

GaAs/AlGaAs 量子级联激光器*

刘俊岐 路秀真 郭瑜 刘峰奇[†] 王占国

(中国科学院半导体研究所 半导体材料科学实验室, 北京 100083)

摘要: 利用分子束外延方法生长了激光波长约为 9μm 的 GaAs/Al_{0.45}Ga_{0.55}As 量子级联激光器. 条宽 35μm, 腔长 2mm 的器件准连续激光温度最高达 120 K, 81 K 下未经收集效率修正的峰值功率超过 70mW.

关键词: 量子级联激光器; 分子束外延; 有源区; 注入区

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

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)03-0624-03

1 引言

近年来, GaAs/AlGaAs 成为继 InP/InGaAs/InAlAs 之后制作量子级联激光器^[1]最具吸引力的材料体系. 这主要来源于三个方面: (1) GaAs 作为继 Si 之后的半导体材料, 处理工艺相当成熟, 并且由于 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 材料体系在宽成分范围内的晶格匹配特点, 使得 GaAs 基量子级联激光器在器件设计方面具有独特的灵活性; (2) 易于获得无铝的低损耗波导^[2]; (3) 能够在远红外范围获得粒子数反转, 在 THz 量子级联激光器研制方面扮演着重要角色. 尽管具有以上的优点, 目前 GaAs/AlGaAs 量子级联激光器的性能还远不如 InP/InGaAs/InAlAs 基器件. GaAs/AlGaAs 材料体系较小的带阶 (band offset) 容易造成载流子的热激活泄漏, 降低电子向有源区激发态能级的注入效率, 从而限制了器件的连续波工作温度. GaAs 较 InP 小的热导率不利于波导核的热耗散, 易于造成波导核的自加热效应而增强了载流子的热激活泄漏过程. 为满足光学限制的要求, 无铝波导层的厚度往往需要超过 4μm, 使得整个外延层厚度超过 10μm, 接近了分子束外延的极限, 从而造成材料生长困难. 由于 GaAs/AlGaAs 量子级联激光器研制的这些困难, 目前只有法国、奥地利、英国、德国等少数几个国家进行这方面的工作.

2 材料生长与性能表征

实验样品是基于通常的三耦合量子阱有源区结构, 类似于文献[3]. 材料体系选择为 GaAs/Al_{0.45}Ga_{0.55}As. 具体的生长层次见图 1. 图 2 为计算所得的工作电压下波导核的导带结构及相应波函数模的平方. 波导核的具体结构见图 2 注释部分. 所有的层通过分子束外延单生长步骤在 n 型掺杂的 GaAs 衬底上完成. 高掺杂的 GaAs 波导层用于降低平面光学限制所必需的折射系数. 插入的 3.75μm 低掺杂 ($4 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$) GaAs 层用来减小光学模与 n⁺⁺ 层的交叠系数, 从而避免过高的波导损失^[2]. 为了防止注入区电子回流上一级有源区并且保证注入条件下的电荷电中性, 超晶格注入区中间的两个周期进行了掺杂 ($(6 \sim 7) \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$)^[4].

GaAs	$6 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	1μm
GaAs	$4 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$	3.75μm
30 周期波导核		
GaAs	$4 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$	3.75μm
GaAs	$6 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	1μm
GaAs substrate	$2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	

图 1 GaAs/AlGaAs 量子级联激光器分子束外延生长结构简图

Fig. 1 Schematic cross section of complete GaAs/AlGaAs laser structure grown by MBE

*国家自然科学基金(批准号: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规划(批准号:G20000683-02)资助项目

