

文章编号: 1001-3806(2008)03-0278-03

## 强激光输出窗口热行为对光束质量的影响

盛朝霞,王再军

(天津工程师范学院 数理与信息科学系,天津 300222)

**摘要:** 为了研究强激光输出窗口热行为对光束质量的影响,从 Strehl 比的普遍公式出发,推导出热变形情况下考虑材料折射率温度效应的 Strehl 比计算公式和远场强度分布公式。计算并分析了蓝宝石、石英、单晶硅组成的窗口镜的热变形对光束质量的影响。激光功率越高,引起的窗口的热变形越显著,使得 Strehl 比和远场归一化强度越低,因而光束质量越差;在考虑到材料折射率的温度效应时,在相同的激光辐射条件下,蓝宝石的 Strehl 比随激光功率的变化较平缓。结果表明,高功率激光器的窗口热变形及其基片材料折射率的温度效应对远场光束质量具有较大的影响。

**关键词:** 激光器;光束质量;Strehl 比;远场强度分布;热变形

**中图分类号:** TN248 **文献标识码:** A

## Influence of thermal deformation of high-power laser output windows on beam quality

SHENG Zhao-xia, WANG Zai-jun

(Department of Mathematics and Physics, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** To investigate the influence of thermal deformation of high-power laser output windows on the beam quality, the Strehl ratio formula and the far-field normalized intensity under thermal aberration were induced with the thermal effect of the refractive index of the materials considered. The influence of the thermal aberration of the output windows on the Strehl ratio and the far-field normalized intensity were analyzed and discussed. The results show that under the same laser radiation, in the presence of temperature effect of refractive index, the far-field Strehl ratio of  $Al_2O_3$  changes the slowest with the laser radiation power among the three materials.

**Key words:** lasers; beam quality; Strehl ratio; far-field intensity distribution; thermal deformations

### 引 言

在激光的许多应用中(如激光加工、激光传输),激光光束质量的好坏越来越成为影响激光在这些应用领域中进一步发展的重要因素。稳腔激光器输出单横模或多横模高斯光束。对这种光束的质量评价,国际标准化组织已提出一套标准:通过光束横截面上强度分布的二阶矩表示光束束宽,用  $M^2$  因子<sup>[1]</sup>表示光束质量。该标准规定的光束束宽,光束质量物理概念明确,分析方便。但具体执行起来有两个问题:其一是二阶矩对噪声比较敏感,应使用高信噪比的控制系统;其二是对于孔径截断光束,远场强度分布二阶矩不收敛。

除了  $M^2$  因子之外,常用的光束质量的定义还包括<sup>[2-6]</sup>:远场光斑半径,远场发散角,衍射极限倍数  $\beta$ , Strehl 比,靶面上的功率或环围能量比等。针对高功

率激光器中常用的正支虚共焦非稳腔输出的是均匀环形光束,本文中推导出热变形情况下,同时考虑到折射率的温度效应的 Strehl 比的计算公式,并给出热变形情况下的远场光强分布;计算并分析了由化学氧碘激光器目前比较流行的几种光学材料蓝宝石、石英、单晶硅组成的窗口镜在激光辐照下的热变形量及其折射率的温度效应对 Strehl 比、远场光强分布的影响。

### 1 理论分析

#### 1.1 Strehl 比

Strehl 比通常被用来评价光束质量的标准。其定义为:

$$S = \frac{\text{实际轴上的峰值光强}}{\text{理想轴上的峰值光强}} \quad (1)$$

根据傅里叶变换的零频项(即  $\exp[-2\pi i(\nu_x x + \nu_y y)] = 1$ ,  $\nu_x$ ,  $\nu_y$  分别表示  $x$  方向和  $y$  方向的空间频率),可得圆孔衍射的 Strehl 比:

$$S = \frac{1}{\pi^2} \left| \int_0^{2\pi} \int_0^1 \exp[i2\pi \Delta w(\rho, \theta)] \rho d\rho d\theta \right|^2 \quad (2)$$

式中,  $\Delta w$  是指定区域波阵面的均方畸变量,即  $(\Delta w)^2 = \overline{(\Delta w)^2} - (\overline{\Delta w})^2$ ;  $\rho$ ,  $\theta$  是圆孔上某点的极坐标。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10675090)

