

回音壁模式光学微腔的模式激发效率研究

温钦,周恒*,邱昆

(电子科技大学 光纤传感与通信教育部重点实验室,成都 611731)

摘要:针对回音壁模式(WGM)光学微腔中模式高效激发的需求,基于有限元软件 COMSOL 对模式电场分布的计算结果,设计了一种对于 WGM 激发效率的仿真方法。该方法可以对微腔与锥形光纤在不同耦合条件下不同模式的谐振峰最大深度进行仿真计算,从而确定该模式得到高效激发的耦合条件。在此基础上对模式的激发效率控制和高阶方位角模式的激发进行了仿真分析,结果表明:选择尺寸匹配的锥形光纤,通过精细调整耦合距离,可以实现对所加工微棒腔的基模从欠耦合到过耦合的激发控制;通过耦合位置的调整,可以实现对其高阶方位角模式的高效激发。

关键词:回音壁模式;光学微腔;耦合效率

中图分类号:O436;TN929 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2021)07-0033-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.07.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research on mode excitation efficiency of
whispering gallery mode optical microcavity

WEN Qin, ZHOU Heng*, QIU Kun

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communication, Ministry of Education, University of
Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Aiming at the requirement of efficient excitation of whispering gallery mode(WGM) in optical microcavity, and based on the calculation results of mode electric field distribution by finite element software COMSOL, a simulation method for the excitation efficiency of WGM is designed. The method can be used to simulate the maximum depth of resonant peak of different modes under different coupling conditions of microcavity and tapered fiber, so as to determine the coupling condition of efficient excitation of the mode. On this basis, the excitation efficiency control of the mode and the excitation of high-order azimuth modes are simulated and analyzed. The simulation results show that by selecting a tapered fiber with a matching size and finely adjusting the coupling distance, the excitation control of the fundamental mode of the fabricated microrod cavity from under-coupling to over-coupling can be achieved. By adjusting the coupling position, the high-order azimuth modes can be excited with high efficiency.

Key words: whispering gallery mode; optical microcavity; coupling efficiency

0 引言

回音壁模式(WGM)光学微腔凭借其低吸收的介电材料和光滑的表面,通过全反射将光约束在较窄的

收稿日期:2020-12-31。

基金项目:国家重点研发计划(2019YFB2203103)资助;国家自然科学基金(61705033)资助。

作者简介:温钦(1988—),男,四川江油人,博士生,现就读于电子科技大学信息与通信工程学院通信与信息系统专业,主要从事回音壁模式光学微腔和基于回音壁模式光学微腔的光学非线性效应的相关应用研究工作。

*通信作者:周恒(1983—),男,博士,副教授,研究方向为硅基光子学集成光通信器件与芯片、超快光学与光学频率梳以及非线性光学。



区域内,具有极高的品质因子(Q 值)与较小的模式体积,因此成为极具应用前景的新型光学器件^[1]。迄今为止,其研究成果已经覆盖物理学科各个领域,在非线性光学、光学传感、光电器件和大容量相干光通信等领域得到了广泛研究和应用^[2-5]。

WGM 光学微腔通常具有众多的模式,其中基模具有最小的模式体积,可以极大地提升光与物质的相互作用,成为研究和应用中被普遍采用的模式^[6]。然而,不同的应用对于模式体积的要求是不同的。例如,非线性光学效应的研究中,通常需要最小的模式体积,以最大化地降低泵浦光阈值功率,但在生物传感等应用中,却可能受益于相对较大的模式体积^[7]。因

此,根据不同的应用需求激发 WGM 光学微腔的不同模式具有现实的意义。除此之外,模式的高效激发对于研究和应用也至关重要,模式的临界耦合甚至过耦合的激发在某些应用中是必要的^[8]。

本文以微棒腔为例,对 WGM 光学微腔与锥形光纤耦合系统中模式的激发效率进行研究。

1 WGM 激发理论分析

根据经典电磁理论,均匀分布的线性各向同性介质的光学微腔可以简化为标量赫姆霍兹方程。规则的球形或柱形通过变量分离法可以求得模式分布^[9]。每个谐振模式可以用 p, n, l, m 这 4 个量子数来表示,其中 p 为偏振方向(TE 或者 TM); n 为径向模式数,描述光场的径向分布在腔内的波节数; l 为角向模式数,描述光场在赤道面的波节数; m 为方位角模式数,描述光场在子午面的波节数。

