

# 非对称电流注入对矩形台面激光器的偏振分析

李秀山<sup>1,2</sup> 宁永强<sup>1</sup> 崔锦江<sup>3</sup> 张星<sup>1</sup> 贾鹏<sup>1,2</sup> 黄佑文<sup>1,2</sup> 钟础宇<sup>1,2</sup> 秦莉<sup>1</sup> 刘云<sup>1</sup> 王立军<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

<sup>3</sup>中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163

**摘要** 为了获得高稳定性的偏振光, 研制了氧化孔区域为  $70\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$  的非对称电流注入的矩形台面垂直腔面发射激光器(ACIR-VCSEL)。在室温下, 注入连续直流电流, 实验测试得到 ACIR-VCSEL 的斜率效率为  $0.483\ \text{W/A}$ , 微分串联电阻为  $23.5\ \Omega$ 。在电流注入过程中, ACIR-VCSEL 以稳定的平行于长边的偏振光输出, 功率偏振比始终大于 5。当电流为  $15\ \text{mA}$  时, 功率偏振比的最大值为 14。在相同的测试条件下, 氧化孔径大小同为  $70\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$  的环形电流注入矩形台面 VCSEL (RCIR-VCSEL) 的斜率效率为  $0.568\ \text{W/A}$ , 微分串联电阻为  $18.1\ \Omega$ , 偏振功率比值最大值为 9, 最小值为 2.6。RCIR-VCSEL 与 ACIR-VCSEL 的输出特性相比, 虽然 RCIR-VCSEL 比 ACIR-VCSEL 的斜率效率高, 串联微分电阻小, 但是 ACIR-VCSEL 的偏振稳定性和最大偏振比值比 RCIR-VCSEL 增强。

**关键词** 激光器; 垂直腔面发射激光器; 非对称电流注入; 偏振; 矩形台面

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.071402

## Polarization Properties of Rectangle-Shape VCSEL with Asymmetrical Current Injection

Li XiuShan<sup>1,2</sup> Ning Yongqiang<sup>1</sup> Cui Jingjiang<sup>3</sup> Zhang Xing<sup>1</sup> Jia Peng<sup>1</sup>  
Huang Youweng<sup>1,2</sup> Zhong Chuyu<sup>1,2</sup> Qin Li<sup>1</sup> Liu Yun<sup>1</sup> Wang Lijun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>3</sup>Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China

**Abstract** In order to obtain stable polarization laser, asymmetrical current injection into rectangle-shape vertical cavity surface emitting laser (ACIR-VCSEL) with oxidation aperture dimension of  $70\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$  is studied and manufactured. Room temperature (RT) continuous-wave (CW) light-current-voltage characteristics of a VCSEL described above are tested. Slope efficiency is  $0.483\ \text{W/A}$  with differential series resistance of  $23.5\ \Omega$ . The orthogonal polarization suppression ratio is more than 5 over the whole range of operating current. The maximum power polarization ratio is 14 at current of  $15\ \text{mA}$ . Ring current injection into rectangular VCSEL (RCIR-VCSEL) with the same oxidation aperture dimensions of ACIR-VCSEL is also studied as a comparison. In the same test conditions, the slope efficiency is  $0.568\ \text{W/A}$  with differential series resistance of  $18.1\ \Omega$ . The minimum orthogonal polarization suppression ratio is more than 2.6 over the whole range of operating current and the maximum power polarization ratio is 9. For ACIR-VCSEL, although the slope efficiency is a little decrease and the differential series resistance increases, the maximum polarization ratio effectively increases and more stable polarization is achieved.

收稿日期: 2015-03-01; 收到修改稿日期: 2015-03-09; 网络出版日期: 2015-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(61234004, 51172225, 61204056, 61376070, 61474118, 61176045, 61204055), 吉林省科技厅项目(20140101172JC, 20130206006GX), 江苏省自然科学基金(BK2012188)

作者简介: 李秀山(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事新型半导体光电子器件方面的研究。E-mail: jinglexiushan@163.com

导师简介: 宁永强(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为新型半导体激光器方面的研究。

E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn(通信联系人)

**Key words** lasers; vertical cavity surface emitting laser; asymmetric current injection; polarization; rectangle post

**OCIS codes** 140.7260; 230.5440; 140.5960; 260.5430

## 1 引言

垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)相比于边发射激光器,具有阈值电流低、工艺简单、在片测试、列阵集成高、封装成本低、可靠性好等优点,广泛应用于短距离光传输、光储存、激光打印、光谱分析等领域<sup>[1-4]</sup>。垂直腔面发射激光器在布拉格反射镜(DBR)的电光效应的影响下,输出光的偏振方向沿 $[110]$ 和 $[\bar{1}\bar{1}0]$ 两个晶向<sup>[5]</sup>。在上述两个方向上,由于有源区的均匀性增益、圆形波导和布拉格反射镜对光的均匀性限制,导致圆形台面VCSEL对两个偏振方向的控制很弱。偏振方向不稳定性限制了VCSEL在光通讯、光互联等领域应用。