作者简介:盛朝霞(1978-),女,讲师,研究方向为高能激光器件。

E-mail: zhaoxia78@126.com

收稿日期:2007-03-26;收到修改稿日期:2007-06-05

根据 (2) 式, 可得到圆环衍射的 Strehl 比为:

$$S = \frac{1}{(1 - \varepsilon^2)^2 a^4 \pi^2} \left| \int_0^{2\pi} \int_{\varepsilon a}^a \exp[2\pi i \Delta\Phi(r, \theta)] r dr d\theta \right|^2 \quad (3)$$

式中,  $\Delta\Phi$  是由于窗口热变形而引起的波前畸变,  $\Delta\Phi = (n/\lambda) \times \Delta d(r)$ ,  $n$  为介质的折射率,  $\lambda$  为激光波长,  $a$  是光束的外半径;  $r, \theta$  为窗口上某点的极坐标;  $\varepsilon a$  是光束内半径,  $\varepsilon$  是小数部分 ( $0 < \varepsilon < 1$ );  $\Delta d(r)$  是窗口的热变形量, 由 3 部分组成: (1) 轴向的自由热膨胀  $\Delta d_f$ ; (2) 边界固定后引起的纵向膨胀  $\Delta d_a$ ; (3) 轴向温度分布的不均匀产生的热弹性位移  $\Delta d_t$ , 即:

$$\Delta d(r) = \Delta d_f + \Delta d_a + \Delta d_t \quad (4)$$

其中第 1 部分可直接由温度场得出<sup>[7]</sup>:  $\Delta d_f = \alpha_1 \int_0^d f'(r, z, t) dz$ , 式中,  $\alpha_1$  是线性热膨胀系数;  $T$  是升高的温度,  $T' = T - T_0$ ,  $T$  是某一时刻窗口的温度。

因在大多数情况下,  $\Delta d_a, \Delta d_t$  要比  $\Delta d_f$  小很多, 因此 (4) 式可以近似写成:  $\Delta d(r) \approx \Delta d_f$ 。

### 1.2 考虑折射率温度效应时的远场强度分布

在前面的计算分析中, 假设基片的热特性在整个物理过程中是常数。实际上, 温度梯度会导致热应力。热应力在输出窗口上产生热张力, 进而由于光电效应使窗口材料的折射率发生改变。现在考虑到折射率的温度效应, (3) 式应写成:

$$S = \frac{1}{(1 - \varepsilon^2)^2 a^4 \pi^2} \times \left| \int_0^{2\pi} \int_{\varepsilon a}^a \exp \left\{ 2\pi i \left[ \Delta\Phi(r, \theta) + \frac{\omega}{\lambda} \int_0^d f'(r, z, t) dz \right] \right\} r dr d\theta \right|^2 \quad (5)$$

式中,  $\omega$  为材料的热光系数 ( $\omega = dn/dT$ ), 对于蓝宝石 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 来说, 其热光系数为  $0.75 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , 对于石英玻璃 ( $\text{SiO}_2$ ), 其热光系数为  $1.03 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

### 1.3 远场强度分布

对于高功率激光器中常用的正支虚共焦非稳腔,

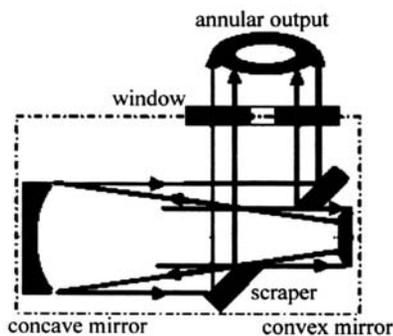


Fig 1 Schematic of the unstable optical resonator of a high-power laser system

其近场光束是均匀环形光束见图 1。所以, 输出窗口即被均匀环形平面波所辐照。光束的远场分布符合夫琅和费衍射积分。所以, 由输出窗口的热变形产生的波前畸变会影响光束的远场光强分布。

为了方便起见, 首先分析在存在窗口热变形情况下的圆孔衍射。在极坐标下, 其夫琅和费衍射积分式是<sup>[8]</sup>:

$$U(\beta, \phi) = C \int_0^a \int_0^{2\pi} \exp[-ikr\beta \cos(\theta - \phi)] r \rho d\rho d\theta \quad (6)$$

