

# 基于锥形光纤的可调谐光纤激光器

宋秋艳<sup>1</sup>, 陈根祥<sup>2</sup>, 田恺<sup>3</sup>

<sup>1</sup>曲阜师范大学物理工程学院, 山东 曲阜 273165;

<sup>2</sup>中央民族大学理学院, 北京 100081;

<sup>3</sup>北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044

**摘要** 利用几何光学理论分析了锥形光纤中传输光线模式的变化, 得到锥形光纤锥腰直径在 1.135~60  $\mu\text{m}$  范围内时可实现多模传输的结果。采用熔融拉锥系统制备不同直径的锥形光纤, 运用 Origin 软件拟合得出锥形光纤半径随拉伸长度的变化关系, 在给定条件下, 拉锥时间为 95 s 时, 获得锥腰直径为 2.475  $\mu\text{m}$  的锥形光纤。运用 RSoft 公司的 BeamPROP 模块对直径为 2.475  $\mu\text{m}$  锥形光纤的传输性能进行了模拟, 同时采用放大自发辐射 (ASE) 光源作为输入光源, 选取 1530~1580 nm 波段, 测量了锥形光纤输出光功率随波长的变化关系。将锥形光纤接入环形腔, 通过偏振控制器改变腔内信号光的偏振态, 实现了 1563.828~1565.444 nm 范围内的波长可调谐, 边模抑制比为 51.4 dB, 并得到波长间隔最大为 1.48 nm 的双波长输出, 边模抑制比为 49.8 dB。

**关键词** 激光器; 锥形光纤; 传输特性; 偏振控制器; 可调谐激光器

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.051406

## Tunable Fiber Lasers Based on Tapered Fiber

Song Qiuyan<sup>1</sup>, Chen Genxiang<sup>2</sup>, Tian Kai<sup>3</sup>

<sup>1</sup>College of Physics and Engineering, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China;

<sup>2</sup>School of Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China;

<sup>3</sup>School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract** The geometrical optics theory is adopted to analyze the change of light transmission mode in tapered fiber, and multimode transmission is achieved when tapered fiber diameter is in the range of 1.135-60  $\mu\text{m}$ . Tapered fibers are fabricated with fused biconical taper system. The relationship between the tapered fiber radius and the stretching length is obtained by Origin software. Under the given conditions, tapered fiber with waist diameter of 2.475  $\mu\text{m}$  is fabricated when the stretching time is 95 s. The transmission performances of tapered fiber with waist diameter of 2.475  $\mu\text{m}$  are simulated by the BeamPROP module of RSoft. We use amplified spontaneous emission (ASE) optical source to measure the output optical power change with wavelength in 1530-1580 nm. The tapered fiber is inserted into the ring cavity, and the polarization state of the signal light in the cavity is changed by the polarization controller to realize wavelength tunable in the range of 1563.828-1565.444 nm. The side-mode suppression ratio is 51.4 dB, and the double wavelength output with a maximum wavelength interval of 1.48 nm is achieved while the side-mode suppression ratio is 49.8 dB.

**Key words** lasers; tapered fiber; transmission performance; polarization controller; tunable laser

**OCIS codes** 140.3500; 140.3510; 140.3600; 230.5440

## 1 引言

普通单模光纤通过拉锥可获得单模-多模-单模

双锥形光纤结构, 这种光纤结构的多模段直径小、倏逝场强, 在空气中传输的包层模能量较高, 对外界参量十分敏感, 可广泛应用于传感、数据存储等领域

收稿日期: 2017-11-09; 收到修改稿日期: 2017-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(61275052)

