

基于模式分裂现象的在纤式双微盘谐振腔

林春婷¹, 吴根柱^{1,2*}, 汪成程¹, 卢俊城¹¹浙江师范大学光学信息研究所, 浙江 金华 321004;²浙江师范大学行知学院, 浙江 金华 321004

摘要 为了实现结构紧凑、性能稳定的回音壁微腔, 提出一种在纤式并联双微盘结构, 其中回音壁微腔与激发回音壁模式的光波导均处于光纤纤芯中。采用有限时域差分法研究模式分裂现象中对称模式与反对称模式随着两微盘耦合间距增大的变化规律。研究表明, 对称模式与反对称模式之间存在竞争关系, 随着耦合间距的增大, 反对称模式的透射率先变大后变小, 共振波长发生红移; 对称模式则正好相反。通过计算分析制作工艺精度对模式分裂的影响。该研究结果可用于高灵敏度在纤式微盘光纤温度传感器的设计等领域。

关键词 光纤光学; 回音壁模式; 有限时域差分法; 双微盘谐振器; 模式分裂

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0406003

In-Fiber Double Microdisk Resonator Based on Mode Splitting

Lin Chunting¹, Wu Genzhu^{1,2*}, Wang Chengcheng¹, Lu Juncheng¹¹Institute of Optical Information, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China;²Xingzhi College, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China

Abstract In order to realize the whispering gallery microcavity with compact structure and stable performance, this paper proposes an in-fiber parallel dual microdisk structure, in which the whispering gallery microcavity and the optical waveguide that excites the whispering gallery mode are both in the fiber core. Finite time domain difference method is used to study the variations of the symmetric mode and antisymmetric mode in the mode splitting with the coupling distance between two microdisks. The research results show that there is a competitive relationship between the symmetric mode and the antisymmetric mode. As the coupling distance increases, the transmittance of the antisymmetric mode first increases and then decreases, and the resonance wavelength is red shifted; the symmetric mode is exactly the opposite. The influence of manufacturing process accuracy on mode splitting is analyzed by calculation. The research results can be used to design high-sensitivity fiber-optic temperature sensors in fiber micro-disks and other fields.

Key words fiber optics; whispering gallery modes; finite time domain difference method; dual microdisk resonator; mode splitting

OCIS codes 060.2310; 140.3945; 060.2370

1 引言

回音壁(WGM)微腔是一种将光束缚在环形波导结构中的微纳光学谐振腔, 它利用连续全反射将光限制在一个很小的闭合腔体区域并在腔体内部保

持稳定的行波传输模式^[1-4]。WGM 微腔具有高品质因子、小模式体积的特点^[5-7], 在高灵敏度传感器^[8-9]、超低阈值激光器^[10]与非线性光学^[11-12]等领域展现出广泛的应用前景。但激发/收集无源回音壁模式的光波导与回音壁微腔之间是彼此分离的,

收稿日期: 2020-06-18; 修回日期: 2020-09-14; 录用日期: 2020-10-09

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY19F050015, LY19F050014)

* E-mail: wugenzhu@zjnu.cn

其集成度和稳定性较低且不易转移。因此,目前基于回音壁微腔的应用仍被限制在实验室环境中^[13]。近几年研究者提出一种在纤式回音壁微腔,其中单模光纤的纤芯作为耦合器来激发和收集回音壁模式,光纤包层中的圆柱体结构作为回音壁微腔^[14],该结构能将回音壁微腔集中在一根光纤内,有效处理了回音壁微腔转移率低、集成度低等问题^[13]。另外,有研究表明,在微腔周围放置一个相等的微腔,两微腔靠得很近,相互耦合形成一种复合结构,这种结构由于可以和原子相互作用形成的分子相类比,因而被称为光子分子^[15-18]。在该结构中,不同谐振器中的光学模式之间的相互作用产生超模,并且光子分子能够提高传感器的灵敏度^[15]。为了设计出结构紧凑、性能稳定的回音壁微腔谐振系统,本文基于有限时域差分法(FDTD)仿真提出一种新型在纤式双微盘谐振腔,其中回音壁微腔与其激发回音壁模式的光波导均位于光纤纤芯中,这种耦合结构将回音壁微腔高度集成,更能解决目前回音壁微腔中集成度、可转移较低的问题,具有一体化结构。并且在系统中,由于两微盘之间模式-模式的相互作用,输出透射光谱发生模式分裂^[19-21],两微盘的耦合间距对

