

# 光学学报

## 回转椭球体氟化钙毫米晶体微腔制备与谐振特性分析

王梦宇<sup>1,2</sup>, 杨煜<sup>2</sup>, 吴涛<sup>1\*</sup>, 刘彬<sup>1</sup>, 伏燕军<sup>1</sup>, 王克逸<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup>南昌航空大学无损检测教育部重点实验室, 江西 南昌 330063;

<sup>2</sup>中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230026

**摘要** 氟化钙晶体微腔相比玻璃材料微腔, 具有吸收系数小、缺陷少、纯度高、对周围环境湿度不敏感的优势, 在微波光子学、陀螺仪和非线性光学等领域具有潜在的应用价值。通过超精密加工技术制备了回转椭球体氟化钙毫米晶体微腔。研发了一套精密加工系统来制备这种微腔, 所制得的微腔形状为回转椭球体, 微腔结构边缘表面粗糙度低至 1.97 nm。使用光纤锥波导与氟化钙微腔实现了高效耦合, 此耦合系统展现了高达  $\sim 10^8$  的超高品质因子  $Q$  值和低至约 0.03 nm 的自由光谱范围。这些结果证明了针对氟化钙微腔的加工手段具有重要意义, 将大大促进其应用。氟化钙微腔的特性也证明了它在光学滤波器、腔量子动力学、非线性光学和陀螺仪等应用中的潜力。

**关键词** 光学器件; 光学微腔; 超精密加工; 光学谐振器; 回音壁模式

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0823019

## Fabrication and Resonance Characteristic Analysis of Spheroid Calcium Fluoride Millimeter Crystalline Microcavity

Wang Mengyu<sup>1,2</sup>, Yang Yu<sup>2</sup>, Wu Tao<sup>1\*</sup>, Liu Bin<sup>1</sup>, Fu Yanjun<sup>1</sup>, Wang Keyi<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Nondestructive Test of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China;

<sup>2</sup>Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** Compared with glass microcavity, a calcium fluoride ( $\text{CaF}_2$ ) crystalline microcavity has the advantages of small absorption coefficient, fewer defects, higher purity, and being insensitive to ambient humidity. It has potential applications in microwave photonics, gyroscopes, and nonlinear optics. In this paper, a spheroid  $\text{CaF}_2$  millimeter crystalline microcavity is fabricated by the ultra-precision machining technology. To fabricate such a microcavity, a home-made precision machining system is developed. The shape of the fabricated microcavity is a spheroid, and the surface roughness of the edge of the microcavity is as low as 1.97 nm. Efficient coupling between the tapered fiber waveguide and the  $\text{CaF}_2$  crystalline microcavity is achieved. The coupling system exhibits an ultra-high-quality ( $Q$ ) factor up to  $\sim 10^8$  and a free-spectral-range as low as  $\sim 0.03$  nm. These results demonstrate that the fabrication method for the  $\text{CaF}_2$  crystalline microcavity is significant, and can promote its applications. The characteristics of  $\text{CaF}_2$  crystalline microcavity also prove its potential in optical filter, cavity quantum electrodynamics, nonlinear optics, and optical gyroscope.

**Key words** optical devices; optical microcavity; ultra-precision machining; optical resonator; whispering-gallery mode

**OCIS codes** 230.3120; 280.1415; 230.3990; 230.7370

收稿日期: 2020-06-01; 修回日期: 2020-06-21; 录用日期: 2020-07-06

基金项目: 国家自然科学基金(61775209, 61275011)、江西省重点研发计划(20192BBH80019)

\* E-mail: wutccnu@nchu.edu.cn; \*\* E-mail: kywang@ustc.edu.cn

## 1 引言

光学微腔<sup>[1]</sup>可将光以行波模式在腔内传输,形成稳定的回音壁模式<sup>[2]</sup>。目前研究人员已经对各种材料和结构的微腔进行了深入研究,如今光学微腔已在高灵敏度传感、非线性光学、腔量子动力学、低阈值激光器等众多领域有广泛的应用<sup>[2-3]</sup>。传统的微腔主要集中于片上的硅基材料和二氧化硅熔融的玻璃材料。基于硅基材料的片上微盘及微环腔易于集成,并且可批量化生产,但其固有的材料损耗及较低的制作工艺精度等决定了品质因子(Q 值)局限于  $10^4 \sim 10^6$  量级<sup>[4]</sup>。基于玻璃材料微球腔,通过二氧化碳(CO<sub>2</sub>)激光熔融的方法制备光学微腔时,Q 值可达到  $10^7 \sim 10^8$  量级<sup>[5]</sup>,但此类微腔存在的问题有:1)正常环境下,石英材料对水蒸气很敏感,因此不够稳定<sup>[6]</sup>;2)玻璃材料二阶非线性系数几乎为零,无法完成二倍频转换。

