



# 直波导耦合输出 AlGaInAs 多量子阱环形激光器研究

李献杰, 齐利芳, 郭维廉, 于晋龙, 赵永林, 蔡道民, 尹顺政, 毛陆虹

中国电子科技集团公司第13研究所, 石家庄 050051;

天津大学电子信息工程学院, 天津 300072

E-mail: [xianjie@tom.com](mailto:xianjie@tom.com)

2008-11-30 收稿, 2009-03-25 接受

国家自然科学基金(批准号: 60706035)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2003CB314901)资助项目

**摘要** 采用 InP 基 InAlGaAs 多量子阱激光器外延材料结构, 利用感应耦合等离子体(ICP)干法刻蚀技术和聚酰亚胺介质平坦化工艺, 研制了多量子阱半导体环形激光器样品. 该器件通过加正偏压的环形结构谐振腔实现光激励, 然后借助紧邻的直线波导耦合将光信号输出. 环形谐振腔直径为 700  $\mu\text{m}$ , 波导宽度为 3  $\mu\text{m}$ . 用光纤对准直线波导端口耦合测试了环形激光器的光功率-电流特性曲线和激励光谱, 其阈值电流为 120 mA, 在注入电流 160 mA 时从直波导耦合输出得到激励光谱的中心波长为 1602 nm, 并结合光功率-电流特性曲线对环形激光器中的工作模式进行了初步分析.

**关键词**  
多量子阱  
环形激光器  
直波导  
双稳态

随着集成光路和全光网络技术的发展, 基于环行光谐振器结构的半导体环形激光器日益受到人们的关注, 成为近年来集成光学领域的研究热点之一<sup>[1-5]</sup>. 与传统法布里-珀罗(FP)腔半导体激光器和分布反馈(DFB)腔半导体激光器通过解理面和光栅实现谐振腔不同, 环形半导体激光器是通过闭合的环形腔实现光学谐振, 器件尺寸不再受解理腔面的限制, 结构简单紧凑. 随着半导体微细加工工艺的进步, 其环形谐振腔尺寸日趋微型化, 其本身材料结构、器件结构和制作工艺与光开关、光波导、光滤波器、波长选择器、光调制器和波长变换器等兼容, 加之该种器件还表现出光双稳特性, 可以实现光开关、光存储等光信号处理功能, 在大规模集成光路和全光网络等方面有广泛的应用前景.

本文设计了一种带直波导耦合输出的 InAlGaAs 多量子阱半导体环形激光器结构, 在激光器环形谐振腔上加电流并通过相邻直波导耦合输出到光纤成功观测了光的激励和环形激光器的单向双稳态工作模式, 并测量了器件的激励光谱.

## 1 器件外延层材料结构及生长

本文所用 InAlGaAs 多量子阱激光器外延材料纵向结构与普通 InP 基多量子阱激光器外延材料类似: 自下而上依次为高掺杂 N 型 InP 衬底、高掺杂 N 型 InP 缓冲层, N 型 InP 下包层、6 个周期的  $\text{In}_{0.53}\text{Al}_x\text{Ga}_{0.47-x}\text{As}$  应变多量子阱有源区, 量子阱区的 PL 谱图如图 1 所示, 峰值波长  $\lambda_{\text{PL}}$  为 1525 nm, 势垒和阱层的厚度分别为 10 nm 和 6 nm、P 型上包层、高掺杂 P 型 InGaAs 上欧姆接触层; 用 Aixtron 2000 金属有机物化学气相淀积系统(MOCVD)在 2 英寸(100)晶向 N 型 InP 衬底上生长完成.

