

文章编号: 1000-7032(2025)07-1301-09

回音壁模式花生腔制备及其定向发射特性

黄潇潇¹, 李志秀², 石林林¹, 常朋发^{1*}, 朱益志^{1*}, 王安帮^{1,3}

(1. 太原理工大学 物理与光电工程学院, 新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024;

2. 晋中学院 物理与电子工程系, 山西 晋中 030619;

3. 广东工业大学 通感融合光子技术教育部重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要: 回音壁模式变形微腔兼具了回音壁模式(WGM)高品质因数与内部丰富模式路径优势,在混沌动力学、传感探测、激光定向发射方面具有重要研究价值。本文结合使用氢氧焰加热与二氧化碳(CO₂)激光器加热,首先利用氢氧焰加热将两根光纤熔融拉伸制备到一起,而后使用CO₂激光加热二次熔融拉伸的方法,制备了花生形WGM微腔阵列。实验中,我们分别研究了氢氧焰加热时拉伸距离,以及两次CO₂激光加热位置间距对制备得到的花生腔尺寸与形貌的影响。而后利用锥形光纤耦合的方式,探究了其在不同角度下的出射强度,并使用仿真软件进行了模拟。两种方法的结果吻合,证实了其具有定向发射特性。此外,实验上分别使用不同直径光纤以及中空玻璃管进行组合加工,制备了两瓣直径不同、以及单瓣中空的非对称花生腔,并对它们的发射特性进行了仿真研究,证实了该方案的普适性。这项工作提出了一种快速批量制备WGM花生腔的简便方法,为变形WGM微腔的研究与应用奠定了基础。

关键词: 回音壁模式; 花生腔; 定向发射特性; 传感

中图分类号: TN243

文献标识码: A

DOI: 10. 37188/CJL. 20250042

CSTR: 32170. 14. CJL. 20250042

Preparation of Whispering Gallery Mode Peanut-shaped Cavity and Its Directional Emission Characteristics

HUANG Xiaoxiao¹, LI Zhixiu², SHI Linlin¹, CHANG Pengfa^{1*}, ZHU Yizhi^{1*}, WANG Anbang^{1,3}

(1. Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Department of Physics and Electronic Engineering, Jinzhong University, Jinzhong 030619, China;

3. Key Laboratory of Photonic Technology for Integrated Sensing and Communication, Ministry of Education, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

* Corresponding Authors, E-mail: changpengfa@tyut.edu.cn; zmxzzhu@163.com

Abstract: The deformed whispering gallery mode (WGM) microcavity combines the advantages of high quality factor and rich internal mode paths, demonstrating significant research value in chaotic dynamics, sensing detection, and directional emission. This paper presents a hybrid fabrication method combining traditional hydrogen-oxygen flame heating and carbon dioxide laser heating. Initially, two optical fibers were fused and stretched together using hydrogen-oxygen flame heating. Subsequently, secondary fusion stretching was performed through CO₂ laser heating to fabricate a peanut-shaped WGM microcavity array. Experimentally, we investigated the effects of stretching distance during flame heating and the spacing between two CO₂ laser heating positions on the dimensions and morphology of the peanut-shaped cavities. Using a tapered fiber coupling, we explored coupling intensities at different angles and confirmed their directional emission characteristics. Furthermore, experiments were conducted using fibers of

收稿日期: 2025-02-26; 修订日期: 2025-03-11

基金项目: 山西省基础研究计划(20210302124536, 202403021211010); 国家自然科学基金(62105233, 12104333, 62204157, 62205235)

Supported by Basic Research Plan of Shanxi Province (20210302124536, 202403021211010); National Natural Science Foundation of China (62105233, 12104333, 62204157, 62205235)

different diameters and hollow glass tubes in combination processing to fabricate peanut-shaped cavities with two lobes of different diameters and single hollow lobes in an asymmetric configuration. The emission characteristics of these cavities were simulated and studied, confirming the universality of this approach. This work proposes a simple method for rapid batch fabrication of WGM peanut-shaped cavities, laying a foundation for research and applications of deformed WGM microcavities.

Key words: whispering gallery mode; peanut-shaped cavity; directional emission characteristics; sensing

1 引 言

回音壁模式(Whispering gallery mode, WGM)微腔由于具有高品质因数(Quality, Q)、小模式体积的优势,在基础物理效应研究^[1-2]、低阈值激光与非线性效应激发^[3-7]、传感探测^[8-10]等领域具有十分重要的地位。相较于正圆形的WGM微腔,变形WGM微腔由于具有独特的形状,能够支撑具有不同形状的回音壁模式,在混沌动力学^[11-12]、激光定向发射^[13-16]等方向具有独特的研究价值,常见的变形WGM微腔有椭圆形^[11,17-18]、多边形^[19-20]、缺陷型^[21-22]、花生形^[23-26]等。花生形WGM微腔(Peanut-shaped cavity)又称为花生腔,通常由两个近圆形微腔组合而成,这使得在耦合时由于两个腔体内模式路径不同能够产生类MZI的干涉输出^[27],以及Fano线型^[28-29]等,在传感中能够实现更高的灵敏度。此外,由于两个腔体结合时打破了各自的旋转对称性,能够实现特定方向的发射效果,在激光器制备领域具有重要应用^[23,30]。

