

基于光参数积的单管半导体激光器光束质量描述与评价

牛 奔 王宝华 郭渭荣 曲 研 王丽荣 赵亚平 刘燕楠 林学春*

中国科学院半导体研究所, 北京 100083

摘要 根据单管半导体激光器出射光束特点,分别采用 $1/e^2$ 、环围能量以及二阶矩定义描述光束束宽,在高斯光束近似下采用双曲线拟合法测算得到不同方法定义束宽时的光参数积(BPP),并与芯径为 $105\ \mu\text{m}$ 、数值孔径为0.2的光纤所能接受的最大BPP进行比较。对该单管半导体激光器进行光纤耦合,实验中单管半导体激光边模数量随注入电流的增大逐渐增多,光束质量的恶化导致其光纤耦合效率逐渐降低,当注入电流由1 A增大到13 A时,光纤耦合效率由96.5%降为88.8%。研究表明以二阶矩定义束宽半径测算光参数积BPP去描述与评价单管半导体激光器光束质量特征是最为准确合理的。

关键词 激光器; 半导体激光器; 单管; 光纤耦合; 光束质量; 光参数积; 二阶矩

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0202004

Description and Evaluation of Beam Quality of Single Emitter Diode Laser Based on Beam Parameter Product

Niu Ben Wang Baohua Guo Weirong Qu Yan Wang Lirong Zhao Yaping
Liu Yannan Lin Xuechun

Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract Considering characteristics of beam output from output single emitter diode laser, beam width is described using $1/e^2$ maximum, power in bucket and second moment. The beam parameter product (BPP) in various definitions based on the hyperbolic fitting method with approximation of Gaussian beam can be obtained. The calculated BPPs of the beam from a single emitter diode laser are compared with the BPP of fiber with core diameter of $105\ \mu\text{m}$ and numerical aperture of 0.2. The side mode increases gradually with increasing injection current, leading to deterioration of the beam quality, and reduces the coupling efficiency. As the injection current increases from 1 A to 13 A, the coupling efficiency decreases from 96.5% to 88.8%. Therefore, the beam width defined by the second moment is an accurate method for the description and evaluation the beam quality of single emitter diode laser based on BPP.

Key words laser; diode laser; single emitter; fiber coupled; beam quality; beam parameter product; second moment

OCIS codes 140.2020; 140.3325; 140.3510; 140.5960

1 引 言

近年来,随着激光工业加工以及光纤激光器的快速发展,大能量、高亮度光纤耦合输出半导体激光器受

收稿日期: 2014-08-12; 收到修改稿日期: 2014-09-16

基金项目:

作者简介: 牛 奔(1986—),男,硕士,助理研究员,主要从事高功率半导体激光器光纤耦合技术方面的研究。

E-mail: benn@semi.ac.cn

* 通讯联系人。E-mail: xclin@semi.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

到了越来越多的关注^[1-4]。单管半导体激光器的光束质量对其光纤耦合效率有直接的影响,国内外在高亮度单管半导体激光器的光纤耦合输出方面都开展了大量的研究。在工业用大能量、高亮度单管半导体激光器光纤耦合技术方面,NLight、JDSU 等公司一直处于世界领先水平^[5-6]。国内中国科学院长春精密机械与物理研究所以及长春理工大学等单位也开展了相关方面的研究,并取得了较好的成果^[7-8]。