氟化物晶体材料对周围环境湿度不敏感,相比传统的玻璃材料具备非线性系数大、吸收系数小、缺陷少和纯度高的优势。其中,氟化钙晶体的光损耗极小、透明窗口极广,可用于制作超高 Q 值微腔<sup>[7]</sup>,在低相噪光电振荡器、量子动力学、非线性光学应用等方面显现出了重要的应用价值<sup>[8-11]</sup>。氟化钙晶体微腔具有极强的场增强效应,泵浦光与谐波光都在腔中共振,使得其非线性效应,尤其是三阶非线性效应(包括受激拉曼散射<sup>[9]</sup>、受激布里渊散射<sup>[10]</sup>、四波混频甚至克尔光频梳效应<sup>[11]</sup>)的起振阈值大大降低。光频梳在精细频谱分析、气体检测和测距等领域有重要应用<sup>[12]</sup>。

2006 年,加州理工学院 Grudin 等<sup>[13]</sup>通过机械抛光加工研制出了氟化钙微腔,Q 值达到了  $4 \times 10^8$ 。2007 年 Savchenkov 等<sup>[7]</sup>继续采用高温退火,将 Q 值进一步提高到了  $10^{11}$ <sup>[7]</sup>。该方法保留了晶体材料高纯度、低缺陷的特性,制备的微腔能够达到极高的 Q 值,但是制备过程中无法做到精准控制微腔的形状。另外,2017 年,日本庆应义塾大学 Mizumoto 等<sup>[14]</sup>采用单点金刚石车削技术制备了氟化钙微腔,Q 值为  $4.6 \times 10^6$ 。通过计算机控制精密车床,对氟化钙晶体进行车削加工,从而控制微腔的形状。

国内对氟化钙微腔的研究相对较晚,2014 年,中国科学院上海光学精密机械研究所 Lin 等<sup>[15]</sup>采用飞秒激光烧蚀结合聚焦离子束抛光技术制备了氟化钙微腔,开启了国内研究氟化钙微腔的先河,所得

结构的 Q 值达到  $4.2 \times 10^4$ ,该方法具有加工精度高、灵活性大的特点,在微米级的氟化钙晶体微腔加工方面具备优势。2015 年,中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室卢晓云等<sup>[16]</sup>结合机械抛光和化学抛光法制备了粗糙度在纳米级别的光滑表面毫米级氟化钙微腔,得到的 Q 值为  $2.1 \times 10^6$ ,这是国内首次采用精密抛光的方法加工氟化钙微腔,避免了单纯机械抛光或者化学抛光造成加工速度慢的问题,有效地制备了高 Q 值氟化钙晶体微腔。2019 年,中国科学技术大学 Wang 等<sup>[17]</sup>在精加工的过程中制备了 V 型氟化钙微腔,并采用纳米粒子悬浮液抛光的方法将 Q 值提升到了  $10^8$  量级,这也是国内实现的 Q 值最高的氟化钙微腔,但是文中对制备工艺未进行详细论述。此外,2019 年,浙江工业大学郭栋等<sup>[18]</sup>通过理论研究了氟化钙微腔光热振荡探测,有效计算出腔内的热耗散率。

本文从回转椭球体晶体微腔的制备出发,详细介绍了基于晶体微腔超光滑表面的加工设备开发和制备工艺。此加工系统结合了计算机程控系统和超精密抛光技术,可加工超光滑表面,且具有精度高、可靠性高、完全程控化的优势。分析了加工过程中粗抛和精抛对腔体表面粗糙度的影响。搭建了耦合探测系统,用来测试加工后晶体微腔的光学谐振特性。从分析的结果可知,激发出的谐振模式 Q 值大于  $10^8$ ,这证明了所搭建加工系统的有效性,所加工的晶体微腔在光学滤波器、非线性光学、腔量子动力学、光学陀螺仪等领域极具应用前景。

## 2 回转椭球体晶体微腔的制备

### 2.1 加工系统设计

实验中,采用超精密抛光的方法制备了旋转对称型氟化钙微腔,如图 1 所示。加工的氟化钙微腔为盘状的圆环型,圆环的半径为  $R$ ,侧壁形状可近似为半径为  $r$  的小圆弧,整个结构为回转椭球体。在正交的曲线坐标系  $u\theta\varphi$  中,应用文献<sup>[19]</sup>中的理论,电场模式可表示为

$$E(\varphi, \theta, u) = C \times \exp(im\varphi) \times \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\theta_m^2}\right) H_p(\theta/\theta_m) \times \text{Ai}\left(\frac{u}{u_m} - \zeta_q\right), \quad (1)$$

式中: $q$  表示腔内的径向模式数; $m$  表示角向模式数; $p$  表示极向模式数; $C$  为归一化常数; $\theta_m = (R/r)^{3/4} m^{-1/2}$ ;  $H_p(\zeta)$  是  $p$  阶厄米特多项式; $u_m = R/(2^{1/3} m^{2/3})$ ;  $\zeta_q$  是 Airy 方程  $\text{Ai}(-\zeta) = 0$  的解。电场模式对应的谐振频率可表示为

$$\nu = \frac{c}{2\pi n_1 R} \left[ l + \zeta_q \left( \frac{l}{2} \right)^{\frac{1}{3}} + p \left( \sqrt{\frac{R}{r}} - 1 \right) - \frac{N \cdot n_1}{\sqrt{n_1^2 - 1}} + \sqrt{\frac{R}{4r}} + O(l^{-\frac{1}{3}}) \right], \quad (2)$$

