

InP 基低阈值单向双稳态工作微环激光器的设计与制备

谢 生¹ 郭维廉¹ 李献杰² 齐利芳² 于 欣¹ 于晋龙¹ 陈 燕¹
毛陆虹¹ 张世林¹ 谷 晓³ 吴 波¹ 罗 俊¹

¹ 天津大学电子信息工程学院, 天津 300072
² 中国电子科技集团公司第 13 研究所, 河北 石家庄 050051
³ 天津工业大学信息与通信工程学院, 天津 300160

摘要 由于半导体微环激光器(SML)具有波长转换、可调谐和光学双稳态等特点,因此成为全光逻辑和全光存储领域的研究热点。在分析背散射耦合系数与 SML 工作区域(双向连续波、双向交替振荡和单向双稳态)的基础上,优化设计了环形谐振腔的结构参数和工艺流程,研制出一种低阈值、直接进入单向双稳态工作的 InP 基微环激光器。测试结果表明,激光器的中心激射波长为 1569.65 nm,阈值电流为 56 mA,当驱动电流超过阈值电流后,器件可不经双向工作区直接进入单向双稳态,降低了双稳态工作的电流和功耗,非常适合用作光随机存储器单元。

关键词 激光器;光学微腔;微环激光器;低阈值;单向双稳态;磷化铟

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0302011

Design and Fabrication of InP-Based Low Threshold Microring Laser with Unique Unidirectional Bistability Operation

Xie Sheng¹ Guo Weilian¹ Li Xianjie² Qi Lifang² Yu Xin¹ Yu Jinlong¹
Chen Yan¹ Mao Luhong¹ Zhang Shilin¹ Gu Xiao³ Wu Bo¹ Luo Jun¹

¹ School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

² 13th Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050051, China

³ School of Information and Communication Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China

Abstract Semiconductor microring lasers (SMLs) have received increasing attention in the areas of all-optical logic and random storage owing to their unique characteristics for wavelength conversion, tunability and optical bistability. Based on the analysis of relationship between backscattering coupling and SML operation regimes (bidirectional continuous-wave, bidirectional alternate oscillations, unidirectional bistability), the structure parameters and process of microring resonator are optimized, and an InP-based low threshold SML with unique unidirectional bistability is fabricated. The experimental results indicate that the laser with a threshold current of 56 mA has a lasing wavelength of 1569.65 nm. Once the driving current exceeded the threshold, the SML entered into the unidirectional bistability without any bidirectional regimes. Thus the driving current and power consumption of bistability operation are reduced greatly, and the device reported here is very suitable to the optical random storage memory unites.

Key words lasers; optical microcavity; microring laser; low threshold; unidirectional bistability; InP

OCIS codes 250.5960; 140.3560; 140.3948; 140.5960

收稿日期: 2010-09-07; 收到修改稿日期: 2010-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(60736035)、天津市基础研究重点项目(10JCZDJC15600)和天津大学青年教师培养基金(TJU-YFF-08B64)资助课题。

作者简介: 谢 生(1978—),男,博士,副教授,主要从事半导体光电器件及其集成技术等方面的研究。

E-mail: xie_sheng06@tju.edu.cn

1 引 言

半导体微环激光器(SML)利用闭合波导环路作为谐振腔,不需要解理面或光栅提供光反馈,因而结构紧凑、工艺简单、可靠性高,易于集成,并且器件自身还具有可调谐、波长转换和光学双稳态等特性。因此,SML成为当前光信息处理、集成光电子、光纤通信领域的研究热点。随着研究的不断深入,其应用范围已从早期的集成光源^[1]和激光陀螺^[2]扩展到光随机存储器^[3]、全光逻辑^[4,5]、光开关^[6]和波长转换器^[7]等方面,并在光互连、光网络和光存储等领域产生了重要的影响。

