

# 大功率高可靠性垂直腔面发射激光器阵列研究

崔锦江<sup>1</sup> 宁永强<sup>2</sup> 姜琛昱<sup>1</sup> 王帆<sup>1</sup> 施燕博<sup>1</sup> 董宁宁<sup>1</sup> 田玉冰<sup>1</sup> 檀慧明<sup>1</sup> 武晓东<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163  
<sup>2</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要** 针对 980 nm 激光波长设计了 InGaAs/GaAsP 材料多周期增益量子阱结构。垒层采用带隙更宽的 GaAsP 材料代替常规 GaAs, 改善了效率随温度升高而降低的问题, 同时又能满足长寿命激光工作的需要。周期增益量子阱结构提高了有源区的单程增益, 降低了阈值, 提高了输出功率。制作出新结构的集成单元数为  $4 \times 4$ , 单元直径  $30 \mu\text{m}$  的阵列器件, 工作电流为 5.88 A 时连续激光功率达到 2 W; 窄脉冲宽度  $1 \mu\text{s}$ , 重复频率 100 Hz, 工作电流 60 A 时输出功率达到 30 W, 且均未达到饱和状态。此阵列器件在工作电流为  $1 \sim 4$  A 时发散角半宽均小于  $16^\circ$ 。利用加速老化方法对阵列器件的寿命进行了测试, 推算出  $30^\circ\text{C}$  的寿命可达 5280 h 以上, 并分析了影响大功率垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 可靠性的主要因素。

**关键词** 激光器; 垂直腔面发射激光器; 阵列; 可靠性

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0802011

## High Power and High Reliability Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Array

Cui Jinjiang<sup>1</sup> Ning Yongqiang<sup>2</sup> Jiang Chenyu<sup>1</sup> Wang Fan<sup>1</sup> Shi Yanbo<sup>1</sup>  
Dong Ningning<sup>1</sup> Tian Yubing<sup>1</sup> Tan Huiming<sup>1</sup> Wu Xiaodong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Suzhou, Jiangsu 215163, China  
<sup>2</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

**Abstract** We design InGaAs/GaAsP periodic gain structure quantum wells for 980 nm laser wavelength. The GaAsP material with a wider band gap is used as the barrier layer instead of conventional material GaAs. It will solve the problem that the efficiency is decreased with increasing temperature, and will meet the requirement of long-life laser working. The periodic gain structure quantum wells will increase the gain, decrease the threshold current and improve the output power. The new structured  $4 \times 4$  array with an element aperture of  $30 \mu\text{m}$  has a 2 W continuous output power at 5.88 A current. The narrow pulse output power can reach to 30 W at the pulse width of  $1 \mu\text{s}$ , repetition rate of 100 Hz, and work current of 60 A. The results all above have not reached saturation. The far-field angles at the current of  $1 \sim 4$  A are all below  $16^\circ$ . We test the reliability of the array. The life at  $30^\circ\text{C}$  is as high as 5280 h or above. The main factors affecting the reliability of high power vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) are studied.

**Key words** lasers; vertical-cavity surface-emitting laser; array; reliability

**OCIS codes** 230.3670; 140.2020; 140.7260

## 1 引 言

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 是近几年来发

展迅速的一种新型激光器, 作为边发射半导体激光器的有力竞争对手, 以其光束圆形对称、阈值低、易

收稿日期: 2011-03-01; 收到修改稿日期: 2011-03-25

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (094305L099)、苏州医工所筹建期科技创新项目 (I05301L101, I05401L102)、国家自然科学基金 (60636020, 60706007, 10974012, 60876036, 90923037) 和中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助课题。

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

形成二维集成、可以动态单模工作等优点,无论在国防军事还是在民用方面都有着广泛的应用<sup>[1~3]</sup>。

国际上从 20 世纪 80 年代以来就广泛开展了相关的研究工作,主要集中在面向光通信应用的小功率器件上,目前波长 850 nm,调制速率 2.5 GHz 的毫瓦级小功率激光器已经商品化。自 20 世纪 90 年代中期发明了侧氧化技术以来,器件的阈值电流密度、输出光功率等指标得到迅速的提高。近年来医学、材料加工、自由空间通信和激光抽运等领域对于大功率半导体激光器的市场需求日益增长,大功率垂直腔面发射激光器的研究已经成为全世界范围内的研究热点<sup>[4]</sup>。