目前常见的花生形微腔制备方法有融合球腔法^[27,31]、融合光纤法^[23]等。融合球腔法是首先将两个光纤端面放电熔融成球形,而后再将两个微球融合在一起,这样可以继承微球腔的高品质因数,在激发激光^[23-26]和传感探测领域^[31]具有重要应用价值。但是,这种方法需要将两个微球精确对准,而且一次只能制备一个花生腔。融合光纤法则是通过将两根光纤柱贴合在一起,这是一种快捷的方法^[23],也能实现内部光能量特定角度发射。但是,

理论上这些腔体内部的模式可以向轴向上无限扩散,局域效果较差。

本文提出了一种批量制备花生腔的新方案,通过将两根光纤并列熔融,而后利用二氧化碳激光二次熔融拉伸的方式可以实现整列花生腔的制备。实验中,我们利用普通单模光纤制备了两瓣直径相同的对称花生腔,探究了实验参数对腔体尺寸与形貌的影响,并通过锥形光纤耦合和仿真相结合的方式探究了腔体的定向发射特性。此外,实验上验证了该方案能够制备两瓣直径比例为2:1的非对称花生腔,以及中空微管花生腔。该方案具有成本低廉、制备周期短、参数灵活性高等优势,在定向发射激光器制备和传感探测领域具有重要应用价值。

2 实 验

2.1 样品制备

实验中,花生腔阵列的制备过程包括熔合和二次熔融拉伸两个步骤,如图1所示。首先,使用光纤耦合器拉锥机(Rayscience,SCS-4000-ST)进行光纤熔合制备,调节氢气流速200 mL/min,氢氧焰范围约6 mm,火焰横扫移动速度1 cm/s。将两段光纤剥去涂覆层,互相缠绕一周放置在夹具上并固定,两侧夹具的拉伸速度设置为5 $\mu\text{m/s}$ 。由于两端施加的拉力,互相缠绕的两根光纤将受到向内挤压的分力。使用氢氧焰扫描加热光纤缠绕的中心区域,这时候两个光纤会缓慢熔在一起,

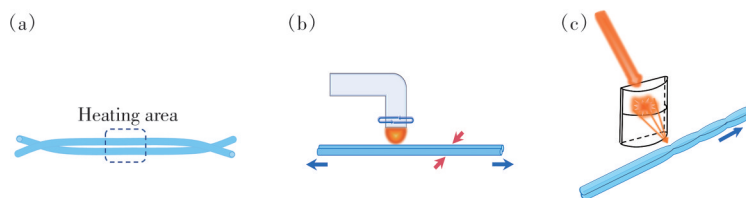


图1 加工流程示意图。(a)两根光纤缠绕一周;(b)氢氧焰加热光纤实现熔合;(c)激光二次熔融拉伸制备花生腔

Fig.1 Schematic diagram of the fabrication process. (a) Two fibers are wound around each other for 360°. (b) The two fibers are fused by heating with an oxyhydrogen flame. (c) The peanut-shaped cavity is formed by laser-assisted secondary melting and stretching

且直径逐渐减小。这里虽然两个光纤互相缠绕,使光纤产生了弯曲,但由于缠绕只有一周,光纤缠绕范围远超过加热扫描区域(约1 cm)范围,所以中心位置的弯曲度很小,对于制备得到的单个花生腔可以忽略不计。当将两根光纤熔融在一起后,它们的截面已经呈现“花生”形状,但此时其内部的回音壁模式仍可以向轴向两端不受限扩展。为了将腔体内部模式进一步局域,同时提升品质因数,需进行二次熔融与拉伸。将制备得到的柱体取下固定在一个平移台上,使用一台二氧化碳激光器对样品进行二次熔融和拉伸。二氧化碳激光器输出功率6 W,通过一组硒化锌柱透镜聚焦成线状激光束。在垂直于柱体轴向方向上进行加热,待该区域熔融后进行牵拉,使该部分柱体变细。然后平移花生腔柱体,使激光连续扫描柱体表面。平移一段距离后,再次进行加热和拉细,得到轴向方向中间粗两端细的结构。这种腔体形状能够使耦合进入的光能量局域在较小的体积内,维持高 Q 和模式内高能量密度。

2.2 样品表征

所制备的样品采用微仪光电金相显微数码成像系统进行形貌表征,显微镜系统型号为V3800-C20。花生腔在不同波长下的透射光谱采用扫描激光器波长法进行测试。测试所用激光器型号为

Yenista T-100s,输出线宽为400 kHz,波长扫描速度为10 nm/s。透射端光信号强度由康冠光电探测器进行探测,型号为KG-PR-200M-A。输出电信号强度由Tektronix示波器进行采集,型号为TBS2102B。耦合锥形光纤的位置由Thorlabs三维精密电控移台进行控制,型号为MAX311D/M,精度为10 nm。花生腔角度使用卓立汉光手动旋转滑台进行控制,型号为AKR10A-60,角度精度为1°。

