

# 基于高圆度微球腔选模的单纵模窄带光纤激光器

万洪丹, 丁佐芹, 汪 杰, 刘琳倩, 张祖兴\*

南京邮电大学先进光子技术实验室, 江苏 南京 210023

**摘要** 提出了一种基于高圆度微球腔选模的双环腔光纤激光器。通过改进熔融加热和表面洁净化处理工艺, 获得了高圆度、高  $Q$  值微球腔, 利用二维可视的三维高精度耦合系统实现锥形光纤-微球腔的高效率耦合。通过优化入射光偏振态和锥形光纤直径, 获得了耦合效率为 99.5%, 3 dB 带宽为 1 pm, 边模抑制比为 14.5 dB 的窄带回音壁模 (WGM) 共振谱。将高效耦合的锥形光纤-微球腔作为光纤子环腔选模单元, 获得了 3 dB 带宽小于 0.01 nm, 边模抑制比为 40 dB, 稳定无跳模的单纵模窄带激光输出。

**关键词** 激光器; 单纵模; 回音壁模式; 双环腔

**中图分类号** TN248.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.1001003

## Single-Longitudinal-Mode Narrow Linewidth Fiber Lasers Using High Roundness Microsphere as Mode Selector

Wan Hongdan, Ding Zuoqin, Wang Jie, Liu Linqian, Zhang Zuxing

*Advanced Photonic Technology Laboratory, Nanjing University of Posts and Telecommunications,  
Nanjing, Jiangsu 210023, China*

**Abstract** A double-ring cavity fiber laser based on a high roundness microsphere cavity as the single-longitudinal-mode selector is proposed. By the improvement of the melt heating technology and surface cleaning process, microsphere cavities with high roundness and high  $Q$  are obtained. We achieve highly efficient coupling between the tapered fiber and the microsphere cavity by using a two-dimensional visual and three-dimensional high-precision coupling system. Through optimizing the polarization of incident light and the diameter of tapered fiber, we obtain whispering gallery mode (WGM) resonance spectrum with coupling efficiency of 99.5%, a 3 dB bandwidth of 1 pm and a side-mode-suppression-ratio (SMSR) of 14.5 dB. The proposed fiber laser produces narrow bandwidth laser spectra with a 3 dB linewidth less than 0.01 nm, a SMSR of 40 dB and a high stability without mode-hopping.

**Key words** lasers; single longitudinal mode; whispering gallery mode; double-ring cavity

**OCIS codes** 140.3510; 140.3948; 140.3945; 140.3570

## 1 引 言

单纵模窄带光纤激光器具有相干性高、波长灵活、结构紧凑等优点, 在光纤传感、相干通信、高分辨率光谱测试等领域得到了广泛的研究和应用<sup>[1-4]</sup>。目前, 线性短腔和环形腔为两种主要的光纤谐振腔结构<sup>[5]</sup>。线性腔光纤激光器的短直腔通过在增益光纤上刻光栅或者以光栅和增益光纤对接的方式构造<sup>[6-8]</sup>, 后者成本相对低, 但需结合特殊封装技术确保稳定性。环形光纤激光器腔长较长, 需要加入窄带光纤滤波器实现单纵模

**收稿日期:** 2017-04-25; **收到修改稿日期:** 2017-06-08

**基金项目:** 江苏省自然科学基金(BK20161521)、江苏省自然科学基金青年项目(BK20150858)、南京邮电大学引进人才科研启动项目(NY213083)、南京邮电大学国自基金孵化项目(NY214059)、江苏省特聘教授资助项目(RK002STP14001)、江苏省“六大人才高峰”资助项目(2015-XCL-023)、南京邮电大学引进人才项目资助(NY214002, NY215002)

**作者简介:** 万洪丹(1984—), 女, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事窄线宽光纤激光器及其在光纤通信和传感系统应用等相关理论与应用技术方面的研究。E-mail: hdwan@njupt.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: zxzhang@njupt.edu.cn

选择,如光纤光栅<sup>[9-10]</sup>、饱和吸收体<sup>[11-12]</sup>、级联法布里-珀罗(FP)腔<sup>[13]</sup>、有源注入复合腔<sup>[5]</sup>等。然而,光纤光栅、FP腔等窄带滤波器件的3 dB带宽通常在0.05 nm以上,不利于激光器线宽的进一步压缩。如何在压缩激光输出带宽的同时,提高系统的稳定性和紧凑性并降低制作成本,成为了现阶段单纵模光纤激光器的研究重点。

