

文章编号 1674-2915(2010)06-0637-06

高功率 980 nm 垂直腔面发射激光器的亮度特性

丛海兵^{1,2}, 宁永强¹, 张星^{1,2}, 王贞福^{1,2}, 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: 在循环水冷却(工作环境温度控制在 15)和连续注入电流条件下,从垂直腔面发射激光器(VCSEL)亮度基本定义出发,实验测量了不同注入电流时口径为 400 μm 的高功率 980 nm InGaAs/GaAs 应变量子阱垂直腔面发射激光器(VCSEL)的亮度特性。结果表明:在注入电流 < 4 A 时,随着注入电流的增加,亮度也跟着增加;当注入电流 > 4 A 时,尽管输出功率在增加,但是器件的光束质量变差, M^2 因子升高,表明此时影响器件亮度的主导因素是 M^2 因子,所以亮度减小;在注入电流为 4 A,输出功率为 1.2 W 时,亮度达到最大值 2.43 $\text{kW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$,此时的光束质量最好, M^2 因子为 207。最后,分析了影响高功率 VCSEL 器件亮度特性的主要因素,提出了提高器件亮度特性的解决方法。

关键词: 垂直腔面发射激光器;亮度;光束质量因子

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

Brightness characteristics of 980 nm high power VCSEL

CONG Hai-bing^{1,2}, NING Yong-qiang¹, ZHANG Xing^{1,2}, WANG Zhen-fu^{1,2}, WANG Li-jun¹

(1. Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: On the basis of the brightness definition of Vertical-cavity Surface-emitting Lasers(VCSELs), the brightness characteristics of high power strained quantum well 980 nm InGaAs/GaAs VCSEL with a diameter of 400 μm are demonstrated at continuous-wave(CW) operation with a recycled water cooling(the temperature is controlled at 15). The results show that when the injection current is smaller than 4 A, the brightness will increase with the increasing of injection current; while the injection current is larger than 4 A, the output power increases with the increasing of injection current, but the beam quality becomes bad, and then the M^2 is the main factor impacting on the brightness characteristics. When the injection current is 4 A and the output power is 1.2 W, the beam quality is the best, M^2 factor achieves 207, and the maximum brightness is 2.43 $\text{kW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$. Finally, the main factors that impact the brightness characteristics of high-power VCSEL devices are analyzed, and the solutions to improve the brightness characteristics of the device are also proposed.

Key words: vertical-cavity surface-emitting laser; brightness; beam quality factor

1 引言

高亮度激光器在工业、医疗、军事领域有着广泛的应用,其不仅具有较高输出功率,而且还具有好的光束质量。目前,高亮度激光器主要有 CO₂ 激光器^[1,2]、泵浦固体激光器^[3,4]、泵浦光纤激光器^[5]以及利用激光合束技术制作的半导体激光器阵列^[6-11]。一般来说,半导体激光器的亮度特性不及其它3种激光器,但是由于其具有高转换效率、体积小、成本低的特点,所以仍得到了广泛的关注和应用。

目前,通过各种激光合束技术获得的半导体激光器阵列在高亮度半导体激光器领域占据着主导地位,它不仅直接应用在工业加工、材料处理、医疗和军事领域,而且还被用来泵浦固态激光器和光纤激光器^[6,7,9-11]。但是,由于获得高亮度的由多个边发射激光器单元组成的阵列需要多个单管,每个单管又都要进行准直校准,整个系统还要经过复杂的光学系统进行整形、匀化,并且不能集成为精确的二维阵列^[6,7,10],因此,最近几年垂直腔面发射激光器(VCSEL)逐渐引起了人们的重视。

激光波长 1 004 nm(TEM₀₀模式)的外腔耦合光泵浦 VCSEL 单管,输出功率可以达到 0.52 W,亮度为 50 MW/cm²·sr^[12];Princeton Optronics 的 Jean-Francois Seurin 等人利用外腔耦合制作的电泵浦大口径(约 150 μm) VCSEL 单管,激光波长为 976 nm,输出功率达到 500 mW,亮度约为 36.5 MW/cm²·sr;利用外腔耦合电泵浦制作的 VCSELs 阵列,激光波长为 976 nm,通过微透镜阵列准直,经聚焦透镜耦合进入 100 μm/0.22 NA 的光纤,最高输出功率超过 27.4 W,相应亮度为 2.3 MW/cm²·sr,经光纤输出后能量转换效率约为 11%^[13]。

