

doi: 10.3788/gzxb20144307.0730002

808 nm LD 激发下高折射率差光纤锥-硫卤微球 耦合系统的荧光回廊模

路来伟, 吴越豪, 李超然, 吕社钦, 张培晴, 戴世勋, 许银生, 沈祥

(宁波大学 高等技术研究院 红外材料及器件实验室, 浙江 宁波 315211)

摘 要: 用熔融淬冷法制备了 0.5 wt. % 掺杂 Nd^{3+} :75GeS₂-15Ga₂S₃-0CsI(0.5wt. % Nd-GGSI) 硫卤玻璃。在此基础上以玻璃粉料漂浮熔融法制备出粒径为 50~300 μm 高折射率($n \approx 2.1$)玻璃微球, 并在显微镜下选出表面质量高的硫卤微球用于后续实验。将火焰法拉制出的直径 1~2 μm 间的双锥形石英微纳光纤与硫系微球进行近场耦合。相位匹配条件下测试结果表明光纤锥倏逝场将激发球内径向高阶回音壁模式。实验测量了在 808 nm LD 激光泵浦下直径 110 μm 微球的荧光光谱特性, 结果表明: 掺 Nd^{3+} 硫卤微球在输出端 1 075 nm 波段附近产生了等间距分布的荧光回音壁模式的光学谐振, 共振峰间隔为 1.80 nm。实验结果与微球腔回音壁模式谐振的理论模型有较高的符合度。

关键词: 光学器件; 硫卤玻璃微球; 回音壁模式; Nd^{3+} 掺杂; 锥形光纤

中图分类号: TN214

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)07-0730002-5

Excitation of Fluorescence Whispering Gallery Modes in a Taper-Chalcohalide Microsphere Coupling System with a Large Refractive Index Difference Pumped by an 808 nm Laser Diode

LU Lai-wei, WU Yue-hao, LI Chao-ran, LV She-qin, ZHANG Pei-qing, DAI Shi-xun, XU Yin-sheng, SHEN Xiang

(Laboratory of Infrared Material and Devices, The Advanced Technology Research Institute,
Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 310027, China)

Abstract: Chalcohalide glass based on the composition of Ge-Ga-S-CsI (GGSI) doped with Nd^{3+} (0.5 wt. %) was synthesized with the traditional melt-quenching technique. The synthesized glass material was used to fabricate large refractive index ($n \approx 2.1$) microspheres using an improved flowing powders method. The fabricated spheres have diameters ranging from 50 to 300 μm . Microspheres with good surface quality were selected for the following coupling experiment. Biconical tapered fibers with waist diameters of 1~2 μm were fabricated with a flame-heating process. They were then coupled with the selected GGSI glass microsphere via phase-matched evanescent waves. The phase-matching condition between the sphere and the fiber predicted high order radial modes in microsphere would be excited by the evanescent field of the fiber taper. In experiment, an 808 nm Laser Diode (LD) was used as the excitation source and fluorescence emission spectra of the selected microsphere were measured. Periodically spaced intensity peaks around 1 075 nm, which indicated Whispering Gallery Mode (WGM) optical resonances occurred in the Nd^{3+} doped GGSI glass microsphere, were clearly observed in experimental results. The typical spacing between two resonance peaks is 1.80 nm, which is in good accordance with the theoretical prediction.

Key words: Optical devices; Chalcohalide glass microsphere; WGM mode; Nd^{3+} doped; Tapered fiber

OCIS Codes: 140.3948; 230.4555; 300.6280; 140.3480

基金项目: 973 计划项目子课题(2012CB722703)、国家自然科学基金(61177087)、教育部新世纪优秀人才计划项目(NCET-10-0976)、宁波市新型光电功能材料及器件创新团队(2009B21007)和宁波大学王宽诚幸福基金资助

第一作者: 路来伟(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为硫系玻璃微球激光器。Email: lulaiwei@163.com

导师(通讯作者): 吴越豪(1982-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为微纳光器件。Email: wuyuehao@nbu.edu.cn

