

基于聚合物的橄榄球形光学微谐振器

金 虎^{1,2} 白晓淞² 陆 云²

(¹ 甘肃联合大学师范学院, 甘肃 兰州 730000
² 中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要 利用苯二甲酸丙二醇酯(PTT)聚合物微米线从生物相容性聚合物材料聚乙烯吡咯烷酮(PVP)水溶液中提拉制备得到直径为 10~300 μm 的橄榄球形光学微谐振器。将波长为 532 nm 的绿光和波长为 671 nm 的红光分别耦合到最大直径为 94.7 μm 和 68.3 μm 的橄榄球形微谐振器,观察了其谐振特性。利用 1549~1552 nm 的连续光源对直径为 94.7 μm 的橄榄球形微谐振器进行了光学性能测试,测量了其吸收光谱。观察到明显的回音壁模式吸收峰,测得其品质因子为 1.05×10^5 。

关键词 光学器件;橄榄球形微谐振器;PTT 微米线;PVP 材料;回音壁模式

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0823004

Polymer-Based Rugby-Shape Optical Micro-Resonators

Jin Hu^{1,2} Bai Xiaosong² Lu Yun²

(¹ Normal College, Gansu Lianhe University, Lanzhou, Gansu 730000, China
² State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

Abstract Rugby-shape optical micro-resonators with diameters of 10~300 μm are fabricated by drawing poly(trimethylene terephthalate) (PTT) microwires immersed in biocompatible polyvinylpyrrolidone (PVP) polymer aqueous solution. Resonating characteristics are observed by coupling 532 nm green light and 671 nm red light respectively into the rugby-shape optical micro-resonators with diameters of 94.7 μm and 68.3 μm . By coupling 1549~1552 nm light into the rugby-shape optical micro-resonator with a diameter of 94.7 μm , absorption spectra are obtained and whispering gallery mode-based absorption peaks are observed, with a measured quality factor of 1.05×10^5 .

Key words optical devices; rugby-shape optical micro-resonator; PTT microwire; PVP material; whispering gallery mode

OCIS codes 230.4555; 130.2790; 130.3990

1 引 言

随着生物光子学的发展,研究光学与生物学相融合的生物光子器件在生物传感器^[1,2]、生物成像^[3~6]、生物微机械系统^[7]以及生物治疗^[8]等方面显得非常重要。然而,光子学微结构种类多样,有柱、碟、环、线、球等几何形状,其中球形微腔因具有回音壁模式(WGM)的传输特性而备受人们关注^[9~14]。光以这种模式传播,相当于在一个闭合的谐振腔内振荡。由于全反射的作用,球外光场为局限于微球表面附近的倏逝场,是一种非传播波,因此渗出微球以外的光极其微弱,所以微球能够将光长

时间约束在很小的体积内而几乎没有任何损失,这使回音壁模式下的球形微腔具有很高的品质因子和很小的模式体积。光学谐振在微盘形和微柱形微腔中也可产生^[15,16]。最近出现了一种新型的微瓶形谐振器^[17~22],这种双脖子状的微谐振器不但能实现回音壁模式传输,而且能沿轴向将回音壁模式很好地分开,其自由谱宽与相同尺寸的微球形谐振器的自由谱宽在同一数量级。目前制作这种微瓶形谐振器的方法主要有热拉法^[20]和软压法^[19,22],制作工艺较为复杂。现有微谐振器大多为 SiO₂ 材料制作,不具有生物相容性。而聚乙烯吡咯烷酮(PVP)作为一

收稿日期: 2012-01-19; 收到修改稿日期: 2012-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(10974261)资助课题。

作者简介: 金 虎(1963—),男,副教授,主要从事光学器件方面的研究。E-mail: jgw63@sina.com

种生物相容性材料,具有独特的物理和化学特性,它既溶于水,又溶于大部分有机溶剂,它的产品遍及许多领域^[23],Higa等^[24]从实验上证明了PVP材料的无细胞毒性和较低的溶血性。在生物医学方面,PVP主要运用于润滑性涂层、口服和注射药物、消毒液、缓释口服药物的载体、外伤包扎带等。PVP材料的这些物化特性使得基于PVP材料的光子器件有望在生物光子学领域得到应用。本文采用简单的方法,利用生物相容性材料PVP制作了橄榄球形光学微谐振器,研究了其光学谐振特性,发现了明显的回音壁模式吸收峰。

