

# 用于光学微腔的玻璃微球研究进展

戴世勋<sup>1</sup> 路来伟<sup>1</sup> 陶光明<sup>2</sup> 许银生<sup>1</sup> 尹冬梅<sup>1</sup> 牛雪珂<sup>1</sup> 张巍<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 宁波大学信息科学与工程学院红外材料及器件实验室, 浙江 宁波 315211)

<sup>2</sup> 美国中佛罗里达大学光学中心, 佛罗里达 奥兰多 32816

**摘要** 玻璃微球谐振腔具有极高的品质因数和极小的模式体积, 近年来它在低阈值微球激光器、微放大器、非线性光学、腔量子电动力学效应以及高灵敏度传感器等领域引起广泛的关注。回顾了玻璃微球的研究历程, 从玻璃微球制备方法、微球激光输出、耦合方式和传感器应用方面概括了玻璃微球的研究现状, 对其发展前景进行了展望。

**关键词** 激光器; 光学微腔; 玻璃微球; 微球激光

**中图分类号** O482.31; O431 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.080001

## Research Progress of Glass Microspheres for Optical Microcavity

Dai Shixun<sup>1</sup> Lu Laiwei<sup>1</sup> Tao Guangming<sup>2</sup> Xu Yinsheng<sup>1</sup>

Yin Dongmei<sup>1</sup> Niu Xueke<sup>1</sup> Zhang Wei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratory of Infrared Materials and Devices, College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

<sup>2</sup> Center for Research and Education in Optics and Lasers (CREOL), University of Central Florida, Orlando, Florida 32816, USA

**Abstract** Glass microsphere resonators have ultrahigh quality factor and small mode volume. These characteristics make them have a subject of enormous interest in areas as diverse as low-threshold microsphere lasers, microamplifiers, nonlinear optics, cavity quantum electrodynamics and high sensitive sensor. The research of glass microspheres is reviewed in terms of the preparation method, laser output, coupling method and sensor application. Their development prospects are also discussed.

**Key words** lasers; optical microcavity; glass microsphere; microsphere laser

**OCIS codes** 140.4780; 140.3410

## 1 引言

光学微腔是指尺寸在光波长量级的激光谐振腔。在微球腔理论方面, 早在 20 世纪初, Mie 等<sup>[1]</sup>建立了平面电磁波被均匀散射的基本理论, 即 Mie 散射理论, 并推导出了微球的散射系数、吸收系数和消光系数的表达式。1946 年 Purcell<sup>[2]</sup>研究发现光学微腔内共振时真空场模式密度的增加将使得腔内原子的自发辐射几率远超过自由空间的值。1983 年 Goy 等<sup>[3]</sup>推导出微球腔内场模式密度增强的幅度值的表达式为  $\eta \approx 3DQ\lambda^3 / (4\pi^2 V_m)$ , 其中  $D$  为腔模简并度,  $Q$  为腔模的品质因数,  $V_m$  为模体积。

光学微腔的实验研究是随着微球腔相关理论和各种微球制备工艺的并进发展而逐步开展起来的。虽然 1939 年 Richtmyer 已在球形物体中观测到高品质腔因数模式, 但由于当时缺乏相应优良的介电材料以及实用有效的耦合方式, 导致微球谐振腔研究处于停滞状态<sup>[4]</sup>。直到 1961 年美国贝尔电话实验室的 Garrett 等<sup>[5]</sup>首次证明微球形谐振腔可以用作激光谐振腔, 并在液氢温度下于直径 1~2  $\mu\text{m}$  的  $\text{Sm}^{3+}:\text{CaF}_2$  晶体微球

**收稿日期**: 2012-02-28; **收到修改稿日期**: 2012-03-28; **网络出版日期**: 2012-05-21

**基金项目**: 国家自然科学基金(61177087)、教育部新世纪优秀人才计划(NCET-10-0976)、浙江省杰出青年基金(R1101263)、宁波市新型光电功能材料及器件创新团队基金(2009B21007)、宁波市自然科学基金(2011A610189)和宁波大学王宽诚幸福基金资助课题。

**作者简介**: 戴世勋(1974—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光功能玻璃及器件等方面的研究。E-mail: daishixun@nbu.edu.cn

中观察到了脉冲激光产生和微球回音壁模式(WGM)荧光发射振荡现象。1980年 Benner 等<sup>[6]</sup>报道了含荧光物质微球荧光的结构共振现象。此后,各种基质材料(有机溶液、晶体、玻璃等)的光学微腔被相继报道。

直径从几微米到几百微米不等的光学玻璃微球本身就可构成一种天然的光学微腔,高介电常数的玻璃微球中存在回音壁模式的光子共振方式,因此,玻璃微球腔具有极高的腔品质因数  $Q$ (理论上可达  $10^{10}$ )和极小的模体积  $V_m$ ,近年来它在低阈值微球激光器、非线性光学、腔量子电动力学效应及量子光学等研究领域引起了广泛的关注<sup>[7~9]</sup>。本文首先回顾了玻璃微球的研究历程,然后从玻璃微球制备方法、微球激光输出、耦合方式、传感应用方面概括了玻璃微球的研究现状,最后对其发展前景进行了展望。

