

空间光通信中的光束质量处理技术研究

杨林颖, 杨华军, 邱 琪

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

【摘要】由于通常采用圆形孔径加工光学系统,故可将单横模输出的半导体激光器发出的椭圆高斯光束近似为圆高斯光束,提出了对半导体激光器出射光束用轴对称光学系统进行处理的方法。并通过计算有限孔径的高斯光束有效菲涅尔数,确定了只要选择合适的孔径和距离,可以将几何光学的一些方法引入到高斯光束的处理问题中。实验中用视频激光光束检测仪对准直后的光束进行了测试,通过计算得出准直后的发散角被很好地控制在1mrad以内,从而验证了理论的可行性及准直系统的实用价值。

关键词 发散角; 准直; 菲涅尔数; 高斯光束; 光通信; 半导体激光器
中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A

Beam Quality Control of Space Optical Communication System

YANG Lin-ying, YANG Hua-jun, QIU Qi

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract An elliptical Gaussian beam, which is from single transverse mode semiconductor laser diodes, can be approximated dealt as circular beam because most elements of optical systems generally consist of circular aperture, like lens, illuminator, reflector, etc. By choosing both proper aperture and distance, the laws of reflection and refraction, ray tracing techniques, etc. from geometrical optics provide a foundation for design of laser beam controlling systems. Applications of these techniques to design an axis-symmetrical beam quality controlling systems are presented in this paper, and measurements with Photon 2 350 Beam Profiler are represented. The angle of divergence is corrected within 1mrad, thus the theories in this paper are proved to be applicable to beam quality controlling system.

Key words angle of divergence; collimation; Fresnel number; optical communication; Gaussian beam; semiconductor laser;

光通信作为地球轨道卫星之间的通信以及无法铺设光纤场合的点对点通信,很有发展前途。由于光通信具有传输容量大、保密性好、不受电磁干扰等优点,已日益受到人们的关注。

半导体激光器作为一种电光转换效率高、驱动电流低、体积小、重量轻、结构简单及稳定性好、寿命长、易于集成化和微型化的高可靠性光源,近年来制造工艺水平迅速提高,输出功率不断增大,已成为太空光通信的首选光源。如美国约翰逊空间站的激光对接系统采用CW半导体激光器作为光源;日本东京宇航研究所的空间交会对接扫描激光雷达采用CW/GaAlAs半导体激光器作为光源^[1]。

但是半导体激光器由于具有非对称激活通道,发出的激光在子午和弧矢方向其的发散角一般为

20°~40°和5°~10°,从而形成像散,并在远场形成椭圆光斑。这样的激光束利用价值不高,无法实现长远距离传输,故在使用半导体激光器时必须对其光束进行处理。国内外已报道的一些改善半导体激光束性能的方法和器件主要有:(1)几何透镜组合准直系统;(2)变形棱镜消像散、准直系统;(3)自聚焦棒透镜准直系统;(4)光纤微透镜耦合系统;(5)二元光学元件准直系统等^[2-8]。

为了使光电探测器不存在探测盲区,通常选用出射基横模的半导体激光器,对于单横模输出的半导体激光器发出的椭圆高斯光束,若用圆高斯光束来处理,引入误差很小,可以简化理论计算^[9]。同时,由于任何光束处理系统都有一定的口径限制,通常采用圆形孔径加工光学系统,即相当于在准直

头前加上合适圆光阑, 限制圆光阑外的激光束通过, 可在像方空间得到近似的轴对称圆光束, 故可将半导体激光器出射的椭圆光束近似为圆光束, 用轴对称光学系统进行处理。这种损失边缘能量的办法只是使光束束斑变小, 对束斑亮度影响不大, 不会降低作用距离, 是一种用于半导体激光器光束准直的简单有效的措施。实验验证了基于这一思想所设计的光束处理系统的可行性。

1 理论基础

对于光阑处半径为 a 、入射光波曲率半径为 R 的情况, 菲涅尔数 N 为^[10]:

$$N = \frac{a^2}{\lambda R} \quad (1)$$

类似地, 根据式(1), 可定义 z 处有限孔径 D 的高斯光束的有效菲涅尔数 $N(z)$ 为:

$$N(z) = \frac{(D/2)^2}{\lambda \rho(z)} = \frac{(D/2)^2}{\lambda z [1 + (Z_0/z)^2]} = \frac{\lambda z (D/2)^2}{(\lambda z)^2 + (\pi \omega_0^2)^2}$$

式中 λ 为光波长; $\rho(z) = z[1 + (Z_0/z)^2]$ 为高斯光束等相位面的曲率半径; $Z_0 = \pi \omega_0^2 / \lambda$ 为光束的共焦参数; ω_0 为高斯光束的光腰半径。

