

文章编号: 0258-7025(2009)08-1941-05

高光束质量新型垂直腔面发射激光器阵列

崔锦江^{1,2} 宁永强¹ 张 岩^{1,2} 孔 鹏² 刘光裕^{1,2} 张 星^{1,2} 王贞福^{1,2}
史晶晶^{1,2} 李 特^{1,2} 秦 莉¹ 刘 云¹ 王立军¹

(¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激发态物理重点实验室, 吉林 长春 130033)
²中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 报道了一种具有新型排列方式的垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)阵列。通过调制阵列中各单元直径以及单元间距,得到 1 kW/cm² 的高功率密度和高斯远场分布,且在工作电流 0~6 A 内远场发散角均小于 20°。阵列由直径分别为 200 μm, 150 μm 和 100 μm 成中心对称分布的 5 个单元组成,单元圆心间距分别为 250 μm 和 200 μm。在室温连续工作条件下,阵列在注入电流 4 A 时达最大输出功率 880 mW,斜率效率为 0.3 W/A,具有 0.56 A 的低阈值电流,微分电阻 0.09 Ω。与具有相同出光面积的 4×4 二维阵列相比,这种新型阵列在出光功率、阈值电流、光谱特性及远场分布等方面均具有优越性。模拟了阵列各单元叠加后的近场远场光强分布,结果表明得到的新型阵列的远场分布与实验结果吻合较好。

关键词 激光器; 垂直腔面发射激光器; 阵列; 远场分布

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093608.1941

High Beam Quality Novel Vertical Cavity Surface Emitting Laser Array

Cui Jinjiang^{1,2} Ning Yongqiang¹ Zhang Yan^{1,2} Kong Peng² Liu Guangyu^{1,2}
Zhang Xing^{1,2} Wang Zhenfu^{1,2} Shi Jingjing^{1,2} Li Te^{1,2} Qin Li¹
Liu Yun¹ Wang Lijun¹

¹Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract Vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) array with a novel arrangement is reported. By the modulation of the arrangement of aperture size and the center spacing of the units, we obtain high power density up to 1 kW/cm² and good beam property of Gaussian far-field distribution. The divergence angle is below 20° in the range of operating current from 0 A to 6 A. This array is composed of 5 symmetrically-arranged elements of 200 μm, 150 μm and 100 μm-diameter, with the center spacing of 250 μm and 200 μm respectively. The maximum power is 880 mW at a current of 4 A with the wall-plug efficiency of 0.3 W/A. The differential resistance is 0.09 Ω with a threshold of 0.56 A. By the comparison between the novel array and the 4×4 two-dimensional array with the same total lasing area, we can conclude that the novel array is better in the property of output power, threshold current, lasing spectra, far-field distribution etc. The theoretical simulation of the near-field and far-field distribution is in good agreement with the experimental results.

Key words lasers; vertical cavity surface emitting laser; array; far-field distribution

收稿日期: 2008-09-09; 收到修改稿日期: 2008-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(60636020, 60676034, 60706007, 60577003, 60876036)资助项目。

作者简介: 崔锦江(1981-),女,博士研究生,主要从事半导体光电子器件方面的研究。E-mail: cuijjiomp@yahoo.com.cn

导师简介: 宁永强(1965-),男,研究员,博士生导师,主要从事新型半导体激光器及其相关物理方面的研究。

E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn

1 引 言

垂直腔面发射半导体激光器 (VCSEL) 具有圆形对称光束、阈值低、易形成二维集成、可以动态单模工作等优点, 广泛应用于光纤通信、光互连、光信息处理等领域。目前, 有源区尺寸小于 $20 \mu\text{m}$, 发光功率小于 100 mW 的毫瓦级小功率激光器已经商品化^[1~3]。随着外延材料质量的提高和器件工艺技术的发展, 输出达到瓦级的大功率垂直腔面发射激光器开始成为人们研究的热点^[4]。为了提高器件的输出功率, 一种途径是继续增大器件出光孔径, 但由于器件效率随出光孔径增大而减小, 绝大部分的电功率转化成热, 给继续提高输出功率带来极大的困难^[5]; 另一种方法是制成二维阵列, 这种结构具有结构简单、阵列密度高、功率大、散热方便等优点。

