

# 带有多环耦合结构的环形半导体激光器

张斯钰<sup>1</sup> 乔忠良<sup>1</sup> 周路<sup>1</sup> 王云华<sup>1</sup> 贾宝山<sup>1</sup> 刘春玲<sup>2</sup> 薄报学<sup>1</sup> 高欣<sup>1</sup> 曲轶<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022)  
<sup>2</sup>吉林师范大学信息技术学院, 吉林 四平 136000)

**摘要** 为了提高半导体激光器的光谱纯度、亮度和工作稳定性,对多环耦合结构的半导体激光器进行了研究。采用多环耦合与弯曲有源波导共端输出结构,使得环形结构激光器输出在光谱纯度、亮度和工作稳定性方面得到了大幅改善。器件水平远场发散角度为  $2.7^\circ$ ,输出功率达 10 mW,在 821 nm 处的谱线宽度为 0.26 nm,实现 Q 因子达 2737。该多环耦合结构器件具有电流对光谱调制特性,调制范围接近 15 nm,同时电流对谱线宽度也有一定的调制作用,调制能力在 0.2 nm 左右。优化后器件输出的谱线宽度变窄,达到 0.2 nm,实现 Q 因子达 4040。

**关键词** 激光器;环形半导体激光器;光谱;亮度;Q 因子

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0202004

## Ring Semiconductor Laser with Multi-Ring Coupling Structure

Zhang Siyu<sup>1</sup> Qiao Zhongliang<sup>1</sup> Zhou Lu<sup>1</sup> Wang Yunhua<sup>1</sup> Jia Baoshan<sup>1</sup>  
Liu Chunling<sup>2</sup> Bo Baoxue<sup>1</sup> Gao Xin<sup>1</sup> Qu Yi<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>State Key Laboratory on High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

<sup>2</sup>College of Information and Technology, Jilin Normal University, Siping, Jilin 136000, China

**Abstract** To improve the spectral purity, brightness and stability of semiconductor lasers, multi-ring coupling structure of the semiconductor laser is investigated. Based on the structure of multi-ring coupling and output of the curved active waveguide, spectral purity brightness, and output stability of ring laser structure are greatly improved. The parallel far-field divergence angle of slow axis is up to  $2.7^\circ$  and output power of 10 mW is obtained. Spectral width reaches 0.26 nm at 821 nm, the Q factor is up to 2737. It is found that the multi-ring coupling structure laser device owns current modulation characteristics with its spectrum, whose modulation range is closed to 15 nm. Meanwhile, the operation current owns a certain modulation to spectral width, whose modulation capability is about 0.2 nm. The optimized multi-ring coupling structure laser output spectral width narrowed to 0.2 nm and a Q factor of 4040 is obtained.

**Key words** lasers; ring semiconductor laser; spectrum; brightness; Q factor

**OCIS codes** 140.5960; 140.3570; 310.6860; 350.2450

## 1 引言

为了实现器件高亮度、激光光的高纯度输出,激光器通常采用分布反馈式(DFB)或分布布拉格反射(DBR)结构。然而,DFB 或 DBR 结构的发光器件无论是使用生长的方法还是工艺的手段进行器件的

制备,其制备难度和效果都难以令人满意。若将其应用到光路集成当中,以 DFB 或 DBR 结构为基础的器件特性无法满足光集成的需要。而自从环形发光器件出现以来,该类器件在光路集成、高亮度输出和高光谱纯度获取方面被寄予希望。这是因为环形

收稿日期: 2012-08-27; 收到修改稿日期: 2012-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(61177019,61176048)、实验室基金(9140C3102071001)资助课题。

作者简介: 张斯钰(1982—),女,博士研究生,主要从事高功率半导体激光器外延生长和器件制备等方面的研究。

E-mail: yu820808@163.com

导师简介: 曲轶(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事高功率半导体激光器制备及应用等方面的研究。

E-mail: yiqu-cust@hotmail.com(通信联系人)