式中,  $a$  是圆孔半径;  $\phi$  是圆孔的角极坐标;  $\beta$  是远场的角半径;  $C$  为积分常数;  $k$  表示波数。

在存在热畸变的情况下, (6) 式变为:

$$U(\beta, \phi) = C \int_0^a \int_0^{2\pi} \exp[-ikr\beta \cos(\theta - \phi) \times \exp(2\pi i \Delta\Phi)] r \rho d\rho d\theta \quad (7)$$

用圆环孔代替圆孔。圆环的内外半径分别为  $\varepsilon a$  和  $a$ , 其中  $\varepsilon$  是小数部分 ( $0 < \varepsilon < 1$ )。则 (7) 式可以写为:

$$U(\beta, \phi) = C \int_{\varepsilon a}^a \int_0^{2\pi} \exp[-ikr\beta \cos(\theta - \phi) \times \exp[2\pi i \Delta\Phi(r, \theta)]] r dr d\theta \quad (8)$$

光强  $I$  与复振幅  $U$  的关系是:  $I(\beta) = |U(\beta)|^2 = U(\beta) \cdot U(\beta)^*$ 。根据前面的讨论, 可以得出热变形情况下的远场光强归一化强度分布:

$$I_n = \int_{\varepsilon a}^a \int_0^{2\pi} (rk\beta) \exp[2\pi i \Delta\Phi(r, \theta)] r dr d\theta \quad (9)$$

考虑折射率的温度效应, 上式重写为:

$$I_n = \int_{\varepsilon a}^a \int_0^{2\pi} (rk\beta) \times \exp \left\{ 2\pi i \left[ \Delta\Phi(r, \theta) + \frac{\omega}{\lambda} \int_0^d f'(r, z, t) dz \right] \right\} r dr d\theta \quad (10)$$

## 2 计算结果及分析

### 2.1 窗口热畸变对 Strehl 比的影响

假设畸变量完全是由窗口的热畸变引起的。根据 (3) 式, 可得到热变形情况下的 Strehl 比。表 1 所示为在激光功率分别是 10kW, 50kW, 辐照时间为 5s 时的情况下, 窗口分别为蓝宝石 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、石英玻璃 ( $\text{SiO}_2$ ) 和单晶硅 (Si) 材料时的 Strehl 比。

Table 1 Strehl ratios of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  and Si under the laser power of 10kW and 50kW with a laser radiation time of 5s

laser power	parameter	materials		
		$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	Si
P = 10kW	peak valley/ $\mu\text{m}$	0.325	0.074	0.623
	S	0.906	0.994	0.165
P = 50kW	peak valley/ $\mu\text{m}$	1.626	0.370	3.117
	S	0.159	0.871	0.061

根据表 1 可以看出,在相同的激光辐照下由于  $\text{SiO}_2$  的热畸变量(即峰谷值,其定义为窗口表面热变形最高与最低之差)最小,所以它具有最大的 Strehl 比。相反, Si 的 Strehl 比最小。这表明当用  $\text{SiO}_2$  作窗口材料时,窗口的热变形对光束质量的影响最小。

## 2.2 窗口热畸变对远场归一化强度的影响

根据(9)式,可以得到在激光功率为 50kW、辐照时间为 5s 的情况下,窗口材料分别是  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$  材料时的远场归一化强度,如图 2 所示。

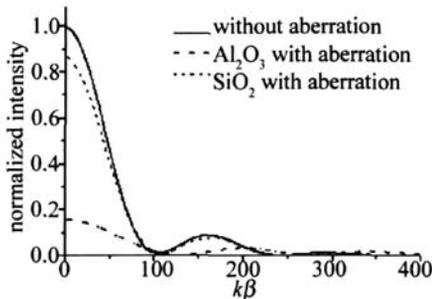


Fig 2 Far-field normalized intensity distribution of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{SiO}_2$  substrates versus coordinate  $k\beta$  for laser power 50kW and irradiation time 5s

由图 2 可以看出:(1)在激光功率为 50kW、照射时间为 5s,窗口材料分别为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ ,远场归一化强度分别降为 0.159 和 0.881;(2)在同样的激光辐照下,由于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的热变形比  $\text{SiO}_2$  大,所以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的远场归一化强度比  $\text{SiO}_2$  小;(3)归一化强度的分布线形随着窗口变形量的增大而展宽,中心峰值强度变小。