本文提出一种基于高圆度微球腔选模的双环腔结构单纵模窄带光纤激光器。双环腔由一个有源光纤主环腔与一个置有锥形光纤-微球腔选模单元的光纤子环腔并联组成。采用激光熔融加热方法制备微球腔,通过控制并优化激光加热光斑和功率,结合洁净化处理技术,获得具有高圆对称性和高表面面形质量的微球。通过二维可视的三维高精度耦合位移系统控制微球腔和锥形光纤的耦合位置和距离,激发高Q值、超窄带宽回音壁模(WGM)共振谱,实现光纤谐振腔内窄带激光选模,实验获得了稳定性高、无跳模的单纵模窄带光纤激光输出。

## 2 实验装置与原理

如图1(a)所示,高圆度微球腔选模的单纵模窄带光纤激光器具有全光纤、双环腔结构。主环腔内980 nm抽运激光经过一个980/1550 nm波分复用器(WDM)注入一段长为30 cm的掺铒光纤(EDF, Coreactive EDFL1500),分别通过一个光纤隔离器(ISO)和偏振控制器(PC)来控制激光腔内光的单向传输和光场偏振状态。通过一个2×2耦合器将主环腔与置有锥形光纤-微球腔选模单元的子环腔相连。高圆度微球腔与锥形光纤通过倏逝场效应耦合,其光场在微球腔内全反射形成窄带WGM共振谱。激光通过光纤耦合器的10%的端口输出到光谱分析仪(OSA, YOKOGAWA AQ6370D)和光功率计,并进行测试。

先通过优化和控制CO<sub>2</sub>激光器的功率改善了微球圆对称性,后通过洁净化处理技术提高了微球表面均匀性和洁净度。获得的微球腔尺寸范围为150~200 μm。图1(b)和图1(c)分别为使用改进激光熔融加热

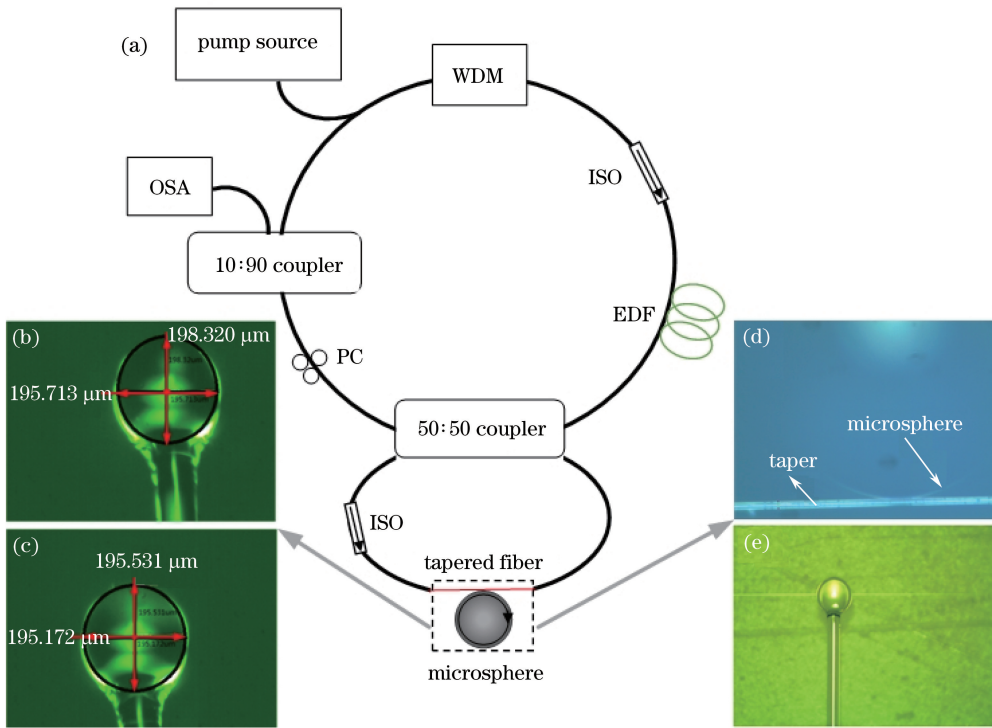


图1 (a)激光器系统图;(b)低圆度微球腔实物照片;(c)高圆度微球腔实物照片;(d)水平显微镜下锥形光纤-微球腔耦合实物图;(e)垂直显微镜下的锥形光纤-微球腔耦合实物图

