

# 7. 8 $\mu\text{m}$ 二级分布反馈量子级联激光器\*

郭 瑜 刘峰奇<sup>†</sup> 刘俊岐 路秀真 王占国

(中国科学院半导体研究所 材料科学重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 报道了基于应变补偿的 InP 基  $\text{In}_{0.53+x}\text{Ga}_{0.47-x}\text{As}/\text{In}_{0.52-y}\text{Al}_{0.48+y}\text{As}$  分布反馈量子级联激光器. 采用二级光栅作为反馈, 激射工作波长为 7.8 $\mu\text{m}$ , 在 1% 占空比, 5kHz 频率的工作条件下, 在 93~173 K 的温度范围内, 单模发射光谱边模抑制比均超过 20dB, 调谐系数  $d/dT=0.5125\text{nm}/\text{K}$ . 在 93 K 时, 峰值功率为 30mW, 直到 153 K 时, 峰值光功率仍达到 12mW.

**关键词:** 量子级联激光器; 分布反馈; 分子束外延; 应变补偿

**PACC:** 6855; 4255P **EEACC:** 4320J; 2520D

**中图分类号:** TN365 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)03-0627-03

## 1 引言

量子级联激光器<sup>[1]</sup>是一种新型单极性半导体激光器, 与常规半导体激光器不同, 它是利用量子限制效应引起的导带中分立子能带之间的电子从高能态向低能态跃迁发光. 量子级联激光器的激射波长是由导带中分立子能级之间的位置决定, 并可以采用“能带工程”来设计所需要的激射波长, 采用分子束外延的方法来生长. 自 1994 年量子级联激光器发明以后, 已经取得了相当大的进展, 波长可覆盖中远红外范围<sup>[2,3]</sup>, 并已实现高功率室温连续工作<sup>[4,5]</sup>.

为了用于大气痕量气体监测、化学传感以及分子光谱等领域, 要求量子级联激光器必须能够稳定单模发射, 并具有可控的调谐范围. 而目前实现单模发射最有效的方法就是采用分布反馈激光器<sup>[6,7]</sup>, 通常分布反馈激光器是采用全息曝光制作光栅, 并需要二次外延生长, 这使得制作工艺非常复杂.

为了简化工艺, 我们采用直接光刻的办法制备出二级表面光栅, 这样无需再次外延可一次成型, 并最终实现了分布反馈量子级联激光器.

## 2 实验

激光器材料是利用 EPI Gen 固源分子束外延系统在 n 型 InP 衬底上生长. 先生长下波导层 ( $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ , Si,  $8 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ , 厚度 0.4 $\mu\text{m}$ ), 接着是 35 个周期的  $\text{In}_{0.53+x}\text{Ga}_{0.47-x}\text{As}/\text{In}_{0.52-y}\text{Al}_{0.48+y}\text{As}$  有源层 (厚度 2.28 $\mu\text{m}$ ), 再跟着是更厚的上波导层 ( $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ , Si,  $8 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ , 厚度 0.6 $\mu\text{m}$ ), 最上面是高掺杂的 n 型帽层 ( $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ , Si,  $4 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ , 厚度 0.5 $\mu\text{m}$ ), 帽层也是光栅的主层.

有源区采用应变补偿的办法可以有效降低载流子从高能态隧穿到连续态的概率. 从注入势垒开始, 有源区一个周期的层序是 **4.3/2.1/0.8/6.3/1.0/6.2/1.0/5.4/2.4/3.7/1.5/3.6/1.4/3.5/1.6/3.4/2.1/3.3/2.5/3.2/2.7/3.2nm**, 其中黑体字表示  $\text{In}_{0.52-y}\text{Al}_{0.48+y}\text{As}$  势垒层, 白体字表示  $\text{In}_{0.53+x}\text{Ga}_{0.47-x}\text{As}$  势阱层, 带下划线的表示 n 型掺杂层 ( $\text{Si}, 3 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ).