作为全光逻辑和光随机存储器单元的重要组成部分,SML的工作特性对其性能有着极其重要的影响,如SML的单向双稳态工作具有更高的激射效率、模式稳定性及更好的单频特性^[8]。尽管目前已有SML工作区域的研究报道^[8-11],但这些器件的工作区域都是先经过双向工作区(双向连续波区 Bi-CW 和/或双向交替振荡区 Bi-AO)然后才进入单向双稳态。对光逻辑、光存储这样的应用而言,SML不经双向工作区直接进入单向双稳态工作不仅有利于降低器件功耗,而且也提高了光开关和存储速度。因此,研制直接进入单向双稳态工作的SML具有重要意义。本文在分析影响SML工作区关键因素的基础上,研制出一种低阈值、直接进入单向双稳态工作的InP基微环激光器。测试结果表明,对于半径为350 μm的环形激光器,其中心激射波长为1569.65 nm,阈值电流为56 mA,当驱动电流超过阈值后,器件直接进入单向工作区,非常适合用作以双稳态为工作基础的光随机存储器单元。

2 器件设计与制备

若SML中传输的顺时针(CW)和逆时针(CCW)两束光为单纵模,则环形谐振腔内的电场强度可表示为^[9]

$$E(x, t) = E_1(t) \exp[-i(\omega t - kx)] + E_2(t) \exp[-i(\omega t + kx)], \quad (1)$$

式中 E_1 和 E_2 分别为 CCW 和 CW 光的慢变平均场, x 为沿环方向的横向距离, ω 为角频率, k 为波矢量。

根据描述 SML 动态特性的平均场方法,环形腔内的模式电场 E 和载流子浓度 N 随时间变化的速率方程可表示为^[9]

$$\frac{dE_{1,2}}{dt} = \frac{(1 + i\alpha)(\xi_{1,2}n - 1)E_{1,2} - (\kappa_d + i\kappa_c)E_{2,1}}{2\tau_p}, \quad (2)$$

$$\frac{dn}{dt} = [\mu - n(1 - \xi_1 |E_1|^2 - \xi_2 |E_2|^2)]/\tau_s, \quad (3)$$

式中 $\xi_{1,2} = 1 - S|E_{1,2}|^2 - C|E_{2,1}|^2$, $n = G_n(N - N_0)\tau_p$, α 为线宽增强因子, S 和 C 分别为自增益饱和及交叉增益饱和系数, τ_p 和 τ_s 分别为光子寿命和载流子寿命, G_n 为半导体增益系数, N_0 为透明载流子浓度, μ 为抽运参数($\mu = 1$ 对应于阈值条件), κ_d 和 κ_c 分别为耗散和保守散射系数。其中 κ_c 取决于局部或连续分布折射率的变化,而 κ_d 取决于无源环形腔的损耗^[12]。理论分析和实验结果表明, κ_d 和 κ_c 决定着 SML 的工作区域。

求解上述方程,可以得到 SML 工作区域与 κ_d, κ_c 的关系,如图 1 所示^[9]。由图可见,对于小的 κ_d 和 κ_c , SML 可以得到无 Bi-CW 和 Bi-AO 的单向工作区。

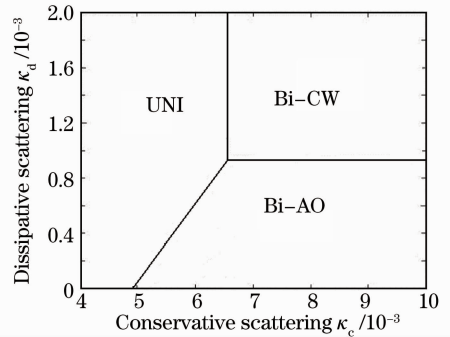


图 1 特定注入情况下,SML 工作区与 κ_d, κ_c 的关系
Fig. 1 Relationship between SML operation regime and κ_d, κ_c under specified injection

