

超高品质氟化镁晶体微盘腔的制备与测试

戴健^{1,2*}, 侯迎港^{1,2}, 高司达^{1,2}, 刘安妮^{1,2}, 李鑫敏^{1,2}, 徐坤^{1,2}¹北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876;²北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876

摘要 超高品质回音壁晶体微腔在非线性光学、相干光通信以及微波光子学等领域具有广阔的应用前景。改善表面粗糙度以降低散射损耗是提升氟化镁晶体微盘腔品质因子的有效途径。基于超精密机械加工法制备出亚纳米表面粗糙度的超光滑氟化镁晶体微盘腔, 通过将锥形光纤耦合与腔内衰荡法相结合, 测得氟化镁晶体微盘腔在 1550 nm 波段的品质因子 Q 值达到 1.2×10^9 , 这有助于推动我国超高品质回音壁晶体微腔领域的研究发展。

关键词 光学器件; 回音壁模式; 氟化镁晶体微盘腔; 表面粗糙度; 品质因子

中图分类号 TN205

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1923004

Fabrication and Test of Ultra-High Q Magnesium Fluoride Microdisk ResonatorDai Jian^{1,2*}, Hou Yinggang^{1,2}, Gao Sida^{1,2}, Liu Anni^{1,2}, Li Xinmin^{1,2}, Xu Kun^{1,2}¹State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;²School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract Ultra-high quality factor whispering gallery mode crystal microresonators have promising applications in nonlinear optics, coherent optical communication, and microwave photonics. Improving the surface roughness to reduce the scattering loss is an effective way to improve the quality factor of magnesium fluoride (MgF_2) crystal microdisk resonators. In this paper, we fabricated ultra-smooth MgF_2 crystal microdisk resonators with sub-nanometer surface roughness based on ultra-precision machining method, and the quality factor Q of MgF_2 crystal microdisk resonators in 1550 nm band is up to 1.2×10^9 by using the tapered fiber coupling combined with cavity ringdown method, which helps to promote the research development in the field of ultra-high quality whispering gallery mode crystal microresonators in China.

Key words optical devices; whispering gallery mode; magnesium fluoride crystal microdisk resonators; surface roughness; quality factor

1 引言

回音壁模式光学微腔是利用光的全内反射原理将光限制于小尺寸闭合腔体内部并保持低损耗传输的光子器件, 凭借品质因子高、模式体积小和易于集成等特点成为近年来国内外研究前沿热点, 可以广泛应用于非线性光学^[1]、腔量子电动力学^[2-4]、光谱学^[5]、相干光通信^[6]以及微波光子学^[7]等领域。回音壁模式光学微腔的高品质特性对于微腔诸多应用场景具有重要意义, 尤其在微腔孤子光频梳^[8-9]和微腔传感等热门研究

方向, 提升微腔品质因子有利于推动单片/混合集成微腔光频梳源的实用化发展, 同时有助于提升微腔传感系统灵敏度^[10-12]。

回音壁模式光学微腔的材料体系以及加工工艺随着研究不断深入而更加丰富, 目前广泛应用的回音壁光学微腔主要包括片上微腔和晶体微腔两种。片上微腔主要以半导体材料为基底, 通过互补式金属氧化物半导体 (COMS) 工艺制备, 适用于大规模生产和片上光子集成^[13]。晶体微腔在光学频率梳以及非线性等领域具有广泛的应用需求, 通常采用氟化镁、氟化钙^[14]和

收稿日期: 2022-03-14; 修回日期: 2022-04-09; 录用日期: 2022-04-18

基金项目: 国家自然科学基金 (61971065)

