

激光束经离轴抛物面镜聚焦后 光斑特性的研究*

石鸿斌 程兆谷 许国良 蒋金波 李现勤 夏金安
(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 从几何光学和物理光学出发,对抛物面镜以离轴 90° 的方式应用于激光束的聚焦光路时,光轴的角度失准和入射光发散角对聚焦光斑造成的影响进行了分析.基模高斯光准直入射时,由于抛物面镜无球差,焦斑的峰值光强将与入射光直径的平方成正比.光线追迹法证明角度失准导致产生一对相互垂直的焦线,由衍射光学知入射的高斯光将转变为类椭圆高斯光,降低了焦面处的峰值光强.抛物面镜对入射角失准的敏感度极高,mrad 量级的误差就足以使焦面处的峰值光强降低一半左右.而且,入射光束直径的增大又将大幅度降低对角度失准的容忍度,使焦面处的峰值光强对失准更敏感.同时也证明发散角的存在将导致产生彗差,亦降低其峰值光强.

关键词 抛物面镜,离轴,角度失准,发散角

1 引言

对于抛物面镜,在理想情况下,入射光严格平行于光轴时,反射光聚焦于 F 点.其球差为零,降低了光扰动,加上它对高强激光的耐用性,近来已被广泛用于激光束的聚焦、偏转光路中.但是,它对光轴失准的敏感度极高,失准引发的像散大大降低了聚焦的光强.因此,需对光轴精密调节.

这里用焦距 f 为 200 mm 的抛物面镜,并用串联双凸透镜扩束技术对入射光束直径进行调节,且能调节入射光发散角,如此便可分开研究入射光失准偏角和发散角的影响.先使入射光发散角影响尽量小,研究失准偏角的影响,最后讨论发散角的影响.

2 失准偏角的影响

2.1 光线追迹法

选入射光一波阵面 ABC ,坐标原点平移至 B 点,得新坐标系 $Bx'y'z'$.假定入射光为均布圆光束.

采用六角圆环阵列表示波阵面 ABC ,如图 1.取图中任一点,由已知偏角值可得相应的入射线方程,与抛物面方程

* 国家自然科学基金(批准号:69978022)资助项目.

收稿日期:2000-01-14;收到修改稿日期:2000-02-28

$$x^2 + z^2 = 2fy \tag{1}$$

联解(舍去大的假解), 可得入射光与抛物面交点 (x_0, y_0, z_0) .

由式(1) 可得交点处抛物面法线为

$$\frac{x - x_0}{x_0} = \frac{y - y_0}{-f} = \frac{z - z_0}{z_0} \tag{2}$$

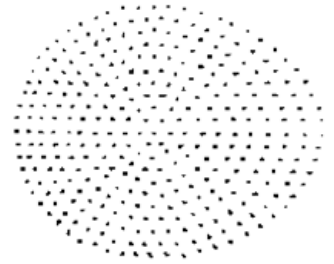


图 1 入射光点阵

Fig. 1 Incident laser lattice

利用入射线、反射线及法线间夹角关系, 可求得反射线方向角 $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$. 反射线为

$$\frac{x - x_0}{\cos\alpha_0} = \frac{y - y_0}{\cos\beta_0} = \frac{z - z_0}{\cos\gamma_0} \tag{3}$$

由式(3) 可求得任意 z 平面内对应光点位置, 取遍图 1 中各点, 且以相应点处的光强为权值, 可得任意 z 平面内光斑形状及大致光强分布.

