

大功率半导体激光束变发散角整形系统设计方法

费冰 王悠子 刘涛 孙建 王巍 杜妍 段庸 崔庆丰*

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 在研究了大功率半导体激光器(HPLD)光束特性的基础上,提出了实现大功率半导体激光束变发散角的设计方法。针对线源像散激光光源设计了由两个垂直放置的平凸柱透镜组成的可变激光束发散角的整形系统。在满足光束发散角要求的前提下,通过离焦使其出射光束的发散角在一定范围内连续改变。建立了两个柱透镜移动量与光束发散角关系的数学模型。利用商用光学软件对整形系统进行了模拟,结果表明,光束发散角被压缩在一定范围内连续改变,从而可实现对不同范围物体照明。

关键词 激光器;大功率半导体激光器;光束整形;变发散角;柱透镜;光学设计

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.071401

Variable Beam Divergence Design Method for High Power Diode Laser

Fei Bing Wang Youzi Liu Tao Sun Jian Wang Wei Du Yan Duan Yong Cui Qingfeng

(Department of Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract On the basis of studying the beam characteristics of high power diode laser (HPLD), variable beam divergence design method for high power diode laser is presented. A variable beam divergence shaping system with two plane-convex cylindrical lenses perpendicular to each other for extended astigmatic source is designed. This system can obtain the required beam divergence and change it in a certain range by defocusing. A mathematical model between motion quantity and beam divergence is set up. The results simulated by commercial optical design software show that this system can reduce the beam divergence and change it continually in a certain range. The transformed beam can illuminate different area objects.

Key words lasers; high power diode laser; beam shaping; variable beam divergence; cylindrical lens; optical design

OCIS codes 140.2020; 140.3300; 140.5960

1 引言

大功率半导体激光器(HPLD)具有发光效率高、易于集成、结构简单、可高速直接调制且调制频率高、可靠性好、使用寿命长、价格便宜的特点,并且它具有其他激光器无可比拟的超小型、重量轻等优势,在激光照明、激光制导、激光测距、材料加工等许多领域中得到应用。HPLD发光区域及其发散角在两个正交方向(快轴与慢轴方向)极不对称。例如,典型的HPLD快慢轴方向发光面尺寸及其光束发散角分别为 $1\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$, $40^\circ \times 10^\circ$ ^[1]。为了使其能够对不同范围物体远距离照明,必须压缩光束发散角并使其在一定范围内连续改变。

对于半导体激光器光束准直技术的文章较多^[2,3],但是目前的报道主要是针对从像散点光源发出的基模高斯光束进行双镜准直系统设计。传统的光源模型为具有像散距离的点光源模型^[3]。对于HPLD,由于半导体激光器的波导结构特点,慢轴方向尺寸的增加提高了输出功率但是也导致其光束质量严重下降,输出光束为多模高斯光束^[4]。光束质量通常可用光参数积来衡量^[5],其值越大,光束质量越差,反之,光束质量越

收稿日期: 2011-12-22; 收到修改稿日期: 2012-01-10; 网络出版日期: 2012-04-24

作者简介: 费冰(1986—),女,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: bing8425@yeah.net

导师简介: 崔庆丰(1954—),男,教授,博士生导师,主要从事衍射光学和光学设计等方面的研究。

E-mail: qfoui@yahoo.cn(通信联系人)

好。光参数积定义为光束的束腰半径与远场发散角的乘积。点光源基模高斯光束的束腰半径是一个很小的量,从而得到较小的光参数积,这与大功率半导体激光束具有很大的光参数积不相符。因此像散点光源模型对 HPLD 激光束不适用。

考虑 HPLD 的光束质量,HPLD 矩形发光区域输出的多模高斯光束可看作一个非相干的线光源^[6]。本文设计了两个柱透镜垂直放置组成的线源大功率半导体激光束整形系统,压缩发散角在一定范围内连续可变,建立了透镜移动量与发散角关系的数学模型。

2 光学系统结构与设计方法

由于 HPLD 的非对称激活通道,两个正交方向的光束质量以及发散角差别很大,如图 1 所示。为了使光束发散角被压缩到同一角度,并且随着发散角的改变保持相同角度的变化,分别采用两个柱透镜来压缩光束发散角,并且实现对光束发散角的改变。由于快轴方向的光束质量,首先压缩快轴方向发散角。