作者简介: 宋秋艳(1986—), 女, 博士, 讲师, 主要从事光纤激光器、非线性光学材料等方面的研究。

E-mail: songqiuyan1986@163.com

域<sup>[1-5]</sup>。此外,锥形光纤插入环形腔内可实现光纤激光器的调谐,美国联合技术研究中心的 Ball 等<sup>[6]</sup>提出了可调谐激光器理论,通过改变激光器腔长、腔内有效折射率和选择纵模序数来实现激光器中心波长的可调谐。2010年,加拿大渥太华大学的 Wang 等<sup>[7]</sup>通过热处理去除锥形光纤的内应力,令其构成马赫-曾德尔滤波器,接入到掺铒光纤激光器中,机械弯曲其中一个锥形,获得了 C 波段和 L 波段(1550~1565 nm)的可调谐范围,其激光的边模抑制比为 50 dB。2017年,日本东京大学的 Wang 等<sup>[8]</sup>将单层石墨烯覆盖锥形光纤的锥腰,使倏逝波与石墨烯相互作用,实现了脉冲宽度为 0.98 ps, 3 dB 谱宽为 4.6 nm,单脉冲能量为 544 pJ 的孤子脉冲输出。2017年,北京邮电大学的 Lan 等<sup>[9]</sup>利用双芯双锥光纤制备对波长、折射率等参数不敏感的模式复用/解复用器,实现了 LP<sub>01</sub> 和 LP<sub>11</sub> 在 760 nm 波长范围内耦合率超过 90%,LP<sub>01</sub> 和 LP<sub>21</sub> 在 320 nm 波长范围内耦合率超过 85%。2017年,南京邮电大学的蔡宇等<sup>[10]</sup>利用 8 字形激光腔和微纳光纤环构成锁模光纤激光器,通过增加抽运功率和调节偏振控制器获得了双波长的锁模脉冲。

本文采用熔融拉锥系统制备双锥形光纤,在锥形光纤的制备过程中,由于存在应力或形状效应等缺陷,锥形光纤中 HE<sub>11</sub> 和 HE<sub>11</sub>' 的传播常数是不同的,将锥形光纤接入环形腔,通过偏振控制器控制通过锥形光纤光信号的偏振态,进而改变光纤内有效折射率,实现了 1563.828~1565.444 nm 范围内的

波长可调谐以及 1.48 nm 间隔的双波长输出。

## 2 FBT 系统制备锥形光纤

### 2.1 锥形光纤的理论分析

本实验和理论分析中采用长飞的 G.652 单模光纤,芯层折射率  $n_1 = 1.4513$ ,包层折射率  $n_2 = 1.4468$ ,标准光纤芯半径为 4.5  $\mu\text{m}$ 。

光线在一个直径从大至小变化的光纤锥体中传播,纤芯导模的模场半径则逐渐增大,由  $V = \pi d \times \sqrt{n_1^2 - n_2^2} / \lambda$  (其中:  $V$  为归一化工作频率;  $d$  为纤芯直径;  $\lambda$  为工作波长) 可知,归一化工作频率逐渐从大变小,当归一化工作频率降至 1 时,纤芯已不能约束导模的传输,光线由纤芯透入到包层传输,形成包层中的传导模和辐射模。

由  $V = \pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2} / \lambda$  可知:当纤芯直径  $d > 4.32 \mu\text{m}$  时,归一化工作频率为  $1 < V_{\text{core}} < 2.405$ ,光线在锥形光纤中单模传播;当  $d = 4.32 \mu\text{m}$  时,  $V_{\text{core}} = 1$ ,此时光线不再受纤芯约束,开始向包层扩散;当  $d < 4.32 \mu\text{m}$  时,基模场将扩散到包层,此时产生了新包层(光纤外的介质)和新纤芯(光纤包层),使得  $n_1^2 - n_2^2$  增大,则新介质波导的归一化工作频率  $V$  也增大,因此,新波导光中可以传输的模式数增加,此时包层中含有基模和高阶模式。继续减小锥形光纤过渡区域的直径,使得归一化工作频率小于 2.405 时,光线在锥形光纤内为单模传输(如图 1 所示)。

