

文章编号: 0253-2239(2006)06-0841-4

# 光学系统像差与光场干涉对激光参量测量精度的影响

高雪松 高春清 于 竞 李家泽 魏光辉

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

**摘要:** 研究了采用面阵 CCD 探测器测量光束参量的技术问题, 研制了一套高精度激光参量测量系统, 对其光学系统像差与光场干涉原因进行了理论分析, 实验测量了连续抽运 1064nm 固体模式发生器产生的基模厄米-高斯光束, 分析对比了其输出光束带有干涉条纹时对测量精度的影响, 对光学系统的设计提出了具体技术要求, 为同类装置的研制提供了参考依据。

**关键词:** 光束参量; 光学系统像差; 光场干涉; 模式发生器;  $M^2$  因子; 面阵 CCD

中图分类号: O348.11 文献标识码: A

## Influence of Optical Interference and System Aberration on Laser Beam Parameter Measurement Precision

Gao Xuesong Gao Chunqing Yu Jing Li Jiaze Wei Guanghui

(Department Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

**Abstract:** The technical problems concerning the parameter measurement of the laser beam by using a CCD array is studied. A high-precision system for laser beam parameter measurement is developed. Its aberrations and optical interferences are analyzed in theory, and the laser beam with fundamental Gaussian mode by continuous a LD-pumped, solid-state mode generator with 1064 nm is measured. The influence of the beam output with different interference patterns on measurement precision is analyzed and compared with theoretical estimation. Then, the technical requests for designing the optical system are brought up, which provides reference for developing the similar instrument.

**Key words:** beam parameter; optical aberration; optical interference; mode generator;  $M^2$ -factor; CCD array

### 1 引 言

高精度光束参量测量系统由光学系统和图像采集及处理系统组成<sup>[1]</sup>。在以 CCD 为探测器的光束参量测量系统中, 许多因素会影响测量结果的精度。文献[2]中研究了采用面阵 CCD 探测器测量光束参量的问题, 采用数值模拟法讨论了 CCD 的积分范围、动态范围、模-数转换量化精度和最大光强等参量对光束参量测量精度的影响。光学系统对光束进行衰减和变换的任何一个环节都会改变光束光场分布, 并对测量结果带来直接影响, 因此分析光学系统像差与光场干涉对提高测量系统整体精确性具有重要意义。

### 2 光学系统像差对光束质量因子的影响

许多光学器件, 如扩束镜, 变换、聚焦或准直透

镜以及吸收介质等都会导致像差。光学系统像差会影响光束远场发散特性, 降低光束聚焦特性, 使光束因子  $M^2$  增大<sup>[3]</sup>。下面分析各种光学元件对因子  $M^2$  的影响。

由菲涅耳-惠更斯原理, 光场  $u_0(r, \theta)$  通过四级像差透镜后变为<sup>[4]</sup>

$$u(r, \theta) = u_0(r, \theta) \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{r^2}{2f} - C_4 r^4 \right)\right], \quad (1)$$

其中  $C_4$  为四级像差系数,  $1/f$  表示具有像差的变换透镜。光束  $M^2$  因子通过像差元件后变为<sup>[4]</sup>

$$M_r^2 = \sqrt{(M_{r_0}^2)^2 + (M_q^2)^2}, \quad (2)$$

其中  $M_{r_0}^2$  为初始光束质量因子,  $M_q^2$  为由像差影响引入的  $M^2$  因子增量且由下式确定

$$M_q^2 = \frac{8\pi\beta_r}{\lambda} C_4 r^4, \quad (3)$$

作者简介: 高雪松(1980~), 男, 黑龙江人, 北京理工大学光电工程系博士, 主要从事光纤激光器、新型固体激光器件与技术、激光光束参量测量的研究。E-mail: gxs1980@sina.com