通信作者: *daijian@bupt.edu.cn

铌酸锂等光学晶体材料,主要通过超精密机械加工法制备,利用磨削抛光等工艺能够充分发挥晶体材料优越的光学特性,实现光学晶体微腔的超高品质因子。2006年,美国加州理工学院 Grudin 等^[15]利用单点金刚石车削与抛光工艺制备出品质因子高达 6.3×10^{10} 的氟化钙晶体微腔;此外,美国 OEwaves 公司和瑞利洛桑联邦理工学院同样利用单点金刚石车削与抛光工艺制备出品质因子优于 10^9 的氟化镁晶体微腔。

国内在超高品质光学晶体微腔研制方向的起步较晚,目前还未出现超高品质因子 ($Q > 10^9$) 光学晶体微腔的相关报道。氟化镁晶体微腔小热光系数及高 Q 值的特性使其在孤子产生和光学频率梳等研究中具有独特的应用价值。此外,氟化镁晶体微腔还具有较高机械硬度,可以在一定程度上避免划痕影响,同时具有稳定的化学性质,并对周围环境湿度不敏感,能够长时间地保持较高的品质因子,因此,超高品质氟化镁晶体微腔的制备研究具有重要意义。2021年,中国科学技术大学沈远^[16]利用机械抛光工艺制备的氟化镁晶体微腔 Q 值达到 7.2×10^7 ,这仍然无法满足非线性克尔孤子光频梳等应用领域的需求;2022年,江苏师范大学 Ji 等^[17]报道的窄线宽自注入锁定光纤激光器中氟化镁微腔 Q 值达到 3.2×10^8 ,但未提及具体的微腔制备工艺。氟化镁材料脆性大且易崩边,为了减少氟化镁晶体微腔中高阶极向的模式场,还需要尽可能减小氟化镁微腔的厚度,这些因素对超高品质因子氟化镁晶体微腔的超精密机械制备加工提出了巨大挑战。

本文首先分析了氟化镁晶体微腔品质因子的影响因素,改善微腔表面粗糙度 (S_a) 以降低散射损耗是提升氟化镁晶体微腔品质因子的有效途径。本文基于超精密机械加工工艺制备出亚纳米表面粗糙度的氟化镁晶体微腔,并且通过将锥形光纤耦合与腔内衰荡法相结合,测得氟化镁微腔品质因子 Q 值优于 10^9 ,其在非线性光学、相干光通信、光谱学和微波光子学等研究领域具有广阔的应用前景。

2 高品质 MgF_2 微腔 Q 值影响分析

品质因子是回音壁模式氟化镁光学晶体微腔最重要的性能指标之一,表征了氟化镁光学晶体微腔的光子能量储存能力。氟化镁晶体微腔的有载品质因子 Q 值与耦合系统中的能量损耗^[18]直接相关,能量损耗主要包括微腔本征损耗和耦合损耗两方面。氟化镁微腔本征损耗用 Q_i^{-1} 表示,包含辐射损耗 Q_r^{-1} 、吸收损耗 Q_m^{-1} 和散射损耗 Q_s^{-1} 分量;此外,耦合器件激发和收集回音壁模式时将引入耦合损耗 Q_c^{-1} 。因此,回音壁模式氟化镁光学晶体微腔的有载品质因子 Q 值满足

$$Q^{-1} = Q_i^{-1} + Q_c^{-1} = Q_r^{-1} + Q_m^{-1} + Q_s^{-1} + Q_c^{-1}. \quad (1)$$

光学微腔的辐射损耗 Q_r^{-1} 与微腔半径 R 和光学波长 λ 满足关系式 $Q_r^{-1} \propto \exp(-4\pi R/\lambda)$ 。本文制备的氟化镁晶体微腔半径为毫米级,远大于激光波长,因此制备出的微腔中辐射损耗非常小,对微腔品质因子的影响可以忽略不计。氟化镁晶体微腔的吸收损耗 Q_m^{-1} 是