图 1 为使用有限元软件 COMSOL 对微棒腔的模式电场分布的仿真结果,其中 V 是根据其电场分布数据计算得到的模式体积。一般称 $n=1, l=m$ 的模式为基模,其具有最小的模式体积。由仿真结果可见, n 越大则模式的电场分布越靠腔内,模式体积越大; $l=|m|+1$ 越大,则模式分布越趋向两极,模式体积越大且分布越分散。

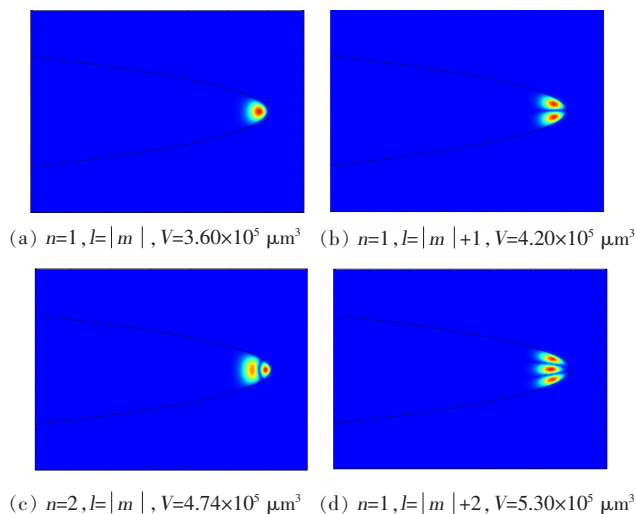


图 1 微棒腔模式的电场分布

在实验中,通常采用近场耦合器件将光导入、导出微腔。本文选择锥形光纤作为耦合器,以达到较高的耦合效率。根据锥形光纤耦合模式理论,微腔与锥形光纤之间的耦合系数^[10]可表示为:

$$\eta_{cl} = \frac{\omega \Delta \epsilon}{4} \iint_{V_c} \vec{E}_t \vec{E}_c \exp(i \Delta \beta z) dV \quad (1)$$

其中, ω 为光的谐振角频率, $\Delta \epsilon$ 为微腔与空气之间介电常数差值, $\vec{E}_t$ 和 $\vec{E}_c$ 分别为锥形光纤和微腔轴向横截面内的归一化光场; $\Delta \beta$ 为微腔与锥形光纤传播常数的差值, z 为锥形光纤的轴向距离, V_c 为微腔的总体积。

当入射激光进入模式的谐振峰,根据耦合系数可以进一步计算得到锥形光纤的功率透过率为:

$$T = \left| \frac{E_{out}}{E_{in}} \right|^2 = \left| \sqrt{1 - |\eta_{cl}|^2} - \frac{2\kappa_l(\kappa_l + \kappa_c + i\Delta\omega)}{(\kappa_l + \kappa_c + i\Delta\omega)^2} \right|^2 \quad (2)$$

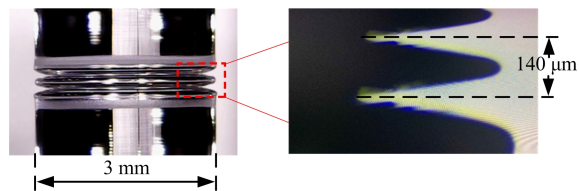
其中, E_{out} 为透过微腔的光的电场, E_{in} 为入射光的电场, κ_l 和 κ_c 分别为本征衰减率和耦合率, $\Delta\omega$ 代表入射激光频率相对模式谐振频率的失谐量。因为 $\eta_{cl} \ll 1$, 故谐振峰最深处的锥形光纤功率透过率可简化为:

$$T_p = \left| \frac{\kappa_l - \kappa_c}{\kappa_l + \kappa_c} \right|^2 \quad (3)$$

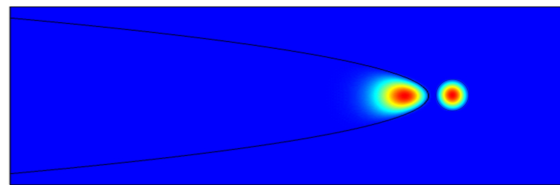
当 $\kappa_l > \kappa_c$ 时,系统处于欠耦合状态,此时大部分光未耦合进入微腔,因此 $T_p > 0$; 当 $\kappa_l = \kappa_c$ 时,锥形光纤的光都被耦合入微腔,且都被消耗,此时 $T_p = 0$,称为临界耦合态; 当 $\kappa_l < \kappa_c$ 时,耦合入微腔的光又重新耦合回光纤,此时 $T_p > 0$,系统处于过耦合状态。