为了获得稳定的偏振方向,通常采用如下几种方式来控制VCSEL偏振,外腔光反馈<sup>[6]</sup>,但是这种方式制作的器件结构不稳定,并且需要精确的光路调制,有源区的各向异性生长<sup>[7]</sup>需要严格的实验条件。面集成光栅<sup>[8]</sup>和光子晶体<sup>[9]</sup>这两种方式制作工艺需要在普通VCSEL的基础上,在出光表面分别刻蚀光栅和小孔,增加了制作成本及制作工艺难度。采用引入非均匀腔<sup>[10]</sup>控制偏振的方式简单,只需制作一个非均匀的台面即可实现偏振控制。相比于其他几种方式,此方法的制作工艺简单、成本低,已有大量研究报道采用了这种方案<sup>[11-13]</sup>。非均匀台面VCSEL的一个典型结构是矩形台面VCSEL<sup>[14]</sup>。利用环状电流注入矩形台面VCSEL(RCIR-VCSEL)结构实现了稳定的偏振控制。这是因为电流从台面的长边比短边注入有源区多,造成有源区沿长边方向比沿短边方向的增益高和损耗小,偏振控制在沿长边方向<sup>[15]</sup>。但是电流从台面的四周注入有源区,从台面的长边和短边分别注入有源区的非对称性不高。研究如何提高从长边和短边注入有源区电流的非对称性对提升偏振输出的稳定性具有科学意义。

为此,本文研制了在台面两端刻蚀孔洞阻止电流从短边注入有源区,只允许电流从长边注入有源区的非环状电极矩形台面VCSEL(ACIR-VCSEL)。相比于环形电流注入矩形台面VCSEL,该结构的长边和短边注入有源区电流的非对称性将提高,有源区沿长边比短边的增益差值也将增大,沿长边的偏振稳定性也将进一步提高。为了提高工艺的简洁性,在刻蚀矩形台面时,同时在矩形台面的两个端点处刻蚀出两个孔洞,刻蚀深度和台面刻蚀深度相同。在台面被侧氧化时,孔洞和台面一起被侧氧化。电流从短边注入有源区时被刻蚀出的孔洞阻止,电流只允许从长边注入有源区。该结构长边的电极集成一起,制作工艺简单,只需和普通矩形台面结构一样,通过光刻,台面刻蚀,侧氧化等步骤即可实现。

## 2 器件结构及制作工艺

ACIR-VCSEL结构示意图如图1(a)所示。矩形台面结构的VCSEL是通过金属有机化学气相沉积法(MOCVD)在N型GaAs衬底 $[001]$ 面生长而成,DBR由 $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 交替组成,为了减小电阻, $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ 层与 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 层之间是厚度为20 nm的渐变层。其中,P型由23对C掺杂的DBR组成,N型由34.5对Si掺杂的DBR组成。由3个周期性增益构成的GaAs量子阱组成的有源区位于P型DBR和N型DBR之间,形成三明治结构,量子阱每层厚度为6 nm,量子阱间被厚度为8 nm的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 分隔开。30 nm厚的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 位于靠近有源区的P型DBR中,替代部分 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 。

在P型DBR表面用等离子体增强化学气相沉积法(PECVD)生长一层 $\text{SiO}_2$ ,在 $\text{SiO}_2$ 表面用光刻的方法制作图案如图1(b)所示,其中,位于矩形的两个短边处各包含一个孔洞,矩形的长边平行于衬底 $[110]$ 方向。首先用电感耦合等离子体(ICP)以光刻胶为掩模对 $\text{SiO}_2$ 刻蚀,使得胶形成的图案转移到 $\text{SiO}_2$ ,去掉 $\text{SiO}_2$ 表面的胶并进行清洗。以 $\text{SiO}_2$ 为掩模,继续用ICP对外延片P面干法刻蚀至刚好刻蚀掉 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 层为止,这样形成带有双孔洞的矩形台面。在通有420 °C水蒸气的氧化炉中对外延片侧氧化,去掉表面残留 $\text{SiO}_2$ 。在P面大面积生长 $\text{SiO}_2$ ,起到防止电极短路的作用,再次光刻,HF溶液腐蚀掉台面表面的 $\text{SiO}_2$ 后形成P面电极孔。采用Lift-off工艺,P面生长Ti/Pt/Au形成P面电极。为了减小串联电阻和增加散热,减薄N型衬底至150  $\mu\text{m}$ 并抛光。在N型衬底表面生长Au/Ge/Ni/Au作为N面电极,这是为了增强Au与衬底的粘附并减小接触电阻,N面电极使用合金。