半导体激光器具有易于光路集成、制备工艺简单、易于实现高亮度和高光谱纯度输出等特点<sup>[1,2]</sup>。

环形半导体发光器件已有大量研究,包括模拟和工艺研究。其难度主要在于结构设计和工艺优化,特别是工艺参数的优化。目前环形发光器件已经从大圆环直径2000 μm发展到小圆环直径十几微米<sup>[3~6]</sup>,各种结构层出不穷。在以往的器件结构中,输出波导往往采取条形或直机形结构,当这部分区域采用电连接时或者非电注入区比较长时,均对环形激光器的输出产生不利影响,既破坏了环形器件的模式特性,也增大了器件的内损耗,降低了输出功率。

本文设计了一种多环耦合结构的环形集成式半导体发光器件,克服了以往器件工艺中条形直波导区对器件输出特性的影响。多环形耦合结构中的各个脊形环之间耦合连接,彼此间进行能量传递,通过环形相关参数的调整,改善了器件的光束质量、增加了器件输出亮度、提高了器件输出的 Q 值及工作稳定性。它具有高亮度输出的特点,而且工艺简单,适合各种波长的环形集成发光器件的制备。另外,由于外界电流和光场的波动使得环形器件间相互制约<sup>[7~10]</sup>,器件多环耦合双向一端输出的特点避免了因电流和光场波动而导致的输出特性的突变,使集成器件具有了良好的抗干扰能力。

## 2 结构设计

从环形半导体激光器的工作特性可知<sup>[11,12]</sup>,注入一定水平的电流情况下,环形腔内的激射光将按照一定方向输出,在未知输出方向的情况下,传统的直波导输出易在器件解理出的解理面间形成激射光振荡,该振荡很容易改变环形激光器原有的器件模式特性。若采用无源波导结构,会大幅损耗环形激光器的输出光功率。因此,本文设计了如图 1 所示结构的多环耦合弯曲波导输出的集成式环形半导体激光器。图中,1,2,3 均为脊形环;4 为脊形环 1 内径区;5 为脊形环 2 内径区;6 为脊形环 3 内径区;7 为耦合输出脊形环内径;8 为脊形环耦合处两环间宽度;9 为直条区宽度;10 为直条区长度;11 为器件衬底;12 为下限制层;13 为下波导层;14 为有源区;15 为上波导层;16 为上限制层。

从图 1 可知,在器件输出端,由两四分之一圆相切耦合,并在其相切耦合处输出。另外两圆环相互耦合,并同时与另外一个输出结构相耦合,通过该结构将产生的激射光输出,从具有不影响环形激光器

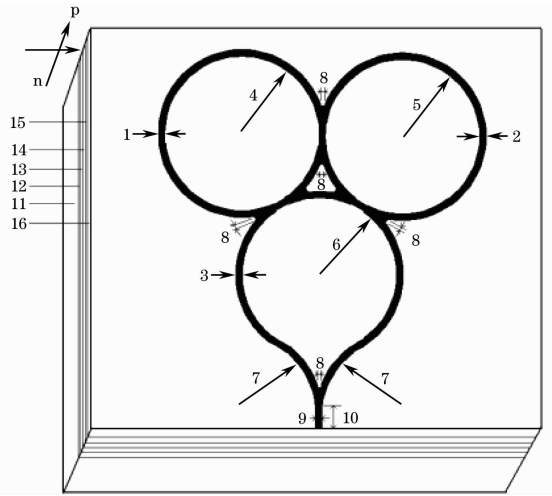


图 1 多环耦合弯曲波导输出的集成式环形半导体激光器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of integrated semiconductor laser with multiple-ring coupled bending waveguide output  
本身特有品质的优点。因为所有弯曲波导都是电注入区,不会吸收其内传播的激射光,故可以实现较高的输出功率。而环形半导体激光器具有高的光束质量。因此,通过该结构设计,可以实现具有高亮度、高光谱纯度等特点的激光输出。同时制备环形激光器的关键技术在于环形脊的刻蚀和掩蔽膜的制备及其优化。因此,相对于 DFB 和 DBR 结构的生长和制备工艺,该方法要简单的多,同时器件性能并不会变差。