不难看出,亮度特性是表征 VCSEL 激光器功能的主要指标之一。事实上,目前并没有直接测量激光器亮度特性的实验仪器,因此本文根据实际需要搭建了光电测试平台,间接对高功率 980 nm InGaAs/GaAs 应变量子阱 VCSEL 器件的亮度特性进行了测试,并对实验结果进行分析。讨论

了影响高功率 VCSEL 亮度特性的主要因素,提出了提高器件亮度特性的解决方法,希望通过这些研究,为以后进一步研制高亮度 VCSEL 器件奠定科学的实验和理论基础。

2 VCSEL 亮度定义

光源亮度定义为单位发光面积、单位立体角的光功率^[14]:

$$B = \frac{P}{A}, \quad (1)$$

单位是 W/cm²·sr,其中 A 代表面积, Ω 代表立体角。对于面发射激光器来说, $A = W_0^2 \Omega$,其中 W_0 是光束束腰半径, Ω 是光束远场发散角,带入式(1),得到:

$$B = \frac{P}{A} = \frac{P}{W_0^2 \Omega} = \frac{P}{M^2}. \quad (2)$$

M 为光束质量因子(光束传输因子或者衍射极限倍数),是表征激光光束特性的一个重要参数,取值 ≥ 1 。光束质量因子表示的是实际传播的高斯光束与理想高斯光束(TEM₀₀)的偏移^[15]:

$$M^2 = \frac{W_0}{W_0} = \frac{W_0}{W_0}, \quad (3)$$

其中 W_0 、 Ω_0 分别表示理想高斯光束的束腰半径和远场发散角。对于理想高斯光束, M 值为 1,于是亮度可以表示为:

$$B = \frac{P}{M^2}. \quad (4)$$

从上面的讨论可以看出 VCSEL 器件的亮度特性与输出功率 P 、 M 因子有关,因此以 B 、 P 、 M 因子的基本关系为出发点,测量不同连续注入电流时 VCSEL 器件的输出特性和 M 因子,可以分析影响器件亮度特性的主要因素,并探索提高器件亮度的解决方法。

3 实验测试与分析

实验中采用的是 InGaAs/GaAs 应变量子阱底发射出光口径为 400 μm 的 VCSEL 单管,激光波长为 980 nm。器件的芯片由金属氧化物化学气相沉积(MOCVD)生长而成。量子阱中引入应变,能有效地降低价带混合效应,获得高的微分增

益和低的阈值电流^[16]。有源区包含 9 个量子阱,分为 3 组,每组 3 个量子阱,有源区量子阱分布和腔内驻波波峰相对应,从而形成了增益匹配结构,以降低光损耗,提高光限制因子,实现更低的阈值电流。 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 量子阱厚度为 8 nm,非掺杂的 GaAs 势垒层厚度为 10 nm,整个有源区夹在 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 空间层内,与空间层一起构成了 2 倍波长的谐振腔。p-DBR 和 n-DBR 分别由 30 对和 25 对 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ 构成。

大口径 VCSEL 单管器件的最高输出功率基本上都是在瓦级左右,如果忽略波长温漂的影响,决定大口径 VCSEL 器件亮度特性的就只是输出功率 P 和 M^2 因子。一般来说,VCSEL 器件的口径越大,光束质量越差, M^2 因子越高^[17]。在加循环水冷却(器件工作环境温度控制在 15)连续注入电流条件下,用半导体激光器综合参数测试仪对器件的输出特性进行测量,得到的特性曲线如图 1 所示。

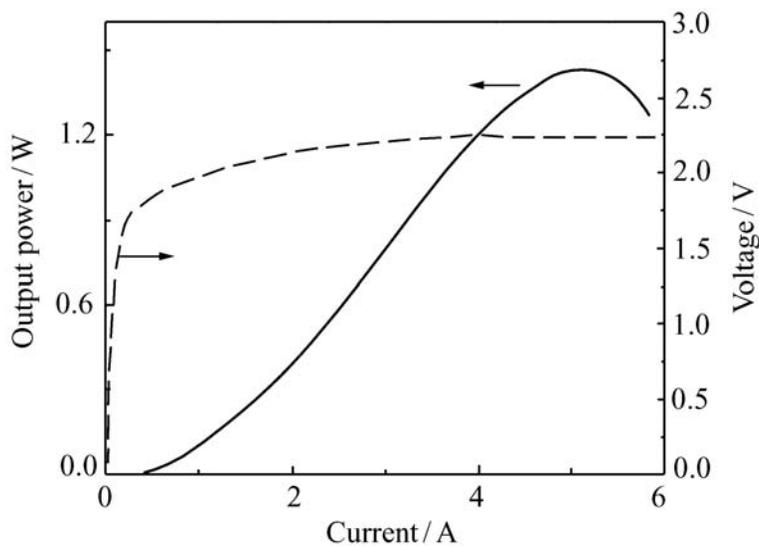


图 1 15 °C 连续电流注入条件下的 $P-I$ 和 $I-V$ 特性曲线

Fig.1 $P-I$ and $I-V$ characteristic curves of device at 15 °C and continuous-wave (CW) operation