## 2.3 考虑折射率温度效应时的远场强度分布

当考虑到基片材料折射率的温度效应时,所算得的结果与不考虑折射率温度效应的结果是截然不同的。图 3 是根据(5)式得到的在激光辐照时间为 5s 的情况下,窗口材料分别是  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$  材料时的远场

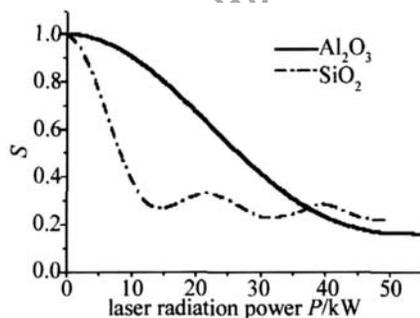


Fig 3 Strehl ratios of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{SiO}_2$  for the temperature effect of the refractive index versus laser irradiating power

Strehl 比与激光功率的关系。

从图中可以看出:(1)在考虑到折射率的温度效应时, $\text{Al}_2\text{O}_3$  的远场 Strehl 比要比  $\text{SiO}_2$  的高,这是因为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的热光系数较小的缘故,即随着温度的升高, $\text{Al}_2\text{O}_3$  的折射率变化较慢;(2) $\text{Al}_2\text{O}_3$  的远场 Strehl 比

随激光功率的变化要比  $\text{SiO}_2$  的缓慢得多;(3) $\text{SiO}_2$  的远场 Strehl 比随激光功率的升高出现高低起伏,这是由于  $\text{SiO}_2$  的热光系数较大,窗口热畸变引起的波前变化较大的缘故。

## 3 结论

从一般的 Strehl 比定义式出发,推导出热变形情况下,并考虑到折射率的温度效应的 Strehl 比计算公式和远场强度分布公式。以此计算并分析了蓝宝石、石英、单晶硅 3 种窗口镜。

理论分析表明:高功率激光器的窗口热变形及其基片材料折射率的温度效应对远场光束质量具有较大的影响。激光功率越高,引起的窗口热变形越显著,使得 Strehl 比和远场归一化强度越低,因而光束质量越差。

由计算结果可以看出:Strehl 比和远场光束的归一化强度随着窗口热变形的增加显著下降。激光功率越高,热变形越显著,Strehl 比和归一化强度下降得越厉害。在考虑到材料折射率的温度效应时,在相同的激光辐射条件下,蓝宝石的 Strehl 比随激光功率的变化较平缓。可见,相对说来,蓝宝石是比较理想的化学氧碘激光器的窗口材料。

影响输出光束质量的原因除了激光腔镜和输出窗口由于吸收激光能量产生的热变形,及其材料折射率的温度效应外,还有其它因素,如激光腔镜的倾斜、光学元件的内部缺陷、表面灰尘等。

## 参考文献

- [1] NU Y X, WANG Y F, LU X, *et al* Laser beam quality factor  $M^2$  and its measurement [J]. Laser Technology, 1999, 23 (1): 38-41 (in Chinese).
- [2] DU X W. Factors for evaluating beam quality of a real high power laser on the target surface in far field [J]. Chinese Journal of Laser, 1997, A24 (4): 327-332 (in Chinese).
- [3] WANG Y P, HUANG J Y, QIAO G L. A method for evaluating high energy laser beam quality [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2001, 12 (10): 1029-1033 (in Chinese).
- [4] LU Z J, LU Q S, ZHAO Y J. Study of evaluating beam quality of high energy lasers with unstable resonators [J]. Chinese Journal of Laser, 1998, A25 (3): 193-196 (in Chinese).
- [5] ZHANG E T, JI X L, LÜB D. Influence of atmospheric absorption in the inner optical system on the laser beam quality [J]. Laser Technology, 2006, 30 (1): 96-98 (in Chinese).
- [6] LUO Sh R, LÜB D, HUANG L. The far-field intensity distribution and beam quality of unstable resonators [J]. Laser Technology, 1999, 23 (5): 281-284 (in Chinese).
- [7] SHENG Zh X, LI F M, GUO L, *et al* Numerical analyses of the thermal distortions of output window for high power lasers [J]. Laser Journal, 2005, 26 (6): 25-26 (in Chinese).
- [8] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. 7th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 365 (in Chinese).