

半导体激光器阵列的“Smile”效应对光束质量的影响

郎 超 尧 舜 陈丙振 贾冠男 王智勇

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 建立“Smile”效应条件下半导体激光阵列近、远场模型,将光纤近场扫描法与高斯光束传输理论相结合,从理论和实验上证明了“Smile”效应值的大小与分布形态共同决定半导体激光器阵列快轴方向实际输出光束质量,获得了不同“Smile”效应条件下半导体激光阵列快轴方向光束参数积 K_f 值。

关键词 激光器;半导体激光器阵列;“Smile”效应;光束质量

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0502006

"Smile" Effect on the Beam Quality for Diode Laser Arrays

Lang Chao Yao Shun Chen Bingzhen Jia Guannan Wang Zhiyong

(*Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

Abstract By establishing the near-field and far-field models of the diode laser arrays with the "Smile" effect, and combining optical near-field scanning method with Gaussian beam propagation theory, the conclusion that the value of "Smile" effect and the distribution decide the beam quality of diode laser arrays together is proved theoretically and experimentally. Except that, the beam parameters products of diode laser arrays under different "Smile" effect in the fast axis are calculated.

Key words lasers; diode laser array; "Smile" effect; beam quality

OCIS codes 140.2010; 140.3295; 140.2020

1 引 言

大功率半导体激光器由于电光转换效率高、结构紧凑等突出优点,目前广泛应用于工业、军事、科研等领域^[1~6]。随着当前高功率光纤激光器抽运源以及直接半导体激光材料加工需求的日益增长,整个激光领域对大功率半导体激光器光束质量的要求也在不断提高。半导体激光器阵列(LDA)作为当前常用大功率半导体激光器的核心部件,其光束质量直接影响着大功率半导体激光器的光束质量。根据光束质量定义,束腰位置的光斑尺寸和光束发散角共同决定输出光束质量,就 LDA 而言,其芯片内部本征结构及工作状态直接决定了其慢轴方向的光束质量,而快轴方向光束质量因为“Smile”效应的存在变得复杂,极大地影响了以 LDA 为基础集成具

有高光束质量的大功率半导体激光器的实际效果,限制了该领域的应用及发展,是个亟待解决的问题。目前国内外研究机构针对 LDA 的“Smile”效应研究主要集中在如何测量、降低、矫正“Smile”效应方面^[7~15],而针对“Smile”效应对 LDA 快轴光束质量影响的研究相对较少,根据调研其相关定量描述仅有 2007 年 LIMO 公司^[16]对不同“Smile”形态的阵列取固定值 0.35 mm·mrad 和 2001 年 Wetter^[17]提出 5 μm 的“Smile”效应能引起 2 倍光束质量的降低。显然,现有相关研究结果无法有效评定实际情况中不同“Smile”效应条件下 LDA 快轴光束质量,从而阻碍了高光束质量大功率半导体激光器的发展与运用。

鉴于“Smile”效应对 LDA 快轴光束质量影响的

收稿日期: 2011-12-19; **收到修改稿日期**: 2012-02-07

作者简介: 郎 超(1986—),男,硕士研究生,主要从事大功率半导体激光器封装方面的研究。

E-mail: nabob@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 尧 舜(1979—),男,博士,副研究员,主要从事大功率半导体激光系统集成方面的研究。

E-mail: yaoshun@bjut.edu.cn

重要性,以及相关定量研究的缺乏,本文采用光纤近场扫描结合高斯光束传输理论,给出了不同“Smile”条件下,LDA 快轴方向实际输出光束质量的获得方法,并以此为基础测试得到不同“Smile”效应下的快轴光束质量。结果表明,“Smile”效应大小及分布形态共同决定 LDA 快轴方向实际输出光束质量。

2 “Smile”效应条件下 LDA 近、远场模型的建立

LDA 的“Smile”效应主要表现为 LDA 内部各个发光单元中心在外延制备和封装过程中在引入应力作用下,快轴方向存在微米量级的尺寸偏移,如图 1 所示。为分析“Smile”效应对 LDA 光束质量的影响,必须将“Smile”效应引入 LDA 输出光束模型,如图 2 所示,获得 LDA 快轴方向实际束腰半径与发散角的表达式,进而采用光束参数积(BPP, K_f)定量描述光束质量。