阵列均为单元直径和单元间距相等的排列方式, 每个单元的环形或圆形光束叠加后在远场形成具有一系列峰值的周期性强度分布。这种激光器远场限制了激光功率密度的提高, 需要复杂的光学系统进行处理, 对器件整体体积、结构等都带来负面影响。本文通过调整阵列单元直径和间距, 得到中间单元直径较大并向两侧递减的中心对称分布, 制作了具有新型排列方式的一维 980 nm 垂直腔面发射激光器阵列。为了更好地说明器件特性, 将这种新型阵列与本实验室曾经报道的具有相同出光面积的 4×4 二维阵列^[6]进行了比较, 建立了数学模型并对各单元的 near field 远场光强分布进行了叠加模拟。

2 新阵列近场远场分布的理论计算与模拟

设计的新型排列方式的垂直腔面发射激光器阵列如图 1 所示, 由直径分别为 $200 \mu\text{m}$, $150 \mu\text{m}$ 和 $100 \mu\text{m}$ 成中心对称分布的 5 个单元组成, 单元圆心间距分别为 $250 \mu\text{m}$ 和 $200 \mu\text{m}$ 。

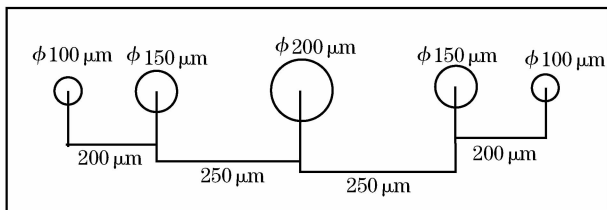


图 1 新阵列示意图

Fig. 1 Schematic diagram of novel array

组成新型阵列的大直径单元输出光束均为圆形

对称的多横模厄米-高斯光束传输, 多模高斯光束和基模高斯光束的关系如图 2 所示^[7], $w_{0m} = w_0 M_m$ 为实际光束的束腰, w_0 为基模光束的束腰, M^2 为光束质量因子。

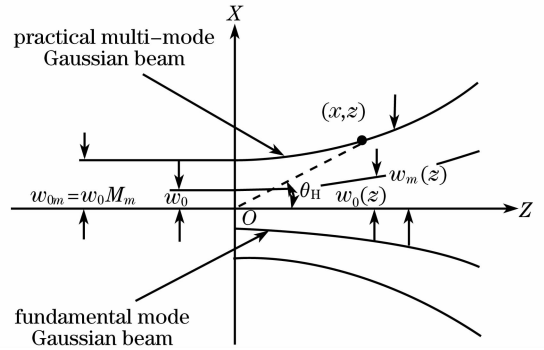


图 2 多模高斯光束与基模高斯光束的关系

Fig. 2 Relationship between multi-mode Gaussian beam and fundamental mode Gaussian beam

多模高斯光束的光束能量传输可通过每个模式的能量加权平均来计算, 即

$$I_m(x, z) = \sum_{i=0}^{+\infty} C_i I_i(x, z), \quad (1)$$

式中 C_i 为加权因子,

$$C_i = \frac{2\tau w_0^2}{w_{0m}^2 + w_0^2} \left(\frac{w_{0m}^2 - w_0^2}{w_{0m}^2 + w_0^2} \right)^i, \quad (2)$$

I_i 为每个模式的厄米-高斯分布,

$$I_i(x, z) = A_i H_i^2 \left[\frac{\sqrt{2}}{w_0(z)} x \right] \exp \left[-2 \frac{x^2}{w_0(z)^2} \right], \quad (3)$$

A_i 为归一化系数, $H_i(x)$ 为厄尔米特多项式^[8]。将 (2), (3) 式代入 (1) 式得到

$$I_m(x, z) \propto P \sum_{i=0}^{+\infty} \frac{2\tau w_0^2}{w_{0m}^2 + w_0^2} \left(\frac{w_{0m}^2 - w_0^2}{w_{0m}^2 + w_0^2} \right)^i \times H_i^2 \left[\frac{\sqrt{2}}{w_0(z)} x \right] \exp \left[-2 \frac{x^2}{w_0(z)^2} \right], \quad (4)$$