2 WGM 激发效率仿真研究

本文在直径为 3 mm 的熔融石英棒上用 CO₂ 激光融刻加工厚度为 140 μm 的微棒腔^[11],其形态如图 2(a)所示。利用有限元软件 COMSOL 对微棒腔进行物理建模并对其模式的电场分布进行频域仿真。同样地,也可以对锥形光纤的模式电场分布进行仿真。采用热拉法加工的锥形光纤的锥腰部分直径约为 2 μm,并均匀过渡到直径数十微米的纤芯。由于微腔和锥形光纤的倏逝场作用范围都相对较小,两者耦合时,可以将耦合点附近锥形光纤的直径简化为常数。同时,



(a) 微棒腔及放大图



(b) 微棒腔及锥形光纤仿真

图 2 微棒腔实物及仿真图

将沿锥形光纤轴向的微棒腔横截面的模式电场分布简化为与子午面相同,且按照其弧面形状的变化增大与锥形光纤的距离,如图2(b)所示。长、短轴分别为 $1500\text{ }\mu\text{m}$ 与 $70\text{ }\mu\text{m}$ 的微棒腔与锥形光纤耦合,锥形光纤与微棒腔的赤道面平行,耦合点处光纤半径约 $4\text{ }\mu\text{m}$,两者距离为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。将两者模式的电场分布分别仿真后,按照其相对位置关系,将其置于同一坐标系下。基于COMSOL超精细的网格化,即可利用仿真数据根据式(1)进行求和积分计算出 η_{cl} ,然后进一步求得 T_p 。

基模是实验和应用中最常用的模式,因此本文首先对基模的耦合效率进行分析。由式(1)可知,耦合系数的大小取决于微腔与锥形光纤倏逝场的重叠度以及两者的传播常数匹配程度。图1(a)中,基模的电场集中分布于微棒腔顶端,故应当使锥形光纤平行于微腔赤道面且靠近顶端,以扩大其电场相互作用区域,通过改变耦合点的光纤半径获得匹配的传播常数。然后,使用半径分别为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 、 $4\text{ }\mu\text{m}$ 和 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的锥形光纤进行耦合,在不同半径下改变微腔与锥形光纤的相对距离并求得 T_p ,得到锥形光纤不同半径耦合时随耦合距离变化透过率的变化如图3所示。可以看出,仅当锥形光纤半径 $R=4\text{ }\mu\text{m}$ 时,基模可以达到过耦合状态; $R=5\text{ }\mu\text{m}$ 或者 $3\text{ }\mu\text{m}$ 时,均只能达到临界耦合状态。根据COMSOL的仿真结果, $R=3\text{ }\mu\text{m}$ 、 $4\text{ }\mu\text{m}$ 和 $5\text{ }\mu\text{m}$ 时基模的有效模式折射率分别为1.4423、1.4398和1.4347,而微棒腔基模的有效模式折射率为1.4445,因此 $R=4\text{ }\mu\text{m}$ 时实际并不是最佳传播常数匹配状态。但是,随着 R 增大,锥形光纤的疏逝场范围减弱,从而使得微腔与锥形光纤模场的重叠度降低。因此,对于半径为 3 mm 的微棒腔基模,通过耦合点锥形光纤半径的精细调整,可以在耦合距离小于 100 nm 时达到临界耦合与较弱的过耦合。