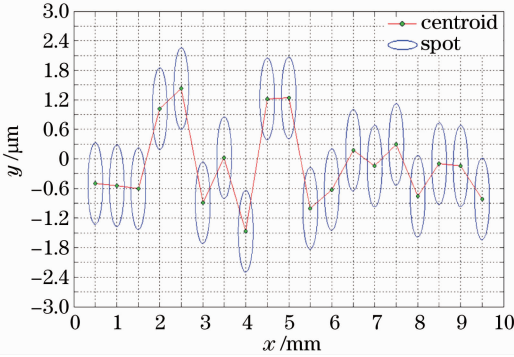


图 1 LDA 的“Smile”效应示意图

Fig. 1 Schematic diagram of "Smile" effect of LDA

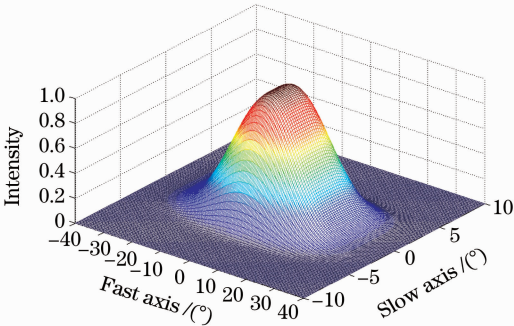


图 2 LDA 的远场光束强度示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the far-field spot intensity of LDA

LDA 内部发光单元因其结构特点,发光特性快轴方向为基模高斯分布,慢轴方向为超高斯分布^[18]。

$$I(x, y) = I_0 \exp \left[-2 \left(\frac{y^2}{w_{\perp}^2} + \frac{x^4}{w_{\parallel}^4} \right) \right], \quad (1)$$

$$I_{\perp}(y) = I_0 \exp \left[-2 \left(\frac{y}{w_{\perp}} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

(1)式为发光单元腔面光强分布函数,(2)式为发光单元腔面快轴方向光强分布函数,其中 I_0 为原点强度, w_{\perp} 及 w_{\parallel} 分别为快慢轴束腰宽度。

根据基模高斯光束特点,由

$$K_{f00} = \lambda/\pi = w_0 \cdot \theta, \quad (3)$$

可计算出确定波长 λ 和发光单元发散角 θ 情况下的理想束腰半径 w_0 。

“Smile”效应由 LDA 内各发光单元中心位置坐标共同描述,可借助光强质心分布予以表示:

$$X_n = \frac{\sum I_i \cdot x_i}{\sum I_i}, \quad (4)$$

$$Y_n = \frac{\sum I_i \cdot y_i}{\sum I_i}, \quad (5)$$

(4)、(5)式中 X_n, Y_n 为 LDA 内第 n 个发光单元光强质心位置坐标。同理以 LDA 中所有发光单元的质心作为计算对象,可求阵列的总质心位置坐标 X_0, Y_0 。

“Smile”效应对 LDA 光束质量的影响主要体现在 LDA 内所有发光单元在快轴方向上的分布对光束质量的影响。

$$I(x, y)_{LDA} = \sum_{i=1}^n I_0 \exp \left[-2 \left(\frac{y^2}{w_{\perp}^2} + \frac{x^4}{w_{\parallel}^4} \right) \right], \quad (6)$$

$$I(x, y)_{LDA} = \sum_{i=1}^n I_0 \exp \left\{ -2 \left[\frac{(y - Y_i + Y_0)^2}{w_{\perp}^2} + \frac{(x - X_i + X_0)^4}{w_{\parallel}^4} \right] \right\}, \quad (7)$$

$$I_{\perp}(y)_{LDA} = \sum_{i=1}^n I_0 \exp \left[-2 \left(\frac{y - Y_i + Y_0}{w_{\perp}} \right)^2 \right]. \quad (8)$$

