

## 超高 $Q$ 值mm级晶体回音壁微腔加工

刘军汉 曲天良 张铨 刘彦清 熊长新

### Fabrication of ultra-high $Q$ factor and millimeter-scale crystal echo wall microcavity

LIU Junhan, QU Tianliang, ZHANG Xuan, LIU Yanqing, XIONG Changxin

引用本文:

刘军汉, 曲天良, 张铨, 等. 超高 $Q$ 值mm级晶体回音壁微腔加工[J]. 应用光学, 2023, 44(4): 742–747. DOI: 10.5768/JAO202344.0401006

LIU Junhan, QU Tianliang, ZHANG Xuan, et al. Fabrication of ultra-high  $Q$  factor and millimeter-scale crystal echo wall microcavity[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(4): 742–747. DOI: 10.5768/JAO202344.0401006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0401006>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 空心微瓶谐振腔的曲率模型及其传输特性研究

Research on curvature model and transmission characteristics of hollow micro-bottle resonator

应用光学. 2020, 41(5): 1122–1128 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0508001>

#### 高灵敏光纤光栅加速度检波器理论模型研究

Research on theoretical model of high sensitivity fiber Bragg grating accelerometer

应用光学. 2019, 40(5): 910–917 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0508002>

#### 毛细管内嵌微球谐振腔的温度传感特性研究

Temperature sensing characteristics of a microsphere resonator embedded in a capillary

应用光学. 2021, 42(5): 926–931 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0508001>

#### 二氧化钛薄膜表面粗糙度研究

Study on surface roughness of titanium dioxide thin film

应用光学. 2018, 39(3): 400–404 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0303005>

#### 光子晶体方形谐振器波分解复用的特性

Wavelength division demultiplexing characteristics of photonic crystal square resonator

应用光学. 2018, 39(1): 157–164 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0108002>

#### 基于散粒磨料振动抛光非球面加工技术研究

Aspheric machining technology based on vibration polishing of loose abrasive grains

应用光学. 2017, 38(1): 89–93 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0105003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 04-0742-06

# 超高 $Q$ 值 mm 级晶体回音壁微腔加工

刘军汉, 曲天良, 张 铨, 刘彦清, 熊长新

(华中光电技术研究所 武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430223)

**摘 要:** 回音壁微腔具有超高  $Q$  值和极小的模式体积, 在微波光子系统、非线性光学和量子光学等领域中具有广阔的应用前景。通过分析 mm 级氟化镁 ( $\text{MgF}_2$ ) 晶体回音壁微腔的损耗因素, 确认了影响回音壁微腔品质因数的主要指标为材料等级和表面粗糙度。设计了 mm 级  $\text{MgF}_2$  晶体回音壁微腔的结构形式, 使用 DUV 级  $\text{MgF}_2$  晶体, 如果回音壁微腔表面粗糙度小于 0.7 nm, 则  $\text{MgF}_2$  晶体回音壁微腔的极限损耗理论计算值为  $4.781 \times 10^{-11}$ , 对应的极限  $Q$  值为  $2.09 \times 10^{10}$ 。通过对  $\text{MgF}_2$  晶体回音壁微腔进行粗成型、精密车削、精密抛光, 实现了高品质因数的微腔制造。测试结果表明, 回音壁微腔的表面粗糙度  $R_a$  值为 0.669 nm、微观形貌 PV 值为 6.767 nm、品质因数为  $2.054 \times 10^9 @ 1\ 550\ \text{nm}$ 。

**关键词:** 晶体; 回音壁微腔; 表面粗糙度; 品质因数; 损耗

中图分类号: TN206; TG580.6

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0401006

## Fabrication of ultra-high $Q$ factor and millimeter-scale crystal echo wall microcavity

LIU Junhan, QU Tianliang, ZHANG Xuan, LIU Yanqing, XIONG Changxin

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong Institute of Electro-Optics, Wuhan 430223, China)