3 结果与讨论

3.1 花生腔形貌与参数分析

基于上述工艺,我们通过控制加热与拉伸参数,制备了各种尺寸与形貌的花生腔阵列。图2(a)给出了制备得到的花生腔阵列俯视图,可以看到经过拉制的两根光纤熔融在一起,且呈现多组“瓶状”结构,各组腔体的长度各不相同,分布在128.05~207.18 μm 。这是通过调整二氧化碳激光器的功率与两次熔融点间距实现的,该参数决定了腔体内部WGM模场的分布范围与模式内部的能量密度。图2(b)给出了在氢氧焰加热拉伸环节中拉制长度分别为400 μm 、800 μm 、1 500 μm 和3 000 μm 时得到的花生腔体截面图,可以看到两根光纤的部分区域熔融在一起,但各自仍保持近似圆形。随着拉制距离(Pulling distances, Pd)

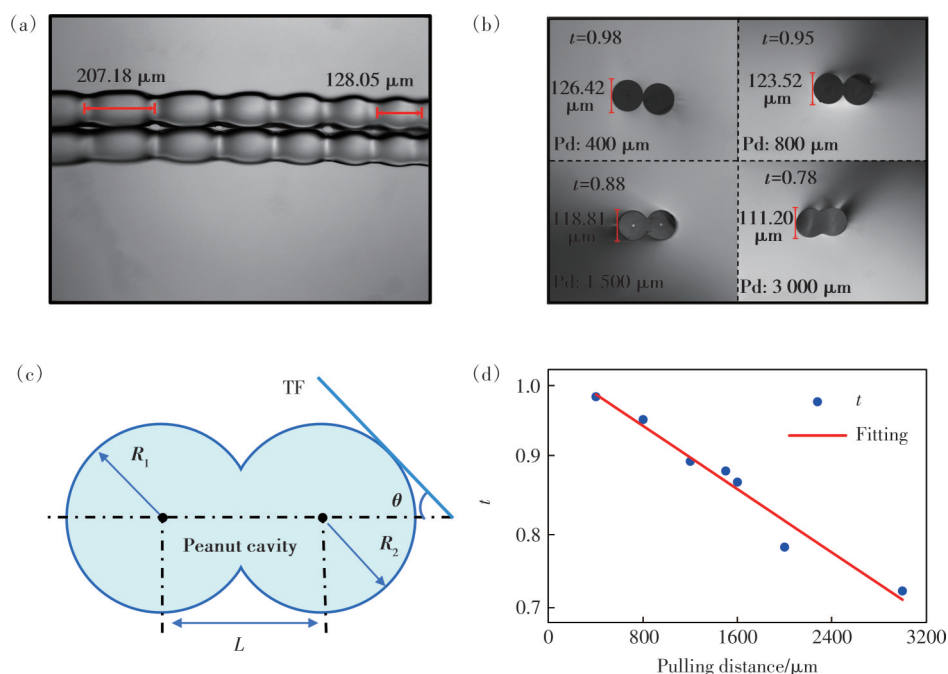


图2 (a)花生腔俯视图;(b)不同花生腔截面图;(c)花生腔结构示意图;(d) t 随拉制距离的变化

Fig.2 (a) Top-view microscope image of the peanut-shaped cavity. (b) Cross-sectional microscope images of different peanut-shaped cavities. (c) Schematic diagram of the peanut-shaped cavity structure. (d) The overlap t with different pulling distances

逐渐增大,单瓣腔体的半径逐渐由 $63.21\ \mu\text{m}$ 减小至 $55.60\ \mu\text{m}$,且两瓣腔体的重合区域逐渐增大。为了定量描述两根光纤的熔合程度,我们定义分离系数 $t=L/(R_1+R_2)$,其中 L 为两个圆心的间距, R_1 、 R_2 分别为两光纤的半径,截面示意图如图 2(c) 所示。分离系数等于 1 意味着二者没有重合,分离系数越小意味着二者重合区域越大。 t 可通过控制拉制距离进行调节。实验中我们统计了 $400\sim 3\ 000\ \mu\text{m}$ 内 7 个不同拉制距离下的情况,得到的结构中两柱体分离系数 t 由 0.985 逐渐减小至 0.723。对以上数据点进行拟合,得到拟合直线的斜率为 $-1.07\times 10^{-4}/\mu\text{m}$ 。可以看到大部分实验数据点落在拟合直线附近,实验误差小于 5%,说明在拉制距离较小的范围内,分离系数近似线性变化,且重复性较好。但这些数据点与拟合直线仍存在偏差,这是由于在操作中不能保证每次状态完全一致,比如光纤缠绕时的相对位置、二者间压力均可能存在误差。在拍摄腔体截面过程中,切割位置偏差和显微镜成像误差也会使测到的 t 值不准确。此外,所用仪器的稳定性也不够理想,如加热所用的氢氧焰易受到气流和氢气流速不稳定的影响。目前,已有学者利用电阻丝加热的方式可以同时制备多根锥形光纤^[32-33],这个方案能够有效解决氢氧焰不稳定带来的问题。