当 $N \gg 1$ 时, 衍射效应几乎可以忽略, 利用衍射理论得到的结果与几何光学的结果极为接近。因此, 只要选择合适的孔径 D 及距离 z , 即可将几何光学的一些方法引入到高斯光束的处理问题中^[10]。

由高斯光束远场发散角关系式 $\theta = \frac{\omega_0}{Z_0} = \frac{\lambda}{\pi \omega_0}$ 可知, 只有通过变换高斯光束, 增大其束腰半径 ω_0 或等效共焦参数 Z_0 , 才能减小高斯光束的发散角^[11-13]。

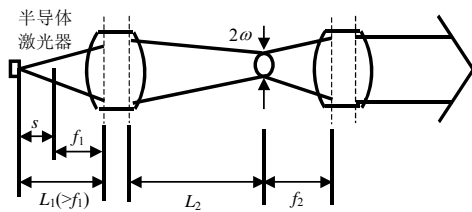


图1 光束处理系统

对于如图1所示的光束处理系统, 根据高斯光束成像变换的 ABCD 定律^[2]有:

$$L_2 = f_1 + (L_1 - f_1) \frac{f_1^2}{(L_1 - f_1)^2 + (\pi \omega_0^2 / \lambda)^2} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\omega^2} = \frac{(1 - L_1 / f_1)^2}{\omega_0^2} + \frac{(\pi \omega_0 / \lambda)^2}{f_1^2} \quad (3)$$

因此, 只要知道半导体激光器的初始光腰大小, 在保证 $L_1 > f_1$ 的情况下, 便可以由式(2)和式(3)确定经

第一个透镜变换后的光腰的大小和位置。另外, 根据几何光学的基本成像理论, 只要保证经第一个透镜变换后的光腰位于第二个透镜的焦平面上, 便可以得到平行光束, 从而可以确定整个准直系统的结构参数。

2 实验结果

在实验中采用SDL-5400系列半导体激光器, 根据厂商提供的资料, 所用半导体激光器两个方向上的半高全宽(FWHM)角分别为 $\theta_{FWHM\perp} = 30^\circ$ 和 $\theta_{FWHM\parallel} = 9^\circ$ 。根据半高全宽角 θ_{FWHM} 与远场发散角 θ 的关系 $\theta = \theta_{FWHM} / \sqrt{2 \ln 2}$, 即可得出未经准直前激光器的远场发散角为 $\theta_{\perp} = 0.447 0 \text{ rad}$ 和 $\theta_{\parallel} = 0.133 4 \text{ rad}$ 。因此, 根据 $\theta = \frac{\omega_0}{Z_0} = \frac{\lambda}{\pi \omega_0}$ 便可以确定初始光腰大小。

激光器固定端水平放置, 未经准直前, 其出射光束在5cm处已经相当发散且光强变得很微弱, 如图2所示。

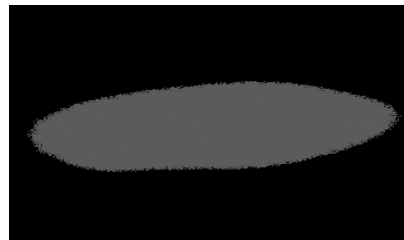
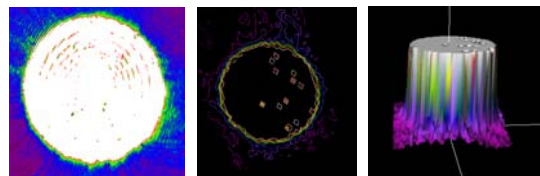


图2 未准直前在5 cm处形成的发散光斑

在实验中主要采用两个平凸透镜组合来改善半导体激光器的光束质量。为避免透镜前后表面的反射带来的能量损失以及形成的会聚光束对平行光束的影响^[4], 提高能量透过率, 准直透镜均镀有增透膜。加上准直系统后, 由于激光输出功率太大, 光强太强, 容易引起CCD的饱和, 所以使用一定的衰减片衰减激光光束的振幅, 以减轻CCD的饱和程度。