Fig. 1 (a) Configuration of the proposed fiber laser; (b) picture of low-roundness microsphere cavity; (c) picture of high-roundness microsphere cavity; (d) picture of tapered fiber-microsphere cavity coupling system observed by a horizontal microscope; (e) picture of tapered fiber-microsphere cavity coupling system observed by a vertical microscope

以及洁净处理技术前后获得的具有不同圆度的微球实物对比照片。通过一个二维可视的三维高精度耦合位移平台实现锥形光纤、微球中光的耦合。图 1(d)和图 1(e)分别为水平和垂直显微镜观测的锥形光纤-微球腔耦合实物照片。其中,水平耦合显微镜放大倍率达到 1900 倍,能够在微球腔子午面实现锥形光纤-微球腔纳米级高精度耦合。

双环腔结构光纤谐振腔内主环腔和子环腔激光谐振条件表达式为<sup>[14]</sup>

$$\beta L_m = 2m\pi, m = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

$$\beta L_s = (2n + 1)\pi, n = 1, 2, \dots, \quad (2)$$

式中  $\beta$  为光传播常数,  $L_m$  为主环腔腔长,  $L_s$  为子环腔腔长。

环形腔的自由光谱范围(FSR,  $R_{FS}$ )的值  $R_{FS,i}$  为

$$R_{FS,i} = c/(n_e L_i), i = m, s, \quad (3)$$

式中  $c$  为真空中光速,  $n_e$  为谐振腔介质有效折射率。根据游标原理<sup>[12]</sup>,双环腔激光器腔内模式同时满足(1)式和(2)式时,产生激光共振,由此可得双环腔光纤激光器的 FSR 为主环腔和子环腔自由光谱范围的最小公倍数,即

$$R_{FS} = 2mR_{FS,m} = (2n + 1)R_{FS,s}. \quad (4)$$

子环腔内引入微米级直径微球腔,其窄带 WGM 共振谱进一步扩展了整个激光器的 FSR,压缩了带宽。因此,将双环腔内植入微球腔的方法大大增加了光纤激光器光谱的 FSR,滤除了多余的激光模式,有利于实现单纵模激光输出并有效抑制跳模。

### 3 实验结果与分析

图 2 为入射光场在不同偏振状态下的 WGM 共振谱,所用锥形光纤锥区直径  $d_f$  为  $3.8 \mu\text{m}$ ,微球直径  $d_s$  为  $195.2 \mu\text{m}$ 。在偏振状态 1(缩写为 P1)的情况下,锥形光纤和微球的耦合效率仅为 74.9%;在偏振状态 2(缩写为 P2)的情况下,锥形光纤和微球的耦合效率为 88.0%。偏振态 2 获得的 WGM 共振谱带宽更窄,窄带选模能力更强。因此,调节微球腔入射光场偏振态至最佳位置,有利于获得最佳窄带 WGM 共振谱。

图 3 为采用锥区直径  $d_f$  分别为  $3.5 \mu\text{m}$  和  $3.7 \mu\text{m}$  锥形光纤与直径  $d_s$  为  $195.2 \mu\text{m}$  微球腔耦合得到的 WGM 共振谱。当锥形光纤直径为  $3.5 \mu\text{m}$  时,共振波长为  $1552.52 \text{ nm}$ ,锥形光纤中 99.5%的光耦合进入微球腔,WGM 共振谱 3 dB 带宽  $\omega_1$  仅为  $1 \text{ pm}$ ,边模抑制比最高为  $14.5 \text{ dB}$ ,Q 值可达  $1.55 \times 10^6$ (采用可调谐激光器光源为 Agilent 81960A)。当锥形光纤直径为  $3.7 \mu\text{m}$  时,共振波长为  $1549.63 \text{ nm}$ ,锥形光纤中 94.2%的光耦合进入微球腔,其边模抑制比最高为  $3.8 \text{ dB}$ ,WGM 共振谱 3 dB 带宽  $\omega_1$  为  $1.2 \text{ pm}$ ,Q 值为  $1.29 \times 10^6$ 。由此看出,采用与微球腔直径匹配的锥形光纤能明显提高耦合效率,增大边模抑制比,压缩 WGM 共振谱带宽,提升 Q 值,优化微球腔内 WGM 共振谱的窄带选模效果。若锥形光纤的直径相对于微球较粗,光场基模在锥形光纤的锥区无法以倏逝场方式完全耦合进微球中,此种情况下基模对应的耦合效率降低,微球单位体积存储的基模能量减少,从而使得 Q 值下降,边模抑制比降低;若锥形光纤的直径相对于微球较细,则