**Abstract:** The whispering gallery mode (WGM) microcavity has ultra-high  $Q$  factor and an extremely small pattern volume, and has a broad application prospect in the fields of microwave photonic systems, nonlinear optics and quantum optics. By analyzing the loss factors of millimeter-scale magnesium fluoride ( $\text{MgF}_2$ ) crystal WGM microcavity, it was confirmed that the main indexes affecting the quality factor of WGM microcavity were material grade and surface roughness. The structure of WGM microcavity was designed with millimeter-scale  $\text{MgF}_2$  crystal, and the DUV-level  $\text{MgF}_2$  crystal was used. Assuming the surface roughness of WGM microcavity was less than 0.7 nm, the theoretical calculation value of limit loss was  $4.781 \times 10^{-11}$  and the corresponding limit  $Q$  value was  $2.09 \times 10^{10}$ . Through rough machining, precision turning and precision polishing of WGM microcavity of  $\text{MgF}_2$  crystal, the microcavity manufacturing with high quality factor was realized. The test results show that the surface roughness of WGM microcavity is 0.669 nm ( $R_a$  value), the shape error is 6.767 nm (PV value), and the quality factor is  $2.054 \times 10^9 @ 1\ 550\ \text{nm}$ .

**Key words:** crystal; echo wall microcavity; surface roughness; quality factor; loss

## 引言

回音壁 (whispering gallery mode, WGM) 微腔<sup>[1]</sup>是一种圆盘形光学谐振器, 有着极高的品质因数

( $Q$  值) 和极小的模式体积, 具有良好的非线性特性, 被广泛应用于微波光子系统中, 如光学频率梳、超窄线宽激光器、光电振荡器等<sup>[2-6]</sup>。光波在回

收稿日期: 2022-08-01; 修回日期: 2022-10-08

基金项目: 国家自然科学基金 (62073055); 华中光电技术研究所基金项目 (ZY577)

作者简介: 刘军汉 (1981—), 男, 高级工程师, 主要从事超精密光学加工与检测技术研究。E-mail: j.h.liu@163.com

音壁微腔的内边界面上全内反射, 以极小的损耗沿着腔的弧形内表面传播, 如果光波沿微腔内传播一周的相位变化为  $2\pi$  的整数倍, 那么光波传播一周后就会与自身叠加而增强, 实现光波在回音壁微腔内谐振。回音壁微腔作为光学频率梳的核心元件, 可增强光学频率梳的场效应, 降低光学频率梳的工作阈值。

人类最早发现回音壁模式是伦敦圣保罗教堂的环形走廊和北京天坛的回音壁, 声波可以在弯曲光滑的墙面上反射并沿着墙面传播。2007 年, 美国喷气实验室制作了  $Q$  值为  $3 \times 10^{11}$  的  $\text{CaF}_2$  晶体回音壁微腔, 光子寿命可以达到 0.5 ms。目前美国 OEwave 公司、法国 Femto 研究所和瑞士 MicroR 公司都已经制作了回音壁微腔产品和相关微波光子器件, 其中美国 OEwave 公司<sup>[7]</sup>可提供  $Q$  值为  $10^{10}$  量级的  $\text{MgF}_2$  晶体回音壁微腔。国内很多高校参与了回音壁微腔的研究, 其中浙江大学<sup>[8]</sup>与法国 Femto 研究所合作, 在法国实验室中采用金刚石研磨粉研磨和金刚石抛光的方法制备了  $\text{LiNO}_3$  晶体回音壁微腔,  $Q$  值达到  $2.7 \times 10^7 @ 1\ 550\ \text{nm}$ ; 中国科学技术大学<sup>[9]</sup>通过金刚石线刷成型、砂纸粗磨、研磨膏粗抛光和金刚石悬浮液精抛光, 研制了  $Q$  值为  $9.7 \times 10^7 @ 1\ 550\ \text{nm}$  的  $\text{CaF}_2$  晶体回音壁微腔; 中北大学<sup>[10]</sup>采用内圆切割法对  $\text{CaF}_2$  晶体进行切割, 然后倒角, 对晶体粗磨, 再分别用 50 nm、10 nm 和 1 nm 抛光液进一步抛光, 实现了  $\text{CaF}_2$  晶体制作回音壁光腔加工, 品质因数  $Q$  值达到  $2.1 \times 10^6 @ 1\ 550\ \text{nm}$ ; 清华大学<sup>[11]</sup>使用 3 次  $\text{CO}_2$  脉冲激光熔融光纤制成  $\text{SiO}_2$  微球腔, 品质因数  $Q$  值为  $8.502 \times 10^7 @ 1\ 550\ \text{nm}$ 。

