

双层结构柱形微腔中回音壁模式激光的干涉调制现象研究

张晓晓 张远宪 普小云

(云南大学物理科学技术学院, 云南 昆明 650091)

摘要 利用充入激光染料的石英毛细管构成了一个双层结构的圆柱形微腔, 在 s 和 p 偏振光抽运条件下, 分别观察到了微腔中的横磁波或横电波回音壁模式激光辐射。实验结果表明, 横磁波激光光谱出现了明显的干涉调制现象, 调制周期随染料溶液折射率的增加而增大, 随毛细管内外半径比的增加而减小; 横电波激光光谱则没有出现干涉调制现象。用双层微腔结构中反射波对折射波的干涉调制效应, 成功解释了观察到的实验现象。双层结构圆柱形微腔中回音壁模式激光的干涉调制现象, 为多模回音壁模式激光的模式选择提供了一定的参考。

关键词 物理光学; 回音壁模式; 横磁场模式; 横电场模式; 干涉调制现象

中图分类号 O433.2; TN248.3+3 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.1102010

Study of Interference Modulation Effect of Whispering-Gallery Mode Lasing Emission with a Double Layered Microcavity

Zhang Xiaoxiao Zhang Yuanxian Pu Xiaoyun

(School of Physical Science and Technology, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650091, China)

Abstract A double-layered cylindrical microcavity is fabricated by filling Rh6G dye solution into a fused capillary. By pumping with s- and p- polarized laser light respectively, whispering-gallery mode lasing emission with transverse magnetic and transverse electric polarization is observed. The interference modulation effect in the whispering-gallery-mode lasing spectra is found when pumped by s- polarized light. And the modulation period increases with the refractive index of dye solution, but decreases with the ratio of the external to internal diameter of a capillary. By applying the interference modulation theory on the reflective and refractive waves in the double-layered cylindrical microcavity, the observed phenomenon can be explained successfully. The interference modulation effect provides a certain reference for mode selection in a multimode whispering-gallery-mode laser.

Key words physical optics; whispering gallery modes; transverse magnetic mode; transverse electric mode; interference modulation

OCIS codes 260.3160; 170.4090

1 引言

回音壁模式光学微腔(WGM)由于具有极高的品质因数和极小的模式体积^[1-3], 目前已广泛应用于光通信的有源器件^[4-6](如激光)、无源器件^[7-8](如滤波器、波分复用器等)以及基础科学(如腔量子电动力学和非线性光学等)方面的研究。大部分

WGM 激光器都是多模输出的^[9], 为了选择性地增强或抑制一些模式的输出, 可采用多层微腔内激光的干涉调制效应^[10-11]进行模式选择。Knight 等^[10]最早在一个熔融的石英毛细管(折射率 $n_2 = 1.458$)内部注入高折射率的染料溶液($n_1 = 1.626$), 从而观察到了 WGM 激光的弱干涉调制现象。在这种情

收稿日期: 2013-03-31; 收到修改稿日期: 2013-05-31

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)、云南省高校科技创新团队支持计划

作者简介: 张晓晓(1983—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学及光子学等方面的研究。

E-mail: littletrees2006@126.com

导师简介: 普小云(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 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)

形下,很大一部分高 Q 值模式的激光存在于毛细管壁的内边缘,只有很少一部分激光泄漏到毛细管外边缘。泄露的部分激光从外管壁反射回来后虽然能与内部 WGM 模式的激光发生干涉调制,但由于受内壁回音壁模式消逝场的限制,干涉调制现象较弱为弱干涉调制现象。在类似的装置中, Moon 等^[11]将折射率小于管壁折射率的染料乙醇溶液注入管壁厚度较小的几种型号的石英毛细管中,通过实验观察到了较强的干涉调制现象以及干涉调制周期随毛细管外径的变化而变化的现象。