(6)式为 LDA 腔面无“Smile”效应时光强分布函数;(7)式为 LDA 腔面在“Smile”效应影响下的光强分布函数;(8)式为 LDA 腔面在“Smile”效应影响下快轴方向光强分布函数。 $Y_i - Y_0$ 为第 i 个发光单元在“Smile”效应条件下快轴方向上的变形尺寸。

LDA 快轴方向占总能量 $a\%$ 时束腰半径 y_0 的计算公式为

$$a\% = \frac{\int_{-y_0}^{y_0} I_{\perp}(y)_{LDA} dy}{\int I_{\perp}(y)_{LDA} dy}, \quad (9)$$

式中 y_0 即为“Smile”效应影响下 LDA 的快轴方向束腰半径,“Smile”效应对 LDA 束腰半径的影响主要体现在 Y_i 和 Y_0 对 y_0 的影响。

通过测试所得 LDA 发散角为“Smile”效应影响下所有发光单元叠加后的多模结果,无法在光束质量计算中应用,对此需要计算 LDA 内发光单元发散角 θ 。发光单元光束传输到 L 处的光束半宽 $w_{L\perp}$ 及 LDA 光束传输到 L 处的快轴方向光强分布函数分别为

$$w_{L\perp} = L \cdot \tan \frac{\theta}{2}, \quad (10)$$

$$I_{\perp}(y)_{LLDA} = \sum_{i=1}^n I_0 \exp\left[-2\left(\frac{y - Y_i + Y_0}{w_{L\perp}}\right)^2\right]. \quad (11)$$

光束传输到 L 处 LDA 快轴方向占总能量 $a\%$ 时光束半径 y_1 的计算公式为

$$a\% = \frac{\int_{-y_1}^{y_1} I_{\perp}(y)_{LLDA} dy}{\int I_{\perp}(y)_{LLDA} dy}, \quad (12)$$

$$D = 2 \tan \frac{\theta}{2} L, \quad (13)$$

$$D = 2y_1. \quad (14)$$

(12)式中 y_1 即为“Smile”效应条件下光束传输到 L 处 LDA 快轴方向的光束半径。(13)式为光束传输到 L 处 LDA 快轴方向光束宽度 D 的计算公式,式中 θ 为 LDA 发散角。(14)式为光束半径 y_1 与光束宽度 D 的关系式。

由(10)~(14)式即可求出发光单元的发散角 θ 。

受“Smile”效应影响的 LDA 光束参数积 K_{ILDA} 的计算公式为

$$d_0 = 2y_0, \quad (15)$$

$$\Theta_0 = 2\theta, \quad (16)$$

$$K_{ILDA} = \frac{d_0 \Theta_0}{4}. \quad (17)$$

式中 d_0 为 LDA 束腰直径, Θ_0 为发光单元发散角全角。

3 实验测试及结果分析

实验运用德国夫琅禾费激光技术研究所(ILT)研发的半导体远场特性分析仪和半导体近场特性分析仪对实验室自行封装的具有不同“Smile”效应大小和形态的传导冷却型(CS)阵列激光器进行测试。通过远场特性分析仪可以测得激光器阵列远场(距离腔面 80 cm 时)一定角度范围内的光强分布,并计算出激光器的快慢轴发散角;通过近场特性分析仪

可以获知激光器阵列近场(距离腔面 40 μm 时)光斑的分布情况,以此计算出阵列的“Smile”分布;其测试“Smile”效应方法为利用光纤探头在步进电机的带动下在 LDA 出光面上以 1 μm 步进做二维扫描。该方法可快速准确地测量半导体激光器的近场光强分布,降低了传统测试方法中光学系统引入的误差^[19]。

3.1 近场及远场实验

运用半导体近场特性分析仪对待测激光器进行 $P-I$ 测试,选取工作稳定、性能相近的半导体激光器阵列作为实验样本,测试“Smile”效应。为了排除光电二极管的暗电流噪声以及其他杂散光对实验结果的影响,设计实验对此类噪声进行测量,测量显示杂散光对最终结果的影响极小,且能产生较大影响的暗电流噪声相对稳定,因此可以通过在样品测量数据中减去多次重复测量获得的噪声平均值,来避免噪声对实验结果准确度的影响。