材料本身的固有特性,损耗机制无法改变。散射损耗 Q_s^{-1} 通常是由微腔侧壁表面的粗糙度和污染物等引起的,氟化镁晶体微腔中的散射损耗对品质因子的影响可以表示为

$$Q_s^{-1} \approx \frac{3\lambda^3 a}{8n\pi^2 B^2 \sigma^2}, \quad (2)$$

式中: a 和 n 分别为氟化镁微腔的半径和材料折射率; B 和 σ 分别为氟化镁微腔表面粗糙度的相关长度和均方根。微腔表面粗糙度均方根 σ 对于提升微腔的本征品质因子至关重要,可以通过优化氟化镁晶体微腔的制备工艺得到极大降低,进而减小氟化镁微腔的散射损耗、提升品质因子。

除了微腔本征损耗的影响,耦合损耗也会影响回音壁氟化镁微腔的有载品质因子,此损耗可以通过调节微腔耦合状态进行控制。微腔耦合状态通常包括欠耦合、临界耦合和过耦合三种,其中临界耦合状态下微腔耦合效率最高,此时氟化镁晶体微腔的耦合损耗可以保持在较低水平。

根据上述分析,对于毫米级回音壁氟化镁光学微腔,辐射损耗对微腔品质因子的影响可以忽略不计,吸收损耗受限于氟化镁材料本身的固有特性,耦合损耗在临界耦合状态下可以保持在较低水平,散射损耗是氟化镁晶体微腔品质因子受限的决定因素。散射损耗大小主要受到微腔侧壁表面粗糙度的影响,通过优化抛光工艺、提高抛光质量以及加入退火工艺^[19]消除应力。本文主要通过优化氟化镁晶体微腔抛光工艺抑制此损耗,这是实现氟化镁晶体微腔超高品质因子行之有效的技术途径。

3 超高品质 MgF_2 微腔制备与测试

3.1 超高品质 MgF_2 微腔制备

本文利用北京邮电大学完全自主研发的超精密加工平台完成超高品质氟化镁微腔制备。由于超精密制备过程对周围环境较为敏感,超高品质氟化镁微腔需要在相对恒温恒湿的超净环境下进行制备;此外,为了减少微腔中的高阶极向模式,需要采用超薄厚度的氟化镁晶体微腔坯料;超精密加工过程还极易产生应力作用和亚表层损伤,因此,超高品质氟化镁微腔的制备过程极具挑战性。本文基于超精密机械加工法的超高品质氟化镁微腔制备工艺的具体流程如图 1 所示,主要包括定形、粗抛和精抛三个阶段。

氟化镁晶体微腔的坯料为厚度为 0.1 mm、半径为 2.3 mm 的圆柱形薄片。为控制氟化镁晶体微腔的模式体积,需对其进行倒角处理,通过单点金刚石定形工序将侧壁赤道面倒角至如图 2(a) 所示的结构。倒角过程中通过控制去料速度来防止出现应力集中效应以及不易察觉的亚表层损伤,这些应力作用和亚表层损伤对氟化镁晶体微腔的品质因子产生很大影响,倒角完成后的氟化镁晶体微腔实物如图 2(b) 所示。

倒角完成后,对氟化镁晶体微腔依次进行 $9 \mu\text{m}$ 、 $6 \mu\text{m}$ 和 $3 \mu\text{m}$ 颗粒度的粗抛光,该阶段主要通过

