

文章编号: 1001-3806(2014)04-0522-05

基于 ZEMAX 的半导体激光器匀光设计

黄 珊¹, 邓磊敏², 杨 煥¹, 段 军^{2*}

(1. 华中科技大学 光学与电子信息学院, 武汉 430074; 2. 华中科技大学 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

摘要: 为了满足半导体激光器能量均匀化的应用需求, 基于 ZEMAX 光学设计软件设计了一套光束整形匀光系统。采用非球面镜与倒置柱面镜望远系统的透镜组合对单模半导体激光器进行准直, 得到近似高斯圆光斑; 在推导了基模高斯强度分布的匀光投影半径的基础上, 利用 ZEMAX 优化得到两个非球面镜组成的匀光透镜组, 在一定范围内可获得能量均匀度达 96% 以上的圆光斑。同时, 实现了一个大功率半导体激光器光纤耦合模块的能量匀化设计, 满足对能量匀化要求较高的应用。结果表明, 该研究为半导体激光器能量均匀化的应用提供了有效方法。

关键词: 光学设计; 光束匀化; ZEMAX; 半导体激光器

中图分类号: TN248.4; TN202

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.04.017

Homogenization design of laser diode based on ZEMAX

HUANG Shan¹, DENG Leimin², YANG Huan¹, DUAN Jun²

(1. School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to meet the beam homogenization application requirements of laser diodes, a beam homogenization shaping system was designed with ZEMAX optical design software. A collimation system composed of aspheric lenses and inverted cylindrical lenses telescope system was used to get a circular Gaussian beam. On the basis of deducing homogenization projection radius of fundamental mode Gaussian beams, the two-aspheric lens homogenization system was optimized with ZEMAX. The whole system can obtain a circular spot with energy uniformity over 96% at a large range. Meanwhile, the beam homogenization of high power optical fiber couple module was realized, which satisfied the needs of high uniformity in applications. This research provides an effective way for the homogenization applications of laser diodes.

Key words: optical design; beam homogenization; ZEMAX; laser diode

引 言

半导体激光器 (laser diode, LD) 由于具有电光转换效率高、输出功率大、体积小、寿命长、可靠性好以及价格低廉等优点, 被广泛应用于照明、医疗、材料加工等诸多领域^[1]。然而, 半导体激光器光束质量较差, 远场光斑分布呈椭圆高斯型, 且存在本征象散。在激光焊接、熔覆及表面热处理等应用中, 能量

分布不均易导致材料局部温度过高而影响材料的性能^[2]; 在光催化领域研究中, 紫外激光光源因其一系列优点受到重视, 利用能量均匀分布的紫外半导体激光器光源能得到均匀的催化效果; 在半导体激光治疗仪的广泛应用中, 输出能量均匀的光斑可使激光照射的有效治疗面积增大, 治疗效果更显著。在半导体激光器的很多应用中, 都对其光束提出了截面圆化和能量均匀化的要求。为了满足应用需求, 必须对半导体激光器输出光束进行整形匀化的处理^[3-5]。

目前, 高斯光束整形成能量均匀分布的平顶光束方法主要有非球面透镜组^[6]、二元光学元件、多光束叠加、复眼透镜等等。其中, 非球面透镜组的设计结构最为简洁, 容易实现, 光能损失小。FAN^[7]和 FENG 等人^[8]在 FRIEDEN 等人^[9]提出的将高斯光

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51175205); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (HUST2011TS057)

作者简介: 黄 珊 (1989-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光微加工及激光光学系统设计方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: duans@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2013-08-28; 收到修改稿日期: 2013-10-04

束利用非球面透镜组整形形成平顶光束的理论基础上,通过数值分析方法得到非球面镜的面型参量。但是,数值模拟过程较复杂,数值计算存在误差,并且若要在较远位置实现匀光效果,需加扩束系统。