图 1 是激光器材料的 X 射线双晶衍射结果, 由于有源区结构的周期性, 可以看到 40 多级的卫星

\* 国家自然科学基金(批准号: 90101002, 60136010), 国家高技术研究发展计划(批准号: 2001AA311140), 及国家重点基础研究发展计划(批准号: G20000683-02) 资助项目

<sup>†</sup> 通信联系人, Email: fqliu@red.semi.ac.cn

2005-02-05 收到

峰,卫星峰半高宽很窄,并具有明显的周期性,表明我们生长的材料质量很好,界面非常陡峭,这也为我们制备分布反馈量子级联激光器奠定了材料基础.根据卫星峰的间距可以计算出有源区中单个周期的实际厚度,实际结果与设计值非常接近.

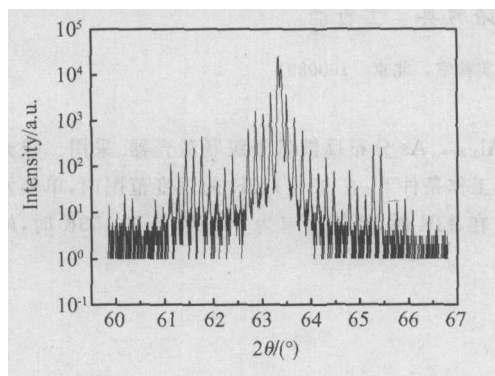


图 1 应变补偿量子级联激光器的 X 射线双晶衍射谱

Fig. 1 Double crystal X-ray diffraction for strain-compensated quantum cascade laser

利用光刻方法曝光出周期为  $2.45\mu\text{m}$  的二级光栅,并采用干法和湿法相结合的办法来腐蚀光栅(光栅深度  $260\text{nm}$ ).采用  $\text{HBr}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=1:1:10$  湿化学腐蚀出双沟脊形波导,脊宽  $60\mu\text{m}$ ,沟深  $3.5\mu\text{m}$ , $300\text{nm}$  的  $\text{SiO}_2$  用作电绝缘层,在脊上开窗口,蒸发  $\text{Ti}/\text{Au}$  作为正面电极,再次在脊上开窗口腐蚀掉部分  $\text{Ti}/\text{Au}$ ,露出表面光栅,接着将样品减薄至  $100\mu\text{m}$ ,蒸发  $\text{AuGeNi}/\text{Au}$  作为背电极.最后对器件进行解理、烧结、压焊,完成后工艺.

如图 2 所示,正电极仅覆盖脊的边缘(两侧约各有  $7\mu\text{m}$ ),这可以防止波导中大的金属吸收损耗,同时又可以构成侧向电流注入.

### 3 测试结果与讨论

激光器管芯被固定到温度可控( $77\sim 300\text{K}$ )的液氮杜瓦的冷端,进行脉冲测试.脉宽为  $2\mu\text{s}$ ,频率为  $5\text{kHz}$ .利用 Bruker Equinox 55 型傅里叶变换红外光谱仪进行光谱测量,并采用步进扫描时间分辨模式.利用热电探测器进行光功率测量.

分布反馈激光器的发射波长可以通过改变电流和温度来进行调谐.图 3 是腔长为  $1.5\text{mm}$ ,脊宽为  $60\mu\text{m}$  的器件,从  $93\sim 173\text{K}$  不同温度下测得的单模发射光谱.边模抑制比(SMSR)均超过  $20\text{dB}$ ,中心波长从  $7.798\mu\text{m}$  变化到  $7.839\mu\text{m}$ ,调谐系数  $d\lambda/dT$

$= 0.5125\text{nm}/\text{K}$ .