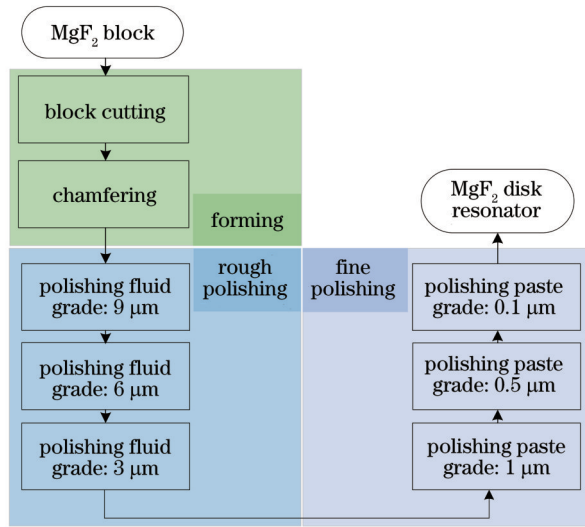


图 1 氟化镁微盘腔加工流程图

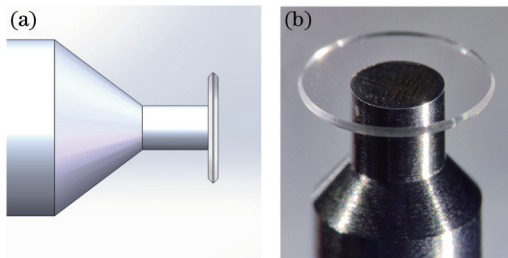
Fig. 1 Flow chart of fabrication of MgF_2 microdisk resonator

图 2 氟化镁微盘腔倒角图。(a)微腔倒角结构示意图;(b)倒角完成后的氟化镁微腔

Fig. 2 Diagrams of MgF_2 microdisk resonator chamfering.

- (a) Schematic of MgF_2 microdisk resonator chamfering;
 (b) MgF_2 microdisk resonator with chamfering

抛光液和编织抛光布完成抛光。抛光液的稀释浓度和均匀性将直接影响抛光效率,并且粗抛阶段的去料速度较快,需要合理控制抛光压力、抛光时间以及轴承转速,以防出现因参数设置不当导致的赤道边缘面过度磨削问题。随着抛光颗粒度的减小,氟化镁微盘腔的侧壁将逐渐变得光滑。3 μm 颗粒度抛光过程完成后,

氟化镁微盘腔的侧壁将会变得更加光滑透亮,并且侧壁赤道面结构完好,粗抛结束后的氟化镁微盘腔实物以及侧壁赤道面形貌表征结果如图 3 所示。

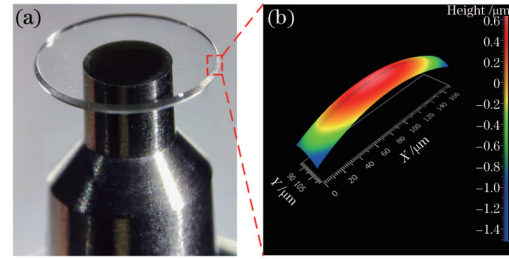


图 3 粗抛光工艺后的氟化镁微盘腔。(a)粗抛后微腔实物图;(b)微腔侧壁形貌表征图

Fig. 3 MgF_2 microdisk resonator after rough polishing. (a) Realistic figure of microresonator after rough polishing; (b) characterization of microresonator sidewall morphology

粗抛光结束后,对氟化镁微腔继续进行 1 μm 、0.5 μm 和 0.1 μm 颗粒度的精抛光,该阶段主要通过较柔软的抛光布配合相应颗粒度抛光膏进行精细抛光。在进行 1 μm 颗粒度抛光时,抛光压力和抛光时间分别设置为 15 g 和 2 h,轴承转速设置为 2500 r/min。1 μm 颗粒度抛光过程完成后,氟化镁微盘腔侧壁将达到光学抛光级别,此时氟化镁微盘腔的品质因子 Q 值可以达到 10^7 量级。

由于抛光液器皿以及微盘腔夹具不可避免地存在一定程度的污染,并且污染物的影响会随着抛光颗粒度的减小而增大,在 0.5 μm 和 0.1 μm 颗粒度抛光阶段,氟化镁微盘腔的抛光参数设置格外重要,抛光压力和抛光时间分别设置为 10 g 和 4 h,轴承转速设置为 2000 r/min。最终,经过 0.1 μm 颗粒度精细抛光后,氟化镁微盘腔的本征品质因子 Q 值能够达到 10^9 量级。抛光完成后的氟化镁微盘腔实物和侧壁粗糙度如图 4 所示,选取图 4(a)中微腔侧壁 30 $\mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 局部区域,该区域的表面粗糙度测量结果能够达到 0.394 nm [图 4(b)],与相同 Q 值量级的氟化钙微腔的粗糙度

