

# 布拉格反射波导双光束边发射半导体激光器

苏道军<sup>1,2</sup>, 计伟<sup>2</sup>, 崔碧峰<sup>2,3</sup>, 邱伟彬<sup>1</sup>, 佟存柱<sup>4</sup>,  
张松<sup>2</sup>, 王晓玲<sup>2</sup>, 凌小涵<sup>2</sup>, 王加贤<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 北京工业大学 电子信息与控制工程学院, 北京 100124;

3. 牡丹电子集团有限公司, 北京 100191;

4. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130000)

**摘要:** 报道 1 种在垂直远场方向上产生 2 个极窄的稳定对称光斑多量子阱边发射半导体激光器,在其有源区两侧设计布拉格反射波导结构.制备 100  $\mu\text{m}$  条宽的边发射激光器,在垂直方向上  $\pm 33.4^\circ$  附近实现 2 个稳定的  $7.2^\circ$  对称的近圆形光斑,对器件镀膜后进行测试,在连续和脉冲工作条件下分别得到 1.40、2.26 W 的输出,器件的特征温度可达到 91 K.

**关键词:** 半导体激光器; 布拉格反射波导; 双光斑激光器; 多量子阱

**中图分类号:** TN 48.4

**文献标志码:** A

近年来,布拉格反射波导结构的半导体激光器广泛应用于各种各样的器件中,包括高速打印机、高灵敏度的激光吸收光谱仪、先进的激光测速仪以及沟深监控系统等<sup>[1-6]</sup>.这种半导体激光器具有较高的增益系数、较强的模式识别以及较大的模式面积等优点<sup>[7-9]</sup>.产生双光斑输出通常有两种方法:一是利用光纤阵列或光束耦合器耦合 2 个单个激光器发出的光束<sup>[10]</sup>;二是利用光栅、极化棱镜、非退化的光学寄生振荡器将单个光束分散成 2 个光束<sup>[11]</sup>.但是,这些方法由于复杂的光学对准和体积的限制,应用较少.除此之外,双脊激光二极管也可以替代双光斑激光光源在横向上产生 2 个输出光斑.但是,这种激光器在工作时双脊之间相互影响产生的热效应使得激光器的输出性能严重不稳定<sup>[12]</sup>.实现双光斑输出最理想的方法是从器件的结构出发.近年来,为了得到单个稳定的具有较大光学模式尺寸的激光光束,人们提出了单个布拉格反射波导和 2 个布拉格反射波导的边发射半导体激光器<sup>[13-15]</sup>,这类激光器可以在垂直方向上分别实现极窄的单个光斑和非常发散的多个光斑.本文通过设计多量子阱有源区两侧的布拉格反射波导结构实现 2 个极窄的双光斑输出.

## 1 器件结构设计

布拉格反射波导边发射半导体激光器结构,如图 1 所示.量子阱有源区的两侧具有非  $1/4$  波长布拉格反射波导结构(BRW),每一侧都是由 6 对厚度分别为 100 nm/750 nm 的  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  分布式布拉格反射镜组成.量子阱有源区的材料为 2 个  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$  量子阱组成,布拉格反射波导的界面有 20 nm 的组分渐变层, $\text{P}^+$  的重掺杂欧姆接触层到有源区厚度为 5.3  $\mu\text{m}$ ,整个外延层的厚度为 12.7  $\mu\text{m}$ .此外,在量子阱有源区和上下布拉格反射波导之间有一层 750 nm 的  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  层.文中所设计的器件各层结构的折射率分布,如图 2 所示.