与基模一样,高阶径向模式相对于赤道面对称分布。因此,为了高效激发高阶径向模式,应该按照上述对基模的高效激发相同的策略,通过耦合点锥形光

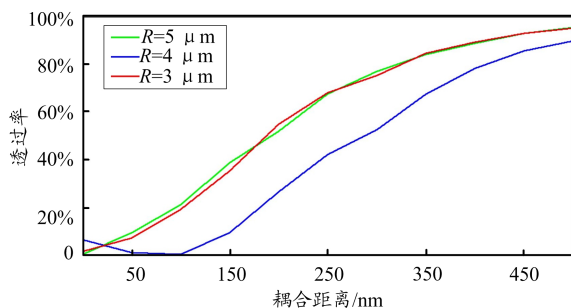


图3 使用锥形光纤不同半径耦合时随耦合距离变化透过率的变化

纤粗细与耦合距离的精细调整来实现。从图1(b)和图1(d)中微棒腔模式的电场分布可知,奇数阶方位角模式的电场主要分布于赤道面附近,而偶数阶方位角模式的电场则对称分布于赤道面上下半球。因此,当锥形光纤与微棒腔赤道面平行时仅仅能高效激发奇数阶方位角模式。偶数阶方位角模式的高效激发,则需要锥形光纤偏移赤道面适当距离。本文使用COMSOL分别对微棒腔和锥形光纤进行模式分布后,利用第1节的相关公式计算出谐振峰最深处的锥形光纤功率透过率,计算结果如表1所示。锥形光纤与微腔赤道面平行且耦合间距约 100 nm 时,低阶径向模式得到高效激发,而二阶方位角模式耦合效率较低;当锥形光纤向上平移 $3\text{ }\mu\text{m}$ 且调整耦合间距使二阶方位角模式高效激发时,径向低阶模式的耦合效率大幅变低,由此实现了高阶模式的选择性高效激发。

表1 不同耦合条件时的谐振峰最大功率透过率

模式	谐振峰最大功率透过率	
	锥形光纤 平行赤道面	锥形光纤较赤道 面上移 $3\text{ }\mu\text{m}$
$n=1, l= m +1=1$	0.52%	48.7%
$n=2, l= m +1=1$	4.93%	66.7%
$n=1, l= m +1=2$	95.2%	15.6%
$n=3, l= m +1=1$	9.9%	70.3%

3 WGM 激发效率实验验证

在实验中,本文通过测量微棒腔模式的功率透过谱对模式激发效率进行测量。使用Santec的TSL-550可调谐激光器在 $1550\sim 1551\text{ nm}$ 的波长范围内以 5 nm/s 的速度进行波长扫描,使用示波器记录出腔后的功率透过谱。搭建的微棒腔与锥形光纤耦合系统如图4所示,锥形光纤固定在三轴电动位移台,每个轴均以 30 nm 的精度进行调整,从而实现微棒腔与锥形光纤相对位置的精细调整。

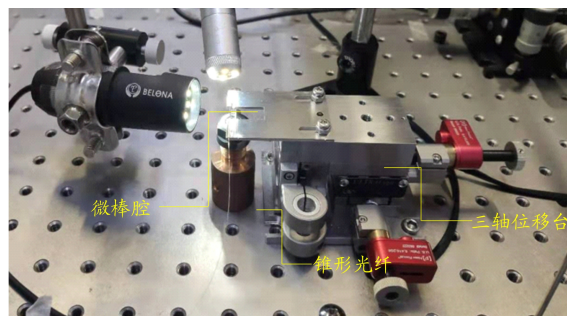


图4 微棒腔与锥形光纤耦合结构

3.1 模式的激发效率控制

为了高效激发基模,首先改变耦合点的锥形光纤直径,以找到匹配度较好的光纤尺寸范围,这可以通过观察微腔与锥形光纤接触时谐振峰的深度来实现。根据图3的仿真结果,对直径为3 mm的微棒腔,需要精细调整耦合点的光纤直径,且将锥形光纤调整到与微腔距离较近的条件下才可能达到过耦合状态。本文使用电动位移台进行精细调整,测试了不同耦合距离的功率透过谱。模式的激发效率控制情况如图5所示,图中蓝色、桔色和红色线分别为微腔与锥形光纤距离150 nm、90 nm和30 nm时的功率透过谱,黑色虚线框所标注的部分是一个模式分别处于欠耦合、临界耦合以及过耦合的透过谱状态。可以看出,使用直径为3 mm的微棒腔仅达到了谐振峰较深的过耦合状态,与仿真结果一致;同时,微腔与锥形光纤距离越短所激发的模式越明显,这是由于更近的耦合距离使得高阶径向模式得到激发。