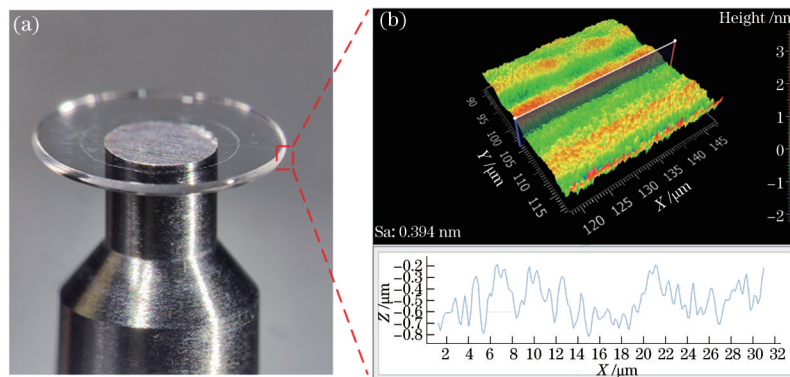


图 4 精抛光工艺后的氟化镁微盘腔。(a)微腔光滑侧壁实物图;(b)微腔侧壁局部粗糙度表征图

Fig. 4 MgF_2 microdisk resonator after fine polishing. (a) Realistic figure of smooth sidewall of microresonator; (b) characterization of local roughness of microresonator sidewall

相近^[20]。

3.2 超高品质 MgF_2 微盘腔测试

光学微腔品质因子的表征方法主要包括半峰全宽法与腔内功率衰荡两种技术,分别从高品质光学微腔的频域滤波线宽以及时域储能延时角度进行表征。由于半峰全宽法受限于调频激光器线宽和精度指标,无法适用于 Q 值达 10^9 以上的超高品质氟化镁微盘腔的线宽表征,因此本文采用腔内功率衰荡法从时域角度测量制备出的超光滑氟化镁微盘腔的品质因子。腔内功率衰荡法^[21]测量氟化镁微盘腔 Q 值的机理是:波导中的输入光场与微腔中的光场产生干涉作用,使传输谱线呈现衰减振荡趋势,该衰荡谱线的包络反映了微腔内光场能量的衰减。通过对该衰荡谱线进行拟合,计算出光子在氟化镁微盘腔中的存储寿命,其中腔内能量衰减至初始能量 e^{-1} 时所用时间即光子寿命,光子寿命 τ 与氟化镁微盘腔的品质因子 Q 值满足

$$Q = \omega\tau, \quad (3)$$

式中: ω 表示氟化镁微盘腔的谐振模式角频率。因此,腔内功率衰荡法通过对氟化镁微盘腔测得的衰荡曲线进行拟合分析得到光子寿命 τ 后,利用式(3)即可计算出氟化镁微盘腔的有载品质因子 Q 值。

为了提高氟化镁晶体微盘腔的耦合效率、减小耦合损耗对氟化镁微盘腔有载品质因子的影响,本文采用锥形光纤耦合方式对氟化镁微盘腔的超高品质因子 Q 值进行测试,整体耦合测试系统方案如图 5 所示。耦合系统方案主要围绕获取氟化镁微盘腔衰荡波形展开,在高倍显微镜下利用 6 维精密位移台控制腔与锥形光纤(锥腰直径 $2\ \mu\text{m}$)之间的耦合距离,以便实现高效耦合状态;此外,耦合系统输出光信号经过光电探测转化为电信号,最终氟化镁微盘腔中的衰荡波形通过示波器观测得到,衰荡谱线的凹陷深度可以通过改变入射光偏振状态进行调整。