本文对回音壁微腔  $Q$  值的影响因素进行了分析, 通过粗成型、超精密车削和精密抛光的加工方法, 获得了  $10^9$  量级  $Q$  值的  $\text{MgF}_2$  晶体回音壁微腔, 将国产回音壁微腔的  $Q$  值提高了一个等级, 缩小了与国外的技术差距。

## 1 回音壁微腔 $Q$ 值影响因素分析

$Q$  值反映的是微腔储存光子的能力, 光场在微腔内部传播一周之后的能量损耗<sup>[10-11]</sup>。 $Q$  值越大, 光子寿命越长,  $Q$  值越小, 光子寿命越短。 $Q$  值定义为微腔内光子总能量与传播一周能量损耗的比值, 如下式所示:

$$Q = \omega\tau \quad (1)$$

式中:  $\omega$  为谐振角频率, 单位为  $\text{s}^{-1}$ ;  $\tau$  为微腔内光子衰减到能量  $1/e$  所需时间, 单位为 s。

回音壁微腔的  $Q$  值大小主要与光波的损耗有关, 其损耗可以用  $Q$  值的倒数来表示。回音壁微腔的损耗主要包括微腔材料本身对光波的吸收损耗  $Q_{\text{mat}}^{-1}$ , 微腔的表面缺陷、微小颗粒或表面粗糙度引起的表面散射损耗  $Q_{\text{ss}}^{-1}$ , 微腔弧形表面的辐射损耗  $Q_{\text{rad}}^{-1}$ , 外界耦合引起的耦合损耗  $Q_{\text{ex}}^{-1}$ , 光在微腔内部不完全反射造成的损耗  $Q_{\text{WGM}}^{-1}$ 。总损耗  $Q^{-1}$  可以表示为

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{\text{mat}}} + \frac{1}{Q_{\text{S.S}}} + \frac{1}{Q_{\text{rad}}} + \frac{1}{Q_{\text{ex}}} + \frac{1}{Q_{\text{WGM}}} \quad (2)$$

对于 mm 级晶体微腔来说, 工作面的弧形近似于一个平面, 所以弧形表面的辐射损耗  $Q_{\text{rad}}^{-1}$  趋近无穷小, 可以忽略不计; 通过控制外界耦合过程, 可以将耦合损耗  $Q_{\text{ex}}^{-1}$  降到最低; 空气中的杂质和水分子会造成微腔表面不洁净, 使光在微腔内部产生不完全反射损耗  $Q_{\text{WGM}}^{-1}$ 。因此, 在洁净室内可以有效减少空气中的杂质, 使用晶体材料可以避免水汽对材料的影响, 从而消除光在微腔内部的不完全反射损耗  $Q_{\text{WGM}}^{-1}$ 。

晶体材料固有的吸收损耗计算公式如下:

$$Q_{\text{mat}}^{-1} = \frac{\alpha\lambda}{2\pi n} \quad (3)$$

式中:  $n$  为材料的折射率;  $\lambda$  为微腔的工作波长;  $\alpha$  为工作波段的材料吸收系数。

制作回音壁微腔的材料主要有  $\text{MgF}_2$ 、 $\text{CaF}_2$ 、 $\text{LiNO}_3$  等晶体,  $\text{SiO}_2$  石英玻璃, 以及 PMMA、PDMS 等聚合物。 $\text{LiNO}_3$  晶体的折射率约为 2.2, 不能使用光纤耦合方式测量  $Q$  值, 而棱镜耦合时需要采用折射率更高的蓝宝石棱镜, 蓝宝石棱镜的加工难度和费用较高。 $\text{SiO}_2$  石英玻璃对氢氧根比较敏感, 易受到水汽的污染,  $Q$  值降低较快。PMMA、PDMS 等聚合物主要用于制作  $\mu\text{m}$  级微腔,  $Q$  值不会超过  $10^6$  量级。

