

室温低阈值分布反馈量子级联激光器*

徐刚毅[†] 李耀耀 李爱珍 魏 林 张永刚 李 华

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

摘要: 报道了室温脉冲工作和低温下连续工作的分布反馈量子级联激光器(DFB-QCL), 提出了一种新型波导和光栅制备技术, 同时获得了合适的光耦合系数和低的波导损耗. 利用这种方法研制出波长为 $7.7\mu\text{m}$ 的分布反馈量子级联激光器. 激光器可以在大的温度范围内($155\sim 320\text{K}$)实现单模激射, 边模抑制比约 30dB. DFB-QCL 在室温脉冲工作时阈值电流密度为 $970\text{A}/\text{cm}^2$, 峰值输出功率达到 75mW . 该激光器还可以在连续模式下工作, 最高工作温度为 130K .

关键词: 中红外; 分布反馈; 量子级联激光器

PACC: 7138; 7340L; 4255P

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)S0-0489-03

1 引言

分布反馈量子级联激光器(DFB-QCL)作为目前最具竞争力的中红外激光光源, 正得到越来越多的关注, 其主要应用为高灵敏度的痕量气体检测^[1,2], 如 CO_2 , CH_4 , HCl , NO_2 , N_2O 等, 因此在空气质量检测、医疗诊断、工业控制等领域有重要的应用前景.

为提高检测灵敏度和应用的方便性, DFB-QCL 应具有室温低功耗、大的调谐范围等性能. 最近人们已在若干波长实现了室温连续工作^[3], 目前研究的焦点是降低激光器的阈值、提高器件散热效率, 从而提高激光器的高温性能. 本文作者通过引入新型的激光器波导和光栅结构, 同时获得合适的光耦合系数和较低的波导损耗, 从而得到了室温工作且阈值电流密度极低的 DFB-QCL.

2 实验

激光器材料由与 InP 衬底晶格匹配的 In-GaAs/InAsAs/InP 层构成, 通过气态源分子束外延生长得到. 实验中首先在 InP 衬底上外延激光器的下波导层(InGaAs, $n, 5 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$, $0.7\mu\text{m}$)和具有 60 个周期结构的有源区. 然后依次生长上波导层(InGaAs, $n, 5 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$, $0.7\mu\text{m}$)、低掺杂上限制层(InP, $n, (1\sim 3) \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$, $1.6\mu\text{m}$)、重掺杂上限

制层(InP, $n^+, 5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$, $0.7\mu\text{m}$)和帽层(In-GaAs, $n^+, 2 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$, $0.1\mu\text{m}$). 有源区结构为 Gmachl 等人^[4]提出的三阱耦合垂直跃迁光发射结构, 但在有源区调制掺杂中使用了更低的二维掺杂浓度($8.0 \times 10^{10}\text{cm}^{-2}$)以进一步降低由自由电子吸收引起的波导损耗.

器件制备中首先用全息法在外延结构的顶部制备一级光栅(周期 $1.119\mu\text{m}$), 结合湿法的选择腐蚀和各向异性腐蚀得到设计深度的光栅, 通过原子力显微镜测试精确控制光栅深度. 光栅腐蚀后, 通过常规工艺得到脊型波导激光器结构. 激光器光谱由傅里叶变化红外光谱仪(FTIR)测得, 光谱仪分辨率为 0.125cm^{-1} . 在电流-光功率($L-I$)测试中, 用经标定的室温快速 HgCdTe 收集激光. 器件工艺和测试表征的工作已在之前的论文中详细报道^[5].

3 结果

图 1 和 2 显示了一个 DFB-QCL 在脉冲模式下的激射光谱、 $L-I$ 以及 $I-V$ 曲线. 所用的脉冲频率和脉宽分别为 100kHz 和 100ns , 对应的脉冲占空比为 1%. 激射光谱显示, 在很大的温度范围内($155\sim 320\text{K}$)激光器都可以稳定地输出单模激光. 在整个温度范围内, 单模激光的边模抑制比约为 30dB. 高的边模抑制比证明了通过提高光栅深度确实获得了强的光反馈效果. 图 1 的插图显示, 由于有效折射率是温度的函数, 随着激光器热沉温度的变化导致激

* 国家自然科学基金(批准号: 60406008), 国家高技术研究发展计划(批准号: 2006AA03Z0406)和国家重点基础研究发展规划(批准号: 2006CB604903)资助项目