**收稿日期:** 2013-12-26

**通信作者:** 王加贤(1955-),男,教授,博士,主要从事激光与光电子技术的研究. E-mail: wangjx@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 集成光电子学国家重点联合实验室开放课题(IOSKL2012KF12); 半导体材料科学重点实验室开放课题(KLSMS-1201); 福建省泉州市科技计划重点项目(2003Z19)

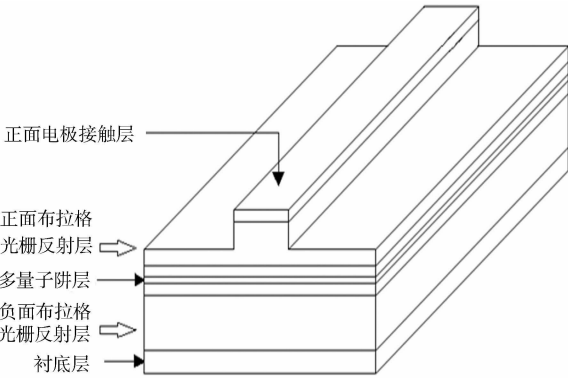


图 1 布拉格反射波导边发射半导体激光器

Fig. 1 Edge-emitting semiconductor laser with Bragg reflection waveguide

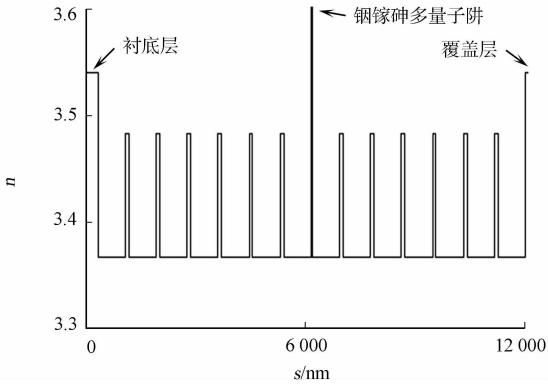


图 2 布拉格反射波导边发射半导体激光器折射率

Fig. 2 Refractive index of edge-emitting semiconductor laser with Bragg reflection waveguide

边发射半导体激光器的远场发散形式是由近场的电磁场分布的傅里叶变化决定的. 由于近场的电磁场分布具有周期性的最大值和最小值的变化, 所以这种电磁场分布可以用正弦函数或者余弦函数来近似表示<sup>[12]</sup>. 对于文中所设计的器件结构, 在端面附近的垂直电场分布可近似表示为余弦函数与高斯函数的乘积, 即

$$E_{\text{NF}}(x) = E_{\text{NF}}(0) \times \cos(2\pi \frac{x}{2\Lambda}) \times \text{Gaus}(\frac{x}{w}). \tag{1}$$

式(1)中:  $\text{Gaus}(\frac{x}{w}) = \exp[-\pi(\frac{x}{w})^2]$ ,  $x$  为横向远离近场中心的距离,  $w$  为由实际近场光场强度决定的模式的光斑宽度;  $E_{\text{NF}}(0)$  为布拉格反射波导边发射激光器中心位置的电场幅值;  $\Lambda$  为布拉格反射镜的厚度, 即  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  的厚度和界面处的 2 个 20 nm 的组分渐变层.

标准的瑞利-索末菲(Rayleigh-Sommerfeld)衍射积分<sup>[12]</sup>为

$$I_{\text{FF}}(\theta) \propto | \cos \theta \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} E_{\text{NF}}(x) \exp(-ik_0 x \sin \theta) dx |^2. \tag{2}$$

由式(2)可得到远场光束强度, 即

$$I_{\text{FF}}(\theta) \propto | \frac{E_{\text{NF}}(0) \cdot w \cdot \cos \theta}{2} |^2 \cdot | \text{Gaus}[w(\frac{\sin \theta}{\lambda} - \frac{1}{2\Lambda})] + \text{Gaus}[w(\frac{\sin \theta}{\lambda} + \frac{1}{2\Lambda})] |^2. \tag{3}$$

式(3)中:  $\theta$  为远场发散角. 由式(3)可知: 布拉格反射波导边发射激光器的远场光束在  $\theta = \pm \arcsin[\lambda/(2\Lambda)]$  处存在 2 个高斯形状的光斑, 可通过改变布拉格反射波导的周期厚度来控制; 对于文中所设计的器件结构,  $\Lambda = 0.89 \mu\text{m}$ , 带入可计算出在  $\Lambda = \pm 33.4^\circ$  处出现 2 个高斯光斑.

