

文章编号: 0253-2239(2010)s100217

多量子阱半导体环形激光器研究

齐利芳¹ 李献杰¹ 郭维廉² 于晋龙² 赵永林¹ 毛陆虹² 于欣² 高向芝¹ 蔡道民¹ 尹顺政¹

(¹ 中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050051)
² 天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要 随着集成光路和全光网络技术的发展, 基于环形光谱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。设计制备了一种双直波导耦合输出半导体环形激光器, 并进行了相应测试。该器件环形谐振腔波导宽度 $3.4 \mu\text{m}$, 环形腔半径 $349 \mu\text{m}$, 直波导与环形腔耦合间距 $1.0 \mu\text{m}$, 其阈值电流为 36 mA , 自由光谱范围(FSR)为 0.33 nm , 61 mA 下激光光谱的中心波长为 1566.66 nm , 用光纤对准直波导口, 测得直波导耦合光功率输出达到 $40 \mu\text{W}$ 。通过该器件的光功率-电流特性曲线, 明显观测到了半导体环形激光器的双向工作、单向双稳态工作及交替振荡工作状态, 并分析了在单向双稳态工作时, 激光方向和非激光方向的光谱特性。

关键词 半导体激光器; 环形谐振腔; 低阈值; 集成探测器; 单向双稳态

中图分类号 TN284.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201030.s100217

Investigation of Multi-quantum Wells Semiconductor Ring Laser

Qi Lifang¹ Li Xianjie¹ Guo Weilian² Yu Jinlong² Zhao Yonglin¹ Mao Luhong² Yu Xin²
Gao Xiangzhi¹ Cai Daomin¹ Yin Shunzheng¹

(¹ 13th Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050051, China)
² School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract With the development of photonic integrated circuits and all-optical networks, semiconductor ring lasers (SRL) based on the structure of ring resonator have received increasing attention and have been one of the focuses in the field of integrated optics in recent years. The design, fabrication and test of a semiconductor ring laser with two coupling bus waveguide are reported in this paper. The width of the ring resonator is $3.4 \mu\text{m}$, the ring radius is $349 \mu\text{m}$, the gap between the ring resonator and the bus waveguides is $1.0 \mu\text{m}$, the threshold current of the (SRL) is 36 mA , the free spectral range FSR is 0.33 nm , and the center lasing wavelength is 1566.66 nm when injected current is 61 mA . Coupling an optical fiber to an end of the bus waveguide, the output optical power reaches to $40 \mu\text{W}$. Semiconductor ring laser's bidirectional operation state, unidirectional bistability operation and unstable alternating oscillation operation state are observed through the P-I characteristic plot. At last, the spectral characteristics of lasing and non-lasing are analyzed when the ring laser operates in unidirectional bistable region.

Key words semiconductor laser; ring resonator; low threshold; integrated detector; unidirectional bistability

OCIS codes 250.5960; 140.3560; 140.3948; 140.5960

1 引 言

半导体环形激光器(SRL)因其在可集成性方面的优势, 可望成为未来全光存储、全光通信及信号处理集成光路中的基本单元, 已被广泛应用于制作激光光源, 光调制器, 光波分复用和解复用器, 色散补

偿器, 滤波器和光存储器等光子器件, 在新一代光网络高速光信号处理系统中有广泛的应用前景, 近年来成为集成光学和光信息处理领域研究的热点之一^[1~5]。

本文设计并制作了一种基于 InAlGaAs 多量子

收稿日期: 2010-08-23; 收到修改稿日期: 2010-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(60706035)和国家 973 计划(2010CB327603)资助课题。

作者简介: 齐利芳(1980—), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事光电器件方面的研究。E-mail: cube2001@sina.com

阱结构的半导体环形激光器,给环形谐振腔加正向偏压实现了光激射,激射光通过紧邻的直线波导耦合将光信号输出,在波导口处用光纤探测,明显观测到了半导体环形激光器的双向工作、单向双稳态工作及交替振荡工作状态,并对比分析了在单向双稳态工作时,激射方向和非激射方向的光谱特性。

