

文章编号:1004-4213(2011)11-1718-5

基于像散与理想光源成像原理的高亮度半导体激光器光纤耦合设计方法

欧翔¹,熊玲玲²,张普²,丁晓尘¹,贾书海¹,刘兴胜^{2,3}

(1 西安交通大学 理学院,西安 710049)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室,西安 710119)

(3 西安炬光科技有限公司,西安 710119)

摘要:运用像散原理和理想光源成像原理,讨论了半导体激光器消像散设计.提出了一种基于消像散的高亮度半导体激光器光纤耦合系统的设计方法.以波长为 808 nm,输出功率为 10 W 的半导体激光器的光纤耦合为例,给出了详细的计算方法和设计步骤.结果表明:采用该方法将半导体激光器光束耦合入数值孔径为 0.22,芯径为 50 μm 的光纤中,耦合后输出功率为 9.712 W,耦合效率为 97.12%,功率密度为 $1.1224 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$.该方法不仅原理简单,而且设计的耦合系统耦合效率高、体积小,具有较强的实用价值.

关键词:半导体激光器;消像散;成像;光纤耦合
中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

doi:10.3788/gzxb20114011.1718

0 引言

半导体激光器具有体积小、可靠性高、使用寿命长等优点.随着应用需求和整形技术的提高,高亮度半导体激光器的应用越来越广泛,如作为光纤激光器泵浦源,或直接作为光源应用于激光医疗、打标和雕刻等领域^[1-7].由于单管半导体激光器快轴的发光区厚度为 1 μm ,慢轴方向发光区宽度为 100~200 μm ,对于它的耦合主要采用在快轴增加准直透镜后进行光纤耦合,能够得到输出功率为 5~8 W,光纤芯径为 100~200 μm 的光纤耦合激光输出,输出光亮度约为 10^4 W/cm^2 ^[8-10].这种方法简单、体积小,然而要使激光器耦合入更小芯径的光纤中,该方法非常困难.为了提高亮度,采用多单管合束可以将耦合功率提高到数十瓦.如采用三个单管可以实现 30~40 W,100 μm 的光纤耦合输出,输出光亮度达到 $9.55 \times 10^4 \text{ W/cm}^2 \sim 1.27 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ ^[11-12].与前一种方法相比这种方法激光器体积大、成本高.

为了进一步提高耦合亮度、减小耦合系统的体积,本文基于像散原理和理想成像原理,提出了一种高亮度光纤耦合系统的设计方法.通过计算和分析得到耦合系统参量设计方程,给出计算系统参量的

流程,并采用几何算法得到主要参量,在 ZEMAX 软件中进行光学系统优化设计.以波长为 808 nm,输出功率为 10 W 的半导体激光器的光纤耦合为例对设计方法做了详细的说明.采用本办法能将半导体激光器光束耦合入数值孔径为 0.22,芯径为 50 μm 的光纤中,耦合后输出功率为 9.712 W,耦合效率为 97.12%,功率密度为 $1.1224 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$.该方法不仅原理简单,而且设计的耦合系统耦合效率高、体积小,具有较强的实用价值.

1 耦合系统设计方法

该耦合系统主要由消像散系统和成像系统组成,如图 1.其中消像散系统可以消除半导体激光器的固有像散,同时减小快轴方向的发散角,使得消像散后的半导体激光器光束满足理想点光源的傍轴成像条件,然后采用设计的成像系统使得半导体激光束能够耦合入 $NA=0.22$,光纤芯径 $R=50 \mu\text{m}$ 的光纤中.因此设计有效的半导体激光器消像散系统

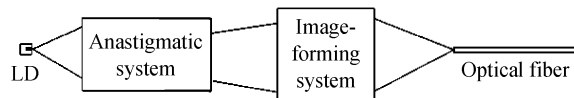


图 1 光纤耦合系统示意
Fig. 1 Schematic diagram of optical fiber coupling

基金项目:中科院重大知识创新项目(No. Y024H91213)资助

第一作者:欧翔(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向为半导体激光器光学整形. Email: aouxiaang@126.com