2 物理模型

图1直观地给出了橄榄球形光学微腔中回音壁模式的示意图,可以清楚地了解使用锥形光纤耦合的方法在橄榄球形微腔内激发起回音壁模式的物理机制。图1(a)所示为通过锥形光纤将波长为 λ_1 的光信号耦合进入微腔,光在微腔内传输时以大于全反射临界角入射到界面上,在界面上被全反射,这些反射光在下一界面也以相同的角度入射,所以反复

发生全反射,在经过若干次绕行后回到原来位置,当它的相位与原来的相位匹配时,就互相叠加增强产生共振,形成回音壁模式。图1(b)和图1(c)则是在另外两种输入光信号下,在橄榄球形微腔内激发起另外两种不同轴向模式数的回音壁模式示意图,即对应一定条件的输入光信号,在微腔中激发起特定模式数的回音壁模式。光在微腔中传播,稳定后在 z 轴方向是以驻波的形式存在,轴向模式数 q 对应于 z 轴方向上波节点的数目。一个特定的回音壁模式,在 z 轴方向是由轴向模式数 q 来确定。图1(b)表示在输入光信号波长 λ_2 的激励下,在微腔内激起了 $q=3$ 的回音壁模式。同样,图1(c)表示在输入光信号波长 λ_3 的激励下,在微腔内激起了 $q=5$ 的回音壁模式。在 z 轴方向上形成这种光传输特性,其物理机制在于:光在微腔体内传输时,在 z 轴方向上存在一个所谓的角动量壁垒。也就是说光在微腔的两个端点处传输时,需要高的角动量,在微腔中部传输时,需要的角动量相对要低。正是在这个角动量壁垒的限制下,光在 z 轴方向的传输被约束。于是也就有了用轴向模式数 q 来标志这种回音壁模式的光传输。

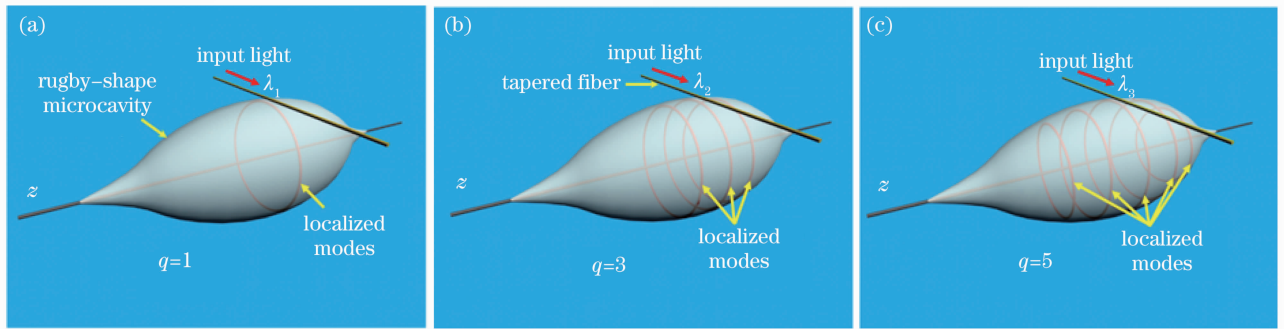


图1 橄榄球形光学微腔回音壁模式的激发示意图。(a) $q=1$; (b) $q=3$; (c) $q=5$

Fig. 1 Schematic of WGM excitation in the rugby-shape optical microcavities. (a) $q=1$; (b) $q=3$; (c) $q=5$

3 实验制作

首先采用直接拉制的方法^[25]得到直径为 $1\sim 15\ \mu\text{m}$ 的苯二甲酸丙二醇酯(PTT)聚合物线作为支撑光纤(PTT微纳光纤具有十分优良的柔韧性和弹性),然后将聚乙烯吡咯烷酮(PVP,折射率1.44)这种生物相容性材料配成质量分数为25%的水溶液,用滴管将约1 mL的PVP水溶液滴在洁净玻璃基片上,用镊子将拉制得到的PTT微米线浸没在PVP水溶液中,再以 $0.1\sim 0.5\ \text{m/s}$ 的速度从溶液中将PTT微米线拉出,由于PVP液体的粘性,PVP水溶液附着在PTT微米线上,在液体表面张力、液体粘滞性的共同作用下,PVP水溶液在PTT微米线上收缩