## 2 玻璃微球研究历程

众所周知,光学玻璃种类繁多,如按玻璃体系划分主要有石英玻璃、硅酸盐玻璃、磷酸盐玻璃、硼酸盐玻璃、碲酸盐玻璃、氟化物玻璃和硫系玻璃(包括硫基、硒基、碲基三大系统)等。不同玻璃体系的玻璃性能(如透射范围、折射率、膨胀系数、机械强度和化学稳定性等)差异很大。

用于光学微球腔的玻璃微球研究始于1989年,Branginsky 等<sup>[10]</sup>首次使用  $\text{CO}_2$  激光热熔石英光纤微球,通过棱镜近场耦合,在微球内直接激发出 WGM 模式。稀土掺杂的玻璃微球在上世纪末研究者开始涉及,1994年吕宝龙等<sup>[11,12]</sup>研究了直径为  $120\ \mu\text{m}$  的掺钕玻璃微球的腔量子电动力学效应。1997年 Miura 等<sup>[13]</sup>报道了  $2\ \mu\text{m}$  直径的  $\text{Nd}^{3+}$  掺杂氟化物玻璃微球在  $800\ \text{nm}$  激光抽运下  $1051\ \text{nm}$  和  $1335\ \text{nm}$  激光输出,随后稀土离子掺杂玻璃微球激光输出逐步成为研究热点。玻璃材料基质也开始多样化,包括碲酸盐玻璃微球<sup>[14,15]</sup>、氟化物玻璃<sup>[16,17]</sup>、磷酸盐玻璃微球<sup>[8,9]</sup>和硫系玻璃微球<sup>[18,19]</sup>等。2000年美国加州理工学院的 Cai 等<sup>[9]</sup>报道了  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺磷酸盐玻璃微球的锥形光纤耦合微球激光器,在  $980\ \text{nm}$  抽运光激励下获得了  $1550\ \text{nm}$  激光,抽运阈值为  $60\ \mu\text{W}$ ,激光输出功率为  $3\ \mu\text{W}$ ;2002年日本 Sasagawa 等<sup>[14]</sup>报道了  $\text{Nd}^{3+}$  掺杂的碲酸盐玻璃微球中  $1.06\ \mu\text{m}$  激光输出;2010年英国南安普顿大学的 Elliott 等<sup>[18]</sup>用  $808\ \text{nm}$  激光抽运  $\text{Nd}^{3+}$  掺杂 Ga-La-S 玻璃微球获得了  $1080\ \text{nm}$  激光输出。在无源玻璃微球方面,石英玻璃微球拉曼激光器也相继被报道<sup>[20,21]</sup>。近10年来研究者对玻璃微球的制备工艺<sup>[7,22]</sup>、微球腔激光输出<sup>[14,15]</sup>和耦合<sup>[9]</sup>以及微球传感器<sup>[23,24]</sup>等领域也进行了广泛深入的研究。

## 3 微球腔特点及特征参数

### 3.1 微球腔特点

微球腔的优异特性来源于其独特的回音壁光场模式<sup>[25]</sup>:耦合进入微球内的光波在微球腔内表面不断发生全反射,被约束在赤道平面附近并沿大圆绕行。绕行的光波满足一定相位匹配条件时,可以相互叠加增强。而在球外的光场为近场,即局限于球表面附近的倏逝波。它是一种非传播波,光场的振幅在矢径方向呈指数下降,因此从球内透出到球外的平均能流为零,WGM 模式光被约束在很小的体积内很长时间而几乎没有任何损失,能量能够长时间地被束缚在很小的微球体积内,这就使回音壁模式下的微球具有极高的品质因数和极小的模式体积。

微球腔 WGM 模式可用  $n, m, l$  三个变量表示,分别代表径向模数、角向模数以及方位角模数。在微球腔所有的模式中,基模( $m=1, n=1$ )是最重要的模式。此模式下,耦合进入到微球腔内的光能量被局限在与耦合锥形光纤相切的一个大圆内,实现了 WGM 下最高光子简并度,因此该模式可获得最低的模式体积,从而获得较高的能量密度。

### 3.2 微球腔品质因数

微球腔的品质因数定义为  $Q \approx \lambda/\Delta\lambda$ ,其中  $\lambda$  为谐振波长, $\Delta\lambda$  为发光谱谐振峰半峰全宽(FWHM)。  $Q$  主要由以下因素决定<sup>[4]</sup>:

$$Q^{-1} = Q_{\text{mat}}^{-1} + Q_{\text{surf}}^{-1} + Q_{\text{curv}}^{-1} + Q_{\text{coup}}^{-1}, \quad (1)$$

式中  $Q_{\text{mat}}^{-1}$  为材料吸收导致的损失; $Q_{\text{surf}}^{-1}$  为表面散射损失,包括由介质的不均匀性和污物引起的损失以及微球表面附近空气中的水汽导致的损失,可基于瑞利散射的模型估算; $Q_{\text{curv}}^{-1}$  为由微球表面曲率导致的本征辐射

损失,也称为 WGM 损失; $Q_{\text{coup}}^{-1}$  为谐振腔与耦合器件间的连接损失。

微球腔中本征辐射损失随微球直径上升而指数下降,当  $D/\lambda \geq 15$  时( $D$  为微球直径, $\lambda$  为激光波长), $Q_{\text{curv}} > 10^{11}$ , $Q$  主要由散射损失和材料吸收损失决定。而对于小尺寸微球( $D/\lambda \leq 10$ ), $Q$  主要由本征辐射损失决定<sup>[4]</sup>。