式中:  $l = p + m$ ;  $n_1$  为晶体材料的折射率;  $O(l^{-1/3})$  是 Airy 方程的高阶项。当处于横电模 (TE 模式) 下,  $N = 1$ , 而当处于横磁模 (TM 模式) 下,  $N = 1/n_1^2$ 。利用实验室制备的回转椭球体晶体微腔结构的数据 ( $R = 9.86 \text{ mm}$ ,  $r = 2.85 \text{ mm}$ ), 计算其基模回音壁模式下的场分布 ( $q = 1, m = 10^5, p = 0$ )。可以看到, 电场沿着腔体边缘分布, 因为晶体微腔尺寸较大, 所以对应的  $m$  和  $l$  比较大。

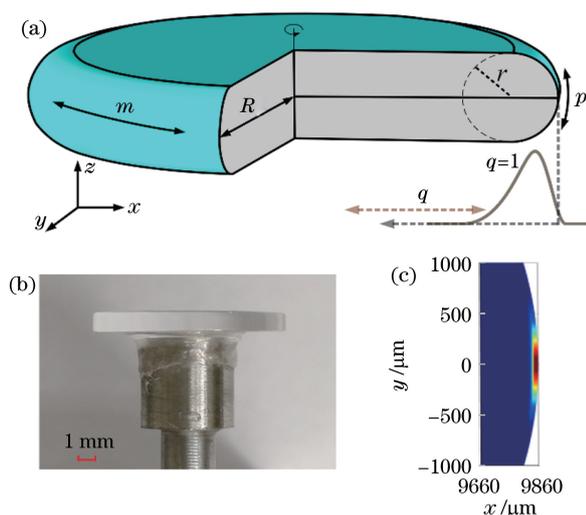


图 1 回转椭球体晶体微腔结构示意图, 实验室制备的晶体微腔结构, 以及晶体微腔基模的截面模场分布图。(a) 回转椭球体晶体微腔结构示意图; (b) 实验制备的晶体微腔; (c) 晶体微腔基模的截面模场分布图

Fig. 1 Diagram of spheroid crystalline microcavity, fabricated crystalline microcavity, and section field distribution of fundamental mode of crystalline microcavity. (a) Schematic of spheroid crystalline microcavity; (b) fabricated crystalline microcavity; (c) section field distribution of fundamental mode of crystalline microcavity

为制备具有超光滑表面的氟化钙晶体微腔, 针对性地开发了一套晶体微腔加工、抛光的集成平台, 其主要装置为高精度气浮轴承 (Canon AB-50R), 通过气浮系统减小轴承转动过程中的振动和摩擦, 保证轴承稳定地带动晶体样品转动。采用无刷直流电机驱动, 并通过配备编码器来控制主轴, 采用上位机软件实时控制主轴的转速。将商用的  $z$  切氟化钙晶体圆盘样品固定在金属铝棒上, 中间采用黄铜连接, 利用卡嘴夹持金属铝棒, 这样方便安全夹持和取用晶体样品。

除了高精度气浮轴承外, 集成平台还包括伺服控制系统、高精度移动台 (Newport)、针对结构设计的专用抛光盒、抛光液循环系统、无尘无水供气系统、高倍显微成像系统以及上位机控制系统, 如图 2 所示。伺服控制系统包括驱动器、控制器和编码器, 驱动器采用 TRUST 公司生产的线性驱动器 (TA310), 控制器采用 Arduino 控制芯片, 编码器采用 PENON 公司生产的旋转编码器。工作时, 上位机给控制芯片发送指令, 驱动器将电脉冲转化为角位移以驱动电机按设定的方向和速度转动, 同时转动的信号也会被反馈到控制器中, 使转速更加平稳。高精度移动台用于控制抛光盒二维压电平台 (在  $x$ 、 $y$  方向运动),  $x$ 、 $y$  方向的运动由上位机系统程控, 同样上位机系统给控制芯片发送指令, 东方 VEXTA 驱动器按设定的方向转动一个固定的角度, 将采集到的位置信息与目标位置进行比对, 采用比例、积分和微分 (PID) 算法使平移台精准、平稳地到达预定位置。

定制的抛光盒用于盛放装有抛光液的抛光垫, 抛光液循环系统定向选择不同径粒的纳米颗粒以对晶体进行多级抛光。金刚石的莫氏硬度比氟化钙晶体材料要高很多, 其颗粒能有效地用于对氟化钙晶体样品的加工, 配备不同径粒大小的抛光膏和抛光液, 用于实现不同程度的精度效果。另外, 压缩后的空气经过无尘无水供气系统, 在多级除水除尘后进入轴承的空气间隙内, 作为气浮轴承润滑剂。加工过程中, 显微成像系统采用长焦距高倍镜头, 用来实时观察晶体表面的加工情况, 以确保加工过程中晶体微腔的侧表面形貌均匀。这些都为制备超高  $Q$  值氟化钙晶体微腔提供了安全可靠的有效保障。

## 2.2 制备过程

加工前, 将金属铝棒固定在气浮轴承的卡嘴上, 通过上位机程序控制电机的转速, 便可实现对样品的加工。将加工过程分为粗磨、粗抛和精抛三个步骤, 如图 3 所示, 分别选用砂纸、金刚石研磨膏和金刚石悬浮液对晶体样品进行加工。粗磨的作用是定型, 会产生很多划痕, 粗抛的作用就是消除这些划痕。为减小样品被划伤的概率, 用上位机控制抛光盒来回打转画圆, 使加工的表面更加均匀。精抛的抛光垫需要选用特别精细和柔软的抛光绒布, 否则会在样品表面留下不可去除的凹痕, 精抛后可获得