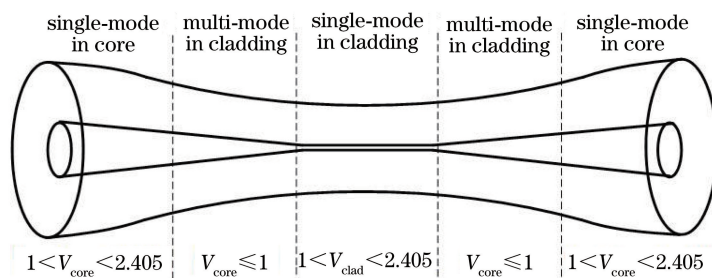


图 1 锥形光纤光线传播模式

Fig. 1 Light propagation mode in the tapered fiber

当  $V = 1$  时,基模场开始扩散到包层进行传输,从而形成以原包层为纤芯,光纤周围空间介质为包层的新波导。新波导的芯层-包层折射率差很大,如果新空间为空气,则  $\Delta n = 0.45$ ,当归一化工作频率  $V_{\text{clad}} > 2.405$  时,新波导是多模波导;当  $V_{\text{clad}} < 2.405$  时,锥形光纤中则只存在单一的传播模式,即 HE<sub>11</sub> 模,称为光纤的基模。由  $V_{\text{clad}} = \pi d_{\text{new}} \sqrt{n_{1\text{new}}^2 - n_{2\text{new}}^2} / \lambda$

可导出,满足单模传输条件的锥形光纤新波导的直径与工作波长之间的关系为

$$d_{\text{new}} = 2.405\lambda / (\pi \sqrt{n_{1\text{new}}^2 - n_{2\text{new}}^2}), \quad (1)$$

式中:  $n_{1\text{new}}$  为原包层折射率;  $n_{2\text{new}}$  为光纤周围空间介质折射率。

由(1)式可以看出,当新波导纤芯与包层的折射率一定时,即光纤周围空间介质确定时,  $V$  只随纤芯

直径与波长的变化而变化,当直径与波长的差值达到一定程度时,锥形光纤就可以实现单模传输。当光纤周围空间介质为空气时,锥形光纤实现单模传输临界条件下,光纤直径与工作波长之间的关系如图 2 所示。

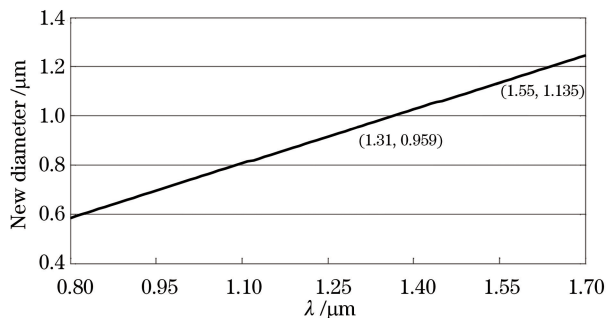


图 2 光纤直径随工作波长的变化

Fig. 2 Fiber diameter changes with operating wavelength

从图 2 可以看出,当锥形光纤置于空气时,在通信波段 1550 nm 处,若锥腰直径小于 1.135  $\mu\text{m}$ ,光线在锥形光纤中单模传输;若锥腰直径大于 1.135  $\mu\text{m}$ ,纤芯直径小于 4.32  $\mu\text{m}$ (此时锥腰直径为 60  $\mu\text{m}$ ),光线在锥形光纤中多模传输,出现多模干涉现象。

通过分析锥形光纤中光线的传输模式,制备锥腰直径为 1.135~60  $\mu\text{m}$  的锥形光纤,以实现基于锥形光纤的可调谐光纤激光器。

## 2.2 锥形光纤的制备过程

使用 KF-FBT(熔融拉锥)系统制备双锥形光纤,如图 3 所示,从左到右依次是 SPDH-400 型高纯氢气发生器、氮气瓶气动控制系统(容积为 40 L,工作压力为 15 MPa)和拉锥机主机(火头马达,主拉伸平台)。其中,主拉伸平台的拉伸精度为 0.38 nm,拉伸速度为 0~0.5 mm/s,火头马达的移动精度为 0.38 nm。



