

文章编号: 0258-7025(2004)06-0649-05

# 准连续 17 kW 808 nm GaAs/AlGaAs 叠层 激光二极管列阵

方高瞻, 马骁宇, 王国宏, 谭满清, 蓝永生

(中国科学院半导体研究所国家光电子器件工程研究中心, 北京 100083)

**摘要** 高功率激光二极管列阵广泛应用于抽运固体激光器。报道了 17 kW GaAs/AlGaAs 叠层激光二极管列阵的设计、制作过程和测试结果。为了提高器件的输出功率,一方面采用宽波导量子阱外延结构,降低腔面光功率密度,提高单个激光条的输出功率,通过金属有机物化学气相沉积(MOCVD)方法进行材料生长,经过光刻、金属化、镀膜等工艺制备 1 cm 激光条,填充密度为 80%,单个激光条输出功率达 100 W 以上;另一方面器件采用高密度叠层封装结构,提高器件的总输出功率,实现了 160 个激光条叠层封装,条间距 0.5 mm。经测试,器件输出功率达 17 kW,峰值波长为 807.6 nm,谱线宽度为 4.9 nm。

**关键词** 激光技术;激光二极管列阵;叠层;GaAs/AlGaAs

**中图分类号** TN 248.4 **文献标识码** A

## Quasi-CW 17 kW 808 nm GaAs/AlGaAs Stack Laser Diode Arrays

FANG Gao-zhan, MA Xiao-yu,

WANG Guo-hong, TAN Man-qing, LAN Yong-sheng

(National Engineering Research Center for Optoelectronics Devices, Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract** High power 808nm laser diodes are widely used for pumping Nd:YAG solid-state lasers. In this paper the design, fabrication and the test results of 17 kW GaAs/AlGaAs stack laser diode arrays are reported. In order to achieve higher power, one of approaches is to use a broad waveguide structure, which effectively reduces the intensity on the facets and allows for higher output power. The structures were grown by metalorganic chemical vapor deposition. The output power of 100 W of 1 cm monolithic laser bars with a 80% filled factor has been obtained; Additionally, the stack structure was used. The laser diode array comprises 160 bars. The pitch of bars is 0.5 mm. The output power of 17 kW has been obtained. The emitting peak wavelength is 807.6 nm and FWHM is 4.9 nm.

**Key words** laser technique; laser diode arrays; stack; GaAs/AlGaAs

## 1 引 言

大功率 808 nm 激光二极管列阵的最主要应用是作为固体激光器的抽运源<sup>[1~3]</sup>。激光二极管抽运固体激光器(DPL)的应用非常广泛,可用于加工、医疗等民用领域,在军事上的应用尤为突出,可用于测距、指示、制导等,在空间武器和可控热核反应方面

的潜力也为许多发达国家所重视。

高功率、长寿命、高可靠性的激光二极管列阵是大功率 DPL 得以实用化的前提。叠层是实现激光二极管列阵器件高功率输出的有效途径,研制高功率叠层列阵有两个关键技术,一是高功率线列阵制备技术,线列阵是叠层列阵的基本单元,通常的长度是 1 cm,线列阵的高功率输出是实现叠层列阵的高

收稿日期:2003-02-11;收到修改稿日期:2003-05-09

作者简介:方高瞻(1971—),男,中国科学院半导体研究所国家光电子器件工程研究中心副研究员,博士,主要从事微电子学与光电子学的研究。E-mail:gzfang@red.semi.ac.cn

功率、高密度输出的前提;另外的关键技术是叠层封装技术。采用宽波导 GaAs/AlGaAs 量子阱结构是实现高功率 808 nm 激光二极管单元器件和线列阵器件的有效方法之一<sup>[4,5]</sup>,实现了 100  $\mu\text{m}$  条宽的单元器件输出 10.2 W<sup>[6]</sup>,本文制备了大功率宽波导 808 nm GaAs/AlGaAs 量子阱激光二极管线列阵,得到了功率达 100 W 以上的激光输出,通过叠层,实现了功率达 17 kW 的激光输出。