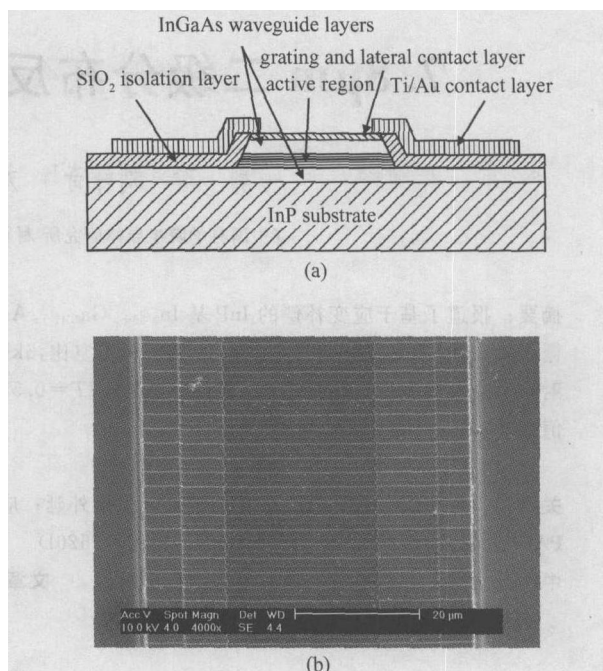


图 2 (a) DFB QC 激光器脊波导的截面示意图 正电极仅覆盖脊波导两侧;(b) DFB QC 激光器的扫描电镜照片(俯视图)

Fig. 2 (a) Schematic cross-section through the waveguide of a DFB QC laser The top metal contact covers only a small fraction on both shoulders of the waveguide; (b) A scanning electron microscopy top view picture of a fabricated DFB QC laser

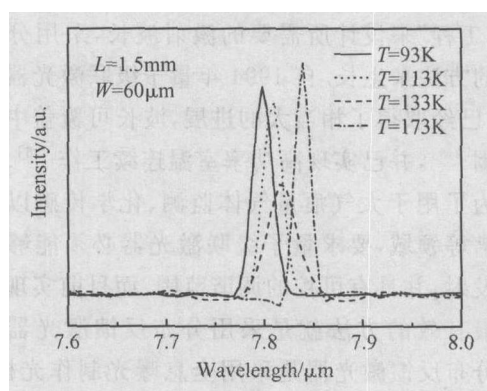


图 3 DFB QC 激光器在不同热沉温度下的发射光谱

Fig. 3 Lasing spectra for different heat sink temperature for DFB QC laser

因为二级光栅的光耦合效率较低,只有部分光从端面发出,使得 DFB QC 激光器的发光性能大为下降<sup>[8]</sup>.图 4 是腔长为  $1.5\text{mm}$ ,脊宽为  $60\mu\text{m}$  的器件在不同温度下测得的  $P-I$  曲线,可以看到,在  $93\text{K}$  时,峰值光功率为  $30\text{mW}$ ,到  $153\text{K}$  时,峰值光功率仍达到  $12\text{mW}$ .

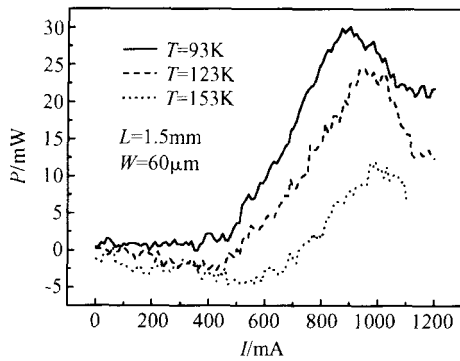


图4 DFB QC激光器在不同热沉温度下测得的  $P-I$  曲线  
Fig. 4  $P-I$  curves of DFB QC laser measured at different temperatures

## 4 结论

我们在国内首次研制成功二级光栅分布反馈量子级联激光器。光栅制备在表面高掺杂的  $\text{In}_{0.53}\text{-Ga}_{0.47}\text{As}$  帽层上,并直接暴露在空气中。电流注入采用侧向注入方案。这种二级光栅分布反馈量子级联激光器制作方法虽简单,但是以牺牲发光功率为巨大代价,即使这样我们仍成功研制出性能良好的DFB QC激光器。在93~173 K的温度范围内,单模发射光谱中心波长从7.798 $\mu\text{m}$ 变化到7.839 $\mu\text{m}$ ,调谐系数  $d/dT=0.5125\text{nm/K}$ 。在93 K时,峰值光功率为30 mW,到153 K,峰值光功率仍达到12 mW。