为了提高垂直腔面发射激光器光功率,一个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<sup>[5]</sup>。垂直腔面发射激光器的出光方向垂直于器件表面,容易制成二维阵列,具有结构简单、阵列密度高、功率大、散热方便等优点。根据国际上报道的单管器件结果推算,直径 1 cm 面积上制作成面阵列可以实现峰值功率 1 kW 的输出。但是,针对激光波长为 980 nm 的量子阱结构,要实现垂直腔面发射结构器件的大功率激光输出,要考虑到其功率转换效率较低的问题,需要对常规 InGaAs/GaAs 量子阱结构加以调整。

本文设计了 InGaAs/GaAsP 材料多周期增益量子阱结构。垒层采用具有更宽带隙的 GaAsP 材料代替常规 GaAs,不仅可以更好地限制 InGaAs 阱中的载流子,而且可以补偿 InGaAs 层中的应力,保证在温度升高的情况下仍具有很好的效率,同时又能实现长寿命的激光工作。采用多周期增益量子阱(QW)材料大大增加了有源区的单程增益,一方面可望降低阈值电流、提高输出功率,另一方面可以减轻对分布式布拉格反射镜(DBR)的高质量材料生长的要求,有利于激光器成品率的提高,也有助于在阵列集成器件研制中各单元器件均能以相近的输出特性工作<sup>[6~8]</sup>。

## 2 新量子阱结构的设计

常规 InGaAs/GaAs 量子阱结构中的 GaAs 势垒在大功率工作时有源区温度升高现象会比较严重,为避免温度升高导致的阈值电流增加和效率下降等问题,可以设计采用具有更宽带隙的 GaAsP 垒层。宽带隙可以使 InGaAs 阱中的载流子得到更好的限制,保证在温度升高的情况下仍能具有很好的

效率。另外 InGaAs 中 In 组分的存在使阱层的晶格常数比 GaAs 大,通过生长具有略小晶格常数的 GaAsP,可以补偿 InGaAs 层中的应力。通过这种交替的应力补偿,使外延层总的应力积累保持在临界应力以下,保证外延层即使在生长十几个或更多周期的情况下仍具有较好的晶体结晶质量,满足长寿命激光工作要求。

垂直腔面发射激光器光的传播方向是垂直于外延层的,所以在腔长方向上量子阱有源区的光增益长度非常短,仅有十几纳米。设计了多周期增益新结构材料,根据腔内光场分布情况,在极大处分别布置多个增益区。每个区内生长 3 个 InGaAs/GaAsP 量子阱,总计 9 个量子阱。这样单程光增益提高到原有结构的 3 倍,有助于提高输出功率和转换效率。

芯片用金属氧化物化学气相沉积法(MOCVD)生长在 p 型 GaAs 衬底上,有源区厚  $2\lambda$ ,包括 9 个应变 InGaAs/GaAsP 量子阱,分成 3 组位于电场驻波的波节处,具体结构如图 1 所示。

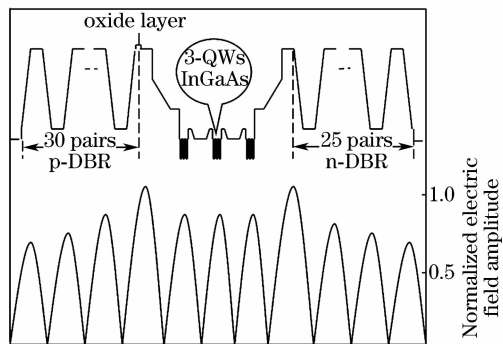


图 1 周期增益结构量子阱

Fig. 1 Periodic gain structure quantum wells

在这种结构中,周期性量子阱增益介质位于电场驻波的波节处,当量子阱周期与激光波长匹配时,就不会出现纵向空间烧孔现象,因为增益介质与光场增益峰一致。这种光场和增益介质在空间上的重合增强了由周期性增益介质决定的垂直方向的特定波长,因此这种结构更容易实现单纵模输出。阈值条件下,材料的增益可以简单地写为

$$g_{th} = \frac{1}{\Gamma} \left[ \alpha_i + \frac{1}{L} \ln \left( \frac{1}{R} \right) \right], \quad (1)$$