3.2 高阶方位角模式的激发

为了实现高阶方位角模式的高效激发,本文分别在锥形光纤与微棒腔的赤道面平行和锥形光纤上移3 μm 时记录功率透过谱,分别如图6中的黑色与红色

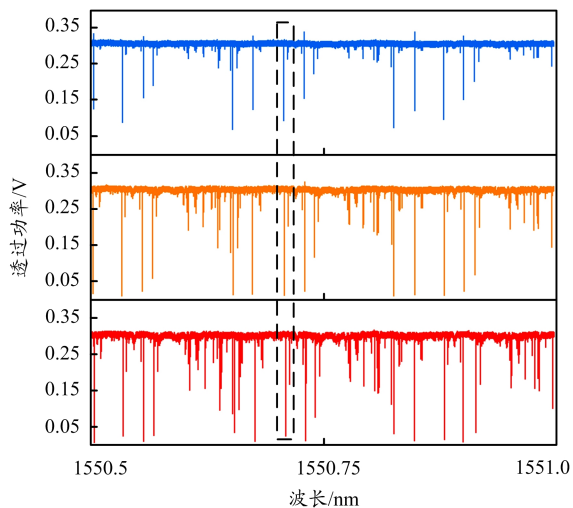


图5 模式的激发效率控制

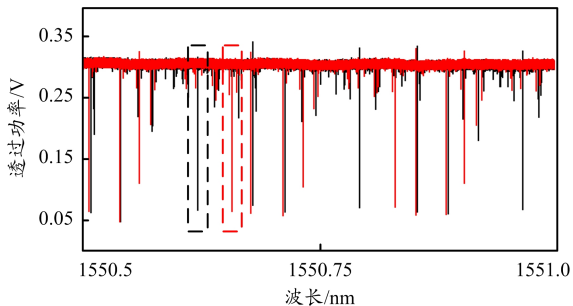


图6 高阶方位角模式的激发

谱线所示。实验中通过调整耦合距离,使得激发模式较少且透过谱较深,以便于识别。可以看出,黑色虚线框的模式在锥形光纤上移3 μm 时明显变浅,红色虚线框中的模式则在锥形光纤上移3 μm 时被高效激发。实验结果与仿真相吻合,说明高阶方位角模式得以高效激发,而部分低阶方位角模式被抑制。

4 结束语

本文采用有限元软件 COMSOL 对光学微腔与锥形光纤进行模场仿真,提出了一种计算 WGM 激发效率的方法。使用该方法,对所加工的微棒腔与锥形光纤的耦合系统进行了仿真分析,确定其基模和高阶方位角模式得到高效激发的耦合条件,并通过实验进行验证。实验结果与仿真结果实现了较好的匹配,验证了所提出的仿真方法在 WGM 光学微腔的模式激发效率研究中的有效性。该方法提供了一种对 WGM 激发效率快速准确的研究手段,对实验和应用具有良好的指导意义。

参考文献:

- [1] 邹长铃,董春华,崔金明,等.回音壁模式光学微腔:基础与应用[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2012,42(11):1155-1175.
- [2] SPILLANE S M, KIPPENBERG T J, VAHALA K J. Ultralow threshold Raman laser using a spherical dielectric microcavity [J]. Nature, 2002, 415: 621-623.
- [3] DONG C H, HE L, XIAO Y F, et al. Fabrication of high-Q polydimethylsiloxane optical microspheres for thermal sensing[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(23): 231110-1-231110-3.
- [4] LU T, YANG L, LOON R V A V, et al. On-chip green silica upconversion microlaser[J]. Optics Letters, 2009, 34(4): 482-484.
- [5] MARIN-PALOMO P, KEMAL J N, KARPOV M, et al. Microresonator-based solitons for massively parallel coherent optical communications[J]. Nature, 2017, 546: 274-279.
- [6] VAHALA K J. Optical microcavities[J]. Nature, 2003, 424: 839-846.
- [7] MURUGAN G S, WILKINSON J S, ZERVAS M N. Selective excitation of whispering gallery modes in a novel bottle microresonator[J]. Optics Express, 2009, 17(14): 11916-11925.
- [8] PFEIFFER M H P, LIU J, GEISELMANN M, et al. Coupling ideality of integrated planar high-Q microresonators [J]. Physical Review Applied, 2016, 7(2): 024026-1-024026-8.
- [9] 玻恩,沃尔夫.光学原理[M].杨葭孙,译.北京:科学出版社,1978.
- [10] ZOU C L, YANG Y, DONG C H, et al. Taper-microsphere coupling with numerical calculation of coupled-mode theory [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2008, 25(11): 1895-1898.
- [11] DEL'HAYE P, DIDDAMS S, PAPP S B. Laser-machined ultra-high-Q microrod resonators for nonlinear optics [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(22): 221119-1-221119-4.