利用三个环形波导结构相互耦合,通过该耦合方式,使得每个脊形环区产生的激光进入相毗连的环区,每个脊形环区均对该激光进行选模(纵模和横模),并相互制约,通过该工作方式可以大幅改进激光器的纵模(光谱宽度)和横模(水平发散角)特性。利用该工作原理及相应的刻蚀工艺,将其应用在中心波长为 808 nm 的高亮度、高光谱纯度的半导体激光器设计中,以期实现大功率、高光束质量、高 Q 值的激光输出。

## 3 半导体激光器的制备

器件制备研究中所使用的是通过金属有机物化学气相沉积(MOVCD)生长的外延结构的激光器外延片,其具体参数见表 1。对于关键的腐蚀/刻蚀工艺,采用的是湿法刻蚀的方法去除重掺杂层或部分上限制层。此处采用体积比  $V(\text{H}_3\text{PO}_4) : V(\text{H}_2\text{O}_2) : V(\text{H}_2\text{O}) = 1 : 10 : 10$  溶液。图 2 是经过溶液蚀后的多环耦合扫描电镜(SEM)图片。

表 1 AlGaAs/GaAs/AlGaAs 非对称结构波导半导体激光器外延生长结构参数

Table 1 Parameters of grown structure of AlGaAs/GaAs/AlGaAs asymmetric structure waveguide

No	Layer	Material	Composition (x)	Thickness / nm
10	Contact	p-GaAs		200
9	Cladding	p-Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	0.6	1350
8	Upper waveguide	p-Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	0.45	1200
7	Barriers	p-Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	0.3	20
6	Quantum well(QW)	GaAs		8
5	Layer	n-Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	0~0.3	20
4	Lower waveguide	n-Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	0.3	300
3	Cladding	n-Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	0.6	1500
2	Buffer	n-GaAs		300
1	Substrate	n-GaAs		

光刻后的外延片进行 5、10、15、20 min 的 0 °C 湿法腐蚀，腐蚀的形貌扫描电子显微镜(SEM)图片如图 3 所示。掩蔽膜采用的是磁控溅射法制备 0.3 μm 厚的 SiO<sub>2</sub> 绝缘介质膜。经剥离工艺之后，使用磁控溅射法分别制备 Ti/Pt/Au 膜，组成 P 面电极层。N 面减薄、抛光后，磁控法分别制备 Ni/AuGe N 面电极膜层。420 °C 下恒温 10 s 后快速退火形成器

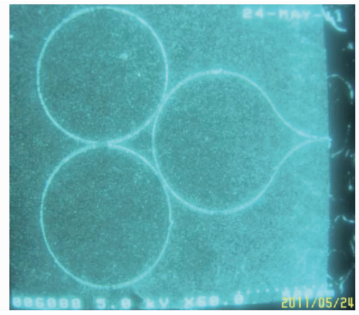


图 2 经过腐蚀后的多环耦合结构 SEM 图

Fig. 2 SEM of multiple-ring coupling structure diagram after etching

件 P 面和 N 面良好的欧姆接触，降低器件串联电阻。之后再分别在 P 面和 N 面镀制 50 nm Ti/50 nm Pt/200 nm Au，此处加厚金膜厚度有利于器件在大功率时工作。解理后得到如图 4 所示的 P 面器件形貌。根据器件的结构特点，仅需要制备增透膜。增透膜材料选择与 GaAs(折射率为~3.3)衬底具有良好匹配性的 AlN(折射率为 1.8~2.2)材料，无需特殊工艺，便可调整增透膜(AR)的透射率达 99.8%。该材料可通过铝靶的反应磁控溅射法制得。并且 AlN 材料具有高热导率和高绝缘性，同时对腔面具有部分的钝化功能，增强了腔面的可靠性。因为制备的是小功率器件，所以采用钢焊料。器件采用 P 面朝下的封装方式。实验中采用的器件面积较大，