3.2 花生腔角向出射分析

实验中,我们使用锥形光纤耦合法对花生腔在不同角度下的出射强度进行了测试。激光器输出波长范围 $1\ 540\sim 1\ 560\ \text{nm}$ 。耦合所使用的锥形光纤束腰直径约 $1.5\ \mu\text{m}$,通过三维精密位移台进行位置调节。花生腔中单瓣柱体直径为 $119\ \mu\text{m}$, t 约为 0.88,置于旋转台上。在耦合时,锥形光纤置于花生腔下方,与其轴向保持垂直且与最大截面刚好接触。实验中首先降低锥形光纤高度使二者分离,而后将花生腔旋转至特定角度,并调整三维位移台使锥形光纤缓慢提升,当二者接触耦合时,在示波器上可以看到明显的透射率变化,可以此来判断二者是否接触。通过以上步骤可以使锥形光纤每次与腔体刚好贴上耦合,保证一致的耦合距离。它们的角度关系如图 2(c) 所示,其中,锥形光纤与花生腔两部分圆心连线的夹角定义为 θ 。我们通过将花生腔旋转一周,得到了腔体在各个角度下的耦合透射谱,将 $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 时的透射谱绘制在图 3 中。四幅图中均可以看到密集的尖峰,对应于花生腔内存在的回音壁模式。这里需要注意的是实验所用锥形光纤较细,系统处于过耦合状态。此时,大部分光能量可以耦合进入腔体内部,但只有与模式谐振的部分光能量能够耦合回光纤,所

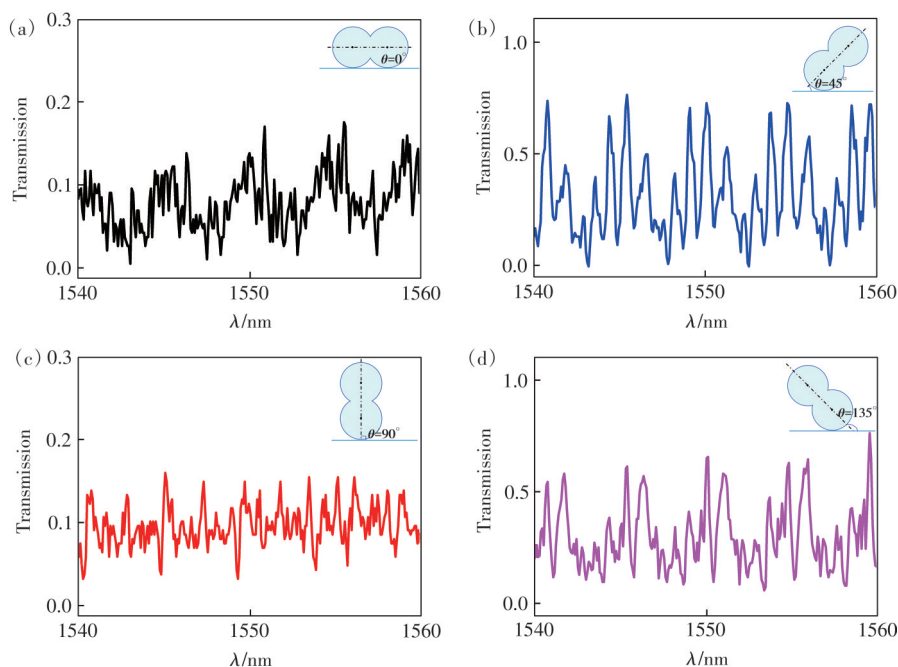


图 3 不同耦合角度透射谱。(a)~(d)分别为 θ 等于 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 的情况

Fig.3 Transmission spectra at different coupling angles. (a)~(d) Correspond to the situations when θ equals to $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$, and 135° , respectively

以透射谱呈现为峰值^[34]。在该直径下,光纤只能维持传输很小比例的高阶模式,高阶模式和纤芯基模一同与腔内WGM发生作用,使得部分模式的两边带存在轻微不对称现象^[35]。从四幅图中可以看到较为清晰的周期性分布,其周期均约4.7 nm,对应于腔体的自由光谱范围。因此,不同角度耦合WGM微腔不会对透射谱上的自由光谱范围产生影响。但不同角度耦合时,激发的回音壁模式在腔体两瓣内的场强分布有所差异,最终造成透射谱上周期性强弱不同。四幅图中的模式强度差异很大,图3(a)、(c)两幅图中峰值普遍在0.2以下,图3(b)、(d)两幅图中的峰值则可以超过0.7。这是因为花生腔由两个柱体融合在一起,打破了各自的圆对称性,使得腔体内部的能量在某些角度上向外辐射较强,这些位置可以与外界发生强耦合^[36];而其余位置只能获得很小的出射强度,耦合较弱。而后,我们利用半高全宽法对四幅图中典型模式的品质因数进行了统计求平均,四幅图中模式对应的 Q 值分别为8 500, 3 229, 8 879, 3 111。这说明在 45° 和 135°