作者利用 ZEMAX 光学设计软件设计了一套光束整形匀光系统。先实现单管单模 LD 的准直和圆化,得到近似高斯能量分布的光束,进而通过匀光透镜组在某一位置实现能量的均匀化,整体设计简单,易实现。

1 半导体激光器的光束特性

半导体激光器的有源区在竖直方向和水平方向的孔径约束大小不一样,由于衍射等原因导致高斯光束空间分布的不对称性。在垂直于结平面(快轴)的方向上,发散角一般在 $20^\circ \sim 40^\circ$,光束质量接近衍射极限,为基横模高斯分布;在平行于结平面(慢轴)的方向上,发散角一般在 $8^\circ \sim 15^\circ$,光束质量很差,为多模厄米-高斯分布。

在 ZEMAX 中,半导体管沿角度方向上强度分布可用下式表示:

$$I(\theta_x, \theta_y) = I_0 \exp \left\{ -2 \left[\left(\frac{\theta_x}{\alpha_x} \right)^{2G_x} + \left(\frac{\theta_y}{\alpha_y} \right)^{2G_y} \right] \right\} \quad (1)$$

式中, I_0 为 z 轴上光强; θ_x 和 θ_y 分别是光束与 x - z 面和 y - z 面夹角; α_x 和 α_y 分别为 x 和 y 方向上高斯强度 $1/e^2$ 点的远场发散角; G_x 和 G_y 分别是 x 和 y 方向上的“超级高斯因子”,其值为 1 时,是典型的高斯分布。

多数半导体激光器制造商将激光强度为中心强度一半时的角度(半峰全宽角 θ_{FWHM}) 定义为远场发散角。于是有:

$$I\left(\frac{1}{2}\theta_{FWHM}, 0\right) = \frac{1}{2}I_0 \quad (2)$$

则有:

$$\alpha_x = \frac{\theta_{FWHM}}{\sqrt{2\ln 2}} = 0.8493\theta_{FWHM} \quad (3)$$

由于 LD 远场强度分布呈椭圆高斯型,必须经光学系统的整形后才能实际应用。

2 LD 整形匀光系统的设计

2.1 准直圆化整形镜的设计

由于慢轴方向的光束质量很差,半导体激光器不易通过组合透镜法整形为高斯分布的圆光斑,本部分设计针对的是现有的慢轴方向光束为基模高斯分布的单模 LD 产品。设计中采用的 LD 发光波长

为 780nm,发光区面积 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$,慢轴(x)方向的发散角 $\theta_{//} = 10^\circ$,快轴(y)方向的发散角 $\theta_{\perp} = 30^\circ$ (半峰全宽)。由(3)式可得 $\alpha_x = 8.49^\circ$, $\alpha_y = 25.47^\circ$ 。在 ZEMAX 设计中,光源选择 source diode,发光管光强分布的“超级高斯因子”为 1。

首先采用非球面镜实现 LD 快慢轴光束的准直,由于快轴方向的发散角较大,为了得到良好的准直效果,非球面镜应采用较大相对孔径的透镜。设计中选用了透镜库中 GELTECH 公司的型号为 350330 的非球面镜,玻璃型号 C0550。然后利用倒置柱面镜望远系统对慢轴方向进行扩束,得到高斯圆光斑。扩束系统采用的是伽利略式倒置望远系统,结构更加紧凑,适用于大功率系统。倒置伽利略望远镜是由两个凹凸透镜按光学间隔 $\Delta = 0$ 的方式组合而成。垂轴放大率:

$$\beta = -\frac{f_2'}{f_1'} = \frac{D'}{D} \quad (4)$$

式中, f_1' 为凹透镜的焦距, f_2' 为凸透镜的焦距, D 为

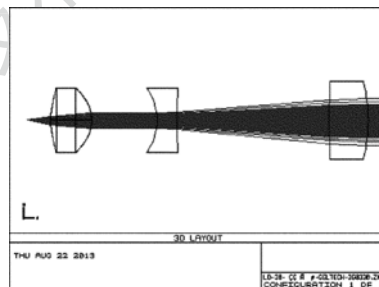


Fig. 1 Layout of collimation and rounding system

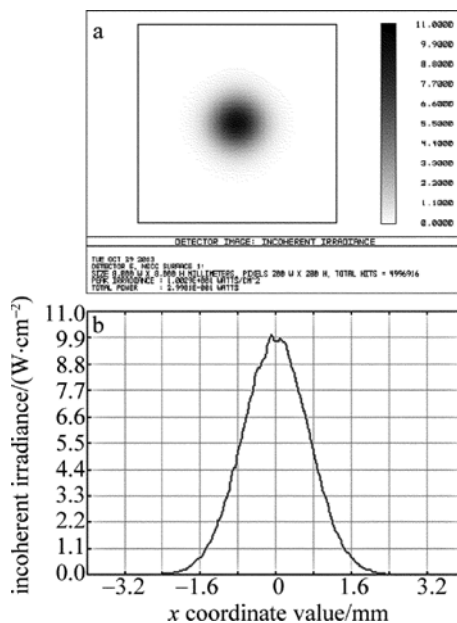


Fig. 2 Energy distribution of beam after shaping
a—spot pattern b—energy profile

入瞳直径, D' 为出瞳直径。柱面镜选用的面型为 Toroidal lens。图 1 为 LD 准直圆化结构图。

图 2 为 LD 准直整形后得到的圆光斑图样, 近似服从高斯能量分布, 束腰半径约为 1.4mm。x 方向的远场发散角:

$$\alpha_x = \frac{w_{x_2} - w_{x_1}}{z_2 - z_1} \quad (5)$$

式中, w_{x_1} 为光束传输到 z_1 处的束腰半径; w_{x_2} 为光束在 z_2 处的束腰半径。可得 $\alpha_x = 0.4\text{mrad}$, 准直效果很好。

2.2 匀光透镜组的设计

经过准直整形后, 光场空间分布近似服从基模高斯分布, 可表示为如下形式:

$$I_0 = \frac{c}{w^2(z)} \exp\left[-2 \frac{x^2 + y^2}{w^2(z)}\right] \times \exp\left\{-2i\left[k\left(z + \frac{x^2 + y^2}{2R}\right) - \arctan \frac{z}{f}\right]\right\} \quad (6)$$

式中, c 为常数因子, $w(z)$ 为 z 处的光斑半径, k 为波数, R 为波阵面半径, f 为共焦参量。 $z=0$ 处, 光斑束半径为 w 。

设光斑半径为 b , 将光斑沿径向均匀分成 M 等份, 则第 N 个等份内包含的总功率为:

$$P(N) = \int_0^{\frac{Nb}{M}} \frac{c}{w^2} \exp\left(-2 \frac{r^2}{w^2}\right) \times 2\pi r dr \quad (7)$$

第 N 个环形光圈中包含的功率为:

$$P_N = P(N, z) - P(N-1, z) = \frac{\pi c}{2} \left\{ \exp\left[-\frac{2u(N-1)^2}{M^2}\right] - \exp\left(-\frac{2uN^2}{M^2}\right) \right\} \quad (8)$$

式中, $u = b^2/w^2$ 。将每个环内所包含的功率均匀的投影到像面上, 设第一等份投影的半径 $R_1 = a$, 则有:

$$\frac{P_N}{\pi(R_N^2 - R_{N-1}^2)} = \frac{P_1}{\pi a^2} \quad (9)$$

可得出第 N 个光环的投影半径为:

$$R_N = \sqrt{\frac{\left\{ \exp\left[-\frac{2u(N-1)^2}{M^2}\right] - \exp\left(-\frac{2uN^2}{M^2}\right) \right\}^2 a^2}{1 - \exp\left(-\frac{2u}{M^2}\right)}} + R_{N-1}^2 \quad (10)$$