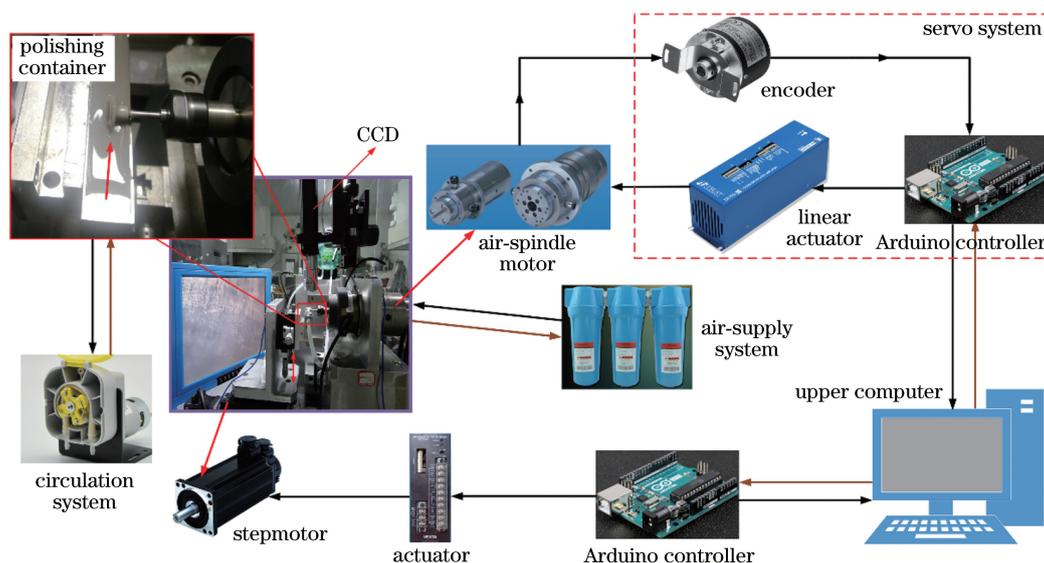


图 2 晶体微腔加工集成系统实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of integrated experimental setup for crystalline microcavity fabrication

高  $Q$  值晶体微腔。每一级抛光后的加工样品都需要用乙醇溶液清洗,以保证没有杂质进入下一级。在粗磨和粗抛的过程中,必须严格控制系统的温度、压力等环境因素。另外,每一级抛光过程中,都必须用显微镜实时观察表面,以确定是否进入下一级抛光。粗磨的过程会在样品表面留下较大的痕迹,粗磨完成后样品的质量会得到改善,但表面仍会出现微小的划痕。加工进入精抛阶段后,在显微镜下就无法看到样品表面的特征。经过最后一级精抛后,样品表面会变得光洁明亮,得到超光滑表面的晶体微腔,如图 3 中 III 所示。

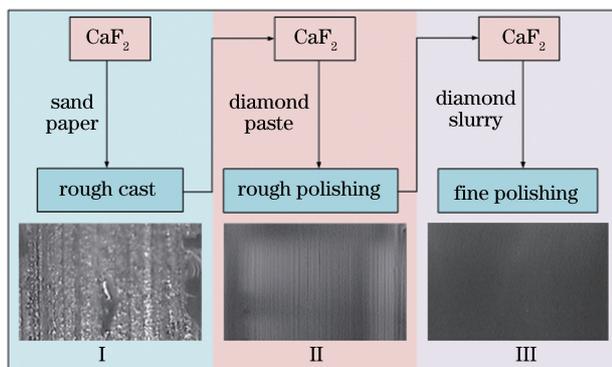


图 3 晶体微腔制备工艺流程及高倍显微镜下观察到的表面成像图

Fig. 3 Flow chart of crystalline microcavity fabrication process and surface images obtained by high-powered microscope

### 3 实验与分析

#### 3.1 表面粗糙度分析

完成晶体微腔加工后,在白光干涉仪下观察了

晶体微腔的边缘。上述所采用的加工方法可实现表面粗糙度的非接触式测量,在不损伤样品表面形态的状态下快速成像,生成高品质的影像,可准确测量晶体微腔表面粗糙度。图 4 给出了粗磨和粗抛后晶体微腔侧壁的表面粗糙度。从得到的三维图像可以看到,侧面有一定的弧度,粗抛后的表面带有划痕,如图 4(a)所示。精抛后的表面非常光滑,如图 4(b)所示。通过对数据进行拟合,得到腔体侧表面的表面粗糙度,结果表明,粗抛后晶体微腔的表面粗糙度在 50 nm 以下,在  $y$  轴的最大表面粗糙度  $R_{\max,y} = 47.13$  nm,平均表面粗糙度  $R_{a,y} = 21.93$  nm,这说明采用的加工方法在粗抛后得到的腔体表面粗糙度在纳米量级。精抛后晶体微腔的表面粗糙度在 4 nm 以下,在  $y$  轴的最大表面粗糙度  $R_{\max,y} = 3.72$  nm,平均表面粗糙度  $R_{a,y} = 1.97$  nm,精抛后的结果表明晶体微腔侧壁光滑程度完全符合光学回音壁模式的要求。