收稿日期: 2005-06-14; 收到修改稿日期: 2006-01-06

其中参量  $\beta_r$  为光束功率密度分布矩  $\bar{r}^2, \bar{r}^4$  和  $\bar{r}^6$  的函数

$$\beta_r = \left[ \frac{\bar{r}^2 \bar{r}^6 - \bar{r}^4{}^2}{\bar{r}^4{}^2} \right]^{1/2}, \quad (4)$$

计算得出各种典型光束的  $\beta_r$  参量如表 1 所示。

表 1 不同光场分布下的  $\beta_r$  值

Table 1  $\beta_r$  of different optical field distributions

Beam power distributing	$\beta_r$
Gauss, $\exp(-r^2)$ or $\exp(-x^2)$	0.707
Exceed Gauss, $\exp(-r^4)$ or $\exp(-x^4)$	0.523
Exponent, $\exp(- r )$ or $\exp(- x )$	1.049

任意激光光束通过薄透镜聚焦或准直后,四级像差系数  $C_4$  表示为

$$C_4 = [n^3 + (3n + 2)(n - 1)^2 p^2 + (n + 2)q^2 + 4(n^2 - 1)pq] / [32n(n - 1)^2 f^3], \quad (5)$$

其中  $p$  为聚焦因子,  $q$  为透镜影响因子,  $f$  为透镜焦距, 设  $C_{4f}$  为参量  $p, q$  和透镜折射率  $n$  的函数, 则  $C_4$  可表示为

$$C_4 = C_{4f} / f^3. \quad (6)$$

对于高斯光束光场  $\beta_r = 0.707$ , 由(3)式得到由光学系统像差引起的光束质量因子增量为

$$M_{r_q}^2 = \frac{2^{3/2} \pi C_{4f} w^4}{f^3 \lambda} = \left( \frac{w}{w_q} \right)^4 \approx \frac{0.1 C_{4f} D}{(f')^3 \lambda}, \quad (7)$$

其中  $D = \pi w$  为高斯光束在透镜上的孔径,  $f' = f/D$  为透镜相对孔径,  $w_q$  可表示为

$$w_q = \left[ \frac{f^3 \lambda}{2^{3/2} \pi C_{4f}} \right]^{1/4}. \quad (8)$$

以平凸透镜为例, 根据使用方向不同  $q = \pm 1$ ; 根据光束准直聚焦还是准直发散  $p = \pm 1$ . 正确使用透镜时  $p = q = 1$  或  $p = q = -1$ , 则  $C_{4f} = 0.292$ ; 错误使用透镜时  $p = 1, q = -1$  或  $p = -1, q = 1$ , 则  $C_{4f} = 1.125$ . 如图 1 所示, 器件错误使用给结果带来较大偏差。

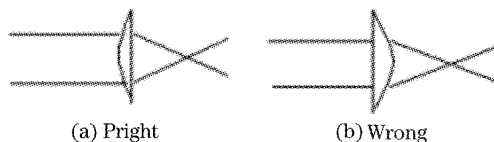


图 1 使用平凸透镜进行光束变换

Fig. 1 Beam transformation using plano-convex lens

设在不同能量分布下  $M^2 = 1.2$  的激光束入射到孔径为 5 mm 的透镜上, 正确使用透镜时, 计算不同  $M^2$  因子误差 ( $M_{r_q}^2$ ) 下要求的透镜  $f/D$  值, 如表 2 所示。

由结果分析可知: 1) 使用光学透镜进行光束变换时, 选用合理的相对孔径  $f/D$ , 则像差对光束  $M^2$

因子的影响可小于 1%; 若使用不当,  $M^2$  因子误差将大于 10%; 2) 相同  $M^2$  因子误差条件下, 超高斯光束要求相对数值孔径  $f/D$  较小; 3) 激光波长越长,  $f/D$  越小; 4) 当入射到透镜表面的光束束宽  $w$  超过一定限度  $w_q$  后, 由像差引入的  $M^2$  因子增量按  $w/w_q$  的 4 次方增长。