从图 1 可以看出,在连续注入电流 5 A 时,最高输出功率约 1.4 W,继续增加注入电流,由于有源区的自热效应而导致管芯内部温度升高,引起了光子密度饱和,光增益减小,最终导致转换效率下降,输出功率降低。结合亮度的定义式可知,尽管在一定范围内随着注入电流的增加输出功率是增加的,但是对于 M^2 因子随着注入电流增加的变化特性并不清楚,因此亮度随注入电流的变化情况并不明确,所以需要测量 M^2 因子在不同注

入电流条件下的变化趋势。一般来说,对于小口径的 VCSEL, M^2 因子的取值为几十左右,而大口径的 VCSEL, M^2 因子的取值在几百左右。

为了测量不同电流注入条件下 M^2 因子的变化情况,设计了一个实验装置。整个实验装置包括循环水冷却系统、VCSEL 专用驱动电源、出光口径 400 μm 的 VCSEL、30 dB 衰减片、双凸透镜、CCD 相机 (SEIKO 公司的 SK420B 系统) (见图 2)。

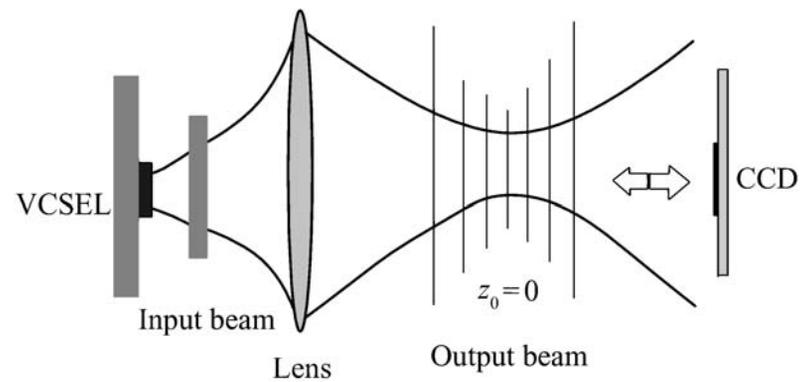


图 2 测量器件光束质量实验装置图

Fig.2 Setup for measuring beam quality of VCSEL

光束经过衰减片衰减光强,防止 CCD 相机饱和,然后通过双凸透镜成像形成束腰,将 CCD 相机置于透镜后不同 z 处对光斑大小(强度分布)进行采集。设束腰所处位置的坐标 $z_0 = 0$,在 z_0 的两边对称的位置取点测量,可以得到经透镜变换后不同 z 处光斑半径 $W(z)$, $W(z)$ 是依据光斑半径的 $1/e^2$ 定义(光强降到中心值的 $1/e^2$ 的点),用 MATLAB 软件编程对拍摄到的光斑进行处理得到的。根据实际激光光束传输式(5),把 M^2 作为拟合参数,用 MATLAB 对 z 和 $W(z)$ 进行拟合进而求出拟合参数 M^2 。

$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left[\frac{(z - z_0) M^2}{W_0^2} \right]^2}. \quad (5)$$

因为测量时器件长时间连续工作,所以必须用循环水进行冷却,器件工作环境温度能控制在 15 °C 左右。连续注入电流分别为 3, 4, 5, 6 A 时,对 M^2 因子进行测量。经 MATLAB 对采集到的试验数据进行拟合后,求出相应的拟合参数 M^2 分别为 236, 207, 249 和 262,拟合曲线如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,随着注入电流的增加,出光光束的束腰逐渐增大,在注入电流 I 为 5 A 时,达到最大值约 5.1 mm,此时输出功率为 1.4 W,