#### 3.2 谐振特性分析

激发高  $Q$  谐振模式需要将光耦合进入微腔,采用全反射器件对晶体微腔进行倏逝场耦合,由于光纤材料与氟化钙晶体材料的折射率相似,两者的相位匹配关系较好,所以采用光纤锥波导的耦合方式<sup>[20]</sup>,而且光纤锥波导可以与各种光纤系统进行集成。搭建波导耦合测试系统并对晶体微腔谐振特性进行分析。如图 5 所示,测试系统包括可调谐激光器、偏振控制器、波导耦合系统、光电探测器、示波器和信号发生器。可调谐激光器的中心波长为 1550 nm,在信号发生器中选择 20 Hz 的三角波信

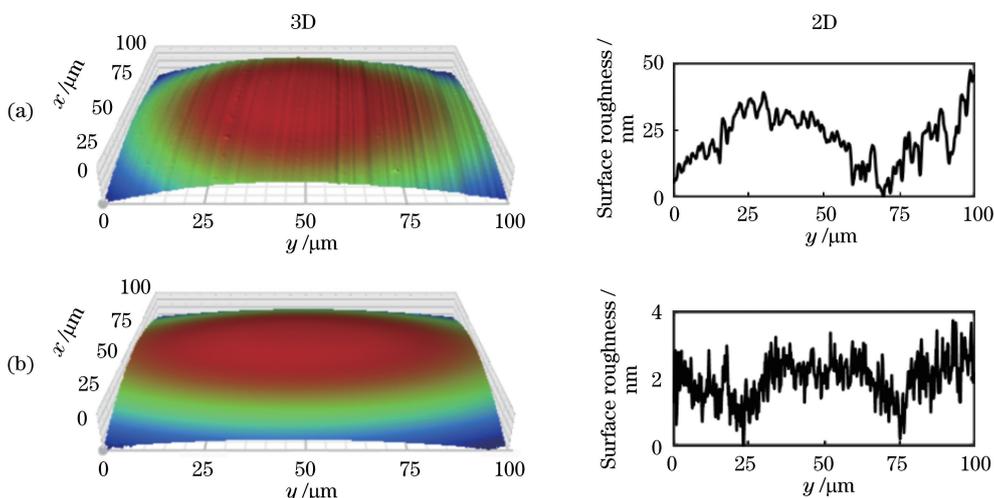


图 4 晶体微腔的表面粗糙度测试图。(a)粗抛后得到的表面粗糙度;(b)精抛后得到的表面粗糙度  
Fig. 4 Surface roughness of crystalline microcavity obtained by test. (a) Surface roughness after rough cast;  
(b) surface roughness after fine cast

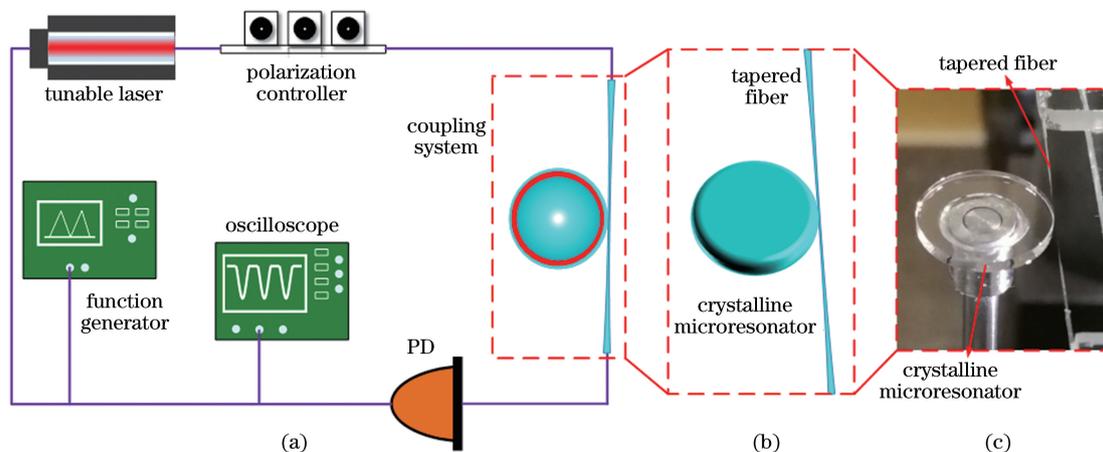


图 5 晶体微腔波导耦合测试系统。(a)测试系统示意图;(b)波导耦合系统示意图;(c)耦合系统实验图  
Fig. 5 Test system for crystalline microcavity waveguide coupling. (a) Diagram of test system;  
(b) diagram of waveguide coupling system; (c) experimental photograph of coupling system

号对激光器进行扫描,波长调谐范围设置为 0.1 nm。偏振控制器用来调节激光器的偏振状态,实现谐振模式的高效激发。光电探测器带宽为 150 MHz,这可保证光电转换后在示波器上观察到对应的谐振光谱。采用锥腰直径为  $3\ \mu\text{m}$  的光纤锥波导对晶体微腔进行了耦合,设置了一个高精度三维平移台,用来调整晶体微腔与光纤锥波导的相对位置,在耦合系统的上方和侧方分别布置了一个高倍显微观察装置来观测两者的位置,以便更好地实现高效耦合。