导师(通讯作者):贾书海(1969-),男,教授,主要研究方向为光学测量. Email: shjia@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期:2011-05-23;修回日期:2011-08-15

是整个耦合系统的关键。

1.1 消像散方法的理论分析

图 2 为半导体激光器像散示意图, X、Y、Z 分别为半导体激光器慢轴、快轴和光束传播的方向, θ_f 为快轴发散角, θ_s 为慢轴发散角, Δf 为激光器固有像散。有两种消除系统像散的办法: 一是使用一个透镜, 仅消除快轴方向的像散, 使得快轴出射光束的反向延长线与光轴的交点正好位于慢轴的虚拟发光点上; 二是对快慢轴分别使用透镜, 同时消除快慢轴的像散, 使得两轴出射光束的反向延长线与光轴的交点位于慢轴虚拟发光点之后。本文将对这两种方法进行分析讨论。

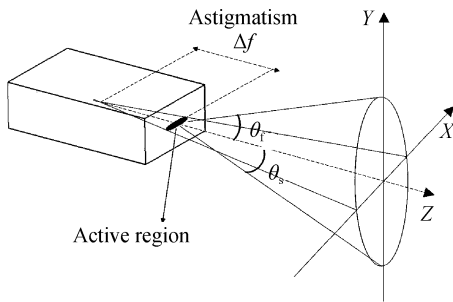


图 2 半导体激光器像散示意
Fig. 2 Astigmatism of a semiconductor laser

1.2 第一种消像散方法

图 3 为快轴消像散示意图, Y、Z 分别为半导体激光器快轴和光束传播的方向, L 为一薄透镜, 与原点 O 点的距离是 s_{11} , 快轴光线的发散为角 θ_1 , 出射光束的反向延长线交光轴于慢轴虚拟发光点 A 点, 即 $AO = \Delta f$, 透镜与 A 点之间的距离为 $s_{12} = s_{11} + \Delta f$, 设光线出射后倾角变为 θ_2 , 光束在透镜上最大高度为 h , 将透镜置于空气之中, 透镜的焦距为 f_{11} 。

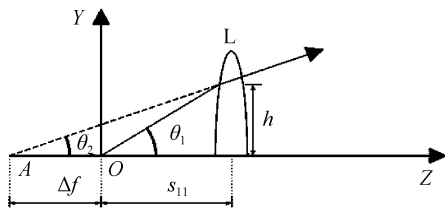


图 3 快轴消像散示意图
Fig. 3 Anastigmatic lens of fast axis

利用薄透镜成像公式及三角关系可得

$$\tan \theta_2 = \frac{h}{s_{12}} = \frac{(f_{11} - s_{11}) \tan \theta_1}{f_{11}} \quad (1)$$

$$\Delta f = s_{12} - s_{11} = \frac{s_{11}^2}{f_{11} - s_{11}} \quad (2)$$

对于半导体激光器而言, 通常其慢轴发光区为 $100 \sim 200 \mu\text{m}$, 本文选取慢轴发光区为 $100 \mu\text{m}$, 发散半角为 5° , 计算出像散值 $\Delta f = 0.57 \text{ mm}$; 快轴方向发散角 $\theta_1 = 35^\circ$, 则确定快轴消像散透镜参量的方程为

$$s_{11}^2 / (f_{11} - s_{11}) = 0.57 \quad (3)$$

在消像散的同时, 还应该考虑压缩快轴边缘光线的发散角

$$\tan \theta_2 = \frac{(f_{11} - s_{11}) \tan 35^\circ}{f_{11}} \quad (4)$$

为使得快慢轴发散角趋于等同, 保证点光源成像的顺利进行, 设置判定条件快轴方向出射光束发散角 $\theta_2 \leq 5^\circ$ 。由式 (3) 和 (4) 计算可得, 此时 $s_{11} \leq 0.0815 \text{ mm}$, 显然透镜距离发光端面过近, 不切合实际; 如果增大发散角度的值, 可以使得 s_{11} 的值满足实际要求 ($s_{11} \geq 0.2 \text{ mm}$), 但是此时的发散角过大 ($\theta_2 \geq 15.12^\circ$), 会限制对激光束的成像, 影响耦合效率。

