

# 铟化镓基量子阱 $2\ \mu\text{m}$ 大功率激光器

廖永平<sup>1,2</sup> 张宇<sup>1,2</sup> 邢军亮<sup>1,2</sup> 杨成奥<sup>1,2</sup> 魏思航<sup>1,2</sup> 郝宏玥<sup>1,2</sup> 徐应强<sup>1,2</sup> 牛智川<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院半导体研究所 半导体超晶格国家重点实验室,北京,100083

<sup>2</sup>中国科学技术大学量子信息与量子科技前沿协同创新中心,安徽 合肥,230026

**摘要** 使用固态源 MBE 系统进行铟化镓基量子阱激光器结构的外延生长,通过优化稳定生长条件,结合标准宽条形激光器制备工艺,获得了在  $15\text{ }^\circ\text{C}$  工作温度下  $823\ \text{mW}$  的连续光输出,注入电流  $0.5\ \text{A}$  时,峰值波长为  $1.98\ \mu\text{m}$ 。在  $1000\ \text{Hz}$ ,  $5\%$  占空比的脉冲工作模式下,最大脉冲功率达到  $1.868\ \text{W}$ 。

**关键词** 激光器;中红外;大功率;光电对抗

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201542.s102006

## GaSb-Based Quantum Wells $2\ \mu\text{m}$ High Power Laser Diode

Liao Yongping<sup>1,2</sup> Zhang Yu<sup>1,2</sup> Xing Junliang<sup>1,2</sup> Yang Chengao<sup>1,2</sup>

Wei Sihang<sup>1,2</sup> Hao Hongyue<sup>1,2</sup> Xu Yingqiang<sup>1,2</sup> Niu Zhichuan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100083 China

<sup>2</sup> Synergetic Innovation Center of Quantum Information and Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** By reducing the Al concentration in waveguide layer and optical confinement layer, stabilizing the epitaxial growth condition and combining with standard broad-area-laser processing technology, we obtain a continuous output power of  $823\ \text{mW}$  when working at  $15\text{ }^\circ\text{C}$ , the peak wavelength is  $1.96\ \mu\text{m}$  with  $0.5\ \text{A}$  injection current. In pulsed condition of  $1000\ \text{Hz}$  and  $5\%$  duty cycle, the maximum output power of about  $1.86\ \text{W}$  is gotten.

**Key words** lasers; mid-infrared; high power; optoelectronic countermeasure

**OCIS codes** 140.280.3420; 300.2140; 300.6260

## 1 引言

室温连续中红外激光源在远距离探测、吸收光谱技术(TDLAS)、医疗诊断和治疗以及军用制导和红外光电对抗(IRCM)等领域有大量需求<sup>[1-3]</sup>。该波段的半导体激光器具有功耗低、工作温度高、效率高和小型易集成等优点,其市场前景乐观,应用潜力巨大,已成为目前国内外一个研究热点,其中基于(AIGaIn)(AsSb)材料体系的量子阱(QW)激光器成为研究主流<sup>[4]</sup>,激光波长在  $2\sim 4\ \mu\text{m}$  的铟化镓基室温连续激光器不论是多模还是单模,单管或者阵列在国际上已有不少报道<sup>[5-8]</sup>。2011年,纽约州立大学石溪分校将基于该材料体系的量子阱激光器的室温连续激光波长扩展至  $3.44\ \mu\text{m}$ <sup>[7]</sup>,2012年德国华特肖特基学院将室温脉冲激光波长扩展到  $3.73\ \mu\text{m}$ <sup>[8]</sup>。美国石溪分校、德国夫琅禾费研究所在该领域拥有大量研究成果。目前, $2\ \mu\text{m}$

收稿日期: 2015-01-20; 收到修改稿日期: 2015-03-01

基金项目: 国家 973 计划(2014CB643903, 2013CB932904), 国家重大仪器专项(2012YQ140005), 国家自然科学基金(61435012, U1037602, 61290303), 中国科学院战略先导专项(B)(XDB01010200)。

作者简介: 廖永平(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事 GaSb 基大功率中红外激光器器件制备研究, E-mail: liaoyongping@semi.ac.cn。

导师简介: 牛智川(1963—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事半导体量子点单光子源器件、量子阱激光器以及超晶格光电探测器方面研究。E-mail: zcniu@semi.ac.cn(通信联系人)