解理制备完成的外延片,形成以台面为中心,边长为1 mm的正方形单管。封装后,在室温条件下,注入连续的直流电,测试矩形台面VCSEL的功率( $P$ )、电流( $I$ )、电压( $V$ )等特性。

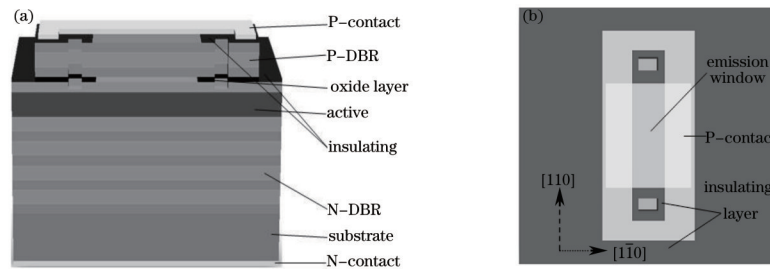


图1 非对称电流注入矩形台面VCSEL的器件结构。(a)示意图;(b)俯视图

Fig.1 Structure of asymmetrical current injection into rectangular mesa VCSEL. (a) Schematic illustration; (b) top view

### 3 结果与讨论

在连续直流电注入下,分别测试了ACIR-VCSEL和RCIR-VCSEL的功率-电流-电压( $P-I-V$ )特性以及偏振平行于长边和短边两个方向的光功率。室温下,有源区边长为 $70\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ 的ACIR-VCSEL的 $P-I-V$ 曲线如图2中虚线所示。阈值电流为6 mA,在6~34 mA之间,斜率效率为0.483 W/A,微分串联电阻为 $23.5\ \Omega$ 。相同有源区形状的RCIR-VCSEL的 $P-I-V$ 曲线如图2中实线显示,阈值电流也为6 mA,在6~34 mA之间,斜率效率为0.568 W/A,微分串联电阻为 $18.1\ \Omega$ 。图2插图所示光谱曲线表明中心波长为864.8 nm,光谱半峰全宽为0.6 nm。

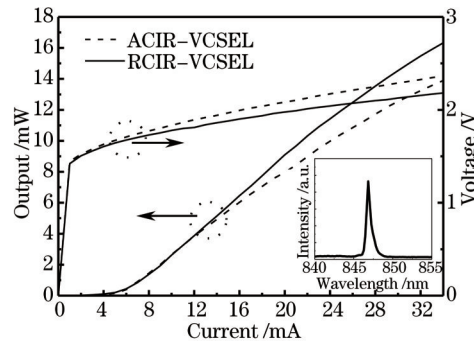


图2 室温下,氧化孔区域为 $70\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ 的矩形台面VCSEL在连续直流注入时的 $P-I-V$ 曲线和激光光谱(插图)

Fig.2 Measured static  $P-I-V$  characteristics of rectangle post with oxide-aperture area of  $70\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$  and lasing spectrum (inset picture) at room temperature

矩形台面VCSEL的非对称电流注入相比于环形电流注入,由于金属电极和VCSEL表面的GaAs接触面积减小,在同等条件下,虽然ACIR-VCSEL和RCIR-VCSEL结构参数完全相同,但ACIR-VCSEL比RCIR-VCSEL的电阻 $R$ 大<sup>[6]</sup>,所以ACIR-VCSEL比RCIR-VCSEL输出功率小。