模式分裂有着很大的影响,可基于此原理制作高灵敏度的微位移传感器。

本文采用 FDTD 对具有模式分裂现象的在纤式双微盘谐振腔进行仿真模拟,分析两微盘耦合间距对模式分裂中对称模式、反对称模式的影响,并计算出制作工艺精度对模式分裂的影响。研究结果可用于设计高灵敏度在纤式微盘光纤温度传感器。

2 器件模型及理论分析

2.1 双微盘结构设计

如图 1 所示,本文基于 D 型光纤提出了在纤式并联双微盘结构,该结构是由纤芯中的上下两根直波导与两个并联的微盘构成。选取 D 型光纤纤芯中的一段,用飞秒激光加工方法制作出两个半径相等的微盘,以及纤芯内上、下两个宽度相等的直波导,其尺寸为:两微盘半径 $R=4\ \mu\text{m}$,两微盘圆心间距 $d=8.2\ \mu\text{m}$,两个波导宽度均为 $0.4\ \mu\text{m}$,微盘与上下波导的间距均为 $0.6\ \mu\text{m}$,高度均为 $2\ \mu\text{m}$ 。器件工作时光从纤芯的一端入射,接着分成两束分别往上、下直波导传播,在倏逝波的作用下,光从直波导耦合进入微盘腔。当在微盘中传输的光符合谐振条件,则发生谐振加强现象。

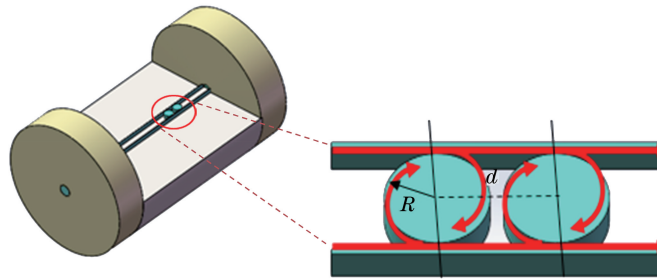


图 1 在纤式并联双微盘结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of in-fiber parallel double microdisk

2.2 模式分裂现象

由微腔模式理论得知,微盘微腔内存在径向模式数 m 互为相反的两个简并模式,这两个模式分别对应逆时针和顺时针方向传播的两种 WGM 模式。因此在该双微盘系统中,每个微盘腔都是驻波腔,对于耦合到波导的驻波腔,其腔模式会同衰减为向前和向后传播的波导模式。该结构中除了存在两个微盘腔模式之间的直接耦合,还存在通过耦合光纤连接的微腔之间的间接耦合。这两种耦合效应共同导致了简并模式分裂,即原来频率为 ω_0 的两个简并模式被分为两个不同谐振频率的模式。根据时谐耦合模式理论,在直接耦合与间接耦合作用下分裂

形成的两个模式的谐振频率满足^[18,22]

$$\omega_{s(a)} = \omega_0 \mp \left[\mu - \frac{1}{\tau_e} \sin(\beta l + \theta_1 - \theta_2) - \frac{1}{\tau_e} \sin(\beta' l + \theta_3 - \theta_4) \right], \quad (1)$$

式中: ω_s, ω_a 为两个分裂模式的谐振频率; ω_0 是初始谐振频率; μ 为直接耦合下两微盘腔之间的耦合系数; $\frac{1}{\tau_e}, \frac{1}{\tau_e}$ 分别为上、下波导与微盘腔的耦合损耗速率; β, β' 分别为上、下波导的传播常数; $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 是与上、下波导中正向和反向传播模式相关的输入耦合系数的相位; l 为谐振器在对称平面左侧的

左(右)参考平面到谐振器在对称平面右侧的左(右)参考平面的距离。

可以看出分裂模式频率与两个微盘的直接耦合系数和引起间接耦合相移的两微盘的距离有关。当两个微盘相互靠近一定距离时,在两种耦合作用的影响下:相位差为 π 的偶数倍的模式同相耦合形成在耦合中心处场分布增强的对称模式(SM);相位差为 π 的奇数倍的模式异相耦合形成在耦合中心处场分布减弱的反对称模式(ASM)。如图 2 插图中的模式场分布可看出,反对称模式使耦合中心电场减弱,此时两个微盘场分布表现出相互排斥的现象,两个微盘内基模被向腔中心压缩。同理,对称模式使耦合中心电场强度最大,此时两个微盘场分布表现出相互吸引的现象,两个微盘内基模向腔外被拉伸,结果导致对称模式下的基模有效半径比反对称模式下的基模有效半径大。根据谐振条件,可知对称模式位于长波长处,反对称模式位于短波长处,透射谱上出现两个峰,如图 2 所示。