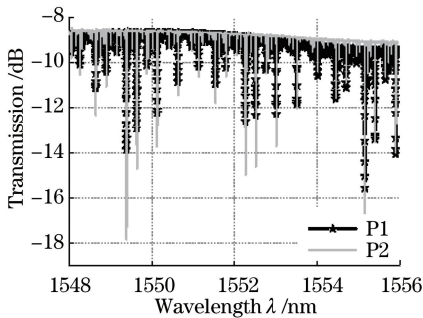


图 2 不同偏振状态下入射光的 WGM 共振谱  
Fig. 2 WGM resonant spectra of incident light in different polarization states

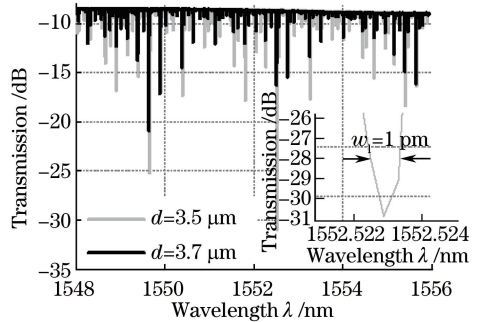


图 3 不同直径的锥形光纤与微球腔耦合获得的 WGM 共振谱  
Fig. 3 WGM resonance spectra obtained by coupling of tapered fibers-microsphere cavity with different diameters

光场的高阶模式将在锥区以倏逝场方式进入到微腔中,此时满足相位匹配条件的部分高阶模式将会形成回音壁模式共振谱,高阶模式的存在使得微球腔中基模的能量被削弱,从而降低了耦合效率、边模抑制比及Q值。

采用氢氧焰加热单模光纤的方法拉制了不同直径的锥形光纤,并将其分别与直径为  $195.2\ \mu\text{m}$  的微球腔进行耦合,得到了不同的耦合效率,其测试结果如表 1 所示。分析表中数据可知,当锥形光纤直径为  $3.5\ \mu\text{m}$  时,微球与其耦合效果最好,且锥区直径与此数值偏离越大,耦合效果越差。因此本文采用直径为  $3.5\ \mu\text{m}$  锥形光纤与微球腔耦合进行光纤激光器选模实验。

表 1 不同直径锥形光纤-直径为  $195.2\ \mu\text{m}$  的微球腔的耦合效率

Table 1 Coupling efficiency of tapered fibers with different diameters-microsphere cavity with diameter of  $195.2\ \mu\text{m}$

Diameter of tapered fiber / $\mu\text{m}$	3.3	3.5	3.7	3.9	4.3	4.58	5.3
Coupling efficiency / %	98.0	99.5	94.2	73.7	71.8	55.3	29.2

图 4 为基于图 1 所示的光纤激光器实验系统测试获得的激光光谱,图中对比了双环腔内置入锥形光纤-微球腔选模单元前后所获得的光谱。分析比较可知,相比于双环腔结构,通过锥形光纤耦合的方式将微球腔置入子环腔后,激光器单纵模运行,其光谱 3 dB 带宽  $w_1$  压缩至  $0.01\ \text{nm}$  以下(达光谱分析仪分辨率极限),边模抑制比提升了  $24.74\ \text{dB}$ ,并且数小时内未观察到跳模现象。