通常采用光参数积(BPP)衡量半导体光束质量的好坏,BPP定义为激光束束腰半径与发散半角的乘积,光束经过无像差光学系统变换后,BPP保持不变^[9]。在半导体激光器光纤耦合系统设计分析时,考虑半导体激光单管出射光斑呈矩形且其远场分布也呈矩形,而光纤芯径及其数值孔径(NA)则呈轴对称分布,因此在进行半导体激光光纤耦合时,研究的焦点集中在半导体出射激光的光束质量与光纤能接受的光束质量的匹配上面^[3,10-12],而对半导体激光器出射光束本身BPP的精确描述方面研究较少。西安电子科技大学曾晓东课题组在半导体激光器光束质量描述与评价方面开展了一定的工作,提出使用 Q 因子、 $L \cdot \theta_y^2 \cdot A_s$ 值等方法描述与评价半导体激光器的光束质量^[13-15],着重关注半导体激光器的准直难易程度,并不适用于半导体激光器光纤耦合系统设计优化。半导体激光光束质量描述与评价的准确性,直接影响到光纤匹配计算结果,影响光纤参数的选择进而影响整个光纤耦合系统效率的高低。

采用BPP描述与评价半导体激光器的光束质量,由于叠阵和巴条半导体激光器是由单管半导体激光器排列组合而成,因此仅对单管半导体激光器展开讨论。根据单管半导体激光器出射光束特点及BPP的定义,采用 $1/e^2$ 、环围能量以及二阶矩定义描述单管出射光束的束宽,在高斯光束近似下采用双曲线拟合得到单管半导体激光器的BPP数值会有所不同,将该数值与芯径为 $105 \mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.2 光纤所能接收的最大BPP进行比较,光纤耦合实验结果表明,相较于其他束宽定义方法,采用二阶矩定义束宽描述单管半导体激光器的BPP的方法是最为准确的。

2 单管半导体激光光束质量描述与评价

单管半导体激光光束质量评价可分为两部分:一是激光光束质量稳定性,即光束质量随注入电流的变化情况;另一方面是由半导体激光器谐振腔及封装质量决定的光束质量,使用BPP进行描述。

光纤耦合传输系统的可靠性要求激光在很宽的电流和温度范围内具有高耦合效率,即要求激光器输出光束的光束质量具有较高的稳定性。单管半导体激光器由于谐振腔结构特点,其光束发散角会随着注入电流的增加逐渐变大,在慢轴方向上体现最为明显^[5-6]。

使用激光光斑分析仪采集激光器出射光斑,获取光斑束宽数据进行数值拟合可获得激光器的BPP。通常对圆对称分布基模高斯光束,常使用 $1/e^2$ 、86.5%环围能量和二阶矩定义光束束宽,并且不同定义得到的束宽是完全一致的^[16]。对于一维基模高斯光束,使用 $1/e^2$ 与使用二阶矩定义的束宽数值一致,但与95.45%的环围能量定义的束宽相对应^[17]。但对其他光束,用不同的定义可能会得到不同的结果,其中,以束宽的二阶矩定义在理论上最为严格^[16]。

单管半导体激光光束在快轴方向呈基模高斯分布^[12],可以直接使用一维基模高斯光束束宽的定义,其慢轴方向的光强呈超高斯分布,使用不同的束宽定义会拟合获得不同光束参数值。对于传统多模圆形光束,常引入所谓嵌入基模高斯光束,并定义包含总功率98%能量的环围圆半径作为等效光斑半径 ω_e 用于计算其光束质量^[18]。根据基模高斯光束功率密度分布为^[19]

$$I(r) = I_0 \exp(-2r^2/\omega_0^2), \quad (1)$$

式中 I_0 为基模高斯光束功率密度。当 $x = \omega_0$ 时为基模高斯光束定义的束宽,当 $x = 1.4\omega_0$ 时为包含光束光斑98%能量的束宽。等效束宽和基模高斯束宽定义下的BPP比值为

$$R_{\text{BPP}} = \frac{\omega_e \cdot \theta_e}{\omega_0 \cdot \theta_0} = 1.96. \quad (2)$$

(1)式等效束宽的计算是针对圆对称光斑进行二维积分获得的结果,而半导体激光器光斑为非圆对称分布,且慢轴方向积分计算只能按照一维方向进行,故在进行半导体激光光束质量评价时等效束宽定义的方法不甚适用。