如上文所述,快轴方向发光尺寸较小,输出光束近似为基模高斯光束,光束质量好,因此近似为点光源,光学系统的焦距对发散角的影响较小。但是快轴方向的光束质量,为了损失较少的能量,快轴方向准直透镜(FAC)的数值孔径(NA)要足够大。通常,透镜的数值孔径为

$$NA = n \times \sin \theta_0, \quad (1)$$

式中 θ_0 为光束的远场发散角。数值孔径较大的透镜容易产生球差影响发散角的大小,所以采用二次非球面系数来校正球差^[7]。

在 HPLD 的慢轴方向,由于发光区域的增加,输出光束为多模高斯光束,其发光区域应该看作一个非相干的线光源。如果激光器慢轴方向的远场发散角为 θ_x ,发光面尺寸为 $2h_x$,光源位于准直系统焦点处时准直光路如图 2 所示,其准直后的光束发散角为

$$\theta'_x = h_x / f_x, \quad (2)$$

式中 f_x 为慢轴方向准直系统的焦距。可见,慢轴方向准直透镜(SAC)焦距必须足够长才能得到发散角比较小的光束。

由此,设计的光学系统结构如图 3 所示。

3 透镜移动量对发散角影响的数学模型

变发散角通过离焦原理实现。当柱透镜距离 HPLD 光源等于自身焦距时,出射光束得到最小发散角。移动柱透镜,产生离焦量 z ,光束发散角变大。所以可以通过微量移动两个柱透镜,根据不同需要改变光束发散角,实现发散角连续可变。离焦既可以改变发散角,又可以不添加元件,从而不会增加系统体积。

快轴方向光束近似为基模高斯光束,其束腰半径为^[8]

$$w_y = \lambda / (\theta_y \pi). \quad (3)$$

经透镜变换后的光束远场发散角及束腰半径分别为

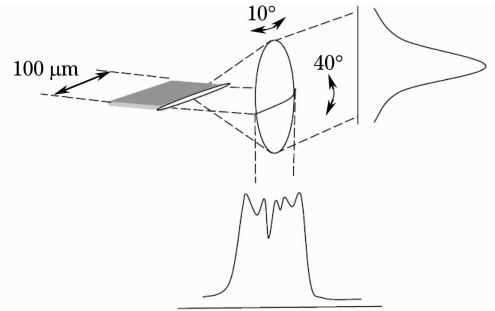


图 1 大功率半导体激光器光束特性

Fig. 1 Beam characteristics of high power diode laser

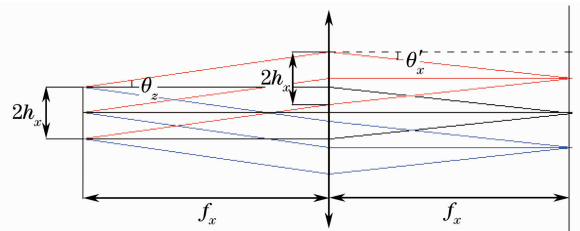


图 2 慢轴方向光束准直光路

Fig. 2 Collimation optical path for slow axis beam

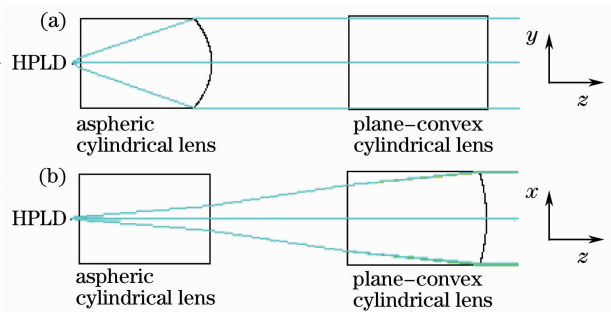


图 3 光学系统结构示意图。(a) $y-z$ 截面;

(b) $x-z$ 截面

Fig. 3 Sketch map of the optical system structure for

(a) $y-z$ section and (b) $x-z$ section

$$\theta'_y = \lambda / (\pi w'_y), \quad (4)$$

$$w'_y = \frac{f_y w_y}{\sqrt{z_y^2 + Z_0^2}}, \quad (5)$$

式中 $Z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ 为瑞利长度, z_y 为离焦量, 当 $z_y \gg Z_0, Z_0 \rightarrow 0$ 时由(2)~(4)式求得离焦后的光束发散角为

$$\theta'_y = \frac{\theta_y}{f_y} z_y. \quad (6)$$

在慢轴方向, 由几百微米处输出的多模高斯光束近似为非相干线光源。对于一个线光源, 离焦后其边缘光线偏折角度最大, 决定了光束发散角。所以使用近轴追迹公式^[9]对边缘光线追迹

