

基于回音壁模式的球形光学微腔实验研究

金虎^{1,2} 陆云² 白晓淞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 采用聚苯乙烯材料制作出不同直径(50~250 μm)的球形光学微腔并实现了微腔与锥形光纤的耦合,测量了球形光学微腔在1570~1576 nm波长范围内的吸收光谱,实验结果表明球形光学微腔在这一波长范围内可发生基于回音壁模式(WGM)的光学谐振,且WGM吸收峰的相邻波长间隔随着聚苯乙烯微球直径的增大而减小。通过吸收光谱计算了聚苯乙烯微球在其本征频率下的品质因子,结果表明微球品质因子数量级均在10⁴以上。

关键词 光学器件;光学微腔;回音壁模式;锥形光纤

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.062301

Experimental Study of Whispering Gallery Mode-Based Spherical Optical Microcavity

Jin Hu^{1,2} Lu Yun² Bai Xiaosong²

(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 Spherical optical microcavities with different diameters (50~250 μm) are fabricated using polystyrene (PS), and they are coupled to tapered fibers. Absorption spectra of the spherical optical microcavities in wavelength range of 1570~1576 nm are measured. Experimental results show that whispering gallery mode (WGM)-based optical resonance occurs in the microcavities in this wavelength range. The wavelength interval between the adjacent resonating modes decreases with the increase of the PS sphere diameters. Quality factors of the PS spheres at the eigen frequencies are calculated according to the absorption spectra, and the results show that values of the quality factors are higher than 10⁴.

Key words optical devices; optical microcavity; whispering gallery mode; tapered optical fiber

OCIS codes 230.4555; 130.2790; 130.3990

1 引言

光子学微结构具有许多新物理效应。在各式各样的光子学微结构中,微球形结构近年来逐渐成为人们的研究热点。若将光学微球置于低于微腔介质折射率的媒质中,光在微腔内以大于临界角的方向传播时会在微腔表面不断发生全反射^[1]。微球将光约束在“赤道”平面附近并沿大圆绕行。当绕行的光波满足一定的相位匹配时,就可以互相叠加增强,形成一种特殊的光传播模式,这种特殊传播模式被称为回音壁模式(WGM)^[2]。这种模式传播,相当于光在一个闭合的谐振腔内振荡,其共振的频率与入射场的模式无关,只决定于微球的折射率和半径,因此这种共振也可以称为形貌共振^[3]。光学谐振在微盘形和微柱形微腔中也可产生^[4~7],而球形光学微腔中存在的WGM使其具有一般谐振腔所没有的一些特殊优点^[8]。微球外的光场为近场,是局限于微球表面附近的倏逝波,它是一种非传播波,光场的振幅在径向方向呈指数下降,因此从球内透出到球外的平均能流为零^[9]。这使WGM下的微球具有很高的品质因子和很小的模式体积,它在线

收稿日期: 2012-01-10; 收到修改稿日期: 2012-02-19; 网络出版日期: 2012-04-01

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

性和非线性光谱中存在非常窄的共振峰,这就为其在光子学器件中的应用提供了潜力^[10]。在光通信功能器件应用领域,利用光学微球在特定频率下产生谐振的性能,可以实现线性光开关、波长滤波、密集波分复用等光学功能器件。2006年,Topolancik等^[11]利用微球谐振腔实现了近红外波段全光开关。他们在实验中所用到的二氧化硅微球的直径为 $300\ \mu\text{m}$,利用两根光锥实现 $1311\ \text{nm}$ 波长的上行下行光开关,并采用红外线成像拍摄记录了光学图片。2010年,Roy等^[12]利用微球实现了光逻辑电路功能。微球在特定频率下产生谐振,对于谐振状态下特定频率的光可以耦合进入微腔当中,输出端的光强就会显著下降。从而实现所需要的逻辑值1或者0。2010年,Wu等^[13]在 $\text{ZrF}_4\text{-BoF}_2\text{-NaF-AlF}_3$ (ZBNA)微球中实现了波长为 $550\ \text{nm}$ 的绿光极低阈值的激光发射,同样也是利用光锥耦合激发了ZBNA微球腔中的WGM。球形微腔还可应用于生物传感领域,基于微球的生物传感器由于谐振腔的谐振传输次数很高,因此将增加光与生物分子相互作用的有效距离,进而提高检测灵敏度。2007年,Ren等^[14]进行了圆柱状的大肠杆菌检测实验,显著提高了检测灵敏度。2008年,Vollmer等^[15]利用微球腔实现了单个球状流感A病毒的检测,结果与预期吻合。由于光子学微结构具有非常重要的研究价值和应用前景,所以本文基于WGM的球形光学微腔进行了实验研究。