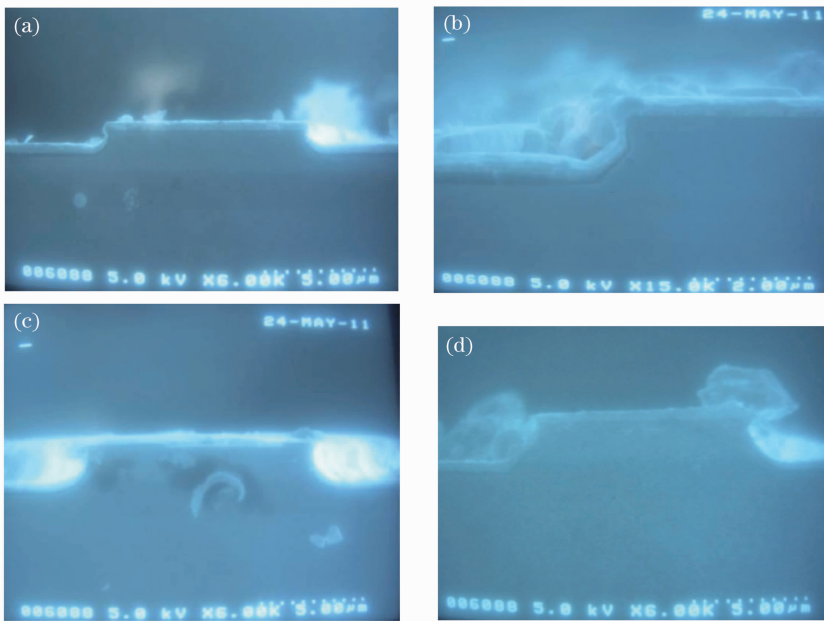


图 3 808 nm 外延片经不同时间腐蚀后环形脊的 SEM 截面图(带有掩蔽膜和 P 面电极)。(a) 5 min; (b) 10 min; (c) 15 min; (d) 20 min

Fig. 3 SEM cross-sectional view of ring ridge based on 808 nm epitaxial wafer after etching for different times (with coated film and P surface electrode). (a) 5 min; (b) 10 min; (c) 15 min; (d) 20 min

环形脊的电注入区条宽是  $8\ \mu\text{m}$ 。

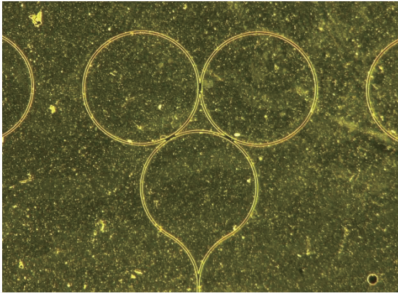


图 4 解理后的管芯 P 面形貌

Fig. 4 P surface morphology of chip after cleavage

## 4 特性测试、分析与优化

### 4.1 多环耦合输出高亮度环形半导体激光器特性测试和分析

对腐蚀 5 min 的器件经高功率器件综合测试系统测试得到如图 5 所示的器件功率-电流 ( $P-I$ ) 和电压-电流 ( $U-I$ ) 特性曲线, 得到其串联电阻为  $0.18\ \Omega$ 。通过高功率器件综合测试分析系统测试其水平、垂直方向上的远场发散角, 如图 6 所示, 得到了其水平远场发散角为  $2.7^\circ$ , 垂直远场发散角达  $26.6^\circ$ 。所测试的远场发散角进一步证明了器件发射光为激光。因此, 为了进一步测试其光谱的分布情况, 对不同器件类型 (主要指腐蚀深度) 使用 MS9710C 型光谱分析仪进行了光谱测试分析的同时, 使用小功率器件驱动电源对其输出功率做了进一步的测试, 以利于对器件做更精确的分析评估。对比传统器件半峰全宽 (FWHM) 约为  $8.4^\circ$ <sup>[13~15]</sup>, 从图 6 可知, 多环耦合结构的器件的水平远场发散角要小得多。

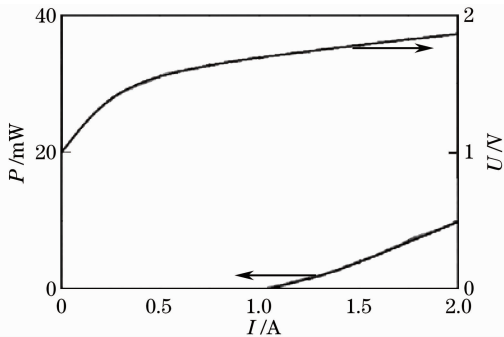


图 5 多环耦合输出的半导体激光器  $P-I$  及  $U-I$  特性曲线 (室温, 腐蚀 5 min)