图 3 KF-FBT 系统

Fig. 3 System of KF-FBT

对单根标准单模光纤的去涂敷层区域进行加热,待光纤在熔融状态时,通过拉伸加热区域两端的

光纤,得到所需要的锥形光纤。在拉伸过程中,从标准光纤到过渡区再到锥腰,包层和纤芯的比例基本保持不变<sup>[11-12]</sup>。

## 2.3 锥形光纤参数的监测与分析

标况下,氢气流量分别为  $f_1 = 30, 40, 50$  mL/min,拉锥速度分别为  $v = 1000p, 3000p, 6000p$   $\text{s}^{-1}$  的实验条件下进行光纤拉锥,其中  $p = 0.08$   $\mu\text{m}$ 。采用光学显微镜 XSP-02 观察各拉锥条件下得到的锥形光纤,通过多次实验结果的对比,可以得出当  $f_1 = 40$  mL/min,  $v = 3000p$   $\text{s}^{-1}$  时,锥形光纤质量最佳。在此实验条件下,将拉锥后的光纤固定在载玻片上,并且使其处于紧绷状态,用光学显微镜电子目镜(500 倍)观察锥形光纤的拉伸区,其图像如图 4 所示。



图 4 锥形光纤光学电子目镜图像

Fig. 4 Optics electronic eyepiece image of tapered fiber

通过光学显微镜测量出锥形光纤的锥腰直径和光纤长度,记录整理数据,运用 Origin 画图软件绘制锥形光纤锥腰直径和光纤长度随拉锥时间的变化曲线(如图 5 所示)。

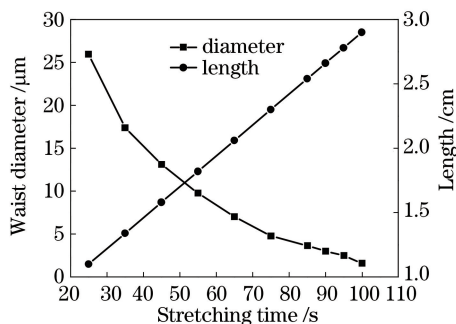


图 5 锥形光纤锥腰直径和光纤长度随拉锥时间的变化关系

Fig. 5 Waist diameter and length of tapered fiber changes with stretching time

从图 5 可以看出,随着拉锥时间的增加,锥形光纤长度逐渐增大,锥腰直径逐渐减小,锥形光纤长度为拉伸长度  $l_x$  与火焰宽度  $L_0$  的和。将图 5 中实验数据进行拟合得锥腰直径随拉伸长度的变化曲线,如图 6 所示,锥腰直径  $2w$  和拉伸长度  $l_x$  之间的关系为<sup>[13-14]</sup>