此种方法虽然能够消除激光器固有像散, 但是由于透镜距发光端面的距离与出射光束的发散角不能同时达到实际要求, 因此本文考虑对快慢轴同时消像散的方法。

1.3 第二种消像散方法

图 4 为快慢轴同时消像散示意图, X、Y、Z 分别为半导体激光器慢轴、快轴和光束传播的方向, L_1 为快轴消像散薄透镜, L_2 为慢轴消像散薄透镜, 均置于空气中, 其焦距分别为 f_1 、 f_2 。激光器固有像散为 Δf , 其中快慢轴消像散透镜距发光端面距离为分别 s_1 、 s_2 , 快慢轴发散角分别为 θ_f 、 θ_s , 消像散后发散角分别为 θ_{\perp} 、 θ_{\parallel} , 出射光束的反向延长线分别交光轴于 A_1 、 A_2 点, 消像散距离分别为 Δd_1 、 Δd_2 。

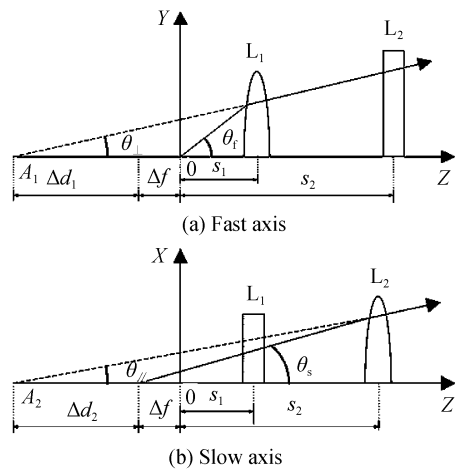


图 4 快慢轴同时消像散示意
Fig. 4 Anastigmatic lens of fast and slow axis

设快慢轴消像散后发散角的角度差为 $\Delta\theta$, 快慢轴消像散距离差为 Δd , 根据高斯公式以及三角关系, 可以得出

$$\Delta\theta = \theta_{\perp} - \theta_{\parallel} = \arctan \left[\left(1 - \frac{s_1}{f_1}\right) \tan \theta_f \right] - \arctan \left[\left(1 - \frac{s_2}{f_2}\right) \tan \theta_s \right] \quad (5)$$

$$\Delta d = \Delta d_1 - \Delta d_2 = \frac{s_1^2}{f_1 - s_1} - \frac{s_2^2}{f_2 - s_2} \quad (6)$$

由于式(5)和(6)包含有4个未知参量,不能直接求解出 $\Delta\theta$ 与 Δd ,需要采用局部优化的方法,通过数值求解确定最优解.由于半导体激光器快轴发散角很大,必须减小快轴消像散透镜与发光端面距离,否则就会加大出射光束的宽度,增大快轴消像散透镜的尺寸,从而使得整个耦合系统体积变大,质量增加,因此添加初始条件 $0.1\text{ mm} < s_1 < 0.4\text{ mm}$ 和 $0.1\text{ mm} < f_1 \leq 0.4\text{ mm}$.同时为保证消像散效果,使得快慢轴消像散距离与发散角度趋于相等,对于两式的解设定判定条件 $\Delta d = \Delta d_1 - \Delta d_2 \leq 0.05\text{ mm}$ 和 $\Delta\theta = \theta_{\perp} - \theta_{//} \leq 0.1^{\circ}$ 且 $\theta_{//}$ 、 θ_{\perp} 均小于 3.5° .