式中 P 为功率。

在工作电流为 4 A 时, 计算阵列中直径为 $100 \mu\text{m}$, $150 \mu\text{m}$ 和 $200 \mu\text{m}$ 单元的功率 P 理论值分别为 0.364 W , 0.856 W 和 1.52 W , 用“透镜变换法”^[9]得到 M^2 分别为 $35, 47, 61$ 。已知理想基模高斯光束束腰为 $1.296 \mu\text{m}$ ^[10], 代入 $w_{0m} = w_0 M$ 得到单元近场束腰分别为 $7.66 \mu\text{m}$, $8.88 \mu\text{m}$ 和 $10.12 \mu\text{m}$ 。将各单元的功率 P 和 w_{0m} 代入 (4) 式, 并按间距排列进行叠加, 模拟得到近场光强分布如图 3(a) 所示。

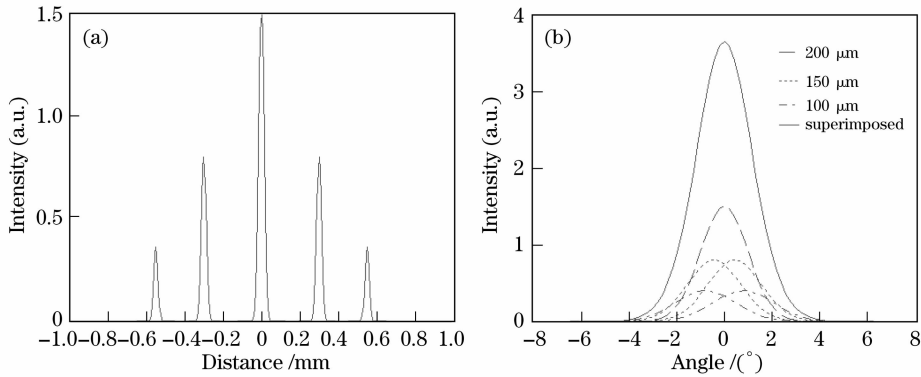


图 3 各单元光束叠加后的新阵列近场分布(a)和远场分布(b)

Fig. 3 Near-field distribution (a) and far-field distribution (b) of novel array superimposed of five units

将(4)式进行傅里叶变换得到各单元的远场图形表达式为

$$I_m(\theta, z) \propto P \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{2\omega_0^2}{\tau\omega_m^2 + \omega_0^2} \left(\frac{\omega_m^2 - \omega_0^2}{\omega_m^2 + \omega_0^2} \right)^i \cdot H_i^2 \left[\frac{\sqrt{2}}{\omega_0(z)} \tan(\theta) z \right] \exp \left[-2 \frac{\tan^2(\theta) z^2}{\omega_0(z)^2} \right]. \quad (5)$$

各单元叠加后得到距离出光平面 5 cm 处远场光强分布如图 3(b)所示,可见各单元光束叠加后在远场呈高斯分布。

3 器件结构及制作

VCSEL 外延片采用金属氧化物化学气相沉积法(MOCVD)生长。外延片结构如图 4 所示,外延层依次为: 30 对 C(分子浓度为 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$) 掺杂的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ / GaAs p 型分布布拉格反射镜(DBR), 反射谱中心波长为 980 nm, 反射率达 99.9%; p 型 DBR 与光学谐振腔之间生长一层 30 nm 厚的 AlAs 层, 这一层经选择氧化后变成低折射率的隔离氧化物 Al_xO_y 以减少横向电流扩展效应, 产生对有源层的高效电流限制^[11]; 谐振腔由 3 个 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ / GaAs 量子阱(QW)的有源区和两边的 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 空间层构成, 有源区阱厚和垒厚分别为 8 nm 和 10 nm, 激射波长为 980 nm; n 型 DBR 包括 20 对 Si(分子浓度为 $2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$) 掺杂的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ / GaAs, 提供 99.3% 的反射率。