2 实验过程

实验选用的微球是制备的直径为 $50\sim 250\ \mu\text{m}$ 聚苯乙烯微球。聚苯乙烯材料的光学性能十分优良,折射率为 $1.59\sim 1.60$,属于高折射率材料,优于二氧化硅。它也是一种纯烃类结构的高分子化合物,其介电性能良好,在高频下有很低的功率因数,是最耐辐射的聚合物之一,且吸湿性也很弱,约为 0.02% ,能在潮湿的环境中保持尺寸及强度的稳定性,被广泛应用于有机聚合物光纤纤芯材料^[16]。由于聚苯乙烯无色透明,透光率为 $88\%\sim 92\%$,光稳定性很好,特别是抗放射线能力是所有已知塑料中最强的,因而被用作光学零件。为了研究光在球形光学微腔中传输时的吸收光谱,选择了与锥形光纤的耦合方法,在聚苯乙烯微球中激发起WGM传输,并利用锥形光纤实现光信号的输入和输出。

实验用到的锥形光纤直径为 $890\ \text{nm}$,近红外光在其中的传输损耗约为 $0.3\ \text{dB/mm}$ 。该光纤放大1000倍后的显微图像如图1所示。由于匹配 $890\ \text{nm}$ 锥形光纤的聚苯乙烯球形微腔直径在 $50\sim 250\ \mu\text{m}$ 之间,所以本实验选用的聚苯乙烯微球直径是 $161\ \mu\text{m}$ 。图2为锥形光纤与聚苯乙烯微球耦合成功的光学显微镜图片,光学显微镜的聚焦平面为光锥与微球的耦合平面。由于光锥直径在 $1\ \mu\text{m}$ 以下,光锥与微球之间的范德瓦耳斯力和静电力比较明显,在这两种力的作用下,光锥被聚苯乙烯微球吸引,相当于这两种力将它们“固定”,于是可以认为在实验过程中,光锥与微球的耦合条件基本不变。

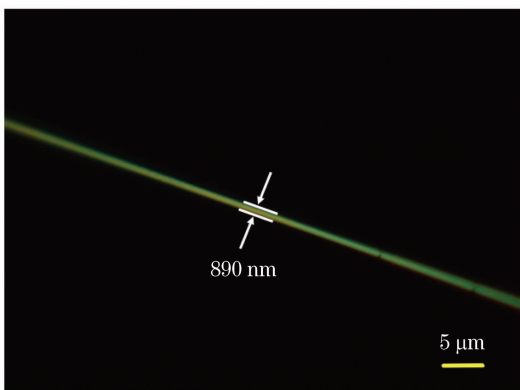


图1 直径为 $890\ \text{nm}$ 的锥形光纤的光学显微镜图片

Fig. 1 Optical microscope image of a tapered optical fiber with a diameter of $890\ \text{nm}$

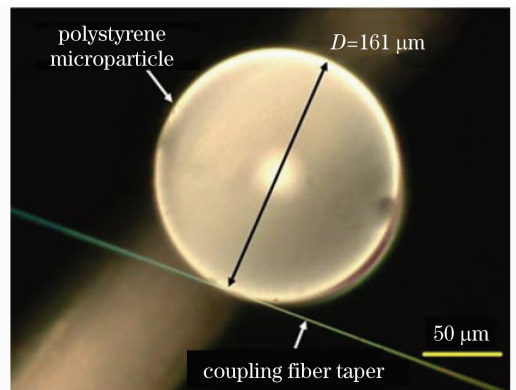


图2 光锥与聚苯乙烯微球耦合图片

Fig. 2 Optical microscope image of the coupling between a tapered optical fiber and a polystyrene microparticle