本文开展了对双层结构圆柱形微腔中 WGM 激光干涉调制现象的研究工作,在 s 和 p 偏振光抽运条件下,分别观察到了微腔中的横磁(TM)和横电(TE)波 WGM 激光辐射。对 TE-WGM 激光,没有出现明显的激光干涉调制现象;对 TM-WGM 激光,出现了明显的干涉调制现象,调制周期随染料溶液折射率的增加而增大,随毛细管长短轴半径比的增加而减小。利用双层微腔结构中反射波对折射波的干涉调制效应,对观察到的实验现象进行了解释。

2 调制原理

双层结构的圆柱形微腔调制原理如图 1 所示。光波 1 经内外半径分别为 a 和 b ,管壁折射率为 n_2 的毛细管内层界面(毛细管内染料溶液和内边缘构成,见图 1 上部)的 A_1 点后,部分光波(小于 10%)经反射回到折射率为 n_1 的染料溶液中(反射波,细实线所示)并交内层界面于 D_1 点;光波中主要部分(大于 90%)经折射进入毛细管管壁(折射波,粗实线所示),在毛细管的外层界面(毛细管外边缘和空气构成)的 B_1 点经全反射后返回到内层界面的 C_1 点。只有返回的折射波和反射波在内层界面上相遇

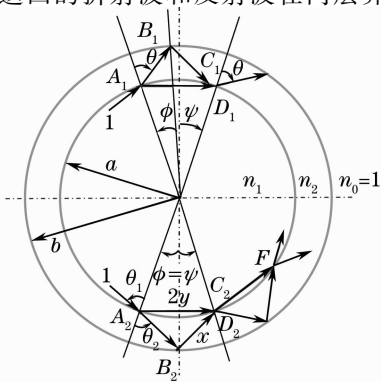


图 1 双层结构圆柱形微腔调制原理图

Fig. 1 Principle diagram of interference modulation in a cylindrical double layered micro-cavity

(C_1 点和 D_1 点重合,即角 $\phi = \psi$),如图 1 中 C_2 与 D_2 重合,两波在空间重叠后才能够产生有效的干涉调制。折射波的主体经重叠点 C_2 (或 D_2) 后再次经折射进入染料溶液中,并交内层界面于 F 点后完成行程 $A_2B_2C_2F$ 。折射波的行程 $A_2B_2C_2F$ 重复发生,如果沿管壁行走一周后满足干涉相长条件,则在管壁上形成稳定的 WGM 场分布。反射波作为干涉调制信号,经重叠点 C_2 (或 D_2) 后对 WGM 场分布做有效调制。由几何关系可得

$$\phi = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1} \sin \theta\right), \quad (1)$$

$$\phi = \theta - \arcsin\left(\frac{a}{b} \sin \theta\right). \quad (2)$$

由(1)式和(2)式可知,在 n_2/n_1 值确定的条件下,可以调整 a/b 值以满足调制条件 $\phi = \psi$ 和改变调制周期;也可以在 a/b 值确定的条件下,调整 n_2/n_1 值以满足调制条件和改变调制周期。前者是文献^[11]采用的技术路径,后者是本文采用的调制方法。在 $\phi = \psi$ 的条件下, C_2 点和 D_2 点重合,反射波和折射波的光程差满足

$$\Delta L = 2(n_2x - n_1y) = 2a \sin \phi \left[\frac{n_2}{\sin(\theta_2 - \phi)} - n_1 \right]. \quad (3)$$

在光程差 ΔL 等于 WGM 波长 λ 的整数倍时,反射波和折射波也发生“干涉相长”,调制作用使对应波长的 WGM 强度增强,调制周期^[10-11] $T = \lambda^2/\Delta L$ 。由 $\phi = \psi$ 的条件可计算出折射角 θ_2 [即(1)、(2)式中的 θ],将 θ_2 值代入(2)式即可求出 ϕ 值,再由(3)式求出光程差值 ΔL 后就可获得调制周期 T 。