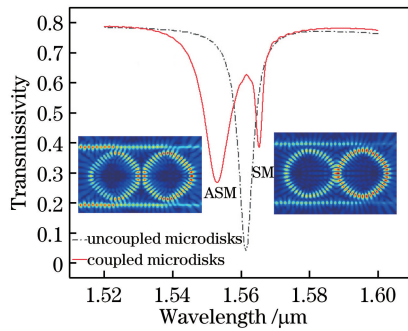


图 2 模式分裂图(左、右插图分别为反对称模式和对称模式的场分布图)

Fig. 2 Mode splitting illustration (left and right insets are field distributions of antisymmetric mode and symmetric mode, respectively)

3 FDTD 仿真及结果分析

3.1 耦合间距对模式分裂透射谱的影响

本文将基于 D 型光纤进行仿真,以左边的微盘圆心作为 $x-y$ 平面的原点。设置光纤纤芯的折射率为 1.4682,包层折射率为 1.4628,纤芯直径为 $10 \mu\text{m}$,将纤芯里的多余部分挖空,形成两个半径为 $4 \mu\text{m}$ 的微盘柱,纤芯的上、下边缘宽度各为 $0.4 \mu\text{m}$ 。纤芯中上、下直波导与微盘的高度一致,并比包层与前后纤芯部分高 $1 \mu\text{m}$ 。选取的光源为宽带光源(光源波长为 $1.52 \sim 1.60 \mu\text{m}$),光从纤芯一端中心入射,图 3 为仿真的 $x-y$ 平面。控制两微盘与上下波导的距离相等,改变两微盘之间的圆心

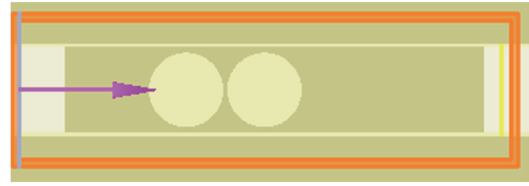


图 3 FDTD 仿真的 $x-y$ 平面(部分)

Fig. 3 $x-y$ plane of FDTD simulation (part)

距,研究耦合间距对输出端透射谱的影响。

从图 4 可知,当两微盘的耦合间距为 $0.1 \mu\text{m}$ 时,该透射谱发生模式分裂,出现两个分裂谷,随着耦合间距的进一步增大,右边分裂谷的深度变小,左边分裂谷的深度变大,当耦合间距为 $0.43 \mu\text{m}$ 时,右边的分裂谷消失,只剩下左边的分裂谷。分析认为当耦合间距处于 $0 \sim 0.43 \mu\text{m}$ 时,由于 WGM 模式之间的强耦合作用,SM 和 ASM 发生了模式竞争,SM 逐渐减弱直至消失,ASM 逐渐增强并占主导地位,当耦合间距为 $0.43 \mu\text{m}$ 时,双微盘系统中只有 ASM,电场在耦合区变弱,此时两微腔的相互作用表现为排斥力。

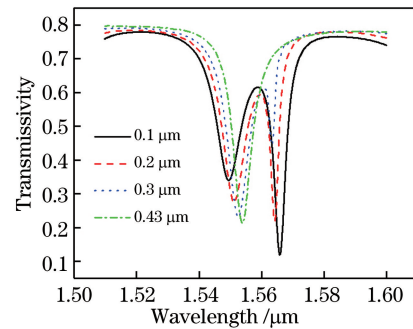


图 4 耦合间距在 $0.1 \sim 0.43 \mu\text{m}$ 范围内的输出谱线图

Fig. 4 Output spectral lines with coupling spacing from $0.1 \mu\text{m}$ to $0.43 \mu\text{m}$

从图 5 可知,在两微盘耦合间距从 $0.5 \mu\text{m}$ 进一步增大的同时,左边分裂谷的谐振深度随着耦合间距的增大而变小,右边的分裂谷深度随着耦合间距的增大而增大。当耦合间距为 $1 \mu\text{m}$,左边的分裂谷消失,只剩下右边的分裂谷。这是因为随着耦合间距的加大,倏逝场耦合强度变小,左边的分裂谷深度逐渐变小并向右靠拢,与右边分裂谷合二为一。在此过程中,ASM 逐渐减弱,SM 逐渐增强并占主导地位,当耦合间距为 $1 \mu\text{m}$ 时,该系统中只剩下 SM,耦合区电场增强,两微盘之间的相互作用表现为吸引力。

