

941nm 2% 占空比大功率半导体激光器线阵列*

辛国锋^{1,2} 花吉珍² 陈国鹰¹ 康志龙¹ 杨鹏² 徐会武² 安振峰²

(1 河北工业大学信息工程学院微电子所,天津 300130)

(2 中国电子科技集团公司电子第十三研究所光电专业部,河北,石家庄 050051)

摘要 计算了半导体激光器的激射波长与量子阱宽度以及有源层中 In 组分的关系,确定了 941nm 波长的量子阱宽度和 In 组分. 并利用金属有机化合物气相淀积(MOCVD)技术生长了 InGaAs/GaAs/AlGaAs 分别限制应变单量子阱激光器材料. 利用该材料制成半导体激光器线阵列的峰值波长为 940.5 nm,光谱的 FWHM 为 2.6 nm,在 400 μs, 50 Hz 的输入电流下,输出峰值功率达到 114.7 W(165 A),斜率效率高达 0.81 W/A,阈值电流密度为 103.7 A/cm²,串联电阻 5 mΩ,最高转换效率可达 36.9%.

关键词 金属有机化合物气相淀积;半导体激光器阵列;分别限制结构;单量子阱

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

0 引言

半导体抽运掺 Yb:YAG 激光器已成为研究热点. 由于掺 Yb³⁺ 介质同掺 Nd³⁺ 介质相比有很多优点,其中 InGaAs 半导体激光器输出波长(941 nm)在 Yb³⁺ 介质吸收光谱范围,掺 Yb³⁺ 介质的宽吸收带宽很适合于半导体激光器的抽运,抽运效率高. Yb:YAG [Yb³⁺:Y₃Al₅O₁₂]的主吸收峰有两个中心波长分别位于 941 nm 和 970 nm,其中 941 nm 吸收带非常适用于激光二极管抽运,并且由于该吸收带宽达 18 nm,使得激光二极管可以不需要复杂的温度控制系统^[1,2]. 所以研制 941 nm 大功率半导体激光器阵列具有重要的实际意义.

本文利用先进的外延生长技术-金属有机化合物气相淀积(MOCVD)技术成功的生长了高质量的 941 nm 波长分别限制应变单量子阱 InGaAs/GaAs/AlGaAs 半导体激光器材料. 在电制冷的条件下,输出功率高达 114.7 W(驱动电流 165 A),此时器件的斜率效率没有明显的下降.

1 材料结构生长

大功率半导体激光器材料采用单量子阱是因为 SQW 有以下优点. 从图 1(a)可以看出双量子阱(DQW)的阈值电流密度从 700 A/cm²(300 μm 腔长)降低到 300 A/cm²(2000 μm 腔长),而单量子阱(SQW)的阈值电流密度从 1300 A/cm²(300 μm 腔

长)降低到 200 A/cm²(2000 μm 腔长). 当激光器的腔长较短时 SQW 激光器阈值比 DQW 的高,腔长为 600 μm 时二者相当,当激光器的腔长较长时就可以显示出 SQW 的优点.

从图 1(b)可以看出,当腔长大于 600 μm 时 DQW 的效率比 SQW 的低,在长腔长激光器中(腔长大于 900 μm)二者的效率都下降. 这是在量子阱界面或周围包层(cladding)中的自由载流子吸收的缘故,特别是量子阱界面的吸收与量子阱的数目以及激光器的腔长有关. 因此为了有较好的冷却、低的电阻和热阻以及较低的工作电流密度,采用长腔长(大于 1000 μm)激光器,从以上分析可以看出长腔长激光器应采用 SQW 较好.

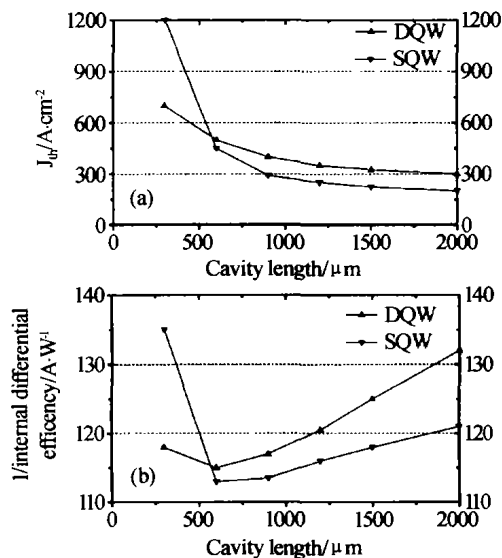


图 1 阈值电流密度(a)和内量子效率的倒数(b)与腔长的关系

Fig. 1 Threshold current density (a) and reciprocal internal differential efficiency (b) versus cavity length
单量子阱阱宽的确定,半导体激光器的激射波