收稿日期: 2013-11-12; **录用日期:** 2014-01-08

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

直径几微米到几百微米的低吸收电介质玻璃微球一种天然光学谐振腔,因其具有极高的品质因数 Q (石英基质可达 10^{10}) 和极小的模式体积 V_m 而引起广泛关注. 其具有的优异特性源于在腔内存在回音壁模式 (Whispering Gallery Mode, WGM)——入射光束在腔内发生全内反射,被约束在“赤道”平面附近并沿大圆绕行,当其相位满足一定相位匹配条件时,可以互相叠加而增强^[1-2]. 玻璃微球腔特性不仅优于 Fabry-Perot 腔等传统谐振腔^[3],相比于微环、微柱和微盘等其他结构光学谐振腔,微球腔也具有制备简单,光能量存储时间最长等特性^[4-6]. 基于以上优良特性,玻璃微球在极低阈值激光器、高灵敏度传感器、非线性光学及腔量子电动力学效应等领域应用前景广阔. 目前国内外开展用于微球腔实验的玻璃基质主要有石英玻璃、磷酸盐玻璃、氟化物玻璃、碲酸盐玻璃、硫系玻璃等. 其中硫系玻璃具有极高的线性与非线性折射率 ($n_1 = 2.0 \sim 3.5 \text{ m}^2/\text{W}$, $n_2 = 2 \sim 20 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$),低声子能量 ($200 \text{ cm}^{-1} \sim 350 \text{ cm}^{-1}$),使得掺杂其中的稀土离子具有较低的多声子弛豫概率和较大的受激发射截面,从而使红外波段的辐射跃迁成为可能^[7]. 但硫系玻璃具有强共价键的特点,稀土离子很难进入其紧凑的网络结构,研究表明硫卤玻璃更利于提高稀土离子溶解度和稀土离子吸收跃迁,并具有优良的热稳定性及更低的声子能量^[8-9].

在硫系玻璃微球方面,南安普顿大学 Elliott 等^[9]制备了 Ga-La-S 玻璃微球,测得直径 $100 \mu\text{m}$ 微球 $1.55 \mu\text{m}$ 处的 Q 值为 8×10^4 ,后续实验中用 808 nm 激光泵浦 Nd^{3+} 掺杂 Ga-La-S 玻璃微球获得 1080 nm 激光输出^[10]. 美国康奈尔大学 Broaddus 等人制备了在 1550 nm 处 Q 值为 2×10^6 的 As_2Se_3 玻璃微球^[11]. 南安普顿大学 Wang Pengfei 等在 $110 \mu\text{m}$ 直径聚合物包裹的微球中也实现了高 Q 值模式有效激发^[12]. 国内在硫系微球研究领域还未见报道. 本文在制备 0.5 wt. \% Nd^{3+} 掺杂 $75\text{GeS}_2\text{-}15\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-}10\text{CsI}$ 硫卤玻璃的基础上,采用改进的玻璃粉料漂浮熔融法制备出粒径为 $50 \sim 300 \mu\text{m}$ 玻璃微球,并将之与直径为 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 的双锥形石英光纤进行近场耦合. 测量和讨论了直径为 $110 \mu\text{m}$ 微球在 808 nm 激光二极管 (Laser Diode, LD) 泵浦下的荧光回廊模光谱特性.

1 微球腔与光纤锥耦合理论

根据微球腔与光纤锥耦合理论^[13],其耦合应满足微球与光纤锥倏逝场重叠,要达到最佳耦合效果,需要控制耦合距离 d 和达到模式相位匹配.

锥形光纤与微球耦合效率 η 表示为

$$\eta = 1 - \left| \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} \right|^2 \quad (1)$$

式中 E_{in} 为输入到光纤锥的光功率, E_{out} 为从光纤锥另一侧出射光功率.

根据相关文献,式(1)可进一步表示为^[14]

$$\eta \approx \frac{4\alpha L}{K_0 \exp(-2d\gamma)} \left(1 + \left[\frac{2F}{\pi} \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \right] \left[\exp(-2d\gamma) + \frac{\alpha L}{K_0} \right]^2 \right)^{-2} \quad (2)$$

α 为光在微球腔内绕一周的振幅衰减因子, $L = 2\pi a$, a 为微球腔的半径, d 为微球腔与锥形光纤的距离, K_0 为 $d=0$ 时的耦合系数, γ 为微球腔衰减系数. 通过式(2)可以估算出达到最佳耦合距离时的距离 d .