$$2w = \frac{28.4}{l_x + 0.216} - 9. \quad (2)$$

通过以上分析,拉锥时间设置为 95 s,即可获得锥腰直径为 2.475  $\mu\text{m}$  的锥形光纤。

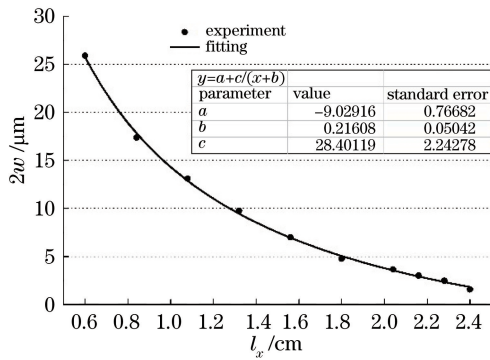


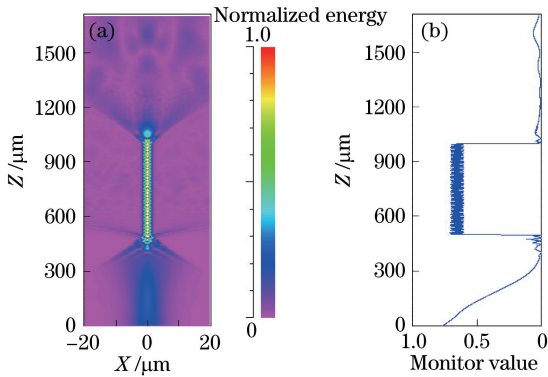
图6 锥腰直径随拉伸长度的变化关系

Fig. 6 Waist diameter of tapered fiber changes with stretching length

### 3 锥形光纤传输特性的仿真模拟及实验测量

#### 3.1 BeamPROP 模拟锥形光纤传输特性

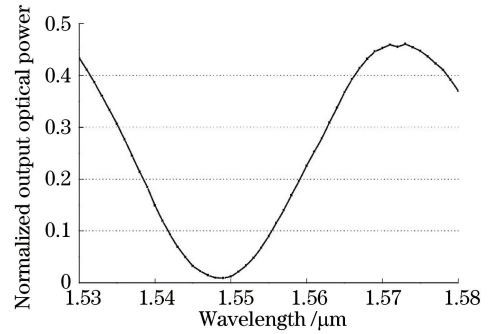
工作波长  $\lambda = 1550$  nm, 锥腰直径  $2w = 2.475$   $\mu\text{m}$  时, 锥形光纤中能量分布如图 7 所示。从图 7 可以看出, 在锥腰部分由于多模干涉使得光强呈现周期性分布。

图7 锥腰直径为  $2.475$   $\mu\text{m}$  时锥形光纤中能量分布。

(a) 能量分布图; (b) 归一化能量曲线图

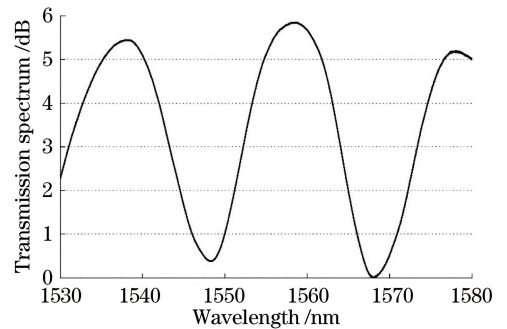
Fig. 7 Energy distributions in tapered fiber with  $2.475$   $\mu\text{m}$  tapered waist diameter. (a) Chart of energy distribution; (b) profile of normalized energy

扫描范围选为  $1530 \sim 1580$  nm, 扫描间隔为  $1$  nm, 仿真模拟锥腰直径为  $2.475$   $\mu\text{m}$  时, 锥形光纤输出归一化光功率随波长的变化关系如图 8 所示。从图 8 可以看出, 当锥腰直径为  $2.475$   $\mu\text{m}$  时, 锥形光纤输出光功率随波长变化表现出明显的振荡特性, 这是因为当纤芯归一化工作频率降到  $1$  时, 纤芯已不能约束导模的传输, 光束进入包层传输, 外界环境为空气, 此时光束相当于在一个多模波导中传输, 因而会出现多模干涉现象。

图8 锥腰直径为  $2.475$   $\mu\text{m}$  时锥形光纤输出归一化光功率随波长的变化关系Fig. 8 Normalized output optical power changes with wavelength when the tapered waist diameter is  $2.475$   $\mu\text{m}$ 

#### 3.2 锥形光纤传输特性的实验测量

采用放大自发辐射 (ASE) 光源, 选取  $1530 \sim 1580$  nm 波段, 实验测量锥形光纤输出光功率随波长的变化关系。设定输入光源光功率为  $12.3$  dBm, 锥腰直径为  $2.475$   $\mu\text{m}$  时, 锥形光纤透射光谱如图 9 所示。从图 9 可以看出, 锥形光纤具有明显的滤波特性。这主要是因为仿真时选用单模光纤的本征模作为锥形光纤的输入光源, 同时为了保证计算的准确性, 选取的计算步长为  $0.001$   $\mu\text{m}$ , 但由于计算量大, 故缩小了计算区域, 如图 7 所示。另外, 利用 BeamPROP 模拟时, 锥形光纤的模型在标准单模光纤到锥腰间的过渡区是斜线连接, 而不是平滑的曲线连接, 因此, 模拟锥形光纤和实际锥形光纤的模式不相同, 故实验测得的结果与仿真结果有一些差别, 但都表明锥形光纤具有滤波特性。

图9 锥腰直径为  $2.475$   $\mu\text{m}$  时锥形光纤透射光谱Fig. 9 Transmission spectrum of tapered fiber with  $2.475$   $\mu\text{m}$  tapered waist diameter