由(10)式可知, 可计算出像面上功率密度均匀分布时, 入射高斯光束的坐标与像面上位置坐标的对应关系。第一等份投影半径的大小决定了匀光后光斑的大小。

在 ZEMAX 序列模式下, 采用了两个偶次非球面镜, 选定第一面非球面镜的初始结构后, 使用“REAY”操作数, 控制不同孔径高处真实光线的偏转, 通过调控权重进行优化, 实现能量的均匀分布。在该位置放置第二面非球面镜, 同时使用“REAY”和“REAC”操作数, 保证匀化光束的准直射出, 在某一位置实现最佳能量匀化效果, 且在较长距离范围内均有匀化效果。

该系统中影响非球面镜结构的参量包括高斯光束的束腰半径、均分份数、匀化后的光斑大小及最佳位置选取、透镜的初始结构(含玻璃类型)及优化操作数权重。由于并无接近的结构作为初始结构, 又加上操作数繁多, 优化中使用了 ZEMAX 的宏编程语言, 设置系统参量和批量添加操作数, 大大提高了效率。

LD 整形得到的高斯光斑束腰半径为 1.4mm, 选择匀化后的光斑半径为 3mm, 实现匀化的位置离第二面非球面镜距离为 50mm。采用了伽利略式非球面透镜组合, 为一平凹非球面镜和一平凸非球面镜, 凹凸面的面型参量见表 1, 玻璃选择的是常用的 BK7。

Table 1 Optimized parameters of aspheric lenses

radius/mm	4.053	10.962
thickness/mm	3	3
conic	-4.526	-2.268
$\alpha_4/10^{-4}$	-93.81	-1.720
$\alpha_6/10^{-6}$	1263	-7.662
$\alpha_8/10^{-7}$	-1098	-1.500
$\alpha_{10}/10^{-8}$	442.4	-3.086

图 3 为非序列性(non-sequential)模式下, 不同位置的探测器接收到的能量分布情况, 依次离第 2 面非球面镜距离 L 为 40mm, 50mm 和 60mm, 其中图 3b 为设计的能量匀化位置。从图中可以明显地看出光强分布的变化趋势, 在设计的匀化位置前, 平均

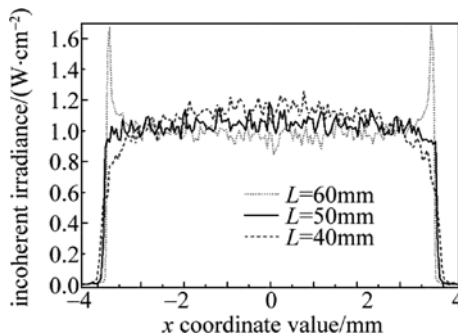


Fig. 3 Energy profile under non-sequential raytracing

光强高,边缘光强低;匀化位置后,平均光强低,边缘光强增大迅速。这是由于匀化光斑大于高斯光斑,光线经透镜向外偏转,传输过程中存在一定程度发散。

2.3 LD 整形匀光设计结果及讨论

图 4 为 LD 整形匀光系统在非序列模式中的光线追迹图,第 1 面非球面镜实现快慢轴的准直;第 2 面和第 3 面均为柱面镜,组成倒置望远系统对慢轴光束扩束,得到一近似高斯光斑;第 4 和第 5 面透镜为非球面镜,实现匀光设计;第 6 面为探测器,探测面上的能量分布。