$$n'\theta'_x = n\theta_x - y\phi_x, \quad (7)$$

$$y = h_x + \theta_x \times (f_x + z_x), \quad (8)$$

式中 $n' = n = 1$ 。由(7), (8)式得离焦后的发散角为

$$\theta'_x = (z_x \times \theta_x + h_x) / f_x, \quad (9)$$

式中 z_x 为离焦量。边缘光线光路图如图4所示。

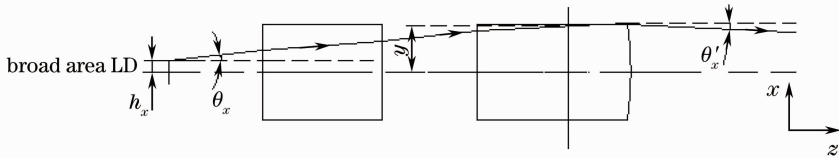


图4 慢轴方向边缘光线追迹示意图

Fig. 4 Sketch map of slow axis direction marginal ray tracing

4 设计实例与模拟

选取典型的 HPLD, $\lambda = 0.808 \mu\text{m}$, $\theta_{//} = 10^\circ$, $\theta_{\perp} = 40^\circ$ (半峰全宽, FWHM), 发光面尺寸为 $100 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 。根据应用需求确定整形系统设计指标为 $0.1^\circ \sim 0.5^\circ$ (半峰半宽, HWHM) 连续变化。通常激光器生产商以激光功率下降到一半时所对应的全角 (FWHM) 来作为该产品的参数。远场发散角与全角的关系为^[10]

$$\theta_0 = 0.85 \times \theta_{\text{FWHM}}. \quad (10)$$

所以该激光器光慢轴与快轴方向光束远场发散角分别为 $\theta_x = 0.85 \times 10^\circ = 8.5^\circ$, $\theta_y = 0.85 \times 40^\circ = 34^\circ$ 。准直后的远场发散角为 $\theta' = 0.85 \times 0.2^\circ = 0.17^\circ = 2.96 \times 10^{-3} \text{ rad}$, 由(2)式求得慢轴方向光学系统焦距为 $f_x = \frac{h_x}{\theta'_x} =$

$$\frac{0.05 \text{ mm}}{2.96 \times 10^{-3}} = 16.89 \text{ mm}.$$

根据文献^[11]采用远心光路模拟了发光面积为 $1 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, 远场发散角为 $34^\circ \times 8.5^\circ$ 的像散光源。

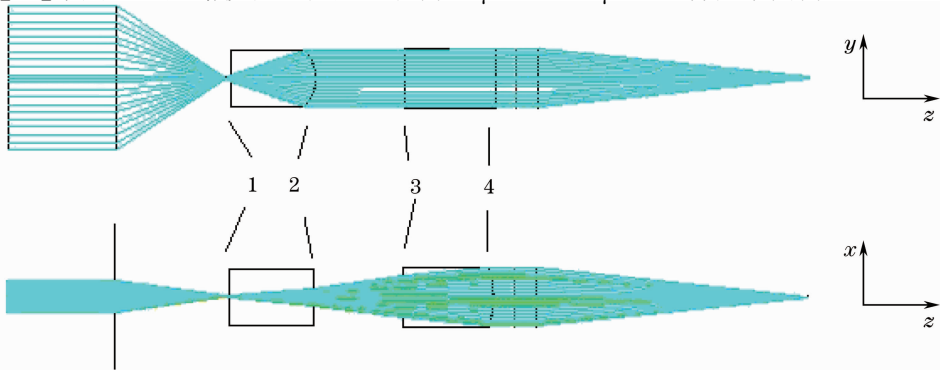


图5 y - z 截面与 x - z 截面变发散角整形系统

Fig. 5 Beam shaping system with variable divergence at y - z section and x - z section

令面 1 距离光源 0.5 mm, 将面 2 的半径、其二次非球面系数、面 2 与面 3 之间的距离以及透镜的厚度设为变量, 设置好优化操作数, 使用定义评价函数优化系统。最终光学系统如图 5 所示, 2 面优化为椭球柱面。

将探测器放置于距离光源 100 m 处接收整形后的光束的能量, 其远场分布如图 6 所示。图 6(a) 为距光源 100 m 处光斑截面图, 由图可知, 发散的像散椭圆光束被整形成对称光束。图 6(b)、(c) 分别为快轴方向与慢轴方向能量分布, 可见 100 m 处能量下降到一半时所对应的光斑直径为 384.4 mm。所以

$$\theta = \frac{D}{2l} = \frac{384.4 \text{ mm}}{100 \text{ m} \times 2} = 1.742 \text{ mrad} = 0.0998^\circ, \quad (11)$$