分别测试了粗抛和精抛后晶体微腔的谐振光谱,粗抛后激发出的谐振光谱如图 6 所示,精抛后激发出的谐振光谱如图 7 所示。通过洛伦兹曲线拟合单个谐振峰,通过测量其半峰全宽可得到谐振模式

的Q值。实验中始终保持微腔与光纤锥波导相接

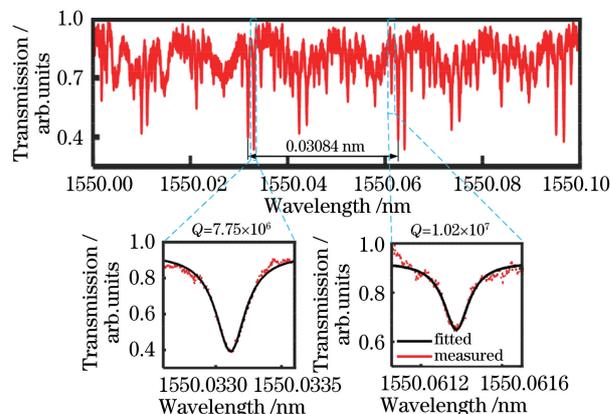


图 6 粗抛后激发出的谐振光谱图  
Fig. 6 Resonant spectra excited after rough cast

触,以提高耦合系统的抗振动性能和稳定性能。图 6 中拟合了两个典型的谐振峰,可以看出,粗抛后氟化钙微腔两个典型的谐振峰中较大的  $Q$  值达到了  $1.02 \times 10^7$ ,已经超过了聚焦离子束抛光<sup>[15]</sup>和单点金刚石抛光<sup>[14]</sup>两种加工方法制备的氟化钙微腔  $Q$  值,此时的透过率为 37%,因为模式处于欠耦合状态。另一个谐振峰  $Q$  值为  $7.75 \times 10^6$ ,透过率较高,达到了 60.5%。结果表明,光纤锥波导与氟化钙微腔尺寸匹配十分良好,两者传播常数满足相位匹配

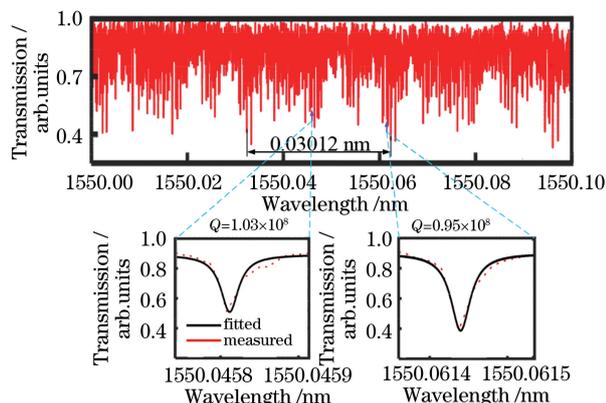


图 7 精抛后激发出的谐振光谱图

Fig. 7 Resonant spectra excited after fine cast

关系,光纤锥内的光能量大部分耦合进入了腔内,从而实现了回音壁模式的高效激发。

从激发出的谐振模式数来看,每一个自由频谱范围(FSR)内,即两个相邻同阶回音壁模式谐振波长的差值范围内,除了存在基模外,还存在一些高阶模式,这些高阶模式除了包括径向方向的高阶模式外,还包括极方向上的高阶模式。精抛后谐振光谱模式非常密集,说明随着晶体微腔表面的越来越光滑,更多高阶模式被激发,如此多的模式在腔量子动力学应用中极具潜力。同样拟合了两个典型的谐振峰,可以得到精抛后的微腔两个谐振峰中较大的  $Q$  值达到  $1.03 \times 10^8$ ,透过率为 51%,拟合的另一个谐振模式  $Q$  值达到了  $0.95 \times 10^8$ (明显比粗抛时的  $Q$  值大很多),透过率为 60%。

为了更好地表征粗抛和精抛后的结果,对谐振光谱结果进行了统计分析。图 8(a)为粗抛后测得的  $Q$  值的统计结果,平均  $Q$  值( $\bar{Q}$ )为  $5.96 \times 10^6$ ,标准差  $\sigma = 1.82 \times 10^6$ ,最大  $Q$  值为  $1.02 \times 10^7$ ,这表明粗抛后所制备的晶体微腔  $Q$  值普遍还处于  $10^6$  量级。图 8(b)为精抛后测得的  $Q$  值统计结果(前 100