由以上分析可知: 布拉格反射波导结构的周期厚度决定了垂直方向上的 2 个高斯光斑之间的角度, 而垂直方向上单个高斯光斑的远场发散角主要是由光学波导厚度来决定的. 因此, 可以通过设计布拉格反射波导结构来精确控制布拉格反射波导边发射激光器的垂直光场分布.

## 2 器件制备与测试

### 2.1 器件的制备

采用金属有机物化学气相沉积法(MOCVD), 在(100)方向的  $\text{n}^+\text{-GaAs}$  衬底依次外延缓冲层、 $\text{n-DBR}$ 、多量子阱有源区、 $\text{p-DBR}$  和  $\text{p}^+$  重掺杂的欧姆接触层形成布拉格反射波导边发射激光器的外延结构. 外延生长完成后, 利用标准的光刻工艺和湿法腐蚀工艺形成条宽为  $100 \mu\text{m}$  的脊型波导结构, 湿法腐蚀的深度约为 280 nm. 然后, 采用等离子体增强化学气相沉积法(PECVD)淀积 200 nm 的  $\text{SiO}_2$  作为电绝缘层; 利用标准光刻工艺制作电极窗口, 溅射正面电极  $\text{Ti}/\text{Au}$ , 厚度为 50 nm/300 nm; 经过背面减薄, 溅射 50 nm/300 nm 的背面电极  $\text{AuGeNi}/\text{Au}$  后, 在  $430^\circ\text{C}$  条件下快速合金 35 s. 最后, 溅射 100 nm 的金层. 为了测试镀膜对器件性能的影响, 将制备好的器件分为两部分: 一部分以自然解理面作为谐振腔的腔面; 另一部分则在器件的反射面和出光面分别镀上 90% 的高反膜和 1.3% 的增透膜, 解离成单个

器件后分别进行测试.

### 2.2 拟合内量子效率和内损耗

F-P 腔的边发射半导体激光器的外微分量子效率和内量子效率及内损耗的关系<sup>[16]</sup>为

$$\eta_d = \eta_i \cdot \frac{\frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2}}{\frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} + \alpha_i} \tag{4}$$

式(4)中: $\eta_d$  为外微分量子效率; $\eta_i$  为内量子效率; $\alpha_i$  为内损耗; $L$  为谐振腔腔长; $R_1, R_2$  分别为腔面的反射率. 对式(4)两边取倒数后可得

$$\frac{1}{\eta_d} = \frac{1}{\eta_i} + \frac{2\alpha_i L}{\eta_i \ln(R_1 R_2)^{-1}} \tag{5}$$

由式(5)可知:腔长与外微分量子效率的倒数呈线性关系. 因此, 可通过测试不同的腔长对应的外微分量子效率, 利用 Origin 软件经过线性拟合算出内量子效率和内损耗. 实验分别进行了 800, 1 200, 1 500  $\mu\text{m}$  等 3 种腔长的器件测试, 其结果如图 3 所示. 由拟合结果可知:内量子效率  $\eta_i$  为 47.64%;内损耗  $\alpha_i$  为 1.265  $\text{cm}^{-1}$ .

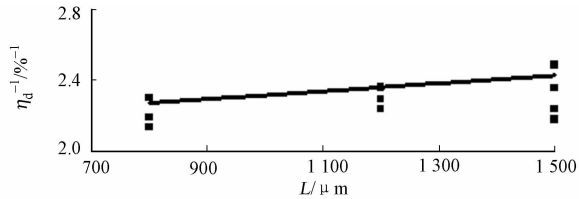


图 3 内量子效率和内损耗拟合曲线  
Fig. 3 Fit curve of internal quantum efficiency and internal loss

### 2.3 器件镀膜测试

将制备好的外延片解离成 1 mm 腔长的单管管芯, 然后 P 面向下烧结在镀有铜的铜热沉上, 将铜热沉封装在 TO-3 的管座上, 用 LD2002C4 型半导体激光器测试仪进行测试. 施加 1 A 的连续电流, 测得器件的  $P$ - $I$ - $V$  曲线和垂直发散角, 如图 4 所示.

