

# 基于 PDMS 基片的回音壁模式光纤激光器

张远宪 张晓晓 刘春 普小云

(云南大学物理系, 云南 昆明 650091)

**摘要** 介绍了一种基于聚二甲基硅氧烷(PDMS)基片的回音壁模式(WGM)光纤激光器。激光器主要由多模石英光纤、塑料楔形光纤、激光染料溶液、玻璃基底和 PDMS 基片构成。将一根直径为 279  $\mu\text{m}$  的石英裸光纤和一根直径为 200  $\mu\text{m}$  的塑料楔形光纤耦合后固定在一块长和宽分别为 2 cm 和 1 cm 的玻璃基底上,在玻璃基底上浇注 PDMS 溶液后再经烘干形成厚度约为 400  $\mu\text{m}$  的柔性 PDMS 基片。在基片上石英光纤与楔形光纤的耦合位置处刻出一个长为 0.4 cm, 宽和高均为 400  $\mu\text{m}$  的光纤沟道,在沟道中填入诺丹明 6G 的乙醇溶液并用另外一块玻璃基片封装后构成基于 PDMS 基片的回音壁模式光纤激光器芯片。采用沿石英光纤轴向消逝波光抽运方式,在 PDMS 芯片上实现了抽运能量为 8.5  $\mu\text{J}$  的低阈值的回音壁模式激光定向输出。

**关键词** 激光器;聚二甲基硅氧烷芯片;回音壁模式;激光定向输出

**中图分类号** TN25 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1102001

## Whispering Gallery Mode Fiber Laser Based on PDMS Substrate

Zhang Yuanxian Zhang Xiaoxiao Liu Chun Pu Xiaoyun

(Department of Physics, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650091, China)

**Abstract** A whispering-gallery-mode (WGM) fiber laser integrated on a polydimethylsiloxane (PDMS) chip is presented which consists of a multimode quartz optical fiber, plastic wedge optical fiber, lasing dye solution, a glass and a PDMS substrate. A multimode quartz unclad optical fiber with a diameter of 279  $\mu\text{m}$  and a plastic wedge optical fiber with a diameter of 200  $\mu\text{m}$  are coupled and fixed on a glass substrate, and the length and width of the glass substrate are 2 cm and 1 cm, respectively. By pouring liquid PDMS on the glass substrate and oven dry, a flexible PDMS substrate (thickness is about 400  $\mu\text{m}$ ) is shaped. Then a fiber channel (length is 0.4 cm, both width and height are 400  $\mu\text{m}$ ) is carved in the contact position between PDMS and the coupled optical fiber. After injecting ethanol solutions of rhodamine 6G into the channel and packaging by a cover glass, a WGM laser chip integrated on a PDMS substrate is fabricated. Pumped by evanescent wave along the quartz optical fiber axis, low threshold energy of 8.5  $\mu\text{J}$  and directional WGM lasing emission has been successfully achieved on a PDMS chip.

**Key words** lasers; polydimethylsiloxane chip; whispering-gallery-mode; lasing directional emission

**OCIS codes** 140.3510; 140.3948; 140.3325; 140.2050; 140.5560; 140.3410

## 1 引言

回音壁模式(WGM)光学微腔激光器,如微盘<sup>[1~3]</sup>、微柱<sup>[4~7]</sup>和微球<sup>[8~11]</sup>激光器,是通过光在微腔界面上的全反射来实现对光场的强限制,光在腔内沿环形回路形成特殊的回音壁模式。这类光学微腔激光器极高的品质因子(Q)非常有利于低阈值的

激光产生。但是,由于这类腔体的高度空间对称性,产生了激光辐射分散的问题,导致了这类激光器很难付诸于实际应用。Levi等<sup>[11]</sup>最早提出在微盘边界上制作凸起结构来改善微盘激光器的光场辐射性能,后来,Nöckel等<sup>[12,13]</sup>提出的非对称共振腔(ARCs)不仅改进原对称腔体的光场辐射方向性,而且由于其光

收稿日期: 2012-05-11; 收到修改稿日期: 2012-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(11164033)、云南省应用基础研究基金(2011FA006)、云南省教育厅项目(K1050667)、云南省高校科技创新团队支持计划和云南大学研究生项目(ynuy201146)资助课题。