减小 κ_d 和 κ_c 的措施之一是降低损耗。在 SML 中主要的损耗为散射损耗、弯曲损耗和输出耦合损耗。散射损耗主要是环形谐振腔侧壁表面不平整性和晶体损伤引起的。弯曲损耗除了与包层和芯层折射率差有关外,还取决于波导截面的几何形状与尺寸^[13]。输出耦合损耗是通过瞬逝场耦合到输出波导的损耗,它主要决定于波导尺寸、耦合长度和耦合间距^[14]。为了降低损耗,这里采取如下措施:1)用感应耦合等离子体(ICP)刻蚀工艺制备脊型波导,然后用溴水漂洗,以降低腔体侧壁散射损耗;2)采用较大的环半径和最佳脊高来降低弯曲损耗;3)采用弱耦合条件,降低谐振腔的输出损耗。其中脊型波导刻蚀深度的选择是获得低损耗、无 Bi-CW 和 Bi-AO 区 SML 的关键工艺。这是因为它直接影响着环形谐振腔的弯曲和散射损耗,刻蚀过浅会增大波导的弯曲损耗,而刻蚀过深则增加侧壁粗糙度引起的散射损耗。实验结果表明,损耗最小的波导刻蚀深度近似等于上包层厚度^[9]。

根据 40 Gb/s 通信系统的要求,设计器件由半径

350 μm 的环形谐振腔^[15,16]和两条 bus 波导组成,为了测试方便,在 bus 波导末端,设计了 4 个监测光信号的探测器(PD)。其中波导宽度为 3 μm , bus 波导与环形腔的耦合间距为 1.0 μm ,以保证两者的弱耦合条件。为了降低光反射, bus 波导与解理端面法线成 10° 夹角。器件有源层采用 AlGaInAs 多量子阱结构,上、下包层为 p 型和 n 型 InP,厚度分别为 1.5 μm 和 0.8 μm ,200 nm 厚的 N^+ -In_{0.53}Ga_{0.47}As 用作欧姆接触层。首先用 ICP 刻蚀波导图形,淀积 100 nm 的 SiO₂ 提供波导保护和电学隔离;然后刻蚀通孔、制备上下电极。制备完成的芯片照片如图 2 所示。最后,将芯片烧结在铜热沉上,进行参数测量。为了防止激光器芯片温度过高,用半导体制冷器为芯片降温。

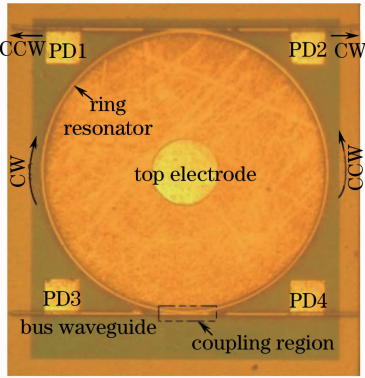


图 2 带耦合波导输出的 SML 芯片照片

Fig. 2 Micrograph of the SML with coupled bus waveguides

3 实验结果与讨论

图 3 给出了 bus 波导上探测器监测到的光电流信号与微环激光器驱动电流的关系曲线。用来监测 CW 和 CCW 光信号的探测器 PD2 和 PD1 均偏置在 -0.5 V ,两探测器的输出电流信号馈入 Keithley 4200 型半导体特性分析系统。可以看到,本文所研制的微环激光器的阈值电流 $I_{\text{th}} = 56\text{ mA}$,远低于同类器件的结果^[8,9,11]。当驱动电流超过 I_{th} 后,器件直接进入双稳态,即 CCW 模式的光电流迅速上升,而 CW 模式的光电流则基本保持不变;当电流增大到 95 mA 时,CCW 和 CW 模式发生非常陡峭的转换,CW 模式由自发辐射转变为激射,而 CCW 激射模式淬灭。随着驱动电流的增加,CCW 和 CW 发生交替转换,当驱动电流达到 155 mA 时,器件经历了 5 次模式转换。与文献^[8,9]报道的结果不同,本文研制的激光器未经 Bi-CW 和 Bi-AO 区就直接进