考虑单管半导体激光器光强分布特点,拟采用严格的二阶矩束宽定义理论处理光斑束宽数据。在直角坐标系中,在 z 处 x 方向的束宽按二阶矩方法定义为

$$\omega_x = 4 \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x,y)(x-\bar{x})^2 dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x,y) dx dy}}, \quad (3)$$

其中

$$\bar{x} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x,y)x dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x,y) dx dy} \quad (4)$$

为光束能量重心在 x 方向的坐标。

LBA-FW-SCOR型激光光斑分析仪测量到的是离散的光强数据点,可以将对一定区域的积分变为对数据点的求和。对于 M 行 N 列的数据, x 方向二阶矩定义束宽(以像素为单位)为

$$\omega_{xp} = 4 \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I(m,n)(n-\bar{n})^2}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I(m,n)}}, \quad (5)$$

其中

$$\bar{n} = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I(m,n) \cdot n}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I(m,n)} \quad (6)$$

通过(6)式以及LBA-FW-SCOR型激光光斑分析仪像素尺寸,即可获得由二阶矩理论定义的光束的束宽数据,在高斯光束近似下可通过双曲线拟合法获得该单管半导体激光光束的BPP。

3 实验研究

实验中采用国内某公司生产的输出功率为12 W、波长为976 nm的单管半导体激光器,发光尺寸为 $90 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 。由于半导体激光器发散角较大,快轴方向为 $35^\circ \sim 70^\circ$,慢轴方向为 $8^\circ \sim 12^\circ$,要测量其光束质量需要先对其进行准直。测量其光束质量稳定性,单管出射光束分别经焦距为0.365 mm的快轴非球面柱透镜与焦距为6.4 mm的慢轴球面柱透镜准直,调节至最佳准直状态后,使用Spiricon公司的LBA-FW-SCOR型激光光斑分析仪获取距离发光端面50 mm处不同注入电流下的光斑图像,通过图像处理即可获得该处不同注入电流下激光束宽与归一化光强分布的关系曲线,如图1所示。

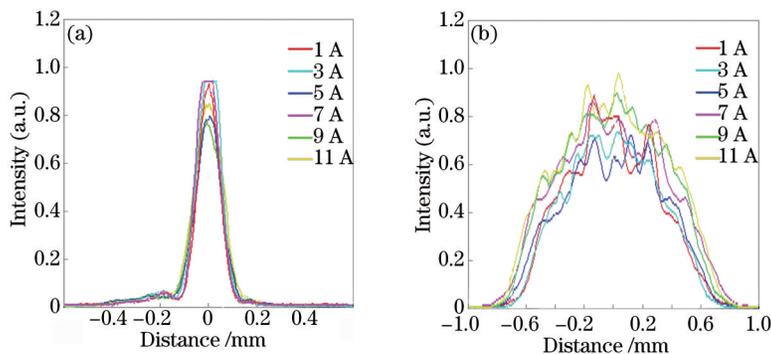


图1 不同注入电流时单管(a)快、(b)慢轴方向的束宽

Fig.1 Beam widths of (a) fast axis and (b) slow axis at difference currents

由图1可知,单管半导体激光器快轴方向光束能量呈高斯分布,光束束宽在注入电流增大时基本保持不变,其光束质量稳定性较好;慢轴方向的光束束宽随注入电流的增加而逐渐变宽,其光束质量随注入电流的

增大而逐渐退化。

根据光纤耦合理论可知,要将激光功率耦合进光纤中,激光光束必须同时满足以下条件^[11-18]

$$d_{in} < d_{core}, \quad (7)$$

$$\theta_{in} < \theta_{max} = 2 \arcsin(NA), \quad (8)$$

$$P_{laser} < \frac{d_{core} \cdot NA}{2}, \quad (9)$$

式中 d_{in} 、 θ_{in} 分别为入射光束的光斑直径和远场发散角全角, d_{core} 为耦合光纤芯径直径, θ_{max} 为光纤纤芯所能捕获的光束的最大入射角全角, NA 为耦合光纤数值孔径, P_{laser} 为激光束的BPP。