3 实验安排

实验装置框图如图 2 所示,用 YAG 激光器(北京镭宝公司生产,脉宽为 7 ns)波长为 532 nm 的倍频脉冲激光作为抽运光,抽运光先后经过一组偏振片 P_1 和 P_2 ,旋转 P_1 的通光方向获得需要的抽运能量;调节 P_2 的通光方向,使抽运光的偏振方向平行(或者垂直)于毛细管的管轴,形成 s (或者 p)偏振态的抽运光。抽运光经过一组透镜(L_1 和 L_2)准直并缩束后,由柱面透镜(CL,其母线平行于毛细管管轴)会聚在石英毛细管上。毛细管内充满了激光染料溶液,进入毛细管内的抽运光在染料溶液中产生激光增益并形成受激辐射。受激辐射光波经毛细管的内层界面后,一部分经反射回到染料溶液中并形

成反射波；另一部分经折射进入毛细管管壁中形成折射波。折射波在满足“干涉相长”条件下于管壁附近形成回音壁模式激光振荡，反射波对 WGM 场分布产生调制作用。折射波的一部分以倏逝波的形式

沿毛细管外缘的切线方向向外辐射，由导光光纤送至光谱采集系统 (ICCD: PI-MAX; Spectrometer: Spectrapro 500i)。

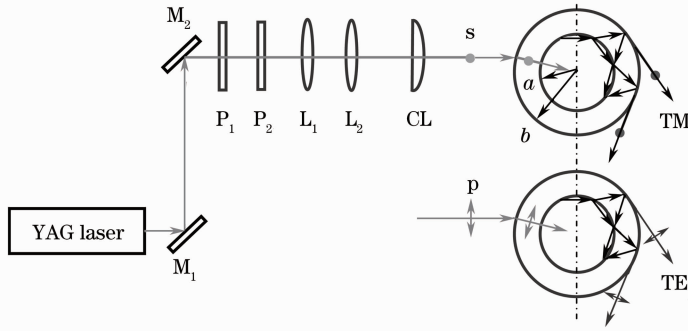


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

分别配制浓度为 1.0×10^{-4} mol/L 的 Rh6G 乙醇 (折射率为 1.361) 和乙二醇 (折射率为 1.432) Rh6G 染料母液, 改变两种母液的体积比, 可获得同一染料浓度下折射率不同的四种染料溶液。用阿贝折射计 (2WA-J 型) 测量染料溶液的折射率, 四种混合染料溶液的折射率 n_1 分别为 1.361、1.393、1.413、1.432。选用两种尺寸规格的石英毛细管 (HP-5) 作为双层结构的圆柱形微腔, 在 570 ~ 600 nm 的波长范围内管壁折射率 $n_2 = 1.458$ 。用高精度读数显微镜 (蔡司 10096 型) 实测毛细管的内外径, 第一种毛细管内外半径分别为 $a = (100 \pm 1) \mu\text{m}$, $b = (125 \pm 1) \mu\text{m}$; 第二种毛细管内外半径分别为 $a = (125 \pm 1) \mu\text{m}$, $b = (150 \pm 1) \mu\text{m}$ 。

毛细管的激光光谱随染料溶液折射率 n_1 的变化规律, 结果如图 3 和图 4 所示。其中, 图 3 对应的毛细管尺寸为 $a = 100 \mu\text{m}$, $b = 125 \mu\text{m}$, $b/a = 1.25$; 图 4 对应的毛细管尺寸为 $a = 125 \mu\text{m}$, $b = 150 \mu\text{m}$, $b/a = 1.2$, 其中箭头所示范围为调制周期。