入单向双稳态区,说明更适合光开关、光存储等以双稳态为工作基础的应用。当环电流超过 155 mA 后,器件进入 CW/CCW 交替随机振荡区。另外,从图中也可发现,模式转换的电流间隔不同,这可能是由于输出波导及两端探测器的结构不对称造成的。

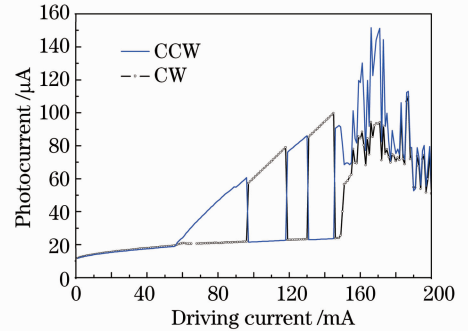


图 3 SML 的光电流与驱动电流的关系曲线

Fig. 3 Relationship between photocurrent and driving current of the fabricated SML

关于 SML 双稳态的物理机制目前还不清楚。Booth 等^[10]认为,CW/CCW 间的模式转换是由于模式竞争引起的,可由耦合差分方程描述

$$\frac{dI_1}{dt} = g_1 I_1 (1 - S_1 I_1 - C_{12} I_2), \quad (4)$$

$$\frac{dI_2}{dt} = g_2 I_2 (1 - S_2 I_2 - C_{21} I_1), \quad (5)$$

式中 I_1 和 I_2 分别表示 CW 和 CCW 的模式光强, g 为模式增益,这与(2)式在本质上是一致的。当激光器模式体积扩展到饱和增益及饱和吸收区(即 $C_{21}C_{12} > S_1S_2$)时,激光器出现光学双稳态。

将输出波导的光信号耦合进石英多模光纤,用 Agilent 86142B 光谱仪分析激光光谱。当环形谐振腔驱动电流为 61 mA 时,CCW 模式的光谱如图 4 所示。可以看到,器件的中心激射波长为 1569.65 nm,周围存在多个对称的边模,且各模式间隔均为 0.33 nm,其边模抑制比大于 23 dB。对于半导体量子阱激光器,其中心激射波长由子带间跃迁选择定则决定,而两侧边模的谐振波长 λ_m 由环形谐振腔的谐振条件决定: $m\lambda_m = n_{\text{eff}}L$ (L 为环形谐振腔的长度)。考虑到相邻谐振波长的阶数 $\Delta m = -1$,可导出 AlGaInAs 多量子阱有源区的有效折射率 $n_{\text{eff}} = 3.39$ 。文献^[17]的测试结果表明,随驱动电流增加而发生的 CW/CCW 模式交替转变现象,伴随着多纵模跳变,即中心激射波长发生红移;当驱动电流降低时,不存在模式转换,中心激射波长顺序跳变至初始波长。一般认为,中心波长随驱动电流的变化关系并不是由驱动电流改变引起的,而是由器件温度升高使得线性

增益峰发生漂移造成的^[17,18]。关于器件性能的其他测试将在下一步工作中做更深入的分析。

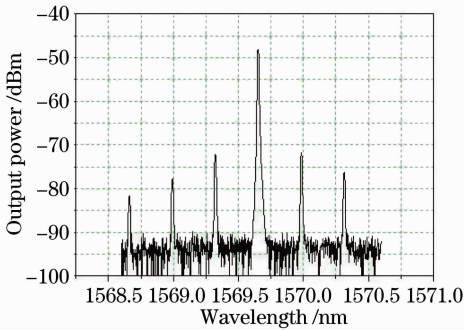


图 4 半径 350 μm 微环激光器的激光谱 ($I=61\text{ mA}$)
Fig. 4 Lasing spectrum for a 350 μm radius microring laser biased at 61 mA

4 结 论

在具体分析 SML 工作区域与背散射耦合系数的基础上,讨论了降低 SML 损耗的具体措施,确定了 AlGaInAs 多量子阱脊型波导的最佳刻蚀深度,设计并研制出无 Bi-CW 和 Bi-AO 区的半导体微环激光器。测试结果表明,激光器的阈值电流仅为 56 mA,当驱动电流超过阈值电流后,器件立即进入双稳态,在较低的电流范围内就能实现单向 CW/CCW 模式间的转换,降低了器件在光学双稳态工作时的电流和功耗,提高了器件的效率和稳定性。