由图 4 可知:器件的输出光束在垂直方向附近出现 2 个光斑, 其位置与理论推导到的  $\pm 33.4^\circ$  有一定偏差, 这是由于在封装时摆放管芯的过程中, 芯片距离中心位置有一定的偏移. 器件的阈值电流较大, 达到 400 mA, 这是由器件的结构所决定的. 器件外延结构在多量子阱有源区两侧具有对称的非 1/4 波长的 DBR 结构, 注入的电子和空穴复合后发射出的光子除了在水平方向上的谐振腔内的损耗和腔面损耗外, 还有一部分光子在上下 DBR 之间谐振, 使得器件的阈值电流比普通 F-P 腔的边发射半导体激光器的阈值电流大.

为了得到较大的输出功率, 对激光器的腔面进行镀膜, 一端镀上 90% 的高反膜, 另一端镀上 1.3% 的增透膜. 器件的测试结果, 如图 5 所示. 镀膜后对器件施加 3 A 的连续电流, 可得到 1.40 W 的输出功率. 在脉冲条件下, 器件在 4 A 的驱动电流作用下, 可得到 2.26 W 的输出功率. 但此时阈值电流是 490 mA, 与镀膜之前相比有了一定的增加, 这是因为当器件的前后腔面镀完膜后, 器件的腔面损耗增大, 总损耗增加, 从而使器件的阈值电流变大.

### 2.4 变温测试

半导体激光器的输出特性与温度密切相关. 随着温度的升高, 激光器的阈值电流增加, 输出功率降低, 发射波长漂移, 造成激光器模式不稳定, 从而影响器件的寿命. 对腔长为 1 mm, 镀有 90% 的高反膜和 1.3% 的增透膜的单管器件在 283~343 K 温度范围内进行变温测试, 其  $P$ - $I$ - $V$  曲线如图 6 所示.

由图 6 可知:随着温度的升高, 器件的阈值电流将会增加. 这主要是因为随着温度的升高, 器件的热效应越来越显著, 使得器件中的损耗系数增加, 漏电流增加, 内量子效率降低, 阈值电流增大. 此外, 器件的输出功率也会逐渐较小, 这是由于随着温度的升高, 注入的电子中参与非辐射复合的电子数越来越多; 从器件外部来看, 器件注入的电功率转化为焦耳热的比例越来越大, 最终导致输出功率逐渐减小.

实验中进一步研究了阈值电流与温度的变化关系. 阈值电流与温度的关系满足指数关系<sup>[16]</sup>为

$$I_{th}(T) = I_{th}(T_r) \cdot \exp\left(\frac{T - T_r}{T_0}\right) \tag{6}$$

式(6)中: $T_r$  为室温; $I_{th}(T_r)$  为室温下的阈值电流; $T_0$  为表征半导体激光器温度稳定性的重要参数, 称为特征温度, 它与激光器的材料和结构有关,  $T_0$  越大, 表明激光器对温度的敏感程度越小, 热特性越好.

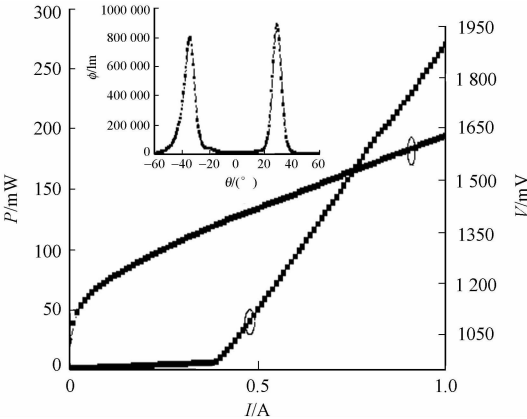


图 4 腔面镀膜前器件的  $P$ - $I$ - $V$  曲线及垂直远场发散角  
Fig. 4 Device cavosurface with no coating film  $P$ - $I$ - $V$  surge and divergence angle in the far field vertical direction  
阈值电流和中心波长随温度的变化关系,如图 7 所示.