作者简介: 张远宪(1983—),男,博士研究生,主要从事光学及光子学等方面的研究。E-mail: zyx74635@163.com

导师简介: 普小云(1957—),男,博士,教授,主要从事光学与光电子学等方面的研究。

E-mail: xypu@163.com(通信联系人)

波混沌特性使其在量子混沌理论研究领域受到极大的关注。国内也在正方形、等边三角形和微盘微腔的方向性辐射方面做了大量的研究工作<sup>[2,14,15]</sup>。然而,当方向性改善后又遇到了新的问题,即损耗问题。那些激光辐射方向性好的模式往往损耗也大,在应用于像极低阈值激光器、单光子源及腔量子电动力学等要求 Q 值极高的场合出现了问题。所以设计高 Q 值且沿特定方向辐射的光学微腔一直是微腔研究人员不懈的追求。

本文介绍一种基于聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 基片的 WGM 光纤激光器。这种激光器将石英光纤 (QOF) 和塑料楔形光纤 (PWO) 耦合后固定在玻璃基底 (GS) 上,在玻璃基底上浇注 PDMS 溶液后再经烘干形成柔性的 PDMS 基片。在 PDMS 基片与已经耦合后的光纤接触位置刻出一个光纤沟道,在沟道中填入若丹明 6G 的乙醇溶液并用另外一块玻璃基片封装后构成一块坚固的基于 PDMS 的 WGM 光纤激光器芯片。采用沿光纤轴向消逝波光抽运方式,在不改变微腔对称性的条件下在 PDMS 芯片上实现了较低阈值的 WGM 激光的定向输出,本文所述实验系统可为“芯片上的实验室”<sup>[16]</sup> 提供一种激光或荧光光源。

## 2 PDMS 芯片的制作

芯片制作前,先将一根直径为  $279\ \mu\text{m}$  的石英裸光纤(已去掉包层,折射率为 1.458)和一根直径为  $200\ \mu\text{m}$  的塑料楔形光纤(纤芯折射率为 1.49、包层折射率为 1.41,起到将光耦合后定向输出的作用)的楔形面(楔角为  $10^\circ$ )耦合后固定在一块洁净平整的玻璃基底上,然后再配置 PDMS 预聚物(折射率为 1.406,起到固定光纤及光纤包层作用),将 PDMS 预聚物在室温下放置 20 min 进行脱气处理,再将已经脱气的 PDMS 预聚物浇注在已经固定好光纤的玻璃基底上构成 PDMS 基片(PDMS 基片厚度约为  $400\ \mu\text{m}$ ),然后将基片放于烤箱中固化(烤箱温度固定在  $30\ ^\circ\text{C}$ ,固化时间 24 h)。在固化后的 PDMS 基片与已经耦合的光纤接触位置刻出一个长  $0.4\ \text{cm}$ 、宽和高均为  $400\ \mu\text{m}$  的光纤沟道作为储液池,PDMS 基片长为  $2\ \text{cm}$ ,宽为  $1\ \text{cm}$ ,在沟道中注入若丹明 6G 乙醇溶液(折射率为 1.362,起到光纤的增益包层作用),再用另外一块洁净平整的玻璃基片将芯片封装后,便构成基于 PDMS 的 WGM 光纤激光器芯片,如图 1 所示,其中图 1(a)为 PDMS 芯片实物图照片,第 1,3 两段为 PDMS 包层,起到固定

光纤的作用;第 2 段为乙醇染料溶液,起到增益包层作用;图 1(b)为光纤耦合后的剖面图,“up”、“down”和“center”分别代表塑料光纤上下表面及末端。

