

doi: 10.3788/gzxb20164511.1128002

# 石英毛细管椭球微气泡模式特性及传感技术

刘彬斌<sup>1,2</sup>, 张蒙<sup>1,2</sup>, 吴根柱<sup>1,2</sup>

(1 浙江师范大学 信息光学研究所; 浙江省光信息检测与显示技术研究重点实验室, 浙江 金华 321004)

(2 浙江师范大学 行知学院, 浙江 金华 321004)

**摘要:** 利用有限元数值分析方法研究了椭球状石英毛细管微气泡回音壁模式特性及其折射率传感性能. 计算分析了不同半径与内壁厚度情况下空芯和液芯椭球形微气泡模式特征, 包括品质因数、有效折射率和能量比等, 并探讨了微气泡在高灵敏度和高分辨率折射率传感方面的应用潜能. 研究结果表明微气泡膨胀至 350  $\mu\text{m}$ , 且内壁厚度为 1  $\mu\text{m}$  时分辨率和灵敏度最佳; 在该厚度范围附近, 微气泡分辨率不会因为半径尺寸的改变而发生太大变化; 二阶径向模具有较高品质因数, 其灵敏度略高于一阶基模, 且使用二阶径向模可降低在制造时对结构壁厚控制精度的要求, 可用于实际传感应用中. 研究结果对微气泡的进一步实验研制具有理论参考价值.

**关键词:** 光学传感; 回音壁模式; 品质因数; 有限元数值模拟; 椭球形微气泡; 灵敏度; 分辨率

中图分类号: 0436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)11-1128002-6

## Mode Properties and Sensing Technology of Silica Capillary Ellips-microbubble

LIU Bin-bin<sup>1,2</sup>, ZHANG Meng<sup>1,2</sup>, WU Gen-zhu<sup>1,2</sup>

(1 Institute of Information Optics; Key Laboratory of Researching Optical Information Detecting and Display Technology of Zhejiang Province, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

(2 Zhejiang Normal University, Xingzhi College, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

**Abstract:** Mode and refractive index sensing properties of silica capillary microbubble were studied numerically using a finite element method. Mode characteristics such as quality factor, effective refractive index and percentage of light intensities inside the core were determined for different bubble diameters and shell thicknesses, and the potential application of microbubble in the high sensitivity and high resolution refractive index sensing was discussed. The results show that, optimized shell thicknesses sizes for the best sensitivity and resolution can be obtained, which is about 1  $\mu\text{m}$  for microbubble with a diameter of 350  $\mu\text{m}$ . Around this thickness, the resolution does not vary too much with bubble size, the sensitivity of the second order mode with a high quality-factor is higher than that of the first order mode. Therefore, in a practical sensing application, the second order mode is recommended since it can reduce the level of control needed on the shell thickness during device fabrication. It has a certain theoretical reference value to guide the experimental production process.

**Key words:** Optical sensing; Whispering gallery modes; Quality factor; Finite element model; Ellips microbubble; Sensitivity; Resolution

**OCIS Codes:** 280.4788; 230.5750; 230.4000

## 0 引言

近年来高 Q 值回音壁模式光学微腔的研究受到人们关注. 回音壁模式微腔一般是指尺寸为光波长量级 (微米量级) 的圆对称波导结构, 其特点是内部光通过

一个连续反射过程被限制在内边界附近并沿着边缘环绕形成所谓回音壁模式的光. 因回音壁模式的谐振频率很容易受外部环境影响, 微腔可作为高灵敏传感器来使用. 围绕提高传感灵敏度和分辨率的要求, 人们设计制作了多种回音壁模式微腔<sup>[1-3]</sup>, 光微流光学环形微

基金项目: 浙江省自然科学基金 (No. LY15F050001) 资助

第一作者: 刘彬斌 (1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微气泡传感. Email: 574959076@qq.com

导师 (通讯作者): 吴根柱 (1967-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为新型半导体激光器. Email: wugenzhu@zjnu.cn

收稿日期: 2016-04-26; 录用日期: 2016-07-05

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

腔是其中一种<sup>[4]</sup>. 光微流光学环形微腔可以看作是一种混合微腔, 由于具有不同介电层, 倏逝光场会耦合进核芯中的液体, 而大部分能量仍留在壁中, 该结构仍保持着高 Q 值的同时又具有很高的传感灵敏度.