为方便起见,仅讨论一支单管半导体激光器光纤耦合的情况。为获得高亮度,单管半导体激光器光纤耦合时,普遍采用芯径为 105 μm 、数值孔径为 0.2 的光纤,即 $d_f=105 \mu\text{m}$, $\theta_f = 0.2 \text{ rad}$, 可得光纤的 BPP 为

$$P_f = \frac{d_f}{2} \cdot \theta_f = 10.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}. \quad (10)$$

在光纤耦合系统设计时,为保证耦合效率通常使通光孔径仅占光纤芯径的 90%,数值孔径也仅占光纤数值孔径的 90%,即

$$P'_f = \left(\frac{d_f}{2} \cdot 0.9 \right) \cdot (\theta_f \cdot 0.9) = 8.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}. \quad (11)$$

实验中单管半导体激光器经快、慢轴准直后在 13 A 注入电流下,使用 LBA-FW-SCOR 型激光光斑分析仪在距离发光端面 0~120 mm 范围内每隔 5 mm 取一次光斑图像,然后根据 $1/e^2$ 、95.45% 环围能量以及二阶矩方法定义获取快、慢轴方向束宽半径,分别如图 2 和图 3 所示

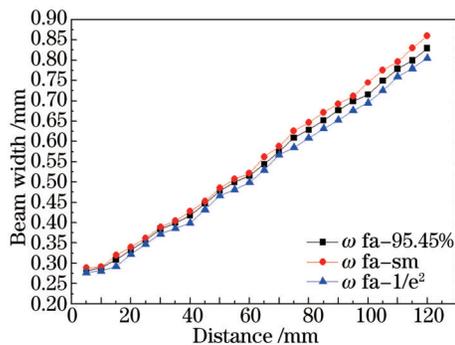


图 2 不同束宽定义下快轴方向束宽尺寸

Fig.2 Beam width of fast axis with different descriptions

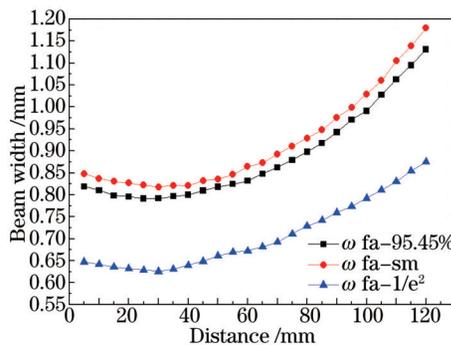


图 3 不同束宽定义下慢轴方向束宽尺寸

Fig.3 Beam width of slow axis with different descriptions

在高斯光束近似下将单管半导体激光器输出光束光斑数据按照双曲线拟合方法进行测算^[20],其中按二阶矩定义束宽尺寸获得拟合图像如图 4 所示。

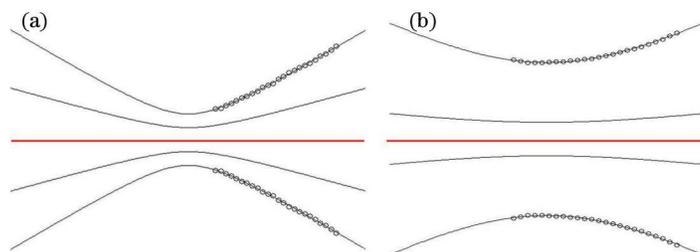


图 4 二阶矩定义束宽时,(a)快轴和(b)慢轴双曲线拟合图像

Fig.4 Hyperbolic fitting images of (a) fast axis and (b) slow axis as beam width defined by the second moment

该单管半导体激光器出射光束快、慢轴方向根据不同束宽定义通过双曲线拟合测算得到的光束参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 快轴方向不同定义束宽的光束参数