[†]通信联系人. Email: fqliu@red.semi.ac.cn

2005-02-03 收到

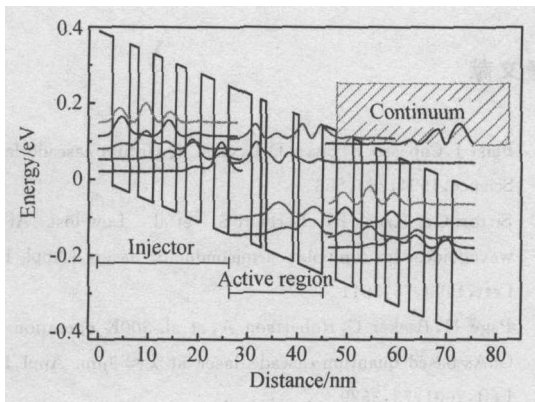


图 2 在正向偏压下带结构及相关波函数模的平方 每一级层次序由注入势垒开始,分别为:4.6,1.9,1.1,5.4,1.1,4.8,2.8,3.4,1.7,3.0,1.8,2.8,2.0,3.0,2.6,3.0nm,粗体为垒,白体为阱,下划线的部分掺杂浓度为(6~7) ×10¹⁷cm⁻³.
Fig.2 Conduction band diagram and squared wavefunctions under positive bias condition The layer sequence in one stage starting from the injection barrier is **4.6**,1.9,1.1,5.4,1.1,4.8,2.8,3.4,1.7,3.0,**1.8**,**2.8**,**2.0**,3.0,2.6,3.0nm The bold script are barrier, normal script wells, and underscore doped regions (6~7) ×10¹⁷cm⁻³.

样品的 X 射线衍射摇摆曲线如图 3 所示. 卫星峰具有良好的周期性和窄的线宽,这表明样品在外延生长方向的成分梯度可以忽略并且界面质量好^[5]. 每一级的周期可通过以下方程^[6]获得,

$$= \frac{(n_i - n_j)}{2(\sin i - \sin j)} \quad \frac{(n_i - n_j)}{2 \cos i}$$

这里 λ 为所用 X 射线的波长; n_i 和 n_j 为两个不同指纹的峰位; i 和 j 为卫星峰的角度位置. 计算表明

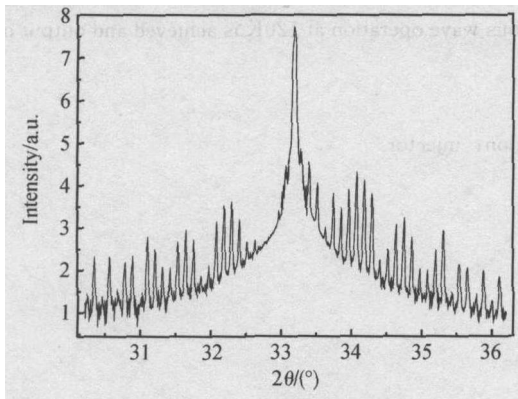


图 3 GaAs/ Al_{0.45}Ga_{0.55}As 量子级联激光器波导核 X 射线衍射结果
Fig. 3 X-ray diffraction spectra for a 30 period GaAs/ Al_{0.45}Ga_{0.55}As quantum cascade laser waveguide core

的实验值基本符合设计值. 我们把图 3 中央的两个相邻的主峰看作衬底峰和一个周期内具有平均成分的层峰,则波导核中势垒层的 Al 摩尔组分接近设计值.

3 器件的制作与测量结果分析

样品通过光刻和湿法化学腐蚀做成具有不同脊宽的双沟脊型波导结构(条宽分别为 35,45,55μm)刻蚀深度穿透波导核. 利用 CVD 法生长 300nm 的 SiO₂ 作为脊周围的绝缘层. 在脊区的中部开出电流注入窗口(宽度分别为 15,25,35μm),然后蒸发非合金的 Ti/ Au 作为正面欧姆接触. 样品从背面减薄至 100μm,淀积合金的 AuGe/ Ni/ Au 作为背面欧姆接触. 器件解理成 2~3mm 长的法布里-贝罗腔结构. 考虑到级联激光器的阈值电流密度较高,我们采用了上电极引线的多重压焊和外延面朝下芯片焊接技术.

测量过程中,激光器管芯安装在液氮杜瓦内的冷指上,其温度可以控制. 光谱测量在 BRUKER EQUINOX55 型红外傅里叶变换光谱仪上进行,采用时间分辨步进扫描模式. 光功率测量使用了已校准的热电探测器.

图 4 为光功率-注入电流曲线,其中的插图为器件的光谱. 图 4 中的光功率未进行收集效率的修正,在我们的实验中收集效率小于 30%.