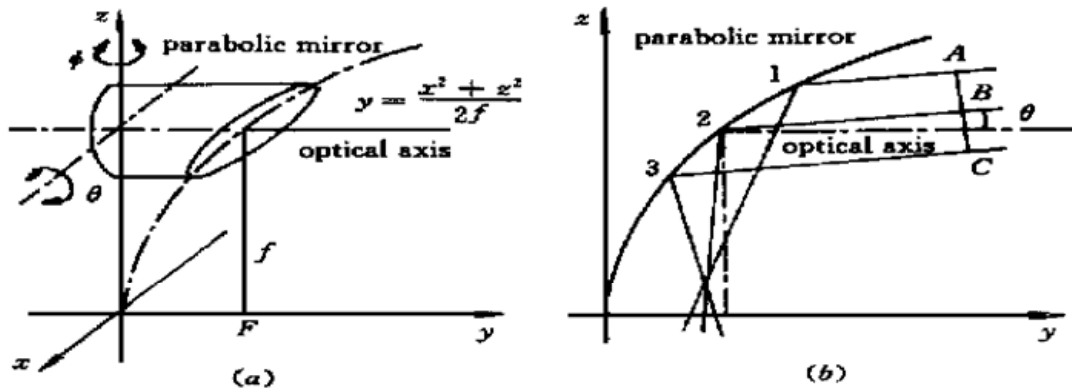


图 2 抛物面镜离轴 90°的示意图

(a) 坐标系; (b) 抛物面镜对激光束的聚焦

Fig. 2 Schematic diagram of 90° off-axis parabolic mirror

(a) coordinates; (b) laser beam focused by a parabolic mirror at misalignment angle of θ

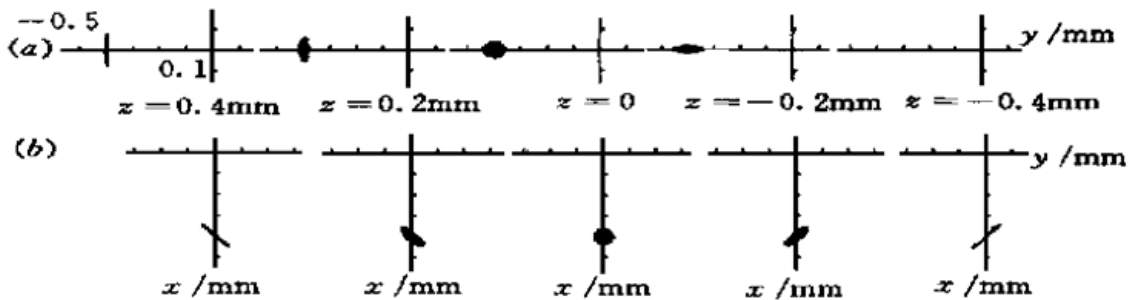


图 3 光斑图

Fig. 3 Spot diagram

(a) $\theta = 2 \text{ mrad}$ ($\phi = 0$); (b) $\phi = 2 \text{ mrad}$ ($\theta = 0$)

2.2 物理分析

图 3 (a) 是直径为 40 mm 的均布圆光束以偏角 $\theta = 2 \text{ mrad}$ 入射时的光点图(图 3, 4 的坐标原点均在过 F 点的光轴上, 图 12, 13 与之相同). 由于斜像散的存在, 产生了一对焦线, 其一在焦平面与镜面之间, 平行于 x 轴, 但稍有弧度, 为弧矢焦线; 其二在焦平面之外, 平行于 y 轴, 几乎全在 yz 面内, 为子午焦线. 而两焦线之间有一近似圆光斑, 为最小模糊圈. 该类圆光斑 y 轴两侧对称, 由近 F 点的短径渐变为远 F 点的长径. 需要指出的是, 这两条焦线均具有一定的

线宽,并非理想的焦线,这是由彗差引起的,彗差同时也导致了最小模糊圈的非对称性.这里彗差的影响远比斜像散的影响小,故下文做简化处理,只考虑后者的影响.图3(b)是偏角为 $\phi=2$ mrad时的光点图.也有一对焦线,不同的是,焦线与 x, y 轴夹角为 45° ,且两焦线相互垂直,均稍有弧度;两焦线之间的类圆光斑近 F 点径长,远 F 点径短,与 θ 角时恰恰相反.

考虑到衍射的影响,实际焦线处的光分布应为扁椭圆状,且焦平面上的近似圆光斑的直径也应比计算值大些.而且计算值越小,受衍射影响越大.