2 材料结构设计及生长

1550 nm 波长多量子阱激光器材料通常有 InGaAsP 和 InAlGaAs 两种,与 InGaAsP 量子阱材料相比,InAlGaAs 量子阱材料在大电流下有较好的特性表现,其原因在于 InAlGaAs 的导带偏移量(CBO)与价带偏移量(VBO)之比为 0.72:0.28,高于 InGaAsP(0.4:0.6)材料,载流子限制能力更强,溢出的载流子大大减少,使得量子效率提高,输出功率增大。量子阱区采用压应变结构,应变改变了量子阱的能带结构,使得价带简并度降低,态密度减小,可降低阈值电流,减小线宽,增大调制宽度。基于上述考虑,外延层有源区采用 InAlGaAs 多量子阱结构,量子阱区的上下方分别为低折射率 InP 层。顶层重掺杂的窄带隙 InGaAs 材料及最底层重掺杂的 InP 衬底分别用作上下欧姆接触层。材料结构如图 1 所示,用 Aixtron 2000 金属有机物化学气相沉积系统(MOCVD)在 2 inch (1 inch = 2.54 cm) (100)晶向 N 型 InP 衬底上生长完成。

P ⁺ InGaAs
InP top cladding
U-In _{0.53} Al _x Ga _{0.47-x} As
InAlGaAs/InAlGaAs MQW
U-In _{0.53} Al _x Ga _{0.47-x} As
n ⁺ InP buffer layer
n ⁺ InP Substrate

图 1 半导体环形激光器外延材料结构

Fig. 1 Schematic diagram of semiconductor ring laser epitaxial structure

3 器件结构设计及制备

半导体环形激光器结构由一个环形谐振腔波导与两侧紧邻的两条平行耦合直波导构成,谐振腔半径 349 μm,直波导长度 870 μm,脊宽 3.4 μm,直波导与环形谐振腔耦合间距 1.0 μm。环形谐振腔中心为环形激光器的 P 型欧姆接触电极,N 型 InP 衬

底背面制作公共 N 型欧姆接触,加正向偏压时环形谐振腔内实现光激射,环中的激光借助紧邻的直线波导耦合将光信号输出。直波导两端各有一个电极,加零偏时可探测到耦合进直波导的光电流强度,监测到环形谐振腔内光的变化情况,加正向偏压时可将耦合进直波导的光放大输出,起到光放大器的作用。

根据设计要求,开关频率 $f = 40$ GHz,即波导口光输出频率,有光为开态,无光为关态。则光在环中运行一周的时间 $T = 25$ ps,环的周长

$$L = 2\pi R = v_{\text{InAlGaAs}} T = \frac{c}{n_{\text{eff}}} T,$$

式中 R 为环的半径, v_{InAlGaAs} 为光在 InAlGaAs 多量子阱中的速度, n_{eff} 为 InAlGaAs 多量子阱材料的等效折射率, c 为真空中的光速。圆环的周长为 2.19 mm,环的半径 R 为 349 μm。另外,考虑到模式要求及现有的工艺条件,圆环脊宽设计为 3.4 μm。

环形谐振腔与上下两条直波导的材料结构相同,二者之间采用横向耦合方式,耦合强度与两者之间的间隙成指数关系,耦合间隙越小,耦合强度越大,但该间距的设计受限于工艺加工精度,设计为 1 μm。

具体器件制作工艺与文献[6]中描述的类似。所不同的是为了进一步减小由于脊波导侧面粗糙度引起的光损耗,文中环形波导深刻蚀深度在多量子阱有源层之上处,而不是在 N 型下包层 InP 表面。将完成前道工艺的圆片解理成芯片,同时形成直波导端面,图 2 为完成制作的半导体环形激光器芯片照片。