的位置上腔内模式辐射损耗较大,与强度部分的分析相符。

而后,我们测试了腔体在各个角度下的出射强度。由于腔体在旋转中会使耦合位置略有改变,因此并不能保证在所有位置都耦合到同一模式。所以选取1 549~1 551 nm范围内三个模式,对它们的出射强度进行了统计求平均,得到的结果如4(a)所示。可以看到,模式的透射强度呈现四极发射的特点,在 θ 为 40° 、 130° 、 230° 和 320° 四个方向簇上具有较强的透射强度且普遍达到了0.7。且强度由这四个角度向两边逐渐降低,在 0° 、 90° 、 180° 和 270° 四个角度上甚至低于0.2。这说明,花生腔在 40° 、 130° 、 230° 和 320° 这四个位置具有较强的发射效果。此外,四个方向簇内的不同角度上存在多个波动值,这可能是两方面原因造成的。一方面,由于腔内部模式路径不再单一,使模式内光能量在腔内部出现散射,从而以多束形式从腔内发射;另一方面,我们实验中光纤与腔体耦合时存在吸附效应,因此不能保证每次耦合强度完全一致,使得测到的光强度出现小幅波动。

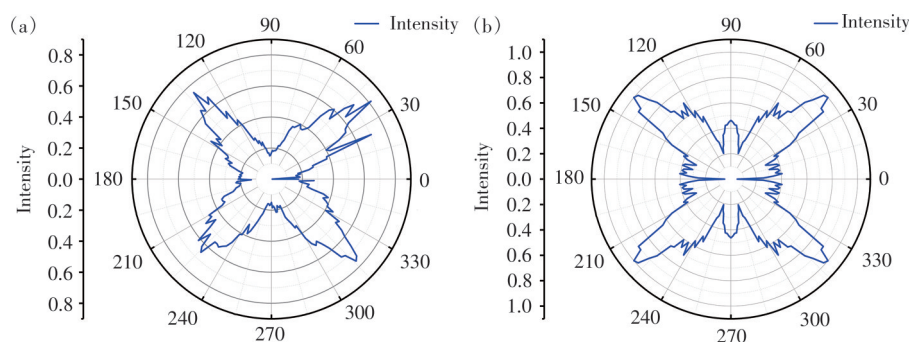


图4 花生腔不同耦合角度下出射强度图。(a)实验结果;(b)仿真结果

Fig.4 Emission intensity diagrams of peanut-shaped cavity under different coupling angles. (a)Experimental results. (b)Simulation results

为了验证上述结果,我们使用COMSOL构建仿真模型对上述实验过程进行了仿真。由于服务器内存限制,仿真中花生腔单瓣柱体的直径设置为 $40\text{ }\mu\text{m}$,两个圆心间距为 $34\text{ }\mu\text{m}$ 。耦合所用锥形光纤直径设置为 $0.45\text{ }\mu\text{m}$,使光纤内模式折射率与腔体内模式折射率匹配,实现高效耦合。设置二者的耦合距离为 $0.2\text{ }\mu\text{m}$,首先通过扫描泵浦波长,测得了在1 554 nm处存在较强的谐振模式。而后,通过将花生腔绕光纤旋转一周,得到了花生腔在不同耦合角度下的透射情况。由于光纤较细,传输损耗较大,我们对出射强度进行了归一化,结果如图4(b)所示。可以看到与实验结果类

似的四极发射情况,在 40° 、 140° 、 220° 和 320° 这四个方向簇上出射强度最大,在 0° 和 180° 方向出射强度最小,这些特性与实验结果基本一致。但仿真结果显示,在 90° 和 270° 方向存在两个明显凸起,实验中并未测到这一现象。猜想可能是由于仿真设置的花生腔是完美对称的,因此在二者呈 90° 耦合时,能够使较强光能量返回到光纤。而实验制备的花生腔两瓣存在一些差异,这些差异使得 90° 和 270° 方向上的出射强度减小。两瓣的差异在一定程度上也打破了腔体的对称性,从而降低了实验中测得的发射角对称性。

3.3 异形花生腔制备与定向发射特性仿真

基于以上工艺,我们分别使用双光纤、双中空微管以及光纤-中空微管组合三种形式进行熔合制备得到了多种非对称花生腔。实验中选择直径为 $220\ \mu\text{m}$ 的光纤与普通单模光纤进行熔合制备,在拉制距离为 $500\ \mu\text{m}$ 时得到的结果如图 5(a)、(b)所示。可以看到两根直径不同的光纤融合在一起,其截面也显示了两瓣直径差异明显的非对称花生形状。理论上,可以通过对光纤预拉制获得具有任意直径的光纤,制备出两瓣具有任意比