## 4 基于锥形光纤的可调谐光纤激光器

#### 4.1 实验装置

基于锥形光纤的可调谐光纤激光器如图 10 所示, 该光纤激光器以  $980$  nm 激光二极管 (LD) 作为

抽运源,抽运光通过 980 nm/1550 nm 波分复用器(WDM)耦合进入环形腔;3.2 m 长的掺铒光纤(EDF)作为增益介质,在 1530 nm 的吸收峰为 28.81 dB/m,数值孔径为 0.251,当抽运功率为 47 mW 时,EDF 的增益谱如图 11 所示;隔离器用于保证光在环形腔内单向传输;熔融拉锥光纤用来实现波长可调谐;腔内插入偏振控制器(PC)控制偏振态;10/90 的耦合器中,10%的光输出连接到光谱分析仪,用来记录数据并分析输出激光特性,90%回到环形腔形成反馈。

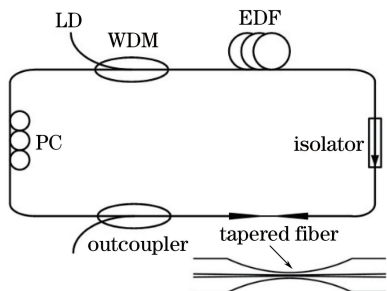


图 10 基于锥形光纤的可调谐光纤激光器

Fig. 10 Tunable fiber laser based on tapered fiber

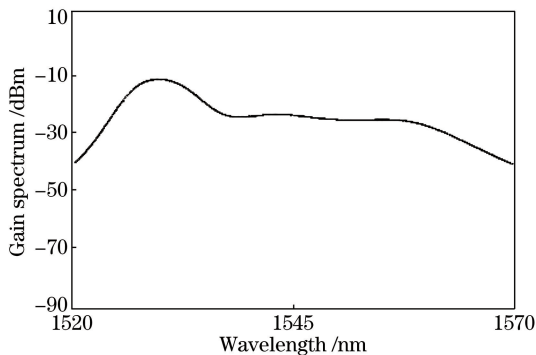


图 11 抽运功率为 47 mW 时掺铒光纤的增益谱

Fig. 11 Gain spectrum of erbium-doped fiber at 47 mW pump power

## 4.2 实验结果及分析

将拉锥时间设为 95 s,锥腰直径为 2.475  $\mu\text{m}$  的锥形光纤插入激光器环形腔,增加抽运功率到 10 mW 时,实现激光激射,继续增加抽运功率到 30 mW,使激光具有较大的边模抑制比,保持抽运功率不变,通过偏振控制器改变腔内进入锥形光纤光的偏振态,使得腔内有效折射率发生改变,进而影响激射激光的中心波长,实现输出激光中心波长的可调谐<sup>[15]</sup>。

由光谱分析仪(分辨率为 0.02 nm)观察可得:激光中心波长在 1563.828 ~ 1565.444 nm (1.616 nm)范围内连续可调谐,输出激光峰值功率

为 -13.365 dBm,边模抑制比为 51.4 dB;同时,在调谐过程中可以得到波长间隔最大为 1.48 nm 的双波长激射,边模抑制比为 49.8 dB,如图 12 所示。

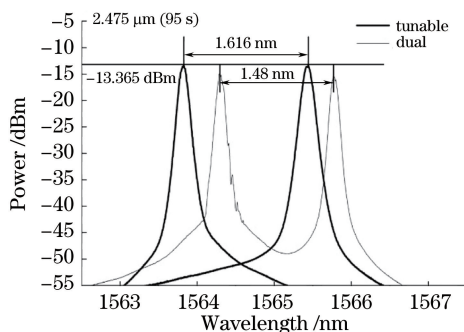


图 12 锥腰直径为 2.475  $\mu\text{m}$  时可调谐激光与双波长激光功率

Fig. 12 Power of tunable laser and dual-wavelength laser when the tapered waist diameter is 2.475  $\mu\text{m}$

调节偏振控制器,使激光中心波长为 1564.5 nm,以 10 min 为间隔,在 1 h 内通过分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪观察输出激光功率的稳定性,结果显示峰值功率抖动小于 0.7 dB,中心波长几乎没有偏移。

同一根锥形光纤,多次实验结果显示:单波长激射时,调谐范围在 1563.828 nm 和 1565.444 nm 处的变化均小于 0.1 nm;双波长激射时,最大波长间隔变化小于 0.06 nm。