### 3.3 微球腔模式体积

微球腔模式体积  $V_m$  定义为<sup>[25]</sup>

$$V_m = \frac{\int 1/2\epsilon(r)E^2(r)d(r)}{[1/2\epsilon(r)E^2(r)]_{\text{max}}}, \quad (2)$$

即玻璃微球腔中的光场总能量等于腔中能量密度的最大值与此时能量分布所占有的空间体积的乘积。微腔中存在着径向多阶回音壁模式,其中一阶模式有最高品质因数和最小的模式体积。由于微腔本身体积很小,在回音壁基模(一阶)下,微腔中光波能量在径向和极角方向都有极大值。能量集中在赤道面上紧贴球面的大圆环这一狭小区域<sup>[25]</sup>。

## 4 玻璃微球制备方法

用于光学微腔的玻璃微球的制备方法主要有玻璃粉料漂浮高温熔融法<sup>[7,17,26,27]</sup>和  $\text{CO}_2$  激光加热光纤芯熔化法<sup>[28,29]</sup>两种。

玻璃粉料漂浮高温熔融法制备工艺流程(图 1)<sup>[27]</sup>如下:首先将制备好的特定组分的玻璃研磨成玻璃粉末,并过一定尺寸孔径筛(视制备微球尺寸而定),将玻璃粉末从熔炉或者火焰上部的加料系统中经充分雾化后引入炉体,实验温度根据所制备材料而定。为了使玻璃粉在炉内能充分熔化,一般通过增加炉膛加热区长度来延长粉末在炉内停留的时间,同时利用熔体的表面张力使其成为玻璃微球。一般需要控制加料风压和收集微球系统的负压,调整炉内压力,使粉料在炉内停留时间适当延长,让粉料充分熔化,保证形成微球的圆度。玻璃粉料漂浮高温熔融法优点在于可以一次性批量制备尺寸在一定数值区间分布的玻璃微球,极大地提高了制备效率。Ward 等<sup>[7]</sup>改进设计了一种短加热区(仅 133 mm)竖直管式炉装置(图 2),用玻璃粉料漂浮高温熔融法制备  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺磷酸盐玻璃微球,装置底部用旋转的培养皿用于收集制备的玻璃微球。玻璃微末从进料口进入后,用注射器将其吹入加热炉内,同时在整个加热过程中,氩气被缓慢吹入炉内以抑制烟囱效应,阻止热气流将微球从炉口吹出。利用该装置可成功地一次性批量制备直径为  $10 \sim 400 \mu\text{m}$  不等的磷酸盐玻璃微球,并在 978 nm 激光抽运下获得了高腔品质因数( $Q > 10^5$ )WGM 模式。

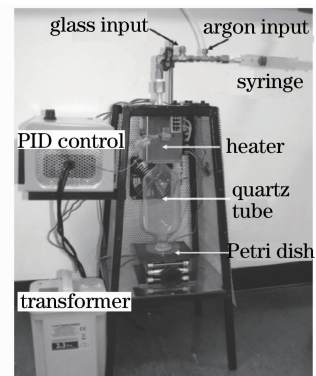
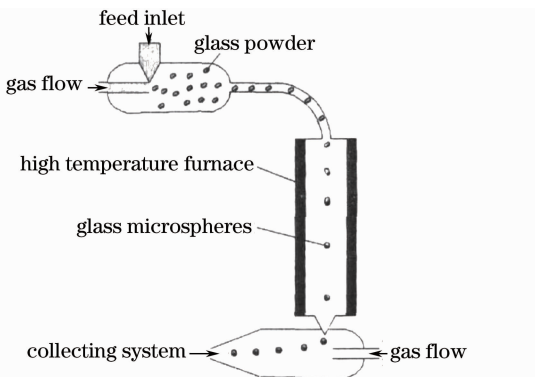


图 1 玻璃粉料漂浮高温熔融法制备微球工艺图

Fig. 1 Scheme of preparing glass powders floating under high temperature

图 2 竖直短管式加热炉装置图

Fig. 2 Setup of short vertical tube furnace

$\text{CO}_2$  激光加热纤芯熔化法主要用于高熔点的石英玻璃基质微球的制备,其主要流程(图 3)<sup>[30]</sup>如下:将光纤的包层去除后,用  $\text{CO}_2$  激光会聚产生的高温将光纤芯一端局部熔融,在液态表面张力作用下形成较标准的球形,冷却后便是一个带光纤柄的微球。虽然已不再是完整的球形,但对于能量集中于赤道部分的基本 WGM 模式影响很小,而且由于有光纤柄,使得对微球的操纵方便很多。 $\text{CO}_2$  激光加热纤芯熔化法制备玻璃

微球时往往需要 CCD 监视熔化成球过程。这种方法的缺点是一次只能制作一个玻璃微球,而且微球尺寸受光纤尺寸限制。

除以上两种主要制备方法外,近年来还出现了一些新的玻璃微球制备方法,如强磁场蒸发冷凝法<sup>[31]</sup>、脉冲激光加工法<sup>[32]</sup>、玻璃液旋转法<sup>[33]</sup>、模压法<sup>[22]</sup>和伽马射线辐照法<sup>[34]</sup>等。