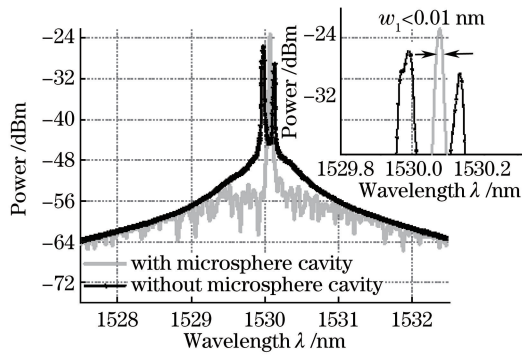


图 4 光纤激光器输出光谱图

Fig. 4 Spectra output of the fiber laser

图 5(a)为不同测量时间获得的激光器输出光谱稳定性实验结果,抽运功率为  $60\ \text{mW}$ 。整个激光器置于隔震性能较高的气浮式光学平台上。测试结果表明,  $12\ \text{h}$  内激光器输出无跳模现象,光谱谱型基本未发生变化,仅有小部分旁瓣发生细微的变化,输出激光的边模抑制比可达  $40\ \text{dB}$ 。图 5(b)为激光器输出光谱细节图,可以看出激光器的输出功率及峰值波长存在微小波动。测试结果表明,该激光器单位时间内峰值波长和功率波动分别为  $0.13\ \text{pm/h}$  和  $0.0354\ \text{dB/h}$ 。因此,在数小时运行时间内,该激光器的输出波长和功率较为稳定。

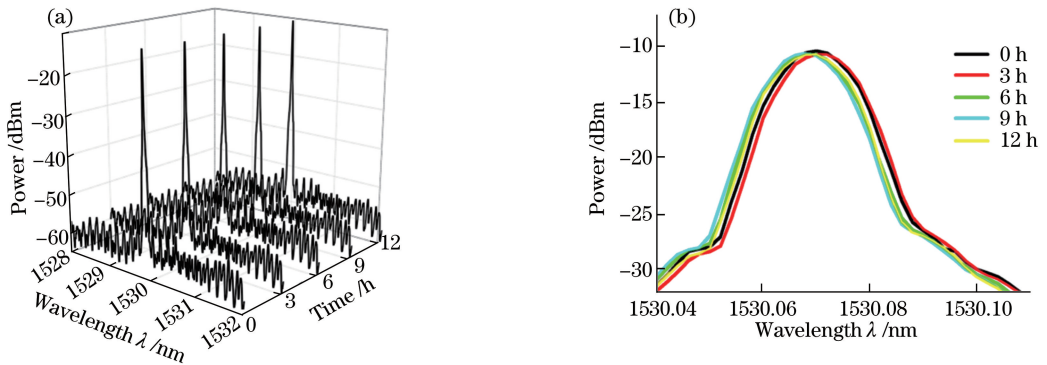


图 5 光纤激光器输出光谱稳定性。(a)每隔 3 h 测试的光谱;(b)输出光谱细节图

Fig. 5 Output spectral stability of the fiber laser. (a) Spectra measured every 3 hours; (b) detailed spectra

图 6 为改变抽运源功率的大小获得的激光器输出效率实验测试结果。由图可知,当抽运源的输出功率为 23.80 mW 时,激光器的输出阈值约为 0.0156 mW,斜率效率为 2.23%,当抽运功率为 200 mW 时,激光器输出功率为 4.33 mW。