对 $1.56 \mu\text{m}$ 谐振波长处出现的模式分裂进行分析,研究两模式透射率与耦合间距的变化关系,如

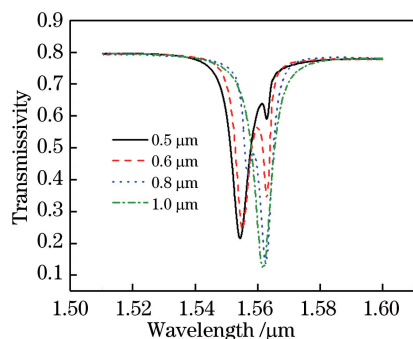


图 5 耦合间距在 0.5~1 μm 范围内的输出谱线图
Fig. 5 Output spectral lines with coupling spacing from 0.5 μm to 1 μm

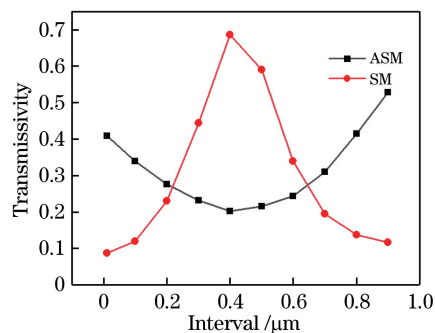


图 6 两模式透射率随耦合间距的变化曲线
Fig. 6 Variation of transmittance of two modes with coupling interval

图 6 所示,发现两模式在透射谱上存在竞争关系,这是由两微盘之间的相互作用引起的。随着耦合间距的增大,左端分裂谷(ASM)的透射率先变小后变大,右端分裂谷(SM)的透射率先变大后变小。这是由于左边分裂谷对应 ASM 激发的排斥力先变大后变小,导致光泄漏先变小后变大。同理可推得对称模式的变化。在这一过程中,两模式的透射峰对应的波长间隔在缩小,最后模式分裂现象消失,反对称

模式逐渐消失并与对称模式融为一体。

选左边分裂谷(ASM)的透射率为研究对象,当耦合间距处于 0~0.43 μm 之间,透射率是随着耦合间距的增大而变小的。分析数据得出灵敏度为 $-0.51679 \mu\text{m}^{-1}$,线性拟合度为 95.847%。当耦合间距处于 0.43~1 μm 之间,透射率是随着耦合间距的增大而变大的,此时的线性拟合度为 94.771%,灵敏度为 $0.73605 \mu\text{m}^{-1}$,其数据拟合图如图 7 所示。

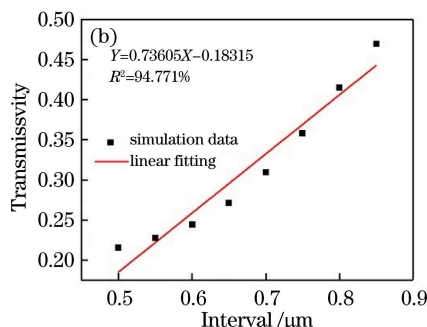
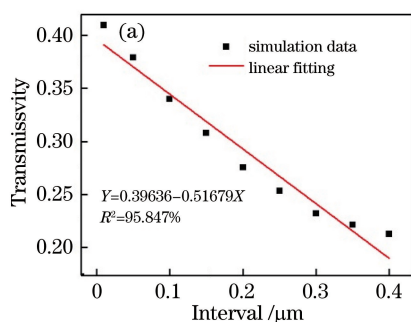


图 7 耦合间距在 1 μm 内时透射率与耦合间距的关系。(a)耦合间距在 0~0.43 μm 之间时透射率与耦合间距的关系;
(b)耦合间距在 0.45~1 μm 之间时透射率与耦合间距的关系

Fig. 7 Relationship between transmittance and coupling interval for coupling interval within 1 μm. (a) Relationship between transmittance and coupling interval for coupling interval of 0-0.43 μm; (b) relationship between transmittance and coupling interval for coupling interval of 0.45-1 μm

利用 SM 和 ASM 的谐振波长的漂移量来研究耦合间距的变化,从图 4、图 5 可以发现随着耦合间距的增大,ASM 的谐振波长红移,SM 的谐振波长蓝移。选 ASM 的谐振波长为研究对象,图 8 为谐振波长与耦合间距的变化关系,发现谐振波长的漂移可以看成是耦合间距的线性函数,线性拟合度为 99.409%,灵敏度为 9.33 pm/nm。