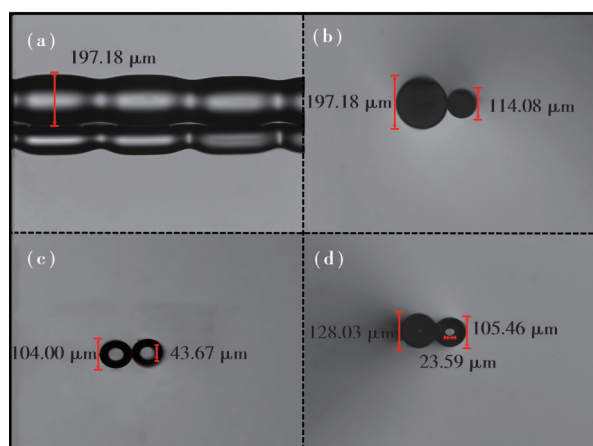


图 5 异形花生腔的显微镜图。(a)~(b)非对称花生腔的俯视图与截面图;(c)中空微管花生腔截面图;(d)非对称中空微管花生腔截面图

Fig.5 Microscopic images of the asymmetric peanut-shaped cavity. (a)~(b)Top view and cross-sectional view of the asymmetric peanut-shaped cavity. (c)Cross-sectional view of the microcore peanut-shaped cavity. (d) Cross-sectional view of the asymmetric microcore peanut-shaped cavity

例的非对称花生腔,满足不同发射角度与强度的需求。此外,我们还利用中空毛细玻璃管与普通光纤熔融进行制备测试,均得到良好的效果。图 5(c)为使用两根外径 $110\ \mu\text{m}$ 、管芯内径 $60\ \mu\text{m}$ 的毛细玻璃管在拉制距离 $500\ \mu\text{m}$ 时的制备结果;图 5(d)为使用外径 $110\ \mu\text{m}$ 、管芯内径 $25\ \mu\text{m}$ 的毛细玻璃管与普通单模光纤的熔合结果。这些腔体中的一瓣或两瓣是毛细玻璃管,这就使其可以利用微流器注入待测液体,利用花生腔内部高品质因数回音壁模式来实现对液体的高灵敏度探测。

基于以上仿真方法,我们在 COMSOL 中构建了不同直径,以及单瓣中空管两种非对称花生腔(如图 5(b)、(d)所示)与光纤耦合的模型。不同直径花生腔中两瓣的直径分别为 $40\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m}$,二者中心距离为 $27\ \mu\text{m}$;中空微管花生腔中两瓣的直径均为 $40\ \mu\text{m}$,其中一瓣为中空微管,管内直径为 $10\ \mu\text{m}$,二者中心距离为 $36\ \mu\text{m}$ 。耦合所用锥形光纤直径为 $0.45\ \mu\text{m}$,与腔体的耦合距离为 $0.2\ \mu\text{m}$ 。首先通过扫描泵浦波长法,测得两种花生腔分别在 $1\ 553\ \text{nm}$ 和 $1\ 558\ \text{nm}$ 处存在谐振模式。将两个模型使用的激励波长分别设置为以上数值,而后通过将光纤的耦合点围绕两种花生腔旋转一周,得到了它们在不同角度下的出射情况。利用出射强度最大值进行归一化后得到的结果如图 6 所示。可以看到与两种非对称花生腔形状对称性一样,它们的出射强度分布均仅有一个对称轴。图 6(a)为不同直径非对称花生腔的出射强度分布,其发射较强的位置更多地分布在较小腔体一侧,这是因为较大腔体在界面处具有更小的

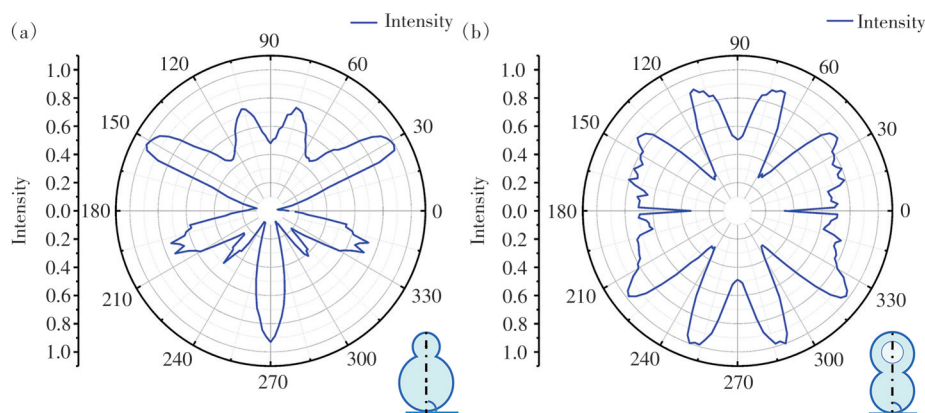


图 6 (a)不同直径非对称花生腔在不同耦合角度下的出射强度图;(b)单瓣中空管非对称花生腔在不同耦合角度下的出射强度图

Fig.6 (a)Emission intensity diagrams of the asymmetric peanut-shaped cavity with different diameters at different coupling angles. (b)Emission intensity diagrams of the single-lobed hollow tube asymmetric peanut-shaped cavity at different coupling angles