Table 1 Beam parameters of fast axis with different descriptions of beam width

Parameter	$1/e^2$	95.45%Energy	Second moment
Rayleigh length Z_R /mm	36.53	34.67	34.03
ω_0 /mm	0.19	0.18	0.19
θ_0 /mrad	5.21	5.26	5.58
M^2	3.18	3.10	3.41
BPP /mm·mrad	0.99	0.96	1.06

表 2 慢轴方向不同定义束宽的光束参数

Table 2 Beam parameters of slow axis with different descriptions of beam width

Parameter	$1/e^2$	95.45%Energy	Second moment
Rayleigh length Z_R /mm	94.14	84.29	81.78
ω_0 /mm	0.63	0.79	0.81
θ_0 /mrad	6.71	9.35	9.93
M^2	13.64	23.71	25.99
BPP /mm·mrad	4.24	7.37	8.08

由表 1 可知,单管半导体激光器快轴方向使用 $1/e^2$ 定义、95.45% 包围能量定义与二阶矩定义束宽计算得到的 BPP 近似相同,该结果也符合之前的理论分析。慢轴方向使用二阶矩定义束宽时拟合计算得到的 BPP 值最大,稍高于使用 95.45% 包围能量定义束宽时的 BPP 值,约为使用 $1/e^2$ 定义束宽时 BPP 值的两倍,分析半导体激光器光纤耦合时,考虑出射光斑呈矩形且其远场分布也呈矩形,而光纤芯径及其数值孔径则呈轴对称分布,因此在进行半导体激光光纤耦合设计时,人们常常考虑光斑对角线的 BPP,以便出射激光的光束质量与光纤光束质量相匹配,常采用的公式为^[11]

$$P_{FA,SA} = P_{FA} + P_{SA} \quad (12)$$

由此可以得到使用 $1/e^2$ 定义、95.45% 包围能量定义与二阶矩定义束宽时该单管半导体激光器出射光束的 BPP 值分别为 5.23、8.33 和 9.14 mm·mrad。

由以上分析可知,在注入电流为 13 A 时,该单管半导体激光器出射光束使用 $1/e^2$ 定义和使用 95.45% 包围能量定义束宽时光束的 BPP 值都在光纤所能接受的范围以内,而使用二阶矩定义束宽时光束的 BPP 值已超过光纤所能接受的最大值。根据光纤耦合条件及光束特点设计耦合系统并进行优化,耦合透镜选用 Lightpath 非球面透镜,焦距 $f=5.5$ mm,耦合光纤芯径为 105 μm 、数值孔径为 0.2。镀制增透膜会消除光纤端面的菲涅耳反射,提高光纤耦合效率,实验中使用的光纤端面没有镀制增透膜,这将会导致光纤耦合时 4%~8% 的功率损失^[7,21]。该单管半导体激光器在 1~13 A 注入电流时最佳光纤耦合效率曲线如图 5 所示

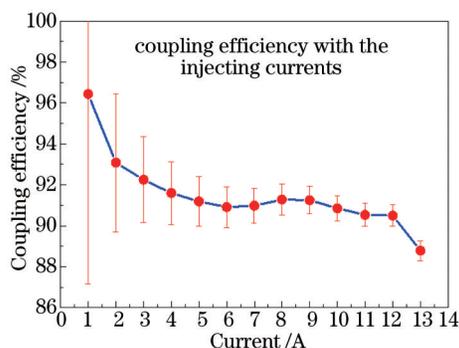


图 5 不同注入电流下测试单管半导体激光光纤耦合效率曲线

Fig.5 Relationship between coupling efficiency and injecting currents at different inject currents