$\text{CaF}_2$  晶体和  $\text{MgF}_2$  晶体具有材料均匀性好、材料透明窗口波段宽和光波透过率高等特性, 使得光波在  $\text{MgF}_2$  晶体内部损耗很小;  $\text{CaF}_2$  晶体和  $\text{MgF}_2$  晶体对氢氧根不敏感, 具有很好的耐水汽污染特性, 不会因水汽污染降低微腔的  $Q$  值;  $\text{MgF}_2$  晶体的硬度较其他晶体材料高, 虽然较难加工, 但是能获得较高的表面质量。因此,  $\text{MgF}_2$  晶体是制

作高  $Q$  值回音壁微腔的最佳材料。

回音壁微腔选用 DUV 级 Z 切  $\text{MgF}_2$  晶体, 在 1 550 nm 工作波长吸收系数更低, 具有较小的材料吸收损耗。 $\text{MgF}_2$  晶体折射率  $n=1.38$ , 在 1 550 nm 波长的吸收系数约为  $4 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$ , 由此估算得到  $\text{MgF}_2$  晶体微腔的材料损耗  $Q_{\text{mat}}^{-1}$  下限为  $0.715 \times 10^{-13}$ , 可以忽略不计。

回音壁微腔材料内部缺陷和表面粗糙度可引起折射损失和散射损失  $Q_{\text{s.s.}}^{-1}$ 。晶体材料晶格近乎完美, 本征缺陷较小, 工作波长光学透过率高, 引起的折射损耗可以忽略, 而微腔加工后的表面粗糙度产生的损耗主要是微腔的表面散射损耗。微腔的表面损耗表达式为

$$Q_{\text{s.s.}}^{-1} = \frac{16n\pi^2 B^2 \sigma^2}{3\lambda^3 D} \quad (4)$$

式中:  $D$  为微腔直径;  $B$  为微腔与耦合光纤的相关长度;  $\sigma$  为微腔工作面的表面粗糙度;  $n$  为工作波长下的折射率。 $\text{MgF}_2$  晶体折射率为  $n=1.38$ , 微腔直径  $D=8 \text{ mm}$ , 当表面粗糙度  $\sigma=0.7 \text{ nm}$  时, 根据文献 [12] 将  $B$  取值为 200 nm。此时, 微腔表面粗糙度引起的损耗  $Q_{\text{s.s.}}^{-1}$  极限值为  $4.774 \times 10^{-11}$ 。

综上所述, 采用 DUV 级  $\text{MgF}_2$  晶体制作 mm 级回音壁微腔, 微腔加工后的表面粗糙度要求小于 0.7 nm, 表面无缺陷, 在理想洁净环境下进行高效率耦合。此时, 微腔的综合损耗为  $4.781 \times 10^{-11}$ , 相当于微腔的最大  $Q$  值为  $2.09 \times 10^{10}$ 。针对 mm 级  $\text{MgF}_2$  晶体回音壁微腔, 降低微腔损耗的关键在于降低表面粗糙度和表面缺陷。所以, 微腔的精密加工技术是提高微腔  $Q$  值的核心。

## 2 回音壁微腔加工

回音壁微腔的外圆轮廓设计为 V 型结构的圆盘形, 直径  $\Phi 8 \text{ mm}$ 、厚度为 0.2 mm、工作宽度为 0.02 mm。回音壁微腔的 3D 模拟图如图 1 所示。