## 2 器件结构及制作工艺

带波导耦合输出半导体环形激光器结构如图 2 所示, 由一个环形谐振腔与上下两条耦合直波导两部分构成. 激光器环形谐振腔圆环半径为 350  $\mu\text{m}$ , 环形谐振腔和直波导脊宽均为 3  $\mu\text{m}$ , 上下两条直波导与环形谐振腔波导之间的间距为 1.5  $\mu\text{m}$ , 该间距的设计受限于工艺加工精度. 在直波导和环形谐振

**引用格式:** 李献杰, 齐利芳, 郭维廉, 等. 直波导耦合输出 AlGaInAs 多量子阱环形激光器研究. 科学通报, 2009, 54: 3088-3091

Li X J, Qi L F, Guo W L, et al. AlGaInAs multi-quantum wells ring laser with optical coupling waveguides. Chinese Sci Bull, 2009, 54: 3716-3719, doi: 10.1007/s11434-009-0237-9

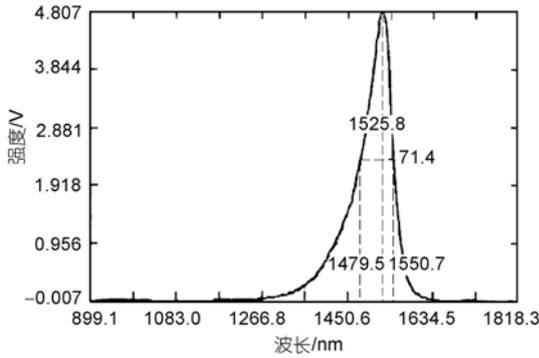


图1 AlGaInAs 多量子阱环形激光器材料结构光荧光光谱

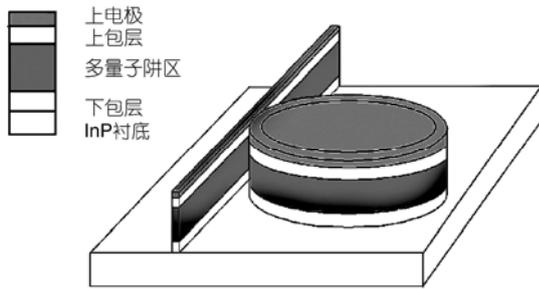


图2 带波导耦合输出半导体环形激光器结构示意图

腔上分别制作了 P 型欧姆接触电极, 在 N 型 InP 衬底背面制作公共 N 型欧姆接触. 在环形谐振腔电极上加正向偏压时可在谐振腔内产生激光, 光的方向为顺时针或逆时针; 在环形谐振腔内的激光可耦合通过紧邻的直波导耦合输出, 其耦合效率和环形谐振腔波导与直波导之间的间隙大小紧密相关. 通过直接检测直波导端面输出光功率的强弱或直波导加反偏时检测电流的大小可监测环形谐振腔内光的变化情况.

器件制作工艺如下: 首先光刻环形谐振腔波导和直波导图形, 用感应耦合等离子(ICP)干法刻蚀到 N 型下包层 InP 表面, 形成环形谐振腔和直波导; 光刻环形谐振腔与直波导上电极图形, 用电子束蒸发结合剥离工艺制作 Ti/Pt/Au: 20 nm/40 nm/100 nm 欧姆接触电极; 在圆片表面旋涂聚酰亚胺(PI)进行平坦化和钝化; 然后反刻聚酰亚胺露出环形谐振腔和直波导上电极, 通过电镀工艺引出环形激光器和直波导上电极; 最后将 N 型 InP 衬底减薄并进行背面金属化制作 N 型欧姆接触 AuGeNi/Au: 100 nm/200 nm, 形成公共下电极. 上述工艺过程中最关键的是环形谐振腔波导和直波导光刻和 ICP 干法刻蚀工艺, 图 3 为 BCl<sub>3</sub> 为反应气体的 ICP 刻蚀环形谐振腔和直波导局

部扫描电子显微镜照片; 图 4 为制作完成的带波导耦合输出的环形激光器芯片照片.