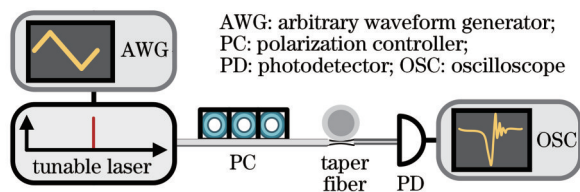


图 5 基于锥形光纤耦合的氟化镁微盘腔超高品质因子测试系统框图

Fig. 5 Diagram of ultra-high quality factor testing system based on tapered fiber coupling for MgF_2 microdisk resonator

为了测量整个自由频谱范围(FSR,可用 F_{SR} 表示)周期内的模式谱,将信号发生器的输出波形和激光器的中心波长分别设置为三角波模式和 $1550\ \text{nm}$,并且三角波驱动信号的扫描频率和电压峰-峰值分别为 $100\ \text{Hz}$ 和 $2.5\ \text{V}$ (对应约 $17\ \text{GHz}$ 的激光器扫频范围),最终通过调节优化锥形光纤与氟化镁微盘腔之间的耦合状态得到如图 6 所示的透射谱测试结果。根据激光器线性调频速率与周期时域间隔,图 6(a)中选取的氟化镁微盘腔的自由频谱范围测量结果约为

$15.15\ \text{GHz}$,与自由频谱范围和微盘腔直径、折射率之间的理论关系相匹配 [$F_{\text{SR}} = c/(\pi D n_1)$,其中氟化镁的微盘腔直径 D 和折射率 n_1 分别为 $4.6\ \text{mm}$ 和 1.37]。此外,从图 6(a)中透射谱线还可以看出,氟化镁微盘腔单个 FSR 内存在多个谐振模式,绝大部分谐振峰可以清晰辨别并且衰荡现象非常明显,因此氟化镁微盘腔中绝大多数模式都达到了超高品质因子水平。选取临界耦合状态下单个氟化镁微盘腔模式进行拟合,拟合曲线如图 6(b)所示,计算得出该模式的光子寿命 τ 约为 $1\ \mu\text{s}$ 。根据式(3)可以推算出氟化镁微盘腔的品质因子 Q 值约为 1.2×10^9 ($1550.43\ \text{nm}$ 波长处)。因此,本文成功制备了超高品质氟化镁晶体微盘腔,在非线性光学、腔量子电动力学、光谱学、相干光通信以及微波光子学等诸多领域都具有重要应用价值。

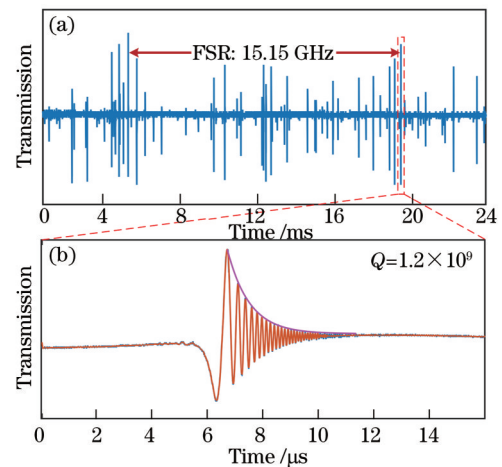


图 6 氟化镁微盘腔透射谱。(a)微腔透射谱;(b)衰荡拟合曲线

Fig. 6 Transmission of MgF_2 microdisk resonator.

(a) Microresonator transmission spectrum; (b) ringdown fitting curve

4 结 论

利用北京邮电大学自主研制的超精密加工平台并结合定形、粗抛和精抛多级加工工艺,制备出亚纳米表面粗糙度的氟化镁晶体微盘腔,最终通过锥形光纤耦合与腔内衰荡法测得氟化镁微盘腔品质因子 Q 值达到 1.2×10^9 。本文工作表明改善表面粗糙度以降低散射损耗是提升氟化镁晶体微盘腔品质因子 Q 值的有效途径,超精密机械加工工艺适用于不同材料、尺寸和形貌的毫米级超高品质晶体微腔制备,有助于进一步推动我国超高品质光学晶体微腔领域的研究发展。