由图 3 和图 4 可知, 反射波对 WGM 激光有明显的调制效果 (图中箭头指示位置), 其调制作用有如下规律: 1) 对相同的毛细管, 调制周期随染料溶液折射率 n_1 的增加而变长; 2) 对相同的染料溶液折射率, 调制周期随毛细管长短轴比值 b/a 的增加变短, 这个结果和文献 [11] 的报道相吻合; 3) 调制周期 T 随 n_1 变化的实验测量值及理论计算值由表 1 给出, 由表 1 可知, 测量值及理论值基本吻合。此外, 用一块检偏片直接观察石英毛细管的激光辐射, 当检偏片的通光方向平行于 (或垂直于) 毛细管的管轴时, 激光辐射的强度最强 (或基本消光), 表明 WGM 激光辐射的电场矢量平行于管轴, 属于典型的横磁波。

4 实验结果及讨论

4.1 s 偏振光抽运下的实验结果

在 s 偏振光抽运条件下, 采集了两种不同规格

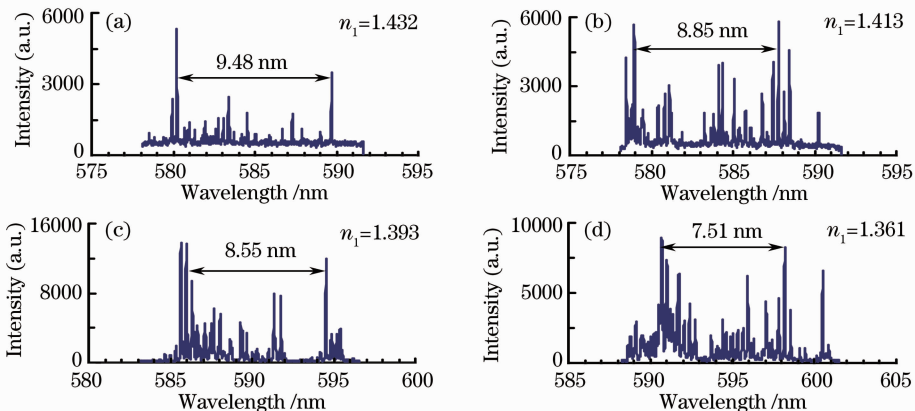


图 3 s 偏振光抽运下 n_1 取不同值时 TM-WGM 激光调制光谱图 ($a = 100 \mu\text{m}$, $b = 125 \mu\text{m}$)

Fig. 3 Modulated lasing spectra of TM-WGM pumped by s-polarized light under different n_1 ($a = 100 \mu\text{m}$, $b = 125 \mu\text{m}$)

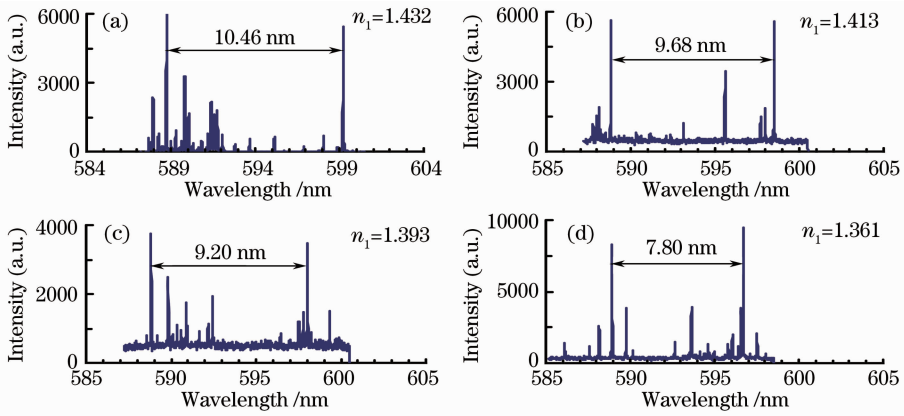


图 4 s 偏振光抽运下 n_1 取不同值时 TM-WGM 激光调制光谱图 ($a=125 \mu\text{m}$, $b=150 \mu\text{m}$)

Fig. 4 Modulated lasing spectra of TM-WGM pumped by s- polarized light under different n_1 ($a=125 \mu\text{m}$, $b=150 \mu\text{m}$)