我们较关心 $z=0$ 平面即焦平面内的光斑.由图3及上文分析可知,偏角 θ 时与 ϕ 时的该光斑只有细节上的差别,极类似.下文只讨论 θ 角的影响.

图4是偏角为不同 θ 值时焦平面上的光斑图.易知:类圆光斑直径及与焦点间距均大致与 θ 值成正比.小 θ 值时,有 $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$,由几何法也易于证明上述结论.

另外,焦线所处 z 平面与焦点 F 处的距离亦与偏角大小 $\theta(\phi)$ 近似成正比.实践中,可由此关系预估焦线的位置.

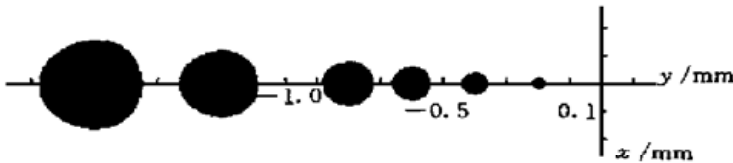


图4 $z=0$ 时的光斑图

Fig. 4 Spot diagram at focal flat ($z=0$)
 $\theta = 1, 2, 3, 4, 6$ mrad ($\phi = 0$)

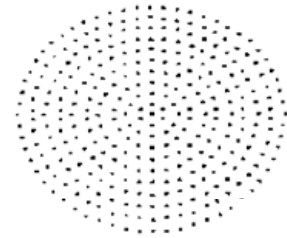


图5 光点阵图

Fig. 5 Reflective laser lattice
 $\theta = 4$ mrad ($z = 0$)

图5是 $\theta=4$ mrad, $z=0$ 时的光点图.与图1相比(通过分圈光线追迹显示),可知图1,5上各圈一一对应,只是各点在圈上的方位角有改变.其他 θ 角及 ϕ 角值时亦如此.

由上述分析可知,若入射光为基模高斯光,则反射光在 $z=0$ 平面上形成类圆光斑,也可近似看作高斯分布.对基模高斯光,入射光束半径指的是振幅减小到中心值的 $1/e$ 处的 w 值,所得到的 $z=0$ 处的光斑亦如此对待.

我们较关心光斑峰值光强,取光斑的最小半径为当量高斯半径.

$$\text{光强分布: } I(r) = I_0 \exp\left[-\frac{2r^2}{w^2}\right]$$

$$\text{总功率 } P_t: \int_0^{2\pi} \int_0^\infty I(r) r dr d\theta = I_0 \frac{\pi w^2}{2}$$

$$\text{总功率一定,故 } I_0 \propto \frac{1}{w^2}, \quad I_0 = \frac{2P_t}{\pi w^2} \quad (4)$$

得峰值光强 $I_0(\theta)$ 曲线如图6曲线a所示.

曲线a中, $\theta \rightarrow 0$ 时, $I_0(\theta) \rightarrow \infty$,显然不合理.这是因为 $\theta \rightarrow 0$ 时,几何法算得的 $w \rightarrow 0$,而 w 小于衍射极限时,必须考虑衍射的影响, w 不能无穷小.

当 $\theta \rightarrow 0$ 时,该光路系统可看作是高斯光经透镜的聚焦过程(这里以 CO_2 激光为例).