参 考 文 献

- [1] Carmon T, Vahala K J. Visible continuous emission from a silica microphotonic device by third-harmonic generation[J]. Nature Physics, 2007, 3(6): 430-435.
- [2] Henrich M, Kuhn A, Rempe G. Transition from antibunching to bunching in cavity QED[J]. Physical Review Letters, 2005, 94(5): 053604.
- [3] Yilmaz Y O, Demir A, Kurt A, et al. Optical channel

- dropping with a silicon microsphere[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(8): 1662-1664.
- [4] Boca A, Miller R, Birnbaum K M, et al. Observation of the vacuum Rabi spectrum for one trapped atom[J]. Physical Review Letters, 2004, 93(23): 233603.
- [5] Suh M G, Yang Q F, Yang K Y, et al. Microresonator soliton dual-comb spectroscopy[J]. Science, 2016, 354(6312): 600-603.
- [6] Pfeifle J, Brasch V, Lauerer M, et al. Coherent terabit communications with microresonator Kerr frequency combs[J]. Nature Photonics, 2014, 8(5): 375-380.
- [7] Xue X X, Xuan Y, Kim H J, et al. Programmable single-bandpass photonic RF filter based on Kerr comb from a microring[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(20): 3557-3565.
- [8] 沈远, 孟令俊, 王梦宇, 等. 氟化镁楔形微腔色散调控及孤子产生数值分析[J]. 光学学报, 2021, 41(3): 0323001.
Shen Y, Meng L J, Wang M Y, et al. Dispersion engineering of magnesium fluoride wedge resonator and numerical analysis for soliton generation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 0323001.
- [9] 张新亮, 赵延菁. 微腔光频梳研究进展[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823014.
Zhang X L, Zhao Y J. Research progress of microresonator-based optical frequency combs[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823014.
- [10] Armani A M, Kulkarni R P, Fraser S E, et al. Label-free, single-molecule detection with optical microcavities[J]. Science, 2007, 317(5839): 783-787.
- [11] Wildgen S M, Dunn R C. Whispering gallery mode resonators for rapid label-free biosensing in small volume droplets[J]. Biosensors, 2015, 5(1): 118-130.
- [12] Chistiakova M V, Armani A M. Optical detection of CO and CO₂ temperature dependent desorption from carbon nanotube clusters[J]. Nanotechnology, 2014, 25(39): 395201.
- [13] 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): 3028-3042.
Cao Q T, Tang S J, Chen H J, et al. Research advances of ultrahigh-Q on-chip microcavity photonics[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(27): 3028-3042.
- [14] 王梦宇, 杨煜, 吴涛, 等. 回转椭球体氟化钙毫米晶体微腔制备与谐振特性分析[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823019.
Wang M Y, Yang Y, Wu T, et al. Fabrication and resonance characteristic analysis of spheroid calcium fluoride millimeter crystalline microcavity[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823019.
- [15] 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.
- [16] 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: 39-45.
Shen Y. Research on optical frequency comb generation in magnesium fluoride micro-resonator[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021: 39-45.
- [17] Ji J R, Wang H T, Ma J, et al. Narrow linewidth self-injection locked fiber laser based on a crystalline resonator in add-drop configuration[J]. Optics Letters, 2022, 47(6): 1525-1528.
- [18] Grudinin I S. Crystalline whispering gallery mode resonators for quantum and nonlinear optics[D]. California: California Institute of Technology, 2008: 38-42.
- [19] 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.
- [20] Grudinin I S, Matsko A B, Savchenkov A A, et al. Ultra high Q crystalline microcavities[J]. Optics Communications, 2006, 265(1): 33-38.
- [21] Dumeige Y, Trebaol S, Ghiša L, et al. Determination of coupling regime of high-Q resonators and optical gain of highly selective amplifiers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2008, 25(12): 2073-2080.