图 5 中,1 A 注入电流时考虑光纤端面菲涅耳反射和光束与光纤模式匹配^[22]造成的能量损失,耦合效率高于 100%,该结果对高斯光束而言是无法实现的。考虑在 1 A 注入电流时激光器出光功率较低,此时功率计测量误差不可忽略,该结果主要是由功率计测量误差引起的。通过图 5 效率曲线可知,在低注入电流时激

光能量近似全部耦合进入光纤,但随着注入电流的增大,光纤耦合效率在91%左右微小浮动,但当注入电流增大到13 A时,光纤耦合效率降为88.8%。该结果表明在注入电流为13 A时,该单管半导体激光器光束质量退化较严重,不再满足光纤耦合条件,部分光束能量无法耦合进入光纤。表1和表2计算结果表明,在13 A注入电流时使用 $1/e^2$ 定义束宽和使用95.45%环围能量定义束宽时测算的光束BPP在考虑调节误差等因素的影响时均满足光纤耦合条件,而使用二阶矩定义束宽时BPP不再满足光纤耦合条件。结合耦合实验的结果表明使用二阶矩定义束宽时测算的光束BPP最接近真实情况,而使用 $1/e^2$ 定义束宽和使用95.45%环围能量定义束宽时拟合测得的光束BPP偏小。

4 结 论

光纤耦合技术的关键在于准确获得激光器的光束质量,根据半导体激光器光束特征,分别使用 $1/e^2$ 、95.45%环围能量和二阶矩定义单管半导体激光器出射激光束宽,在高斯光束近似下使用双曲线拟合获得该出射激光的光束参数,并对该单管半导体激光器光束质量稳定性进行了分析与验证,为了论证这3种束宽定义方法所得到的光束BPP与真实情况的近似程度,将不同方法定义束宽时光束的BPP与芯径为105 μm 、数值孔径为0.2的光纤所能接受的最大BPP进行比较并进行光纤耦合实验,实验中该单管半导体激光器光纤耦合效率随注入电流的增大而降低,在注入电流增加到13 A时耦合效率由96.5%降至88.8%,从而证明了使用二阶矩定义束宽对半导体激光器出射激光的光束质量特征描述与评价的方法是最为准确的。这对半导体激光芯片设计之初的谐振器优化、边模抑制以及后期封装工艺优化中控制出射激光光束质量具有重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Peng Hangyu, Zhang Jun, Fu Xihong, *et al.*. High-efficiency external cavity spectral-beam-combined diode laser array[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0702015.
彭航宇, 张俊, 付喜宏, 等. 高效外腔光谱合束半导体激光器阵列[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702015.
- 2 Zhang Jun, Peng Hangyu, Liu Yun, *et al.*. High brightness diode laser source based on three-wavelength multiplexing[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0401011.
张俊, 彭航宇, 刘云, 等. 三波长合束高亮度半导体激光光源[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0401011.
- 3 Cao Yinhua, Liu Youqiang, Qin Wenbin, *et al.*. Kilowatt diode laser with beam quality better than all-solid-state laser[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2282-2285.
曹银花, 刘友强, 秦文斌, 等. 光束质量超过全固态激光器的千瓦级直接半导体激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2282-2285.
- 4 Ma Xiaohui, Shi Quanlin, Xu Li, *et al.*. High-power laser diode fiber-coupled module[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(4): 674-678.
马晓辉, 史全林, 徐莉, 等. 高功率半导体激光器光纤耦合模块[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4): 674-678.
- 5 R Duesterberg, L Xu, J A Skidmore, *et al.*. 100 W high-brightness multi-emitter laser pump[C]. SPIE, 2011, 7918: 79180V.
- 6 S R Karlsen, R K Price, M Reynolds, *et al.*. 100 W, 105 μm , 0.15 NA fiber coupled laser diode module[C]. SPIE, 2009, 7198: 71980T.
- 7 Zhu Hongbo, Hao Mingming, Peng Hangyu, *et al.*. Module of fiber coupled diode laser based on 808 nm single emitters combination [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0502001.
朱洪波, 郝明明, 彭航宇, 等. 基于808 nm半导体激光器单管合束技术的光纤耦合模块[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502001.
- 8 Chen He'nan, Zou Yonggang, Xu Li, *et al.*. Fiber coupling technology of high power semiconductor laser[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 37(1): 6-9.
陈赫男, 邹永刚, 徐莉, 等. 高功率单管半导体激光器光纤耦合技术[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2014, 37(1): 6-9.
- 9 Zuo Tiechuan. Beam Quality Propagation Quality and Focused Quality of Manufacturing Laser[M]. Beijing: Science Press, 2008. 13-15.
左铁钊. 制造用激光光束质量、传输质量与聚焦质量[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 13-15.
- 10 M Werner, C Wessling, S Hengesbach, *et al.*. 100 W/100 μm passively cooled, fiber coupled diode laser at 976 nm based on multiple 100 μm single emitters[C]. SPIE, 2009, 7198: 71980P.
- 11 Z Wang, A Segref, T Koenning, *et al.*. Fiber coupled diode laser beam parameter product calculation and rules for optimized design [C]. SPIE, 2011, 7918: 791809.