3.2 制作工艺精度对模式分裂的影响

当利用飞秒激光刻蚀工艺制作微盘时,由于受到仪器设备精度和环境干扰等因素的影响,在 D 型光纤上制作出的圆形微盘可能不是理想的光滑圆

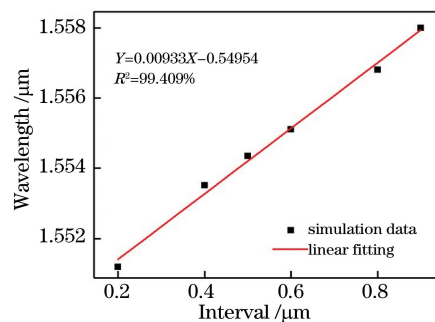


图 8 谐振波长随耦合间距的变化
Fig. 8 Variation of resonance wavelength with coupling interval

形,其边缘可能是具有一定粗糙度的多边形或椭圆等形状。通过仿真分析,估算出可容许的工艺误差,进而验证该结构的实用性。如图 9 所示,从对相对半径为 $4\ \mu\text{m}$ 的微盘腔的仿真结果中可以发现,在最大变形度为正八边形时微腔仍能保持模式分裂现象,此时八边形的顶角与对应圆形的偏离距离为 $3.6\ \mu\text{m}$,该尺寸处于目前飞秒激光微加工技术所允许的误差范围内。另外,对具有一定椭圆形状的微盘也进行了仿真分析,椭圆度为 0.556 时微盘中仍然保持模式分裂现象,如图 10 所示。

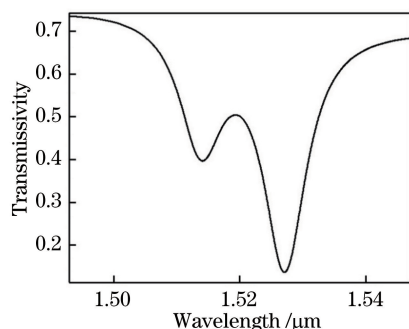


图 9 两微盘间距为 $0.3\ \mu\text{m}$ 时八边形微盘中的模式分裂现象

Fig. 9 Mode splitting in octagonal microdisk when distance between two microdisks is $0.3\ \mu\text{m}$

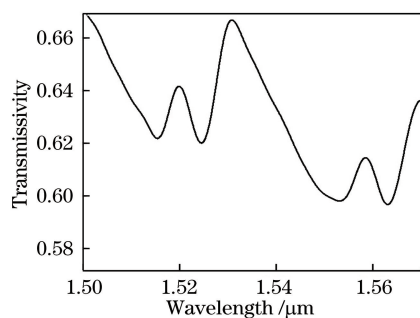


图 10 两微盘间距为 $0.1\ \mu\text{m}$,椭圆长半轴为 $9\ \mu\text{m}$ 、短半轴为 $4\ \mu\text{m}$ 时的模式分裂现象

Fig. 10 Mode splitting when distance between two microdisks is $0.1\ \mu\text{m}$, semi-major axis of ellipse is $9\ \mu\text{m}$, and semi-minor axis of ellipse is $4\ \mu\text{m}$

总之,两微盘的间距对透射谱的影响较大,可以通过改变外界的温度,使微盘发生热胀冷缩,这时两微盘的距离发生改变,透射谱发生改变,从而使得微盘可以起到感知外界环境温度变化的作用。利用这一原理可设计出高灵敏度在纤式双微盘光纤温度传感器。