成橄榄球状的液滴。将附着有PVP水溶液的PTT微米线自然晾干后(约48 h),橄榄球状的PVP微球凝固在PTT线上,从而得到直径在 $10\sim 300\ \mu\text{m}$ 的橄榄球形谐振器。这种橄榄球形光学微腔的制作方法简捷有效,可通过控制PVP液体粘度、PTT微纳光纤的直径大小以及拉制速度而有效控制所形成的橄榄球形谐振器的大小。图2给出了橄榄球状微型谐振器的制作示意图,图2(a)为用镊子将拉制得到的PTT微米线浸没在PVP水溶液中,图2(b)为以 $0.1\sim 0.5\ \text{m/s}$ 的速度从溶液中将PTT微米线拉出,图2(c)为PVP水溶液在PTT微米线上收缩成橄榄球状的液滴。

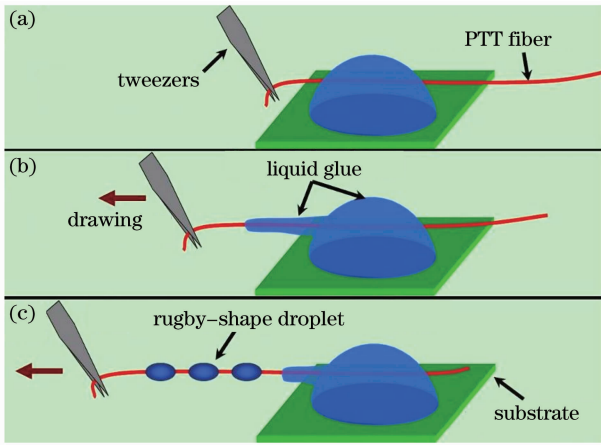


图 2 橄榄球状微型谐振器的制作示意图。(a)用镊子将拉制得到的 PTT 微米线浸没在 PVP 水溶液中；(b)以 0.1~0.5 m/s 的速度从溶液中将 PTT 微米线拉出；(c) PVP 水溶液在 PTT 微米线上收缩成橄榄球状的液滴

Fig. 2 Fabrication process of the rugby-shape optical micro-resonator. (a) PTT microwires are immersed in PVP aqueous solution; (b) PPT microwires are draw by using a tweezer out of the solution at a speed of 0.1~0.5 m/s; (c) rugby-shape PVP drops are formed on the PTT microwires

为了表征 PVP 材料的光学特性,用 25% 的 PVP 水溶液制作成厚度为 20 μm 的薄膜,通过实验测得 20 μm 厚的 PVP 薄膜在波长 400~1900 nm 范围内的透光率在 86% 以上。图 3 为实验测量 20 μm 厚的 PVP 薄膜的透光率曲线。

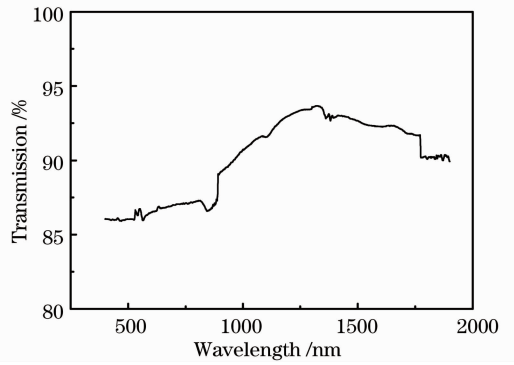


图 3 厚度为 20 μm 的 PVP 薄膜的透光过率
Fig. 3 Transmission of PVP thin film with a thickness of 20 μm

图 4 为制作的橄榄球形微型谐振器的光学照片。4 个级联的橄榄球形微型谐振器固定在一根直径为 10.8 μm 的 PTT 线上,从左至右,橄榄球形微型谐振器的直径分别为 37.7、35.3、35.3、35.4 μm,相互间隔分别为 143.2、127.8、148.3 μm。图 5 给出了二级级联的橄榄球形微型谐振器的照片(放大倍数 350×)。由于 PVP 材料的透明性,可以清楚地看到橄榄球形微型谐振器内部的 PTT 支撑线。橄榄球内部无气泡、间隙等缺陷。插图为局部放大图,PVP 材料与 PTT 支撑线很好地接触,橄榄形微球的凸起形成透镜效应,使在微腔内部的 PTT 线被放大 1.53 倍。用这种方法制备的橄榄球形光学微腔可很好地被级联。图 6 给出了一个直径为 146 μm 的橄榄球形微型谐振器,长轴长度为 411 μm,支撑线的直径为 14.3 μm。