Fig. 5  $P-I$  and  $U-I$  output characteristic curves of multiple-ring coupled semiconductor laser (room temperature, etched 5 min)

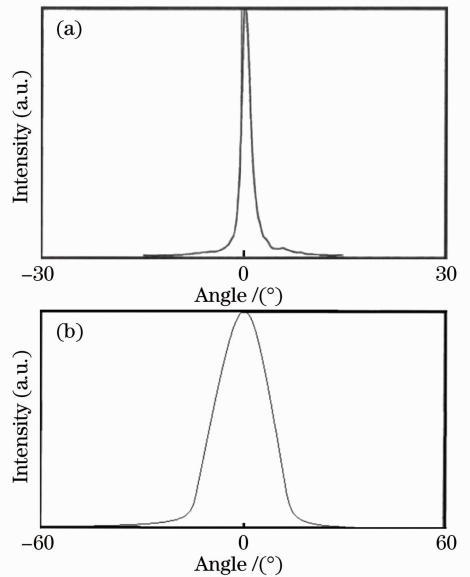


图 6 多环耦合输出的半导体激光器 (a) 水平远场图和 (b) 垂直远场图 (室温, CW, 10 mW)

Fig. 6 (a) Parallel far-field pattern and (b) vertical far-field pattern of multiple-ring coupled semiconductor laser (room temperature, CW, 10 mW)

图 7~9 分别为不同腐蚀深度的环形脊结构 (在冰水混合物中分别腐蚀 5、10、15、20 min) 的多环的  $P-I$  特性曲线, 从中可以看出, 被腐蚀的环形脊结构的深度对输出的  $P-I$  特性有着明显的影响。腐蚀 5 min 时, 腐蚀截止位置在上限制层中, 使得器件注入的电流能够较有效地转化为光子, 但由于此时环形结构没有有效形成环形波导, 必然导致其产生的激光输出效率低。随着腐蚀时间的加长, 当腐蚀截面的深度达到波导层时, 环形波导才逐步形成, 正常无损耗的情况下可以实现较高效率的输出。然而由于腐蚀波导的存在, 特别是腐蚀截面方向上器件材

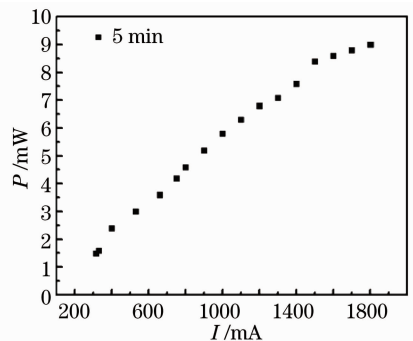


图 7 环形脊被腐蚀 5 min 后器件所测的  $P-I$  特性曲线 (室温)

Fig. 7  $P-I$  characteristic curve of device after ring ridge being etched for 5 min (room temperature)

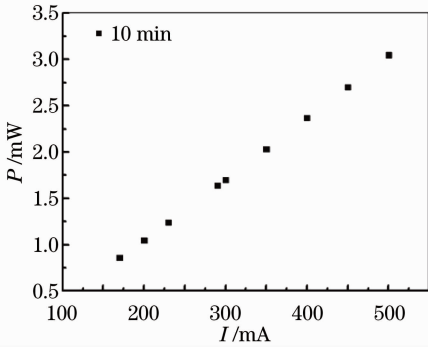


图 8 环形脊被腐蚀 10 min 后器件所测得的  $P-I$  特性曲线(室温)

Fig. 8  $P-I$  characteristic curve of device after ring ridge being etched for 10 min (room temperature)

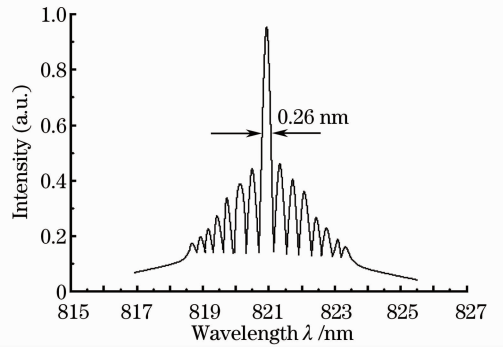


图 11 环形脊被腐蚀 10 min 器件的高分辨光谱分布图(500 mA)