近几年研究者提出一种新型光微流光学环形微腔, 即液芯微气泡微腔<sup>[5-7]</sup>. 该微腔是利用二氧化碳激光器对内部加气压的石英毛细管进行局部加热熔融制成. 通过控制加热区域和加热功率, 可形成一个特定大小和壁厚的椭球形或球形的带有单柄或双柄结构的微气泡, 然后利用注射泵将液体注入到微气泡内构成准液滴状微腔. 与纯微滴相比, 准微滴微气泡微腔表面因受到石英材料保护, 可有效避免纯微滴微腔容易变形和容易蒸发等问题, 同时具有类似纯微滴微腔模式特征. 但微气泡微腔几何尺寸对其模式特征的影响非常大, 尤其是微气泡内壁厚度对其传感应用很关键(一般情况下壁越薄传感灵敏度越大). 而为了保证一定的机械强度和制作工艺的方便, 内壁厚度也不能太薄, 必须在壁厚和传感灵敏度之间实现最佳权衡, 所以在微气泡传感器的制造过程中结构最优化设计至关重要. 文献<sup>[5-8]</sup>对球形微气泡结构进行了模拟设计, 其共同特点是用有限元方法模拟分析了球形微气泡 Q 值、有效折射率等参数, 以及当微气泡中充满液体时其温度、压力和折射率传感性能, 并讨论了微气泡在各类传感应用中灵敏度与分辨率随着微气泡半径和壁厚的变化规律, 但都只限于球形微气泡这一种情况. 实际制作过程中微气泡一般形成椭球形状, 为了获得更好的传感性能, 应对其进行优化设计, 而目前有关椭球状微气泡及其优化设计方面的研究鲜有报道.

本文使用有限元分析方法研究椭球状液芯和空芯微气泡回音壁模式特征及其传感特征, 并进行优化得出工艺上能实现的同时具有较高灵敏度和分辨率的最佳微气泡尺寸结构.

### 1 物理模型

典型的微气泡结构如图 1(a), 一般由内部有一定气压的一段石英毛细管两侧同时被强激光照射加热膨胀而制成, 如图 2. 微气泡外部是空气, 而内部可填充不同液芯材料, 形状一般是球体或椭球状, 是由制作工艺参数决定的. 假设由半径为  $R = 60 \mu\text{m}$ , 长度为  $h = 358 \mu\text{m}$ , 厚度为  $t = 4 \mu\text{m}$  的一段圆柱形毛细管膨胀而得到一个微气泡, 其横截面示意图如图 1(b), 由图 2 所示的工艺方法可获得半轴长  $b = 179 \mu\text{m}$  (因激光照射光斑不变而半轴长  $b$  保持不变),  $a$  在  $100 \sim 700 \mu\text{m}$  之间变化, 径向壁厚在  $3.5 \sim 0.5 \mu\text{m}$  之间变化的椭球形或半径等于  $179 \mu\text{m}$  的球形 (当  $a = b = 179 \mu\text{m}$  时) 微气泡.

