# 宽发射面激光二极管光束整形系统的光学设计

高志红1,张文喜2,孔新新2,冯其波1

(1. 北京交通大学 理学院,北京 100044;

2. 中国科学院计算光学成像技术重点实验室,北京 100094)

摘 要: 宽发射面激光二极管作为泵浦源在全固态激光器中得到了广泛的应用,但由于快慢轴发散 角太大和发光面的不对称,所以需要对其进行光束整形。针对发光面为 1 μm(快轴)×200 μm(慢轴)且 远场光斑为矩形光斑的宽发射面激光二极管,分析了输出光束在平行于 p-n 结方向上光场(侧模)的 多光丝分布特性。通过在 ZEMAX 非序列里,设置合理的光丝间隔、尺寸和以纵模为间隔的多个波长, 模拟了与实际相符的远场光斑。利用圆柱透镜压缩激光二极管快轴发散角,再用自聚焦透镜进行聚 焦,最后在离自聚焦透镜后端面 1.8 mm 处得到快慢轴方向长分别为 0.15 mm×0.17 mm 的方形光斑, 且快慢轴方向发散角分别为 3.3°×2.4°。同时,通过实验逐步比较了光束通过每一个光学元件后光斑 形状的变化和光强分布,结果表明:宽发射面激光二极管光束整形中,通过引入侧模光丝结构的矩形 光斑模拟方法是可行的。

关键词:激光二极管;光束整形;圆柱透镜;自聚焦透镜 中图分类号:TN248.4 文献标志码:A DOI:10.3788/IRLA201847.1218006

# Optical design of broad-area laser diode beam-shaping system

Gao Zhihong<sup>1</sup>, Zhang Wenxi<sup>2</sup>, Kong Xinxin<sup>2</sup>, Feng Qibo<sup>1</sup>

(1. School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Key Laboratory of Computational Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: The broad-area laser diode is widely used as a pump source in all-solid-state lasers, while the beam of semiconductor laser diode have to be shaped because of large divergence angle and the asymmetry of the narrow rectangular cross section in fast-axis and slow-axis directions. The output laser spot of area-broad diode laser with bright area:  $1 \mu m$  (fast axis)×200  $\mu m$  (slow axis) was rectangular and the mode characteristics of multiple filaments in the direction parallel to the p-n junction was analyzed. The far-field optical intensity distributions was simulated based on ZEMAX ray tracing software that operated in a non-sequential mode by setting appropriate filament size, spacing and multi-longitudinal mode. The simulation result was consistent with the real optical intensity distributions. Then a compact optical system of beam shaping was presented which consisted of a cylindrical lens and self-focused lens. The cylindrical lens was responsible for collimating the beam along its fast-axis, while the self-focused lens made the spot size become smaller. Finally, the image size was 0.15 mm ×0.17 mm and beam

收稿日期:2018-07-11; 修订日期:2018-08-15

作者简介:高志红(1986-),女,博士生,主要从事全固态激光技术研究和激光干涉测量等方面的研究。Email:gaozhihong2009@163.com 导师简介:张文喜(1980-),男,研究员,主要从事精密测量、全息和全视场外差检测等方面的研究。Email:zhangwenxi@aoe.ac.cn

divergence angle was  $3.3^{\circ} \times 2.4^{\circ}$  in fast-axis and slow-axis directions, respectively, at 1.8 mm after self-focused lens. In the end, the comparison between the simulated intensity distribution and the experimental intensity distribution was performed step by step after placing optical element. It is shown that the method of simulating rectangular spots based on the broad area laser diode is feasible by introducing the filament structure.