要使光纤锥中倏逝波光场模式与微球中 WGM 模式达到相位匹配,需要满足传输常量相等. 微球 WGM 模式传输常量 $\beta_s = kl/x_{n,l}$, $k = 2\pi/\lambda$ 为光在自由空间中的传输常量, l 为轨道量子数, $x_{n,l}$ 为微球谐振峰对应尺寸参数,根据 Lam 对一折射率为 N_s 的微球其回音壁模式特征方程近似解, $x_{n,l}$ 满足下列关系^[15]

$$N_s x_{n,l} = \nu + 2^{-1/3} \zeta_n \nu^{2/3} - \frac{P}{(N_s^2 - 1)^{1/2}} + \left(\frac{3}{10} 2^{-2/3} \right) \zeta_n^2 \nu^{-1/3} - \frac{2^{-1/3} P \left(\frac{N_s^2 - 2P^2}{3} \right)}{(N_s^2 - 1)^{3/2}} \zeta_n \nu^{-2/3} + O(\nu^{-1}) \quad (3)$$

式中 $\nu = l + 1/2$, 对于 TE 模, $P = N_s$; 对于 TM 模, $P = 1/N_s$. ζ_n 为 Airy 函数的第 n 个根, $\zeta_1 = 2.338$, $\zeta_5 = 7.944$, $\zeta_{10} = 12.829$, $\zeta_{15} = 16.906$. 据式(3)及 $\beta_s = kl/x_{n,l}$ 可得到微球半径与传播常量对应关系. 对于光纤锥,其基模传播常量为^[13,16]

$$\beta_f^2 = k^2 N_f^2 - 2.405/\rho^2 \quad (4)$$

N_f 为锥形光纤折射率, ρ 为锥形光纤半径,由式(3)及式(4)即可得到微球与光纤锥相位匹配关系. 实验所用硫卤玻璃折射率为 $N_s = 2.1$. 光纤锥使用标准模通信光纤拉制,折射率 $N_f = 1.44$. 微球腔支持 TE 和 TM 模式谐振,图 1(a)、(b)分别为 808 nm 和 1075 nm 波长下微球 TE 模式传输常量匹配图 ($n=1, 5, 10, 15$).

图 1 表明,对于本实验直径 $>50 \mu\text{m}$ 的硫卤微球,其基模 ($n=1$) 及较低阶微球 WGM 模式 ($n=2 \sim 15$), 在 808 nm 和 1075 nm 波长下,与锥形光纤传播常量相差较大,无法达到在其他材质内(如石英、磷酸盐玻璃)出现的基模相位匹配. 这主要是由于硫卤微球与锥形光纤折射率相差较大导致^[13]. 因此,根据传播常量匹配图, 808 nm LD 泵浦激发微球时将会激发球内径向高阶 WGM 模式.

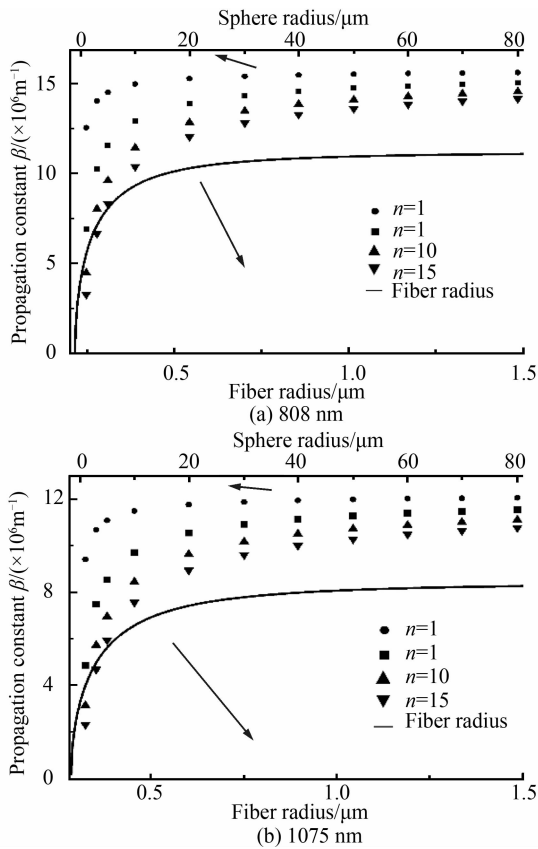


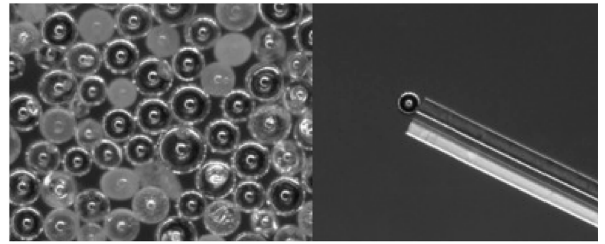
图1 不同尺寸微球与锥光纤传播常量匹配图
Fig.1 Propagation constants of microspheres in different sizes and tapered fibers