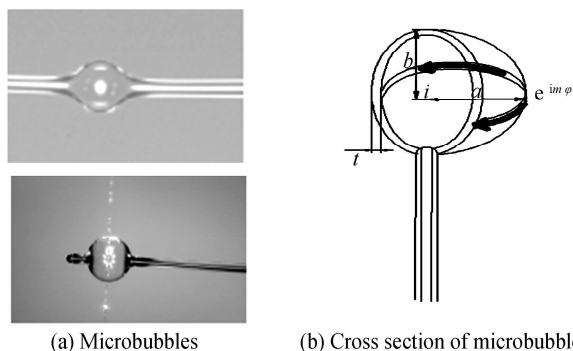


图 1 微气泡及其横截面示意图

Fig. 1 Microbubble and the schematic of its cross section

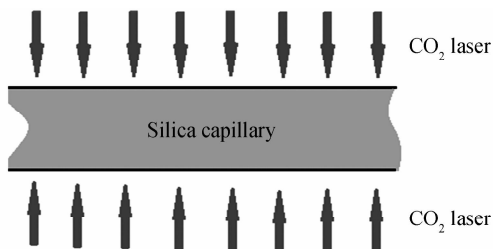


图 2 微气泡制作方法示意图

Fig. 2 Manufacture of microbubble

毛细管膨胀过程中满足质量守恒原理, 半轴长  $a$  与壁厚  $t$  的关系由  $179a^2 - 175(a-t)^2 = 162400$  确定, 显然随着毛细管的膨胀其壁厚越来越薄. 图 3 表示壁厚随半轴长  $a$  的变化情况. 以该尺寸微气泡为例研究一般石英毛细管微气泡模式分布及其传感应用特征.

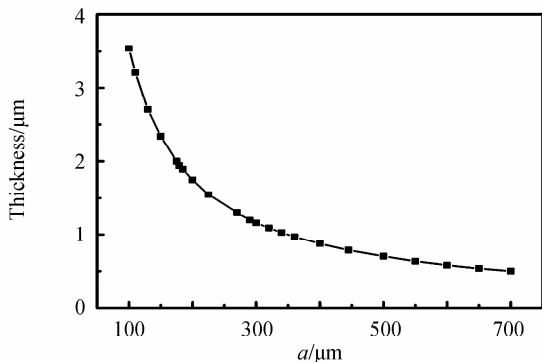


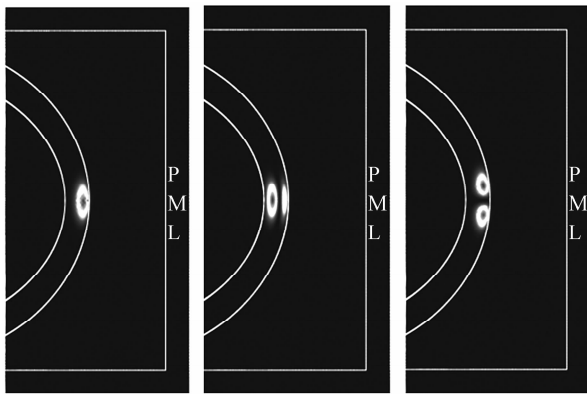
图 3 椭球形微气泡壁厚随半轴长  $a$  的变化曲线  
Fig. 3 Thickness of ellips microbubble changes with the semi-major axis  $a$

### 2 数值仿真及分析

$1.55 \mu\text{m}$  是回音壁模式实验中常用的波长, 而且是石英材料的一个“窗口”波长, 因而使用该波长作为工作波长. 首先通过有限元数值计算方法求解弱项亥姆霍兹方程<sup>[8]</sup>来获得微气泡内外回音壁模式光场分布, 即

$$\begin{aligned} & \int dv (\nabla \times \tilde{H}) \epsilon^{-1} (\nabla \times H) - \alpha (\nabla \times \tilde{H}) (\nabla \times H) + \\ & c^{-2} \tilde{H} \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $\epsilon$  是有效介电常数,  $\alpha$  为弱项因子. 在球坐标  $(r, \theta, \varphi)$  中, 回音壁模式绕赤道面顺时针或逆时针方向传播, 如图 1(b). 这是由模场相位分量  $\exp(im\varphi)$  所决定, 其中  $m$  表示模式径向阶数. 而模式有效折射率谐振条件由  $N_{\text{eff}} = m\lambda/2\pi a$  决定. 对于 3D 结构, 即便是很微小的物体也需要占用大量计算资源, 而微气泡为旋转对称结构, 故可用全矢量有限元法<sup>[8]</sup> 将其简化为 2D 的结构, 在短时间内利用较小的内存解决问题. 在微气泡中, 除了基模之外还存在其它模式, 图 4 分别为一阶径向模式(基模)、二阶径向模式和更高阶传输模式的模场分布. 在这里将高阶径向模式和更高阶切向模式分别表示为  $(q=2, 3, \dots)$  和  $(l=m\pm 1, m\pm 2, \dots)$ . 先以空气为核芯介质研究椭球形微泡回音壁式特征.