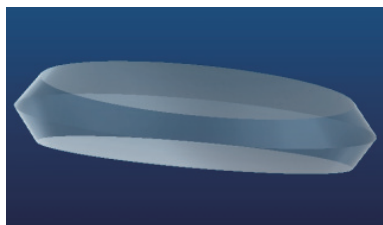


图 1 回音壁微腔 3D 模拟图

Fig. 1 3D simulation diagram of WGM microcavity

回音壁微腔加工流程包括粗成型、精密车削

和精密抛光<sup>[13]</sup>。粗成型是使用精密数控铣磨机, 采用金刚石砂轮将  $\text{MgF}_2$  晶体毛坯加工 V 型结构轮廓。由于  $\text{MgF}_2$  晶体是一种硬脆材料, 加工时容易产生崩边和裂纹, 因此需采用金刚石砂轮进行精密磨削。磨削工具选用青铜结合剂金刚石磨轮, 金刚石的粒度选择 W10, 磨轮的转速应不低于 10 000 r/min, 进给速度不能高于 0.02 mm/min, 这样可有效避免  $\text{MgF}_2$  晶体的崩裂和降低氟化镁晶体表面的损伤层深度。

精密车削是将 V 型结构轮廓精密去除, 保证微腔的准确形状和工作面的表面粗糙度。精密车削选用单晶金刚石刀具, 刀具的进给速度不高于 0.005 mm/min, 零件转速不低于 5 000 r/min, 这样可有效控制  $\text{MgF}_2$  晶体的表面粗糙度优于 2 nm。

精密抛光是利用磁流变抛光技术, 将微腔固定在精密旋转轴上, 微腔和磁流变抛光盘自转, 微腔沿抛光盘的直径方向做直线往复运动。磁流变抛光需用 20 nm 粒径的氧化铈抛光液, 微腔的转速不高于 200 r/min, 此时精密抛光的去除量很小, 不仅可以保证微腔工作面的面形, 也能进一步降低表面粗糙度, 消除前期加工残留的表面裂纹层和变质层, 减小微腔的表面散射损耗, 提高微腔的品质因数。回音壁微腔精密车削及精密抛光过程如图 2 和图 3 所示。

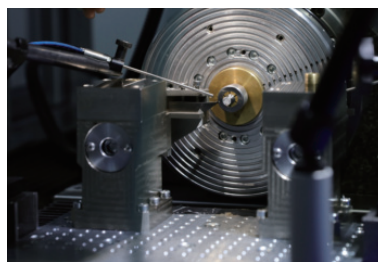


图 2 回音壁微腔精密车削

Fig. 2 Precision turning of WGM microcavity

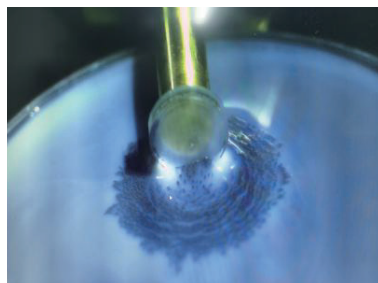


图 3 回音壁微腔精密抛光

Fig. 3 Precision polishing of WGM microcavity



### 3 结果与分析

使用粗成型、精密车削和精密抛光方法实现高  $Q$  值回音壁微腔的精密加工, 微腔的表面面形、表面粗糙度和  $Q$  值均达到了理想要求。回音壁微腔实物图如图 4 所示。



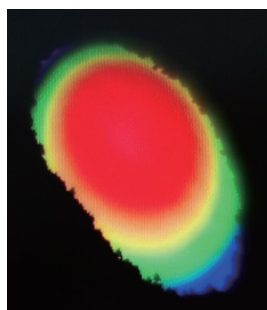
图 4 加工后的回音壁微腔

Fig. 4 Fabricated WGM microcavity

采用白光干涉仪检测微腔工作面的面形及表面粗糙度, 微腔的表面形貌检测结果如图 5 所示。图 5(a) 为表面粗糙度和面形误差检测结果, 在  $0.05\text{ mm} \times 0.06\text{ mm}$  检测范围内表面粗糙度  $R_a$  值为  $0.699\text{ nm}$ , 去除“4th order”泽尼克系数后的微观形貌 PV 值为  $6.767\text{ nm}$ ; 图 5(b) 为干涉仪拟合的表面面形三维图, 面形为规则圆滑的椭圆形; 图 5(c) 为微腔面形干涉条纹图, 干涉条纹为同心椭圆形。