在距离50 cm远处, 用视频激光束检测仪(Beam Profiler)对准直后的光束进行测试。虽然CCD有一些饱和, 但从其分布看, 仍能得到一个很好的圆形光斑(如图3所示)。



a. 视频图像 b. 光束的二维分布 c. 光束的三维分布

图3 加上准直系统后距离50 cm处所得的测试结果

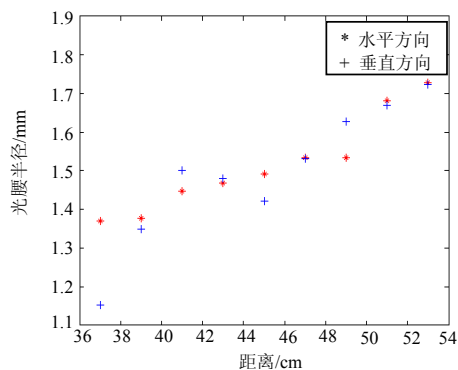


图4 准直后的光腰大小

表1 实际测得的两个方向上的光斑大小

z/cm	53	51	49	47	45	43	41	39	37
$\omega(z)_{//}/\mu m$	1 730.78	1 683.12	1 537.22	1 535.80	1 494.36	1 471.19	1 449.31	1 379.99	1 373.12
$\omega(z)_{\perp}/\mu m$	1 726.04	1 670.65	1 629.00	1 534.37	1 425.22	1 481.28	1 402.37	1 351.26	1 156.88

从图4中可看出,随着距离的变化,准直后两个方向上的光腰基本保持一致,取平均得准直后的光腰半径分别为 $\omega_{0//} = 1.515 2 \text{ mm}$ 和 $\omega_{0\perp} = 1.325 0 \text{ mm}$ 。考虑到测量过程所带来的误差,可以看出两个方向的光斑大小基本相同。再由高斯光束的发散角公式 $\theta = \frac{\omega_0}{Z_0} = \frac{\lambda}{\pi\omega_0}$,就可以确定加上准直系统后

其发散角已经减小为 $\theta_{//} = 0.174 4 \text{ mrad}$ 和 $\theta_{\perp} = 0.199 4 \text{ mrad}$ 。考虑衰减片的影响,可以看到,光斑被很好地准直在1 mrad以内。

3 结束语

本文用具体实验验证了所采用的理论处理半导体激光器光束质量问题的可行性。根据该理论所设计的准直系统结构简单、加工方便、利于装配,准直后的激光束可达到空间光通信中对于光束质量的指标要求。

参考文献

- [1] 何兴仁. 空间光通信用半导体激光器[J]. 半导体光电, 2000, 21(1): 11-12.
- [2] 房启勇, 施浣芳, 高洪尧. 半导体激光器光束质量改善新技术综述[J]. 光学技术, 2003, 29(1): 107-109.
- [3] SHEALY D L. Historical perspective of laser beam shaping[C]//Proceeding of SPIE. San Jose: SPIE Press, 2002, 4770: 37-47.

移动CCD,得到一组两个方向上的光斑 $\omega(z)_{//}$ 和 $\omega(z)_{\perp}$ 。 $\omega(z)_{//}$ 和 $\omega(z)_{\perp}$ 的大小随距离 z 的变化情况如表1所示。

根据高斯光束截面半径表达式 $\omega(z) = \omega_0 [1 + (\frac{\lambda z}{\pi\omega_0^2})^2]^{\frac{1}{2}}$,便可求得经准直后光束的光腰大小。

假设经准直系统处理后的光束的光腰位于第二个透镜的端面,则在水平和垂直两个方向上,准直后的光腰半径大小如图4所示。

- [4] SHEALY D L, CHAO Shao-hua. Geometric optics-based design of laser beam shapers[J]. Optical Engineering, 2003, 47(11): 3123-313.
- [5] SHEALY D L, CHAO Shao-hua. Design and analysis of an elliptical Gaussian laser beam shaping system[C]//Proceeding SPIE. San Diego: SPIE Press, 2001.
- [6] SHEALY D L. Theory of geometrical methods for design of laser beam shaping systems[C]// Proceeding of SPIE, San Diego: SPIE Press, 2000.
- [7] SINZINGER S, BRENNER K H. Astigmatic gradient-index elements for laser-diode collimation and beam shaping[J]. Applied Optics, 1995, 34: 6626-6632.
- [8] AI-SAIDI I A. Using a simple method:conversion of a Gaussian laser beam into a uniform beam[J]. Optics & Laser Technology, 2001, 33: 75-79.
- [9] 陈建平, 黄上元. 半导体激光管光束准直器的设计[C]//第五届全国光纤通信学术会议论文集天津. 天津: 天津市电子学会, 1991.
- [10] 卢亚雄, 杨亚培, 陈淑芬. 激光束传输与变换技术[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1999.
- [11] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [12] 熊秉衡, 王正荣. 准直透镜反射光引起的一个问题[J]. 光子学报, 2000, 29(4): 344-347.
- [13] YAGIUY, YASUTOSHIT, KUMAZAWAM, et al. New collimating lens system for laser diode package[C]//Proceedings-Electronic Components and Technology Conference. Orlando: [s. n.], 1993.

编辑 熊思亮