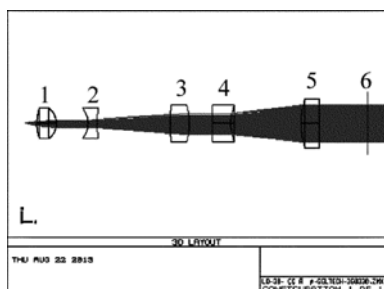


Fig. 4 Layout of shaping and homogenization system

图 5 为 LD 整形匀光后在 $L = 50\text{mm}$ 处得到的最佳匀化效果,图 6 为该位置在 x 方向的光强分布情况。根据能量均匀度的计算公式:

$$\gamma = 1 - \frac{\sum |E_i - \bar{E}|}{n \cdot \bar{E}} \quad (11)$$

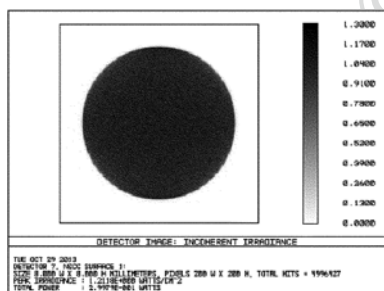


Fig. 5 Spot pattern after shaping and homogenization

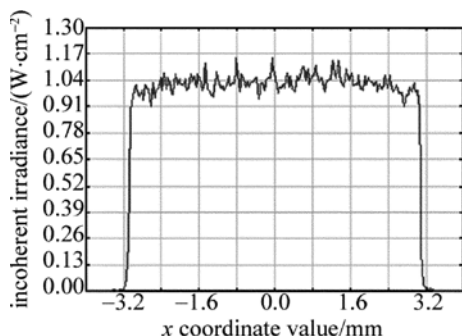


Fig. 6 Energy profile on x axis

式中, E_i 为采样点数值, \bar{E} 为采样平均值, n 为采样点个数。能量均匀度反映了截面内的整体光强对平均光强的偏离程度,其值越大,表明能量分布越均匀。LD 匀光后的能量变化趋势仍如图 3 所示,均化截面有一个动态的变化范围。图 7 反映了动态范围内的能量均匀度情况,均匀截面的动态范围大,在 10mm 范围内能量均匀度可达 95% 以上。从图中可以看出,最大能量均匀度在匀光透镜组的设计位置之后,在该位置处边缘光强开始增大,但并未对均匀度造成很大影响;光束经两个非球面镜匀光准直后仍有点发散,中间区域向外发散程度小,能量相对均匀。设计的匀化位置后,由于边缘光强过高,大多应用中应避免。

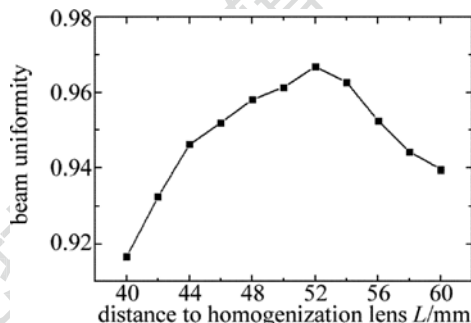


Fig. 7 Uniformity variation in a dynamic range

设计中发现,LD 整形得到的近似高斯分布的圆光斑,当实际束腰半径与匀光透镜组预设的束腰半径大小有一定出入时,仍能在某一位置得到效果很好的匀光分布,只是与匀光透镜组设计的最佳位置有偏移。当 LD 慢轴方向近似高斯能量分布时,也可得到较好的匀光效果。综上所述,该匀光设计效果理想,且装调方便。

3 光纤耦合模块的匀光设计

由于半导体激光器的直接应用受到限制,采用光纤耦合技术改善远场对称性、获得更高功率输出,已经进行了大量的研究^[10],并且大功率半导体激光器的光纤耦合模块已经商品化。工业应用中,大功率半导体激光器能量均匀化有重大需求,其中塑料焊接是一典型的应用。

设计中采用 nLIGHT 公司 Pearl 系列的大功率半导体激光器光纤耦合模块,纤芯直径 $200\mu\text{m}$,能量近似高斯分布,波长 940nm ,功率 50W ,选择匀化后光斑直径为 3mm 。将光纤耦合模块输出的光束准直扩束,得到光斑直径 1.6mm ,然后再进行匀化处理,满足塑料焊接中的某些能量高匀化要求。