$\theta=0$ 时,当量焦距 $f' = f$ (如图7),有

$$w_0' = \frac{w_0}{\sqrt{1 + (\pi w_0^2 / \lambda f')^2}} = \frac{w_0}{\sqrt{1 + (z_0 / f')^2}} \quad (5)$$

$$z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \tag{6}$$

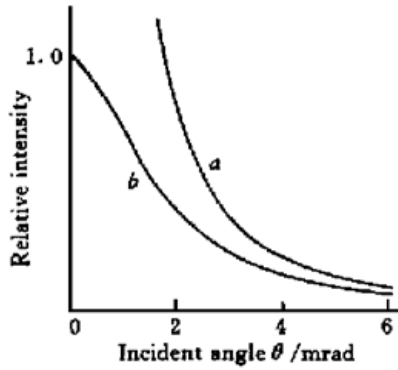


图 6 峰值光强 $I_0(\theta)$ 曲线

Fig. 6 Peak power density vs misalignment angle θ

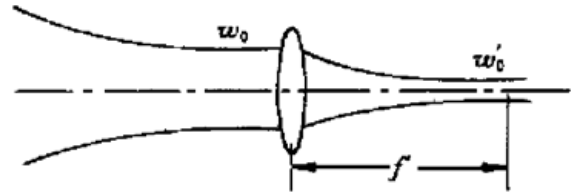


图 7 光轴准直时抛物面镜聚焦的当量光路图

Fig. 7 Equal schematic of the system with precise alignment

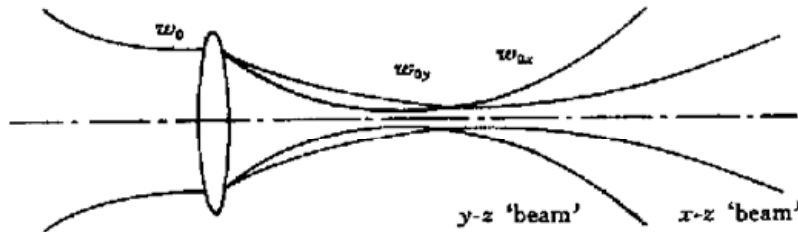


图 8 有偏角时抛物面镜聚焦的当量光路图

Fig. 8 Equal schematic of the system with misalignment angle

$\theta > 0$ 时, 产生两条相互垂直焦线, 若忽略弧矢焦线的弧度, 则反射光可看作椭圆高斯光束. 其中, 在平行于 $z-x$ 的平面内的束腰在子午焦线处, 而在 $z-y$ 平面内的束腰, 则在弧矢焦线处. 等价光路见图 8.

$$1) \quad w_{0x} = \frac{w_0}{\sqrt{1 + (\pi w_0^2 / \lambda f_x)^2}} = \frac{w_0}{\sqrt{1 + (z_0 / f_x)^2}}$$

其中, z_0 见式(6).

$$w_x^2(z = 0) = w_{0x}^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z_1}{\pi w_{0x}^2} \right)^2 \right] \tag{7}$$

其中, $z_1' = \frac{f_x}{1 + (f_x / z_0)^2}$, $z_1 = f - z_1'$.

$$2) \text{ 有 } w_{0y} = \frac{w_0}{\sqrt{1 + (\pi w_0^2 / \lambda f_y)^2}} = \frac{w_0}{\sqrt{1 + (z_0 / f_y)^2}}$$

$$w_y^2(z = 0) = w_{0y}^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z_2}{\pi w_{0y}^2} \right)^2 \right] \tag{8}$$

其中, $z_2' = \frac{f_y}{1 + (f_y / z_0)^2}$, $z_2 = f - z_2'$.

3) 求峰值光强

对于椭圆高斯光束, 令任一 z 横截面内的峰值光强为 I_0 , 则其总功率 P_t 满足下式

$$P_t = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_0 \exp\left[-\frac{2x^2}{w_x^2} - \frac{2y^2}{w_y^2}\right] dx dy = 4I_0 \frac{w_x w_y}{2} \frac{1}{2} \Gamma\left[\frac{1}{2}\right] \frac{1}{2} \Gamma\left[\frac{1}{2}\right] = \frac{\pi w_x w_y}{2} I_0$$

所以, 其峰值光强为

$$I_0 = \frac{2P_t}{\pi w_x w_y} \tag{9}$$

由式(9) 可得修正后的光斑半径 w' . 再由式(4) 可得修正后曲线, 如图 6 曲线 b .