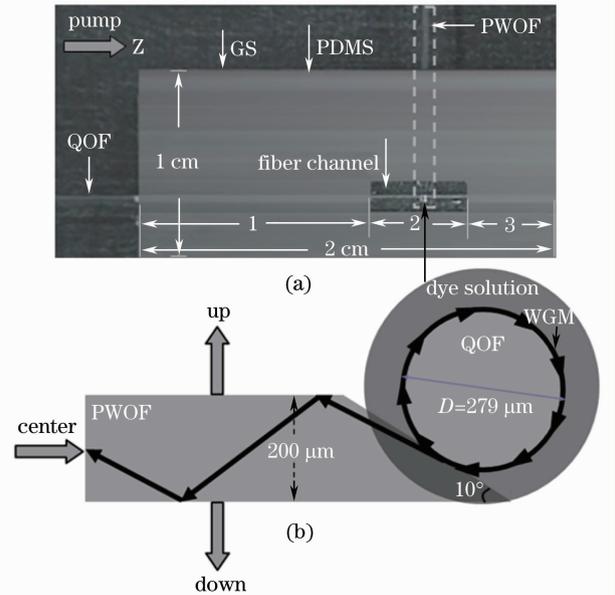


图 1 PDMS 芯片结构图

Fig. 1 Diagram of the PDMS chip

## 3 实验结果及讨论

### 3.1 实验安排

如图 1(a)所示,沿石英光纤 QOF 轴向的包层由 3 段构成。当抽运光进入光纤的入射角  $\theta_i$  小于光纤数值孔径角  $\theta_{ic} = 22.7^\circ$  时,光以全反射方式在第 1 段(PDMS 包层)中沿光纤轴向传播。抽运光进入第 2 段(增益包层)后,如果在光纤和增益包层溶液界面上的入射角  $\theta_i$  大于临界入射角  $\theta_c = 69.2^\circ$ ,则抽运光将以全反射方式沿光纤轴向传播。本文中抽运光(脉宽为 7 ns,波长为 532 nm 的脉冲激光)经焦距等于 20 mm 的透镜会聚后,以  $2\theta_i = 29^\circ$  ( $\theta_i = 80.1^\circ > \theta_c$ ) 的圆锥角沿光纤轴线进入石英裸光纤,垂直于光纤轴向的任意截面都构成一个圆柱形微腔,沿圆柱形微腔表面辐射出来的光和楔形光纤耦合后在楔形光纤界面的反射角只需大于  $71.2^\circ$ ,光就能沿楔形光纤轴向以全反射方式传播(楔形光纤的楔角为  $10^\circ$ ,满足上述条件)。

抽运光在包层溶液中的消逝场激励染料产生增益,圆柱形微腔 WGM 消逝场中的光子在染料增益中产生受激辐射,在微腔 WGM 的支持下形成激光振荡。WGM 激光的光能沿光纤表面垂直于光纤轴向(Z 轴)的方向辐射出来,辐射出来的光经塑料光纤耦合并沿塑料光纤轴线不断全反射后送入光谱采

集系统。激光的抽运和光谱检测系统见文献[17]的详细描述。

### 3.2 结果及讨论

在图 1(a)所示的 PDMS 光纤沟道中填入浓度为  $4 \times 10^{-3}$  mol/L 的若丹明 6G 的乙醇溶液,采用沿光纤轴向消逝波光抽运方式[抽运光方向为图 1(a)所示的 Z 轴方向],当抽运能量为  $6 \mu\text{J}$  时,只能在光纤外的染料区观察到暗黄色的荧光辐射,沿塑料光纤末端[图 1(a)所示的 center 处]只能观察到微弱的荧光,如图 2(a)所示;但是当抽运能量增加到一定的数值后,沿石英光纤的边缘出现耀眼的橙黄光,用肉眼沿垂直于纤轴方向观察,此橙黄光的强度最大;偏离纤轴的垂向后强度急剧减弱,沿纤轴方向不能观察到橙黄光,图 2(b)为抽运能量为  $15 \mu\text{J}$  时的 WGM 激光辐射图。如图 2(b)所示,沿塑料光纤末端能观察到较强的激光。用  $2400 \text{ g/mm}$  光栅采集到的光谱如图 3 所示。图 3 中右上角的插图是光辐射强度和抽运能量的关系曲线。由插图可见,当抽运能量超过  $8.5 \mu\text{J}$  时,激光辐射强度急剧增加,  $8.5 \mu\text{J}$  的抽运能量就是此 WGM 激光器的阈值能量,对应肉眼刚刚观察到“耀眼橙黄光”时的抽运能量值。