Table 2 Optimized parameters of aspheric lenses

radius/mm	thickness/mm	conic	$\alpha_2/10^{-3}$	$\alpha_4/10^{-3}$	$\alpha_6/10^{-3}$	$\alpha_8/10^{-5}$	$\alpha_{10}/10^{-5}$
9.373	2	-43.717	-4.577	-17	7.004	-182.7	22.02
32.065	2	-68.758	3.054	-0.2481	-0.1302	-0.126	-1.232

非球面镜选型仍为伽利略式,凹凸两面的面型参量见表 2,选用模压玻璃非球面透镜,玻璃为 D-ZK3。超精密模具的加工技术已经比较成熟,可以制造出各种形状的高精非球面镜,与计算机数字控制机床 (computer numerical control, CNC) 抛光非球面透镜相比,制作容易,且可批量生产。

图 8 为匀化后得到的最佳效果,能量均匀度为 96%,能够满足对能量均匀性要求比较高的工业应用。

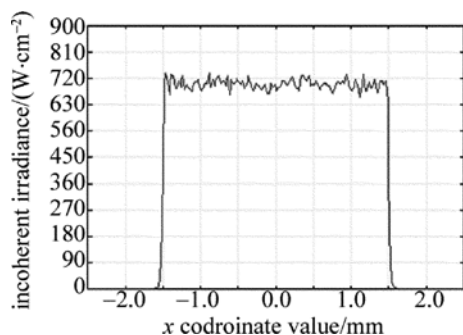


Fig. 8 Energy profile on x axis after shaping and homogenization for the best result

4 结 论

作者针对 LD 大发散角、椭圆高斯分布的特性,在 ZEMAX 中设计了一套光束整形匀光系统,并编写了相应的宏语言程序,提高了优化效率。模拟结果表明,在非序列模式下,最佳位置的能量均匀度可达 96% 以上,且在较长范围内均有匀光效果。

现今,非球面镜的加工技术已经比较成熟,CNC 抛光非球面透镜和模压玻璃非球面透镜均得到广泛应用,大大提高了非球面整形系统的实际应用价值。该研究为能量均匀化的半导体激光器在激光照明、

材料加工、医疗等领域的广泛应用,提供了有效途径。随着半导体激光器光束质量及功率的不断提高,该匀光系统有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] SHANGGUAN W P. Study on the system of beam shaping for high-power laser diode array [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011:14-38 (in Chinese).
- [2] HUANG W, WEI H Y, LI Y. Effect of relative position error in microlens arrays pair on beam homogenization [J]. Laser Technology, 2013, 37(1):11-15 (in Chinese).
- [3] XIONG Y. Research of homogenizing technology for diode laser beam based on kaleidoscope [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012:1-5 (in Chinese).
- [4] BONORA S. Compact beam-shaping system for high-power semiconductor laser bars [J]. Journal of Optics, 2007, A9(4):380-386.
- [5] CHEN G, ZHAO Ch M, JI R Y, et al. Simulation design of semiconductor laser collimation based on ZEMAX[J]. Laser Technology, 2012, 36(3):318-321 (in Chinese).
- [6] CHEN K, LI P X, CHEN M, et al. Design and analysis of aspheric lenses system converting Gaussian beam to flat-top beam [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011(3):54-58 (in Chinese).
- [7] FAN Z M, LI Z, QIAN L X. Aspherical lens laser beam shaping system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(2):353-357 (in Chinese).
- [8] FENG K, LI J S. Design of aspherics lenses shaping system on Gaussian beam [J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(5):127-132 (in Chinese).
- [9] FRIEDEN B R. Lossless conversion of a plane laser wave to a plane wave of uniform irradiance [J]. Applied Optics, 1965, 4(11):1400-1403.
- [10] ZHU H B. Study on high power single emitter diode laser combination and fiber coupling[D]. Changchun:Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012:1-13 (in Chinese).