θ 极小时, 这一修正比较合理, 但当 θ 较大时, 反射光束的运动方式严重畸变, 一点也不象高斯光束, 则这种修正有误. 但也必定位于 a, b 曲线之间.

由上述各式可看出, b 曲线与抛物面镜的焦距 f 和激光的波长 λ 密切相关. 在数学模拟时, 改变焦距 f 或波长 λ 的值, 可看到 b 曲线变化极大, 如图 9(a), (b).

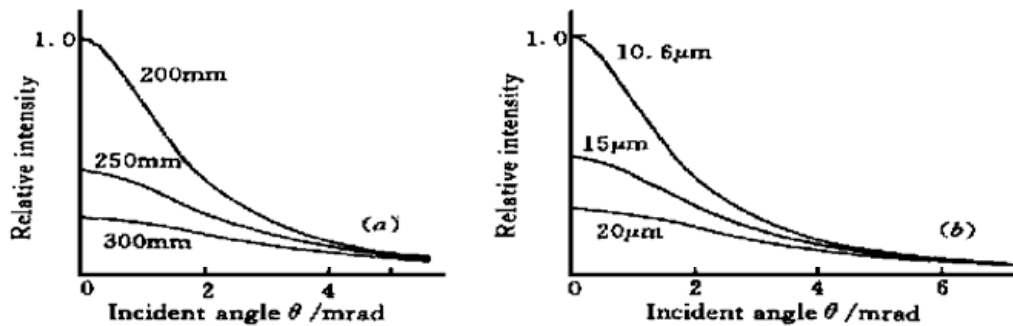


图 9 $I_0(\theta)$ 曲线

(a) 不同焦距对应的曲线; (b) 不同波长对应的曲线($f = 200 \text{ mm}$)

Fig. 9 Peak power density vs misalignment angle θ

(a) for various focal lengths; (b) for various wavelengths ($f = 200 \text{ mm}$)

焦距越长, 则无偏角时反射聚焦的高斯光斑越大, 从而使(偏角造成的)几何光斑的影响降低, 所以大焦距时峰值光强随 θ 变化减缓. 但是大的高斯光斑又使得峰值光强较小, 故而实际操作中尽量采用短焦距的抛物面镜. 但在激光焊接时, 若焦距过短, 会使溅射对镜面的污染度提高, 从而降低焊接质量和镜子的使用寿命.

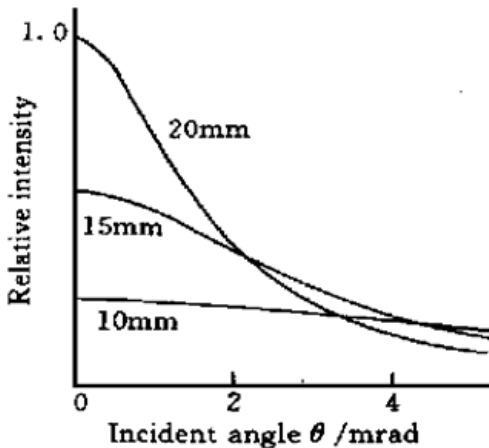


图 10 不同入射光半径 w_0 对应的 $I_0(\theta)$ 曲线($f = 200 \text{ mm}$)

Fig. 10 Peak power density vs misalignment angle θ for various beam radii ($f = 200 \text{ mm}$)

在相同总功率和光束直径的前提下, 波长越长, 其光子密度越大, 则相应的高斯光斑越大, 其结果与上段分析类似.

由图 9 可看出, 峰值光强随 θ 下降极快. 在 mrad 量级的偏角下就能下降一半, 可见 $I_0(\theta)$ 对 θ 极为敏感.