## Second-Order Distributed Feedback Quantum Cascade Lasers at 7.8 $\mu\text{m}$ \*

Guo Yu, Liu Fengqi<sup>†</sup>, Liu Junqi, Lu Xiuzhen, and Wang Zhanguo

(Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The realization of distributed feedback quantum cascade lasers based on strain-compensated  $\text{In}_{0.53+x}\text{Ga}_{0.47-x}\text{As}/\text{In}_{0.52-y}\text{Al}_{0.48+y}\text{As}$  grown on InP substrate using molecular beam epitaxy is reported. The lasers operate at 7.8 $\mu\text{m}$ . The second-order surface grating with a period of 2.45 $\mu\text{m}$  is used for feedback. For 1% duty cycle and 5kHz repetition rate, the emission spectrum is single mode with more than 20dB side mode suppression ratio between 93 and 173 K with the tuning coefficient of  $d/dT=0.5125\text{nm/K}$ . Peak optical power is over than 12mW up to 153 K.

**Key words:** quantum cascade laser; distributed feedback; molecular beam epitaxy; strain-compensated

**PACC:** 6855; 4255P **EEACC:** 4320J; 2520D

**Article ID:** 0253-4177(2005)03-0627-03

**致谢** 在材料生长上,得到李路、梁凌燕、周华兵等人帮助;在光栅制作上得到国家光电子工艺中心王宝军的帮助;在器件后工艺上得到常秀兰、梁平、胡颖、孙虹等的帮助。在此一并表示感谢!

## 参考文献

- [1] Faist J, Capasso F, Sivco D L, et al. Quantum cascade lasers. *Science*, 1994, 264: 553
- [2] Liu Fengqi, Ding Ding, Xu Bo, et al. Strain-compensated quantum cascade lasers operating at room temperature. *J Cryst Growth*, 2000, 220: 439
- [3] Liu Fengqi, Zhang Yongzhao, Zhang Quansheng, et al. Room temperature (34 °) operation of strain-compensated quantum cascade lasers. *Electron Lett*, 2000, 36(20): 1704
- [4] Colombelli R, Capasso F, Gmachl C, et al. Far-infrared surface-plasmon quantum-cascade lasers at 21.5 $\mu\text{m}$  and 24 $\mu\text{m}$  wavelengths. *Appl Phys Lett*, 2001, 78(18): 2620
- [5] Slivken S, Huang Z, Evans A, et al. High-power (9 $\mu\text{m}$ ) quantum cascade lasers. *Appl Phys Lett*, 2002, 80(22): 4091
- [6] Beck M, Hofstetter D, Aellen T, et al. Continuous wave operation of a mid-infrared semiconductor laser at room temperature. *Science*, 2002, 295: 301
- [7] Faist J, Gmachl C, Capasso F, et al. Distributed feedback quantum cascade lasers. *Appl Phys Lett*, 1997, 70(20): 2670
- [8] Hofstetter D, Faist J, Beck M, et al. Demonstration of high-performance 10.16 $\mu\text{m}$  quantum cascade distributed feedback lasers fabricated without epitaxial regrowth. *Appl Phys Lett*, 1999, 75(05): 665
- [9] Hofstetter D, Faist J, Beck M, et al. Surface-emitting 10.1 $\mu\text{m}$  quantum-cascade distributed feedback lasers. *Appl Phys Lett*, 1999, 75(24): 3769

\* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 90101002, 60136010), National High Technology Research and Development Plan of China (No. 2001AA311140), State Key Development Program for Basic Research of China (No. G20000683-2)

<sup>†</sup> Email: fqliu@red.semi.ac.cn

Received 5 February 2005

© 2005 Chinese Institute of Electronics