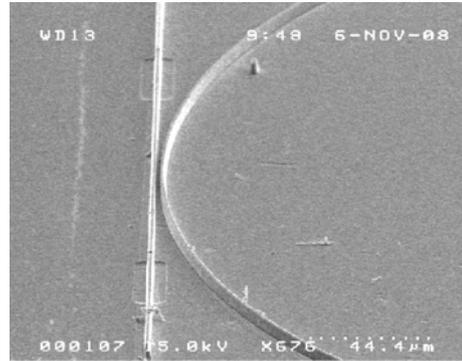


图3 ICP 刻蚀环形谐振腔和直波导局部扫描电子显微镜照片

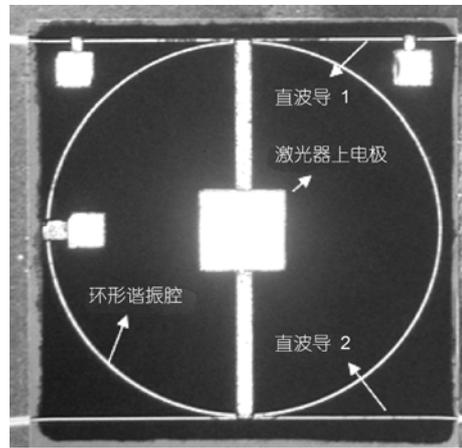


图4 带波导耦合输出的环形激光器芯片照片

### 3 测试结果与分析

用 Keithely 4200 半导体参数测试仪测试了环形激光器的直流电流-电压( $I$ - $V$ )特性曲线, 如图 5 所示, 正向开启电压为 0.4 V@10 $\mu$ A, 反向击穿电压为 13~15 V @10 $\mu$ A, 与普通脊形波导 F-P 腔激光二极管特性类似.

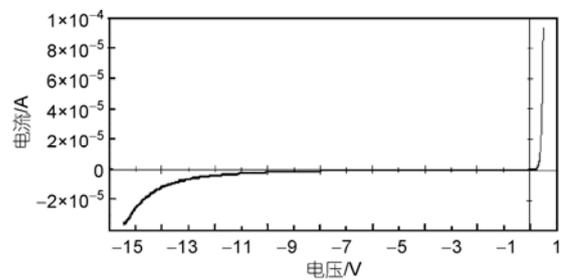


图5 环形激光器的直流  $I$ - $V$  特性

将环形激光器芯片烧结在铜热沉上,键合金丝电极引线,并用半导体制冷器稳定芯片工作温度,然后在显微镜下通过测试夹具与光纤微调架将光纤与直波导1右端口耦合.给激光器加正向偏压,并通过光功率计测量耦合光纤输出的光功率,记录激光器电流和输出光功率数据,得到环形激光器输出光功率-驱动电流( $P-I$ )关系曲线,如图6所示.可以看出激光器的阈值电流约120 mA,当注入电流为130~160 mA时输出光功率较大,约在80~250 nW范围;而当注入电流为170~200 mA时,输出光功率很微弱,约在25~30 nW范围,之后随注入电流增加光功率又开始增大,当注入电流为210 mA时输出光功率达到270 nW;之后注入电流再增加时光功率呈现出交替随机振荡现象.这与文献[31]中报道的InGaAs/InGaAsP量子阱环形激光器测试结果相似,即单向双稳态工作模式.从图6注入电流与输出光功率的变化说明改变注入电流可以控制环形谐振腔内激光顺时针(CW)和逆时针(CCW)旋转方向,在注入电流为130~160 mA时直波导1右端口输出光功率较大,反映了对应谐振腔内激光的旋转方向为顺时针方向;而当注入电流为170~200 mA时,直波导1右端口输出光功率很微弱,反映了对应谐振腔内激光的旋转方向为逆时针方向从直波导1左侧端口输出,如果同时在此端口监测光功率输出,应该可以测到较强的光功率.受测试条件限制,我们暂时无法同时监测直波导1左右两端口输出光功率随注入电流的变化.待相关测试手段完备后,我们会进一步进行相关测试.

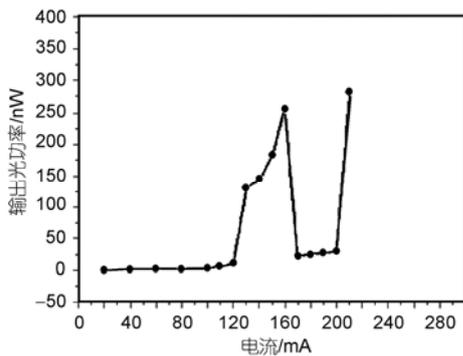


图6 环形激光器输出光功率-驱动电流关系曲线

从图6中我们还注意到目前测得的输出光功率较小,在nW量级,这可能与如下两个因素有关:首先,由于光刻工艺限制,该器件直波导和环形谐振腔

的实际间隙为1.5  $\mu\text{m}$ ,较大的间隙直接影响了耦合效率.环形激光器与直波导的耦合效率和波导宽度、厚度 $b$ 、波导间距 $d$ 及SRL的半径 $R$ 有关.