## 2 宽波导外延结构

器件采用双阱宽波导量子阱结构,图 1 是结构的导带示意图。量子阱的宽度  $L_{\text{QW}} = 8 \text{ nm}$ ,为了避免双阱的耦合,造成阱内奇偶能级差加大,从而降低量子效应,双阱间的垒宽选择为  $L_b = 15 \text{ nm}$ ,这样奇偶能级差非常小 ( $E_1 - E_0 = 0.00007 \text{ eV}$ ,  $E_3 - E_2 = 0.0001 \text{ eV}$ ),可以将它们看成是一个能级,相当于单阱情况。在阱中,  $L$  能级在  $\Gamma$  以上 0.24 eV,  $X$  能级在  $\Gamma$  以上 0.40 eV。阱深大有利于抑制阱内载流子的泄漏,所以采用 Al 组份相对高一点的垒及波导层,  $X_{\text{Al}} = 0.35$ ,这样  $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$  垒提供了一个大的导带势台阶,  $\Gamma_b - \Gamma_{\text{QW}} = 0.21 \text{ eV}$ 。

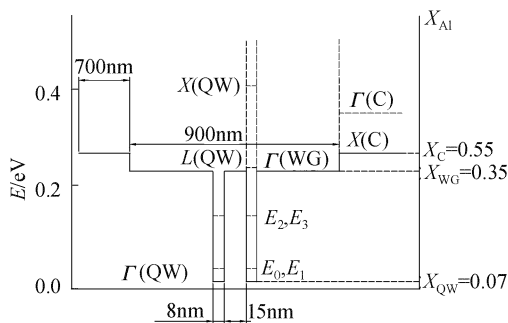


图 1 宽波导双阱结构的导带示意图

Fig. 1 Conduction band schematic of the double quantum well structure with a broad waveguide

宽波导的宽度  $L_{\text{WG}} = 900 \text{ nm}$ ,其组份是  $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ ,整个波导层不掺杂或低掺杂,这是为了保证波导层的低损耗。

$P$  和  $N$  限制层的宽度  $L_c = 700 \text{ nm}$ ,其组份是  $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$ ,  $X_{\text{Al}} = 0.55$  限制层是间接带隙,它的能级与阱的  $\Gamma$  能级比较是:  $\Gamma_c - \Gamma_{\text{QW}} = 0.36 \text{ eV}$ ,  $L_c - \Gamma_{\text{QW}} = 0.33 \text{ eV}$ ,  $X_c - \Gamma_{\text{QW}} = 0.28 \text{ eV}$ 。

采用传输矩阵法进行数值计算,可以得到这种结构的激光二极管的近场、远场、发散角和光限制因子等参数。图 2 是计算结果。图 2(a)是近场分布

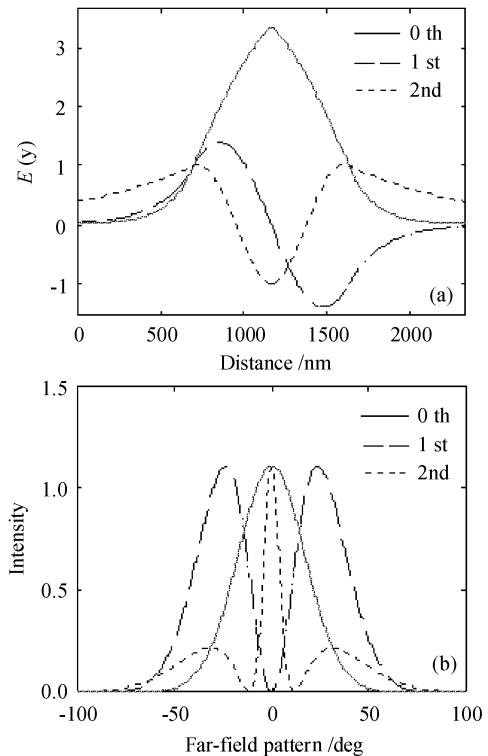


图 2 GaAs/AlGaAs 宽波导激光二极管光场的计算结果

(a) 近场分布; (b) 远场光强分布

Fig. 2 Calculated results for GaAs/AlGaAs broad waveguide laser structure

(a) near-field optical mode distribution;