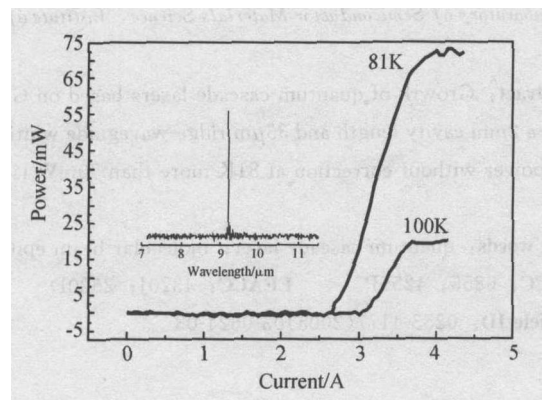


图 4 宽 35μm 长 2mm 的激光器在脉冲驱动模式下的光功率-电流曲线 占空比为 2μs/200μs. 插图为激光谱.
Fig. 4 Optical output power per facet versus the driving current in pulsed mode operation of a 35μm wide and 2mm long laser The duty cycle is 2μs/200μs. The insert is the lasing spectrum of the laser.

工艺方面的改善将进一步提高器件的性能. 由于 GaAs/AlGaAs 量子级联激光器的波导核心区平行于层方向的热导率比垂直方向高一个数量级^[7], 增加淀积 Au 的厚度或者采用离子注入而不是湿法刻蚀来定义条形结构将会提高器件的横向散热, 这必然会大大减少注入区载流子的热激活, 从而提高注入效率, 改善器件工作的温度特性和功率输出特性, 这一工作正在进行中.

4 结论

在国内首次利用分子束外延技术成功地生长出了 GaAs/AlGaAs 量子级联激光器材料. 长 2mm 脊宽 35 μ m 的条形激光器在 5kHz、1% 占空比的脉冲电流驱动下最高工作温度为 120 K, 81 K 未经修正的峰值功率超过 70mW.

致谢 在材料生长过程中, 得到李路、梁凌燕的协助; X 射线衍射实验在北京同步辐射站进行, 得到郭立平、贾全杰二位老师的帮助; 在器件工艺方面得到常秀兰、梁平、胡颖、孙虹的大力帮助, 在此一并表示

感谢!

参考文献

- [1] Faist J, Capasso F, Sivco D L, et al. Quantum cascade laser. *Science*, 1994, 264:553
- [2] Sirtori C, Kruck P, Barbieri S, et al. Low-loss Al-free waveguides for unipolar semiconductor lasers. *Appl Phys Lett*, 1999, 75:3911
- [3] Page H, Becker C, Robertson A, et al. 300 K operation of a GaAs-based quantum-cascade laser at 9 μ m. *Appl Phys Lett*, 2001, 78:3529
- [4] Gehler M, Hey R, Kostial H, et al. Lasing properties of GaAs/ (Al, Ga) As quantum-cascade lasers as a function of injector doping density. *Appl Phys Lett*, 2003, 82:671
- [5] Liu Fengqi, Zhang Quansheng, Zhang Yongzhao, et al. Growth and characterization of InGaAs/InAlAs quantum cascade lasers. *Solid-State Electron*, 2001, 45:1831
- [6] Fewster P F. X-ray scattering from semiconductors. London: Imperial College Press, 2003
- [7] Pfeiffer C, Litzenberger M, Schrenk W, et al. Interferometric study of thermal dynamics in GaAs-based quantum-cascade lasers. *Appl Phys Lett*, 2003, 82:1664

GaAs/AlGaAs Quantum Cascade Lasers*

Liu Junqi, Lu Xiuzhen, Guo Yu, Liu Fengqi[†], and Wang Zhanguo

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

Abstract: Growth of quantum cascade lasers based on GaAs/Al_{0.45}Ga_{0.55}As and operating at a wavelength of 9 μ m is reported. For a 2mm cavity length and 35 μ m ridge-waveguide width, quasi-continuous wave operation at 120 K is achieved and output optical power without correction at 81 K more than 70mW is demonstrated.

Key words: quantum cascade laser; molecular beam epitaxy; active region; injector

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

Article ID: 0253-4177(2005)03-0624-03

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

[†] Email: fqliu@red.semi.ac.cn

Received 3 February 2005

© 2005 Chinese Institute of Electronics