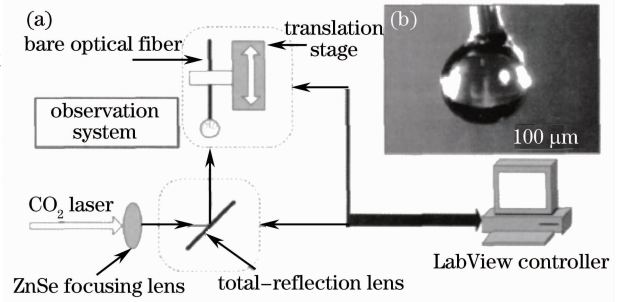


图 3 (a) CO<sub>2</sub> 激光制备微球装置;(b) 制备的微球实例

Fig. 3 (a) Scheme of microsphere fabrication by using CO<sub>2</sub> laser; (b) a sample of prepared glass microsphere

## 5 研究热点

### 5.1 玻璃微球激光输出

玻璃微球作为一种微球谐振腔具有极高的腔品质因数和极小的模式体积,可实现极低阈值激光输出。自 1997 年日本 Miura 等<sup>[13]</sup>首次在 Nd<sup>3+</sup> 掺杂氟化物玻璃微球获得激光输出后,国外许多著名研究机构(如美国亚利桑那大学光学中心、英国南安普顿大学光电子中心、美国加州理工学院和美国斯坦福大学等)和国内科研单位(中国科学院上海光学精密机械研究所、北方交通大学、南开大学、中国科学院理化技术研究所和中北大学等)纷纷开展了玻璃微球激光器的研究。近年来玻璃微球激光器的研究发展迅速,各种不同尺寸和耦合方式的低阈值玻璃微球激光器也相继问世。

表 1 总结了已报道的稀土掺杂有源玻璃微球激光输出结果。从中可以看出,玻璃微球直径一般为几十到一百微米,玻璃微球激光器普遍具有极低的抽运阈值功率,一般都在毫瓦甚至微瓦量级。例如:Er<sup>3+</sup> 掺杂 ZBLAN 玻璃微球中获得的上转换激光输出,其阈值仅为 20 μW,低于任何掺 Er<sup>3+</sup> 固体激光器阈值 99% 以上<sup>[16]</sup>。

表 1 有报道的稀土离子掺杂玻璃微球激光输出

Table 1 Laser output from reported rare earth ions doped glass microspheres

Rare earth ions	Output laser wavelength /μm	Diameter /μm	Glass system	Pump wavelength /nm	Threshold	Coupling method	Year
Nd <sup>3+</sup>	1.051/1.334	140	Fluoride glass	800	3 mW/ 60 mW	Microscope objective coupling	1997 <sup>[13]</sup>
	1.05	112	ZBLAN glass	808	100 μW	Prism Coupling	1998 <sup>[17]</sup>
	1.06	140	Tellurite glass	800	81 mW	Microscope objective coupling	2002 <sup>[14]</sup>
	1075	100	Ga-La-S glass	808	82 mW	Microscope objective coupling	2010 <sup>[18]</sup>
	1.06	55	Borosilicate glass	801	16 mW	End-fire coupling	2011 <sup>[35]</sup>
Er <sup>3+</sup>	0.540	120	ZBLAN glass	801	20 μW	Microscope objective coupling	1999 <sup>[16]</sup>
	1.604	34	Tellurite glass	975	2 mW	Fiber taper	2003 <sup>[33]</sup>
	1.535	115	Phosphate glass	980	<18 mW	Fiber taper coupling	2009 <sup>[8]</sup>
Er <sup>3+</sup> /Yb <sup>3+</sup>	1.535	57	Phosphate glass	980	60 μW	Fiber taper coupling	2000 <sup>[9]</sup>
	1.535	43	Phosphate glass	980	<1 mW	Fiber taper coupling	2009 <sup>[8]</sup>
Tm <sup>3+</sup>	0.480/0.800	65	ZBLAN glass	1064	20 mW/ 5 mW	Microscope objective coupling	1999 <sup>[36]</sup>
	1.47/1.9	104	Tellurite glass	800	4.6 mW/ 4.8 mW	Fiber taper coupling	2004 <sup>[15]</sup>