图5为参量求解流程图.其步骤为:在初始条件中任取 s_1 和 f_1 的值,代入式(5)和(6)中计算,得到一系列的解并反解出 s_2 和 f_2 的值;然后判定其是否满足预设条件,如果不满足则重新取值计算,反之则输出数值解;最后确定出理想的快慢轴消像散薄透镜的焦距为 $f_1 = 0.2162\text{ mm}$ 、 $f_2 = 7\text{ mm}$ 和距发光端面的距离为 $s_1 = 0.2\text{ mm}$ 、 $s_2 = 2.8\text{ mm}$.由于这是在理想薄透镜的条件下得到的数值解,因此在实际设计中需要根据所选用的透镜,做出适当的调整.

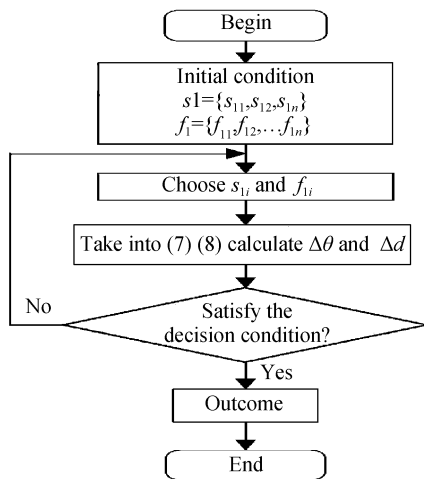


图5 参量取值流程

Fig. 5 Flow diagram of the parameters

2 ZEMAX 模拟

基于上述方法,本文以波长为 808 nm ,输出功率为 10 W 的半导体激光器的光纤耦合为例,采用Zemax软件对激光器的消像散系统和成像系统进行设计和优化,实现了 $NA = 0.22$,光纤芯径 $R = 50\text{ }\mu\text{m}$ 的光纤耦合半导体激光输出.由于选用的透镜厚度较小,在实际加工中会给透镜镀上增透率达99%以上的增透膜,因此忽略了系统的光能损失,设定消像散透镜和成像透镜的传光效率为100%.半导体激光器慢轴方向发散半角为 5° ,快轴方向发散半角

为 35° ,慢轴发光区为 $100\text{ }\mu\text{m}$,快轴发光区为 $1\text{ }\mu\text{m}$.

2.1 消像散透镜设计

模拟中选用圆柱透镜作为快轴消像散透镜,选用D型透镜作为慢轴消像散透镜.根据理论计算结果,结合所选透镜,设计出两种透镜的具体参量如表1.

表1 消像散透镜的具体参量(单位:mm)

Table 1 Parameters of the anastigmatic lens(units:mm)

(a) Parameters of the fast axis anastigmatic lens	
Comment	Anastigmatic lens of fast axis
Object type	Cylinder volume
Material	NA0
Z position	0.245
Front R	0.2
Z length	3
Back R	0.2
(b) Parameters of the slow axis anastigmatic lens	
Comment	Anastigmatic lens of slow axis
Object type	Toroidal lens
Material	K9
Z position	1.45
Radius height	0.25
X half-Width	0.25
Thickness	0.5
Radius1	0
Radius1	-2.5
Thickness	0.5

经ZEMAX模拟,得出激光器消像散前后光斑情况.图6为距离激光器 5 mm 处,探测板规格为 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 时的消像散前后光斑对比图.图6(a)为未消像散时的光斑图,图6(b)为消像散后的光斑图.可以发现消像散后光斑尺寸大为缩小.

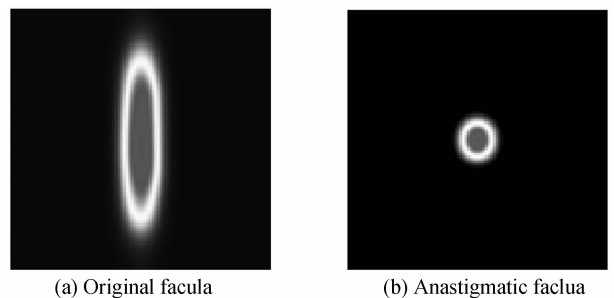


图6 消像散后光斑对比图

Fig. 6 Comparison charts after eliminating astigmatism

消像散前与消像散后参量的理论值与模拟值对比如表2,其中、分别表示快慢轴的发散半角.