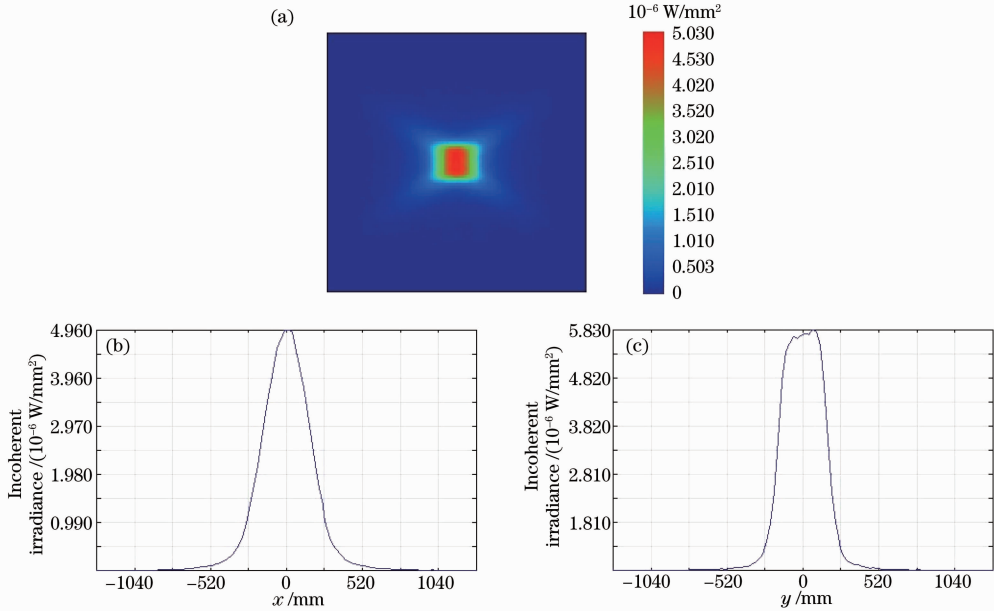


图 6 100 m 处光束能量分布。(a) 光斑能量分布图; (b) 快轴方向能量分布; (c) 慢轴方向能量分布

Fig. 6 Irradiance at the detector surface 100 m behind the diode laser. (a) Beam spot; (b) fast axis; (c) slow axis

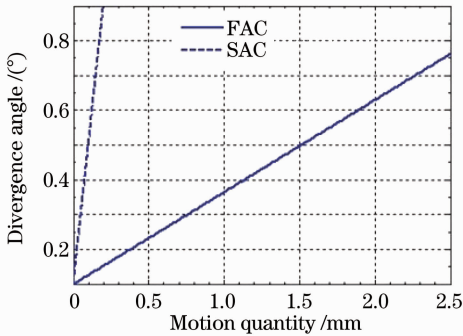


图 7 两个柱透镜的移动量与发散角的关系
Fig. 7 Motion quantities of two cylindrical lenses with various beam divergence angles

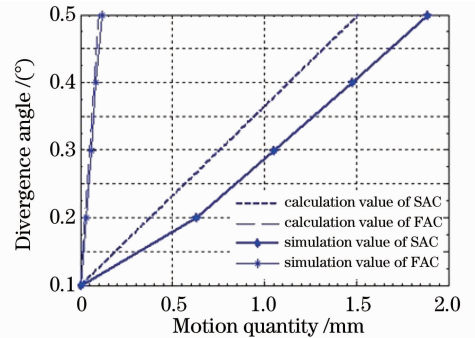


图 8 0.1°~0.5°理论计算与 Zemax 模拟的两个透镜移动量与发散角关系

Fig. 8 Calculated motion quantities with various beam divergence angles between 0.1°~0.5° in comparison with simulation results

得到了 0.1° 的对称光束。

由(6)、(9)式可求得不同发散角所对应的两个柱透镜移动量, 使用 Matlab 绘制其关系, 如图 7 所示。在 0.1°~0.5° 范围内理论计算与 Zemax 模拟所得到的两个透镜移动量与发散角关系比较如图 8 所示, 理论值与模拟值接近, 但是不能够精确得到要求的发散角, 经过分析, 原因如下:

1) 大功率半导体激光束光场分布十分复杂, 在研究了 HPLD 光束特性的基础上, 对光源进行了近似, 并且采用最为直观的几何光学方法研究了激光光束的传输变换, 而 Zemax 中采用了非序列模式光束追迹。