式中  $R$  为反射镜的反射率,  $L$  为腔长,  $\Gamma$  为总的限制因子,  $\alpha_i$  为腔内损耗。在周期增益结构中,  $\Gamma \approx 2$ ,而对于传统的三个阱的结构,  $\Gamma \approx 1$ ,因此增益系数比传统垂直腔面发射激光器增加 1 倍<sup>[9]</sup>。

外量子效率  $\eta_d$  定义为

$$P_o = \eta_d \frac{h\nu}{q} (I - I_{th}), \quad (2)$$

式中  $P_o$  为输出功率,  $h\nu$  为光子能量,  $q$  为电子电量,  $I$  为基本电流,  $I_{th}$  为阈值电流。在这种周期增益结构中,  $\eta_d$  也可以表示为

$$\eta_d = N_A \eta_i \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m}, \quad (3)$$

式中  $N_A$  为有源层的组数,  $\eta_i$  为注入效率,  $\alpha_m$  为反射镜的损耗。当有源区所有的组都在同一个模式下时, 微量子效率与有源区组数的这种线性关系就会成立。

同时, 阈值电流可以表示为

$$I_{th} = I_{tr} \exp\left(\frac{\alpha_i + \alpha_m}{\Gamma g_{th}}\right), \quad (4)$$

由于有源区外部组份的限制因子比内部的小, 总的限制因子并不与  $1/N_A$  成正比<sup>[10]</sup>, 而且, 增益与电流也不是线性的。因此, 阈值电流虽然随有源区组分的增加降低, 但不正比于  $1/N_A$ 。

### 3 器件结构及制作

垂直腔面发射激光器外延片采用 MOCVD 生长。外延片结构如图 2 所示, 外延层依次为: 30 对  $C(1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3})$  掺杂的  $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/GaAsP$  型 DBR 反射镜, 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; 谐振腔由 9 个  $In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAsP$  量子阱的有源区和两边的  $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$  空间层构成, 有源区阱厚和垒厚分别为 6 和 8 nm, 激光波长为 980 nm; n 型 DBR 包括 20 对  $Si(2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3})$  掺杂的  $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/GaAs$ , 提供 99.3% 的反射率。

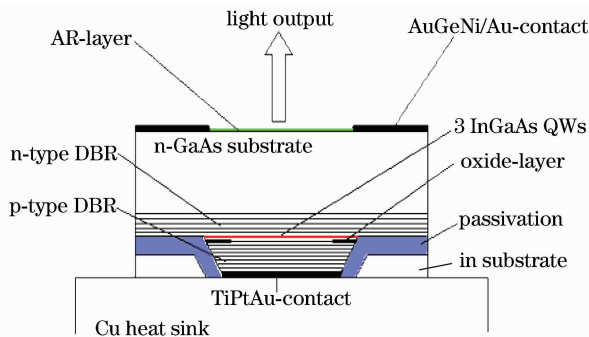


图 2 底发射 VCSEL 结构

Fig. 2 Structure of bottom-emitting VCSEL

器件的制备过程首先从 p 面工艺开始。首先, 用光刻法在外延片 p 表面刻出阵列图形, 然后用湿法腐蚀方法腐蚀出台面, 腐蚀深度要超过 AlAs 层

并达到有源区。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 p 型电极。为了减少衬底损耗, 将 n 面 GaAs 衬底化学减薄至 150  $\mu\text{m}$  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

利用上述方法制作了集成单元数为  $4 \times 4$ , 单元直径 30  $\mu\text{m}$  的阵列器件, 图 3 为室温连续工作时的 I-V-P 曲线, 结果显示电流在 5.88 A 时最高输出功率达到 2 W; 在连续工作条件下, 对应不同电流的激光远场光强分布如图 4 所示, 激光器在工作电流为 1~4 A 时发散角半宽均小于 16°。图 5 显示对  $4 \times 4$  阵列器件在窄脉冲工作下的输出特性进行测试的结果。脉冲宽度 1  $\mu\text{s}$ , 重复频率 100 Hz。在电源最大输出 60 A 下, 阵列输出功率达到 30 W, 平均每个单元