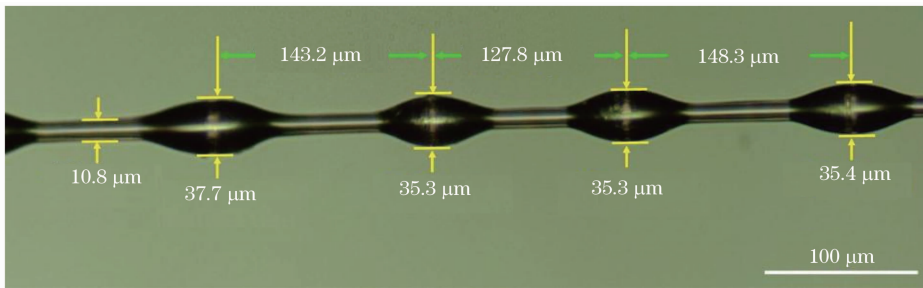


图 4 橄榄球形微型谐振器的光学显微镜照片

Fig. 4 Microscope images of the rugby-shape optical micro-resonators

图 7 为形成橄榄球状液滴的力学原理示意图。待液滴稳定后,PVP 液体表面张力、PTT 微米线表面张力以及 PVP 溶液与 PTT 微米线之间的粘滞力三力趋于平衡^[26],即

$$\gamma_{SG} - \gamma_{SL} - \gamma_{LG} \cos \theta_c = 0, \quad (1)$$

式中 γ_{SG} 为 PTT 支撑线表面张力, γ_{SL} 为 PTT 支撑线与 PVP 粘性液体之间的相互作用力, γ_{LG} 为 PVP

液体表面张力。

图 8 给出了制备的 4 个不同直径、不同支撑线的橄榄球形微型谐振器的扫描电子显微镜 (SEM) 图。橄榄球形微型谐振器的直径分别为 296.7、96.0、53.7、10.3 μm, PTT 支撑线的直径分别为 11.3、8.6、2.1、1.5 μm。长轴与短轴的比例分别为 0.48、0.40、0.42、0.36。图 9 为一个二级级联橄榄

球形微型谐振器的 SEM 图。两个橄榄球形微型谐振器的直径分别为 $91.2\ \mu\text{m}$ 和 $88.2\ \mu\text{m}$ ，相互间隔为 $176.5\ \mu\text{m}$ ，支撑线直径为 $8.7\ \mu\text{m}$ 。由 SEM 图可以发现，越粗的支撑线可以得到直径越大的橄榄球形谐振器。这是由于在从 PVP 溶液提拉得到橄榄球形谐振器的过程中，越粗的支撑线与溶液接触面积越大，可以黏附更多的 PVP，从而得到了更大直径的橄榄球形谐振器。

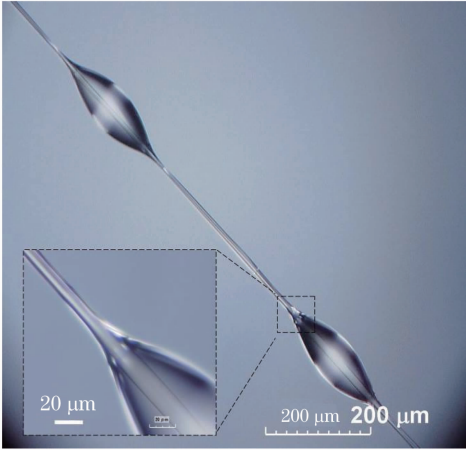


图 5 二级级联的橄榄球形微型谐振器的光学照片，放大倍数 $350\times$

Fig. 5 Optical microscope images (at the magnification of $350\times$) of two cascaded rugby-shape optical micro-resonators

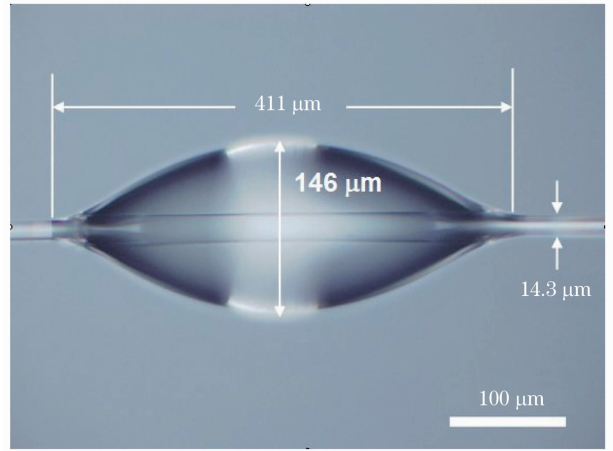


图 6 直径为 $146\ \mu\text{m}$ 橄榄球形微型谐振器光学照片
Fig. 6 Optical microscope image of a $146\text{-}\mu\text{m}$ -diameter rugby-shape optical micro-resonator