用光刻法在外延片 P 表面刻出阵列图形, 用湿法腐蚀方法腐蚀出台面, 腐蚀深度要超过 AlAs 层达到或刚刚超过有源区。在 420 °C 石英炉内由氮气携带 90 °C 水蒸气对 AlAs 层进行选择氧化形成 Al_xO_y 绝缘层。大面积生长 SiO_2 绝缘层防止电流从台面侧向注入导致器件短路, 再将台面中央电极区的 SiO_2 腐蚀掉, 大面积溅射 Ti-Pt-Au 作为

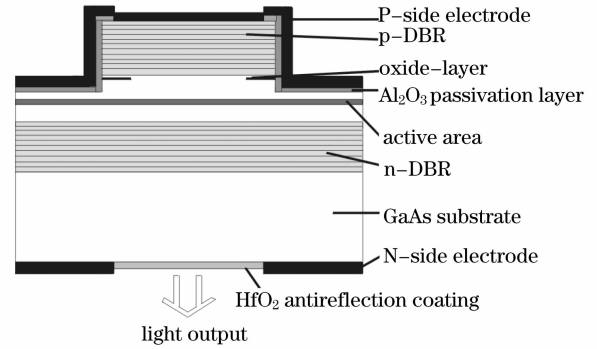


图 4 底发射 VCSEL 器件结构

Fig. 4 Structure of bottom-emitting VCSEL

p 型电极。为了减少衬底损耗将 N 面 GaAs 衬底化学减薄至 150 μm 左右, 采用双面对准工艺刻出出光窗口, 蒸镀 AuGeNi/Au 形成 N 面欧姆接触并在 420 °C 氮气保护下合金 1 min, 解理管芯并将 P 面装配在金刚石热沉上。

4 测试结果与分析

制作了如图 5 所示的新阵列芯片。图 6 为新型阵列的功率-电流-电压(P-I-V)特性曲线, 在室温条件下, 注入电流为 4 A 时器件获得最大连续输出功率 880 mW, 相应的光功率密度达 $1 \text{ kW}/\text{cm}^2$, 斜率效率为 0.3 W/A, 器件的阈值电流为 0.56 A, 微分电阻 0.09 Ω。图 6 的插图为 CCD 抓拍的光斑经 Matlab 软件处理后得到的器件远场强度分布, 可见这种新型阵列各单元光束叠加后在远场呈高斯分布。

为了直观说明这种新型 VCSEL 阵列不同的器件特性, 图 7 比较了文献[6]制作的二维(2-D)阵列与本文制作的一维(1-D)阵列的功率-电流(P-I)特性, 可见新型阵列的最大输出功率高于文献[6]的 0.70 W。图 8 所示的两种阵列的激射光