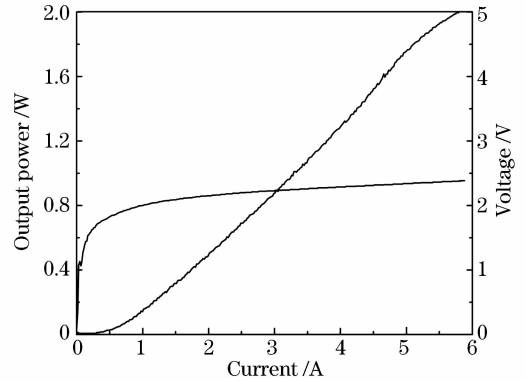


图 3  $4 \times 4$  阵列连续输出特性

Fig. 3 Continuous output characteristic of array

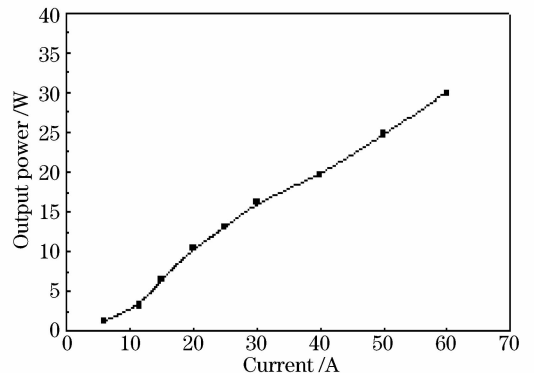


图 4  $4 \times 4$  阵列器件在窄脉冲工作下的输出

Fig. 4 Narrow pulse output characteristic of array

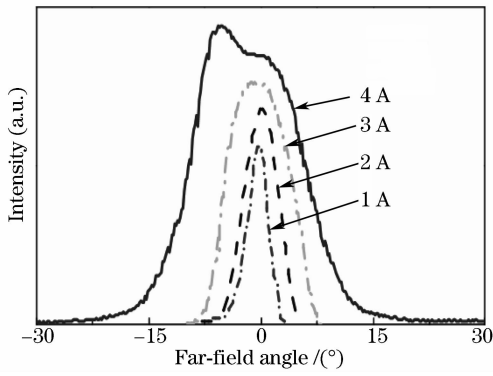


图 5 阵列在不同电流下的远场

Fig. 5 Far-field distributions at different currents

工作电流 3.8 A, 输出功率为 1.88 W。4×4 阵列是从 10×10 阵列芯片截下的, 因此按照相同单元工作电流计算, 10×10 阵列窄脉冲输出功率可以达到 188 W。

## 5 阵列器件的寿命测试

半导体激光器的高温加速老化寿命测试原理是基于 Arrhenius 模型, 利用该模型可以发现由温度应力决定的反应速度的依赖关系, 即

$$\ln \tau = A + \frac{E_a}{kT}, \quad (5)$$

式中  $\tau$  为寿命,  $E_a$  为激活能,  $A$  为常数,  $k = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K 为玻尔兹曼常数,  $T$  为热力学温度。通过测试两个不同温度下的器件寿命, 就可以求出激活能  $E_a$ 。于是便可求得温度  $T_1$  对某温度  $T_3$  下的加速系数  $K_3$  为

$$K_3 = \frac{\tau_3}{\tau_1} = \frac{\exp\left(\frac{E_a}{kT_3}\right)}{\exp\left(\frac{E_a}{kT_1}\right)} = \exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_1}\right)\right], \quad (6)$$

则有

$$\tau_3 = \tau_1 \exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_1}\right)\right]. \quad (7)$$

实验中随机抽取 6 只垂直腔面发射激光器进行高温加速老化实验。分别放进 60 °C 和 80 °C 条件下的恒温箱内进行恒流加速老化实验, 激光器工作电流控制在 2 A。测试出激光器在高温条件下的寿命, 如图 6 和图 7 所示; 然后推算其在正常工作条件下的寿命, 如图 8 所示。实验过程中, 每 24 h 用综合参数测试仪对 6 只激光器进行测试, 如果激光器的功率下降到初始值的 30% 则认为该器件已经失效。激光器的寿命用器件失效的平均寿命来表示。实际