Key words: laser diode; beam shaping; cylindrical lens; self-focused lens

### 0 引 言

激光二极管以其体积小、重量轻、转换效率高、 功耗低、价格低廉等优点,长期以来在光通信、激光 打印、全固态激光器、精密测量及激光投影显示中有 着广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。近些年,半导体激光器件结构设 计和制备工艺的改善,极大地提高了其输出功率和 亮度,促进了以激光二极管作为泵浦源的全固态激 光器的快速发展。激光二极管作为泵浦源时,由于二 极管的发光面为条形,在平行和垂直 p-n 结的两个 方向上发散角有很大差别<sup>[3]</sup>,而为了满足激光晶体处 泵浦光与振荡光基模最佳模式匹配<sup>[4]</sup>,需要对泵浦光 进行整形,这不仅有助于提高全固态激光器激光输 出的斜效率,而且有助于能改善激光输出光束质量。

对于激光二极管的整形,国内外有很多学者进 行了研究。国内学者王秀林师采用柱透镜消除激光 二极管像散和透镜准直之后,利用一对变形棱镜对 对光斑进行圆化;而潘春艳、崔庆丰临等人实现了采 用平凸柱透镜和梯度折射率透镜对激光二极管输出 光束的发散角在 0~0.5°范围内可调。新加坡的 Zhou Xiao-qun<sup>[7]</sup>、美国的 Mert Serkan<sup>[8]</sup>都直接采用 了一个特殊的非球面的单透镜对激光二极管的快慢 轴进行消像散、光斑的圆化和准直,虽然结构简单, 但加工难度大。这些方法的光学设计都是基于激光 二极管输出的是像散椭圆光束,即在垂直和平行 pn 结的方向上都是基模的高斯光束分布, 但由于两 个方向上的发散角不一样引起像散,所以激光二极 管输出光束在远场区域呈现为长轴方向为垂直于 p-n结的椭圆光斑。单模激光二极管的功率一般在 毫瓦量级,而作为小功率全固态激光器泵浦源的LD, 功率都是在瓦级以上的宽发射面多模激光二极管, 即在平行 p-n 结的方向上光场不再是基模高斯光 束,远场出射光斑近似矩形。因此,宽发射面激光二

极管的光束整形设计在实际应用中具有重要的意义。

文中首先分析宽发射面多模激光二极管的光束 特性,基于宽发射面激光二极管的侧模中光丝的尺 寸和间隔,在 ZEMAX 的非序列里进行合理的光源 模拟的参数设置和整形系统的光学设计,不仅实现 了百微米激光光斑的输出,且仿真结果成功地验证 了实验中远场光斑的光强分布特点。

#### 1 宽发射面激光二极管光束特性

#### 1.1 宽发射面激光二极管模式分析

激光二极管的发光面是矩形的,通常在垂直于 p-n结方向有源区的厚度为1µm,而在平行于p-n 结方向宽度(条宽)在 10~200 µm 之间。随着平行于 p-n结方向横向条宽的增大,激光二极管额定输出 功率会增加,但是光束质量会变差<sup>[9]</sup>。在垂直 p-n 结 方向会一直是基模高斯光束,但在平行于 p-n 结方 向光场的模式会由高斯光束基模向高阶模转化。有 研究表明: 当条宽 ω>14 μm 时, 侧模不再是基模高 斯分布<sup>[10]</sup>。此外,随着注入电流和横向条宽的增加, 在平行于 p-n 结方向上载流子的空间烧孔引起的折 射率变化、热致自聚焦效应和光进入包层产生的离 焦效应,横向光场分布表现出多光丝的结构。R. Hülsewede<sup>[11]</sup>对宽发射面激光二极管侧模中光丝的现 象进行了深入的研究,认为光丝的空间尺寸为 $\sigma=$  $\frac{4\lambda}{\pi\theta}$ ,其中 θ为光束在慢轴方向的发散角, λ 为光波 波长。同时指出光丝的间隔,随材料的克尔系数而改 变,且测得了条宽  $\omega_{x}=50 \,\mu m$  的激光二极管的光丝间 隔为 15 μm。故在对高功率宽发射面半导体激光器 光源进行模拟时(图 1),从横向模式上可以认为是由 许多个具有相同发散角的等光丝间隔分布的单模发 射结构成[12]。同时,作为泵浦源的激光二极管一般都 是多纵模的激光器,故从纵向模式上可以认为是由 许多以纵模为间隔的单色光源组成的相干光源。



图 1 宽发射面激光二极管空间发光示意图

Fig.1 Coordinate system and schematic diagram of a stripe-contact broad area laser diode