曲率,局域效果更好。在 30° 、 150° 和 270° 三个方位的发射强度较大,均超过0.9,其中上面两个峰值是由于两瓣腔体交汇处较小腔体具有散射效果,而 270° 处的峰值是由于较小腔体与光纤耦合点关于大腔中心对称引起发射增强。图6(b)为单瓣中空花生腔的出射强度分布,其中 40° 、 140° 、 220° 和 320° 方向对应图4(b)中的四个发射峰值,只是该模型中分离度 t 为0.9,造成发射角度偏向水平方向。在 90° 附近的两个峰值和 270° 附近的两个峰值对应图4(b)中 90° 和 270° 的较弱发射,但由于该模型中其中一瓣为中空结构,使得该角度发射极产生分裂,且强度增强至约0.9。此外,中空结构的存在使最终发射角度不再关于水平线对称,其下方的发射强度略高于上方。而且 0° 和 180° 两侧原来较弱的发射增强,与原四极发射峰值难以区分,最终使整个结构呈现类八极发射情况。以上模型的仿真结果说明可以通过控制花生腔两瓣的结构参数实现对其发射特性调谐,以满足如定向发射激光器、基于发射角度的传感器等应用对不同发射角度的需求。

4 结 论

本文提出了利用加热拉伸法制备回音壁模式

花生腔方案,首先将两根光纤并列熔融在一起,而后利用二氧化碳激光器进行二次熔融和拉伸,制备得到了回音壁模式花生腔阵列,并对其不同定向发射情况进行了研究。在实验中,我们通过控制参数制备了各种形貌的花生腔,并探究了花生腔形状随着拉制距离的变化趋势,明晰了二者关系。而后,通过调整锥形光纤与花生腔耦合位置,测试了花生腔在不同角向上的出射强度,通过统计各个角向上的出射强度,得到了四极发射的结果。利用仿真软件对类似形貌的花生腔进行了仿真,仿真结果与实验结果吻合,验证了花生腔的四极发射效果。最后,实验验证了利用该工艺能够制备两瓣直径比例为2:1的非对称花生腔,以及中空微管花生腔。本研究通过简单的熔融拉制工艺就可以批量得到具有高品质因数的花生腔,为制备变形WGM微腔提供了新的思路,同时得到的腔体也可用于定向发射激光以及液体高灵敏传感领域,这为基于花生腔的研究与应用提供了新的视角和策略。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250042>

参 考 文 献:

- [1] FENG L, WONG Z J, MA R M, *et al.* Single-mode laser by parity-time symmetry breaking [J]. *Science*, 2014, 346(6212): 972-975.
- [2] ZHOU X C, TAMURA H, CHANG T H, *et al.* Coupling single atoms to a nanophotonic whispering-gallery-mode resonator via optical guiding [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2023, 130(10): 103601.
- [3] SPILLANE S M, KIPPENBERG T J, VAHALA K J. Ultralow-threshold Raman laser using a spherical dielectric microcavity [J]. *Nature*, 2002, 415(6872): 621-623.
- [4] 李文媛, 付鑫鹏, 姚聪, 等. 基于回音壁模式光学微腔的低阈值激光器研究进展 [J]. *发光学报*, 2022, 43(12): 1823-1838.
- LI W Y, FU X P, YAO C, *et al.* Research progress of low threshold laser based on whispering gallery mode microcavity [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(12): 1823-1838. (in Chinese)
- [5] KORENJAK Z, HUMAR M. Smectic and soap bubble optofluidic lasers [J]. *Phys. Rev. X*, 2024, 14(1): 011002.
- [6] GAO Z G, CUI L G, CHU Y S, *et al.* Robust low threshold full-color upconversion lasing in rare-earth activated nanocrystal-in-glass microcavity [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2025, 14(1): 14.
- [7] 姚瑶, 闫胤洲, 蒋毅坚. 光学微腔荧光和拉曼光谱增强技术研究进展 [J]. *发光学报*, 2025, 46(1): 23-45.
- YAO Y, YAN Y Z, JIANG Y J. Recent advances in optical microcavity enhanced fluorescence and Raman spectroscopy [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(1): 23-45. (in Chinese)
- [8] WARD J, BENSON O. WGM microresonators: sensing, lasing and fundamental optics with microspheres [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2011, 5(4): 553-570.
- [9] HU Z G, GAO Y M, LIU J F, *et al.* Picotesla-sensitivity microcavity optomechanical magnetometry [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2024, 13(1): 279.