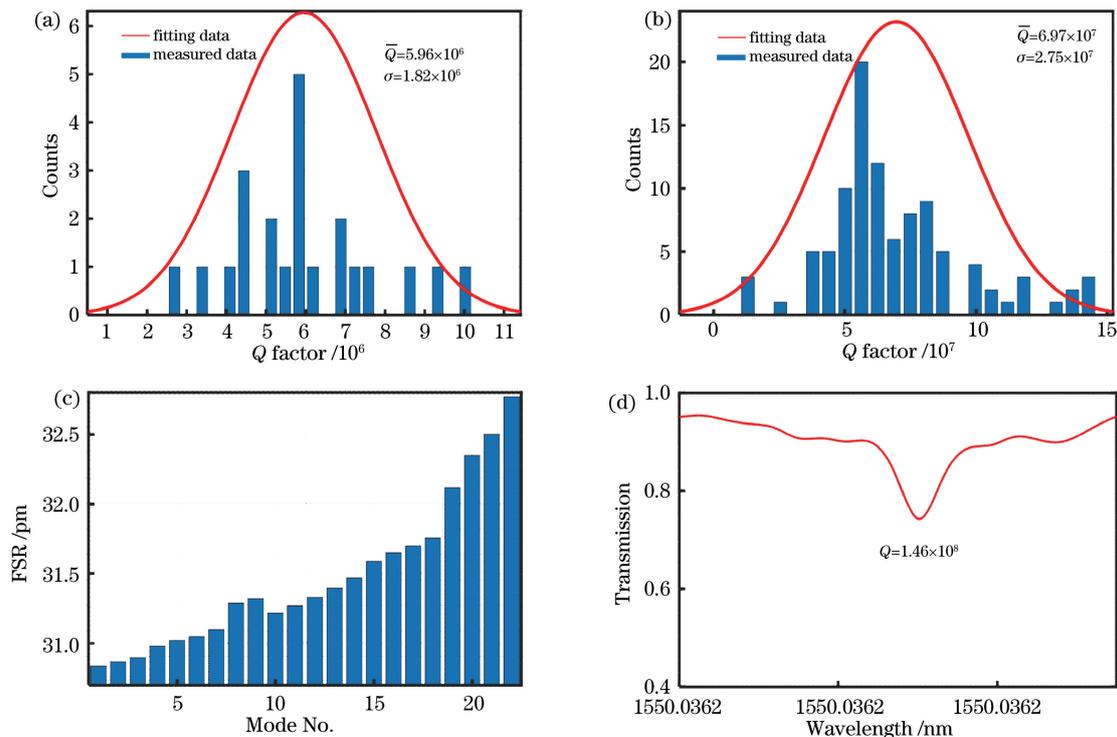


图 8  $Q$  值与 FSR 统计结果。(a)粗抛后激发出的谐振模式  $Q$  值统计结果;(b)精抛后激发出的谐振模式  $Q$  值统计结果;(c)粗抛后激发出的谐振模式 FSR 统计结果;(d)精抛后的最大  $Q$  值

Fig. 8 Statistical results of  $Q$  factor and FSR. (a) Statistical result of  $Q$  factor of resonant mode excited by rough cast; (b) statistical result of  $Q$  factor of resonant mode excited by fine cast; (c) statistical result of FSR of resonant mode after rough cast; (d) maximum  $Q$  factor after fine cast

个谐振模式),平均  $Q$  值为  $6.97 \times 10^7$ ,标准差  $\sigma = 2.75 \times 10^7$ ,最大  $Q$  值达到了  $1.46 \times 10^8$ ,其谐振光谱图如图 8(d)所示。可以看出精抛后晶体微腔大部分  $Q$  值达到了  $10^7$  量级,比粗抛时  $Q$  值大了一个量级,这与白光干涉仪下表征的晶体侧面粗糙度的提升量级结果十分吻合,说明晶体微腔  $Q$  值与光绕行传播的路径表面粗糙度息息相关。同时制备过程需要在超洁净的环境内进行,以尽量避免外界的灰尘等颗粒污染物对腔体表面带来的影响,减小不必要的损耗,这对晶体微腔的制备有很大的指导意义。如此高  $Q$  值的晶体微腔可用来作为谐振式光学陀螺的核心敏感元件,大大提升了光学陀螺灵敏度<sup>[21]</sup>,而且氟化钙材料热光系数小,热稳定性很好,非常适合集成于光电子器件中。另外,由于腔内具有极高的  $Q$  值,仅需很低的阈值便可激发微腔内的受激拉曼散射、受激布里渊散射、四波混频等效应<sup>[9-11]</sup>,这大大拓展了晶体微腔在非线性光学中的应用。最后,统计了粗磨后的 FSR,如图 8(c)所示,不同阶数的 FSR 存在差别,阶数较大时 FSR 基本呈现上升的趋势,这个特性为不同阶数模式之间的耦合提供条件。总之,晶体微腔 FSR 在 0.03 nm 左右,频率范围在 3.91 GHz 左右,这个范围比石英微球腔 FSR(1~5 nm 之间)小很多<sup>[22]</sup>,这个范围更适合微波光子学领域的应用<sup>[23]</sup>,如光学滤波器、光电振荡器<sup>[24]</sup>等。