表2 消像散后部分参量变化情况

Table 2 Some parameters after astigmatic changes

	$\theta_{fast}/(^{\circ})$	$\theta_{slow}/(^{\circ})$	$\Delta d_1/\text{mm}$	$\Delta d_2/\text{mm}$
Original value	35	5	0	-0.57
Theoretical value	3.006	3.005	-1.89	-1.866
Analog value	3.02	3.10	-1.71	-1.69

由表2可知,尽管像散值的理论计算与模拟测试值有所出入,但是两者均达到了消除像散($\Delta d = \Delta d_1 - \Delta d_2 \approx 0\text{ mm}$),压缩角度($\theta_{\perp} \approx \theta_{//} \approx 3^{\circ}$)的效

果,这说明透镜参量的设计是符合消像散要求的.由于理论计算是基于理想的物理模型计算得来的,而模拟中的透镜参量则是做了诸多近似处理得来的,因此两者数值上产生了微小的差异.

2.2 成像透镜设计

根据已有的消像散透镜参量,利用点光源成像原理设计出两个成像透镜 Lens 1 和 Lens 2 的主要参量如表 3.

表 3 成像透镜的主要参量(单位:mm)

Table 3 The main parameters of the image-forming system(units:mm)

Comment	Lens 1	Lens 2
Object type	Standard lens	Standard lens
Material	K9	K9
Z position	43.6	58.726 473
Radius1	20.72	9.23
Radius2	-23.17	11.02
Thickness	3.9	7.12

图 7 为消像散光束经过成像透镜聚焦后所得的光谱图.通过积分计算得到 90%能量宽度的光斑尺寸为 $29\ \mu\text{m} \times 49\ \mu\text{m}$,数值孔径为 0.21,完全符合光纤芯径为 $50\ \mu\text{m}$ 和数值孔径为 0.22 的光纤耦合.

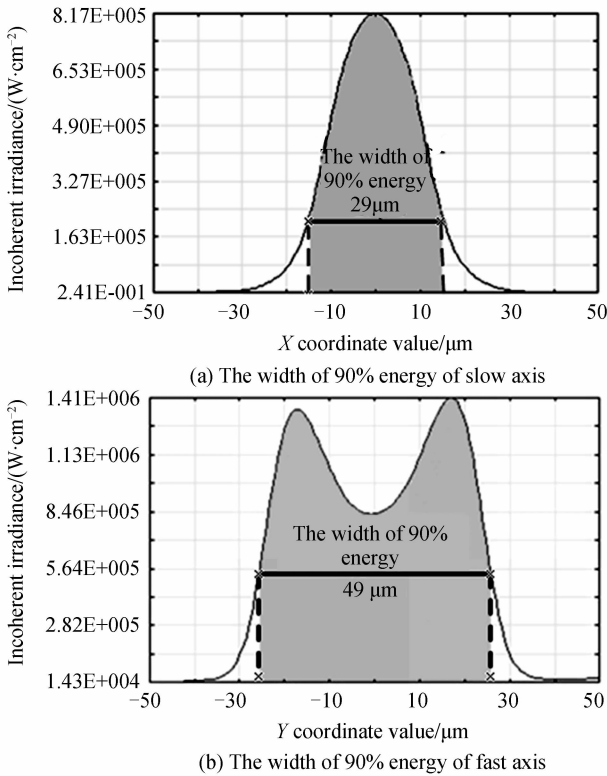


图 7 成像后光斑图
Fig. 7 Light spot after imaging

2.3 耦合结果

图 8 为整个耦合系统设计图.它主要包含消像散和成像两个部分.光学系统中光源与各个元件的相对位置如图 9,该系统可以将出射光束耦合入数值孔径为 0.22、芯径为 $50\ \mu\text{m}$ 的光纤中.