入射光束的直径不同, 对应的 $I_0(\theta)$ 曲线也显著不同, 无偏角时, 由于总功率一定, 则入射光半径 w_0 越小, 聚焦光束对应的光子密度也就越大, 进而使光束的衍射程度增强, 考虑到抛物面镜的焦距一定时, 对应的 $z = 0$ 平面上的光斑半径则越大, 故 $I_0(\theta = 0)$ 相应越小. 光轴失准程度很大, 即大 $\theta(\varphi)$ 值时, $z = 0$ 平面上的几何光斑大小将远大于衍射量, 则主要考虑前者的影响. 而几何光斑半径与 w_0 成正比, 故小半径的入射光对应的 I_0 (大

θ 值时) 反而较大, 如图 10 所示. 图中的三条曲线分别对应于 $w_0 = 20, 15, 10$ mm.

由图 10 可看出, 无偏角时的峰值光强与入射光半径的平方近似成正比. 这是因为, 抛物面镜的球差为零, 大的 w_0 值不会带来球差; 由式(5) 可知 $w_0' \propto 1/w_0$ 近似成立, 再考虑式(4), 得知 $I_0(\theta = 0) \propto w_0^2$. 入射光半径越大, 则 $I_0(\theta)$ 随 θ 的增大下降得越快, 相应地对光轴的调节精度提出了更高的要求.

3 发散角的影响

前一部分讨论中, 入射光的束腰位于镜面处, 即入射光发散角的影响可忽略. 然而, 实际操作中很难保证束腰与镜面的重叠, 聚光镜常常处于远场. 下面研究发散角对聚焦光斑的影响.

当入射光发散角为 α 时, 可把入射光看作半角为 α 的球面光束. 图 11 为近似等价光路图.

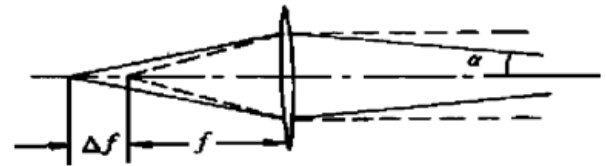


图 11 发散角为 α 时的等价光路图

Fig. 11 Equal schematic with divergence angle α

由几何光学易得

$$\Delta f = \frac{1}{1 - (f/w_{in}) \tan\alpha} \frac{f^2}{w_{in}} \tan\alpha \approx \frac{f^2}{w_{in}} \tan\alpha \quad (10)$$

同样, 可由光线追迹法得到不同发散角情况下, $f' = f + \Delta f$ 焦平面上的光斑, 见图 12. 发散角引起了彗差, 彗尾沿 y 轴延伸. 该彗差由一大一小两个扇形重叠而成, 大扇形对应于上半圆入射光, 小扇形对应于下半圆入射光. 而且小扇形柄端光点密集, 是其峰值光强处. 图 12 中, Δf 取的是精确值, 两扇形接近, 不易分辨; 当 Δf 取式(10) 中的近似值时, 大小扇形分明.

彗差分散了焦斑处的能量, 使焦斑的峰值光强大大降低. 随着发散角的增大, 彗差尺度锐增, 相应其峰值光强则锐减, 见图 12; 随着入射光半径的增加, 其变速更快, 见图 13.

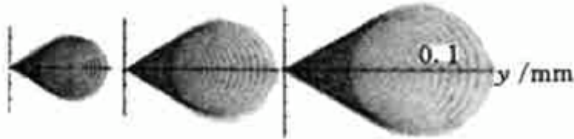


图 12 不同发散角对应的彗差

$f = 200$ mm, $w = 20$ mm, $\alpha = 2, 3, 4$ mrad

Fig. 12 Coma diagram calculated for divergence angle of 2 mrad, 3 mrad and 4 mrad ($f = 200$ mm, $w = 20$ mm)

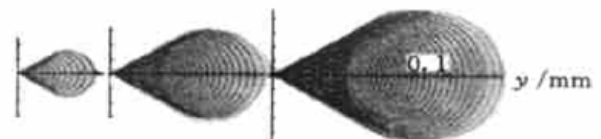


图 13 不同入射光半径对应的彗差

$f = 200$ mm, $\alpha = 3$ mrad, $w = 10, 20, 30$ mm

Fig. 13 Coma diagram calculated for beam radius of 10 mm, 20 mm and 30 mm ($f = 200$ mm, $\alpha = 3$ mrad)