运用半导体远场特性分析仪对待测 LDA 的远场光强度分布进行测量,通过计算测量结果可得到 LDA 快轴方向的远场发散角,由此计算出测试位置快轴方向的光束直径。为降低误差,对待测 LDA 的近场及远场实验均进行多次重复测量,选取数据平均值。图 3 为 LDA 样品 $P-I$ 曲线分布及近场、远场测试结果示意图,其中左上为远场测试光斑三维图,右下为近场测试光斑分布图,中间线为激光器的 $P-I$ 曲线。

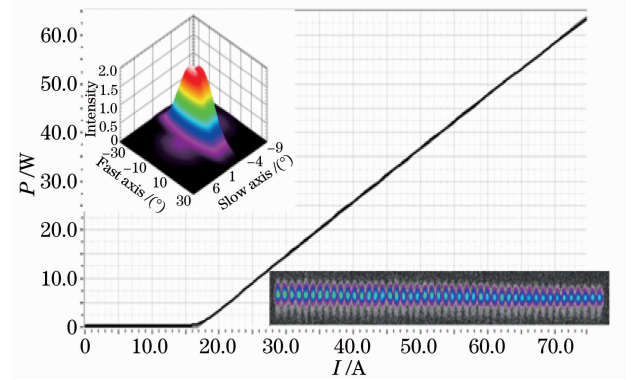


图 3 LDA 样品 $P-I$ 曲线分布及近、远场测试结果分布图
Fig. 3 Schematic diagram of the $P-I$ curve and far-field, near-field test results of the LDA sample

3.2 实验结果分析

表 1 为实验与模型计算结果,包含 4 组实验的测试与计算结果以及“Smile”效应为零时的理论模拟计算结果,其中“Smile”效应为零的模型,发散角及波长值取为 4 组样品的平均值。

表 1 中第 1 列为样品编号;第 2 列和第 3 列分

别为 LDA 的“Smile”效应值及其快轴发散角;第 4 列和第 5 列数值分别为由(10)~(14)式计算得出的阵列发光单元快轴发散角与测量所得波长值;第 6 列和第 7 列为实验测试远场光束宽度及由(12)式计算得出的光束宽度;第 8 列为(3)式计算所得发光单

元理想束腰宽度;第 9 列为由(9)式计算所得 LDA 束腰宽度;第 10 列为由(17)式计算所得 LDA 的快轴方向光束质量。其中发散角、光束宽度及束腰宽度的测试与计算值,表示占总能量 86.5%时所对应的数据。

表 1 近场及远场实验测试结果及相应计算值

Table 1 Experimental and calculated values of the near-field and far-field experiments

No.	Smile / μm	Fast axis divergency angle of LDA / ($^\circ$)	Fast axis divergency angle of emitter / ($^\circ$)	Wavelength / nm	Experimental value / mm	Calculated value / mm	Waist width of emitter / μm	Waist width of LDA / μm	BPP / (mm·mrad)
0	0	43.670	43.67	941	—	658.727	1.572	1.572	0.299
1	2.18	45.745	44.75	948	674.959	674.973	1.545	2.704	0.528
2	3.06	44.416	43.29	938	653.215	653.223	1.581	3.549	0.670
3	4.02	44.336	43.18	938	651.904	651.881	1.585	4.503	0.848
4	8.30	44.633	43.47	938	656.754	656.713	1.574	6.102	1.157

图 4(a)为表 1 中 BPP 与“Smile”值间对应关系示意图,(b)为 4 组实验样品的“Smile”效应分布示意图。通过图 4(a)可以看出随着“Smile”效应值的增加 BPP 也随之增加,通过图 4(b)可以看出 LDA 的“Smile”效应分布形态并不统一。形态多样性是“Smile”效应的一个特性,即便“Smile”效应的大小相同,也可以存在不同的“Smile”效应。此时在快轴

方向同一水平线上发光单元的比例不同,这使阵列的束腰宽度发生变化,进而影响光束质量。对此通过在模型中建立具有相同大小“Smile”效应值,不同“Smile”分布形态的 3 种典型模型进行计算,比较不同“Smile”效应走势对快轴方向光束质量影响。图 5 为 3 组模型光斑分布示意图^[17]及“Smile”效应分布示意图,表 2 为 3 种不同走势的模型计算结果。