而目前玻璃微球激光器输出激光功率一般为几纳瓦到几十微瓦之间,量子效率一般小于1%。Cai等<sup>[37]</sup>在 $\text{Er}^{3+}$ - $\text{Yb}^{3+}$ 共掺的磷酸盐玻璃微球中获得了112  $\mu\text{W}$ 单模1550 nm的激光输出,量子效率为2.6%,这是迄今为止稀土掺杂玻璃微球中获得的最大的输出功率。由于稀土离子在不同玻璃基质中配位场强不同,因此其荧光及激光参数(荧光峰位置、荧光寿命、量子效率及激光峰的有效线宽等)也不同。磷酸盐玻璃对稀土离子溶解度最高,而碲酸盐玻璃和氟化物玻璃的声子能量较低(分别约为700  $\text{cm}^{-1}$ 和400  $\text{cm}^{-1}$ ),稀土离子掺杂其中可以获得多种波长的跃迁。硫系玻璃具有最低的声子能量和最高的折射率以及优良的中远红外透射特性。近年来研究者们热衷于工作在特殊波段的稀土掺杂玻璃微球激光器研究,如S波段的掺 $\text{Tm}^{3+}$ 碲酸盐玻璃微球<sup>[15]</sup>、L波段的掺 $\text{Er}^{3+}$ 碲酸盐玻璃微球<sup>[33]</sup>、2.0  $\mu\text{m}$ 波段的掺 $\text{Tm}^{3+}$ 碲酸盐<sup>[38]</sup>和石英玻璃<sup>[39]</sup>微球等。此外,稀土掺杂的低声子能量玻璃(如碲酸盐玻璃、氟化物玻璃和硫系玻璃)微球中可实现上转换激光输出,这主要是由于较低的声子能量可降低无辐射弛豫发生几率,提高稀土离子中间亚稳态能级的荧光寿命,从而可有效地提高上转换发光效率。例如:掺 $\text{Er}^{3+}$ 和掺 $\text{Tm}^{3+}$ 的ZBLAN玻璃微球中已实现了540 nm<sup>[16]</sup>、480 nm和800 nm<sup>[36]</sup>的上转换激光输出。

温度对微球激光输出特性也有较大影响。Peng等<sup>[40]</sup>研究了掺 $\text{Er}^{3+}$ 碲酸盐玻璃微球激光输出与温度的变化规律,当工作温度从35  $^{\circ}\text{C}$ 增加到75  $^{\circ}\text{C}$ 时,激光抽运阈值明显增加,且激光中心波长从1606.4 nm红移到1607.6 nm。

在无源玻璃微球激光器方面,2002年Spillane等<sup>[20]</sup>报道用2 mW的1550 nm波长激光抽运直径40  $\mu\text{m}$ 的石英玻璃微球,获得了1670 nm波长的单纵模拉曼微球激光输出结果,如图4所示,微量子效率高达36%,抽运阈值仅为86  $\mu\text{W}$ ,是先前已报道的直径为30  $\mu\text{m}$ 的 $\text{CS}_2$ 液滴微球拉曼微球激光器阈值的1/1000。2003年Min等<sup>[21]</sup>报道了直径50  $\mu\text{m}$ 的石英微球五级联拉曼激光器。

## 5.2 微球腔耦合

抽运激光与玻璃微球之间的耦合效率将直接影响输出激光功率大小。虽然微球腔处于WGM模式下具有很高的腔品质因数,但模式所对应的球外光场分布却是一条逝波,而不像法布里-珀罗(F-P)谐振器那样对应为传播波。因此,当用平面波直接照射微球时,由于很大部分光穿过微球腔而没有耦合到WGM模式中,因而耦合效率很低。微球腔较高效的耦合方式是通过其他电介质物体产生的倏逝波耦合,即近场耦合。近场耦合主要有光纤耦合和棱镜耦合<sup>[17,25]</sup>两种,光纤耦合方式有锥形光纤耦合(图5)<sup>[8]</sup>。一定倾角端面光纤耦合(图6)<sup>[18]</sup>,其中锥形光纤耦合是使用得最多的方法(如表1中所示耦合方式)。对于锥形光纤和微球而言,倏

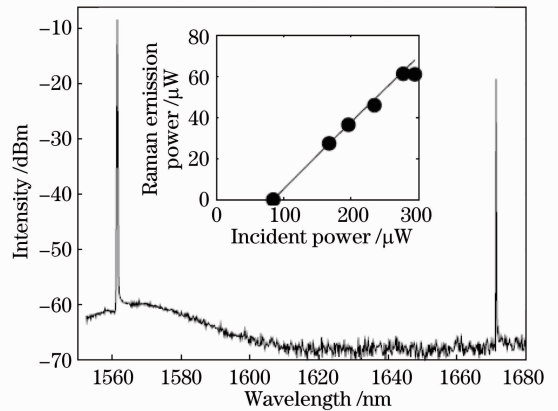


图4 单纵模拉曼激光输出。插图为拉曼输出功率与抽运功率的关系

Fig. 4 Single longitudinal mode Raman lasing. Inset shows Raman power output versus incident pump power