- [10] ZHANG Y X, SONG Q H, ZHAO D N, *et al.* Review of different coupling methods with whispering gallery mode resonator cavities for sensing [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2023, 159: 108955.
- [11] JIANG X F, SHAO L B, ZHANG S X, *et al.* Chaos-assisted broadband momentum transformation in optical microresonators [J]. *Science*, 2017, 358(6361): 344-347.
- [12] GU Y Z, CHEN L K, QIAN Y J, *et al.* Layered localization in a chaotic optical cavity [J]. *Phys. Rev. E*, 2020, 102(6): 062208.
- [13] SCHWEFEL H G L, REX N B, TURECI H E, *et al.* Dramatic shape sensitivity of directional emission patterns from similarly deformed cylindrical polymer lasers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, 21(5): 923-934.
- [14] LEE I G, GO S M, RYU J H, *et al.* Unidirectional emission from a cardioid-shaped microcavity laser [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(3): 2253-2258.
- [15] JIANG X F, ZOU C L, WANG L, *et al.* Whispering-gallery microcavities with unidirectional laser emission [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2016, 10(1): 40-61.
- [16] LIN J T, FARAJOLLAHI S, FANG Z W, *et al.* Electro-optic tuning of a single-frequency ultranarrow linewidth micro-disk laser [J]. *Adv. Photonics*, 2022, 4(3): 036001.
- [17] KIM M W, PARK K W, YI C H, *et al.* Directional and low-divergence emission in a rounded half-moon shaped microcavity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 98(24): 241110.
- [18] KRAFT M, WIERSIG J. Perturbative analysis of whispering-gallery modes in limaçon-shaped microcavities [J]. *Phys. Rev. A*, 2014, 89(2): 023819.
- [19] LIU X F, HA S T, ZHANG Q, *et al.* Whispering gallery mode lasing from hexagonal shaped layered lead iodide crystals [J]. *ACS Nano*, 2015, 9(1): 687-695.
- [20] HUANG Y Z, LÜ X M, LIN J D, *et al.* Output characteristics of square and circular resonator microlasers connected with two output waveguides [J]. *Sci. China Technol. Sci.*, 2013, 56(3): 538-542.
- [21] KIM M W, PARK K W, YI C H, *et al.* Analysis of broad emission direction in a spiral-shaped microcavity laser [J]. *Opt. Lett.*, 2011, 36(23): 4503-4505.
- [22] ZHAN X P, KU J F, XU Y X, *et al.* Unidirectional lasing from a spiral-shaped microcavity of dye-doped polymers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2015, 27(3): 311-314.
- [23] SHANG L, LIU L Y, XU L. Highly collimated laser emission from a peanut-shaped microcavity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92(7): 071111.
- [24] SHU F J, ZOU C L, SUN F W, *et al.* Mechanism of directional emission from a peanut-shaped microcavity [J]. *Phys. Rev. A*, 2011, 83(5): 053835.
- [25] RYU J W, LEE S Y, KIM I, *et al.* Abnormal high- Q modes of coupled stadium-shaped microcavities [J]. *Opt. Lett.*, 2014, 39(14): 4196-4199.
- [26] YANG H D, XIE C F, WANG M Y, *et al.* Strain sensing based on gourd-shaped optical microresonator [J]. *Opt. Laser Eng.*, 2024, 183: 108470.
- [27] ZHAO J Q, CHENG H B, FENG Y P, *et al.* Wavelength-tunable erbium-doped fiber laser based on peanut structure and U-bent single-mode fiber coated with CS/PAA for Cu^{2+} concentration sensing [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2025, 90: 104081.
- [28] YU X C, TANG S J, LIU W J, *et al.* Single-molecule optofluidic microsensor with interface whispering gallery modes [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2022, 119(6): e2108678119.
- [29] LIN W H, ZHAO F, SHAO L Y, *et al.* Temperature sensor based on Er-doped cascaded-peanut taper structure in-line interferometer in fiber ring laser [J]. *IEEE Sens. J.*, 2021, 21(19): 21594-21599.
- [30] WAN H D, CHEN Y F, ZHOU Q, *et al.* Tunable, single-wavelength fiber ring lasers based on rare earth-doped, double-peanut fiber interferometers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2020, 38(6): 1501-1505.
- [31] LIN W H, ZHOU S J, SHAO L Y, *et al.* In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on Er doped up-taper and peanut-shaped fiber structure in fiber ring laser [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 128126-128132.
- [32] FANG H B, XIE Y, YUAN Z P, *et al.* Parallel fabrication of silica optical microfibers and nanofibers [J]. *Light: Adv. Manuf.*, 2024, 5(2): 260-268.
- [33] FAN W J, LIU W Y, PAN Z W, *et al.* A novel dual-channel thermo-optic locking method for the whispering gallery mode

microresonator [J]. *Chin. Phys. B*, 2024, 33(5): 054206.

[34] CHANG P F, WANG C, JIANG T, *et al.* Optical scrambler using WGM micro-bottle cavity [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2023, 21(6): 060601.

[35] LIU W Y, WANG R, LI W, *et al.* Modulation of Fano-like resonance in spherical microbubble cavity for high sensitivity pressure sensing [J]. *Appl. Phys. Express*, 2022, 15(4): 046504.

[36] ZHANG S X, WANG L, LI Z Y, *et al.* Free-space coupling efficiency in a high-*Q* deformed optical microcavity [J]. *Opt. Lett.*, 2016, 41(19): 4437-4440.



黄潇潇(1999-),女,山西朔州人,硕士研究生,2022年于河北大学获得学士学位,主要从事回音壁模式微腔方面的研究。
E-mail: huangxiaoxiao182@163.com



朱益志(1989-),男,贵州平塘人,博士,副教授,2021年于东南大学获得博士学位,主要从事半导体光电材料与器件、新能源材料的研究。
E-mail: zmxzzhu@163.com



常朋发(1989-),男,河北邯郸人,博士,讲师,2019年于南开大学获得博士学位,主要从事回音壁模式微腔方面的研究。
E-mail: changpengfa@tyut.edu.cn