表 2 不同光功率密度分布, 不同  $M^2$  因子误差对应上述透镜值

Table 2 Various  $M^2$ -factor error with different optical power distribution

Require of $M^2$ factor error	Gauss		Exceed Gauss	
	5%	10%	5%	10%
$f/D$	632.8 nm	36	22	31
	1064 nm	30	19	26

### 3 光场干涉对束宽测量的影响

光束测量过程中, 常会出现带有干涉条纹的光场分布, 如图 2 所示。

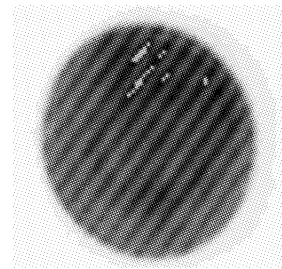


图 2 测量中带有干涉条纹的光斑

Fig. 2 Beam pattern with interference fringes

图 3 表示进入薄板的光在后表面折反射产生多束透射光, 当这些光束满足相干条件在空间相遇时即产生干涉条纹<sup>[5]</sup>。由于最初两束透射光较强且大致相等, 以后各束很弱可忽略不计, 因此只讨论薄板

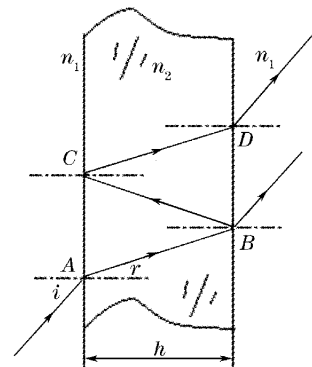


图 3 光学表面折射光的干涉原理

Fig. 3 Interference of refraction beams on optical surface

两透射光束干涉的情况。干涉场光强公式为<sup>[6]</sup>

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(2\pi\Delta/\lambda), \quad (9)$$

其中  $I$  为干涉叠加后的光强,  $I_1$  和  $I_2$  分别为两束透射光在干涉场上的光强,  $\Delta$  为两束光光程差,  $\phi = 2\pi\Delta/\lambda$  为两束光位相差。分析可知两束光光程差为

$$\Delta = 2h \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i}, \quad (10)$$

其中  $h$  为薄板厚度,  $n_1$  为空气折射率,  $n_2$  为薄板折射率。根据菲涅尔干涉原理, 可得干涉条纹规律为亮纹:

$$\Delta = 2h \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} = m\lambda, \quad (11)$$

暗纹:

$$\Delta = 2h \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} = (m + 1/2)\lambda. \quad (12)$$

当入射光照射在均匀且厚度稍有变化的薄板上时, 折射率  $n_2$  不变, 对于入射角为  $i$  的入射光, 光程差仅与薄板厚度  $h$  相关, 因此形成等厚干涉条纹。  $i \neq 0$  时对(11)式微分得

$$\lambda dm = 2 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} dh, \quad (13)$$

如图 4 所示, 当薄板楔角很小时,  $dh = \theta dl$ ; 当  $dm = 1$  时对应的  $dl$  即干涉条纹间距

$$g = \frac{\lambda}{2\theta \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i}}, \quad (14)$$

当正入射  $i = 0$  时  $g = \lambda/(2n_2\theta)$ , 干涉条纹间距与薄板倾角成反比。

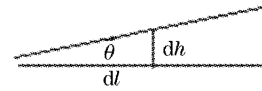


图 4 等厚干涉中的参量关系

Fig. 4 Parameters of interference

在光束测量系统中, 中性衰减片、滤光片和 CCD 窗口等如果使用不当, 都会由于产生干涉条纹而使光场分布发生严重畸变。由于干涉条纹对光束光场分布的影响非常复杂, 利用解析法分析十分困难, 因此采用实验的方法, 利用自行研制的高精度激光光束参量测量系统, 测量了 1064 nm 模式发生器出射的基模高斯光束束宽, 在此基础上人为引入不同样式的干涉条纹, 然后测量了带有干涉条纹的光束宽度, 并将测量结果与原束宽参量进行比较, 即可得出不同干涉条纹对束宽测量的影响, 实验结果如表 3 所示。