表 1 调制周期 T 随 n_1 及 b/a 变化的测量值及计算值

Table 1 Calculation and measurement values of modulation period varied with n_1 and b/a

n_1	T / nm			
	Calculated values		Measured values	
	$(b/a=1.25)$	$(b/a=1.25)$	$(b/a=1.20)$	$(b/a=1.20)$
1.361	8.44	7.51	8.89	7.80
1.393	8.65	8.55	9.44	9.20
1.413	8.95	8.85	9.92	9.68
1.432	9.30	9.48	10.33	10.46

4.2 p 偏振光抽运下的实验结果

在 p 偏振光抽运条件下,采集了两种不同规格毛细管的激光光谱随染料溶液折射率 n_1 的变化规

律,结果如图 5 和图 6 所示。其中,图 5 中 $a=100 \mu\text{m}$, $b=125 \mu\text{m}$, $b/a=1.25$, 图 6 中 $a=125 \mu\text{m}$, $b=150 \mu\text{m}$, $b/a=1.2$ 。

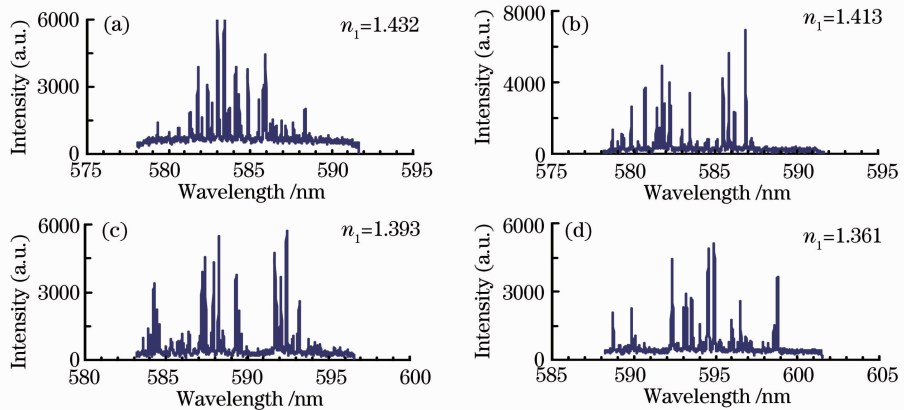


图 5 p 偏振光抽运下 n_1 取不同值时 TE-WGM 激光调制光谱图 ($a=100 \mu\text{m}$, $b=125 \mu\text{m}$)

Fig. 5 Lasing spectra of TE-WGM pumped by p- polarized light under different n_1 ($a=100 \mu\text{m}$, $b=125 \mu\text{m}$)

p 偏振光抽运条件下的激光光谱具有如下两个特点: 1) 用检偏片直接观察石英毛细管的激光辐射,当检偏片的通光方向垂直于(或平行于)毛细管的管轴时,激光辐射的强度最强(或基本消光),说明

WGM 激光辐射的电场矢量垂直于管轴,属于典型的横电波; 2) 和 s 偏振光抽运条件下的激光光谱(图 3 和图 4)比较,图 5 和图 6 都没有出现反射波对 WGM 激光显著的干涉调制效果。