*河北省科技攻关项目(编号:03213540D)和河北省自然科学基金(编号:603080)项目
Tel:0311-7091313 Email:guofeng_xin@eyou.com
收稿日期:2003-09-12

长主要由其材料组分、量子阱宽度、应变等因素决定^[4,5]. 本激光器阵列采用 InGaAs/AlGaAs 材料体系.

In_xGa_{1-x}As 材料的能带带隙

$$E_{gw}(x) = 1.424 - 1.614x + 0.54x^2 \quad (1)$$

同时在计算时考虑了应变引起的能带带隙变化,量子阱中的第一电子(E_{cel})和空穴(E_{vhl})子能级直接根据薛定谔方程及其边界条件计算^[6]. 量子阱的有效带隙为

$$E_{eff}(eV) = E_{gw} + E_{cel} + E_{vhl} \quad (2)$$

则半导体激光器的激射波长可由下式计算

$$\lambda(\mu m) = 1.24/E_{eff}(eV) \quad (3)$$

根据以上分析,计算了激射波长与有源区材料 In 组分(不同量子阱宽度下)的关系. 从图 2、图 3 中可以看出,当有源区的 In 组分一定时,波长随阱宽的变化不大,而当量子阱的宽度一定时,激射波长随有源区的 In 组分的变化较大. 因此在实验中通常固定有源区的组分,通过调节量子阱的宽度(即生长时间)来得到设计波长. 根据理论计算选取量子阱中 In 的组分为 0.1124, 相应的量子阱宽度为 8 nm.

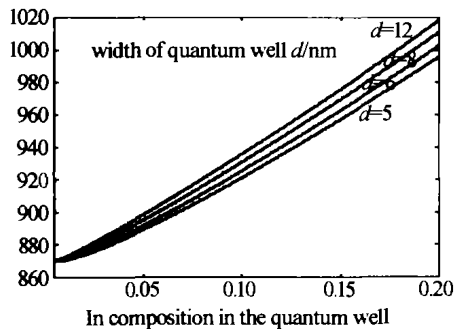


图 2 激射波长随 In 组分的变化

Fig. 2 Change of stimulated wavelength with in composition

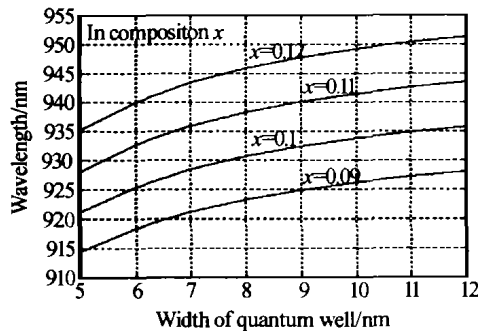


图 3 激射波长随量子阱宽度的变化

Fig. 3 Change of stimulated wavelength with the width of quantum well

用德国 AIXTRON-2000 金属有机化合物气相沉积(MOCVD)设备,分别以 TMIn, TMGa, TMAI 为 III 族源, AsH₃ 为 V 族源, SiH₄ 和 DEZn 为 n 型和 p 型掺杂源, H₂ 作为载气,生长温度为 650℃. 在(100)偏向 <110> 约 2° 方向的 n⁺-GaAs 衬底(Si:10¹⁸ cm⁻³)上,依次生长 n⁺-GaAs/AlGaAs 超晶格缓冲层 500 nm, N-Al_{0.6}Ga_{0.4}As 下限制层 1100 nm, Al_{0.2}Ga_{0.8}As 下波导层

200 nm, GaAs 势垒层, 8 nm 厚的 GaInAs 单量子阱, GaAs 势垒层, Al_{0.2}Ga_{0.8}As 上波导层 200 nm, P-Al_{0.6}Ga_{0.4}As 上限制层 1100 nm, P⁺-GaAs 欧姆接触层 300 nm. 详细材料结构如表 1. 该半导体激光器阵列采用了分别限制单量子阱结构,这种结构还能有效的对载流子和光子进行限制,弥补了单量子阱半导体激光器限制因子小、载流子泄漏和光吸收损耗大的弱点,同时引入了应变,从而降低了器件的阈值.