(b) vertical far-field pattern

图,有 3 个模式:基模、一阶模和二阶模。它们的光限制因子分别为 3.097%, 0.010173% 和 1.2936%,由于一阶模的光限制因子很小,所以一阶模不可能激射。如何抑制二阶模的激射是问题的关键,做法是尽量减小限制层的厚度,增加二阶模的损耗,但同时不能增加基模的损耗。在近场图中看出,在限制层的边缘,基模的光振幅几乎降为零,  $P$  面边缘处光振幅为最大振幅的 0.2628%,  $N$  面边缘处光振幅为最大振幅的 0.2626%,也就是说基模泄露到衬底及盖层的光很少,损耗小;一阶模在  $P$  面边缘处的光振幅为最大振幅的 2.2665%,  $N$  面边缘处为最大振幅的 -2.2676%;二阶模在限制边缘处的光振幅很大,  $P$  面和  $N$  面处分别是最大振幅的 38.4037% 和 38.4007%,很大一部分光将会泄露出去,由于二阶模泄露损耗很大,所以二阶模也不可能激射。理论上存在两个高阶模,通过设计,两个高阶模都能被抑制。图 2(b)是光场的远场分布图,基模的远场发散角是  $36.3281^\circ$  (半峰值全宽度)。

### 3 器件制作

#### 3.1 外延生长

采用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)方法进行外延生长,制作过程如下:衬底  $n^+$ -GaAs(Si doped,  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), 其上是 500 nm GaAs 缓冲层, 然后依此是: 1) 700 nm  $N\text{-Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$  限制层; 2) 450 nm  $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$  波导层; 3) AlGaAs 双量子阱; 4) 450 nm  $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$  波导层; 5) 700 nm  $P\text{-Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$  限制层; 6) 200 nm  $p^+$ -GaAs 顶层; 7) 20 nm  $p^+$ -GaAs 盖层。

通过对 X 光双晶衍射测量, C-V 测量和光荧光特性的测量, 对生长温度、掺杂、生长速度等不同工艺条件进行反复试验, 使量子阱激光二极管材料满足阈值电流密度、斜率效率等一些参数的要求。

#### 3.2 线列阵制备

受到光灾变损伤(COD)阈值功率密度  $P_{\text{COD}}$  的限制(AlGaAs/GaAs 材料的  $P_{\text{COD}}$  是  $10 \text{ MW/cm}^2$ <sup>[7]</sup>), 为了提高 1 cm 长的线列阵的输出功率, 又要避免接近 COD 阈值, 提高列阵的填充密度(发光区总长度与线列阵总长度的比值)是很好的方法。但是填充密度的提高, 会使发光单元间相互干扰, 注入的载流子很大程度上将耦合到横向光场中, 在横向上引发不必要的自发辐射增强甚至激射, 降低了光腔方向上的激光模式放大, 从而降低器件效率。因此在进行列阵结构的设计和实现时, 必须在横向上对注入载流子及光子进行隔离限制。

通过光刻、腐蚀、氧化物隔离等工艺, 形成列阵结构。列阵结构的填充密度是 80%, 包括 100 个发光单元。采用分段隔离结构实现对发光单元的限制, 每 10 个发光单元为一段, 段与段之间有  $10 \mu\text{m}$  宽的深隔离区, 通过腐蚀的方法破坏深隔离区的波导层, 在段内通过微腐蚀, 防止注入电流在顶层的重掺杂的欧姆接触层扩展。将带有列阵结构的外延片金属化, 形成  $p, n$  面欧姆接触, 解理成 1 cm 长的激光条, 两端面分别镀上高反膜( $>90\%$ )与增透膜( $<5\%$ )。