#### 1.2 远场光斑的模拟

实验使用的单管半导体激光二极管输出功率为 5W,快轴方向发散角为35°,慢轴方向发散角为8°, 发光区域尺寸为1μm(快轴)×200μm(慢轴)。将1× 200μm的发光面认为是在X方向等间距排列的单 模发射结,而每一个发射结在慢轴方向的光强近似高 斯分布,且同一个发光面内的光是部分相干的,则整 个出射光束的角空间光强分布近似超高斯函数<sup>[13]</sup>:

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_{0} \exp\left[-\left(\frac{\theta_{x}}{\alpha_{x}}\right)^{2\mathbf{G}_{x}} + \left(\left(\frac{\theta_{y}}{\alpha_{y}}\right)\right)^{2\mathbf{G}_{y}}\right]$$
(1)

式中: I<sub>0</sub>为 Z 轴上的光强; θ<sub>x</sub>和 θ<sub>y</sub>分别是光束与 X-Z 面和Y-Z 面的夹角; α<sub>x</sub>和 α<sub>y</sub>分别为 X 和 Y 方向的远 场发散角; G<sub>x</sub>和 G<sub>y</sub>分别为 X 和 Y 方向上的超高斯因 子。当G<sub>x</sub>=G<sub>y</sub>=1时,远场光斑为椭圆的光斑。随着 G<sub>x</sub>和 G<sub>y</sub>的增大,光斑形状越来越趋近于方形。由于光源的 单色性和尺寸都会影响到最后探测器上的光强分布, 所以在ZEMAX 非序列里,要根据激光二极管的谱宽 (3 nm)设置多个以纵模间隔分布的激光波长,慢轴方 向以光丝间隔排列多个光丝大小的单模发射结,使探 测面的光强分布最大限度地接近实际光斑图。图2





是 ZEMAX 软件模拟光斑图和激光二极管实际出射 远场光斑图,图中很明显看到光斑的轮廓是接近方 形的,而且有光丝的现象。

#### 2 光束整形原理

#### 2.1 圆柱透镜理论分析

相对于各种非球面镜,圆柱透镜更容易加工,而 且可以用光纤代替,同时节约了成本<sup>[14]</sup>。用光线追迹 法分析圆柱形微透镜的耦合原理如图 3 所示,光线 由 F 点发出,经圆柱形微透镜会聚后聚焦于 F'点。



图 3 圆柱透镜中光线传播原理图

Fig.3 Schematic diagram of ray propagation in cylindrical lens

其中,L为透镜与光源的距离。根据图 3 的几何 关系有:

$$\theta = \theta_0 + 2 \left[ \theta_5 - \arcsin\left(\frac{\sin(\theta_0 + \theta_5)}{n}\right) \right]$$
 (2)

$$\theta_5 = \arcsin\left(\frac{\mathbf{L}+\mathbf{r}}{\mathbf{r}}\sin\theta_0\right) - \theta_0$$
 (3)

当取 r=150 μm, n=1.458,圆柱透镜对光束发散 角压缩效果如图 4 所示。从图中可得,当需要圆柱透 镜放置在约 13 μm 时,光束出射的发散半角约为4°。





#### 2.2 自聚焦透镜理论分析

自聚焦透镜适合用在二极管泵浦的固体激光器 的泵浦光学系统中,它使泵浦系统结构简单,体积 小,光耦合效率高,且价格便宜。这里采用的是聚焦 常数 $\sqrt{A}$ =0.327、尺寸为  $\phi$ 1.8 mm×4.42 mm 的自聚 焦透镜,中心折射率  $n_0$ =1.5957,介质的折射率沿着 垂直于光轴的径向变化,等折射率面是以光轴为旋 转对称轴的圆柱面。如果经过自聚焦透镜的光是没 有像散的,那么光在透镜中传播的轨迹方程为<sup>[6]</sup>:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 \cdot \cos\left(\frac{\mathbf{n}_0 \sqrt{\mathbf{A}}}{\mathbf{L}_0} \mathbf{Z}\right) + \frac{\mathbf{P}_0}{\mathbf{n}_0 \sqrt{\mathbf{A}}} \cdot \sin\left(\frac{\mathbf{n}_0 \sqrt{\mathbf{A}}}{\mathbf{L}_0} \mathbf{Z}\right) \quad (4)$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_{0} \cdot \cos\left(\frac{\mathbf{n}_{0}\sqrt{\mathbf{A}}}{\mathbf{L}_{0}}\mathbf{Z}\right) - \mathbf{x}_{0}\mathbf{n}_{0}\sqrt{\mathbf{A}} \cdot \sin\left(\frac{\mathbf{n}_{0}\sqrt{\mathbf{A}}}{\mathbf{L}_{0}}\mathbf{Z}\right) \quad (5)$$