表 1 InGaAs/GaAs/AlGaAs 材料示意结构

Layer name	composition	Doping level	thickness
Cap layer	P ⁺ -GaAs:Zn	> 5 × 10 ¹⁹ cm ⁻³	300 nm
P-chadding	P-Al _{0.6} Ga _{0.4} As:Zn	1 × 10 ¹⁸ cm ⁻³	1100 nm
Waveguide	Al _{0.2} Ga _{0.8} As	undoped	200 nm
Barrier	GaAs	undoped	nm
QW	GaInAs	undoped	8 nm
Barrier	GaAs	undoped	nm
Waveguide	Al _{0.2} Ga _{0.8} As	undoped	200 nm
n-cladding	n-Al _{0.6} Ga _{0.4} As:Zn	1 × 10 ¹⁸ cm ⁻¹	1100 nm
buffer layer	n ⁺ -GaAs	1 × 10 ¹⁸ cm ⁻³	500 nm
substrate	n ⁺ -GaAs	> 1 × 10 ¹⁸ cm ⁻³	350 μm

2 芯片制作工艺

采用标准 1 cm bar, 其中包括多个发光单元. 其中标准 cm bar 的填充密度以及各发光单元之间的电光隔离是两个主要的参数. 根据理论和实验数据,优化了填充密度^[7],选取发光单元的尺寸为 $w = 90 \mu m$, 单元周期 $s = 130 \mu m$. 一维阵列的结构示意图如图 4. 为了抑制激光在侧向激射,提高激光器的输出功率,用 H₃PO₄:H₂O₂ 腐蚀液在芯片上形成 V 形槽进行光隔离,为了限制电流测向扩展在 V 形槽上生长一层介质膜层(Si₃N₄),以进行电隔离,最后经 P 面金属化(Cr/Au)、减薄、N 面金属化(Au/Ge/Ni/Au)、合金、解理等工艺制成腔长为 1500 μm 的激光器 1 cm bar. 半导体激光器前腔面镀增透膜(反射率 < 5%),后腔面镀高反膜(反射率 > 95%),器件 P 面朝下烧到无氧铜热沉上.

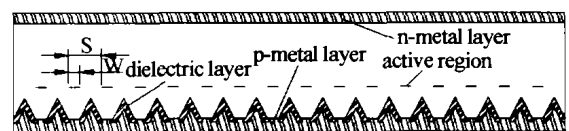


图 4 线阵列的芯片结构示意图

Fig. 4 Diagram structure of linear laser array of the chip

3 器件的测试特性

图 5 为半导体激光器阵列的 P-I 曲线图,测试条件:电流的脉宽 400 μs,重复频率 50 Hz,采用电制冷(电流为 1 A),驱动电流为 165 A 时的输出功率达到 114.7 W,斜率效率为 0.81 W/A,阈值电流密度为 103.7 A/cm²,串联电阻 5 mΩ,最高转换效

率可达 36.9% (工作电流 60 A 时). 从 $P-I$ 图上可以看出斜率效率没有下降. 图 6 为半导体激光器阵列的光谱图, 中心波长 940.5 nm, FWHM 为 2.6 nm. 波长从 20 A 的 933.8 nm 到 165 A 的 942.1 nm (波长变化 8.3 nm), 表明激光器的温度上升了 27.7°C (0.3 nm/°C).