叠层封装之前, 对激光条进行筛选, 满足激光条的一致性要求, 激光条的典型特性见图 3, 输出功率为 100.0 W, 阈值为 17.5 A, 峰值波长为 806.7 nm, 谱线宽度为 3.0 nm, 见图 4。

#### 3.3 叠层封装

热特性是研制高功率激光二极管叠层阵列过程中的一个不可忽略的问题, 有源区会产生大量的热

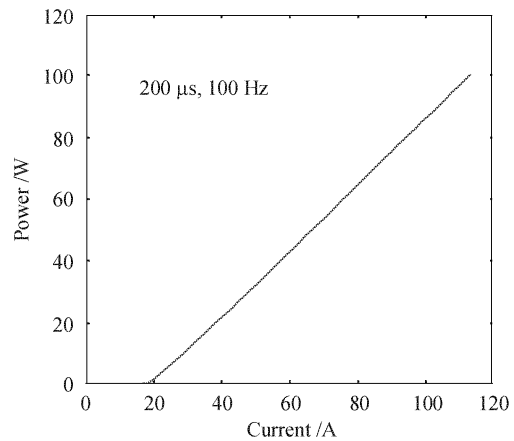


图 3 1 cm 线列阵的功率曲线

Fig. 3 Light output power versus driving current for 1 cm GaAs/AlGaAs linear laser diode arrays with a broad waveguide

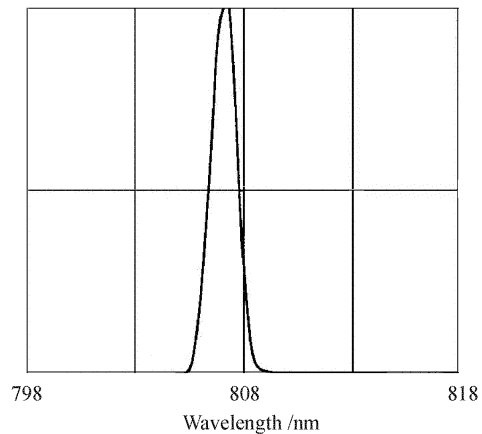


图 4 1 cm 线列阵的光谱曲线

Fig. 4 Lasing spectrum of 1 cm GaAs/AlGaAs linear laser diode arrays with a broad waveguide

量, 只有通过选取最佳封装材料、合理设计热传导路径, 减小热阻, 实现有源区与热沉和散热系统间的有效散热, 否则, 形成热积累, 导致有源区温升过高, 影响器件效率、阈值、波长、寿命等。

封装结构如图 5, 从三个方面降低这种封装形式的热阻: 1) 采用较短腔长的激光条。有源区平面垂直于热沉底平面, 腔长的增大, 并没有增大与热沉间的接触面积, 反而增大了有源区到热沉的热传导路径, 所以腔长越长, 热阻越大。短腔有利于降低热阻, 但是短腔会使注入电流密度增加, 不利于器件可靠工作。实验中采用腔长为  $600 \mu\text{m}$  的激光条; 2) 优化激光条的间距。图 6 是热阻与激光条间距的关系, 计算值是通过求解热传导方程, 得到温度分布中最高温度, 从而得到峰值热阻, 实验值是测量恒定工