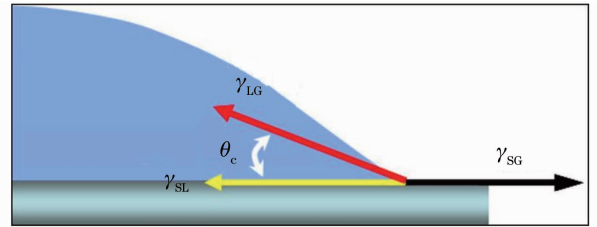


图 7 形成橄榄球状液滴的力学原理示意图
Fig. 7 Schematic for the mechanical process of the formation of rugby-shape drops

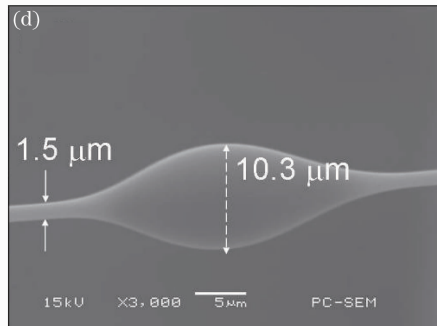
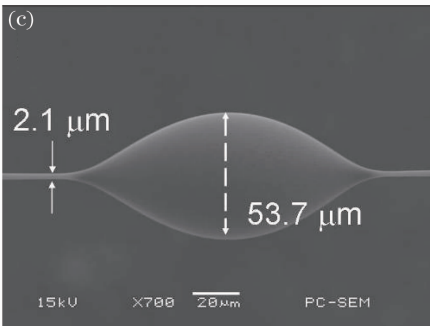
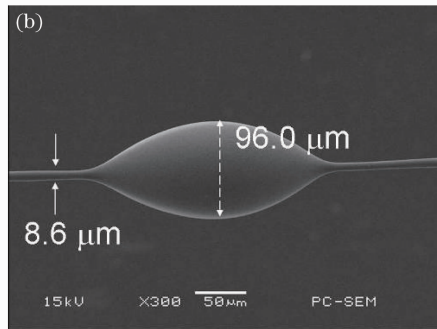
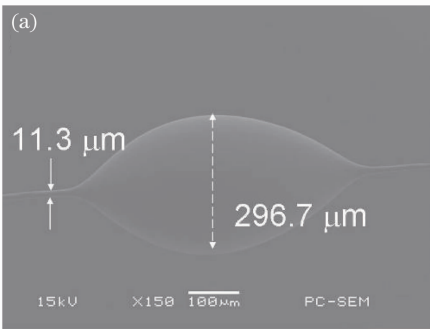


图 8 橄榄球形微型谐振器的 SEM 图

Fig. 8 SEM images of the rugby-shape optical micro-resonators

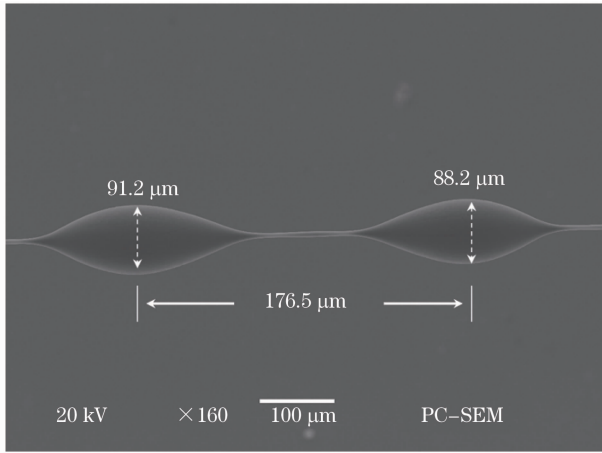


图 9 二级级联的橄榄球微型谐振器 SEM 图
Fig. 9 SEM image of two cascaded rugby-shape optical micro-resonators