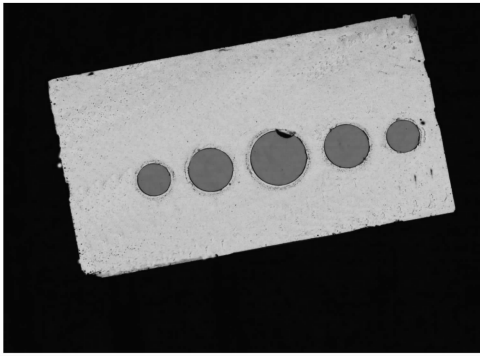


图 5 制作的新型 VCSEL 阵列图片
Fig. 5 Photo of novel VCSEL array

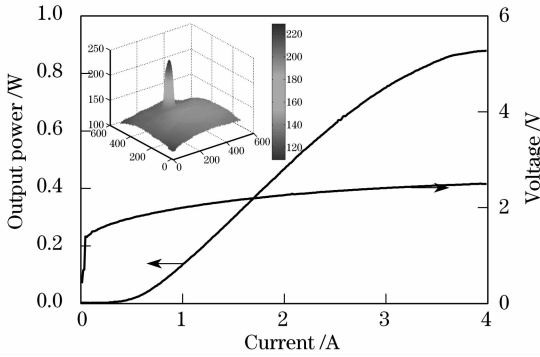


图 6 新型阵列的 P-I-V 特性
Fig. 6 P-I-V curves of novel array

谱图表明,新型阵列的波长漂移和光谱半宽均小于 4×4 阵列。由于 4×4 阵列各单元直径较小且排列密度大,单元之间热干扰现象比较明显,加重了器件的散热问题^[12]。严重的热干扰现象会影响注入电流的空间分布,以及有源区增益和折射率分布,降低了输出功率并引起波长红移。由图 7 可见,在相同注入电流下, 4×4 二维阵列比新型一维阵列更先达到热饱和,热效应使有源区量子阱结构的能级曲率变小,同时随注入电流的增大,载流子所占据的能级分布展宽,使得发射谱加宽,影响了器件的光谱特性和输出功率。

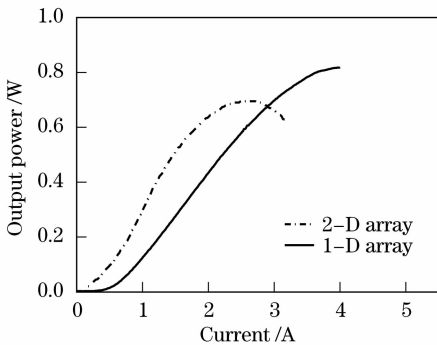


图 7 两种阵列的 P-I 曲线
Fig. 7 P-I curves of two arrays

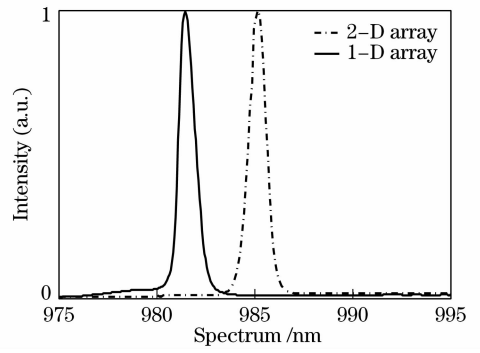


图 8 两种阵列的光谱特性
Fig. 8 Spectra of two arrays

图 9 给出了两种阵列在不同注入电流下的远场分布图,以及 CCD 抓拍的相应电流下的光斑图片。对于 4×4 阵列,在注入电流为 1500 mA 时,由于单元光束强度较小,且单元之间间距较大,光束耦合现象不明显,各单元高斯光束叠加后在远场仍然呈一系列峰值排列,且随着注入电流的增大,渐强的单元光束耦合现象逐渐明显,远场呈近超高斯光束分布,发散角较大^[13]。新型一维阵列调整了阵列单元直径和间距,使之成中间单元直径较大并向两侧递减的中心对称分布,相应的中间强度较高的单元光束与两侧强度递减的单元光

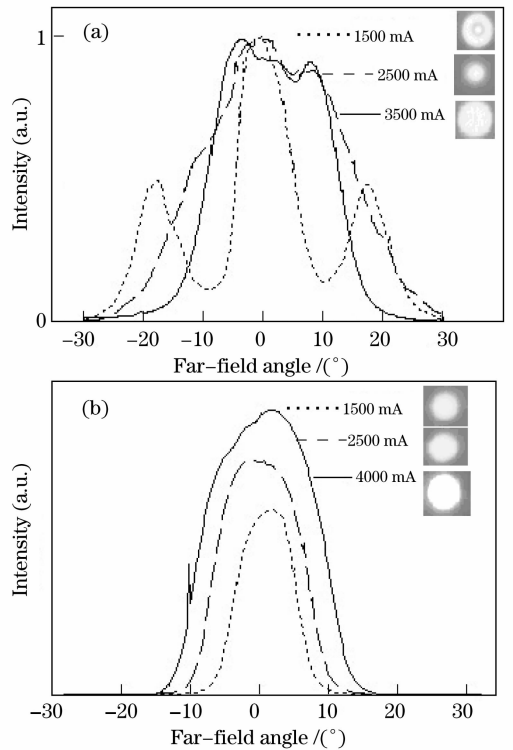


图 9 二维阵列(a)与新型一维阵列(b)在不同电流下的远场分布

Fig. 9 Far-field distribution of 4×4 two-dimensional array (a) and novel one-dimensional array (b) at different current