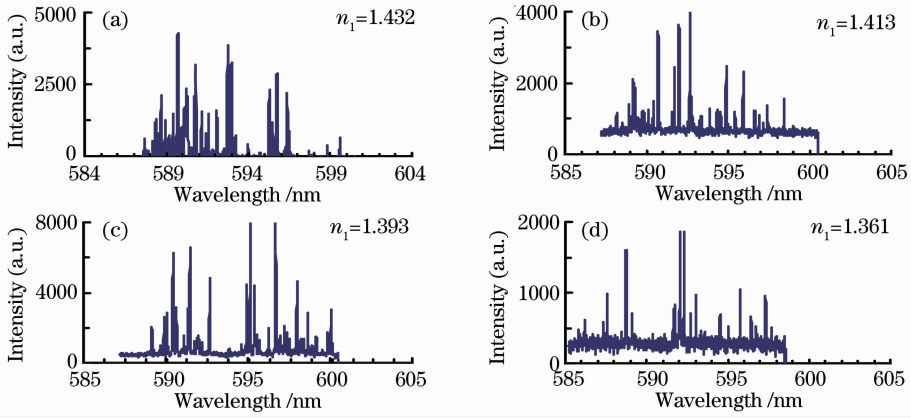

 图 6 p 偏振光抽运下 n_1 取不同值时 TE-WGM 激光调制光谱图 ($a=125 \mu\text{m}$, $b=150 \mu\text{m}$)

 Fig. 6 Lasing spectra of TE-WGM pumped by p-polarized light under different n_1 ($a=125 \mu\text{m}$, $b=150 \mu\text{m}$)

4.3 WGM 激光辐射偏振态的解释

抽运光的偏振状态决定了受激染料分子的振动状态,进而决定了 WGM 激光辐射的偏振性质^[12]。受 s 偏振光(或者 p 偏振光)激励的染料分子,必然产生沿毛细管管轴(或者垂直于毛细管管轴)方向偏振的受激辐射光子,受激辐射光在由毛细管截面构成的圆形微腔中的光放大产生了 WGM 激光辐射。因此,受 s 偏振光抽运下产生的 WGM 激光具有 TM 波属性(激光的电场矢量平行于管轴),用 TM-WGM 表示;受 p 偏振光抽运下产生的 WGM 激光具有 TE 波属性(激光的电场矢量垂直于管轴),用 TE-WGM 表示。

4.4 p 偏振光抽运干涉调制作用不突出的解释

作为调制信号的反射光,为了产生有效的干涉调制作用,除了和折射光在空间重叠外,还必须具有足够的调制光强。如图 2 所示,在毛细管截面上,TE-WGM(或 TM-WGM)波激光也属于 p(或 s)偏振光。当激光从染料溶液向毛细管内层界面反射时,p(或 s)偏振光的反射率分别满足:

$$\begin{cases} R_p = \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \\ R_s = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \end{cases}, \quad (4)$$

式中 θ_1 是入射角, $\theta_2 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1\right)$ 是折射角。

对 Rh6G 乙醇溶液 ($n_1=1.361$), R_p 和 R_s 随 θ_1 变化的曲线如图 7 所示。

对内外径 $a=100 \mu\text{m}$, $b=125 \mu\text{m}$, $b/a=1.25$ (或 $a=125 \mu\text{m}$, $b=150 \mu\text{m}$, $b/a=1.2$) 的石英毛细管,由调制条件 $\phi=\psi$ 得到折射角 $\theta=\theta_2=62.9^\circ$ (或 64.1°),对应的入射角 $\theta_1=72.5^\circ$ (或 74.5°)。在 $\theta_1=72.5^\circ$ (或 74.5°) 时,如图 7 所示: $R_p=0.029$

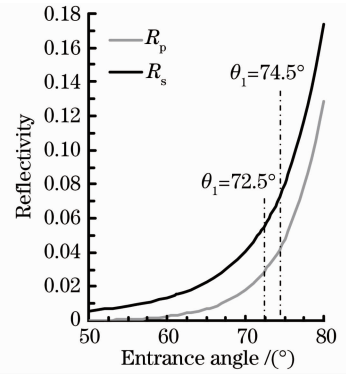


图 7 s 和 p 偏振光的反射率在内壁界面随入射角度的变化

Fig. 7 Reflectivity of s- and p-polarized light varied with entrance angle on the internal interface

(或 0.056), $R_s=0.043$ (或 0.075), p 光的反射率约为 s 光的一半。作为调制信号的反射光, p 光的强度不足导致在 p 偏振光抽运条件下的 WGM 激光, 因此难以出现调制现象。