表 3 不同的干涉条纹对束宽测量精度的影响

Table 3 Effect on beam width measurement precision of different interference patterns

Condition	Interference pattern	Error of X direction /%	Error of Y direction /%	Interference pattern /%	Error of X direction /%	Error of Y direction /%
Interference pattern sparseness, dissymmetrical distribution		38.2	10.3		24	8.7
Interference pattern denseness, dissymmetrical distribution		4	2		4	1
Interference pattern denseness, symmetrical distribution		3	2		3.2	2.1

由结果分析可知: 1) 干涉条纹会对光束束宽的测量带来影响, 根据干涉条纹的位置, 宽窄和角度不同, 影响也不相同; 2) 干涉条纹较宽时, 条纹位置不同对束宽的测量影响较大, 特别是当干涉条纹不对称分布时, 会对束宽测量带来非常大的误差; 3) 干涉条纹越密集, 条纹的对称性越强, 对束宽的测量影响越小; 4) 干涉条纹的角度对束宽测量的影响不是决定因素。

#### 4 高精度激光参量测量装置中光学系统的设计

如图 5 所示, 自行研制的高精度激光参量测量装置中光学系统主要由衰减系统、变换透镜以及滤光片组成。本装置衰减系统由具有吸收特性的中性玻璃衰减片构成, 可以保护 CCD, 适当选择衰减幅度(衰减幅度为 3%、5%、10%、20%、30% 和 50%)

等)可有效利用 CCD 动态范围,精确计算光束参量,减小测量值与理论值之间的误差<sup>[7]</sup>。

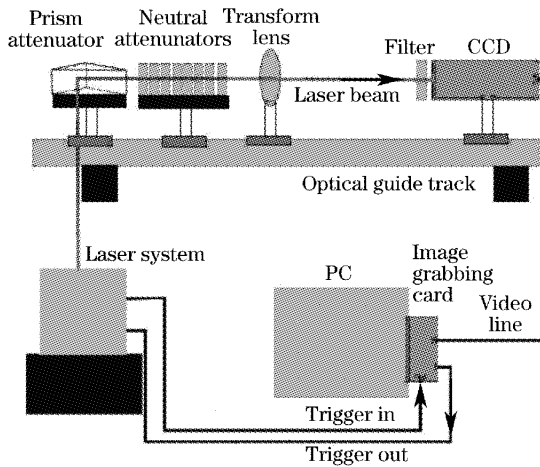


图 5 测量系统结构图

Fig. 5 Schematic diagram of laser beam parameters measurement system

由于被测激光光斑大小大多数情况下不能保证与 CCD 探测面的大小匹配,因此需要加入透镜对激光束进行变换后测量,原理如图 6 所示。

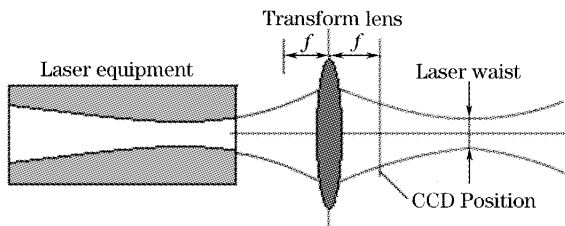


图 6 变换透镜工作原理

Fig. 6 Operating principle of transform lens

由于透镜像差对光束参量测量结果影响较大,优化情况下选用双分离或双胶合透镜消除像差(双分离  $f=300\text{ mm}$ ,双胶合  $f=1000\text{ mm}$ ),透镜表面镀被测激光波长的增透膜<sup>[8]</sup>。特别是在测量光束因子  $M^2$  时,需要在透镜后面形成一个人造束腰,在该束腰两侧 2 倍瑞利长度范围内不同位置上采集光斑,利用双曲线拟合的方法求出激光器的因子<sup>[9]</sup>。面阵 CCD 探测器用于采集激光光斑,是光束参量测量中的重要元器件。选择 CCD 时要考虑其光谱响应、动态范围、非线性度、均匀性等特性<sup>[10]</sup>,对于脉冲激光器的测量,要考虑 CCD 与激光器的同步问题,本系统采用 MTV-1881CB 型 CCD。图像采集卡用于获取 CCD 采集的图像,由软件计算测量结果。