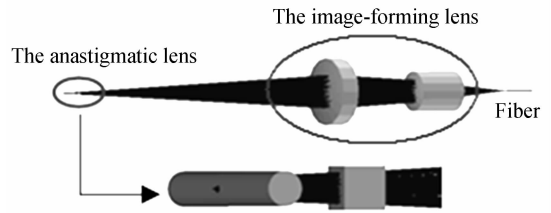


图 8 耦合系统设计图
Fig. 8 The design diagram of fiber coupling system

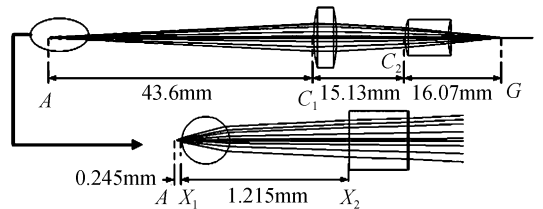


图 9 耦合系统位置图
Fig. 9 The position diagram of fiber coupling system

图 10(a)是半导体激光束耦合入 $50\ \mu\text{m}$ 光纤后在 $0.06\ \text{mm} \times 0.06\ \text{mm}$ 探测板上得到的光斑情况,图 10(b)、(c)是快慢轴的光强分布图.在激光器总功率为 10 W 的情况下,探测功率为 9.712 W,耦合

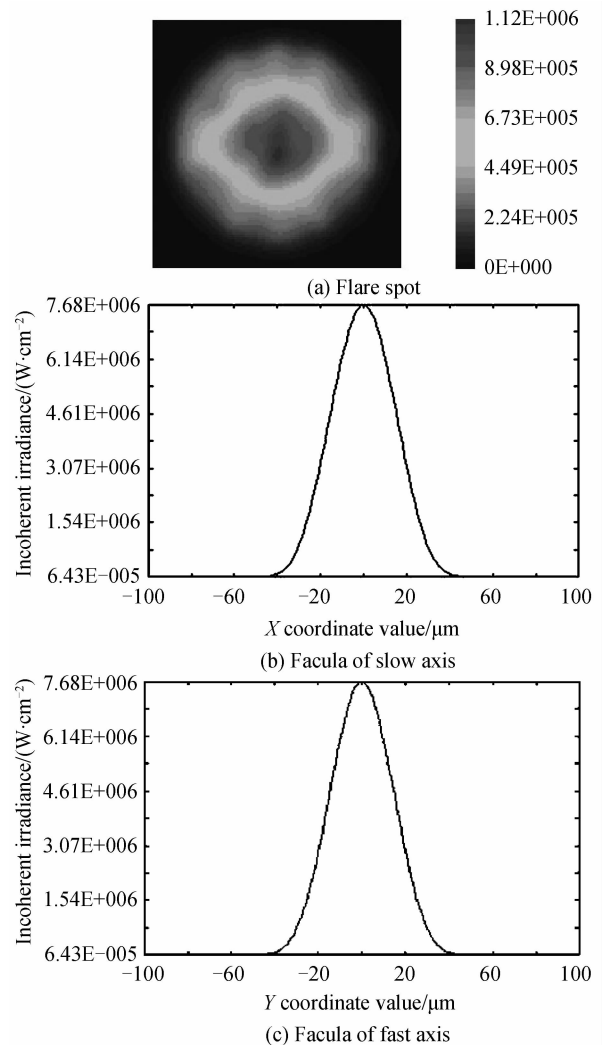


图 10 耦合后光斑图
Fig. 10 Facula after fiber coupling

效率为 97.12%，功率密度为 $1.1224 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 。

3 结论

本文运用像散原理和理想光源成像原理,详细讨论了半导体激光器消像散设计并提出了基于消像散的一种高亮度半导体激光器光纤耦合系统的设计方法,给出了详细的计算方法和设计步骤.利用该耦合系统在 ZEMAX 光学软件中模拟了波长为 808 nm,输出功率为 10 W 的半导体激光器光纤耦合.采用本方法能将半导体激光束耦合入数值孔径为 0.22,芯径为 50 μm 的光纤中,耦合后输出功率为 9.712 W,耦合效率为 97.12%,功率密度为 $1.1224 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$.整个系统不仅具有耦合效率高、设计原理简单和体积小等优点,而且能够实现小芯径、低数值孔径、高亮度的光纤耦合半导体激光输出,具有较强的实用价值.下一步本课题组将通过实验来验证此设计.