2 实验

实验中首先用传统熔融淬冷法制备了 30 g 的 0.5 wt. % Nd^{3+} 掺杂的 $75GeS_2-15Ga_2S_3-10CsI$ 硫卤玻璃. 微球采用玻璃粉末漂浮熔融法制备^[17], 装置主要包括加料系统、熔制系统、收集系统^[17,18], 因硫系玻璃在高温下易与空气中氧、水蒸气等发生反应导致微球质量变差, 故整个制备过程在 Ar 气体氛围中进行. 玻璃块体敲碎后用玛瑙研钵磨成粉末, 并将粉末通过一定目数网筛进行筛选用于制备微球. 在加热到 1 000 °C 的管式炉上端引入筛选好的粉末, 高温熔融状态下粉末受表面张力作用形成球体. 图 3 为采用马尔文 MS2000 激光粒度仪测得的制备前粉末和制备后所得微球尺寸分布^[19], 筛选出硫系微球粒径分布为 50 ~ 300 μm . 图 2(a) 所示为利用自行制作的石英槽重复倾斜挑选后的微球显微图. 挑好的微球用紫外固化胶粘附在一光纤柄上以便进行耦合实验(图 2(b)).

光纤锥采用火焰法拉制, 拉制过程中, 康宁 SMF-28e 单模光纤通过光纤夹具固定于两电控平移台上, 光纤两端用光纤熔接机分别与单模跳线熔接, 激光从一侧跳线输入, 从另一侧跳线输出并接入光谱分析仪 (Optical Spectrum Analyzer, OSA), 监测拉制过程功率变化. 将光纤待加热部分 (1 ~ 2 cm) 去除涂覆层, 擦拭干

净. 图 4 为拉制过程中功率变化监测图. 拉制结束后功率损耗在 1 dB 以内, 实现了较低损耗光纤锥的拉制^[20].



(a) Under an optical microscope (b) Attached to a silica fiber stem (diameter=10 μm)