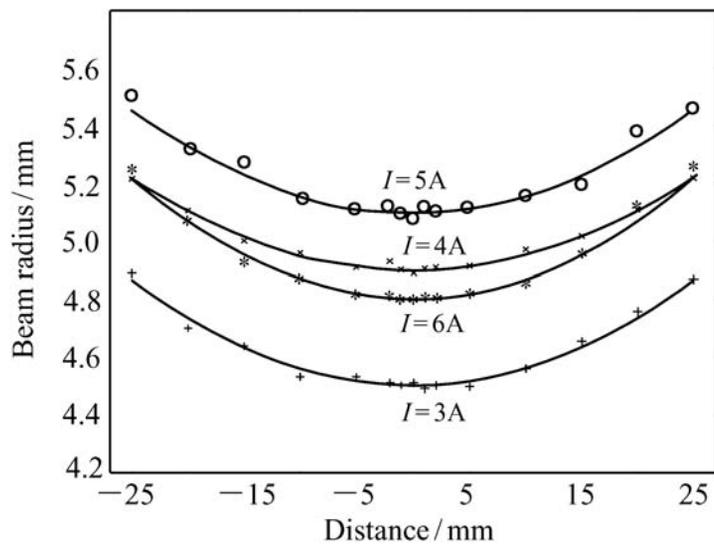


图3 不同注入电流时 M^2 的测量结果

Fig. 3 M^2 measurement results for different injection currents

当电流继续增加时,束腰变小,这是因为管芯内部的热效应使器件能量转换效率降低,输出功率下降。

以注入电流 I 和 M^2 作为变量做图,结果如图4所示。

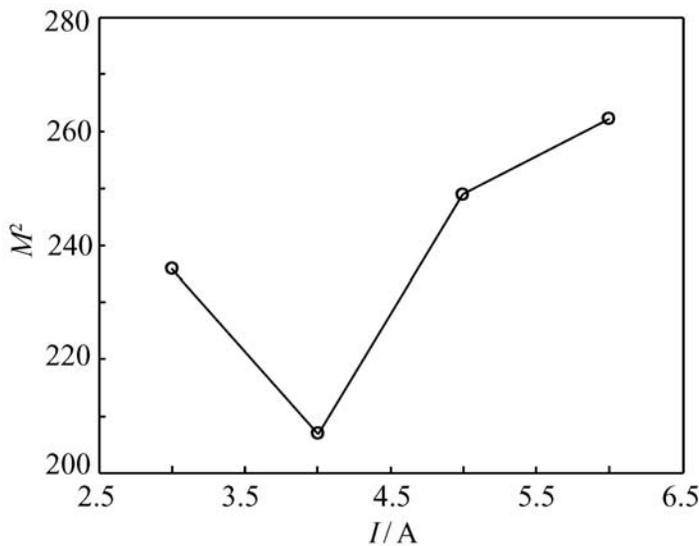


图4 M^2 随注入电流的变化曲线

Fig. 4 M^2 values versus different injection currents

从图4中可以看出,随着注入电流的增加, M^2 因子值先降低后升高,因而光束质量也经历了先变好后变差的这一过程。其原因是开始时注入电流较小,由于器件的口径比较大,而且器件出光端面周围是环形电极,电极距有源区的距离很小,注入电流分布不均匀,因此导致出射光束是环形分布,光束质量比较差;随着注入电流的增加,电流分布逐渐变得均匀,出射光束逐渐变成一圆形光斑,光束质量变好;但是如果注入电流过大,由于管芯内部的热效应和电流拥挤效应,光束质量

将会逐渐变差^[18],同时还伴随有高阶模式产生。

利用式(2)进行计算得到相应亮度 B 分别为 1.5, 2.43, 2.35 和 1.82 kW/cm² · sr。以注入电流 I 和亮度 B 作为变量做图,如图5所示。