- 12 Peng Hangyu, Gu Yuanyuan, Shan Xiaonan, *et al.*. Study on beam shaping of high power diode lasers[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.
- 13 Cao Changqing, Zeng Xiaodong. Evaluating the beam quality of semiconductor lasers[J]. J Infrared Millim, Waves, 2011, 30(3): 276-278.
曹长庆, 曾晓东. 半导体激光器光束质量评价方法探论[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(3): 276-278.
- 14 Lin Jingping, Zeng Xiaodong, An Yuying. A method for evaluating beam quality of laser diode[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005, 22(4): 550-553.
蔺敬平, 曾晓东, 安毓英. 激光二极管光束质量评价方法[J]. 量子电子学报, 2005, 22(4): 550-553.
- 15 Yao Yuzhan. Evaluation on Semiconductor Laser Beam Quality[D]. Xi'an: Xidian University, 2007. 35-38.
姚宇鹳. 半导体激光器光束质量评估[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007. 35-38.
- 16 Lü Baida. Laser Optics: Beam Characterization, Propagation and Transformation, Resonator Technology and Physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. 77-78.
吕百达. 激光光学: 光束描述、传输变换与光腔技术物理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 77-78.
- 17 Peng Hangyu. Study on High Power Diode Laser with Beam Shaping and Beam Combining[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011. 23.
彭航宇. 大功率半导体激光光束整形及合束研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011. 23.
- 18 Wang Baohua, Jiang Menghua, Hui Yongling, *et al.*. Improving coupling efficiency of optical fiber for high-power laser beam[J]. Chinese J Laser, 2008, 35(2): 194-198.
王宝华, 姜梦华, 惠勇凌, 等. 大功率固体激光器高效率光纤耦合[J]. 中国激光, 2008, 35(2): 194-198.
- 19 W Koechner. Solid State Laser Engineering[M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang Trans.. Beijing: Science Press, 2002. 174-176.
W 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥译. 北京: 科学出版社, 2002. 174-176.
- 20 Lü Baida. Laser Optics: Beam Characterization, Propagation and Transformation, Resonator Technology and Physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. 83.
吕百达. 激光光学: 光束描述、传输变换与光腔技术物理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 83.
- 21 Chen Yanrong, Guo linhui, Gao Songxin, *et al.*. High efficiency fiber coupled diode laser module[J]. Applied Laser, 2013, 33(5): 545.
陈艳荣, 郭林辉, 高松信, 等. 高效率光纤耦合半导体激光模块研制[J]. 应用激光, 2013, 33(5): 545.
- 22 Liu Deming. Fiber Optics[M]. Beijing: Science Press, 2008. 68-72.
刘德明. 光纤光学[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 68-72.

栏目编辑: 张 雁