在光路系统中插入偏振片后,调节偏振片的偏振方向与 $[110]$ 晶向分别平行和垂直,测试得到ACIR-VCSEL在 $[110]$ 晶向和 $[1\bar{1}0]$ 晶向的偏振功率,结果如图3中曲线所示,沿 $[110]$ 晶向的偏振输出功率始终大于沿 $[1\bar{1}0]$ 晶向的偏振功率。 $[110]$ 晶向和 $[1\bar{1}0]$ 晶向的偏振功率之和小于图2中ACIR-VCSEL的总功率,这是因为测试过程中,偏振片对测试光路系统中的光产生散射和吸收损耗,导致输出功率减小。红线是沿 $[110]$ 晶向的偏振功率和 $[1\bar{1}0]$ 晶向的偏振功率的比值,在注入电流为15 mA时,偏振功率比值最高为14,偏振功率比在电流注入过程中始终大于6。同样的方式测试RCIR-VCSEL在 $[110]$ 和 $[1\bar{1}0]$ 晶向的偏振功率如图4所示。尽管RCIR-VCSEL的偏振方向也是稳定控制在 $[110]$ 晶向,但是偏振功率比值最大值为9,最小值为2.6。表明ACIR-VCSEL比RCIR-VCSEL的偏振比高,偏振性稳定,进而证明非对称电流注入能够改善矩形台面的偏振特性。矩形台面VCSEL产生偏振的原因是长边电极比短边电极注入有源区的电流多,引起有源区沿长边方向比短边的增益多和损耗小,导致偏振方向平行于晶向为 $[110]$ 的长边方向<sup>[15,17]</sup>。相比RCIR-VCSEL,ACIR-VCSEL只有长边电极注入电流到有源区,短边没有电流注入有源区,长边比短边注入有源区的电流比率增加,引起长边与短边的增益比率也增加,即沿 $[110]$ 晶向和沿 $[1\bar{1}0]$ 晶向的偏振功率比增加。图3、4中偏振比都是随着电流的增加先增加后减小,是因为在注入电流较低时,器件产生的热量小,有源区温度低,有源区在 $[110]$ 晶向增益的增速比在 $[1\bar{1}0]$ 晶向快,功率的增速增加,功率偏振比随之增加。随

随着电流的增加,热效应开始呈现,有源区温度升高,热效应形成的透镜作用,高阶模式开始激射,在 $[1\bar{1}0]$ 晶向偏振功率增加速率比在 $[110]$ 晶向的快,两方向的功率偏振比减小。

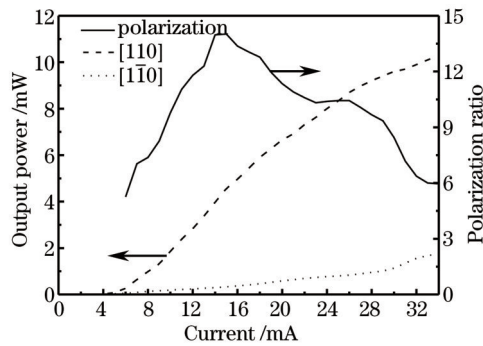


图3 室温下,氧化孔区域为 $70\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ 的非对称电流注入矩形台面在 $[110]$ 晶向和 $[1\bar{1}0]$ 晶向的偏振光输出及偏振比

Fig.3 Polarization resolved optical output power and calculated polarization ratio of the asymmetrical current injection into rectangle post VCSEL with an oxide-aperture area of  $70\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$  along the directions of  $[110]$  and  $[1\bar{1}0]$  at room temperature

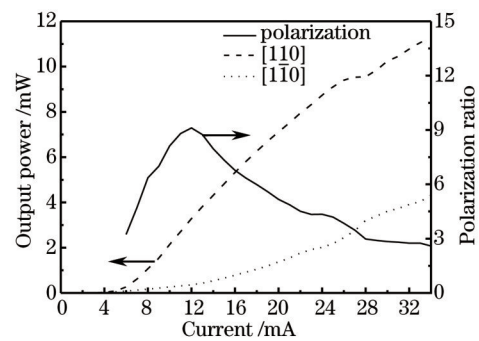


图4 室温下,氧化孔区域 $70\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ 环形电流注入矩形台面在 $[110]$ 晶向和 $[1\bar{1}0]$ 晶向的偏振光输出及偏振比

Fig.4 Polarization resolved optical output power and calculated polarization ratio of ring current injection into rectangle post VCSEL with an oxide-aperture area of  $70\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$  along the directions of  $[110]$  and  $[1\bar{1}0]$  at room temperature

## 4 结 论

研究了非对称电流注入矩形台面出光中心波长为 $850\ \text{nm}$  VCSEL的偏振特性,并且和环形电流注入矩形台面 VCSEL的输出特性进行对比。室温下,在连续直流电注入有源区的条件下测试,两种结构都能够稳定的控制偏振光输出,非对称电流注入矩形台面 VCSEL相比于环形电流注入矩形台面 VCSEL,它的最大功率偏振比从9提高到14,但是微分串联电阻从 $18.1\ \Omega$ 增大到 $23.5\ \Omega$ ,斜率效率由 $0.568\ \text{W/A}$ 降低到 $0.483\ \text{W/A}$ 。研究表明,非对称电流注入更有利于对矩形台面 VCSEL的偏振控制,该研究为提高矩形台面的偏振特性提供了良好的科学方法。