(a) First order mode (b) Second order mode (c) Higher order mode

图 4 微气泡不同模式的模场分布

Fig. 4 Mode field distribution of microbubble with different modes

$Q$  值是回音壁模式光学微腔的重要参数, 回音壁模式的本质损耗包括辐射损耗(倏逝波损耗)、材料吸收损耗和表面粗糙损耗. 采用熔融方法可有效降低表面粗糙损耗, 所以只考虑辐射损耗和材料损耗. 为了模拟实际情况, 把材料吸收作为一个附加的虚部引入材料介电常数. 根据熔融石英玻璃在  $1.55 \mu\text{m}$  波长附近的吸收系数, 取其介电常数虚部为  $\epsilon_i = -3.56 \cdot 10^{-10}$ . 模拟时在计算区域边界引入一个完全匹配层(Perfectly Matched Layers, PML), 如图 4(a)~(c). 完全匹配层可看作各向异性吸收器, 能实现在有限计算空间内模拟辐射到无穷远倏逝波. 通过有限元分析软件求解模式本征方程, 得到复数本征频率解  $f_r$ , 其实部和虚部分别对应模式谐振频率和本征损失, 故  $Q$  值可以定义为  $Q = \text{Re}(f_r)/2\text{Im}(f_r)$ .

微气泡三种不同模式  $Q$  值随半轴长  $a$  的变化如图 5. 椭球形微气泡  $Q$  值随着半轴长  $a$  增大而增大. 当  $a > 300 \mu\text{m}$  时, 各模式  $Q$  值均较大, 而当  $a < 300 \mu\text{m}$  时  $Q$  值呈指数减小, 表明此时辐射损耗占主要部分. 当微气泡尺寸较大时, 辐射损耗减小, 与材料损耗相比可以忽

略, 此时微气泡  $Q$  值主要由材料损耗决定. 在半轴长  $a$  在  $100 \sim 500 \mu\text{m}$  范围内时微气泡支持高  $Q$  值三种模式. 径向二阶模模式  $Q$  值在  $a$  为  $100 \sim 200 \mu\text{m}$  范围内时呈指数增大, 而此时 TE、TM 模式  $Q$  值保持一个相对较低的值. 该  $Q$  值曲线中存在短半轴与长半轴相等一点(图 5 中五角星点), 此时椭球微气泡变成球形, 从该点开始, 随着半轴长  $a$  的增加, 球形微气泡变成椭球时的  $Q$  值也随着变大. 从图 5 可看到当  $a > 350 \mu\text{m}$  时三种模式的  $Q$  值基本达到饱和最大值, 根据图 3, 此时微气泡赤道面上厚度也小于  $1 \mu\text{m}$ , 故工艺上尽量保证微气泡尺寸  $a > 350 \mu\text{m}$ , 这样既能保持大  $Q$  值, 又能让微气泡壁厚满足传感应用要求.

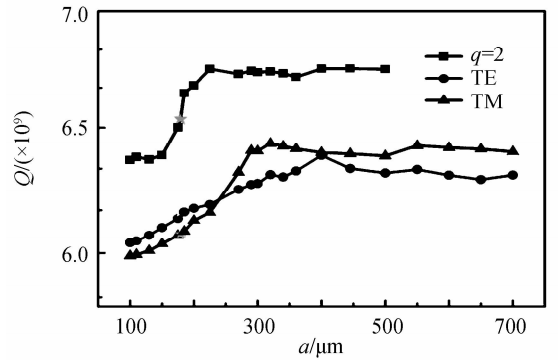


图 5 椭球微气泡各模式  $Q$  值及壁厚随半轴长  $a$  变化关系

Fig. 5  $Q$ -factors and thickness of microbubbles change with semi-major axis  $a$