## 5 结 论

本文主要研究采用面阵 CCD 探测器测量光束参量的技术问题,研制了一套高精度激光参量测量系统,对其光学系统像差与光场干涉进行了理论分析,实验测量了连续抽运 1064 nm 固体模式发生器产生的基模厄米-高斯光束,分析对比了其输出光束带有干涉条纹时对测量精度的影响,对光学系统的设计提出了具体技术要求,为同类装置的研制提供了参考依据。

## 参 考 文 献

- 1 Lei Hong, Li Qiang, Zuo Tiechuan. Measurement method of high-power laser beam parameters[J]. *J. Optoelectronics Laser*, 2000, **11**(4): 372~374 (in Chinese)  
雷 旬,李 强,左铁钊. 大功率激光光束参量的测量方法[J]. 光子学, 2000, **11**(4): 372~374
- 2 Cao Yilei, Gao Chunqing. Analysis on the beam parameter measurement by using CCD camera[J]. *Optical Technology*, 2004, **30**(5): 583~586 (in Chinese)  
曹一磊,高春清. 基于面阵 CCD 的激光光束参量测量系统精度分析[J]. 光学技术, 2004, **30**(5): 583~586
- 3 Gao Wei, Wang Yunping, Li Bin. Study on characterization and diagnosis of high power laser beam quality[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(1): 61~64 (in Chinese)  
高 卫,王云萍,李 斌. 强激光光束质量评价和测量方法研究[J]. 红外与激光工程, 2003, **32**(1): 61~64
- 4 International Standard organization 1999 ISO 11146: Test methods for laser beam parameters; beam widths, divergence angle and beam propagation factor[S]
- 5 K.-M. Du, G. Herziger, P. Loosen *et al.*. Measurement of the mode coherence coefficients[J]. *Opt. Quant. Electron.*, 1992, **24**(9): 1119~1127
- 6 Zhao Dazun. *Wave Optics* [M]. Beijing: Publishing House of Beijing Institute of Technology, 1986  
赵达尊. 波动光学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1986
- 7 Gao Xuesong, Gao Chunqing, Yang Shaozhuang *et al.*. Experimental study on beam parameter measurement system by using area array CCD[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(7): 993~996 (in Chinese)  
高雪松,高春清,杨绍壮等. 面阵 CCD 激光光束参量测量系统及其实验研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(7): 993~996
- 8 Sun Wei, Gao Chunqing, Wei Guanghui. Design of a precision CCD measurement system for beam characterization [J]. *J. Beijing Institute of Technology*, 2000, **20**(8): (in Chinese)  
孙 伟,高春清,魏光辉. 精确 CCD 光束参量测量与评价系统的设计[J]. 北京理工大学学报, 2000, **20**(8):
- 9 Pang Changfu, Wei Guanghui. An analysis of the Random error effect on the measurement precision in laser beam quality evaluation[J]. *J. Beijing Institute of Technology*, 1997, **17**(1): 67~71 (in Chinese)  
庞长富,魏光辉. 激光束质量评价中随机误差对测量精度的影响[J]. 北京理工大学学报, 1997, **17**(1): 67~71
- 10 Zhao Changming. Investigation on the experimental measurement of laser beam quality[J]. *Laser Technology*, 2000, **24**(6): 341~344 (in Chinese)  
赵长明. 激光光束质量参量测量的实验研究[J]. 激光技术, 2000, **24**(6): 341~344