

# 大功率垂直腔底发射激光器的偏振特性

王伟<sup>1,2</sup> 宁永强<sup>1</sup> 张金龙<sup>1</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及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)  
(<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 在垂直腔面发射激光器(VCSEL)作为显示光源的应用中,为了获得大功率的偏振激光,研究了 980 nm 大口径底发射 VCSEL 的偏振特性。通过刻蚀矩形台面和矩形出光口径,制备矩形 VCSEL。在连续条件下,出光口径为  $550\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$  的底发射矩形 VCSEL 最大输出功率为 660 mW,微分电阻为  $0.09\ \Omega$ 。实验中,矩形 VCSEL 在工作电流下,同时存在稳定的水平偏振光和竖直偏振光,并且沿着矩形长边出射的水平偏振光一直占据主导地位。而圆形 VCSEL 在水平和竖直方向的激射情况几乎相同。水平偏振光的激射光谱相对于竖直偏振光出现蓝移,并且用对称三层波导模型解释了蓝移现象。研究了矩形 VCSEL 的正交偏振比与矩形口径长宽比的关系。实验结果表明,矩形柱结构能够有效地稳定 VCSEL 的偏振方向,使大口径器件激射大功率的偏振激光。

**关键词** 激光器;垂直腔面发射激光器;偏振;矩形柱;大口径;蓝移

**中图分类号** TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0302002

## Polarization Properties of High-Power Vertical-Cavity Bottom-Emitting Lasers

Wang Wei<sup>1,2</sup> Ning Yongqiang<sup>1</sup> Zhang Jinlong<sup>1</sup> Qin Li<sup>1</sup> Liu Yun<sup>1</sup> Wang Lijun<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>National Key Laboratory of Luminescence and Their Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)  
(<sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** When using vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSEL) as laser source, in order to obtain high-power polarized laser, polarization feature 980 nm large-aperture bottom-emitting VCSEL is investigated in this paper. A rectangular-shaped VCSEL is fabricated by etching rectangular mesa structure and rectangular output aperture. The maximum power of bottom-emitting rectangular-shaped VCSEL is 660 mW with  $550\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$  output aperture under continuous wave condition, and the differential resistance is  $0.09\ \Omega$ . It is found that H-polarization (horizontal) and V-polarization (vertical) demonstrated steadily coexistence over the entire range of operation current. And H-polarization dominated over V-polarization which is parallel to the shorter side of the rectangular output aperture. Compared with the circular-shaped VCSEL, both H-polarization and V-polarization nearly have the same lasing situation. Spectrum blue-shift of H-polarization light occurs with respect to V-polarization light. This phenomenon is explained by the symmetric three layer waveguide model. The dependence of the orthogonal polarization ratio on the aspect ratio of the output aperture is investigated in the rectangular-shaped VCSEL. It is found that the rectangular post is an effective way to stabilize the output polarization of large-aperture VCSEL, which can emit high-power polarized laser.

**Key words** lasers; vertical-cavity surface-emitting lasers; polarization; rectangular post; large-aperture; blue-shift

**OCIS codes** 140.7260; 230.5440; 250.5960; 250.7260; 260.5430

收稿日期: 2011-10-13; 收到修改稿日期: 2011-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(60636020, 60706007, 10974012, 60876036, 90923037, 11074247, 61006054)资助课题。

作者简介: 王伟(1984—),男,博士研究生,主要从事大功率垂直腔面发射激光器的偏振特性方面的研究。

E-mail: wjwciomp@163.com

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等方面的研究。

E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn(通信联系人)

# 1 引 言

近几十年来,垂直腔面发射激光器(VCSEL)一直吸引着研究人员的广泛关注,相比于边发射激光器(EEL)VCSEL有很多优点,比如低阈值电流、低制作成本、单纵模输出和便于二维集成等<sup>[1]</sup>。传统EEL的结构使得其激射的TE模和TM模有很大的增益差,所以EEL有相对单一的偏振方向<sup>[2]</sup>。而VCSEL一般生长在(100)衬底上,制备成圆柱状结构,具备良好的均匀对称性,理论上VCSEL可以激射任意方向上的线性偏振光,因此VCSEL的偏振方向很不稳定<sup>[3]</sup>,从而限制了VCSEL在光源、光通信和光抽运等领域的应用。为了有效地稳定和控制VCSEL的偏振方向,到目前为止国际上报道了很多种方法,例如引进非均匀腔和非均匀有源区<sup>[4]</sup>、集成面光栅结构<sup>[5]</sup>、金属纳米孔径的等离子共振<sup>[6]</sup>、外腔反馈<sup>[7]</sup>、生长在倾斜衬底上<sup>[8]</sup>、电光双折射效应<sup>[9]</sup>和光子晶体<sup>[10]</sup>等。