图2 微球显微图

Fig.2 Microscopic image of fabricated microspheres

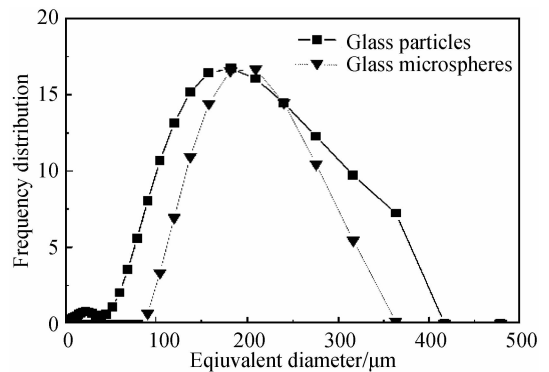


图3 制备前粉末和制备后所得微球尺寸分布

Fig.3 Diameter distribution of glass powder particles and resulted microspheres

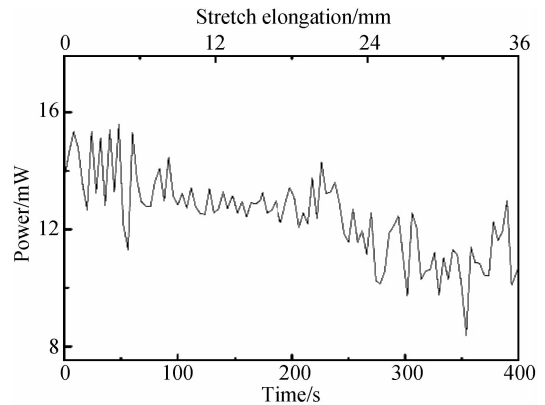


图4 拉制过程功率监测图

Fig.4 Variation of optical power during the fabrication process of fiber taper

耦合系统实验装置原理如图 5, 用工作波长 808 nm 单模 LD 激光器作为微球腔的泵浦源. 实验采用的微球直径为 110 μm , 拉制的光纤锥最细处直径在 1 ~ 2 μm 内. 实验中, 光纤锥固定在凹槽型铝板上, 粘附有微球的光纤柄固定在 Thorlabs 高精度压电平移台上 (Thorlabs NanoMax 312D/M), 通过精细调节 XYZ 三个维度来实现微球腔与锥形光纤的最佳耦合, 泵浦激发微球腔内 Nd^{3+} 发光. 借助 Keyence VHX-1000E 超景深光学显微镜进行耦合调节. 实验过程中

发现因光纤锥直径很小,微球靠近光纤锥到一定距离时,光纤锥会与微球在范德华力作用下相互吸引到一起^[21],达到相对稳定的状态.其中,插图微球与光纤锥耦合过程光学显微镜图($\times 500$).

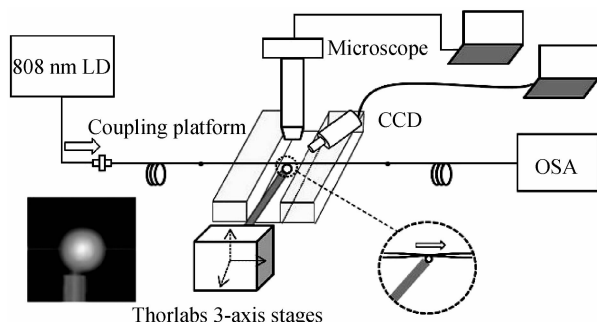


图5 耦合实验装置

Fig. 5 Schematic of the coupling experimental setup

3 实验结果与讨论

图6为微球 Nd^{3+} 离子 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ 辐射跃迁 1075 nm 波段荧光随激光泵浦功率变化光谱图(内嵌图为块状玻璃的 1075 nm 波段荧光光谱),与块状玻璃荧光光谱相比,明显可见微球荧光光谱包含一系列相同间隔的周期性尖峰,间距均在 1.8 nm 左右见图7. 这说

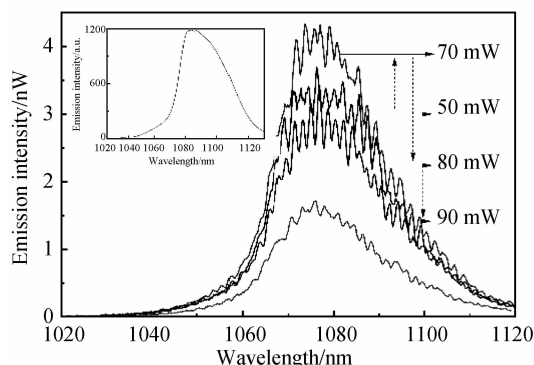


图6 不同泵浦功率下 1075 nm 附近掺 Nd^{3+} 玻璃微球荧光光谱

Fig. 6 Fluorescence emission spectra of the Nd^{3+} -doped microsphere observed around 1075 nm at various pumping powers

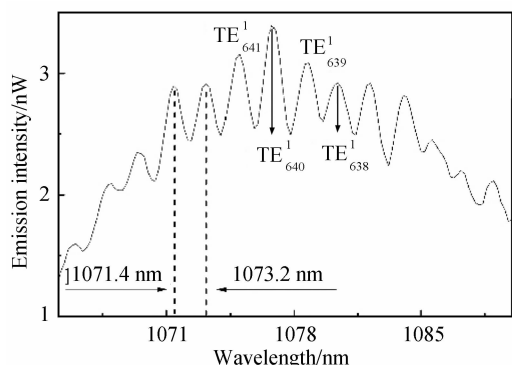


图7 共振峰间隔

Fig. 7 Spacing between resonance peaks

明稀土掺杂硫卤玻璃的荧光受到了微球谐振腔的调制作用,某些特定波长的荧光得到加强,亦即在微球中形成了 WGM 谐振.根据耦合理论,此时实现了高折射率差光纤锥-硫系微球的相位匹配,激发了高阶 WGM 模式.根据 Mie 散射理论,当微球尺寸参数 $x=2\pi a/\lambda$ 大于 50 时,相同偏振模式、相同级数 l 下、模数相邻的两个共振峰之间的间隔大约为^[22,23]