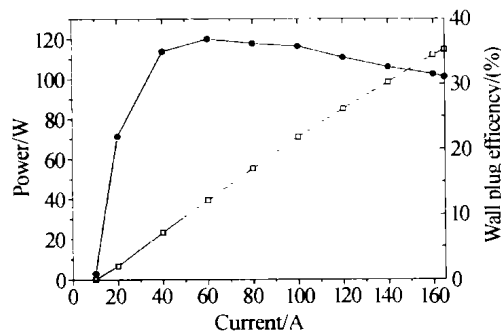


图 5 线阵的 $P-I$ 特性曲线

Fig. 5 $P-I$ characteristics of linear laser array

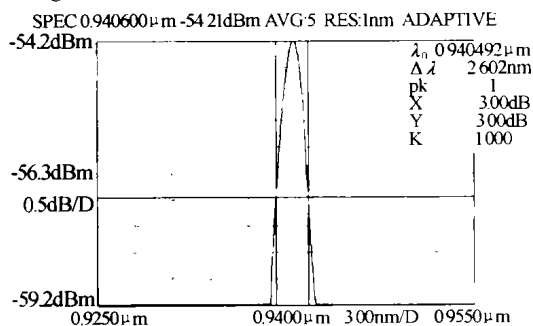


图 6 941 nm 半导体激光器线阵列的光谱图

Fig. 6 The spectra of the 941 nm semiconductor linear laser array

4 结论

从理论上计算了半导体激光器的激射波长与量子阱宽度以及阱中 In 组分的关系, 可以从计算结果来指导材料的生长试验. 制作了 941 nm 波长分别限制应变单量子阱激光器阵列. 采用光刻隔离槽和在其上生长介质膜的方法有效地限制了注入电流的扩展和发光单元间的电隔离. 400 μ s, 50 Hz 的脉冲

电流在 165 A 下功率达到 114.7 W, 斜率效率高达 0.81 W/A (工作电流为 60 A 时), 阈值电流密度为 103.7 A/cm², 串联电阻 5 m Ω , 最高转换效率达到 36.9%.

感谢中国电子科技集团公司第十三研究所光电专业部光刻组王霏, 张世祖, 杨素娟, 测试组沈牧、王晓燕, 材料组赵润、杨红伟, 组装组等同志们的支持与帮助

参考文献

- 1 Endriz J G, Vakili M, Browder G S. High power diode laser arrays. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, **28**(4): 952 ~ 965
- 2 Skidmore J A, Emanuel M A, Beach R J, et al. New diode wavelengths for pumping solid-state lasers. *Proc of SPIE*, 1995, **2382**: 106 ~ 116
- 3 Sumida D S, Betin A A, Bruesselbach H, et al. Diode-pumped Yb: YAG catches up with Nd: YAG. *Laser Focus World*, 1999, **35**(6): 63 ~ 70
- 4 彭宇恒, 陈维友, 赵铁民, 等. 应变量子阱激光器阱宽与组分的确定和增益特性的理论研究. *光子学报*, 1995, **24**(6): 568 ~ 574
Peng Y H, Chen W Y, Zhao T M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1995, **24**(6): 568 ~ 574
- 5 张哲民, 黄德修, 李同宁, 等. 固定波长应变量子阱的设计与比较. *光子学报*, 1998, **27**(12): 1083 ~ 1086
Zhang Z M, Huang D X, Li T N, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(12): 1083 ~ 1086
- 6 杜宝勋. 半导体激光器原理 北京: 兵器工业出版社 2001. 236
Du B X. Principle of Semiconductor Laser. Beijing: Arms Industry Press, 2001. 236
- 7 辛国锋, 花吉珍, 陈国鹰, 等. InGaAs/AlGaAs 941 nm 大功率半导体激光二极管阵列. *光电子·激光*, 2003, **14**(7): 698 ~ 700
Xin G F, Hua J Z, Chen G Y, et al. *J Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(7): 698 ~ 700

941 nm 2% Duty Cycle High Output Power Semiconductor Laser Diode Array

Xin Guofeng^{1,2}, Hua Jizhen², Chen Guoying¹, Kang Zhilong¹, Yang Peng², Xu Huiwu², An Zhenfeng²

¹ *Research Institute of Microelectronics, College of Information, Hebei Univ. of Tech., Tianjin 300130*

² *The 13th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050051*

Received date: 2003-09-12

Abstract The relations of the semiconductor laser stimulated wavelength to the width of quantum well and the In composition in the quantum well are calculated, then the width of quantum well and the In composition in the quantum well are determined. InGaAs/GaAs/AlGaAs separated confinement heterostructure strained single quantum well materials was grown by the technology of metal organic chemical vapor deposition (MOCVD). The peak wavelength of the semiconductor laser linear array with the materials is 940.5 nm, the full width at half maximum (FWHM) is 2.6 nm, the peak output power is 114.7 W (400 μ s, 50 Hz, drive current 165 A), the slope efficiency is 0.81 W/A, current density is 103.7 A/cm², series resistance is 5 m Ω , and the 36.9% wall plug efficiency is reached.

Keywords Metal organic chemical vapor deposition (MOCVD); Semiconductor laser array; Separate confinement heterostructure; Single quantum well



Xin Guofeng was born on October 14, 1975, in Hebei, China. He is a candidate for Ph. D. degree in Hebei University of Technology now. His research interest is in the field of semiconductor optoelectronics. He is currently majoring in the designment and study in high output power semiconductor lasers and array.