虽然上述已报道的VCSEL偏振控制方案能够使得一般的面发射器件激射出稳定的偏振光,但是那些器件都是小口径器件,本身激射的模式就是集中在几个低阶模式之间。而对于高功率输出的激光显示光源来说,需要将VCSEL做成大口径(大于100 μm)的底发射器件。通常的大口径垂直腔面发射激光器大多为多横模单纵模出射<sup>[11]</sup>,上述的方案

在大口径VCSEL中稳定偏振的效果目前还未见报道,因此研究大口径垂直腔面发射激光器的偏振特性非常有现实意义和应用前景。本文将在VCSEL中引入矩形柱结构,提升增益的非均匀性,从而稳定大口径VCSEL的偏振方向,获得高功率偏振激光输出,对于VCSEL的激光倍频和高功率VCSEL的阵列研究也提供了一定的参考<sup>[12,13]</sup>。

# 2 器件结构与制作

底发射VCSEL的器件结构如图1所示。VCSEL的外延片是用金属有机化学气相沉积法(MOCVD)在GaAs(001)衬底上生长而成的,有源区是周期增益结构,由3个厚度为6 nm的In<sub>0.17</sub>Ga<sub>0.83</sub>As量子阱构成,量子阱周围是厚度为8 nm的GaAs<sub>0.92</sub>P<sub>0.08</sub>势垒,激射波长为980 nm。有源区由P型和N型的分布布拉格反射器(DBR)所包围。P-DBR是由30对碳掺杂(粒子浓度 $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )的Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As/Al<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As组成,N-DBR由28对硅掺杂(粒子浓度 $1.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )的Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As/Al<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As组成。在P-DBR和有源区之间有一层材料为Al<sub>0.98</sub>Ga<sub>0.02</sub>As的高铝层,通过湿法氧化这层高铝层可获得底发射VCSEL的氧化限制孔径,从而限制器件的光场和电流。

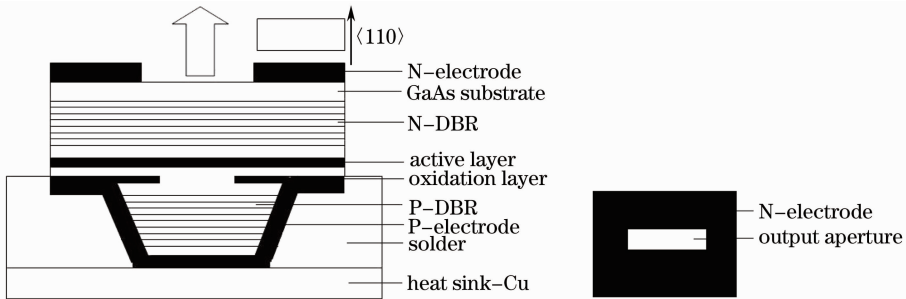


图1 980 nm底发射矩形VCSEL器件结构和俯视图

Fig.1 Schematic structure and top-view of 980 nm bottom-emitting rectangular-shaped VCSEL

先用光刻法在P面刻蚀出器件的矩形图形,接着用湿法刻蚀的方法制作矩形台面,使得矩形台面的短边沿着衬底的<110>晶向,相应的矩形长边就沿着<110>晶向,刻蚀的深度控制在高铝层和有源区之间,为下一步侧氧化做准备。侧氧化后,在P面上大面积蒸发SiO<sub>2</sub>薄膜作为钝化层以防止焊接时器件短路。刻蚀掉矩形台面上的SiO<sub>2</sub>制备矩形电极接触窗口,P面欧姆接触电极采用Ti/Pt/Au结构。为降低损耗,N面减薄、抛光到180 μm厚。采用双面对准工艺在N面形成矩形的出光窗口,N面

电极采用真空热蒸发AuGeNi/Au<sup>[14]</sup>。为了热扩散和测试纯器件功率,N面出光窗口未采用透增膜敷。最后对所有器件进行了解理,并且焊接到铜块热沉上进行封装。

# 3 实验结果与讨论

测试过程在室温下进行,采用直流电流驱动,测试条件均为连续条件。图2显示的是底发射矩形VCSEL的光功率-电流-电压(P-I-V)曲线和激光光谱,矩形的出光口径为550 μm×300 μm。由图2可