(a) 表面粗糙度



(b) 表面形貌



(c) 白光干涉条纹

图 5 微腔侧壁形貌检测结果

Fig. 5 Test results of microcavity sidewall morphology

使用  $200\times$  光学显微镜观察微腔工作面的表面

洁净度如图 6 所示, 表面很洁净, 未发现任何缺陷。



图 6 微腔表面显微镜照片 ( $200\times$ )

Fig. 6 Photomicrographs ( $200\times$ ) of microcavity surface

当回音壁微腔经过精密车削和精密抛光后, 光子在微腔内损耗很小, 可以通过锥形光纤与回音壁微腔进行耦合, 采用线宽法测量微腔的品质因数<sup>[13-17]</sup>。该方法是通过测量回音壁模式谐振峰的线宽和共振波长的比值计算出微腔  $Q$  值的大小。 $Q$  值表达式为

$$Q = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (5)$$

式中:  $\lambda$  为回音壁模式共振波长;  $\Delta\lambda$  为回音壁模式半高线宽。 $Q$  值越高, 微腔损耗越小, 光子寿命越长, 回音壁模式的半高线宽就越窄。

微腔  $Q$  值测试装置测量<sup>[17]</sup> 原理如图 7 所示。

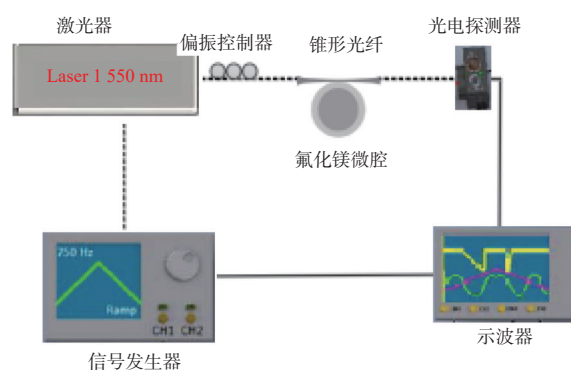


图 7 微腔品质因数测量原理图

Fig. 7 Schematic diagram of microcavity  $Q$  factor measurement

通过搭建的微腔  $Q$  值测量装置对  $\text{MgF}_2$  晶体微腔的品质因数进行测量, 结果为  $2.054 \times 10^9 @ 1550\text{ nm}$ , 与  $\text{MgF}_2$  晶体回音壁微腔  $Q$  值的理论计算值相差一个数量级, 与法国 Femto 研究所得出的结论相符<sup>[12]</sup>。说明毫米级  $\text{MgF}_2$  晶体回音壁微腔的加工和其他损耗影响因素控制合理,  $Q$  值检测结果可信。 $Q$  值检测结果如图 8 所示。

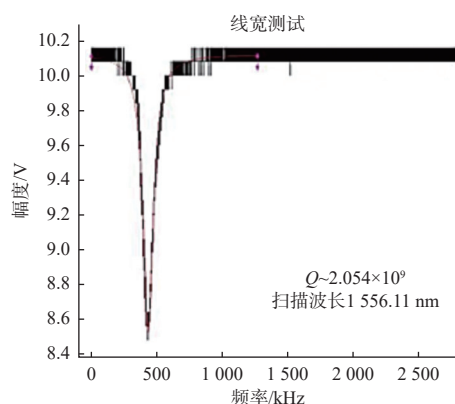


图8 回音壁微腔品质因数检测结果

Fig. 8 Test results of quality factor of WGM microcavity

## 4 结论

通过对 mm 级  $\text{MgF}_2$  晶体回音壁微腔的损耗分析, 确认影响回音壁微腔  $Q$  值的主要因素是回音壁微腔表面粗糙度和表面缺陷, 回音壁微腔精密加工精度决定了回音壁微腔表面质量。通过对  $\text{MgF}_2$  晶体粗成型、精密车削和精密抛光, 实现了高质量回音壁微腔精密制造, 加工的回音壁微腔表面无缺陷, 表面粗糙度  $R_a$  值为 0.669 nm、微观形貌 PV 值为 6.767 nm。采用光纤耦合的方法搭建回音壁微腔耦合测量系统, 测量回音壁微腔的  $Q$  值为  $2.054 \times 10^9 @ 1\,550\text{ nm}$ 。