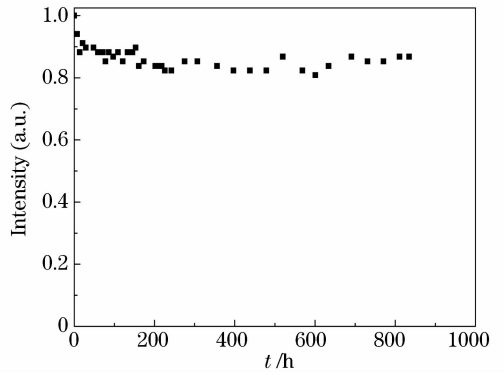


图 6 60 °C 老化曲线

Fig. 6 Aging curve at 60 °C

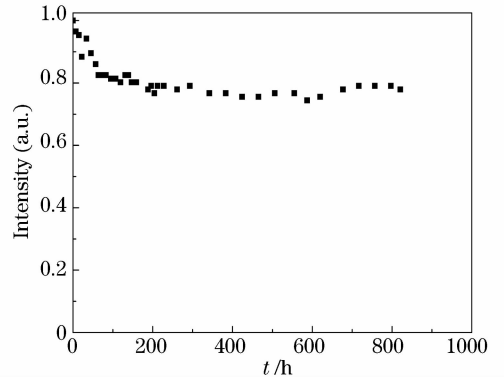


图 7 80 °C 老化曲线

Fig. 7 Aging curve at 80 °C

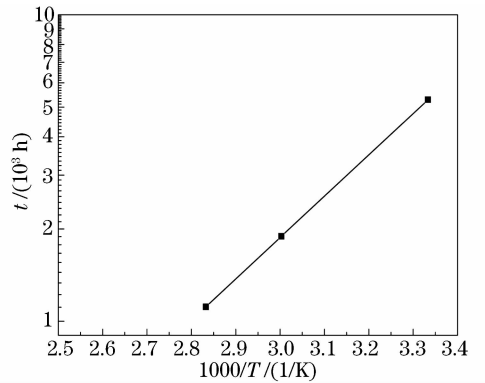


图 8 根据老化曲线推出的室温下的寿命

Fig. 8 Lifetime at room temperature according to the aging curves

计算过程中, 把多只同类激光器的各自失效时间的统计平均值作为平均寿命。从测试曲线中推出 60 °C 的寿命为 1892 h, 80 °C 的寿命为 1115 h。因此推出室温下的寿命约为 5280 h。

为确定老化过程对激光器性能的影响, 对比老化前后的器件参数, 例如: 输出功率、阈值电流、斜率效率、总的转换效率、中心波长以及光谱宽度等作为驱动电流的函数均被测量。表 1 为老化前后各项参数的变化, 所列数据是所有测试激光器的平均值。

从表中可以看出,老化后阈值电流增加,输出功率、斜率效率以及转换效率下降。阈值电流的增加是由于内量子效率降低和非辐射复合过程中吸收的增加。老化过程不但引起输出功率的下降,同时也影响器件的发射光谱。高功率垂直腔面发射激光器的波长是由有源区的材料组分、封装以及制冷决定的,装配过程中的应力和热阻的增加都会引起中心波长的移动和光谱的加宽。从表中可见经过高温加速老化实验后,器件的中心波长漂移平均超过2 nm,光谱宽度的增加也超过了1 nm。

在老化过程中发现了与灾变退化相联系的突然失效,灾变退化是和解理面有关的退化,半导体激光器中的灾变退化是影响半导体激光器的最大输出功率和器件寿命的一个主要因素。而灾变退化是由热

量的逸出产生的,它主要发生在半导体激光器的表面。热量的逸出是一个正反馈过程,它是由载流子的非辐射复合产生的热量引起的。在靠近表面处,由于表面复合和体复合,载流子的复合率增强。这是因为表面区有大量的缺陷,这些缺陷是由解理和热应力引起的机械应力产生的。由于缺陷的存在,因此载流子被不断输送到表面,从而在表面有较大的复合电流。在较高的输出能量时,载流子主要是由带隙吸收光子而产生的光激发提供的。由于复合产生的热量导致带隙的局部热收缩,在表面的光吸收和随之引起的复合电流会随着温度的升高而加剧。在某一能量输出值,这种正反馈导致温度很快升高,从而激光器的有源区熔化而导致灾变退化的发生。