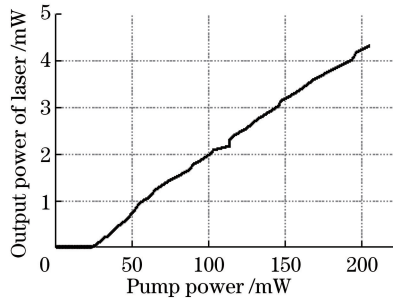


图 6 光纤激光器的斜率效率

Fig. 6 Slope efficiency of the fiber laser

## 4 结 论

提出了一种基于高圆度微球腔选模的单纵模窄带光纤激光器。通过一个  $2 \times 2$  耦合器将一个有源主环腔和一个子环腔并联构成双环腔结构。利用锥形光纤和二维可视的三维高精度耦合位移平台将具有高圆度的微球腔耦合置入子环腔内。通过优化微球腔熔融加热和表面洁净化处理工艺,优化入射光场的偏振态以及锥形光纤的匹配直径获得具有最佳选模效果的窄带 WGM 共振谱。当扫频激光器扫频精度为 0.5 pm 时,获得了耦合效率达 99.5%, 3 dB 带宽  $\omega_1$  为 1 pm, 边模抑制比最高为 14.5 dB, Q 值为  $1.55 \times 10^6$  的 WGM 共振谱。基于最佳耦合条件,搭建双环腔光纤激光器实验系统,实验获得了 3 dB 带宽  $\omega_1$  小于 0.01 nm、边模抑制比为 40 dB 的数小时无跳模的单纵模窄带激光输出,其激光输出阈值为 0.0156 mW,斜率效率为 2.23%。

## 参 考 文 献

- [1] Song Zhiqiang, Qi Haifeng, Wang Chen, *et al.* Narrow line-width fiber laser and application in sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s2): s214005.  
宋志强, 祁海峰, 王晨, 等. 窄线宽光纤激光器及其在光纤传感中的应用[J]. 光学学报, 2015, 35(s2): s214005.
- [2] Yu L Q, Lu D, Pan B W, *et al.* Widely tunable narrow-linewidth lasers using self-injection DBR lasers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(1):50-53.
- [3] Al-Taiy H, Wenzel N, Preußler S, *et al.* Ultra-narrow linewidth, stable and tunable laser source for optical communication systems and spectroscopy[J]. Optics Letters, 2014, 39(20): 5826-5829.
- [4] Luvsandamdin E, Kürbis C, Schiemangk M, *et al.* Micro-integrated extended cavity diode lasers for precision potassium spectroscopy in space[J]. Optics Express, 2014, 22(7): 7790-7798.
- [5] Wan H D, Wu Z W, Lu Z M, *et al.* A watts-level single-longitudinal-mode kHz-linewidth fiber laser based on a gain-controlled active compound cavity[J]. Laser Physics, 2014, 24(10): 105114.
- [6] Gao Y, Sun J Q, Chen G D, *et al.* Single-longitudinal-mode BEFL incorporating a Bragg grating written in EDF[J]. Optics Communications, 2015, 345: 125-128.
- [7] Yin B, Liu Z b, Feng S C, *et al.* Stable single-polarization single-longitudinal-mode linear cavity erbium-doped fiber laser based on structured chirped fiber Bragg grating[J]. Applied Optics, 2015, 54(1): 6-11.
- [8] Razak N F, Ahmad H, Zulkifli M Z, *et al.* Single mode EDF fiber laser using an ultra-narrow bandwidth tunable optical filter[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(2): 179-183.
- [9] Yeh C H, Chen H Z, Chen J Y, *et al.* Use of fiber Bragg grating (FBG) for stable and tunable erbium-doped fiber ring laser with single-longitudinal-mode (SLM) output[J]. Laser Physics, 2015, 25(11): 115101.
- [10] Wan H D, Li H Y, Wang C L, *et al.* An injection-locked, single-longitudinal-mode fiber ring laser with cylindrical vector beam emission[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(1): 7100608.
- [11] Chen J W, Zhao Y, Zhu Y N, *et al.* Narrow Line-width ytterbium-doped fiber ring laser based on saturated absorber

- [ ] . IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(5): 439-441.
- [12] Yang Jing, Qu Ronghui, Sun Guoyong, *et al.* A novel single longitudinal mode fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(4):441-444.  
杨敬, 瞿荣辉, 孙国勇, 等. 一种新型结构的单纵模光纤激光器[J]. 中国激光, 2005, 32(4): 441-444.
- [13] Wan H D, Jiang W F, Gong Y, *et al.* Single-longitudinal-mode fiber ring laser stabilized by tandem all-fiber Fabry-Pérot micro-cavities[J]. IEEE Photon Technology Letters, 2012, 24(5): 404-406.
- [14] Zhang Xin, Chen Wei, Liu Yu, *et al.* Single longitudinal mode fiber laser with multiple ring cavities and its frequency stabilization[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(1): 50-54.  
张欣, 陈伟, 刘宇, 等. 单纵模多环形腔掺铒光纤激光器及其稳定性[J]. 中国激光, 2007, 34(1): 50-54.