知,在注入电流为 5 A 时,矩形 VCSEL 的激光光功率达到饱和,最高出射功率为 660 mW。器件的阈值电流为 70 mA,阈值电流密度为 103.7 A/cm<sup>2</sup>,斜率效率为 0.15 W/A,电光转换效率为 4.5%,微分电阻为 0.09 Ω。斜率效率和电光转换效率比较低,这可能是由器件的热饱和和效应引起的。在底发射矩形 VCSEL 的激光光谱中,中心波长为 992.7 nm,光谱的半峰全宽为 1.3 nm。由此可见,在没有加增透膜的情况下,矩形 VCSEL 展现了较好的激光性能。

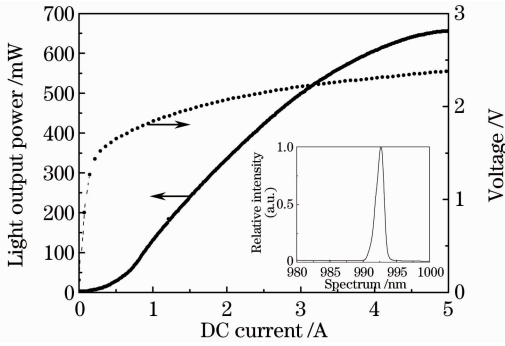


图 2 底发射矩形 VCSEL(出光口径为 550 μm×300 μm)的 P-I-V 曲线和激光光谱(插图)

Fig. 2 Light power-current-voltage (P-I-V) curve and lasing spectrum (inset picture) of rectangular-shaped VCSEL with 550 μm×300 μm output aperture

为了测试矩形底发射 VCSEL 的偏振特性,利用偏振分光棱镜(PBS)将出射激光分成透射光和反射光。由于矩形出光窗口的长边和短边分别沿着 <110>和 <1-10>晶向,所以将沿着矩形口径长边方向出射的激光定义为水平偏振光(H-polarization),沿着短边方向出射的激光定义为竖直偏振光(V-polarization)。图 3 所示为矩形 VCSEL 和直径为 300 μm 的圆形 VCSEL 的功率偏振比较,其中图 3(a)为出光口径为 550 μm×300 μm 的矩形 VCSEL,图 3(b)为直径为 300 μm 的圆形 VCSEL。由于矩形的长宽面注入电流的不同,所以横坐标用统一的电流线密度表示。由图 3(a)可知,在整个工作电流密度范围内,矩形 VCSEL 的水平偏振光和竖直偏振光共同存在,一直呈现线性稳定的状态;而且相对于竖直偏振光,水平偏振光一直占据主导地位,是主要的偏振光<sup>[15]</sup>。同时,由图 3(b)可知,在整个工作电流密度下,圆形 VCSEL 的水平偏振光和竖直偏振光展现了几乎相同的激光情况,这是圆形 VCSEL 对称的圆柱状结构导致的。从矩形和圆形 VCSEL 的功率偏振比较来看,矩形柱结构很好地将

大口径 VCSEL 的偏振方向稳定在水平方向和竖直方向,并且获得了高功率的偏振激光。

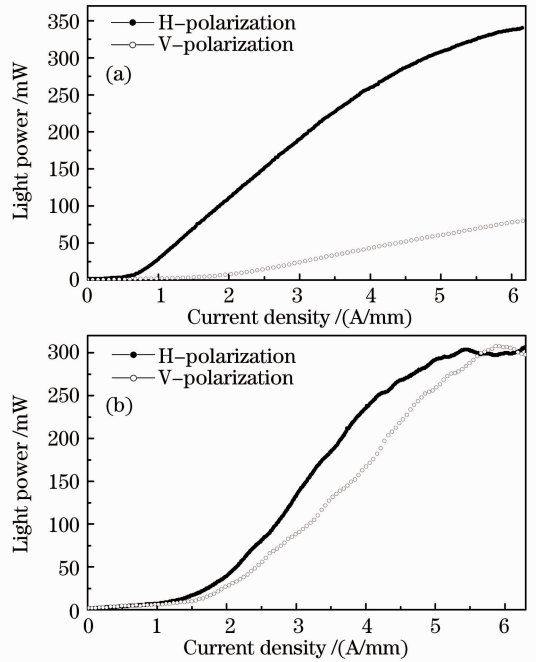


图 3 矩形 VCSEL 和圆形 VCSEL 的功率偏振比较。

(a) 出光口径为 550 μm×300 μm;(b) 直径为 300 μm

Fig. 3 Comparison of power polarization between rectangular-shaped and circular-shaped VCSEL. (a) 550 μm×300 μm output aperture; (b) 300 μm diameter