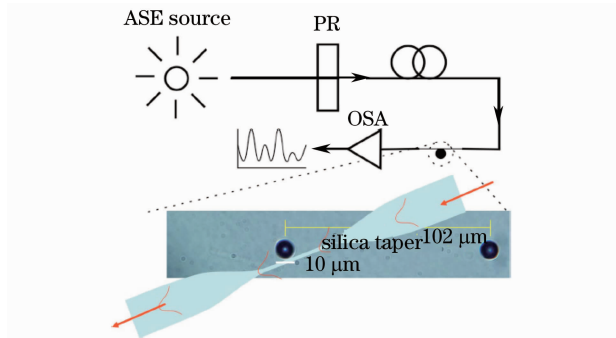


图5 锥形光纤微球耦合原理图

Fig. 5 Fiber taper coupling to a microsphere

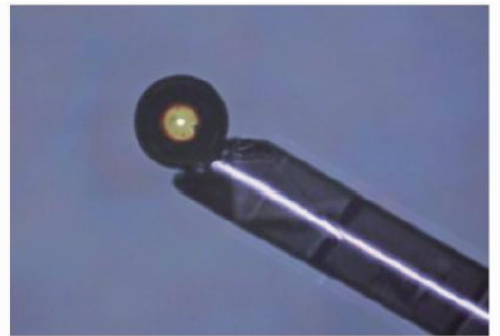


图6 斜面锥形光纤微球耦合图

Fig. 6 Photograph of an angle cleaved end for coupling to a microsphere

逝场的重叠程度将随着光纤与微球之间的间距而改变,并影响它们之间的耦合效率。影响耦合效率的参数有很多,其中最重要的影响因素是用来描述回音壁模式损耗的耦合品质因素  $Q_c$ ,而这种损耗是与耦合泄漏程度以及耦合深度相关的。 $Q_c$  的表达式为<sup>[41]</sup>

$$Q_c = 102 \left( \frac{r}{\lambda} \right)^{5/2} \frac{n^3 (n^2 - 1)}{4q - 1} \exp(2rd), \quad (3)$$

式中  $r$  是微球半径,  $d$  是耦合间距,  $\lambda$  是入射光波长,  $n$  是微球的折射率,  $q$  是回音壁模式的径向模数。Cai 等<sup>[37]</sup>用 980 nm 和 1550 nm 单模混合光纤锥抽运高效耦合  $\text{Er}^{3+}$ - $\text{Yb}^{3+}$  共掺的磷酸盐玻璃微球激光器,其耦合原理如图 7 所示,微分子量子效率约为 12%。

棱镜耦合方式比较灵活,但它的缺点是体积过大,而且与光纤一起使用时需要光学校准器件,特别是激光从微球耦合到棱镜的效率仅有 5%,并且探测光路上的能量损失为 90%<sup>[25]</sup>。除上述两种方法外,研究者也采用传统的显微物镜耦合<sup>[13,36]</sup>,但这种方式耦合效率较低。

### 5.3 玻璃微球传感器应用

微球腔用于传感器领域主要利用微球谐振腔内部或者其与外界相互作用的灵敏反应,诸如频率或光谱的变化。2003 年 Cai 等<sup>[42]</sup>报道了一种基于掺  $\text{Er}^{3+}$  的 ZBLALiP 氟化物玻璃微球温度传感器,低温的发射光谱用以标定强度比率与微球的温度,然后根据强度比率和温度的关系可计算出高温区。该微球温度传感器在 150~850 K 之间测温精度为 1 K。微球的倏逝场传输的光学特性,使其对周围介质折射率的变化具有极高的灵敏度。2005 年 Hanumegowda 等<sup>[43]</sup>报道了一种基于石英微球的高灵敏度折射率传感器,其结构如图 8 所示,折射率测量的灵敏度可达  $10^{-7}$  量级。当微球表面外的倏逝场受到特定离子的干扰时,其谐振频率发生变化,通过测量谐振模式的频移可以间接测量离子含量浓度。2006 年 Hanumegowda 等<sup>[23]</sup>又用该装置验证了水溶液中汞离子检测的可行性,最终测量精度达到  $50 \times 10^{-8}$  (质量分数),这和用光谱测量表面等离子共振法 (SPR) 测量精度相近,检测时间只需要几分钟,比 SPR 传感器更快。

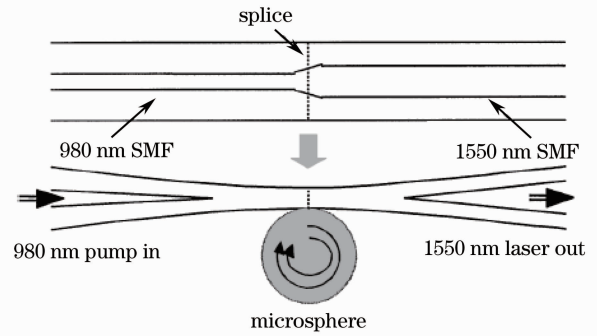


图 7 混合光纤锥耦合微球激光器

Fig. 7. Schematic of hybrid fiber taper coupling to a microsphere laser

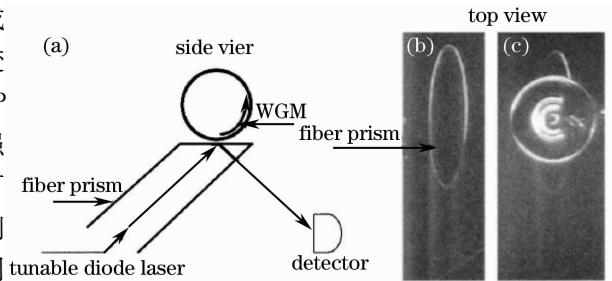


图 8 (a) 微球谐振腔传感器装置图; (b) 一定倾角抛光后的光纤棱镜; (c) 石英玻璃微球置于光纤棱镜面上  
Fig. 8 (a) Configuration of a microsphere resonator sensor; (b) fiber prism is obtained by angle polishing an optical fiber; (c) a fused silica microsphere is placed against the fiber prism