式中: $x_0$ =d·tan( $\theta$ ), $\theta$ 为初始入射角,d为光源离透镜的 距离, $x_0$ 为子午面内初始光线的入射位置;Z为自聚焦 透镜长度; $P_0$ 和 $L_0$ 分别为x与z方向的光学余弦:

$$\mathbf{P}_0 = \mathbf{n}_0 \cdot \sin(\theta) \tag{6}$$

$$\mathbf{L}_{0} = \mathbf{n}_{0} \cdot \cos(\theta) \tag{7}$$

光最后从透镜出射后的空气出射角为:

$$\theta' = \arcsin[\mathbf{P}_0 \cdot \cos\left(\frac{\mathbf{n}_0 \sqrt{\mathbf{A}}}{\mathbf{L}_0} \mathbf{Z}\right) - \mathbf{x}_0 \mathbf{n}_0 \sqrt{\mathbf{A}} \cdot \sin\left(\frac{\mathbf{n}_0 \sqrt{\mathbf{A}}}{\mathbf{L}_0} \mathbf{Z}\right)]$$
(8)

如果在透镜前端面的初始入射角  $\theta$ =4°,如图 5 所示,可以看出,透镜离入射光源的距离 d 越远,通 过自聚焦透镜后,聚焦效果越明显,出射后的聚焦位 置离透镜后端面越近。



图 5 光源放置位置与光束出射角的关系



从图 6 可以看出,在 d=1 mm 和 d=0.5 mm 时,



图 6 光源放置不同位置时,光在自聚焦透镜中的传播轨迹 Fig.6 Imaging path of self-focused lens when light source is at different position

光从透镜后端面射出的位置只相差不到 5 μm。因此,透镜放置位置的不同主要是对发散角的影响比较大,而对光斑出射大小影响不大。

# 3 ZEMAX 软件仿真与实验验证

在 ZEMAX 非序列模式下模拟的 808 nm 半导体激光器,首先利用光纤柱透镜对 LD 快轴发散角进行压缩,光纤芯径选用 150 μm,数值孔径为 0.37 的多模光纤。图 7 是光束经过圆柱透镜后的光斑,模拟光斑和实际光斑都出现了光强分布不均、激光斑上有暗条的现象。同时,可以通过在 Z 方向不同位置处接收面上激光光斑的光场分布图对光斑大小进行分析,软件模拟快轴发散角从 35°压缩到 7.2°,而实际测量快轴压缩后,发散角为 7.8°,快轴和慢轴的发散角接近,模拟与实验基本相符。





Fig.7 Simulated (a) and experimental (b) irradiance profiles after collimating cylindrical lens

其次,半导体激光束经过圆柱透镜后出射的光 束近似为快轴和慢轴方向发散角相等的方形光斑, 再在光纤后面放置自聚焦透镜,最终 ZEMAX 显示在 自聚焦透镜后 1.8 mm 处(图 8),得到尺寸 0.15 mm× 0.17 mm 的方形光斑,快慢轴方向发散角分别为



图 8 自聚焦透镜后 1.8 mm 处光斑的大小 Fig.8 Size of spot diagram when detector is at 1.8 mm after self-focused lens

3.3°×2.4°。实验测量的快慢轴方向发散角分别为 3.33°×3.07°,慢轴发散角偏差较大,是因为自聚焦透 镜放置位置误差,实验观察到几十微米级别的偏差 会严重影响到后面整形光斑的形状。同时,由于拍摄 光斑的 CCD 无法放置在自聚焦透镜后 1.8 mm 处, 所以无法直接验证整形光斑的大小,但将图 9 中的 模拟光斑和实验光斑对比,模拟光斑的形状和光强 分布与实验现象基本是一致的。