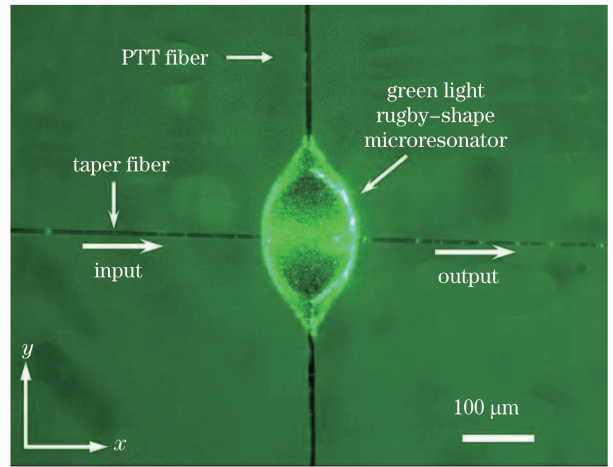


图 11 通入波长为 532 nm 的绿光橄榄球形微谐振器的光学照片

Fig. 11 Optical microscope image of the rugby-shape optical micro-resonator with a coupled green light of 532 nm

4 测试分析

先将 PTT 支撑线两端固定在两个支撑臂上使橄榄球形微谐振器悬空。接着采用火焰法拉制一根直径为 $1.7 \mu\text{m}$ 的光纤并将其固定在三维调节架上,然后将光纤缓慢移动并垂直靠在橄榄球形微型谐振器的最大直径处,在“赤道”平面进行光学性能测试^[22]。图 10 为橄榄球形微谐振器光学性能测试的示意图。图 11 是将波长为 532 nm 的绿光耦合到直径为 $94.7 \mu\text{m}$ 的橄榄球形微谐振器的谐振图片,图 12 是将波长为 671 nm 的红光耦合到直径为 $68.3 \mu\text{m}$ 的橄榄球形微谐振器的图片。可以看出,波长为 532 nm 的绿光和波长为 671 nm 的红光均很好地耦合进入橄榄球形微谐振器。

为了进一步研究其谐振特性,选取直径为

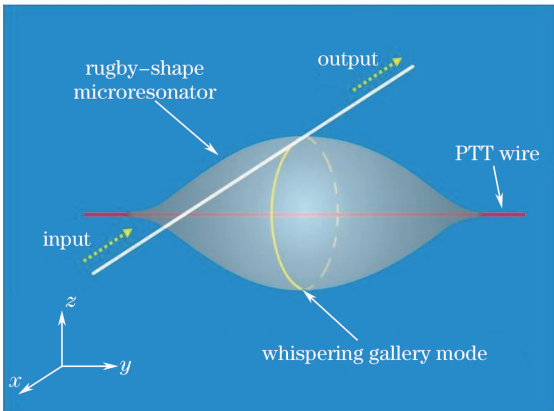


图 10 橄榄球形微型谐振器光学性能测试示意图
Fig. 10 Schematic of the optical characterization of the rugby-shape optical micro-resonator

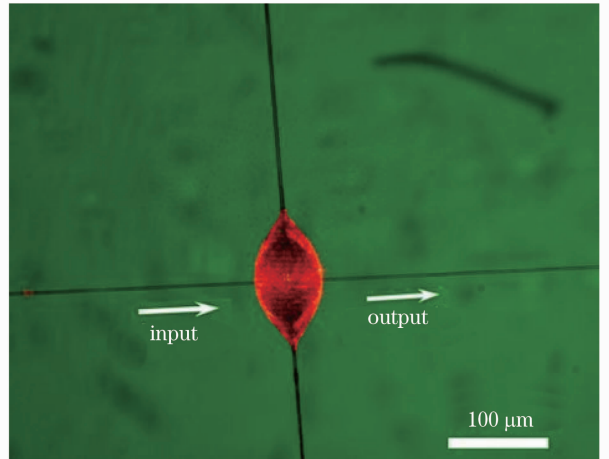


图 12 通入波长为 671 nm 的红光橄榄球形微谐振器的光学照片

Fig. 12 Optical microscope image of the rugby-shape optical micro-resonator with a coupled red light of 671 nm

$94.7 \mu\text{m}$ 的橄榄球形微谐振器进行了连续光谱扫描。实验中,光纤一端连接波长为 $1549 \sim 1552 \text{ nm}$ 的连续光源 (TSL-210F/Santec),另一端接在光谱分析仪 (MS9710C/Auritsu) 上记录橄榄球形微谐振器的传输光谱。图 13 是所测得的传输光谱曲线,可以看出,在波长为 $1549.32, 1549.64, 1550.13, 1550.52, 1551.04 \text{ nm}$ 处均出现明显的光谱吸收。吸收峰之间的距离分别为 $0.32, 0.49, 0.39, 0.52 \text{ nm}$ 。吸收峰的存在表明,在这些对应的输入