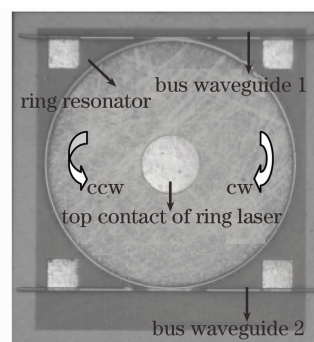


图 2 浅脊波导半导体环形激光器芯片照片

Fig. 2 Photograph of ring laser with shallow ridge waveguides

4 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 3

所示, $10 \mu\text{A}$ 下正向开启电压为 0.4 V , 反向击穿电压为 $11 \sim 12 \text{ V}$ 。

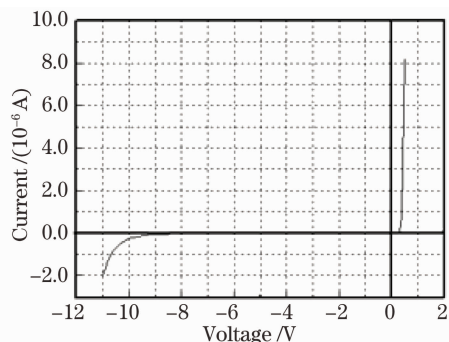


图3 环形激光器的直流 I-V 特性

Fig. 3 I-V characteristic of the ring laser

将环形激光器芯片烧结在紫铜热沉上, 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分别与直波导 1, 直波导 2 右端口耦合。给激光器加正向偏压, 并通过 Keithely 2440 型 5A 源表, 2502 型光纤校准光电二极管计, 2510-AT 型自动温度控制 (TEC) 源表搭建的光功率-驱动电流-电压 (P-I-V) 测试系统, 获得环形激光器的 P-I-V 曲线, 如图 4 所示。可以看出激光器的阈值电流约 36 mA , 开启电压约 0.8 V , 环中光的方向随环形激光器注入电流的大小而做顺时针 (CW) 和逆时针

(CCW) 变化。阈值电流之上, 明显有 3 个工作区, 激光器的驱动电流在 $36 \sim 40 \text{ mA}$ 之间时, 为双向工作区, 环中同时存在顺时针和逆时针两种光, 直波导的两个端口都有光输出; 在 $40 \sim 116 \text{ mA}$ 之间时, 为单向双稳态工作区。若同时监测直波导 1 的左右两端口, 则两侧的光功率应该是互补的, 即右端口有激射光时, 左端口无激射光输出, 但由于测试条件的限制, 只能监测与直波导 1 右端口同侧的直波导 2 右端口, 其光的变化情况与直波导 1 的左端口有半个圆周的光程差, 属于准互补型。可见, 光顺时针方向旋转时, 波导 1 右端口有光输出 (开态), 波导 2 右端口无光输出 (关态), 且随着激光器所加电流的增大, 环中光的旋转方向变为逆时针, 关的端口开, 开的端口关, 犹如单向工作的开关, 且如果电流在单向工作区维持某个值不变, 则光的输出方向是稳定的, 即开关是稳定的; 大于 116 mA 时, 为不稳定的交替振荡工作区, 此时环形谐振腔中光的方向是随机变化的。从图 4 可以看到与参考文献 [6] 中的器件结果相比, 阈值电流由 120 mA 减小到 36 mA , 最大输出功率由 $250 \sim 300 \text{ nW}$ 提高到 $30 \sim 40 \mu\text{W}$, 分析原因, 主要有以下两个方面: 首先, 环形波导刻蚀深度在多量子阱有源层之上, 进一步减小了由脊波导侧面粗糙度引起的光散射损耗; 其次, 优化了光刻工艺, 将环形谐振腔与直波导之间的耦合间距减小到了 $1 \mu\text{m}$, 提高了耦合效率。

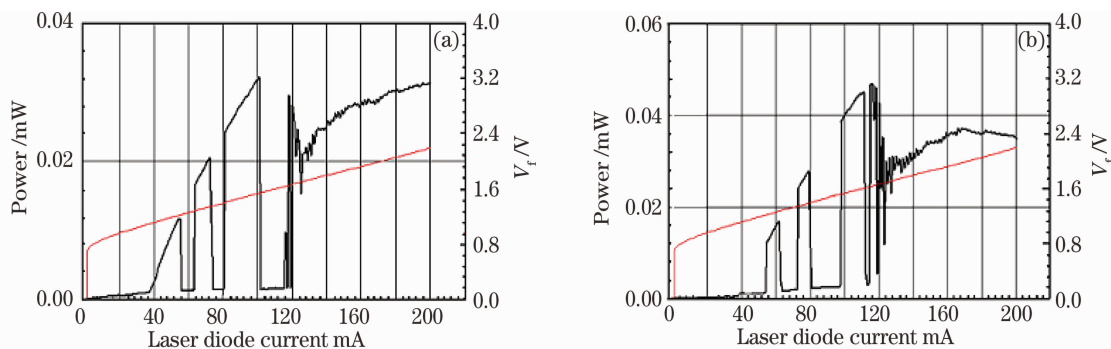


图4 环形激光器的(a)直波导 1 右端口和(b)直波导 2 右端口的 P-I-V 关系曲线

Fig. 4 P-I-V curve of right end of the ring laser of bus waveguide 1 (a) and bus waveguide (b)