## 参 考 文 献

- Li Jianjun, Cui Bifeng, Deng Jun, *et al.*. 980 nm high power semiconductor laser with asymmetric super large optical cavity[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1102011.  
李建军, 崔碧峰, 邓 军, 等. 非对称超大光腔 980 nm 大功率半导体激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1102011.
- Jiang Kai, Li Peixu, Shen Yan, *et al.*. 76% maximum wall plug efficiency of 940 nm laser diode with step graded index structure[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0402003.  
蒋 锴, 李沛旭, 沈 燕, 等. 76% 光电转换效率梯度渐变折射率结构 940 nm 半导体激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0402003.
- Zhang Jianwei, Ning Yongqiang, Zhang Xing, *et al.*. Gain-cavity mode detuning vertical cavity surface emitting laser operating at the high temperature[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0502001.  
张建伟, 宁永强, 张 星, 等. 增益-腔模失配型高温工作垂直腔面发射半导体激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0502001.
- Jia Peng, Qin Li, Cui Jingjiang, *et al.*. Research on the spatial coherent characteristics of high power VCSEL[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1202007.  
贾 鹏, 秦 莉, 崔锦江, 等. 大功率 VCSEL 器件的空间相干性的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1202007.
- M P van Exter, A K Jansen van Doorn, J P Woerdman. Electro-optic effect and birefringence in semiconductor vertical-cavity lasers[J]. Phys Rev A, 1997, 56(1): 845-853.
- Zhou Zhenli, Xia Guangqiong, Deng Tao, *et al.*. Multiple polarization switching in mutually coupled vertical-cavity surface emitting lasers[J]. Acta Phys Sin, 2015, 64(2): 024208.  
周桢力, 夏光琼, 邓 涛, 等. 互注入垂直腔表面发射激光器的多次偏振转换特性研究[J]. 物理学报, 2015, 64(2): 024208.
- Hideaki Saito, Kenichi Nishi, Shigeo Sugou, *et al.*. Controlling polarization of quantum-dot surface-emitting lasers by

- using structurally anisotropic self-assembled quantum dots[J]. *Appl Phys Lett*, 1997, 71(5): 590-592.
- 8 Li Shuo, Guan Baolu, Shi Guozhu, *et al.*. Polarization stable vertical-cavity surface-emitting laser with surface sub-wavelength gratings[J]. *Acta Phys Sin*, 2012, 61(18): 184208.
- 李 硕, 关宝璐, 史国柱, 等. 亚波长光栅调制的偏振稳定垂直腔面发射激光器研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(18): 184208.
- 9 Tian Cao, Chen Xu, Simin Wei, *et al.*. Polarization-controlled single-mode photonic-crystal VCSEL[C]. *SPIE*, 2012, 8333: 83330L.
- 10 K D Choquette, R E Leibenguth. Control of vertical-cavity laser polarization with anisotropic transverse cavity geometries[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, 6(1): 40-42.
- 11 C L Chua, R L Thornton, D W Treat, *et al.*. Anisotropic apertures for polarization-stable laterally oxidized vertical-cavity lasers[J]. *Appl Phys Lett*, 1998, 72(12): 1631-1633.
- 12 T Yoshikawa, H Kosaka, K Kurihara, *et al.*. Complete polarization control of 8×8 vertical cavity surface emitting laser matrix arrays[J]. *Appl Phys Lett*, 1995, 66(8): 908-910.
- 13 N A Loiko, I V Babushkin. Competition of orthogonally polarized transverse Fourier modes in a VCSEL[J]. *J Opt B: Quantum Semiclassical Opt*, 2001, 3(2): S234-S243.
- 14 Wang Wei, Ning Yongqiang, Zhang Jinglong, *et al.*. Polarization properties of high power vertical cavity bottom emitting lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0302002.
- 王 伟, 宁永强, 张金龙, 等. 高功率垂直腔底发射激光器的偏振特性[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0302002.
- 15 G Verschaffelt, W Van der Vleuten, M Creusen, *et al.*. Polarization stabilization in vertical-cavity surface-emitting lasers through asymmetric current injection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(8): 945-947.
- 16 Zhang Xing, Ning Yongqiang, Zeng Yugang, *et al.*. Optimization of element structure in 980 nm high power vertical cavity surface emitting laser array[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(9): 2014-2021.
- 张 星, 宁永强, 曾玉刚, 等. 980 nm 高功率垂直腔面发射激光阵列的单元结构优化[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 2014-2021.
- 17 W Wang, Y Q Ning, Z H Tian, *et al.*. Coherent polarization stabilization in large-aperture rectangular post bottom-emitting vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(5): 1335-1338.

栏目编辑: 宋梅梅