## 6 结束语

虽然玻璃微球及微球激光器研究已有近 20 年历史,但是玻璃微球基础研究及应用总体还处于起步阶段,存在许多不足以及亟需解决的问题,表现在:1) 有源玻璃微球所涉及的稀土离子目前只有  $\text{Nd}^{3+}$ 、 $\text{Er}^{3+}$ 、 $\text{Yb}^{3+}$  和  $\text{Tm}^{3+}$  四种稀土离子,其他稀土离子掺杂尚未涉及。2) 微球激光阈值与微球直径大小、掺杂离子和掺杂浓度等参数之间尚未建立关联变化规律关系。3) 已报道的多组分玻璃微球腔的品质因子一般为  $10^4 \sim 10^5$ ,而石英玻璃微球腔  $Q$  值约为  $10^8$ ,离理论极限  $10^{10}$  还有很大差距。如何降低材料损耗、制备完美结构的玻璃微球、高效激发 WGM 特定光学模式,从而获得稳定的光学微腔共振谱且具有极高  $Q$  值成为今后研究的关键所在。4) 玻璃微球与传统光纤、波导等光通信器件的耦合与集成技术也是玻璃微球激光器今后是否能在光通信、传感领域商业应用的关键问题。

在对通信容量需求快速增加、光器件小型化趋势日益明显的今天,玻璃微球以其极高的品质因数和极小的模式体积特性在低阈值激光发射、集成光学、非线性光纤、传感和量子通讯等领域有着广阔的发展前景。目前玻璃微球研究总体水平还处于理论和实验阶段,但随着相关制备工艺、耦合和集成技术等不断改进和完

善,玻璃微球必将在未来大有用武之地。

### 参 考 文 献

- 1 A. Lami, N. K. Rahman. Predissociation in a Strong Electromagnetic Field; Theory of Double Resonance [M]. In Collisions and Half-Collisions with Lasers. N. K. Rahman, G. Guidotti eds London: Harwood Academic, 1984
- 2 E. M. Purcell. Spontaneous emission probabilities at radio frequencies[J]. *Phys. Rev.*, 1946, **69**(11-12): 681~685
- 3 P. Goy, J. M. Raimond, M. Gross *et al.*. Observation of cavity-enhanced single-atom spontaneous emission[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1983, **50**(24): 1903~1906
- 4 Jin Letian, Wang Keyi, Zhou Shaoxiang. Optical microsphere cavities and their applications[J]. *Physics*, 2002, **31**(10): 642~646  
金乐天, 王克逸, 周绍祥. 光学微球腔及其应用[J]. *物理*, 2002, **31**(10): 642~646
- 5 C. G. B. Garrett, W. Kaiser, W. L. Bond. Stimulated emission into optical whispering modes of spheres[J]. *Phys. Rev.*, 1961, **124**(6): 1807~1809
- 6 R. E. Benner, P. W. Barber, J. F. Owen *et al.*. Observation of structure resonances in the fluorescence spectra from microspheres[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1980, **44**(7): 475~478
- 7 J. M. Ward, Y. Wu, K. Khalfi *et al.*. Short vertical tube furnace for the fabrication of doped glass microsphere lasers[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, **81**(7): 073106
- 8 S. Y. Chen, T. Sun, K. T. V. Grattan *et al.*. Characteristics of Er and Er-Yb-Cr doped phosphate microsphere fibre lasers[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(18): 3765~3769
- 9 M. Cai, O. Painter, K. J. Vahala *et al.*. Fiber-coupled microsphere laser[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(19): 1430~1432
- 10 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
- 11 Lü Baolong, Wang Yuzhu, Li Yongqing *et al.*. Study of Nd-glass microsphere spectra modified by cavity QED effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(3): 253~256  
吕宝龙, 王育竹, 黎永青等. 利用腔内量子电动力学效应改变钕玻璃微球荧光谱特性的研究[J]. *光学学报*, 1994, **14**(3): 253~256
- 12 Lü Baolong, Wang Yuzhu, Li Yongqing *et al.*. Analysis of resonant structures in the spectrum of a Nd-glass microsphere [J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **21**(3): 207~210  
吕宝龙, 王育竹, 黎永青等. 钕玻璃微球荧光谱中共振结构的分析[J]. *中国激光*, 1994, **21**(3): 207~210
- 13 K. Miura, K. Tanaka, K. Hirao. CW laser oscillation on both the  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$  and  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  transitions of  $Nd^{3+}$  ions using a fluoride glass microsphere[J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 1997, **213-214**: 276~280
- 14 K. Sasagawa, K. Kusawake, J. Ohta *et al.*. Nd-doped tellurite glass microsphere laser [J]. *Electron. Lett.*, 2002, **38**(22): 1355~1357
- 15 K. Sasagawa, Z. O. Yonezawa, R. Iwai *et al.*. S-band  $Tm^{3+}$ -doped tellurite glass microsphere laser via a cascade process [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(19): 4325~4327
- 16 W. Von Klitzing, E. Jahier, R. Long *et al.*. Very low threshold lasing in  $Er^{3+}$  doped ZBLAN microsphere[J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(20): 1745~1746
- 17 F. Lissillour, K. Ait Ameer, N. Dubreuil *et al.*. Whispering-gallery mode Nd-ZBLAN microlasers at  $1.05 \mu m$ [C]. *SPIE*, 1998, **3416**: 150~156
- 18 G. R. Elliott, G. S. Murugan, J. S. Wilkinson *et al.*. Chalcogenide glass microsphere laser[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(25): 26720~26727
- 19 C. Grillet, S. N. Bian, E. C. Magi *et al.*. Fiber taper coupling to chalcogenide microsphere modes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(17): 171109
- 20 S. M. Spillane, T. J. Kippenberg, K. J. Vahala. Ultralow-threshold Raman laser using a spherical dielectric microcavity [J]. *Nature*, 2002, **415**(6872): 621~623
- 21 B. Min, T. J. Kippenberg, K. J. Vahala. Compact, fiber-compatible, cascaded Raman laser[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(17): 1507~1509
- 22 H. Niciu, M. Popescu, A. Velea *et al.*. Moulding procedure for the preparation of infrared glassy microlenses and prisms based on arsenic sulphide chalcogenide glass[J]. *Chalcogenide Letters*, 2010, **7**(11): 625~629
- 23 N. M. Hanumegowda, I. M. White, X. Fan. Aqueous mercuric ion detection with microsphere optical ring resonator sensors[J]. *Sensors and Actuators B*, 2006, **120**(1): 207~212
- 24 N. M. Hanumegowda, I. M. White, H. Oveys *et al.*. Label-free protease sensors based on optical microsphere resonators [J]. *Sensor Lett.*, 2005, **3**(4): 315~319
- 25 Huang Rao, Liu Zhijing, Wang Keyi *et al.*. Recent research development of microsphere laser[J]. *High Power Laser and*