图3为光锥与聚苯乙烯微球的耦合过程。聚苯乙烯微球被粘固在一根圆柱形衬底杆上。光锥被固定在三维微调节架上。实验中用的是KOHZU公司生产的手动六轴微调节架,在微调模式下分辨率是 $0.5\ \mu\text{m}/\text{div}$ 。在微调过程中,同时利用CCD系统实时监控光锥在显微镜下的移动情况,从而可以方便有效地实现光锥与聚苯乙烯微球的空间耦合。图3(a)是根据微球的高度,将光锥调节到一个合适高度的图片;

图 3(b)为通过微调节架在水平面移动光锥使之靠近聚苯乙烯微球;图 3(c)为利用微调节架,将光锥与聚苯乙烯微球实现空间位置接触的图片;图 3(d)为在光锥的输入端输入红光(波长 671 nm)后光锥与聚苯乙烯微球的光耦合图片,其中箭头方向表示光的传输方向。

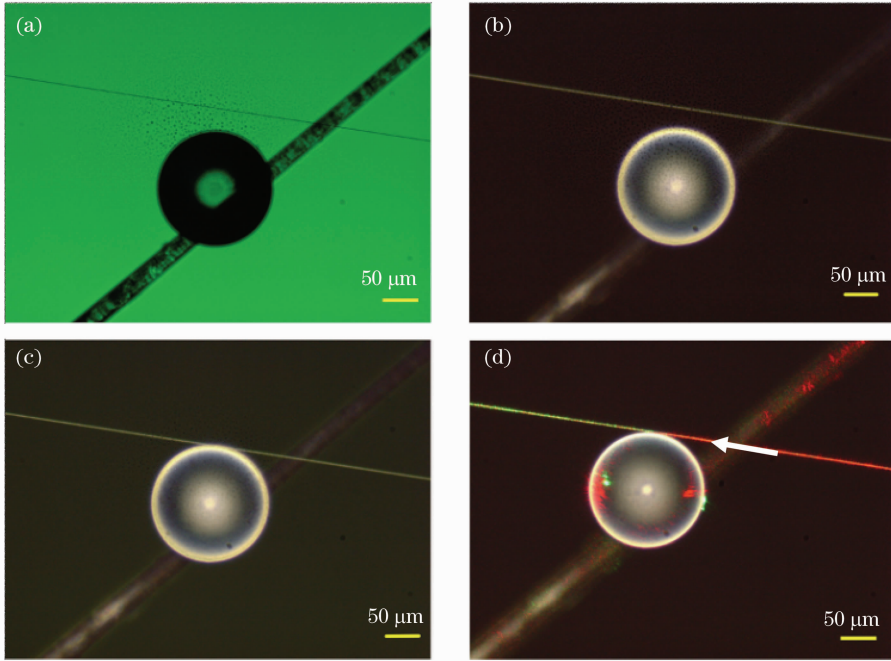


图 3 锥形光纤与聚苯乙烯微球耦合过程的光学显微镜图片(50 \times)

Fig. 3 Optical microscope images (50 \times) of the coupling process between a tapered optical fiber and a polymer sphere

3 测试分析

通过以上光耦合实验,实现了利用锥形光纤将输入光耦合进球形光学微腔。接下来进行连续光谱扫描,以测试得到聚苯乙烯微球的吸收光谱。实验中使用可调谐半导体激光器作为信号源,对聚苯乙烯微球进行连续扫描。光锥的输入端口连接到可调连续激光器,输出端连接到 MS 9710C 光谱分析仪。激光器输出的信号波长范围为 1570~1576 nm,扫描步长为 0.001 nm,输入光功率为 3 mW。光锥输出端光功率强度变化的数据由光谱分析仪采集,根据所采集的传输光谱数据就可以分析得到球形微腔的吸收光谱。图 4 是实验测得直径 161 μm 聚苯乙烯微球 WGM 的吸收光谱曲线。从图中可以看出,吸收光谱曲线出现了明显的周期性的吸收峰。吸收峰的存在表明,在这些对应的输入波长下,光锥输出的光功率明显下降。其原因是当输入光信号传输到光锥耦合区域时,若入射光频率等于微球 WGM 的本征频率,锥形光纤中光信号将几乎最大限度地耦合进入微腔的这个 WGM。此时,光学微腔体处于光学谐振状态,从而光锥输出端光功率强度显著下降,在吸收光谱曲线中就会存在一个吸收峰。由于球形微腔 WGM 的本征波长具有周期性,所以在吸收光谱曲线上就会出现周期性的吸收峰。