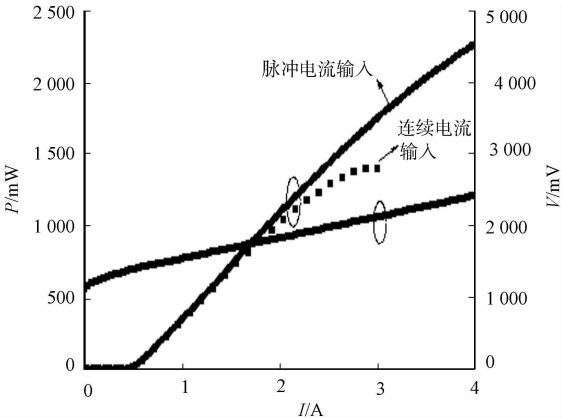


图 5 腔面镀膜后器件的  $P$ - $I$ - $V$  曲线  
Fig. 5 Device cavosurface with coating film  $P$ - $I$ - $V$  surge

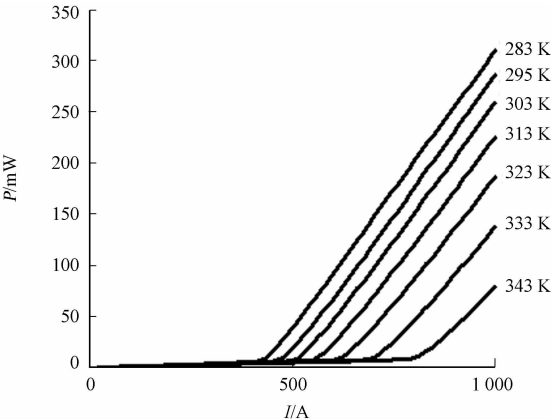


图 6 不同温度下器件  $P$ - $I$ - $V$  曲线  
Fig. 6  $P$ - $I$ - $V$  surge of different temperature

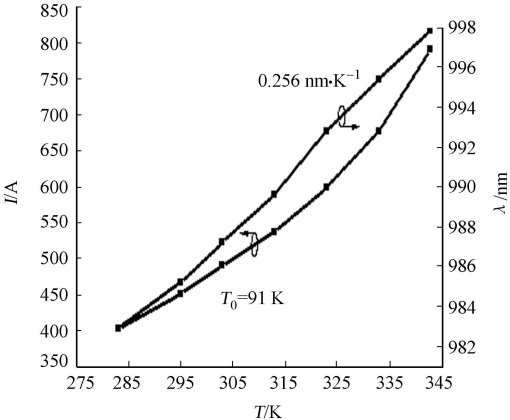


图 7 阈值电流及中心波长随温度变化趋势  
Fig. 7 Threshold current and central wavelength of different temperature

对式(6)两边取对数得  $\ln I_{th}(T) = \ln I_{th}(T_r) + (T - T_r)/T_0$ . 做  $\ln I_{th}(T) \sim T$  的关系曲线. 由此可知:该曲线为 1 条直线,且斜率为  $1/T_0$ ,拟合数据后得到在 283~343 K 温度范围内对应的特征温度为 91 K. 当温度升高时,有源区半导体材料禁带宽度将会减小,激射波长将会增大,即红移,如图 7 所示. 随温度升高,红移速率为  $0.256 \text{ nm} \cdot \text{K}^{-1}$ .

3 结束语

设计 1 种新型的具有波长布拉格反射波导结构的边发射半导体激光器,其输出功率主要集中在垂直方向上  $\pm 33.4^\circ$  处. 通过拟合,得到器件的内量子效率为 47.64%,内损耗为  $1.265 \text{ cm}^{-1}$ . 为了得到较大功率的输出,对器件的前后端面分别镀上 90% 的高反膜和 1.3% 的增透膜. 由实验可知:在连续注入 3 A 电流时,可实现 1.40 W 的功率输出;脉冲注入 4 A 电流时,可实现 2.26 W 的功率输出. 此外,器件在 283~343 K 的温度范围内对应的特征温度可达到 91 K.