波长下,光纤输出的光功率明显下降,其原因是当输入光信号传输到耦合区域时,入射光频率等于橄榄球形微谐振器回音壁模式的本征频率,光纤中光信号几乎最大限度地耦合进入橄榄球形微腔。此时,微腔体处于光学谐振状态,光纤输出端光功率强度显著下降,从而在吸收光谱曲线中存在一个吸收峰。图 14 为对应波长 1550.13 nm 和 1551.04 nm 处吸收峰的洛伦兹函数拟合。红色曲线是对实验数据(黑色曲线)做了洛伦兹函数拟合而得到的拟合曲线(彩色图见电子版)。经计算得到其品质因子值分别为 1.05×10^5 和 7.76×10^4 。

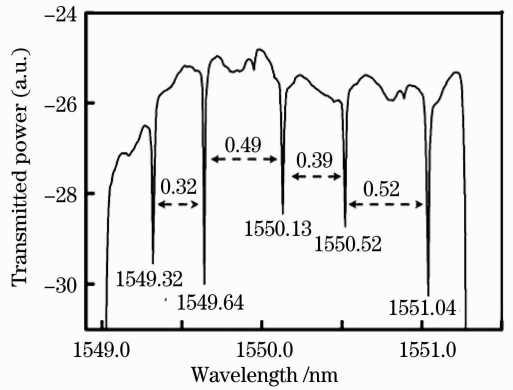


图 13 直径为 94.7 μm 橄榄球形微谐振器在 1550 nm 波长附近的传输谐振光谱曲线

Fig. 13 Transmission spectrum of 94.7-μm-diameter rugby-shape optical micro-resonator at wavelengths around 1550 nm

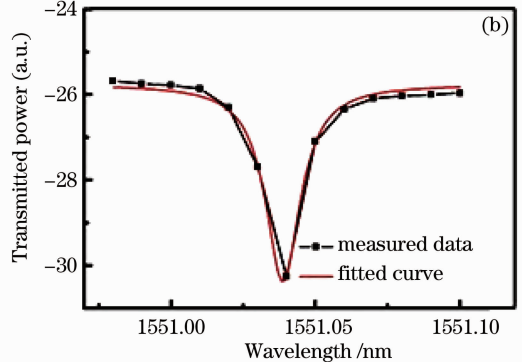
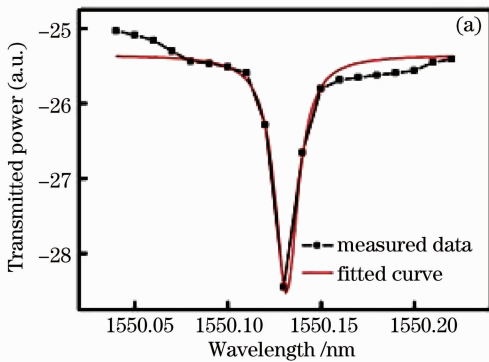


图 14 在 1550.13 nm 和 1551.04 nm 处,对吸收峰进行洛伦兹函数拟合分析图

Fig. 14 Lorentz-function fitting of the absorption peaks at wavelengths of 1550.13 nm and 1551.94 nm

5 结 论

采用直接拉制法得到了直径为 1~15 μm 的 PTT 聚合物微米线,从具有生物相容性的 PVP 材料水溶液中通过简单的提拉方法制备了直径为 10~300 μm 的橄榄球形微谐振器。对直径分别为 94.7 μm 和 68.3 μm 的橄榄球形微谐振器进行了光耦合实验,发现波长为 532 nm 的绿光和波长为 671 nm 的红光均很好地耦合进入橄榄球形微型谐振器。利用 1549~1552 nm 的连续光源对直径为 94.7 μm 的橄榄球形微谐振器进行了光学性能测试,发现了明显的回音壁模式吸收峰,通过洛伦兹函数拟合的方法计算得到其品质因子达到 1.05×10^5 。