- Particle Beams*, 2004, **16**(8): 957~961
- 黄 晓,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
- 26 Wang Jiyou, Hao Wei, Zhao Lijuan *et al.*. Photoluminescence spectra of trivalent neodymium doped TiBa glass microspheres[J]. *Spectrosc. & Spectral Anal.*, 2005, **25**(4): 499~501
- 王吉有,郝 伟,赵丽娟 等. 掺 Nd<sup>3+</sup> 玻璃微球发射光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, **25**(4): 499~501
- 27 Lü Hao, Liu Aimei, Wu Yun *et al.*. Fabrication of phosphate glass microspheres[J]. *Opt. Tech.*, 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**STBZ(5): 712~714
- 28 M. Cai, O. Painter, K. J. Vahala. Observation of critical coupling in a fiber taper to a silica-microsphere whispering-gallery mode system[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(1): 74~77
- 29 P. Bianucci, C. R. Fietz, J. W. Robertson *et al.*. Polarization conversion in a silica microsphere[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(11): 7000~7005
- 30 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 哲,王宝华 等. 锥形光学倏逝场激发微球腔高 Q 模式[J]. 中国激光, 2010, **37**(7): 1789~1793
- 31 N. Kitamura, M. Makihara, I. Mogi *et al.*. Microspheres of tellurite glass formed by evaporation-condensation process under high magnetic field[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2005, **44**(10): 7546~7549
- 32 K. Hiromatsu, D. J. Hwang, C. P. Grigoropoulos. Active glass nanoparticles by ultrafast laser pulses[J]. *Micro & Nano Lett.*, 2008, **3**(4): 121~124
- 33 X. Peng, F. Song, S. Jiang *et al.*. Fiber-taper-coupled L-band Er<sup>3+</sup>-doped tellurite glass microsphere laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(10): 1497~1499
- 34 Y. Zhao, T. Chen, J. Zou *et al.*. Fabrication and characterization of monodisperse zinc sulfide hollow spheres by gamma-ray irradiation using PSMA spheres as templates[J]. *J. Cryst. Growth*, 2005, **275**(3-4): 521~527
- 35 G. S. Murugan, M. N. Zervas, Y. Panitchob *et al.*. Integrated Nd-doped borosilicate glass microsphere laser[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(1): 73~75
- 36 H. Fujiwara, K. Sasaki. Upconversion lasing of a thulium-ion-doped fluorozirconate glass microsphere [J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, **86**(5): 2385~2388
- 37 M. Cai, K. Vahala. Highly efficient hybrid fiber taper coupled microsphere laser[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(12): 884~886
- 38 J. Wu, S. Jiang, N. Peyghambarian. 1.5  $\mu\text{m}$  band thulium-doped microsphere laser originating from self-terminating transition[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(25): 10129~10133
- 39 A. Pal, C. Shu Ying, S. Das *et al.*. Low threshold fiber taper coupled silica microsphere laser in the 2  $\mu\text{m}$  wavelength region[C]. CLEO/Europe, 2011, CJ\_P10
- 40 X. Peng, F. Song, M. Kuwata-Gonokami *et al.*. Temperature dependence of the wavelength and threshold of fiber-taper-coupled L-band Er<sup>3+</sup>-doped tellurite glass microsphere laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(26): 5380~5382
- 41 T. L. Yeo, S. Y. Chen, T. Sun *et al.*. Development of microsphere laser-based sensor system[C]. *SPIE*, 2008, **7004**: 70045O
- 42 Z. P. Cai, H. Y. Xu. Point temperature sensor based on green upconversion emission in an Er<sup>3+</sup>:ZBLALiP microsphere[J]. *Sensors and Actuators A*, 2003, **108**(1-3): 187~192
- 43 N. M. Hanumegowda, C. J. Stica, B. C. Patel *et al.*. Refractometric sensors based on microsphere resonators[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(20): 201107