[†] 通信作者. Email: gyxu@mail.sim.ac.cn

2007-01-04 收到, 2007-01-19 定稿

光器波长从 155K 时的 7.686 μm 线性调谐至 320K 的 7.775 μm , 调谐速率为 $\Delta\lambda/\Delta T = 0.54\text{nm/K}$. 此外, 测试得到的单模激光线宽约为 0.18cm^{-1} , 对应于实验所用 FTIR 的测试精度. 从激光器的 $L-I$ 曲线中可以发现, 激光器在室温下的阈值仅为 $J_{\text{th}} = 970\text{A/cm}^2$, 这是在相似测试条件下所报道的最低的阈值电流密度之一. 如此低的 J_{th} 表明通过在光栅下方插入 n^+ InP 层确实可以显著地降低激光器的波导损耗. $L-I$ 曲线还表明, 在室温下激光器的最高峰值光功率为 75mW, 功率的斜率效率约为 140mW/A. 在低温下 (160K), 激光器的峰值功率上升到 230mW, 功率的斜率效率也上升到约 300mW/A.

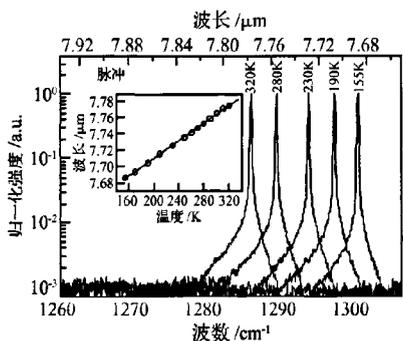


图 1 脉冲模式下激光器的发射光谱
Fig. 1 Single-mode spectrum of a laser operating in pulsed mode

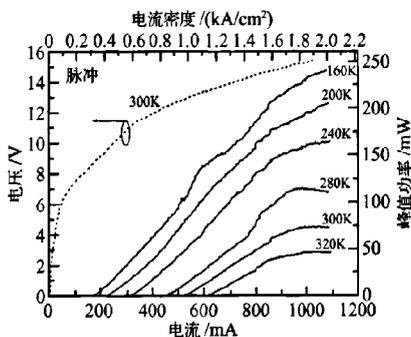


图 2 脉冲模式下激光器的电流-功率和电流-电压曲线
Fig. 2 Light output-to-current and voltage-to-current characteristics of a laser operating in pulsed mode

图 3 所示为激光器在连续模式下工作的光谱和光功率特性. 此时, 激光器同样输出单模激光, 并有高的边模抑制比 ($\text{SMSR} > 30\text{dB}$). 测试得到的单模线宽约为 0.18cm^{-1} , 主要受限于实验所用 FTIR 的光谱分辨率. 在连续模式下, 激光器在 80K 条件下的最大输出功率为 24mW, 而在最高工作温度 (130K) 时下降为 2mW. 对具有顶光栅结构的分布

反馈量子级联激光器, 本文所报道的连续模式下最高工作温度 (130K) 是目前国际上最高值.

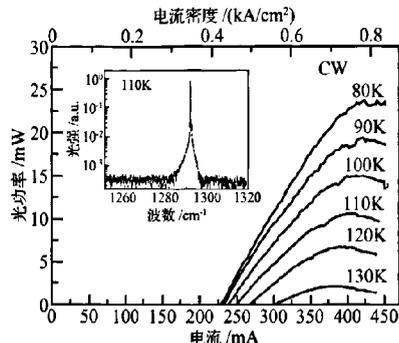


图 3 连续模式下激光器光谱以及功率曲线
Fig. 3 Single mode spectrum and light output-to-current characteristics of a laser under CW operation

4 讨论

本文中激光器性能的提高主要是因为我们引入了新型的激光器波导和光栅结构, 获得了合适的光耦合系数和较低的波导损耗. 图 4 为我们设计的 DFB-QCL 结构示意图, 激光器的一级光栅位于外延结构的顶部, n^+ InP 层和 InGaAs 帽层为光栅腐蚀牺牲层. 设计的光栅深度为 $0.7\mu\text{m}$, 光栅下方 n^+ InP 层厚度为 $0.1\mu\text{m}$. 通过在光栅下方插入一层 n^+ InP 层以降低光栅沟槽中金属-半导体界面处高损耗等离激元的折射率, 使等离激元与激光模式的折射率差增加, 从而减弱这两种模式的耦合, 降低激光器的波导损耗. 计算表明, 当光栅下方存在 $0.1\mu\text{m}$ 厚的 n^+ InP 层时激光器的平均波导损耗为 12.4cm^{-1} , 而光栅下方没有 n^+ InP 层时损耗升至 21.8cm^{-1} . 这证实了 n^+ InP 层确实减弱了激光模式与高损耗等离激元的耦合, 显著降低了激光器的波导损耗. 插入 n^+ InP 层同时会导致激光器光耦合系数降低, 为此我们通过增加光栅深度以获得合适的耦合系数. 光栅深度增加还会使光栅顶部的金属-