- 图 9 自聚焦透镜后 1.8 mm 处光斑的模拟图(a)和 4 cm 处光斑 的实验图(b)
  - Fig.9 Simulated at 1.8 mm (a) and experimental at 4 cm (b) irradiance profiles after self-focused lens

## 4 结 论

采用圆柱透镜和自聚焦透镜对发光面为1× 200 μm 激光二极管进行整形,快轴和慢轴的发散角 分别从 35°×8°变为 3.3°×2.4°, 最后输出光斑约为 0.15 mm×0.17 mm 的方形光斑。光束通过光学元件 后的光强分布是激光相干叠加的结果,因此,合理的 光源模拟非常重要。由于宽发射面激光二极管的发 光面在快轴和慢轴方向上严重不对称,导致两个方 向的空间相干性不一样。此外,激光二极管纵模数也 会影响到激光的时间相干性。将宽发射面激光二极 管看作由许多个具有相同发散角的等光丝间隔分布 的单模发射结构成,并且每一个光丝尺寸大小的单 模发射结都是多纵模运转,实验证明:基于这种方法 模拟的光源在通过光学整形后,仿真的光强分布和 光斑形状与实验现象是一致的。因此,文中基于宽发 射面激光二极管的侧模特性和纵模特性模拟光源的 方法,为宽发射面激光二极管光束整形的光学设计 提供了一种新的参考途径。

#### 参考文献:

[1] Chellappan K V, Erden E, Urey H. Laser-based displays: A

review[J]. Applied Optics, 2010, 49(25): 79-98.

- Wang Mingjian, Meng Junqing, Hou Xia, et al. In-band pumped polarized, narrow-linewidth Er:YAG laser at 1645 nm
  [J]. Applied Optics, 2014, 53(30): 7153-7156.
- [3] Wang Xiaoyan, Zhao Run, Shen Mu. High power semiconductor lasers with small divergence [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(3): 302-304. (in Chinese)
- [4] Wang Shiyu, Guo Zhen, Fu Junmei, et al. Effect of the pump light on the beam quality of the diode pumped laser
  [J]. Acta Phys Sin, 2004, 53(90): 2995-3003. (in Chinese)
- [5] Wang Xiulin, Huan Wencai, Guo Fuyuan. Research on simiconductore laser beam collimators[J]. Journal of Applied Optics, 1999, 20(1): 1-5. (in Chinese)
- [6] Pan Chunyan, Cui Qingfeng, Tong Jingbo, et al. Optical design of laser diode beam-shaping system with variable divergence angle[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1287-1293. (in Chinese)
- [7] Zhou Xiaoqun, Bryan Ngoi Kok Ann, Koh Soon Seong. Single aspherical lens for deastigmatism, collimation and circularization of a laser beam [J]. Applied Optics, 2000, 39 (7): 1148-1151.
- [8] Serkan M, Kirkici H. Optical beam-shaping design based on aspherical lenses for circularization, collimation and expansion of elliptical laser beams[J]. Applied Optics, 2008, 47(2): 230-241.
- Hans Wenzel, Bernd Sumpf, Götz Erbert. High-brightness diode lasers [J]. Comptes Rendus Physique, 2003, 4 (6): 649-661.
- [10] Marciante John R, Agrawal Govind P. Nonlinear mechanisms of filamentation in broad-area semiconductor lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1996, 32(4): 590-596.
- [11] Hülsewede R, Sebastian J, Wenzel H, et al. Beam quality of high power 800 nm broad-area laser diodes with 1 and 2 nm large optical cavity structures [J]. Optics Communication, 2001, 192(1-2): 69-75.
- [12] Masud Mansuripur, Ewan M Wright. The optics of semiconductor diode lasers [J]. Optics & Photonics News, 2002, 13(5): 56-71.
- [13] Nicola Coluccelli. Nonsequential modeling of laser diode stacks using Zemax: simulation, optimization, and experimental validation[J]. Applied Optics, 2010, 49(22): 4237-4245.
- [14] Yuan Zongheng, Hu Fangrong. System of semiconductor laser coupling to fiber without light source by using ZEMAX software [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35 (S5): 22-25. (in Chinese)