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2 \arctan \left[\left(\frac{n_1}{n_2} \right) - 1 \right]^{1/2}}{\pi d n_2 \left[\left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 - 1 \right]^{1/2}} \quad (5)$$

式中 λ 为荧光发射波长, d 为玻璃微球的直径, n_1 和 n_2 分别为微球材料折射率和微球周围介质(本文为空气)折射率.微球 WGM 谐振波长取决于其尺寸和折射率.利用式(5)计算得 $\Delta\lambda=1.93$ nm,与图7观察到的光谱谐振峰平均间隔 1.80 nm 基本相符.为进一步表征谐振腔质量,表1展示了由式(3)所得部分 TE 模式位置.对比结果显示谐振峰波长理论值与实验值基本相符,差值最大仅为 0.0194%.

表1 谐振峰理论值与实验值对比

Table 1 Comparison between theoretical and experiment value of the resonance peaks

Mode	Wavelength λ/nm		Difference
	theoretical value	experiment value	
TE_{641}^1	1 075.19	1 075.00	0.017 7%
TE_{640}^1	1 076.84	1 076.82	0.001 9%
TE_{639}^1	1 078.50	1 078.70	0.018 5%
TE_{638}^1	1 080.17	1 080.38	0.019 4%

同时在图6观察到微球荧光强度随激光泵浦功率提高先增强后减弱,在观察中发现控制的光纤锥出现了细小裂纹,可推测除振动及外界实验环境外^[24],裂纹是导致激光损耗增加的主要因素.实际上将光纤锥与微球分离后,通过的光功率相比之前大幅减小.光谱图各谐振峰图样在各功率处基本保持稳定,同一谐振峰位置向长波方向有所偏移,在较高泵浦功率下热效应是导致光谱“红移”的主要原因.微球吸收泵浦光后因受热引起直径和折射率发生变化,进而导致腔模向长波方向移动^[25],这一特性有应用于温度传感领域的潜力.

4 结论

用改进粉末漂浮熔融法制备了直径为 50~300 μm 的 0.5 wt. % Nd^{3+} :Ge-Ga-S-CsI 高折射率硫卤玻璃微球,将选出的直径 100 μm 微球与腰锥直径 1~2 μm 的光纤锥近场耦合.808 nm 单模 LD 激光泵浦下,激发了微球 Nd^{3+} 在 1075 nm 波长附近的荧光光谱,光纤锥与高折射率微球实现相位匹配,成功激发出高阶 WGM 共振模,并测得其共振峰间距为 1.80 nm,

与理论计算数值相符.同时根据荧光随泵浦功率变化,微球的荧光输出特性受光纤锥拉制质量影响较大,实验结果为下一步低阈值硫系玻璃微球激光器的研究提供了有力条件.