在传感应用中, 需要将光线耦合进回音壁中进行传播与检测. 目前有多种耦合方法, 其中锥形光纤表现出了非常高的耦合效率, 被广泛应用于回音壁模式微腔中. 若想高效地耦合光, 腔体模式必须与锥形光纤模式充分地重合, 且符合相位匹配条件<sup>[10]</sup>. 如回音壁模式有效折射率必须与锥形光纤有效折射率相等, 而回音壁模式有效折射率可以通过公式  $N_{\text{eff}} = m\lambda/2\pi a$  计算得出. 为了保证微气泡与锥形光纤所组成的系统有效耦合, 计算出讨论的不同锥形光纤的有效折射率(当间隙等于零时), 如图 6<sup>[11]</sup>. 调整锥形光纤与微气泡之间的间隙或改变锥形光纤锥直径, 使得两者有效折射率相等. 从图 6 中可以看出, 微气泡内壁厚越薄(接近工作波长时), 进入核芯中的电磁场越多, 导致有效折射率减小. 壁厚为  $0.6 \sim 1.5 \mu\text{m}$  之间, 尺寸  $a$  在  $550 \sim 650 \mu\text{m}$  之间的微气泡 TE、TM 模式有效折射率在  $1.35 \sim 1.38$  之间, 若将纤锥半径控制在  $1 \sim 1.35 \mu\text{m}$  之间, 可达到相位匹配条件. 二阶模的有效折射率则较小, 在  $1.14 \sim 1.35$  之间, 所以要求更细的纤锥才能使得该模式有效地进行耦合. 通过进一步计算发现其它高阶模式的有效折射率会更小, 很难由光纤锥激发, 故分辨率讨论中只讨论 TE、TM 基模和二阶径向三种模式.

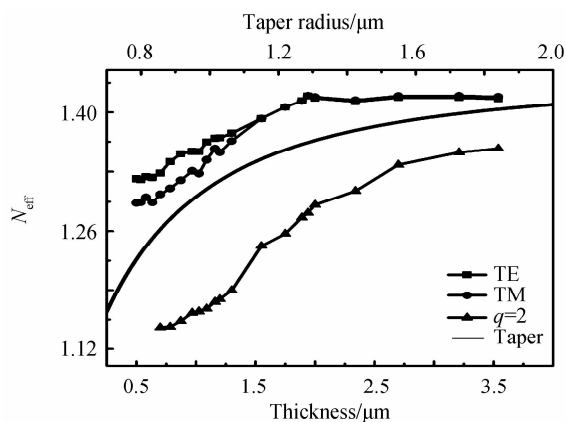


图6 椭球形微气泡不同模式有效折射率和半轴长随厚度的变化

Fig. 6 Effective index and semi-major axis of different modes in ellips microbubble change with thickness  $a$

图5、6研究的都是中空(充满空气)微气泡的回音壁模式,实际上对充满液体的液芯微气泡的研究更有意义.因为液体的折射率高于气体且气泡椭球形的边界可使之保持小液滴状,而回音壁模式可以存在于这样的液滴之中.液滴的回音壁模式可用于研究激光和非线性效应<sup>[13-16]</sup>.当微气泡的壁厚非常厚时,模式的大部分电磁场在微气泡的壁中传播,此时微气泡的性能与固体微球相近,随着壁厚减小,模式更多耦合进液体核芯中进行传播,这为需要更大传播空间的高阶径向模式提供了传播所需的空空间,因此薄壁的液芯微气泡也能够支持高阶模式的传播.

对充满液体不同轴长的微气泡进行数值模拟,其核芯的介电常数被液体的介电常数所取代(例如水的介电常数为  $\epsilon_{\text{real}} = 1.33^2 = 1.7698$ ).利用数值模拟对核芯和壁中的电磁场进行积分,计算出模式在核芯中电磁场所占的比例,即

$$\eta = \int_{\text{core}} w(r) d^3(r) / \int_{\text{all}} w(r) d^3(r) \quad (2)$$

式中,

$$w = [d(w\epsilon(r))/dw |E(r)|^2 + \mu_0 |H(r)|^2] / 2 \quad (3)$$

是能量密度,  $H(r)$ 、 $E(r)$ 、 $\epsilon(r)$  和  $\mu_0$  分别是磁场强度、电场强度、介质介电常数和真空磁导率<sup>[16]</sup>.计算得到圆管膨胀半长轴  $a$  在  $100 \sim 700 \mu\text{m}$  范围内时的微气泡各阶模核芯能量百分比如图7.