其次,通过扫描电子显微镜观察发现ICP干法刻蚀形成的环形波导谐振腔侧壁较为粗糙,增加了光在波导内传播时的损耗.在后续工作中拟通过电子束直写光刻减小直波导和环形谐振腔波导的耦合间隙,提高耦合效率;同时优化ICP干法刻蚀工艺,并适当结合湿法化学腐蚀,得到光滑的波导侧壁,以降低光在波导内传播的损耗.

我们进一步用Agilent86142B光谱分析仪测试了量子阱环形激光器的激射光谱,图7为注入电流为160 mA时直波导1右端口输出的激射光谱特性.可以看出该器件出现多纵模振荡,中心激射波长为1602 nm,在它周围还存在一系列振荡波长.对于半导体量子阱激光器,其激射波长由子带间跃迁选择定则决定;而对于半导体环形激光器,其波长还应该满足谐振腔内形成驻波的条件: $2\pi \cdot R \cdot n_{\text{eff}} = m\lambda_m$ ,该谐振条件决定着激光激射波长的纵模模谱,其中 $R$ 为环的半径, $n_{\text{eff}}$ 为有源区量子阱材料的有效折射率, $m$ 为共振波长的阶数, $\lambda_m$ 为共振波长[6].

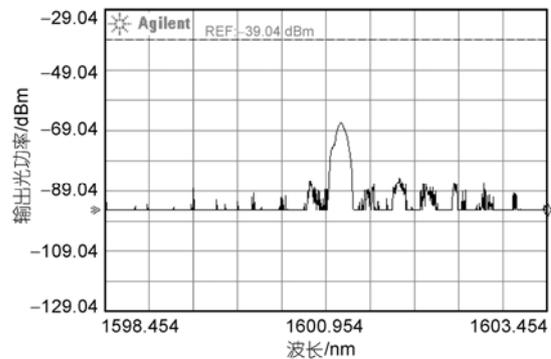


图7 注入电流为160 mA时环形激光器输出光谱特性

#### 4 结论

我们采用InP基InAlGaAs多量子阱激光器外延材料结构,利用感应耦合等离子体(ICP)干法刻蚀技术和聚酰亚胺介质平坦化工艺,实现了多量子阱半导体环形激光器样品.在环形谐振腔上加正偏时通过光纤耦合测试直波导输出光得到了器件的 $P-I$ 特性曲线和激射光谱.器件阈值电流为120 mA,环形谐振腔注入电流为160 mA时激射光中心波长为1602 nm. $P-I$ 特性

曲线显示了改变注入电流可以控制环形谐振腔内激光的单向双稳态工作模式。在后续工作中有待进一步提高器件的输出光功率和进一步测试评估器件的双稳态等其他性能。

#### 参考文献

- 1 Little B E, Chu S T, Pan W, et al. Microring resonator arrays for VLSI photonics. *IEEE Photonic Tech Lett*, 2000, 12: 323—325[[doi](#)]
- 2 Born C, Sorel M, Yu S. Linear and nonlinear mode interactions in a semiconductor ring laser. *IEEE J Quantum Elect*, 2005, 41: 261—271[[doi](#)]
- 3 Sorel M, Laybourn P, Giuliani G, et al. Unidirectional bistability in semiconductor waveguide ring lasers. *Appl Phys Lett*, 2002, 80: 3051—3053[[doi](#)]
- 4 Born C J, Hill M, Yu S, et al. Lasing direction hysteresis in a semiconductor ring laser. In: *Quantum Elect and Laser Sci Conference*, 2005: 1035—1037, doi:10.1109/QELS.2005.1549021
- 5 Born C J, Hill M, Yu S. Study of longitudinal mode coupling in a semiconductor ring laser. In: *The 17th Ann Meeting of IEEE of Laser and Elect-Opt Soc*, 2004, 1: 27—28[[doi](#)]
- 6 De Vos K, Bartolozzi I, Schacht E, et al. Silicon-on-Insulator microring resonator for sensitive and label-free biosensing. *Opt Express*, 2007, 15: 7610—7615