermal stability of specific telescope cavity [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 1991, **10**(4):286~292  
张光寅. 特殊望远镜腔的热聚焦-轴移补偿特性与宽域热稳性[J]. *红外与毫米波学报*, 1991, **10**(4):286~292
- 5 Ching-yue Wang, Weili Zhang, K. M. Koo. Pulse shortening and spectral broadening by periodic pulse-train amplitude modulation in a self-mode-locked Ti:sapphire laser [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(7):1881~1884
- 6 Zhang Xiaohua, Zhang Guangyin, Sun Jinghua *et al.*. Transform-circle graphic analysis of self-mode-locked laser cavity [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(10):1453~1456  
张晓华,张光寅,孙敬华等. 近对称谐振腔的变换圆图解分析[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(10):1453~1456
- 7 G. Cerullo, S. D. Silvestri, V. Magni *et al.*. Resonators for Kerr-lens mode-locked femtosecond Ti:sapphire lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(11):807.~809