## 5 结 论

由理论分析可知:当锥形光纤锥腰直径为 1.135~60  $\mu\text{m}$  时,纤芯已不能约束导模的传输,光束进入包层传输,外界环境为空气,此时实现多模传输,光线通过锥形光纤时,出现多模干涉现象。采用仿真模拟和实验测量两种方法分析了锥腰直径为 2.475  $\mu\text{m}$  时锥形光纤输出光功率随波长的变化关系。另外,将锥形光纤接入环形腔中,通过偏振控制器改变腔内进入锥形光纤的光的偏振态,实现了 1563.828~1565.444 nm 范围内的波长可调谐以及 1.48 nm 间隔的双波长输出。

## 参 考 文 献

- [1] Lei X, Liu Y, Huang Z L, *et al.* High sensitivity tapered fiber SERS probe and its application on pesticide residues detection[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0806001.  
雷星,刘晔,黄竹林,等.高灵敏度锥形光纤 SERS 探针及其在农残检测中的应用[J].光学学报,2015,

- 35(8): 0806001.
- [2] Sharma K, Liang S, Alam S, *et al.* Fiber-based cavity ring-down technique for refractive index sensing at 1953 nm using tapered fibers[J]. *IEEE Sensors Letters*, 2016, 1(3): 1-4.
- [3] Zhao H X, Cheng P H, Ding Z Q, *et al.* Simultaneous measurement of temperature, refractive index and liquid level based on biconical fiber gratings [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(10): 1010005.  
赵洪霞, 程培红, 丁志群, 等. 双锥形光纤光栅实现温度、折射率和液位同时测量[J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1010005.
- [4] Liu Y G, Zhang W. Temperature characteristics of micro-nanofiber Bragg grating surrounded with liquids[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(4): 040605.  
刘颖刚, 张伟. 液体环境中微纳光纤布拉格光栅的温度特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(4): 040605.
- [5] Wang H, Zhou W C, Li K W, *et al.* Label-free biosensing characteristics of micro/nano-fiber coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0306005.  
汪海, 周文超, 李凯伟, 等. 微纳光纤耦合器无标生物传感特性[J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0306005.
- [6] Ball G A, Morey W W. Continuously tunable single-mode erbium fiber laser[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(6): 420-422.
- [7] Wang X Z, Li Y, Bao X Y. C- and L-band tunable fiber ring laser using a two-taper Mach-Zehnder interferometer filter [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(20): 3354-3356.
- [8] Wang Y, Ni W, Set S Y, *et al.* Mode-locked Thulium-doped fiber laser using a single-layer-graphene-covered tapered fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(11): 913-916.
- [9] Lan M Y, Yu S, Cai S Y, *et al.* Mode multiplexer/demultiplexer based on tapered multi-core fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(12): 979-982.
- [10] Cai Y, Qian Y H, Wan H D, *et al.* Multiwavelength mode-locked fiber laser based on micro-fiber loop [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0901001.  
蔡宇, 钱禹豪, 万洪丹, 等. 基于微纳光纤环的多波长锁模光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0901001.
- [11] Ward J M, O'Shea D G, Shortt B J, *et al.* Heat-and-pull rig for fiber taper fabrication [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(8): 083105.
- [12] Mullaney K, Correia R, Staines S E, *et al.* Monitoring the fabrication of tapered optical fibres [C] // 25th International Conference on Optical Fiber Sensors, 2017: 1-4.
- [13] Bekhrad P, Ivanov H, Leitgeb E, *et al.* Simulation of fiber taper for both forward and reverse cases [C] // IEEE International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, Prague, 2016: 1-6.
- [14] Xue S C, van Eijkelenborg M A, Barton G W, *et al.* Theoretical, numerical, and experimental analysis of optical fiber tapering [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(5): 1169-1176.
- [15] Xiao Z G, Zhu S X, Xue C R. The polarization property of tapered fiber [J]. *Journal of Applied Optics*, 2004, 25(6): 22-25.  
肖志刚, 祝生祥, 薛春荣. 锥形光纤的偏振特性 [J]. *应用光学*, 2004, 25(6): 22-25.