图7描述了三种不同径向模式在厚度(半径)不同时的核芯能量百分比.对于一阶径向模式,在壁厚为  $0.5 \sim 3.5 \mu\text{m}$  的范围内时核芯能量始终低于35%,甚至当壁厚大于半波长时,超过80%的模式处于壁中.而二阶模式在壁厚小于波长时,超过60%的模式耦合进了核芯区域.

通过对图7分析,说明了充满水的薄壁微气泡(特别是径向二阶模)与液滴的回音壁模式非常相似,在传感和非线性光学中有着重要的应用价值.相比液滴而

言,微气泡能够维持液体形状,可以避免由表面蒸发而引起谐振腔变形的优势,而且很容易通过耦合结合外部波,以代替低效的自由空间激发.

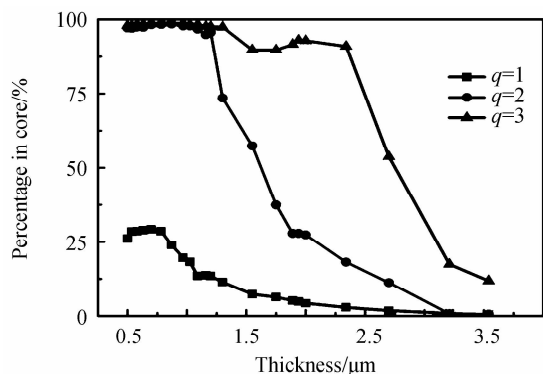


图7 椭球形微气泡不同模式核心中光场所占百分比随厚度的变化

Fig. 7 Percentages of light intensities for different modes of ellips microbubble inside the core change with thickness

### 3 微气泡传感特性

回音壁模式微腔的传感应用基于原理:改变环境(核芯物质浓度、温度、压力)使微腔回音壁模谐振波长产生一个小的漂移,通过扫描记录微腔的透射谱线来检测漂移.将灵敏度定义为回音壁模式的频移比,即  $\partial\lambda(U)/\partial U$ .当谐振线宽扩大,频率无法被分解出来,从而限制了基于回音壁模式传感器的分辨率.而提高灵敏度则限制了  $Q$  值,为了克服这一问题,需要确定回音壁模式微腔的最优化参数.一般将分辨率定义为<sup>[8]</sup>

$$R = \frac{\lambda}{Q} \left( \frac{\partial\lambda(U)}{\partial U} \right)^{-1} \quad (4)$$

式中,  $U$  为物理量(温度、压力),  $\lambda$  为工作波长<sup>[17-22]</sup>.

从直观上看,要得到更高的敏感度,需要尽可能使微气泡中的模式分布在核芯区域.按照波长可以从本质上将折射率灵敏度表示为<sup>[8]</sup>

$$S = \frac{\partial\lambda}{\partial U} = \frac{\kappa_c}{n_c} \frac{\partial\lambda}{\partial U} + \frac{\kappa_s}{n_s} \frac{\partial\lambda}{\partial U} \quad (5)$$

式中,  $\kappa_c$  和  $\kappa_s$  分别表示处于核芯区域和壁中的电磁场百分比,  $n_c$  和  $n_s$  为它们的折射率.简单起见,假设只有核芯物质折射率发生变化,所以灵敏度仅与  $\kappa_c$  成比例.这说明灵敏度随壁厚的变化与图7有着相同的趋势.高阶模有更多模场耦合进微气泡的核心区域,在壁厚略小于  $2.5 \mu\text{m}$  时具有比一阶模高的灵敏度,为了得到高  $Q$  值、高灵敏度和高分辨率微气泡的优化结构,模拟分析了一、二阶模式.为了达到高灵敏度,选择壁厚非常薄的气泡,如壁厚小于工作波长,此时二阶径向模超过60%的光进入核中.液芯微气泡  $Q$  值通过第二部分中所使用的方法计算得到与壁厚之间关系,如图8(a),显然  $Q$  值随着壁厚的增大而增大,这是由于厚度越大限制在气泡核芯内和壁厚内的光能量越大.通过