进一步用 Advantest Q8384 光谱分析仪测试了单向双稳态工作区, 激射方向和非激射方向的光谱特性, 图 5 分别为注入电流 61 mA , 68 mA 时直波导 2 右端口的激射光谱和非激射光谱。注入电流 61 mA 时, 环中的激射光为逆时针工作模式, 直波导 2 右端口测试出激射光谱, 其边模抑制比为

25 dB , 相邻两个通道之间的间隔即自由光谱范围 (FSR) 为 0.33 nm , 激射光谱的中心波长 1566.66 nm ; 注入电流 68 mA 时, 环中的激射光为顺时针工作模式, 直波导 2 右端口无激射光输出, 测到的输出光为自发辐射光谱。

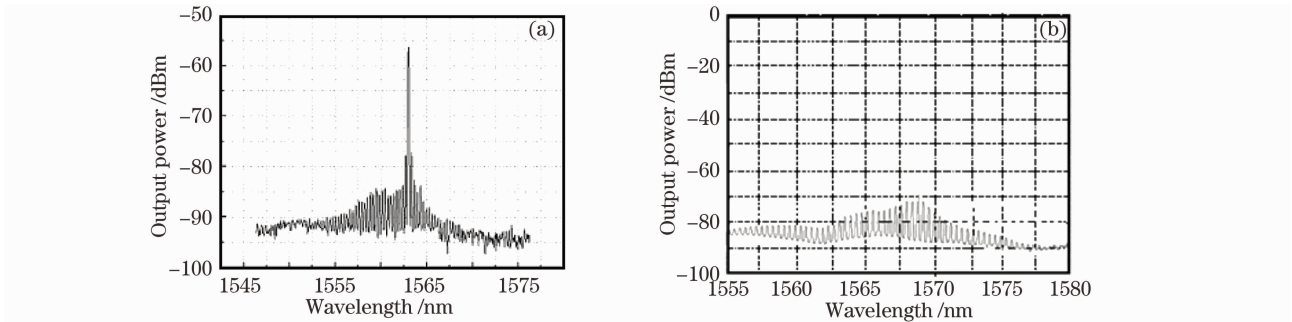


图 5 环形激光器激射及非激射光谱. (a)注入电流 61 mA 下环形激光器直波导 2 右端口激射光谱,
(b)注入电流 68 mA 下环形激光器直波导 2 右端口非激射光谱

Fig. 5 Lasing and non-lasing spectrum of ring laser. (a) Lasing spectrum of right end of bus waveguide 2 for injected current 61 mA, (b) non-lasing spectrum of right end of bus waveguide 2 for injected current 68 mA

5 结 论

采用普通的法布里-珀罗(F-P)腔半导体激光器的制作工艺,研制了一种浅脊波导半导体环形激光器,器件的阈值电流 36 mA,FSR 为 0.33 nm,61 mA下激射光谱的中心波长 1566.66 nm。通过该器件的 P-I 特性曲线,明显观测到了半导体环形激光器的双向工作、单向双稳态工作及交替振荡工作状态,并分析了在单向双稳态工作时,激射方向和非激射方向的光谱特性。

参 考 文 献

- 1 B. E. Little, S. T. Chu, W. Pan *et al.*. Microring resonator arrays for VLSI photonics[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(3): 323~325
- 2 C. Born, M. Sorel, Yu Siyuan, Linear and nonlinear mode interactions in a semiconductor ring laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **41**(3): 261~271
- 3 M. Sorel, P. J. R. Laybourn, G. Giuliani *et al.*. Unidirectional bistability in semiconductor waveguide ring lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(17): 3051~3053
- 4 C. J. Born, M. Hill, S. Yu *et al.*. Lasing direction hysteresis in a semiconductor ring laser[C]. *Quantum Electronics and Laser Science*, 2005, 2: 1035~1037
- 5 C. J. Born, M. Hill, S. Yu. Study of longitudinal mode coupling in a semiconductor ring laser [C]. *LEOS*, 2004, 1(7-11): 27~28
- 6 J. X. Li, F. L. Qi, W. L. Guo, *et al.*. AlGaInAs multi-quantum wells ring laser with optical coupling waveguides[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 2009, **54**(20): 3088~3091
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[J]. *科学通报*, 2009, **54**(20): 3088~3091