室温单管功率已经达到近 2W,单模功率接近 200 mW,并且已经开始实用,国内一些研究组在材料优化以及器件制备等方面也取得很多研究进展<sup>[5,6,9,10]</sup>。本文通过优化稳定外延条件和器件制备工艺,将 2 μm GaInSb/AlGaAsSb 量子阱激光器 15℃单面连续激射功率提升至 823 mW,在 1000 Hz,5%占空比的脉冲工作模式下,最大脉冲功率达到 1.868 W。

## 2 实验内容及结果

使用固态源 Gen-II MBE 系统,在 2 英寸 GaSb:Te 衬底(100)方向上外延生长激光器结构。有源区由两个 InGaSb 量子阱和一个低铝 Al<sub>0.3</sub>GaAsSb 势垒组成,波导层为 400 nm 厚的 Al<sub>0.3</sub>GaAsSb。限制层为 2 μm 厚的高铝组分 Al<sub>0.5</sub>GaAsSb,对光场进行横向限制<sup>[11]</sup>,具体结构如图 1 所示。

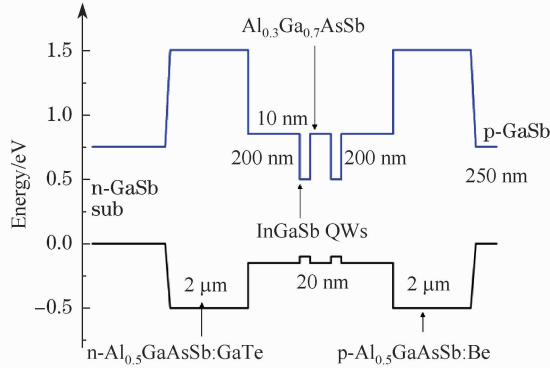


图 1 量子阱激光器外延结构

Fig.1 Epitaxy structure of the QWs laser

外延生长结束后,利用接触式标准光刻技术和电感耦合等离子体刻蚀(ICP)干法刻蚀,制作了长 1500 μm,宽 100 μm,深 2.1 μm 的脊条,然后采用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)的方法沉积了 250 nm SiO<sub>2</sub> 电介质层,并通过二次光刻和干法刻蚀,在 SiO<sub>2</sub> 介质层上形成 1400 μm×90 μm 的电流注入窗口,再通过电子束蒸发沉积 500/500/10000 Å Ti/Pt/Au 作为 p 面接触电极。然后将衬底减薄至 120 μm 并抛光,最后热蒸发 500/3000 Å AuGeNi/Au 并高温退火形成欧姆接触。

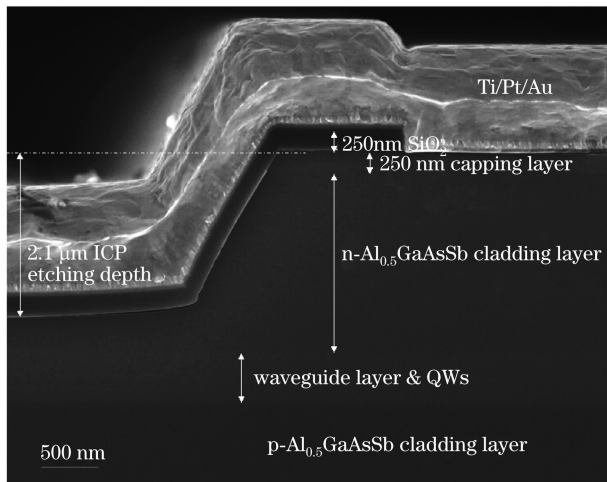


图 2 脊条截面扫描电镜图像

Fig.2 Scanning electron microscope image of ridge section

将样品解离成 1500 μm 长、500 μm 宽的单管,用 In 焊料将其倒装在铜热沉引出电极并固定在 TO-3 底座上,将风冷机设置在 15℃对器件进行测试。图 3 为所测试的电流-电压-功率(I-V-P)曲线以及电流和插头效率(WPE)关系曲线,图 4 表示当注入电流 I 为 0.5 A 时,激光器峰值波长 λ<sub>m</sub> 为 1.98 μm。

通过数值拟合,得出激光器的斜率效率为 201.7 mW/A,激光器阈值电流为 0.18 A,阈值电流密度为 143 A/cm<sup>2</sup>。当注入电流为 4.2 A 时,输出光功率为 823 mW,此时电压为 4.2 V。当注入电流为 0.5 A 时,峰值波