引入微气泡核芯物质折射率的一个微小变量(如0.001)模拟计算出模式谐振波长偏移量,并按其比值得到灵敏度如图8(b)。显然具有与式(5)理论描述相同的变化趋势,随着壁厚增大而减小,当壁厚大于 $2\ \mu\text{m}$ 时,大部分光分布在壁中,因而没有产生频移。对比两种径向模式,二阶模表现出较高的灵敏度。利用图8(a)和8(b)结果计算出分辨率随壁厚变化的关系如图8(c),从图8(c)可看出对气泡膨胀至壁厚厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 时得到最佳分辨率。在这个范围附近,微气泡分辨率不会因为尺寸改变而发生太大变化,二阶模灵敏度略高于一阶模,同时具有较高 $Q$ 值,而且使用二阶模可降低在制造时对结构壁厚控制水平的要求,因而在实际传感应用中应该选择该模式。

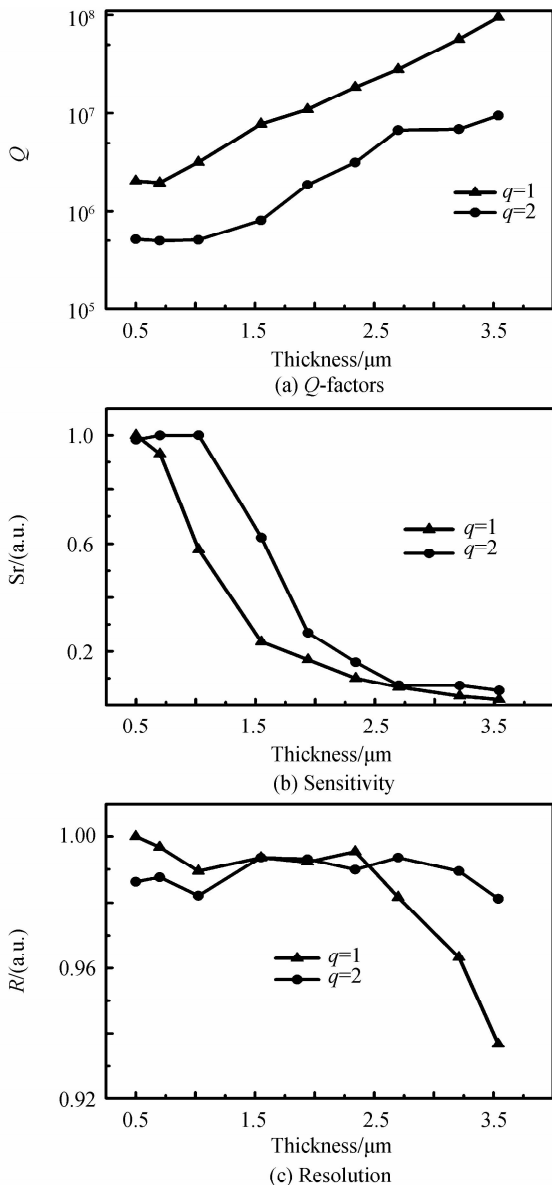


图8 液芯椭球微气泡不同模式 $Q$ 值、灵敏度和分辨率随壁厚的变化关系

Fig.8  $Q$ -factors, sensitivity and resolution for ellips microbubbles filled with water for different radial modes change with thickness

## 4 结论

基于有限元数值模拟方法对微气泡回音壁模式光学特性进行了研究,得到不同直径和壁厚椭球形微气泡的光学参数,并探讨了微气泡回音壁在传感方面的应用。通过调节壁厚使得液芯微气泡中的光学模式尽量多耦合进液体之中,从而获得了一种高灵敏度检测液体折射率传感器。下一步将以工作波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 的情况为例,研究微气泡传感器除了折射率外其他物理参数如压强和温度等在传感领域的应用。