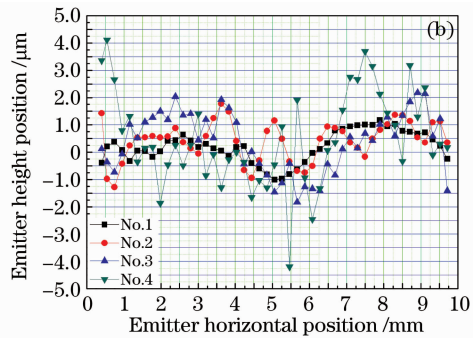
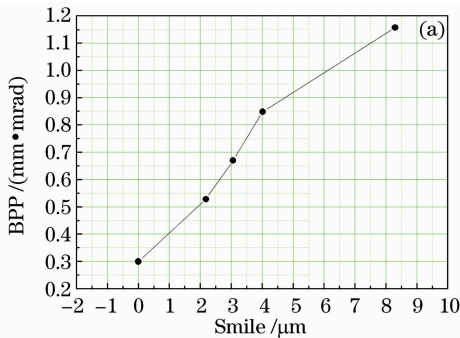


图 4 (a) “Smile”效应值与光束参数积对应分布图; (b) 4 组实验样品的“Smile”效应分布

Fig. 4 (a) Distributions of the "Smile" value and BPP; (b) distributions of the "Smile" effect for the four experimental samples

表 2 3 组模型的近远场测试结果及相应计算值

Table 2 Experimental and theoretical values of the three models

No.	Smile / μm	Divergency angle fast axis / ($^\circ$)	Wavelength / nm	Waist width of emitter / μm	Waist width of LDA / μm	K_f / (mm·mrad)
1	2	43.67	941	1.572	2.652	0.505
2	2	43.67	941	1.572	2.251	0.429
3	2	43.67	941	1.572	2.793	0.532

由图 5 及表 2 可以得出:在相同的发散角、波长、“Smile”效应值的情况下,不同的“Smile”效应分布形态使 LDA 快轴方向光束质量明显不同。通过比较上

述模型样品的 K_f 可以看出,不同分布形态造成的 BPP 偏差最高可达 24%,证明了“Smile”效应分布形态对 LDA 的快轴光束质量具有不可忽视的影响。

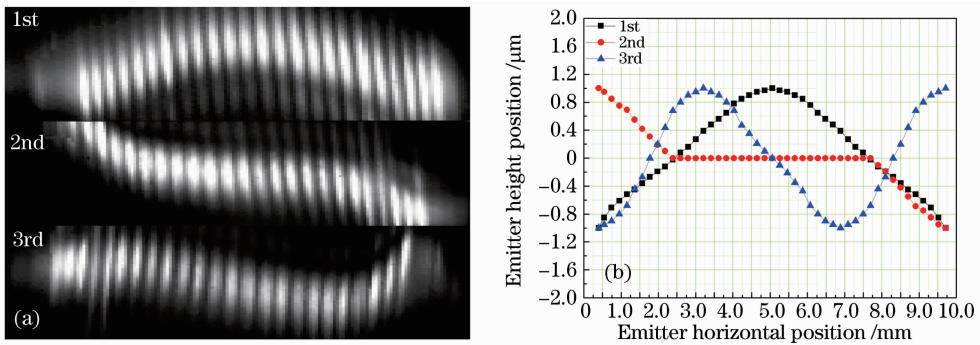


图5 (a) 3组模型光斑分布示意图; (b) 3组模型的“Smile”效应分布示意图

Fig.5 (a) Spots distributions for the three models; (b) distributions of the "Smile" effect for the three models

4 结 论

通过建立“Smile”效应条件下半导体激光阵列近、远场模型,并在此基础上将光纤近场扫描法与高斯光束传输理论相结合,给出了一种在“Smile”效应条件下,获得 LDA 快轴方向实际输出光束质量的方法,并以此为基础得到不同“Smile”效应条件下 LDA 的快轴光束质量,证明了“Smile”效应值的大小与分布形态共同决定 LDA 快轴方向实际输出光束质量,该结果为以 LDA 为基础获得高光束质量大功率半导体激光输出提供了理论与实验基础。