表1 老化前后器件各项参数的变化

Table 1 Change of the parameters before and after the aging test

|            | Output power /W | Threshold current /A | Slope efficiency | Transfer efficiency /% | Center wavelength /nm | Spectrum width /nm |
|------------|-----------------|----------------------|------------------|------------------------|-----------------------|--------------------|
| Unaged     | 0.21            | 0.56                 | 0.35             | 10                     | 986.3                 | 0.7                |
| Aged       | 0.19            | 0.62                 | 0.31             | 8                      | 988.5                 | 1.8                |
| Difference | -0.2            | 0.06                 | -0.04            | -2                     | 2.2                   | 1.1                |

同时,焊接面应力也是影响器件寿命的重要因素之一,应力过大会拉裂芯片而使其失效<sup>[11]</sup>。为了减小焊接造成的应力,焊料必须选择应力较小、焊接温度较低的软焊料,而软焊料在高温状态下易疲劳,不同的材料其疲劳程度不同。因此,焊料的选择也是影响器件可靠性的因素之一。另一个关键环节是芯片的焊接,特别是芯片与热沉间的焊接,整个焊接过程中,芯片的升温 and 降温必须是快速的,按晶相理论,加速冷却有利于获得精细致密的晶粒组织结构,也有利于形成平滑的接触界面和良好的异质结特性,从而达到良好的欧姆接触。但是,降温太快又不利于应力的释放,应力使激光器腔面出现了暗线缺陷(DLD),从而导致激光器的灾难性失效。因此,高功率激光器封装的焊接技术、焊料沉积工艺等是提高器件可靠性和寿命的关键因素。

## 6 结 论

为了提高垂直腔面发射激光器阵列的输出功率及可靠性,针对980 nm量子阱结构进行了优化。设计并制作了 InGaAs/GaAsP 材料多周期增益量子阱结构,垒层采用具有更宽带隙的 GaAsP 材料代替常规 GaAs,不仅可以更好地限制 InGaAs 阱中的载

流子,而且可以补偿 InGaAs 层中的应力,保证在温度升高的情况下仍具有很好的效率,同时又能满足长寿命激光工作的需要。采用多周期增益量子阱材料大大增加了有源区的单程增益,一方面可降低阈值电流、提高输出功率,另一方面可以减轻对 DBR 反射镜的高质量材料生长的要求,有利于激光器成品率的提高,也有助于在阵列集成器件研制中各单元器件均能以相近的输出特性工作。通过老化实验可以看出,老化后阈值电流增加,输出功率、斜率效率以及转换效率下降。晶体缺陷、焊接技术、焊料沉积工艺等均是影响大功率垂直腔面发射激光器可靠性的主要因素。

## 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,郝永琴,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 M. Grabherr, B. Weigl, G. Reiner *et al.*. High power top-surface emitting oxide confined vertical-cavity laser diodes [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(18):1723~1724
- 3 M. Miller, M. Grabherr, R. King *et al.*. Improved output performance of high-power VCSELs [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2001, **7**(2):210~216
- 4 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
- 5 Cui Jinjiang, Ning Yongqiang, Jiang Chenyu *et al.*. Beam quality of high power vertical-cavity bottom-emitting semiconductor lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1):0102002  
 崔锦江, 宁永强, 姜琛昱 等. 大功率垂直腔底发射半导体激光器的光束质量[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1):0102002
- 6 M. Y. A. Raja, S. R. J. Brueck, M. Osiniki. Surface-emitting, multiple quantum well GaAs/AlGaAs laser with wavelength-resonant periodic gain medium [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**(18):1678~1680
- 7 Jon Geske, Kian-Giap Gan, Yae L. Okuno *et al.*. Vertical-cavity surface-emitting laser active regions for enhanced performance with optical pumping [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(9):1155~1162
- 8 J. Hastie, J.-M. Hopkins, S. Clavez *et al.*. 0.5-W single transverse-mode operation of an 850-nm diode-pumped surface-emitting semiconductor laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(7):894~896
- 9 B.-S. Yoo, H.-H. Park, E.-H. Lee. Low threshold current density InGaAs surface-emitting lasers with periodic gain active structure [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(7):1060~1061
- 10 J. K. Kim, E. Hall, O. Sjölund *et al.*. Epitaxially-stacked multiple-active-region 1.55  $\mu\text{m}$  lasers for increased differential efficiency [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(13):3251~3253
- 11 Gao Songxin, Wei Bin, Lü Wenqiang *et al.*. Lifetime testing of high power diode laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(6):689~692  
 高松信, 魏 彬, 吕文强 等. 高功率二极管激光器寿命测试[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(6):689~692