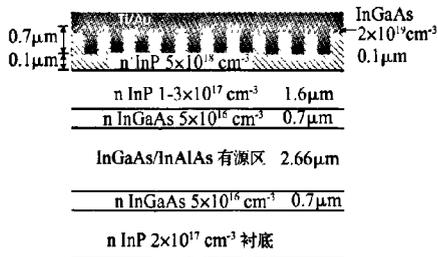


图 4 DFB-QCL 的波导结构
Fig. 4 Waveguide structure of the DFB-QCL

半导体界面远离有源区,从而进一步降低激光器的波导损耗.通过调节光栅下方 n^+ InP 层的厚度以及光栅深度,结合平板波导理论的计算,可以得到合适的耦合吸收和较低的波导损耗.

通过计算可知,这种波导和光栅结构的耦合系数 $|\kappa| \approx |4.3 + 2.6i| = 5.0 \text{ cm}^{-1}$. 由于实际光栅形貌的不理想会导致实验所得的耦合系数偏小,我们将激光器的腔长定为 $L = 3.0 \text{ mm}$,从而使实际耦合系数与腔长的乘积约为 1,以得到高的边模抑制比.

5 结论

本文作者通过引入新型的波导和光栅结构,获得了较低的波导损耗和适当的耦合系数,实现了低阈值电流密度、高边模抑制比的中红外波段可调谐-DFB-QCL,该激光器在连续工作模式下的工作温度

达到同类激光器的世界先进水平.

参考文献

- [1] Faist J, Gmachl C, Capasso F, et al. Distributed feedback quantum cascade lasers. *Appl Phys Lett*, 1997, 70(20):2670
- [2] Hofstetter D, Beck M, Aellen T, et al. High-temperature operation of distributed feedback quantum-cascade lasers at $5.3 \mu\text{m}$. *Appl Phys Lett*, 2001, 78(4):396
- [3] Bakirkin Y A, Kosterev A A, Curl R F, et al. Sub-ppbv nitric oxide concentration measurements using CW thermoelectrically cooled quantum cascade laser-based integrated cavity output spectroscopy. *Appl Phys B*, 2006, 82(1):149
- [4] Gmachl C, Tredicucci A, Capasso F, et al. High-power $\lambda \approx 8 \mu\text{m}$ quantum cascade lasers with near optimum performance. *Appl Phys Lett*, 1998, 72(24):3130
- [5] Li A Z, Xu G Y, Zhang Y G, et al. Low threshold distribution feedback quantum cascade lasers at $7.6 \mu\text{m}$ grown by gas source molecular beam epitaxy. *J Cryst Growth*, 2005, 278:770

Room Temperature, Low Threshold Distributed Feedback Quantum Cascade Lasers*

Xu Gangyi[†], Li Yaoyao, Li Aizhen, Wei Lin, Zhang Yonggang, and Li Hua

(State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: We report on pulsed and continuous-wave operation of single mode tunable distributed feedback quantum cascade lasers at $\lambda \approx 7.7 \mu\text{m}$. A deep top grating and a thin heavily doped InP layer beneath the grating are formed in the upper cladding to obtain simultaneously a strong feedback effect and a low waveguide loss. In pulsed operation, a very low threshold current density of 970 A/cm^2 and a peak power of 75 mW are achieved at 300 K . Reliable single mode emission with a side mode suppression ratio of $\sim 30 \text{ dB}$ is achieved in a large temperature range ($155 \sim 320 \text{ K}$) with a tuning range of 90 nm . The lasers operate in continuous-wave mode up to 130 K .

Key words: mid infrared; distributed feedback; quantum cascade lasers

PACC: 7138; 7340L; 4255P

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0489-03

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60406008), the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2006AA03Z0406), and the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2006CB604903)

[†] Corresponding author. Email: gyxu@mail.sim.ac.cn

Received 4 January 2007, revised manuscript received 19 January 2007