参 考 文 献

- 1 A. S. Liao, S. Wang. Semiconductor injection lasers with a circular resonator [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **36**(10): 801~803
- 2 W. W. Chow, J. Gea-Banacloche, L. M. Pedrotti *et al.*. The ring laser gyro[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1985, **57**(1): 61~104
- 3 M. Hill, H. Dorren, T. Vries *et al.*. A fast low-power optical memory based on coupled micro-ring lasers[J]. *Nature*, 2004, **432**(7014): 206~208
- 4 B. Li, D. Lu, M. I. Memon *et al.*. All-optical digital logic AND and XOR gates using four-wave-mixing in monolithically integrated semiconductor ring lasers[J]. *Electron. Lett.*, 2009, **45**(13): 698~700

- 5 Siyuan Yu. All-optical functions based on semiconductor ring lasers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(9): 918~923
- 6 P. Toni, S. Alessandro, V. S. Guy *et al.*. Bistability and all-optical switching in semiconductor ring lasers[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(20): 12941~12948
- 7 C. W. Tee, K. A. Williams, R. V. Pentyl *et al.*. Vertically-coupled microring laser array for dual-wavelength generation [C]. CLEO, 2007, CThB6
- 8 M. Sorel, P. J. R. Laybourn, G. Giuliani *et al.*. Control of unidirectional operation in semiconductor ring lasers[C]. LEOS, 2001, **2**: 513~514
- 9 M. Sorel, G. Giuliani, A. Scirè *et al.*. Operating regimes of GaAs-AlGaAs semiconductor ring lasers: experiment and model [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(10): 1187~1195
- 10 M. F. Booth, A. Schremer, J. M. Ballantyne. Spatial beam switching and bistability in a diode ring laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(9): 1095~1097
- 11 Li Xianjie, Qi Lifang, Guo Weilian *et al.*. AlGaInAs multi-quantum wells ring laser with optical coupling waveguides[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 2009, **54**(20): 3716~3719
- 12 R. J. C. Spreeuw, R. Centeno Neelen, N. J. Van Druten *et al.*. Mode coupling in a He-Ne ring laser with backscattering [J]. *Phys. Rev. A*, 1990, **42**(7): 4315~4324
- 13 J. Heebner, R. Grover, T. Ibrahim. Optical Micro-Resonators—Theory, Fabrication, and Applications [M]. London: Springer, 2008. 36~38
- 14 Xie Sheng, Zhang Bin, Mao Luhong *et al.*. Finite element analysis on SOI-based micro-ring resonator design[J]. *Chinese J. Lumin.*, 2010, **31**(4): 599~604
- 谢生, 张彬, 毛陆虹等. 有限元分析法在 SOI 基微环谐振器设计中的应用[J]. *发光学报*, 2010, **31**(4): 599~604
- 15 Zhang Bin, Mao Luhong, Xie Sheng *et al.*. A new spice model of silicon-based micro-ring resonator and application for optical filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 537~541
- 张彬, 毛陆虹, 谢生等. 一种基于 Spice 的硅基微环光学谐振器模型及其在光学滤波器中的应用[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 537~541
- 16 Ma Huilian, Bao Huiqiang, Jin Zhonghe. Backscattering in a silica optical waveguide ring resonator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 105~109
- 马慧莲, 鲍慧强, 金仲和. 二氧化硅光波导环形谐振腔的背向散射特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 105~109
- 17 C. J. Born, M. Hill, S. Yu *et al.*. Lasing direction hysteresis in a semiconductor ring laser[C]. Quantum Electronics and Laser Science Conference, 2005, JTUC86: 1035~1037
- 18 S. Matsuo, T. Segawa. Microring-resonator-based widely tunable lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(3): 545~554