### 参考文献:

- [1] VAHALA K J. Optical microcavities[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 839-846.
- [2] 高宇炜, 方守龙, 武腾飞, 等. 双飞秒激光频率梳光谱测量技术研究进展[J]. *应用光学*, 2021, 42(1): 157-175.  
GAO Yuwei, FANG Shoulong, WU Tengfei, et al. Research progress of double femtosecond laser frequency comb spectroscopy measurement technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(1): 157-175.
- [3] 王先华, 陈烽, 杨青, 等. 飞秒激光在透明介质中诱导光学微腔的实验研究[J]. *应用光学*, 2007, 28(2): 191-194.  
WANG Xianhua, CHEN Feng, YANG Qing, et al. Experiment research on femtosecond-laser-induced optical microcavity in transparent materials[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(2): 191-194.
- [4] 罗强, 薄方, 孔勇发, 等. 铌酸锂薄膜微腔激光器研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(11): 20210546-1-5.  
LUO Qiang, BO Fang, KONG Yongfa, et al. Research progresses of microcavity lasers based on lithium niobate on insulator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(11): 20210546-1-5.
- [5] 黄水泉, 高尚, 黄传真, 等. 脆性材料磨粒加工的纳米尺度去除机理 氟化镁晶体微腔的克尔光频梳产生研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2022, 42(3): 257-267.  
HUANG Shuiquan, GAO Shang, HUANG Chuanzhen, et al. Nanoscale removal mechanisms in abrasive machining of brittle solids[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2022, 42(3): 257-267.
- [6] 曹启韬, 唐水晶, 陈豪敬, 等. 超高品质因子片上微腔光子学研究进展[J]. *科学通报*, 2020, 65(27): 3029-3042.  
CAO Qitao, TANG Shuijing, CHEN Haojing, et al. Research advances of ultrahigh- $Q$  on-chip microcavity photonics[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(27): 3029-3042.
- [7] SOLTANI M, ILCHENKO V, MATSKO A, et al. Ultrahigh  $Q$  whispering gallery mode electro-optic resonators on a silicon photonic chip[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(18): 4375-4378.
- [8] 潘毓. 超高品质因数回音壁模式谐振器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.  
PAN Yu, Research on ultra-high  $Q$  whispering gallery mode resonators[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [9] 沈远. 氟化镁微腔光频梳产生研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.  
SHEN Yuan. Research on optical frequency comb generation in magnesium fluoride micro-resonator[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [10] 卢晓云. 高 $Q$ 之氟化钙盘腔的加工与耦合测试[D]. 太原: 中北大学, 2016.  
LU Xiaoyun. The fabrication and coupling test of high  $Q$  value calcium fluoride disk[D]. Taiyuan: North University of China, 2016.
- [11] 杨旭. 回音壁模式光学微腔的拉曼调制及其应用[D]. 北京: 清华大学, 2016.  
YANG Xu. Raman modulation of whispering Gallery mode microresonators and its application[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [12] LIN G P, RÉMI H, AURÉLIEN C, et al. Dependence of quality factor on surface roughness in crystalline whispering-gallery mode resonators[J]. *Optical Letters*, 2018, 43(3): 495-498.
- [13] LU X, XUE C, WANG Y, et al. Fabrication and test of

- millimetersize  $\text{CaF}_2$  disk resonator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 3049-3054.
- [ 14 ] GRUDININ I S, ILCHENKO V S, MALEKI L. Ultrahigh optical  $Q$  factors of crystalline resonators in the linear regime[J]. *Physical Review A*, 2006, 74(6): 063806.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] VERNOOY D, ILCHENKO V S, MABUCHI H, et al. High- $Q$  measurements of fused-silica microspheres in the near infrared[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(4): 247-249.
- [ 17 ] KIPPENBERG T, SPILLANE S, VAHALA K. Demonstration of ultra-high- $Q$  small mode volume toroid microcavities on a chip[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(25): 6113-6115.