为了进一步研究该吸收光谱与球形微腔直径的关系,实验中测量了不同直径的聚苯乙烯微球的吸收光谱。图 5 为所用的直径 192 μm 聚苯乙烯微球的光学显微镜图片,其相应的吸收光谱曲线如图 6 所示。

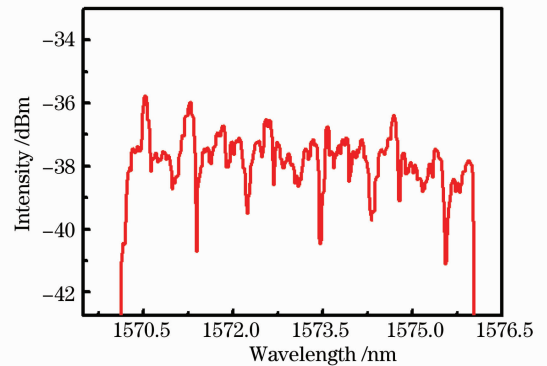


图 4 直径 161 μm 聚苯乙烯微球 WGM 的吸收光谱曲线

Fig. 4 Absorption optical spectra of the whispering gallery mode-based spherical optical microcavity with a diameter of 161 μm

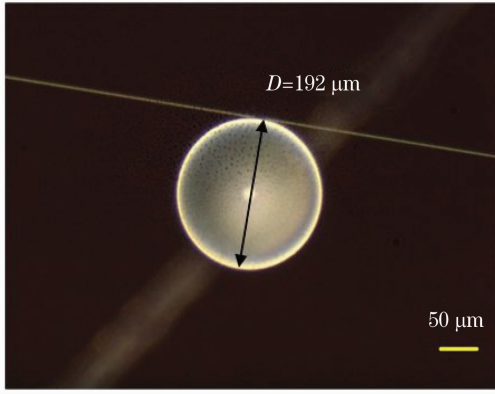


图5 直径 $192\ \mu\text{m}$ 聚苯乙烯微球的光学显微镜图片
Fig. 5 Optical microscope image of polymer sphere with diameter of $192\ \mu\text{m}$

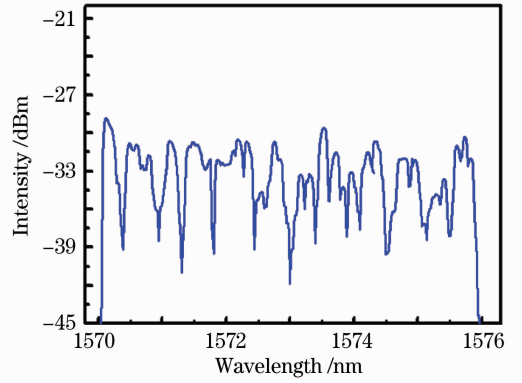


图6 直径 $192\ \mu\text{m}$ 聚苯乙烯微球 WGM 的吸收光谱曲线

Fig. 6 Absorption optical spectra for a $192\ \mu\text{m}$ diameter polymer sphere's WGM

对比图 4 和图 6 可以看出,同样的波长范围($1570\sim 1576\ \text{nm}$),在直径 $192\ \mu\text{m}$ 聚苯乙烯微球的吸收光谱曲线中,吸收峰的数目明显增多,因此其吸收峰的周期间隔比直径 $161\ \mu\text{m}$ 聚苯乙烯微球的要小。这种实验曲线变化规律可以这样解析:根据米氏(Mie)散射理论可以推出在微球的直径比较大、相同偏振模式、相同模式数条件下,模数相邻的两个共振峰之间的间隔与微球的直径成反比^[17]。也就是说,微腔直径越大,对应的共振吸收峰的间隔就越小。所以图 6 中吸收峰的数目明显比图 4 中的要多。