参 考 文 献

1 J. I. Peterson, G. G. Vurek. Fiber-optic sensors for biomedical

applications[J]. *Science*, 1984, **224**(4645): 123~127
 2 V. S. Y. Lin, K. Moteshareh, K. P. S. Dancil *et al.*. A porous silicon-based optical interferometric biosensor[J]. *Science*, 1997, **278**(5339): 840~843
 3 C. H. Contag, B. D. Ross. It's not just about anatomy; in vivo bioluminescence imaging as an eyepiece into biology [J]. *J. Magn. Reson. Imaging*, 2002, **16**(4): 378~387
 4 J. G. Fujimoto. Optical coherence tomography for ultrahigh resolution in vivo imaging[J]. *Nat. Biotechnol.*, 2003, **21**(11): 1361~1367
 5 J. G. Fujimoto, C. Pitris, S. A. Boppart *et al.*. Optical coherence tomography: an emerging technology for biomedical imaging and optical biopsy[J]. *Neoplasia*, 2000, **2**(1-2): 9~25
 6 A. D. Zacharopoulos, P. Svenmarker, J. Axelsson *et al.*. A matrix-free algorithm for multiple wavelength fluorescence tomography[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(5): 3042~3051
 7 R. Ma, A. Taruttis, V. Ntziachristos *et al.*. Multispectral optoacoustic tomography (MSOT) scanner for whole-body small animal imaging[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(24): 21414~21426
 8 J. L. West, N. J. Halas. Engineered nanomaterials for biophotonics applications: improving sensing, imaging, and therapeutics[J]. *Annu. Rev. Biomed. Engng.*, 2003, **5**: 285~292

- 9 K. J. Vahala. Optical microcavities [J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 839~846
- 10 A. M. Armani. Label-free, single-molecule detection with optical microcavities[J]. *Science*, 2007, **334**(6062): 783~787
- 11 M. L. Gorodetsky, A. A. Savchenkov, V. S. Ilchenko. Ultimate Q of optical microsphere resonators[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(7): 453~455
- 12 Y. Louyer, D. Meschede, A. Rauschenbeutel. Tunable whispering-gallery-mode resonators for cavity quantum electrodynamics[J]. *Phys. Rev. A*, 2005, **72**(3): 031801
- 13 V. B. Braginsky, M. L. Gorodetsky, V. S. Ilchenko. Quality-factor and nonlinear properties of optical whispering-gallery modes[J]. *Phys. Lett. A*, 1989, **137**(7-8): 393~397
- 14 Yan Yingzhan, Ji Zhe, Wang Baohua *et al.*. Evanescent wave excitation of microsphere high-Q model using tapered fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1789~1793
严英占, 吉喆, 王宝花等. 锥形光纤倏逝场激发微球腔高Q模式[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1789~1793
- 15 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): 81~86
王加贤, 李俊杰, 吴文广等. 耦合微盘及带输出波导的单微盘腔的耦合模式特性[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 81~86
- 16 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. 影响柱形微腔回音廊膜激光抽运阈值能量的因素[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 660~663
- 17 M. Sumetsky, Y. Dulashko, R. S. Windeler. Optical microbubble resonator[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(7): 898~900
- 18 M. Sumetsky. Whispering-gallery-bottle microcavities; the three-dimensional etalon[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(1): 8~10
- 19 G. S. Murugan, J. S. Wilkinson, M. N. Zervas. Selective excitation of whispering gallery modes in a novel bottle microresonator[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(14): 11916~11925
- 20 G. Kakaranzas, T. E. Dimmick, T. A. Birks *et al.*. Miniature all-fiber devices based on CO₂ laser micro structuring of tapered fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(15): 1137~1139
- 21 M. L. Gorodetsky, A. E. Fomin. Geometrical theory of whispering-gallery modes [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2006, **12**(1): 33~39
- 22 M. N. Zervas, G. S. Murugan, J. S. Wilkinson. Demonstration of novel high-Q fibre WGM “Bottle” microresonators[C]. *IEEE Proc. 10th Anniversary International Conference on Transparent Optical Networks*, 2008. 58~60
- 23 J. M. Rosiak, J. Olejniczak. Medical applications of radiation formed hydrogels[J]. *Radiat. Phys. Chem.*, 1993, **42**(4-6): 903~906
- 24 O. Z. Higa, S. O. Rogero, L. D. B. Machado *et al.*. Biocompatibility study for PVP wound dressing obtained in different conditions[J]. *Radiat. Phys. Chem.*, 1999, **55**(5-6): 705~707
- 25 X. B. Xing, Y. Q. Wang, B. J. Li. Nanofibers drawing and nanodevices assembly in poly (trimethylene terephthalate) [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(14): 10815~10822
- 26 R. Tadmor. Line energy and the relation between advancing, receding, and young contact angles [J]. *Langmuir*, 2004, **20**(18): 7659~7664

栏目编辑：韩 峰