Fig. 11 High resolution spectral distribution of device after ring ridge being etched for 10 min (500 mA)

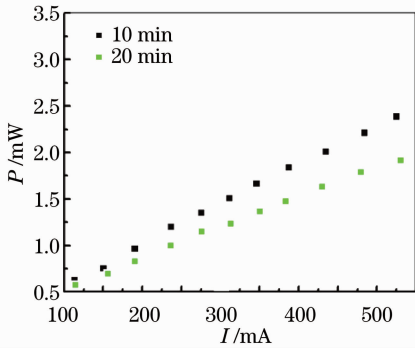


图 9 环形脊分别被腐蚀 15 min 和 20 min 后器件所测得的  $P-I$  特性曲线(室温)

Fig. 9  $P-I$  characteristic curves of device after ring ridge being etched for 15 min and 20 min (room temperature)

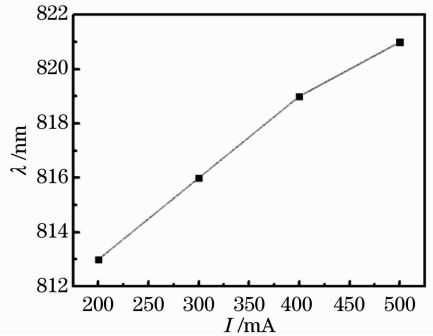


图 12 器件注入电流与输出波长的关系

Fig. 12 Relationship between output wavelength and injected current of device

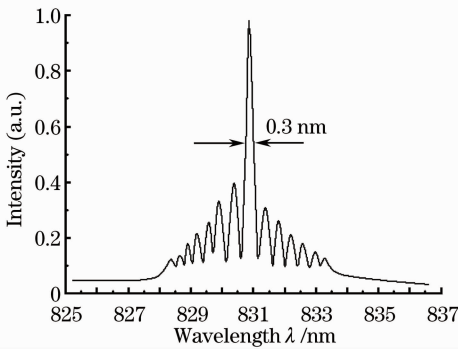


图 10 环形脊被腐蚀 5 min 器件的高分辨光谱分布(500 mA)

Fig. 10 High resolution spectral distribution of device after ring ridge being etched for 5 min (500 mA)

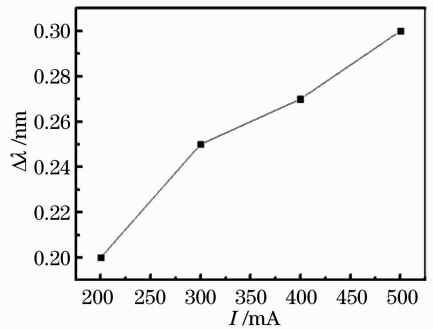


图 13 器件注入的电流与波长线宽的关系

Fig. 13 Relationship between injected current and wavelength line width of device

料的不同及腐蚀速率的各向异性,导致腐蚀界面呈现不规则分布的情况,在腐蚀截面的底部,必然减弱对光子侧向的波导限制,激光光发生横向散射,弱化了环形波导的作用,降低了输出效率。但腐蚀的环形波导还是起到了一定的侧向限制作用,使得器件输出光谱对比其他腐蚀形貌有着明显的差异。如

图 10、11 所示,前者主谱线(831 nm 位置,  $\Delta\lambda \approx 0.3$  nm),后者主谱线(821 nm 位置,  $\Delta\lambda \approx 0.26$  nm)较为突出,边模抑制比达 -9 dB,  $Q$  值达 2737。当腐蚀时间达到 15 min 以后,腐蚀的器件截面发生横向侧蚀,由于外延材料在垂直于结的方向上掺杂的改变,使得通过溶液腐蚀的方法产生的侧壁不光滑,加剧了对产生的光子的吸收,这是输出功率大幅下降的主要原因。同时在陡的腐蚀侧壁位置,因为腐蚀较深,溅射的二氧化硅层薄膜难以有效形成覆盖,