### 参考文献

- [1] XU Q, SCHMIDT B, PRADHAN S, *et al.* Micrometre-scale silicon electro-optic modulator [J]. *Nature*, 2005, **435** (7040): 325-327.
- [2] KIPPENBERG T J, SPILLANE S M, ARMANI D K, *et al.* Fabrication and coupling to planar high-Q silica disk microcavities[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **83** (4): 797-799.
- [3] SHAINLINE J, ELSTON S, LIU Z J, *et al.* Subwavelength silicon microcavities [J]. *Optics Express*, 2009, **17** (25): 23323-23331.
- [4] WHITE I M, GOHRING J, SUN Yu-ze, *et al.* Versatile waveguide-coupled optofluidic devices based on liquid core optical ring resonators[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91** (24):2411041-2411043.
- [5] WHITE I M, HESAM O, FAN Xu-dong. Liquid-core optical ring-resonator sensors[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(9):1319-1321.
- [6] SUMETSKY M, DULASHKO Y, WINDELER R S. Optical microbubble resonator[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(7): 898-900.
- [7] AMY W, JONATHAN W, WU Yu-qiang, *et al.* Single-input spherical microbubble resonator[J]. *Optics Letters*, 2011, **36** (11): 2113-2115.
- [8] BERNESCHI S, FARNESI D, COSI F, *et al.* High Q silica microbubble resonators fabricated by arc discharge[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(17): 3521-3523.
- [9] YANG Yong, JONATHAN W, SILENIC C. Quasi-droplet microbubbles for high resolution sensing applications [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(6): 6881-6898.
- [10] OXBORROW M. Traceable 2D finite-element simulation of the whispering-gallery modes of axisymmetric electromagnetic resonators[J]. *Physics*, 2007, **55**(6): 1209 - 1218.
- [11] LIN Guo-ping, ZHANG Lei, CAI Zhi-ping, *et al.* Excitation of whispering gallery mode resonances by a phase-matched fiber taper[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10):1781-1783.  
林国平, 张磊, 蔡志平. 相位匹配下锥形光纤激发出的回廊模谐振[J]. *光子学报*, 2007, **36**(10):1781-1783.
- [12] LIU Zhao-lun, LI Shu-guang, Ni Zheng-hua, *et al.* Phase-matching in microbubble fibers [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, **27**(1): 68-71.  
刘兆伦, 李曙光, 倪正华, 等. 微结构光纤中的相位匹配分析[J]. *半导体光电*, 2006, **27**(1): 68-71.
- [13] BUMKI M, ERIC O, VOLKER S, *et al.* High-Q surface-plasmon-polariton whispering-gallery microcavity [J]. *Nature*, 2009, **457**(7228): 455-458.
- [14] QIAN S X, CHANG R K. Lasing droplets: highlighting the liquid-air interface by laser emission[J]. *Science*, 1986, **231**

- (4737); 486-488.
- [15] MABUCHI H, DOHERTY A C. Cavity quantum electrodynamics; coherence in context[J]. *Science*, 2002, **298**(5597): 1372-1377.
- [16] DAYAN B, PARKINS A S, AOKI T, *et al.* A photon turnstile dynamically regulated by one atom [J]. *Science*, 2008, **319**(5866): 1062-1065.
- [17] LITTLE B E, CHU S T, HAUS H A, *et al.* Microring resonator channel dropping filters[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(6): 998-1005.
- [18] POSTEMA M, BOUAKAZ A, JONG N D. Noninvasive microbubble-based pressure measurements: a simulation study[J]. *Ultrasonics*, 2004, **42**(1-9): 759-762.
- [19] RICO H, TOM S, JONATHAN W, *et al.* Tuning whispering gallery modes using internal aerostatic pressure [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(23): 4536-4538.
- [20] WARD J M, YANG Y, CHORMAIC S N. Highly sensitive temperature measurements with liquid-core microbubble resonators[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(23): 2350-2353.
- [21] LIU Jie, SHEN Hong-jun, LYU Dong-ni. A novel photonic crystal coupled cavity waveguide with high Q factor and transmission efficiency [ J ]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(7):872-877.  
刘杰,沈宏君,吕冬妮.一种新型高透射率高品质因子光子晶体耦合腔波导结构[J]. *发光学报*, 2014, **35**(7):872-877.
- [22] SHI Fei-fei, ZHAO Chun-liu, XU Ben, *et al.* Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on optical fiber cavity sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(3): 0306003  
时菲菲,赵春柳,徐贲,等.基于光纤微腔的温度及折射率同时测量型传感器[J]. *光子学报*, 2016, **45**(3): 0306003.