吸收光谱曲线中,每一个吸收峰对应一个特定的波长。在这些特定波长下,输入光信号的大部分能量耦合进聚苯乙烯微球 WGM,所以光锥输出端光功率强度就明显下降。因此,认为这些特定波长所对应的频率,就是微球 WGM 的本征频率。图 4 和图 6 中,不同波长对应的吸收峰,尖锐程度有明显差异。可以引入品质因子 Q 来表征吸收光谱曲线中吸收峰尖锐程度的不同。

为了分析不同本征频率下的品质因子,对直径 $161\ \mu\text{m}$ 聚苯乙烯微球的传输光谱代表性的选择了

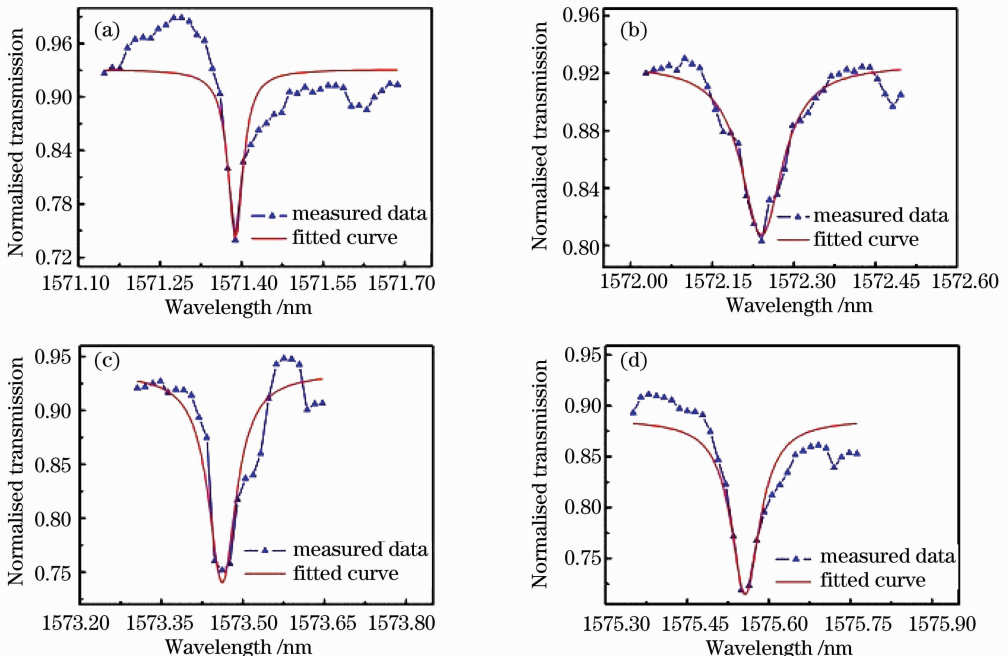


图7 直径为 $161\ \mu\text{m}$ 聚苯乙烯微球在波长为(a) $1571.389\ \text{nm}$, (b) $1572.241\ \text{nm}$, (c) $1573.462\ \text{nm}$ 和 (d) $1575.557\ \text{nm}$ 的归一化传输光谱线

Fig. 7 Normalized optical transmission spectra of $161\ \mu\text{m}$ diameter polymer sphere at wavelengths of (a) $1571.389\ \text{nm}$, (b) $1572.241\ \text{nm}$, (c) $1573.462\ \text{nm}$, and (d) $1575.557\ \text{nm}$

1571.389、1572.241、1573.462、1575.557 nm 四个本征波长进行了研究。图 7 为这四个波长附近的归一化传输光谱曲线。

在图 7 的归一化传输光谱图中,三角形连接线是从光锥的输出端测量得到的光功率数据,并进行了归一化处理。在计算聚苯乙烯微球的品质因子时,为了减小计算值同理论值的误差,采用了这种在处理微腔吸收光谱实验数据方面常用的方法——洛仑兹函数拟合^[18]。图中实线是对实验数据做了洛仑兹函数拟合而得到的拟合曲线。经计算得到,对应 1571.389、1572.241、1573.462、1575.557 nm 这四个本征波长,聚苯乙烯微球的品质因子分别为 47560、17090、25378、25037。其中波长为 1571.389 nm 的光信号对应的品质因子最大,在图 4 的吸收光谱曲线中,这个波长所对应的吸收峰也是最尖锐的;而波长为 1572.241 nm 的光信号对应的品质因子最小,在图 4 的吸收光谱曲线中,这个波长所对应的吸收峰凹陷程度较微弱。