束耦合后在远场形成高斯强度分布,并且工作电流在 0~6 A 范围内均能保证高斯分布和发散角小于 20°。可见实验结果与模拟结果吻合较好,光束输出既提高了激光功率密度,也易于满足与光纤的高效耦合和高效固体激光抽运的要求。

5 结 论

制作了一种具有新型排列方式的垂直腔面发射阵列,由直径分别为 200 μm 、150 μm 和 100 μm 成中心对称分布的 5 个单元组成,单元圆心间距分别为 250 μm 和 200 μm 。通过调整垂直腔面发射激光器阵列单元直径与间距,得到了 1 kW/cm² 的高功率密度和高斯远场分布。阵列具有中心对称分布的排列方式和合理的间距,使得各单元高斯光束叠加后在远场仍呈高斯分布,输出光束更容易满足与光纤的高效耦合和高效固体激光抽运的要求。通过数学模型模拟了单元光束叠加后的新阵列的近场远场光强分布,结果表明与实验结果吻合较好。

参 考 文 献

- 1 Ma Jianli, Hao Yongxin, Zhong Jingchang *et al.*. Study on stability of selective oxidation in vertical cavity surface emitting laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1055~1058
马建立, 郝永芹, 钟景昌等. 垂直腔面发射激光器中选择性氧化工艺稳定性研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1055~1058
- 2 Jinjiang Cui, Yongqiang Ning, Yanfang Sun *et al.*. Vertical cavity surface emitting lasers fabricated with pulsed anodic oxidation[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(suppl.): 145~147
- 3 Hao Yongxin, Liu Wenli, Zhong Jingchang *et al.*. A new process

- in fabrication of vertical-cavity surface emitting laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 443~446
郝永芹, 刘文莉, 钟景昌等. 垂直腔面发射激光器制作新工艺[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 443~446
- 4 B. Weigl, M. Grabherr, C. Jung *et al.*. High-performance oxide-confined GaAs VCSELs [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1997, **3**: 409~415
- 5 Li Te, Ning Yongqiang, Sun Yanfang *et al.*. Beam quality of 980 nm high power vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 641~645
李 特, 宁永强, 孙艳芳等. 980 nm 高功率 VCSEL 的光束质量[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 641~645
- 6 Te Li, Yongqiang Ning, Yanfang Sun *et al.*. High-power InGaAs VCSEL's single devices and 2-D arrays[J]. *J. Luminescence.*, 2007, **122~123**: 571~573
- 7 Li Ping, Sun Jiangqiang, Chen Huimin *et al.*. Study the model of laser diode emitted beam based on multimode Gaussian distribution [C]. *SPIE*, 2007, **6824**(1H): 1~7
- 8 Du Baoxun. The Principle of Semiconductor Lasers[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2004. 108
杜宝勋. 半导体激光器原理[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2004. 108
- 9 International Organization for Standardization, Lasers and laser-related equipment. Test methods for laser beam parameters, beam widths, divergence angle and beam propagation factor[S]. ISO 11146, 1996
- 10 Spilios A. Riyopoulos, D. Dialetis, J. Liu *et al.*. Generic representation of active cavity VCSEL eigenmodes by optimized waist Gauss-Laguerre modes[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2001, **7**(2): 312~327
- 11 Weng W. Chow, Kent D. Choquette, Mary H. Crawford *et al.*. Design, fabrication, and performance of infrared and visible vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(10): 1810~1824
- 12 Jiang Jianping. Semiconductor Laser [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000
江剑平. 半导体激光器[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000
- 13 Anthony A. Tovar. Multi-Gaussian beams-A super-Gaussian alternative[C]. *SPIE*, 2000, **3930**: 87~94