参考文献

- [1] HUANG Rao, LIU Zhi-jing, WANG Ke-yi, *et al.* Recent research development of microsphere laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(8):957-961.
黄尧,刘之景,王克逸,等.微球激光的最新研究进展[J].强激光与粒子束,2004, **16**(8):957-961.
- [2] MATSKO A B, ILCHENKO V S. Optical resonators with whispering-gallery modes-part I: basics[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, **12**(1):3-14.
- [3] VAHALA K J. Optical microcavities[J]. *Nature*, 2003, **424**(740):839-846.
- [4] SPILLANE S M, KIPPENBERG T J, VAHALA K. J. Ultralow-threshold Raman laser using a spherical dielectric microcavity[J]. *Nature*, 2002, **415**(36):621-623.
- [5] RIGHINI G. C, DUMEIGE Y, FÉRON P. *et al.* Whispering gallery mode microresonators: fundamentals and applications [J]. *Rivista del Nuovo Cimento*, 2011, **34**(925):435-488.
- [6] JAIN R K, HOSSEIN-ZADEH M. Microresonator-based mid-IR devices[J]. *Optical Components and Materials X*, 2013, **8621**(981):86210R.
- [7] LI Zhong-xiu, XU Tie-feng, SHEN Xiang, *et al.* Near and mid infrared emission properties of Dy³⁺-Doped Ge-Ga-Se-KBr chalcogenide glasses[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **28**(2):147-153.
张鹏君,戴世勋,彭波,等. Dy³⁺ 掺杂 Ge-Ga-Se-KBr 硫卤玻璃近红外及中红外发光特性研究[J]. 中国激光, 2010, **28**(2):147-153.
- [8] ZAKERY A, ELLIOTT S R Optical properties and applications of chalcogenide glasses: a review [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2003, **330**(972):1-12.
- [9] ELLIOTT G R, HEWAK D W, Murugan G S, *et al.* Chalcogenide glass microspheres; their production, characterization and potential [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(629):17542-17553.
- [10] ELLIOTT G R, MURUGAN G S, WILKINSON J S, *et al.* Chalcogenide glass microsphere laser [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(642):26720-26727.
- [11] BROADDUS D H, FOSTER M A, AGHA I H, *et al.* Silicon-waveguide-coupled high-Q chalcogenide microspheres [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(646):5998-6003.
- [12] WANG P, DING M, LEE T, *et al.* Packaged chalcogenide microsphere resonator with high Q-factor [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(978):131110-131115.
- [13] KNIGHT J C, CHEUNG G, JACQUES F, *et al.* Phase-matched excitation of whispering-gallery-mode resonances by a fiber taper[J]. *Optics Letters*, 1997, **22**(15):1129-1131.
- [14] WANG Li, YAN Ying-zhan, ZHANG Yu-guang, *et al.* Effect of vibration noise on the high-Q optical microcavity coupling system and its suppression methods[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, **32**(9):950-955.
王丽,严英占,张宇光,等.振动噪声对高Q光学微腔耦合系统的影响及抑制方法[J].发光学报,2011, **32**(9):950-955.
- [15] GUO Chang-lei, HUANG Yu, ZHANG Pei-jin, *et al.* Study of laser emission from Er³⁺-doped silica microsphere pumped by 976 nm light[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(3):0302004.
郭长磊,黄玉,张培进,等.976nm光抽运掺Er³⁺二氧化硅微球产生激光的研究[J].中国激光,2013, **40**(3):0302004.
- [16] LAM C C, LEUNG P T, YOUNG K. Explicit asymptotic formulas for the positions, widths, and strengths of resonances in Mie scattering[J]. *Journal Optical Society of America B*, 1992, **9**(907):1585-1592.
- [17] LV Hao, LIU Ai-mei, WU Yun, *et al.* Fabrication of phosphate glass microspheres[J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(5):712-714.
吕昊,刘爱梅,吴芸,等.磷酸盐玻璃微球的制备[J].光学技术,2009, **35**(5):712-714.
- [18] WARD J M, WU Y, KHALFI K, *et al.* Short vertical tube furnace for the fabrication of doped glass microsphere lasers [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, **81**(52):073106.
- [19] MARTINELLI J R, SENE F F, KAMIKAWACHI C N, *et al.* Synthesis and characterization of glass-ceramic microspheres for thermotherapy[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2010, **356**(50):2683-2688.
- [20] YAN Ying-zhan, Ji Zhe, Wang Bao-hua, *et al.* Evanescent wave excitation of microsphere high-Q model using tapered fiber[J]. *Chinese Journal of 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.
- [21] JIN Hu, LU Yun, BAI Xiao-song, *et al.* Experimental study of whispering gallery mode-based spherical optical microcavity [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(6):062301.
金虎,陆云,白晓淞,等.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.
- [22] BARBER P W, CHANG R K. Optical effects associated with small particles[M]. Singapore: World Scientific, 1988.
- [23] MIURA K, TANAKA K, HIRAO K. CW laser oscillation on both the ⁴F_{3/2} - ⁴I_{11/2} and ⁴F_{3/2} - ⁴I_{13/2} transitions of Nd³⁺ ions using a fluoride glass microsphere[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1997, **213** - **214**(17):276-280.
- [24] ZHANG Yu-Guang, LI Peng, WANG Li, *et al.* Effect of the Environment on Microsphere Q-factor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(5):803-806.
张宇光,李鹏,王丽,等.外界环境对微球腔品质因数的影响[J].光子学报,2011, **40**(5):803-806.
- [25] LU Bao-Long, WANG Yu-Zhu, LI Yong-Qing. Observation of Mode Shift of Nd-Glass Microspherical Cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(4):442-444.
吕宝龙,王育竹,黎永青.钕玻璃微球腔模式移动的观察[J].光学学报,1994, **14**(4):442-444.