应当指出,由于实验仪器的精度(如激光器输出的光信号波长精度和光谱分析仪光信号采集精度等)有限,在测量吸收光谱的实验过程中,很有可能存在一些吸收效果更为显著的谱线没有被采集到。因此,实验得到的吸收光谱曲线与理论值之间存在一定程度的误差。理论上聚苯乙烯微球的品质因子值会比实验测量值大。

4 结 论

分析了球形光学微腔 WGM 的本征模式,阐述了该模式的传输特性。用锥形光纤的光耦合方法实现了与聚苯乙烯微球的耦合。测量了直径分别为 161 μm 和 192 μm 两个聚苯乙烯球形光学微腔的吸收光谱曲线。通过对吸收光谱曲线的研究分析,发现了明显的 WGM 结构吸收峰。且球形微腔的直径越大,WGM 吸收峰的相邻波长间隔越小。在归一化传输谱下,计算了直径 161 μm 聚苯乙烯微球在四个本征频率下的品质因子,品质因子的数量级均在 10^4 以上。这种 WGM 微腔,表现出在特征频率下对光信号的强烈限制效应,是一种高品质因子的谐振腔。

参 考 文 献

- 1 A. B. Matsko, V. S. Ilchenko. Optical resonators with whispering-gallery modes-part I: basics[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2006, **12**(1): 3~14
- 2 J. C. Knight, G. Cheung, F. Jacques *et al.*. Phase-matched excitation of whispering-gallery-mode resonances by a fiber taper[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(15): 1129~1131
- 3 O. J. F. Martin, C. Girard, A. Dereux. Generalized field propagator for electromagnetic scattering and light confinement [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(4): 526~529
- 4 Wu Jianfeng, Liu Liying, Hou Zhanjia *et al.*. Whispering gallery modes from micro-disks fabricated by sol-gel technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4): 447~451
吴剑峰, 刘丽英, 侯占佳 等. 溶胶-凝胶光学微盘制作及微腔回廊耳语模式研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(4): 447~451
- 5 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
- 6 Jiang Nan, Wang Donglin, Pu Xiaoyun. Whispering-gallery-mode laser of evanescent wave exciting and coupling dye gain in cylindrical microcavity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 920~923
江楠, 王东林, 普小云. 消逝波激励及增益耦合的柱形微腔回音廊膜激光辐射[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 920~923
- 7 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
- 8 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
- 9 C. Liu, T. Kaiser, S. Lange *et al.*. Structural resonances in a dielectric sphere illuminated by an evanescent wave[J]. *Opt. Commun.*, 1995, **117**(5-6): 521~531
- 10 M. Sumetsky. Mode localization and the Q-factor of a cylindrical microresonator [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(14):

2385~2387

- 11 J. Topolancik, F. Vollmer. All-optical switching in the near infrared with bacteriorhodopsin-coated microcavities[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(18): 1841031
- 12 S. Roy, M. Prasad, J. Topolancik *et al.*. All-optical switching with bacteriorhodopsin protein coated microcavities and its application to low power computing circuits[J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, **107**(5): 0531151
- 13 Y. Wu, J. M. Ward, S. Nic Chormaic. Ultralow threshold green lasing and optical bistability in ZBNA (ZrF_4 - BaF_2 - NaF - AlF_3) microspheres[J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, **107**(3): 0331031
- 14 H. C. Ren, F. Vollmer, S. Arnold *et al.*. High-Q microsphere biosensor-analysis for adsorption of rodlike bacteria[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(25): 17410~17423
- 15 F. Vollmer, S. Arnold. Whispering-gallery-mode biosensing: label-free detection down to single molecules[J]. *Nature Meth.*, 2008, **5**(7): 591~596
- 16 Y. Lu, Y. Yin, Z. Y. Li *et al.*. Colloidal crystals made of polystyrene spheroids: fabrication and structural/optical characterization[J]. *Langmuir*, 2002, **18**(20): 7722~7727
- 17 C. C. Lam, P. T. Leung, K. Young. Explicit asymptotic formulas for the positions, widths, and strengths of resonances in Mie scattering[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1992, **9**(9): 1585~1592
- 18 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