或者覆盖较薄,在其上加镀金属膜后,经合金工艺的高温处理,使得金属薄膜与绝缘层下的材料发生接触反应,这导致了大量漏电流的产生,其结果如高功率综合测试仪所测得的结果一样,阈值电流变大,达到 1 A 左右,这是正常器件难以接受的。同时在器件测试时,发现在不同测试电流的情况下,其主光谱线发生明显的位置移动,具体结果如图 12 所示。

对比图 10、11,发现腐蚀 10 min 的器件和腐蚀 5 min 的器件电流对光谱谱线的调制能力是不同的,这主要是由环形器件的波导结构不同所造成的。

图 12、13 所示的结果,可能是器件的热效应引起的光谱谱线展宽导致。对比测试结果发现,其变化是比较小的,但在大电流注入的情况下,激光器的谱线会发生恶化,甚至会出现超辐射现象。

#### 4.2 多环耦合输出高亮度环形半导体激光器的器件优化

由于使用湿法腐蚀制备多环耦合结构的半导体激光器有截面不规则式底部结构,使得器件阈值电流大幅增加。因此必须降低器件的阈值电流,以便改善器件的光谱及  $P-I$  特性。对于腐蚀截面来说,其结构和形状无法改变,但可以采取有效的手段控制其漏电流。这里对器件的优化主要针对掩蔽膜二氧化硅。有两种方法,一种是在掩蔽膜和腐蚀界面间形成气体隔离层;另外一种是将二氧化硅掩蔽膜覆盖在被腐蚀的侧壁上加厚,保证对其上的金属层的有效电绝缘。前者有一定的工艺难度,但效果会更好些,可以形成高反射率层(类似于砷化镓与空气之间,其折射率差大,易发生全反射);后者效果会差些,但工艺简单、可靠。从工艺可行性角度选择后者作为优化方法。

从优化前后图 14 中的两条功率曲线可知,优化后的器件的斜率效率明显提升,说明优化措施对于

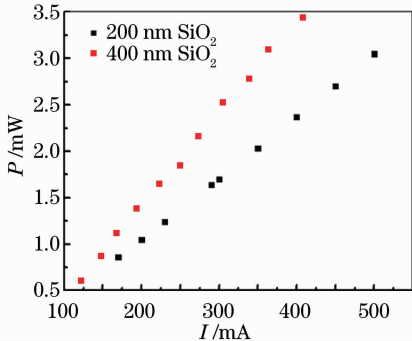


图 14 优化前(200 nm)后(400 nm)的  $P-I$  输出特性对比  
Fig. 14  $P-I$  output characteristics comparison before (200 nm) and after (400 nm) optimization

阻止漏电流有明显作用。

从图 15 可以看出,增加掩蔽效果的同时,电流对波长的调制作用更趋于外延片量子阱的中心波长,弱化了器件热效应对材料参数影响。同时光谱线宽进一步变窄, $\Delta\lambda$  趋近于 0.2 nm,使得器件光谱的  $Q$  值接近于 4040,获得了大幅提升。

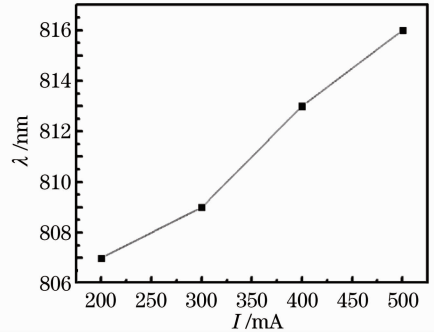


图 15 优化后器件注入电流与输出波长的关系  
Fig. 15 Relationship between injected current of device and output wavelength after optimization

图 16 是优化后的器件电流对应光谱宽度的变化关系。虽然光谱宽度随电流注入依然展宽,但展宽幅度受到了大幅抑制。

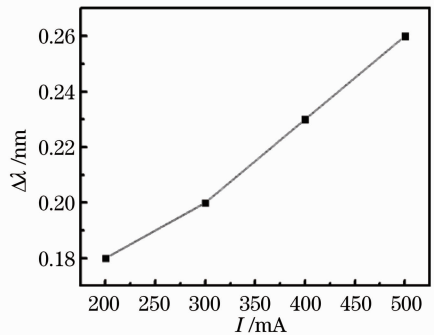


图 16 优化后器件注入的电流与波长线宽的关系  
Fig. 16 Relationship between injected current of device and wavelength line width after optimization