图 3 所示的 WGM 激光平均波长间隔为  $0.253 \text{ nm}$ ,对实验使用的直径为  $279 \mu\text{m}$  的石英光纤,相邻 WGM 激光波长间隔满足近似公式  $\Delta\lambda = \lambda^2 / (n_1 \pi D)$ ,式中  $D$  和  $n_1$  分别表示光纤的直径和折射率,由上式计算出相邻 WGM 激光波长间隔为

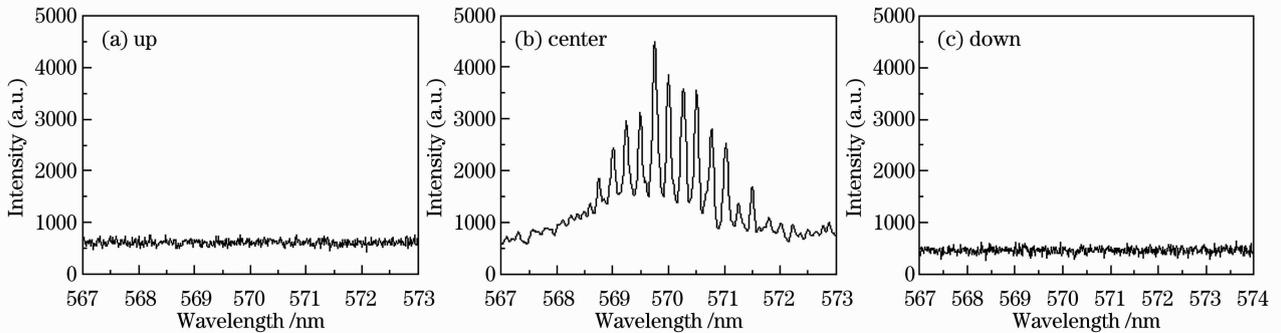


图 4 不同位置处的光谱  
Fig. 4 Spectrum for different position

由图 4 可知,只有在塑料光纤的末端,即图 1(b)所示的 center 位置处才能采集到 WGM 激光,在塑料光纤的上表面(up)及下表面(down)处不存在激光辐射,说明 WGM 激光确实是经塑料光纤耦合后沿塑料光纤轴线以全反射方式传播并从光纤末端辐射出来的。对实验中所使用的石英光纤,由

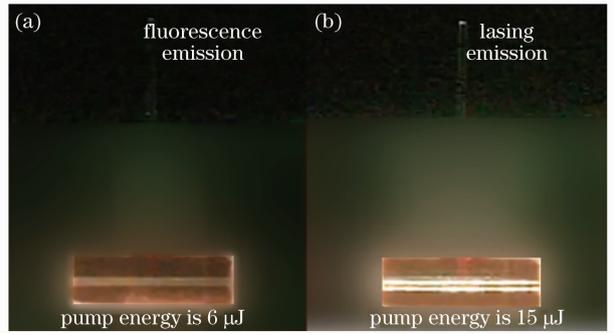


图 2 荧光和激光辐射。(a) 荧光辐射;(b) 激光辐射  
Fig. 2 Fluorescence and lasing emission.

(a) Fluorescence emission; (b) lasing emission

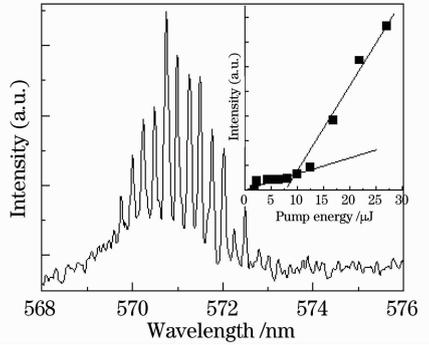


图 3 WGM 激光光谱

Fig. 3 WGM lasing spectrum

$0.255 \text{ nm}$ ,实验值和理论值基本吻合。

在距塑料光纤上、下表面各  $500 \mu\text{m}$  及塑料光纤末端[分别对应图 1(b)中箭头指向的 up,down,center 位置]的位置采集到图 2(b)的光谱如图 4 所示。