长为 1980 nm。器件最大能量转换效率在 0.4 A 时达到最大的 16.7%，在 800 mW 功率处仍然超过 5%。

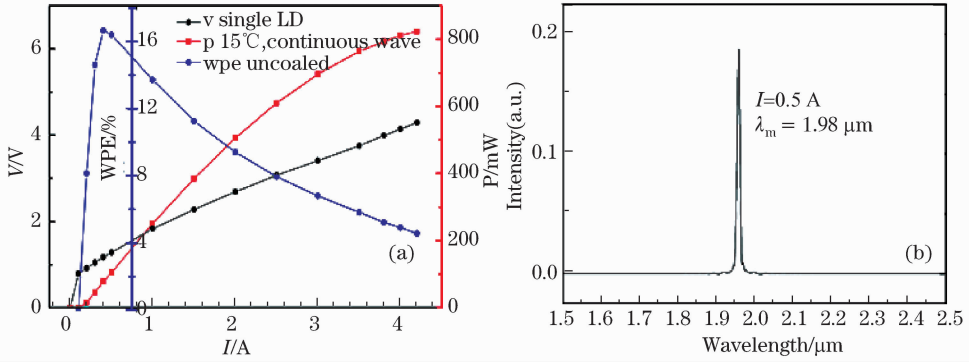


图 3 (a) 器件的  $I$ - $V$ - $P$  以及效率曲线; (b) 注入电流为 0.5 A 时的发光谱线

Fig. 3 (a)  $I$ - $V$ - $P$  and efficiency feature; (b) luminescence spectrum with 0.5 A injection current

在室温连续工作模式下,测量了激光器峰值波长与注入电流的关系,注入电流范围为 200~450mA,结果图 4 所示。

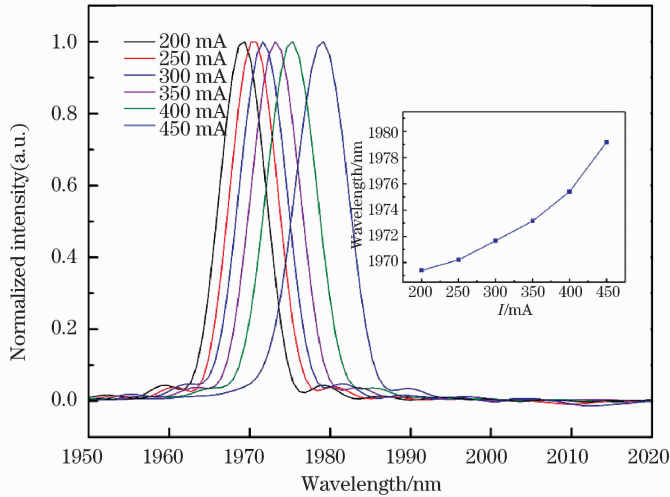


图 4 注入电流从 200 mA 增加到 450 mA 的电致发光谱线

Fig. 4 E-L spectra with injection current ranging from 200mA to 450mA

当注入电流为 0.2 A 时,器件峰值波长为 1970.2 nm,随着注入电流的增加,峰值波长向长波方向移动(红移),注入电流为 0.45 mA 时峰值波长为 1979.2 nm。而且,激光器工作在大电流时,红移现象比工作在小电流时更加明显。这主要是由于随着注入电流的增加,导带电子浓度变大,能带尾部伸入禁带中,导致禁带宽度变窄,峰值波长变长<sup>[12]</sup>。