## 5 结 论

设计了多环耦合结构的集成式半导体发光器件,结合湿法腐蚀工艺,对该器件进行了制备。得到优化前的器件水平远场角度为  $2.7^\circ$ ,输出功率可达 10 mW,在 821 nm 处的谱线宽度为 0.26 nm,实现  $Q$  因子达 2737;该多环耦合结构器件具有电流对光谱和谱线宽度的调制特性,光谱调制范围接近 15 nm,对谱线宽度的调制能力在 0.2 nm 左右。优化后器件输出的斜率效率大幅改善,谱线宽度变窄,达到 0.2 nm,实现  $Q$  因子达 4040,长波长方向可调制波长要短,总体向短波长偏移,与外延材料的量子阱

波段相吻合。

### 参 考 文 献

- 1 S. Matsuo, T. Segawa, T. Kakitsuka *et al.*. Integrated filtered feedback tunable laser using double-ring-resonator-coupled filter [C]. IEEE 21st International Semiconductor Laser Conference, 2008. 155~156
- 2 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
- 3 M. Sorel, G. Giuliani, A. Scir'e *et al.*. Operating regimes of GaAs/AlGaAs semiconductor ring lasers; experiment and model [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(10): 1187~1195
- 4 Martin T. Hill, Harmen J. S. Dorren, Tjibbe de Vries *et al.*. A fast low-power optical memory based on coupled micro-ring lasers [J]. *Nature*, 2004, **432**: 206~209
- 5 S. Fürst, S. Yu, M. Sorel. Fast and digitally wavelength-tunable semiconductor ring laser using a monolithically integrated distributed Bragg reflector [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(23): 1926~1928
- 6 B. Docter, J. Pozo, S. Beri *et al.*. Discretely tunable laser based on filtered feedback for telecommunication applications [J]. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 2010, **16**(5): 1405~1412
- 7 L. A. Coldren, G. A. Fish, Y. Akulova *et al.*. Tunable semiconductor lasers: a tutorial [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(1): 193~202
- 8 L. Liu, R. Kumar, K. Huybrechts *et al.*. An ultrasmall, low-power, all-optical flip-flop memory on a silicon chip [J]. *Nature Photon.*, 2010, **4**(3): 182~187
- 9 X. Leijtens, JePPIX: the platform for indium phosphide-based photonics [J]. *Optoelectronics*, 2011, **5**(5): 202~206
- 10 K. Thakulsukanant, B. Li, M. I. Memon *et al.*. All-optical label swapping using bistable semiconductor ring laser in an optical switching node [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(6): 631~638
- 11 J. Javaloyes, S. Balle. Emission directionality of semiconductor ring lasers: a traveling-wave description [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **45**(5): 431~438
- 12 M. Sorel, P. J. R. Laybourn, A. Scir'e *et al.*. Alternate oscillations in semiconductor ring lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(22): 1992~1994
- 13 Qiao Zhongliang, Bo Baoxue, Gao Xin *et al.*. High brightness high power broad area semiconductor lasers with no-absorption mode filter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0402003  
乔忠良, 薄报学, 高欣等. 无吸收模式滤波结构高亮度大功率宽条形半导体激光器 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0402003
- 14 Qiao Zhongliang, Bo Baoxue, Me Yanping *et al.*. High power semiconductor lasers of new window on insulation film of  $Al_xN_y$  [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2277~2281  
乔忠良, 薄报学, 么艳平等. 基于  $Al_xN_y$  绝缘介质膜的新型窗口大功率半导体激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2277~2281
- 15 Li Hui, Liu Guojun, Qu Yi *et al.*. Deposition of AlN film for AR coating of semiconductor lasers [J]. *Chinese J. Laser*, 2009, **36**(s2): 11~13  
李辉, 刘国军, 曲轶等. 高性能高光束质量 808 nm 锥形半导体激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(s2): 11~13

栏目编辑: 宋梅梅