参考文献:

[1] KATAOKA K. Analysis of banding problem in multiple beam scanning system of laser printer[J]. Optical Review, 2008,15(4):196-203.  
[2] ARIMOTO A,SAITOH S,MOCHIZUKI T,et al. Dual beam laser diode scanning system for ultrahigh speed laser beam printers using a spot control method[J]. Applied Optics,1987,26(3):2554-2557.

[3] HEIDMANN A, HOROWICZ R J, REYNAUD S, et al. Observation of quantum noise reduction on twin laser beams[J]. Physical Review Letters, 1987, 59(22): 2555-2557.

[4] THANH N T K, REES J H, ROSENZWEIG Z. Laser-based double beam absorption detection for aggregation immunoassays using gold nanoparticles[J]. Anal Bioanal Chem, 2002, 374(7/8): 1174-1178.

[5] KAWAJASJO M, HOSOI K. Dual-beam-sweep laser speckle velocimetry[J]. Exp Fluids, 1991, 11(4): 278-280.

[6] AMARY P, CATTELAN D. A new polarimetric camera for real-time trench depth monitoring in micromachining applications[J]. Horiba, 2003(7): 82-85.

[7] LEDENTSOV N N, SHCHUKIN V A, NOVIKOV I I, et al. High-power edgeemitting laser diode with narrow vertical beam divergence[J]. Electronics Letters, 2011, 47(24): 1339-1341.

[8] LI Jie, CHIANG K S. Guided modes of one-dimensional photonic bandgap waveguides[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2007, 24(8): 1942-1950.

[9] SHCHUKIN V, LEDENTSOV N, POSILOVIC K, et al. Tilted wave lasers: A way to high brightness sources of light[J]. Quantum Electron, 2011, 47(7): 1014-1027.

[10] 朱松林, 章献民, 池灏, 等. 用统一耦合模理论分析含布拉格光栅的对称光纤耦合器的传输特性[J]. 光学学报, 2001, 21(8): 991-995.

[11] CHI Ming-jun, BØGH N S, THESTRUP B, et al. Improvement of the beam quality of a broad-area diode laser using double feedback from two external mirrors[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(7): 1107-1109.

[12] LONGFIELD N, LIESHOUT T, de WUT I, et al. Improving laser welding efficiency[J]. Weld J, 2007, 86(5): 52-54.

[13] BHAVIN J, BIJLANI, AMR S. Helmy Bragg reflection waveguide diode lasers[J]. Optics Letters, 2009, 34(23): 3734-3736.

[14] YEH P, YARIV A, HONG C S. Electromagnetic propagation in periodic stratified media[J]. Journal of the Optical Society of America, 1977, 67(4): 423-438.

[15] XIE Jing. Dual beam laser welding[J]. Weld J, 2002, 81(10): 223-230.

[16] 江剑平. 半导体激光器[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000: 52-76.

## Twin Beam Edge-Emitting Semiconductor Laser with Bragg Reflection Waveguide

SU Dao-jun<sup>1,2</sup>, JI Wei<sup>2</sup>, CUI Bi-feng<sup>2,3</sup>, QIU Wei-bin<sup>1</sup>,  
TONG Cun-zhu<sup>4</sup>, ZHANG Song<sup>2</sup>, WANG Xiao-ling<sup>2</sup>,  
LING Xiao-han<sup>2</sup>, WANG Jia-xian<sup>1</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3. Beijing Peony Electronic Group Company, Beijing 100191, China;

4. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, Changchun 130000, China)

**Abstract:** A multiple quantum wells edge-emitting semiconductor laser which can generate twin ultra-narrow, stable and symmetrical beams in the far field vertical direction was designed and fabricated. The Bragg reflection waveguide structure was designed on both side of the active layer. Laser with 100  $\mu\text{m}$  stripe width exhibited two stable near-circular beams symmetrically located at about  $\pm 33.4^\circ$  with full-width at half maximum of  $7.2^\circ$  in the vertical direction. Texting the laser after coating, which showed an output power of 1.40 W under continuous wave operation and 2.26 W in pulsed mode. The characteristic temperature of the device is about 91 K.

**Keywords:** semiconductor lasers; Bragg reflection waveguide; twin-beam lasers; multiple quantum wells