2) 理论计算值是在不考虑球差的情况下得到的结果, 而 Zemax 中得到的发散角包括了球差对发散角

的影响。

图 6 所建立的数学模型可以作为初级模型,为两个透镜移动量与发散角的关系提供可靠的指导。

100 m 处光斑截面如图 9 所示。由图可见,经过整形系统整形后,得到了能量分布对称的光斑。光斑直径分别为 699.7,1016.6,1381.2,1756.1 mm,由(11)式可求得光束发散角分别为 $0.2^\circ, 0.3^\circ, 0.4^\circ, 0.5^\circ$ 。整形系统实现了光束发散角在 $0.1^\circ \sim 0.5^\circ$ 连续可变,并且在变化过程中能量分布保持对称性,满足了对远距离不同范围物体照明的需求。

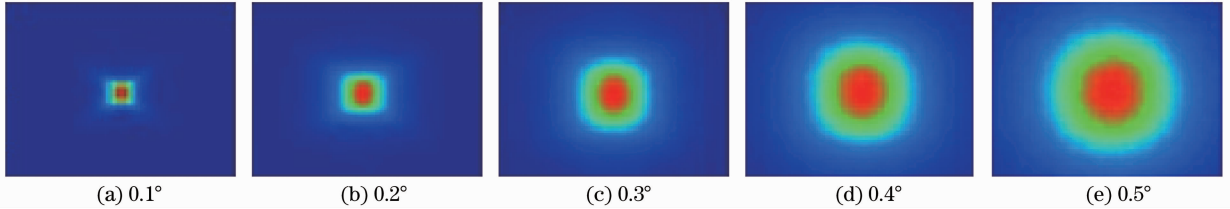


图 9 100 m 处的发散角分别为(a) 0.1° , (b) 0.2° , (c) 0.3° , (d) 0.4° , (e) 0.5° 光斑截面图

Fig. 9 Beam patterns of (a) 0.1° , (b) 0.2° , (c) 0.3° , (d) 0.4° , (e) 0.5° at 100 m distance

5 结 论

提出了非球面柱透镜以及长焦平凸柱透镜对 HPLD 光束整形的设计方法,实现了光束发散角在一定范围内连续改变的目的。所提出的设计方法可用来设计压缩 HPLD 激光束发散角的整形系统,所建立的数学模型可以为两个柱透镜移动量与发散角的关系提供可靠的指导。应用该方法设计的平面-椭圆柱面透镜,由平凸柱透镜垂直放置组成的整形系统,将发散角 $40^\circ \times 10^\circ$,发光面 $1 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 的典型 HPLD 激光束变换为发散角 $0.1^\circ \sim 0.5^\circ$ 连续可变的激光束,而且结构简单,元件可加工,有着良好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Shizhe Shen, Quan Zhang, Yuanxiang Wang. 980-nm broad-area diode laser coupled to a cylindrical lensed multimode fiber [C]. *SPIE*, 2004, **5280**: 434~438
- 2 Masud Mansuripur, Ewan M. Wright. The optics of semiconductor diode lasers[J]. *Optics & Photonics News*, 2002, **13**(7): 57~61
- 3 Mert Serkan, Hulya Kirkici. Optical beam-shaping design based on aspherical lenses for circularization, collimation, and expansion of elliptical laser beams[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(2): 230~241
- 4 Robert E. Fischer, Biljana Tadic-Galeb, Paul R. Yoder. Optical System Design[M]. New York: McGraw-Hill, 2008. 214
- 5 Peng Hangyu, Gu Yuanyuan, Shan Xiaonan *et al.*. Study on beam shaping of high power diode laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0202010
彭航宇, 顾媛媛, 单肖楠 等. 大功率半导体激光光源光束整形技术研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(2): 0202010
- 6 Albrecht Pfeil, Thilo Freyhold. Beam shaping of broad area diode lasers: principles and benefits [C]. *SPIE*, 2002, **4648**: 82~90
- 7 Chu Xinjun, Wang Zhiyong, Ma Chunyu *et al.*. Analysis of two aspheric micro-lens in collimation high-power LD[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(suppl.): 66~69
初新俊, 王智勇, 马春雨 等. 两种非球面微透镜大功率半导体激光器阵列准直效果的分析[J]. 中国激光, 2006, **33**(suppl.): 66~69
- 8 Lü Baida. Laser Optics—Laser Beam Propagation and Transformation and Beam Quality Control[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1992. 92~97
吕百达. 激光光学——激光束的传输变换和光束质量控制[M]. 成都: 四川大学出版社, 1992. 92~97
- 9 Joseph M. Geary. Introduction to Lens Design with Practical ZEMAX Examples[M]. Virginia: Willmann-Bell, 2002. 33
- 10 ZEMAX Development Corporation. ZEMAX User Manual[M]. Bellevue: ZEMAX, 2008
- 11 Simon Thibault. Astigmatic light source in optical design software[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(7): 1808~1811