于微腔的对称性没有改变,由文献[17]的计算结果知,微腔 Q 值可高达  $10^6$  量级。

## 4 结 论

介绍了一种以 PDMS 基片为衬底的新颖光纤激光器,即消逝波激励及增益耦合的 WGM 光纤激

光器。该激光器实现了在不改变微腔对称结构的情况下较低阈值激光的定向输出。本文所述实验系统可为“芯片上的实验室”提供一种激光或荧光光源,所得实验结果在光流控装置中的激光或荧光辐射源方面具有重要的应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 D. K. Armani, T. J. Kippenberg, S. M. Spillane *et al.*. Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip [J]. *Nature*, 2003, **421**(6926): 925~928
- 2 Wang Jiaxian, Li Junjie, Wu Wenguang *et al.*. Coupled-mode characteristics of coupled-microdisks and single microdisk cavity with an output waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0106006  
王加贤, 李俊杰, 吴文广等. 耦合微腔及带输出波导的单微腔的耦合模式特性[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0106006
- 3 Lei Bing, Feng Ying, Wei Li'an *et al.*. Characteristics of fiber loop applied to phase locking array of fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2479~2485  
雷兵, 冯莹, 魏立安等. 用于光纤激光器阵列锁相的光纤环形特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2479~2485
- 4 M. Kazes, D. Y. Lewis, Y. Ebenstein *et al.*. Lasing from semiconductor quantum roads in a cylindrical micro-cavity [J]. *Adv. Mater.*, 2002, **14**(4): 317~321
- 5 Y. D. Yang, Y. Z. Huang, Q. Chen. High-Q TM whispering gallery modes in a three-dimensional microcylinders [J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **75**(1): 013817
- 6 Jiang Nan, Du Fei, Bai Ran *et al.*. Factor of influencing pumping threshold energy of whispering-gallery-mode laser in a cylindrical micro-cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 660~663  
江楠, 杜飞, 白然等. 影响柱形微腔回音壁模激光抽运阈值能量的因素[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 660~663
- 7 Zhang Yuanxian, Han Deyu, Zhu Kun *et al.*. Wavelength shift of whispering gallery mode fiber laser caused by fiber cladding refractive index [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 691~694  
张远宪, 韩德昱, 祝昆等. 包层介质引起的回音壁模式光纤激光波长漂移 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 691~694
- 8 H. Fujiwarra, K. Sasaki. Lasing of a microsphere in dye solution [J]. *Japan J. Appl. Phys.*, 1999, **38**(9A): 5101~5104
- 9 Y. S. Choi, H. J. Moon, K. Y. An *et al.*. Ultrahigh-Q microsphere dye laser based on evanescent-wave coupling [J]. *J. Korean Phys. Soc.*, 2001, **39**(5): 928~931
- 10 Y. Wu, X. Yang. Quantum theory for micro-cavity enhancement of second harmonic generation [J]. *J. Phys. B*, 2001, **34**(11): 2281~2288
- 11 A. F. J. Levi, R. E. Slusher, S. L. McCall *et al.*. Directional light coupling from microdisk lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(6): 561~563
- 12 J. U. Nöckel, A. D. Stone, G. Chen *et al.*. Directional emission from asymmetric resonant cavities [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1609~1611
- 13 J. U. Nöckel, A. D. Stone. Ray and wave chaos in asymmetric resonant optical cavities [J]. *Nature*, 1997, **385**(6611): 45~47
- 14 Huang Yongzhen, Guo Weihua. Mode characteristics of equilateral triangle and square optical micro-resonators [J]. *Physics*, 2004, **33**(7): 515~518  
黄永箴, 国伟华. 正三角形及正方形微光学腔模式特性研究 [J]. *物理*, 2004, **33**(7): 515~518
- 15 Huang Yongzhen, Che Kaijun, Yang Yuede *et al.*. InGaAsP/InP square microcavity laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(2): 16  
黄永箴, 车凯军, 杨跃德等. InGaAsP/InP 正方形微腔激光器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(2): 16
- 16 D. Psaltis, S. R. Quake, C. Yang. Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics [J]. *Nature*, 2006, **442**(7101): 381~386
- 17 Y. X. Zhang, X. Y. Pu, K. Zhu *et al.*. Threshold property of whispering-gallery-mode fiber lasers pumped by evanescent-wave [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2011, **28**(8): 2048~2056

栏目编辑: 马 沂