图 4 所示为出光口径为 550 μm×300 μm 的矩形 VCSEL 中水平偏振光和竖直偏振光的激光光谱,此时的注入电流为 2.5 A。从图中可以发现,水平偏振光的光谱相对于竖直偏振光出现了蓝移,即水平偏振光的中心波长比竖直偏振光的中心波长短,波长差约为 1 nm。这个现象可以用水平方向和

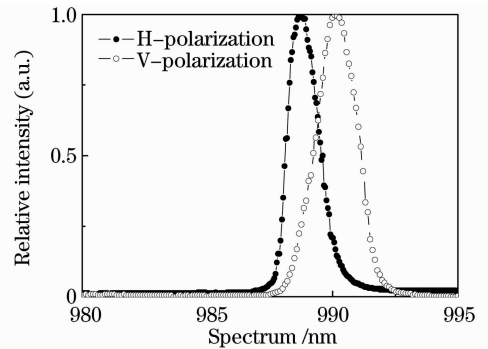


图 4 出光口径为 550 μm×300 μm 的矩形 VCSEL 中水平偏振光和竖直偏振光的激光光谱

Fig. 4 Lasing spectrum of H-polarization and V-polarization for rectangular-shaped VCSEL with 550 μm×300 μm output aperture

垂直方向的波导传输理论来解释。将矩形口径看作夹在周围空气层中的芯层,在沿着矩形任一边长的方向上,最上层和最下层都是空气层,可以认为是包层,中间层是材料为 GaAs 的芯层。由于芯层的折射率大于最上层和最下层的空气层,这样就可以构成简单的对称三层波导,横向传播常数的本征值方程为

$$qd = 2\arctan\left[\frac{\sqrt{k_0^2(n_1^2 - n_0^2) - q^2}}{q}\right] + m\pi, \quad (1)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

式中  $q$  为横向传播常数,  $d$  为矩形口径的长或宽,  $k_0$  为波矢( $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ ,  $\lambda_0 = 980 \text{ nm}$  为器件的激光波长),  $n_1$  为矩形口径的折射率(矩形口径的材料为 GaAs,  $n_1 = 3.6$ ),  $n_0$  为空气的折射率( $n_0 = 1$ )。为简单起见,只考虑零阶模式时的情况( $m = 0$ ),横向传播常数  $q$  和矩形任一边长  $d$  的关系如图 5 所示。而光的纵向传播常数  $\beta$  可以表示为

$$\beta = \sqrt{k_0^2 n_1^2 - q^2}. \quad (2)$$

对于矩形的出光口径,长边的长度记作  $d_H$ ,短边的长度记作  $d_V$ ,  $d_H > d_V$ 。结合(1)、(2)式和图 5 可知  $\beta_H > \beta_V$ 。而纵向传播常数也可以写作

$$\beta = n_{\text{eff}} \cdot \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (3)$$

式中  $n_{\text{eff}}$  为有效折射率。利用加权平均  $n_{\text{eff}} = \frac{n_{\text{eff}}^{d_H} d_H + n_{\text{eff}}^{d_V} d_V}{d_H + d_V}$  使得水平偏振光和垂直偏振光的有效折射率相等,所以  $\lambda_H < \lambda_V$ 。因此在矩形 VCSEL 中,长边方向激光的波长反而比短边方向的激光波长短,从而解释了图 4 中的光谱蓝移现象。

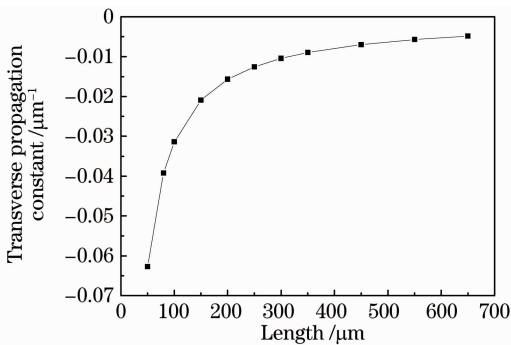


图 5 横向传播常数和矩形任一边长的关系

Fig. 5 Dependence of the transverse propagation constant on either length of the rectangle

水平偏振光和垂直偏振光的偏振比与矩形出光口径长宽比的关系如图 6 所示。由图 6 可知,正交偏振比和矩形口径的长宽比并没有展现出特定的关

系,并不是矩形口径的长宽比越大,VCSEL 的正交偏振比就越大。在所有制备的器件中,最好的偏振比接近 2。这可能是因为在大口径 VCSEL 中,大量复杂的高阶横模被激射出来,并且模式之间相互耦合,相互影响,最终使得在器件的长宽比较小(小于 10)时,器件输出的偏振比不是特别高,这也是需要进一步改善的方面。