此外,当折射光从管壁入射到外层界面时,由(1)式或(2)式计算出 $\phi=\psi=17.5^\circ$ (或 15.5°),入射角 $\theta-\phi=45.4^\circ$ (或 48.5°),大于外层界面的临界入射角 $\theta_c^o=43.3^\circ$,保证了折射激光在外层界面的全反射;当折射光从内层界面进入染料溶液时,入射角 $\theta=62.9^\circ$ (或 64.1°),小于内层界面的全反射角 $\theta_c^i=68.9^\circ$,保证了大部分激光能够折射到染料增益溶液中获得受激辐射放大。

5 结 论

将不同折射率的 Rh6G 激光染料溶液注入到两种不同型号的石英毛细管中,采用沿石英毛细管侧向偏振光抽运方式,研究了双层结构的圆柱形微腔中 WGM 激光的干涉调制现象。实验结果表明, WGM 激光的干涉调制周期随溶液折射率的增加而

增大,随毛细管长内外半径比的增加而减小;s 偏振光抽运条件下获得的 TM 模式激光会产生强干涉调制现象;p 偏振光抽运条件下获得的 TE 模式激光无明显的强干涉调制现象。用双层圆柱形微腔结构中反射波对折射波的调制效应很好地解释了观察到的实验现象。

参 考 文 献

- 1 K J Vahala. Optical microcavities[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 839—846.
- 2 D W Vernooy, A Furosawa, N Ph Georgiades, *et al.*. Cavity QED with high-Q whispering gallery mode[J]. *Phys Rev A*, 1998, 57(4): 2293—2296.
- 3 Jin Hu, Lu Yun, Bai Xiaosong. Experimental study of whispering gallery mode-based spherical optical micro-cavity[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 062301.
金 虎, 陆 云, 白晓松. 基于回音壁模式的球形光学微腔实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 062301.
- 4 H J Moon, Y T Chough, K An Cylindrical micro-cavity laser based on the evanescent wave-coupled gain[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 85(15): 3161—3164.
- 5 S L McCall, A F J Levi, R E Slusher. Whispering gallery mode micro-disk lasers[J]. *Appl Phys Lett*, 1992, 60(3): 289—291.

- 6 T Hiroshil, T Humihirou, K Junjil. Ultra-low-threshold europium chelate laser in morphology-dependent resonances[J]. *Appl Phys Lett*, 1995, 66(13): 1578—1580.
- 7 M Cai, G Hunziker, K J Vahala. Fiber-optic add-drop device based on a silica micro-sphere-whispering gallery mode system [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1999, 11(6): 686—687.
- 8 B E Little, J P Laine, D R Lim, *et al.*. Pedestal anti-resonant reflecting wave guides for robust coupling to micro-sphere resonators and for micro-photonics circuits[J]. *Opt Lett*, 2000, 25(1): 73—75.
- 9 Zhang Yuanxian, Zhang Xiaoxiao, Liu chun, *et al.*. Whispering gallery mode fiber laser based on PDMS substrate[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 1102001.
张远宪, 张晓晓, 刘 春, 等. 基于 PDMS 基片的回音壁模式光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1102001.
- 10 J C Knight, H S T Driver, G N Robertson. Interference modulation of Q values in a clad-fiber whispering-gallery-mode laser[J]. *Opt Lett*, 1993, 18(16): 1296—1298.
- 11 H J Moon, K An. Interferential coupling effect on the whispering-gallery mode lasing in a double-layered micro-cylinder [J]. *Appl Phys Lett*, 2002, 80(18): 3250—3252.
- 12 D Y Han, X Y Pu, N Jiang, *et al.*. Polarization properties of an evanescent-wave pumped whispering gallery mode fibre laser[J]. *Chin Sci Bull*, 2010, 55(1): 1—6.

栏目编辑:张 腾