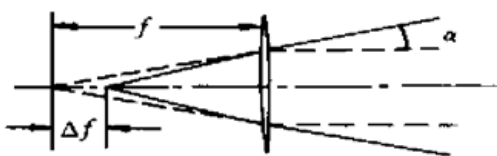


图 14 负值 α 时的等价光路图

Fig. 14 Equal schematic with divergence angle α which is minus

这纯粹是几何光学分析的结果. 它对应的光强图上, 在小扇形柄端处有尖锐凸起, 该凸起处以及其他存在较大光强的区域必须考虑衍射的影响, 加以优化才合理. 其次, 由图 12 也可看出: 小扇形柄端, 即光强峰值点. 随发散角的增加而外移.

当 α 为负值, 即入射光为会聚传输时, 近似等价光路图如图 14.

与 α 为正值时的差异有二: 其一是对应的焦距 $f' = f - \Delta f$, 有所缩短; 其二是彗差的尾部朝向负 y 轴.

4 结 论

本文采用几何光学和物理光学相结合的方法, 针对抛物面镜以离轴 90° 的方式应用于激光束的聚焦光路这一实用领域中出现的问题, 探讨并解析了光入射角度的失准及发散角对聚焦光斑造成的影响. 结论如下: (1) 角度失准使入射的高斯光转变为类椭圆高斯光; (2) 光轴角度失准引发了像散和彗差, 前者将大大降低聚焦的光强; (3) 入射光束直径的增大将大幅度降低对光轴角度失准的容忍度, 光轴需要更高的调节精度; (4) 抛物面镜焦距的增加也会降低聚焦的光强; (5) 发散角会产生彗差, 也降低聚焦的光强.

参 考 文 献

- 1 I. Miyamoto, H. Maruo. Effects of misalignment in focusing CO₂ laser beam by parabolic mirror. ICA-LEO '93, 1993. 341~ 349
- 2 A. Yariv. Quantum Electronics. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, 1975. (Chinese Translation, 1982): 115~ 132
- 3 I. Miyamoto, H. Nanba, H. Maruo. Analysis of thermally induced optical distortion in lens during focusing high power CO₂ laser beam. *SPIE*, 1990, **1276**: 112~ 121
- 4 Y. H. Lee. Alignment of an off-axis parabolic mirror with two parallel He-Ne laser beams. *Opt. Eng.*, 1992, **31**(11): 2287~ 2292
- 5 V. N. Churilovskii, S. A. Konovalova, V. I. Vasilchenko. A centric telescopic system to reduce the angular divergence of laser radiation. *Soviet Journal of Optical Technology*, 1974, **41**: 592~ 593
- 6 G. H. Seward, J. M. Leszcynski, E. J. Mulhern. Rapid alignment of laser beams within optical systems. *Opt. Eng.*, 1997, **36**(5): 1414~ 1420

Study on Focusing Spot Characteristic by Off-axis Parabolic Mirror

Shi Hongbin Cheng Zhaogu Xu Guoliang Jiang Jinbo Li Xianqin Xia Jin'an
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract Based on combining geometrical and physical optics, the effects of the angular misalignment of the optical axis and divergence angle on the focal power density are analyzed. Ray tracing analysis proves that a pair of focal lines are produced due to the angular misalignment, and diffractive optics proves that incident beam of Gaussian mode brings about reflective beam of near elliptical Gaussian mode. So that, the focal power density is decreased due to the angular misalignment. The parabolic mirror is very sensitive to misalignment, and the misalignment angle of the order of mrad magnitude is enough to decrease peak power density down to the half. The tolerance of the misalignment angle goes rapidly down with the incident beam diameter increasing. When the incident angle has a divergence angle, coma is produced to decrease the power density at focal plane.

Key words parabolic mirror, off-axis, angle misalignment, divergence angle