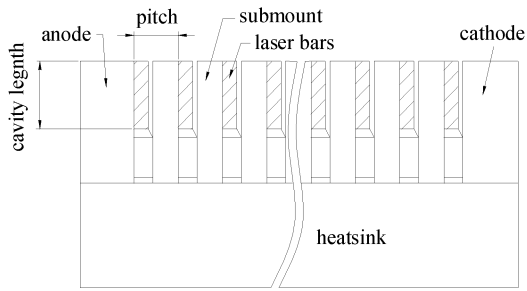


图 5 叠层器件的封装结构

Fig. 5 Package structure of GaAs/AlGaAs stack laser diode arrays

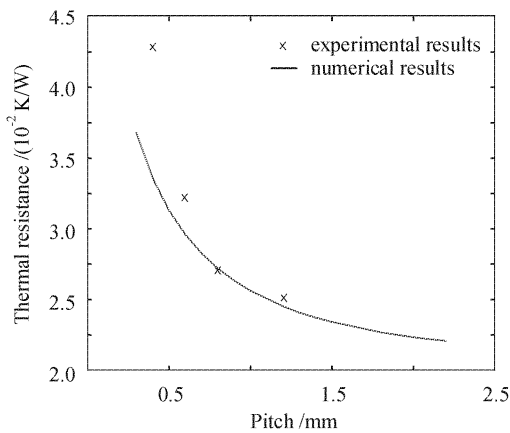


图 6 器件热阻与激光条间距的关系

Fig. 6 Thermal resistance as a function of the laser bar pitch

作电流下的不同占空比的中心波长,根据温度与波长的漂移关系 ( $0.28 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ) 得到器件热阻。从分析结果看,间距越大,热阻越小,但是间距的增大会降低器件的功率密度。实验中激光条的间距为  $0.5 \text{ mm}$ ,热阻为  $3.1 \times 10^{-2} \text{ K/W}$ ,根据预测的热损耗,有源区的温升在  $15^\circ\text{C}$  左右,这个温升能保证器件的可靠工作;3) 采取水冷。热阻与叠层条数近似成反比关系,热损耗功率与叠层条数近似成正比关系,所以可以认为温升与条数无关,但前提条件是保证热沉底部温度恒定。在条数很多的情况下,热损耗大,如果热沉底部的制冷功率不够,造成温升热阻,这时的热阻就与条数有关。对于条数很多的情况下,也就是器件功率很大,虽然热阻很小,为了能有效带走大量热量,不至于产生温升热阻,一般采用主动制冷,实验中采用水冷方式,恒定水温  $20^\circ\text{C}$ 。

#### 4 器件性能

器件采用 160 激光条叠层,发光面是  $40 \text{ mm} \times$

$20 \text{ mm}$ 。器件在准连续状态下测量,脉冲频率  $100 \text{ Hz}$ ,脉宽  $200 \mu\text{s}$ ,功率曲线如图 7。整个测量在制冷水温  $20^\circ\text{C}$  下进行,阈值为  $17.6 \text{ A}$ ,斜率效率  $169 \text{ W/A}$ ,工作电流  $120 \text{ A}$  时,输出功率达  $17 \text{ kW}$ 。

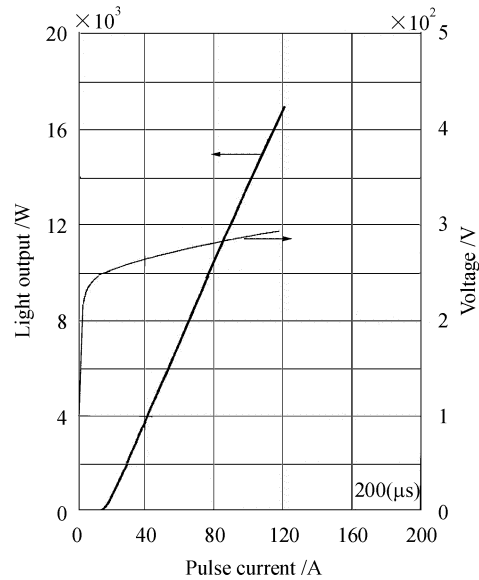


图 7 17 kW 叠层列阵的功率曲线

Fig. 7 Light output power versus driving current for 17 kW GaAs/AlGaAs stack laser diode arrays