## 4 结 论

设计了精密加工的装置来加工毫米级氟化钙晶体微腔,通过粗磨、粗抛、精抛多级加工工艺制备了具有超光滑表面的晶体微腔,并搭建了波导耦合测试平台来表征晶体微腔的  $Q$  值。粗抛后的平均表面粗糙度为 21.93 nm,最大  $Q$  值为  $1.02 \times 10^7$ ;精抛后的平均表面粗糙度为 1.97 nm,最大  $Q$  值为  $1.46 \times 10^8$ 。实验结果表明,开发的超精密加工装置系统完全科学且可行,加工工艺切实可靠。此实验装置还可以用来加工铌酸锂、氟化钡、氟化镁等材料的微腔。加工的氟化钙晶体微腔相对传统的玻璃微腔更加稳定,更具实际意义,在光学滤波器、微波光子学器件、光学陀螺仪、非线性光学和腔量子动力学等诸多领域具有潜在的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Vahala K J. Optical microcavities[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 839-846.
- [2] Chiasera A, Dumeige Y, Féron P, et al. Spherical whispering-gallery-mode microresonators [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2010, 4(3): 457-482.
- [3] Yang S C, Wang Y, Sun H D. Advances and prospects for whispering gallery mode microcavities [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(9): 1136-1162.
- [4] Bogaerts W, de Heyn P, van Vaerenbergh T, et al. Silicon microring resonators[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(1): 47-73.
- [5] Observation of critical coupling in a fiber taper to a silica-microsphere whispering-gallery mode system [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(1): 74-77.
- [6] Yan Y Z, Zou C L, Yan S B, et al. Packaged silica microsphere-taper coupling system for robust thermal sensing application [J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 5753-5759.
- [7] Savchenkov A A, Matsko A B, Ilchenko V S, et al. Optical resonators with ten million finesse[J]. *Optics Express*, 2007, 15(11): 6768-6773.
- [8] Lin G, Coillet A, Chembo Y K. Nonlinear photonics with high- $Q$  whispering-gallery-mode resonators [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2017, 9(4): 828-890.
- [9] Grudinin I S, Maleki L. Ultralow-threshold Raman lasing with  $\text{CaF}_2$  resonators [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(2): 166-168.
- [10] Grudinin I S, Matsko A B, Maleki L. Brillouin lasing with a  $\text{CaF}_2$  whispering gallery mode resonator [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(4): 043902.
- [11] Grudinin I S, Yu N, Maleki L. Generation of optical frequency combs with a  $\text{CaF}_2$  resonator [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(7): 878-880.
- [12] Kippenberg T J, Holzwarth R, Diddams S A. Microresonator-based optical frequency combs [J]. *Science*, 2011, 332(6029): 555-559.
- [13] Grudinin I S, Matsko A B, Savchenkov A A, et al. Ultra high  $Q$  crystalline microcavities [J]. *Optics Communications*, 2006, 265(1): 33-38.
- [14] Mizumoto Y, Kangawa H, Itobe H, et al. Influence of crystal anisotropy on subsurface damage in ultra-precision cylindrical turning of  $\text{CaF}_2$  [J]. *Precision Engineering*, 2017, 49: 104-114.
- [15] Lin J T, Xu Y X, Tang J L, et al. Fabrication of three-dimensional microdisk resonators in calcium fluoride by femtosecond laser micromachining [J]. *Applied Physics A*, 2014, 116(4): 2019-2023.
- [16] Lu X Y, Xue C Y, Wang Y H, et al. Fabrication and test of millimeter-size  $\text{CaF}_2$  disk resonator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 3049-3054.

- 卢晓云, 薛晨阳, 王永华, 等. 毫米级氟化钙盘腔的加工与测试[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 3049-3054.
- [17] Wang M Y, Yang Y, Meng L J, et al. Fabrication and packaging for high-Q  $\text{CaF}_2$  crystalline resonators with modal modification[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(11): 111401.
- [18] Guo D, Zou C L, Ren H L, et al. Measurement of heat dissipation rate based on optic-thermo oscillations in  $\text{CaF}_2$  optical micro-cavity [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0512004.  
郭栋, 邹长铃, 任宏亮, 等.  $\text{CaF}_2$  光学微谐振腔中基于光热振荡的热耗散率测量[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0512004.
- [19] Breunig I, Sturman B, Sedlmeir F, et al. Whispering gallery modes at the rim of an axisymmetric optical resonator: analytical versus numerical description and comparison with experiment [J]. Optics Express, 2013, 21(25): 30683-30692.
- [20] Wang M Y, Jin X Y, Li F, et al. Analysis for coupling characteristics of optical microsphere cavity in waveguide coupled whispering gallery mode [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2018, 37(3): 284-290.
- 王梦宇, 金雪莹, 李飞, 等. 波导耦合回音壁模式光学微球腔结构耦合特性分析[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(3): 284-290.
- [21] Savchenkov A A, Liang W, Ilchenko V, et al. Crystalline waveguides for optical gyroscopes [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(4): 1-11.
- [22] Ke C Z, Xu C H, Huang Y T, et al. High-order whispering gallery modes in  $\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$  hybrid microsphere cavity prepared with sol-gel method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0213002.  
柯超珍, 许灿华, 黄衍堂, 等. 溶胶-凝胶法制备  $\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$  混合微球腔的激发高阶回音壁模式 [J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0213002.
- [23] Rueda A, Sedlmeir F, Colloido M C, et al. Efficient microwave to optical photon conversion: an electro-optical realization [J]. Optica, 2016, 3(6): 597-604.
- [24] Saleh K, Lin G P, Chembo Y K. Effect of laser coupling and active stabilization on the phase noise performance of optoelectronic microwave oscillators based on whispering-gallery-mode resonators [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(1): 1-11.