参考文献

- [1] GAO Xin, BO BAo-xue, QIAO Zhong-liang, *et al.* Single fiber coupling of multi-liner-array-diode-lasers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1229-1235.
高欣, 薄报学, 乔忠良, 等. 多线阵半导体激光器的单光纤耦合输出[J]. 光子学报, 2010, **39**(7): 1229-1235.
- [2] SHI Fei-fei. The historical status and its application of semiconductor laser[J]. *Public Communication of Science & Technology*, 2010, **23**(14): 152.
石飞飞. 半导体激光器的历史状况及应用[J]. 科技传播, 2010, **23**(14): 152.
- [3] XIONG Ling-ling. Beam shaping of semiconductor laser array [D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2006.
- 熊玲玲. 半导体激光二极管阵列的光束整形[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2006.
- [4] ZHOU Chong-xi, LIU Yin-hui, XIE Wei-min, *et al.* Analysis and design of fiber coupled high-power laser diode array[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2004, **31**(11): 1296-1300.
周崇喜, 刘银辉, 谢伟民, 等. 大功率半导体激光器阵列光束光纤耦合研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(11): 1296-1300.
- [5] MA Xiao-yu, WANG Jun, LIU Su-ping. Present situation of investigations and applications in high power semiconductor lasers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(2): 189-195.
马晓宇, 王俊, 刘素平. 国内大功率半导体激光器研究及应用现状[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(2): 189-195.
- [6] NIU Gang, FAN Zhong-wei, WANG Pei-feng, *et al.* A single fiber coupling technique for high power diode laser arrays[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2007, **28**(10): 1607-1610.
牛岗, 樊仲维, 王培峰, 等. 大功率半导体激光阵列单光纤耦合技术[J]. 半导体学报, 2007, **28**(10): 1607-1610.
- [7] YUAN Shu, YANG Hua-jun, XIE Kang. Design of aspheric collimation system for semiconductor laser beam[J]. *Optik*, 2009, **121**(18): 1708-1711.
- [8] WANG P Y. Beam-shaping optics deliver high-power beam [J]. *Laser Focus World*, 2001, **37**(12): 115-118.
- [9] LUAN Kai. Study on fiber-coupler high power semiconductor laser module [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010.
栾凯. 高功率半导体激光器光纤耦合模块的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- [10] WANG Xia, OU-YANG Hong, LI Su. Coupling technology of LD and optical fiber [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2010, **35**(6): 26-32.
王侠, 欧阳竑, 李苏. 半导体激光二极管的光纤耦合技术[J]. 光电技术应用, 2010, **35**(6): 26-32.
- [11] <http://www.bwt-bj.com/index.asp>.
- [12] <http://www.dilas.com/pages/chinese.php>.

Design of High-brightness Fiber-coupled Diode Laser System Based on Astigmatism and Ideal Imaging Theories

OU Xiang¹, XIONG Ling-ling², ZHANG Pu², DING Xiao-chen¹, JIA Shu-hai¹, LIU Xing-sheng^{2,3}

(1 School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2 State Key Laboratory of Transient Optics & Photonics, Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(3 Xi'an Focuslight Technology Co., Ltd., Xi'an 710119, China)

Abstract: A high-brightness fiber-coupled diode laser system is designed, based on the principle of astigmatism and ideal light source imaging theory. As an example, details of the calculation methods and design steps of the fiber coupled laser diode are given whose wavelength is 808 nm and output power is 10 W. Semiconductor laser beam can be coupled into the 50 μm core diameter optical fiber with a numerical aperture of 0.22. It is found that this fiber-coupled system has an output power of 9.712 W, a coupling efficiency of 97.12% and a power density of $1.1224 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$. The proposed method is simple in principle, and the designed fiber-coupled system has high coupling efficiency, small size and strong practical value.

Key words: Semiconductor lasers; Anastigmat; Imaging; Fiber coupling