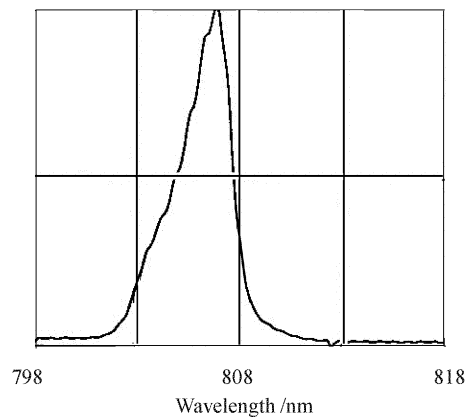


图 8 17 kW 叠层列阵的光谱曲线

Fig. 8 Lasing spectrum of 17 kW GaAs/AlGaAs stack laser diode arrays

图 8 是器件的光谱特性,中心波长为  $807.6 \text{ nm}$ ,半峰值全宽度(FHWM)为  $4.9 \text{ nm}$ 。与单个激光条的光谱特性相比,中心波长向长波漂移一点,另外谱线宽度增大,原因是激光条的光谱特性不一致,尤其是中心波长的偏差造成最终谱线增宽,另外是由于封装不均匀造成器件热阻不均匀,局部热阻过高造成局部有源区温升大,使谱线增宽。

## 5 结 论

采用宽波导外延结构, MOCVD 进行材料生长, 制备了大功率宽波导 808 nm GaAs/AlGaAs 量子阱激光二极管阵列, 实现了 100 W 以上的激光输出。研究了大功率阵列器件的叠层封装技术, 实现了激光输出功率达 17 kW (100 Hz, 200  $\mu$ s) 的叠层阵列, 中心波长为 807.6 nm, 谱线宽度 (FWHM) 为 4.9 nm。

### 参 考 文 献

- 1 Chen Weibao, Nobuo Takkeuchi. Diode pumped, Cr<sup>4+</sup>:YAG passively Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(5):385~388  
陈卫标, Nobuo Takkeuchi. LD 抽运的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q Nd:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(5):385~388
- 2 Zheng Quan, Zhao Ling, Jiang Yaoliang *et al.*. LD-pumped passively Q-switched Nd:YAG/LBO green laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(6):492~494  
郑 权, 赵 岭, 姜耀亮等. LD 抽运被动调 Q Nd:YAG/LBO 绿光激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(6):492~494
- 3 Du Chenlin, Qin Lianjie, Meng Xianlin *et al.*. Study of high-power continuous-wave 1.34  $\mu$ m Nd:GdVO<sub>4</sub> laser end-pumped by laser-diode-array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8):681~683  
杜晨林, 秦连杰, 孟宪林等. LD 抽运高功率连续波 1.34  $\mu$ m Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8):681~683
- 4 M. A. Emanuel, J. A. Skidmore, R. J. Beach. High-power laser diodes at various wavelengths [C]. *SPIE*, 1998, **3001**:2~6
- 5 M. A. Emanuel, N. W. Carlson, J. A. Skidmore. High-efficiency AlGaAs-based laser diode at 808 nm with large transverse spot size [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(10):1291~1293
- 6 Fang Gaozhan, Xiao Jianwei, Ma Xiaoyu *et al.*. High power 808 nm AlGaAs/GaAs quantum well laser diodes with a broad waveguide [J]. *Chinese J. Semiconductor*, 2002, **23**(8):809~812  
方高瞻, 肖建伟, 马晓宇等. 大功率 808 nm AlGaAs/GaAs 宽波导量子阱激光二极管[J]. *半导体学报*, 2002, **23**(8):809~812
- 7 J. K. Wade, L. J. Mawst, D. Botez *et al.*. 8.8 W CW power from broad-waveguide Al-free active-region ( $\lambda = 805$  nm) diode lasers [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(11):1100~1101