4 结 论

提出在纤式耦合双微盘谐振腔结构,该结构主

要由光纤纤芯中的上、下直波导和两个并联双微盘构成,具有集成度高的优点。采用有限时域差分法对在纤式双微盘谐振腔的模式分裂中 SM 与 ASM 随两微盘间距的变化规律进行了分析,结果表明随着耦合间距的增大,反对称模式对应的左端分裂峰的透射率先减小后增大,且在耦合间距变大的过程中,左端分裂峰的谐振波长一直在红移;对称模式则正好相反。通过仿真分析制作工艺精度对模式分裂的影响,结果表明刻蚀精度在允许误差范围内。该在纤式耦合双微盘谐振腔结构在光纤温度传感器等领域具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Wang P F, Li A Z. Packaging and integration of whispering gallery modes optical microcavity devices [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(11): 1148008. 王鹏飞, 李昂震. 回音壁模式光学微腔器件的封装与集成[J]. 光子学报, 2019, 48(11): 1148008.
- [2] He C Z, Hu S D, Chen R Q, et al. Injecting velocity influence of micro-resonators sensitivity in whispering-gallery-mode [J]. Laser Journal, 2018, 39(1): 28-31. 何春枝, 胡舜迪, 陈瑞强, 等. 回音壁模式微腔灵敏度的进样流速影响研究[J]. 激光杂志, 2018, 39(1): 28-31.
- [3] Kosma K, Schuster K, Kobelke J, et al. An "in-fiber" Whispering-Gallery-Mode bi-sphere resonator, sensitive to nanometric displacements [J]. Applied Physics B, 2017, 124(1): 1.
- [4] Barannik A A, Cherpak N T, Protsenko I A, et al. Millimeter-wave WGM resonator-based characterization of continuous and noncontinuous ultrathin Cu films[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2019, 29(5): 363-365.
- [5] Wang H H, Huang Y Q, Gu H M, et al. Analysis and numerical simulation of a novel optical microcavity with the roof structure [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2019, 58(1): 012010.
- [6] Zhi Y Y, Yu X C, Gong Q H, et al. Single nanoparticle detection using optical microcavities[J]. Advanced Materials, 2017, 29(12): 1604920.
- [7] Indukuri S R, Bar-David J, Mazurski N, et al. Ultrasmall mode volume hyperbolic nanocavities for enhanced light-matter interaction at the nanoscale[J]. ACS Nano, 2019, 13(10): 11770-11780.
- [8] Liao Y B, Yuan L B. Preface to the topic of "Modern Optical Information Sensing" [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328000. 廖延彪, 苑立波. "现代光信息传感"专题前言[J].

- 光学学报, 2018, 38(3): 0328000.
- [9] Liao Y B, Yuan L B, Tian Q. The 40 years of optical fiber sensors in China[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328001.
廖延彪, 苑立波, 田芊. 中国光纤传感 40 年[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328001.
- [10] Ding Y, Fan H B, Zhang X, et al. Ultralow-threshold neodymium-doped microsphere lasers on a silicon chip[J]. *Optics Communications*, 2017, 395: 51-54.
- [11] Feng Y M, Zheng Y L, Zhang F X, et al. Passive fine-tuning of microcavity whispering gallery mode for nonlinear optics by thermo-optical effect [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(10): 101103.
- [12] Xu D G, Li C Z, Wang Y Y, et al. Ring-cavity terahertz parametric oscillator based on MgO:SLN crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1119001.
徐德刚, 李长昭, 王与焯, 等. 基于 MgO:SLN 晶体的环形腔太赫兹参量振荡器[J]. *光学学报*, 2018, 38(11): 1119001.
- [13] Shi L L. Study on the key technology of in-fiber whispering gallery mode resonator[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017: 55-59.
史磊磊. 在纤式回音壁微腔关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017: 55-59.
- [14] Shi L L, Zhu T, Huang D M, et al. In-fiber whispering gallery mode resonator fabricated by femtosecond laser micromaching [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9655: 965546.
- [15] Li A, Bogaerts W. Backcoupling manipulation in silicon ring resonators [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(6): 620-629.
- [16] Song Q H. Lasing and directional emission from novel microcavity lasers [D]. Shanghai: Fudan University, 2007: 114-116.
宋清海. 新型光学微腔激光器的构造及其方向性激光出射的研究[D]. 上海: 复旦大学, 2007: 114-116.
- [17] Vollmer F, Yang L. Label-free detection with high-Q microcavities: a review of biosensing mechanisms for integrated devices [J]. *Nanophotonics*, 2012, 1(3/4): 267-291.
- [18] Li Q, Wang T, Su Y K, et al. Coupled mode theory analysis of mode-splitting in coupled cavity system [J]. *Optics Express*, 2010, 18(8): 8367-8382.
- [19] Wang K Y. Lasing characteristics in perovskite microcavity [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 76-80.
王开阳. 钙钛矿微腔的激光特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 76-80.
- [20] Yang Z H, Huo J Y, Han X W. Angular-rate sensing by mode splitting in a whispering-gallery-mode optical microresonator [J]. *Measurement*, 2018, 125: 78-83.
- [21] Asano M, Özdemir Ş K, Chen W, et al. Controlling slow and fast light and dynamic pulse-splitting with tunable optical gain in a whispering-gallery-mode microcavity[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(18): 181105.
- [22] Manolatou C, Khan M J, Fan S, et al. Coupling of modes analysis of resonant channel add-drop filters [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1999, 35(9): 1322-1331.