参 考 文 献

- 1 Andre Timmermann, Jens Meinschien, Perter Bruns *et al.*. Next generation high-brightness diode lasers offer new industrial applications[C]. *SPIE*, 2008, **6876**: 68760U
- 2 J. Wastson, D. Schleuning, P. Lavikko *et al.*. High-brightness line generators and fiber-coupled sources based on low-smile laser diode arrays[C]. *SPIE*, 2008, **6876**: 68760V
- 3 Robin K. Huang, Bien Chann, Leo J. Missaggia *et al.*. High-brightness wavelength beam combined semiconductor laser diode arrays [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(4): 209~211
- 4 C. L. Talbot, M. E. J. Friese, D. Wang *et al.*. Linewidth reduction in a large-smile laser diode array[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(29): 6264~6268
- 5 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直接半导体激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2282~2285
- 6 Ma Xiaoyu, Wang Jun, Liu Suping. Present situation of investigations and applications in high power semiconductor lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(2): 189~194
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): 189~194
- 7 Wang Jingwei, Yuan Zhenbang, Zhang Yanxin *et al.*. Study of the mechanisms of spectral broadening in high power semiconductor laser arrays[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 92~99
王警卫, 袁振邦, 张彦鑫等. 大功率半导体激光器阵列光谱展宽机理研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 92~99
- 8 Xingsheng Liu, Ronald W. Davis, Lawrence C. Hughes *et al.*. A study on the reliability of indium solder die bonding of high

- power semiconductor lasers[J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100**(1): 013104
- 9 Li Peng. Preparation of AuSn Alloys for Packaging of High Power[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010. 1~49
李鹏. 用于大功率半导体激光器封装的 AuSn 合金焊料的制备与特性研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010. 1~49
- 10 Liu Chunling. New encapsulation technique of high power semiconductor lasers [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(7): 902~904
刘春玲. 大功率 LD 封装技术的研究[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(7): 902~904
- 11 Wang Xiangpeng, Li Zaijin, Liu Yun *et al.*. Smile effect and package technique for diode laser arrays[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(3): 552~557
王祥鹏, 李再金, 刘云等. 半导体激光器阵列的 Smile 效应与封装技术[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(3): 552~557
- 12 Guo Linhui, Tang Chun, Wu Deyong *et al.*. Measurement of "Smile" for high-power diode laser array[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(2): 195~198
郭林辉, 唐淳, 武德勇等. 大功率二极管激光器线阵的“Smile”测量方法[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(2): 195~198
- 13 Su Hua. Study on the Dissipation and Packaging of High Power Laser Diode Module[D]. Jilin: Jilin University, 2007. 1~69
苏华. 大功率半导体激光器模块的散热与封装研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2007. 1~69
- 14 Deng Xinli, Liu Yun, Yin Honghe *et al.*. Theoretical analysis and experiment of "Smile" correction for diode laser bar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 505~508
邓鑫李, 刘云, 尹红贺等. 半导体激光线阵弯曲矫正方法的理论分析与实验[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 505~508
- 15 J. F. Monjardin, K. M. Nowak, H. J. Baker *et al.*. Correction of beam errors in high power laser diode bars and stacks[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(18): 8178~8183
- 16 Markus Revermann, Andre Timmermann, Jens Meinschien *et al.*. Efficient high-brightness diode laser modules offer new industrial applications[C]. *SPIE*, 2007, **6456**: 64560Q
- 17 N. U. Wetter. Three-fold effective brightness increase of laser diode bar emission by assessment and correction of diode array curvature[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2001, **33**(3): 181~187
- 18 Friedrich Bachmann, Peter Loosen, Reinhard Poprawe. High Power Diode Lasers Technology and Applications[M]. Berlin: Springer, 2006. 138~139
- 19 W. D. Herzog, M. S. Unlu, B. B. Goldberg *et al.*. Beam divergence and waist measurements of laser diodes by near-field scanning optical microscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(6): 670~688

栏目编辑:宋梅梅