对比了器件在脉冲工作模式和连续工作模式的  $P$ - $I$  特性,如图 5 所示。

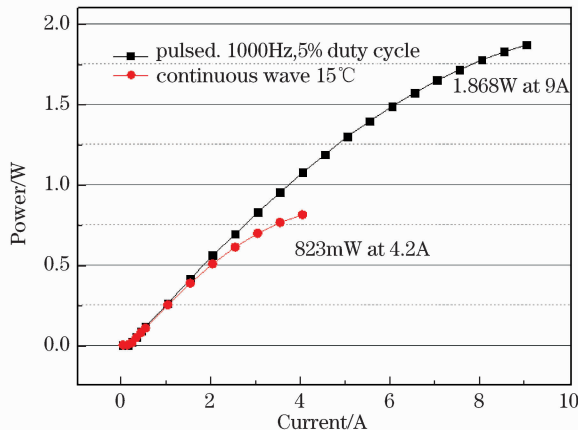


图 5 器件两种工作模式  $P$ - $I$  特性

Fig. 5  $P$ - $I$  features of two operating models

图 5 中红色曲线表示器件连续工作  $P-I$  特性,黑色曲线为器件在脉冲工作模式下的  $P-I$  特性。脉冲频率为 1000 Hz,脉冲宽度 50  $\mu\text{m}$ ,占空比为 5%的条件下,当电流加到 9 A 时,脉冲功率达到 1.868 W。对比可知,当电流较小(小于 1.5A)时,器件热效应不明显,脉冲工作模式与连续工作模式下激光管的光功率基本一致。在连续工作模式下,当注入电流逐渐增加时,器件发热越严重,非辐射复合越显著,斜率效率降低,出光功率与脉冲工作模式相比有明显下降,若继续增大注入电流则有可能造成腔面灾变损伤,使器件失效<sup>[13]</sup>。

### 3 结 论

通过优化和稳定外延生长条件以及宽条形激光器的工艺技术,制备了光电性能良好的激光器单管器件,在 15℃工作温度下连续激射最大功率达到 823 mW,当注入电流为 0.5 A 时,峰值波长为 1980 nm。在频率为 1000 Hz,占空比为 5%的脉冲工作模式下,最大脉冲功率达到 1.868 W。

### 参 考 文 献

- 1 J Benedikt, Thomas. Mid-IR Laser Application in Medicine[M]. Topics in Applied Physics, 2003; 530–565.
  - 2 Y Rouillard, F Genty, A Perona, *et al.*. Edge and vertical surface emitting lasers around 2.0–2.5  $\mu\text{m}$  and their applications[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, 2001, 359(1780):581–596.
  - 3 J Hodgkinson, B van Well, M Padgett, *et al.*. Modeling and interpretation of gas detection using remote laser pointers[J]. Spectrochimica Acta Part A, 2006, 63(5):929–939.
  - 4 M Rattunde, J Schmitz, R Kiefer, *et al.*. Comprehensive analysis of the internal losses in 2.0  $\mu\text{m}$  (AlGaIn)(AsSb) quantum-well diode lasers[J]. Appl Phys Lett, 2004, 84(23):4750–4752.
  - 5 Zhang Y G, Zheng Y L, Lin C, *et al.*. Continuous wave performance and tunability of MBE grown 2.1  $\mu\text{m}$  InGaAsSb/AlGaAsSb MQW lasers[J]. Chin Phys Lett, 2006, 23(8):2262–2265.
  - 6 Xing J L, Zhang Y, Liao Y P, *et al.*. Room-temperature operation of 2.4  $\mu\text{m}$  InGaAsSb/AlGaAsSb quantum-well laser diode with low-threshold current density[J]. Chin Phys Lett, 2014, 31(5):054204.
  - 7 M T Kelemen, J Gilly, M Rattunade, *et al.*. Mid-infrared high-power diode lasers and modules[C]. SPIE, 2010, 7583:75830O.
  - 8 R Liang, G Kipshidze, T Hosoda, *et al.*. 3.3–3.4  $\mu\text{m}$  diode lasers based on triple-layer GaInAsSb quantum wells[J]. IEEE, 2014, 26(7): 664–666.
  - 9 Y Zhang, G W Wang, B Tang, *et al.*. Molecular beam epitaxy growth of InGaSb/AlGaSb strained quantum well diode lasers[J]. Journal of Semiconductors, 2011, 32(10): 103002–4.
  - 10 J L Xing, Y Zhang, Y Q Xu, *et al.*. High quality above 3  $\mu\text{m}$  mid-infrared InGaAsSb/AlGaInAsSb multiple-quantum well grown by molecular beam epitaxy[J]. Chin Phys B, 2014, 23(1):017805.
  - 11 J J Li, B F Cui, J Deng, *et al.*. 980nm high power semiconductor laser with asymmetric suoe large optical cavity[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11):1102011.
  - 12 del Amol J, Swirhum S, Swanson R M, *et al.*. Simultaneous measurement of hole lifetime, hole mobility and bandgap narrowing in heavily doped n-type silicon[J]. IEDM Tech Dig, 1985, 31: 290–293.
  - 13 H T Peng, X Y Jia, S Z Zhang, *et al.*. Facet passivation of high power semiconductor lasers[J]. Micronanoelectronic Technology, 2009, 46(10):591–594.
- 彭海涛,家秀云,张世祖等. 大功率半导体激光器的腔面钝化[J]. 微纳电子技术,2009,46(10):591–594.

栏目编辑: 宋梅梅