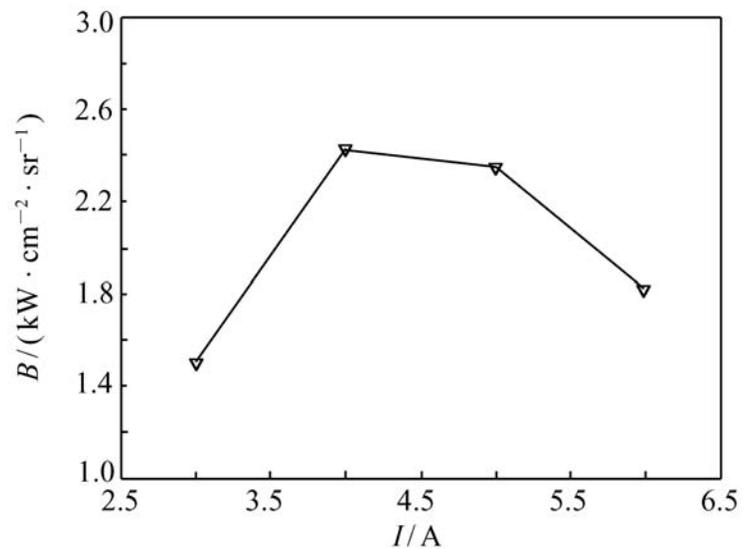


图5 B 随注入电流的变化曲线

Fig. 5 B values versus different injection currents

从图5中可以看出,随着电流的增加,亮度也跟着增加,在连续注入电流 4 A、输出功率 1.2 W 时达到最大 2.43 kW/cm² · sr,继续增加注入电流,亮度开始下降,对比图4还可以看出,在注入电流超过 4 A 时, M^2 因子上升趋势比较快,此时光束质量变差比较明显,尽管输出功率还是有上升趋势,但是此时影响器件亮度特性的主导因素是 M^2 因子,因此亮度值下降。同时可知,器件亮度的最大值并不是处在输出功率最大的时候,而是比最大输出功率要小一些,此时的光束质量最好,而且是主导因素。

4 结 论

根据垂直腔面发射激光器亮度的基本定义,实验测试了循环水冷却、连续注入电流条件下高功率 980 nm InGaAs/GaAs 应变量子阱垂直腔面发射激光器的亮度特性。结果发现:在注入电流 < 4 A 时,亮度随着注入电流(输出功率)的增加而上升;当注入电流 > 4 A 时,尽管输出功率在增加,但是器件的光束质量变差, M^2 因子升高,表明此时影响器件亮度特性的主导因素是 M^2 因子,所以亮度减小。从实验测量得到的光束质量因子以及输出功率随注入电流变化的趋势可以看出,如果器件输出功率变化梯度小于 M^2 因子的变化梯

度,那么影响高功率 VCSEL 器件亮度特性的主要因素就是 M^2 因子。通过 VCSEL 亮度基本定义式可以判断出,只要提高器件的输出功率,改善光束质量,即降低 M^2 因子的值,就可以提高器件的亮度。但是,就目前研究来看,在器件材料、有源区结构设计以及后工艺方面进行改变从而显著地提高输出功率和光束质量存在很大困难。以往研究表明,对于 VCSEL 器件来说,要提高输出功率,就

必须增加激光器的口径;而增大口径将会降低光束质量,并且在高的电流注入条件下,会产生高阶模式,也同样会降低光束质量。从这个角度考虑,通过外腔电泵浦(或者光泵浦)的方式提高 VCSEL 单管(或者阵列)器件的亮度特性是一种有效的途径,这也会成为未来高亮度 VCSEL 器件研究的一个重要的方向。

参考文献:

- [1] TAKENAKA Y, KUZUMOTO M, YASUI K, *et al.* . High power and high focusing CW CO₂ laser using an unstable resonator with a phase-unifying output coupler[J] . *IEEE Quantum Electron*, 1991, 27(11) : 2482-2487.
- [2] 郭汝海,李殿军,杨贵龙,等. 大功率 TEA CO₂ 激光器非稳腔的设计与实验[J] . 中国光学与应用光学, 2009, 2(3) : 253-257.
GUO R H, LI D J, YANG G L, *et al.* . Design and experiment of unstable resonator for high power TEA CO₂ laser[J] . *Chinese J. Opt. d Appl. Opt.* , 2009, 2(3) : 253-257. (in Chinese)
- [3] ZHOU R, LI E, LI H, *et al.* . Continuous-wave, 15. 2 W diode-end-pumped Nd: YAG laser operating at 946 nm[J] . *Opt. Lett.* , 2006, 31(12) : 1869-1871.
- [4] 郭芳,樊仲维,张晶,等. 全固态准连续 TEM₀₀ 模 Nd YVO₄ /LBO 绿光激光器[J] . 中国光学与应用光学, 2009, 2(4) : 358-363.
GUO F, FAN ZH W, ZHANG J, *et al.* . All solid-state quasi-CW Nd YVO₄ /LBO green laser with TEM₀₀ operation[J] . *Chinese J. Opt. Appl. Opt.* , 2009, 2(4) : 358-363. (in Chinese)
- [5] GAPONTSEV V, GAPONTSEV D, PLATONOV N, *et al.* . 2 kW CW ytterbium fiber laser with record diffraction-limited-brightness[C] . Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, Munich Germany, 12-17 June 2005: 508.
- [6] 王祥鹏,梁雪梅,李再金,等. 880 nm 半导体激光器列阵及光纤耦合模块[J] . 光学 精密工程, 2010, 18(5) : 1021-1027.
WAN G X P, LIANG X M, LI Z J, *et al.* . 880 nm semiconductor laser diode arrays and fiber coupling module[J] . *Opt. Precision Eng.* , 2010, 18(5) : 1021-1027. (in Chinese)
- [7] 顾媛媛,冯广智,单肖楠,等. 808 nm 和 980 nm 半导体激光迭阵波长耦合技术[J] . 光学 精密工程, 2009, 17(1) : 8-13.
GU Y Y, FENG G Z, SHAN X N, *et al.* . 808 nm and 980 nm high power laser diode stack with wavelength coupling[J] . *Opt. Precision Eng.* , 2009, 17(1) : 8-13. (in Chinese)
- [8] KARLSEN S R, PRICE R K, REYNOLDS M, *et al.* . 100 W 105 μm 0. 15 NA fiber coupled laser diode module[J] . *SPIE*, 2009, 7198: 71980T.
- [9] 王焯,张岩,秦莉,等. 高功率半导体激光器列阵封装引入应变的测量[J] . 光学 精密工程, 2010, 18(9) : 1951-1958.
WANG Y, ZHANG Y, QIN L, *et al.* . Measurement of packaging-induced strain in high power diode laser bar[J] . *Opt. Precision Eng.* , 2010, 18(9) : 1951-1958. (in Chinese)
- [10] 顾媛媛,彭航宇,王祥鹏,等. 高功率高亮度半导体激光器件[J] . 红外与激光工程, 2009, 38(3) : 110-113.
GU Y Y, PENG H Y, WANG X P, *et al.* . High power and high brightness diode laser device[J] . *Infrared and Laser Eng.* , 2009, 38(3) : 110-113. (in Chinese)
- [11] 李再金,胡黎明,王焯,等. 808 nm 含铝半导体激光器的腔面镀膜[J] . 光学 精密工程, 2010, 18(6) : 1251-1263.
LI Z J, HU L M, WANG Y, *et al.* . Facet coating for 808 nm Al-containing semiconductor laser diodes[J] . *Opt. Precision Eng.* , 2010, 18(6) : 1251-1263. (in Chinese)
- [12] KUZNETSOV M, HAKIMI F, SPRAGUE R, *et al.* . Design and characteristics of high-power(> 0. 5 W CW) diode

- pumped vertical external cavity surface emitting semiconductor lasers with circular TEM₀₀ beams[J] . *IEEE Quantum Electron*, 1999, 5(3) : 561-573.
- [13] SEURIN J-F, XU G Y, WANG Q, *et al.* . High-brightness pump sources using 2D VCSEL arrays[J] . *SPIE*, 2010, 7615: 76150F.
- [14] HEALY S B, O REILLY E P, GUSTAVSSON J S, *et al.* . Active region design for high-speed 850 nm VCSELs[J] . *IEEE J. Quantum Electronics*, 2010, 46(4) : 506-512.
- [15] LIU G J, BO B X, MA X H, *et al.* . Study on high power semiconductor laser arrays and output beam shaping[J] . *SPIE*, 2009, 7382: 738201.
- [16] SIEGMAN A E. New developments in laser resonators[J] . *SPIE*, 1990, 1224: 2-14.
- [17] 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(4) : 641-645.
LI T, NING Y Q, SUN Y F, *et al.* . Beam quality of 980 nm high power vertical-cavity surface-emitting laser[J] . *Chinese J. Laser*, 2007, 34(4) : 641-645. (in Chinese)
- [18] 宁永强, 李特, 秦莉, 等. 980 nm 大功率垂直腔面发射激光器温度和远场分布特性[J] . *红外与激光工程*, 2008, 37(6) : 984-986.
NING Y Q, LI T, QIN L, *et al.* . Temperature and far-field distribution characteristics of 980 nm high power VCSEL[J] . *Infrared and Laser Eng.* , 2008, 37(6) : 984-986. (in Chinese)

作者简介: 丛海兵(1983—), 男, 内蒙古赤峰市人, 硕士研究生, 主要从事半导体光电子器件方面的研究。

E-mail: cong. haibing@ 163. com

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