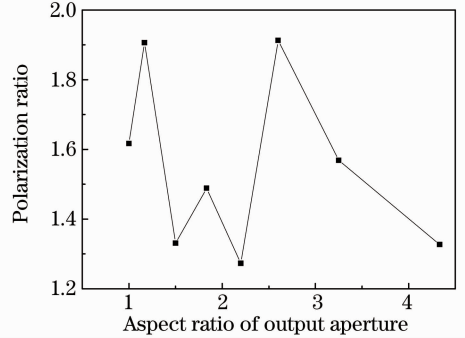


图 6 水平偏振光和垂直偏振光的偏振比和矩形口径长宽比的关系

Fig. 6 Dependence of polarization ratio for H-polarization and V-polarization on the aspect ratio of the rectangular output aperture

## 4 结 论

为了研究大口径垂直腔面发射激光器的偏振特性,在 980 nm 底发射 VCSEL 中引入了矩形柱结构。实验结果表明,矩形 VCSEL 在工作电流下同时存在稳定的水平偏振光和垂直偏振光,并且沿着矩形长边出射的水平偏振光一直占据主导地位。而由于圆柱状对称结构,圆形 VCSEL 在水平和垂直方向的激射情况几乎相同。水平偏振光的激射光谱相对于垂直偏振光的光谱发生了蓝移,这可以用简化的对称三层波导理论解释。最后研究了矩形 VCSEL 的正交偏振比与矩形口径长宽比的关系,发现最高的偏振比接近 2,大口径 VCSEL 的偏振特性仍然需要进一步的改善。

## 参 考 文 献

- 1 Valle, M. Sciamanna, K. Panajotov. Nonlinear dynamics of the polarization of multitransverse mode vertical-cavity surface-emitting lasers under current modulation[J]. *Phys. Rev. E.*, 2007, **76**(4): 046206
- 2 D. Burak, J. V. Moloney, R. Binder. Macroscopic versus microscopic description of polarization properties of optically anisotropic vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(8): 956~970
- 3 J. Martin-Regalado, J. L. A. Chilla, J. J. Rocca *et al.*. Polarization switching in vertical-cavity surface-emitting lasers observed at constant active region temperature[J]. *Appl. Phys.*

- Lett., 1997, **70**(25): 3350~3352
- 4 B. Gayral, J. M. Gerard, B. Legrand *et al.*. Optical study of GaAs/AlAs pillar microcavities with elliptical cross section[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(12): 1421~1423
  - 5 J. M. Ostermann, P. Debernardi, R. Michalzik. Surface-grating VCSELs with dynamically stable light output polarization [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(12): 2505~2507
  - 6 T. Onishi, T. Tanigawa, T. Ueda *et al.*. Polarization control of vertical-cavity surface-emitting lasers by utilizing surface plasmon resonance[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2007, **43**(12): 1123~1128
  - 7 T. H. Russell, T. D. Milster. Polarization switching control in vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(19): 2520~2522
  - 8 N. Nishiyama, M. Arai, S. Shinada *et al.*. Highly strained GaInAs-GaAs quantum-well vertical-cavity surface-emitting laser on GaAs (311)B substrate for stable polarization operation[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2001, **7**(2): 242~248
  - 9 M. S. Park, B. T. Ahn, Byueng-Su Yoo *et al.*. Polarization control of vertical-cavity surface-emitting lasers by electro-optic birefringence[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(7): 813~815
  - 10 D. S. Song, Y. J. Lee, H. W. Choi *et al.*. Polarization-controlled, single-transverse-mode, photonic-crystal, vertical-cavity, surface-emitting lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(19): 3182~3184
  - 11 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
  - 12 Zhang Yan, Ning Yongqiang, Wang Ye *et al.*. High power vertical-cavity surface-emitting laser array with small divergence [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2428~2432  
张 岩, 宁永强, 王 烨等. 高功率低发散角垂直腔面发射激光器阵列[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2428~2432
  - 13 Cui Jinjiang, Ning Yongqiang, Zhang Yan *et al.*. High beam quality novel vertical cavity surface emitting laser array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1941~1945  
崔锦江, 宁永强, 张 岩等. 高光束质量新型垂直腔面发射激光器阵列[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 1941~1945
  - 14 Ning Yongqiang, Li Te, Qin Li *et al.*. Temperature and far-field distribution characteristics of 980 nm high power VCSEL [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(6): 984~986  
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
  - 15 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]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**: 1335~1338

栏目编辑: 宋梅梅