

# 基于无芯光纤结合保偏光纤的可切换 多波长光纤激光器

赵小丽<sup>1,2</sup>, 张钰民<sup>1,2</sup>, 宋言明<sup>1,2</sup>, 骆飞<sup>1,2</sup>, 祝连庆<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>北京信息科技大学光电测试技术及仪器教育部重点实验室, 北京 100192;

<sup>2</sup>北京信息科技大学光纤传感与系统北京实验室, 北京 100016

**摘要** 提出了一种具有多波长可切换特性的掺铒光纤激光器, 基于模场失配原理, 利用无芯光纤结合保偏光纤构成一种光纤内马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构。通过调节 MZI 结构的曲率半径和偏振控制器, 可得到稳定可切换的多波长掺铒光纤激光输出。输出多波长激光的最大波长间隔为 40.184 nm, 边模抑制比均大于 50 dB。对输出激光的波长稳定性进行测试, 在 1 h 内波长漂移量的最大值小于 0.06 nm。研究表明, 所提出的可切换多波长光纤激光器具有较大的输出波长范围和波长间隔、较高的边模抑制比及输出性能稳定等优点。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 可切换多波长; 无芯光纤; 保偏光纤; 马赫-曾德尔干涉仪

中图分类号 TN243

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0201005

## Switchable Multi-Wavelength Fiber Laser Based on Non-Core Fiber Combing with Polarization Maintaining Fiber

Zhao Xiaoli<sup>1,2</sup>, Zhang Yumin<sup>1,2</sup>, Song Yanming<sup>1,2</sup>, Luo Fei<sup>1,2</sup>, Zhu Lianqing<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;

<sup>2</sup>Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China

**Abstract** A switchable multi-wavelength erbium-doped fiber laser is proposed. Based on the mode field mismatch principle, an in-fiber Mach-Zehnder interferometer (MZI) is fabricated by the non-core fiber combing with the polarization maintaining fiber. A stable and switchable multi-wavelength fiber laser can be realized by adjusting the curvature radius of MZI and controlling the polarization controller. The maximum wavelength spacing of the output multi-wavelength fiber laser is about 40.184 nm, and the side mode suppression ratio is larger than 50 dB. In the test of output fiber laser stability, the maximum wavelength variation of output wavelength is less than 0.06 nm in 1 h. The research results show that the proposed switchable multi-wavelength fiber laser has the advantages of a wide switchable wavelength range and a wide wavelength spacing range, a high SMSR, a stable output, and so on.

**Key words** lasers; fiber laser; switchable multi-wavelength; non-core fiber; polarization maintaining fiber; Mach-Zehnder interferometer

**OCIS codes** 140.3600; 060.3510; 060.2420; 060.2280; 350.2460

## 1 引言

多波长掺铒光纤激光器在许多领域中具有重要应用, 如光纤传感、微波光子及波分复用器等系统。

目前已报道了许多可实现多波长掺铒光纤激光器的方法, 如使用级联失配的长周期光纤光栅<sup>[1]</sup>、保偏光纤(PMF)结合 Sagnac 环作为梳状滤波器<sup>[2]</sup>、光敏光纤光栅结合纤芯偏移<sup>[3]</sup>及 Sagnac 环结合错位熔

收稿日期: 2018-10-08; 修回日期: 2018-11-07; 录用日期: 2018-11-19

基金项目: 教育部“长江学者与创新团队发展计划”项目(IRT<sub>16</sub>R07); 北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目(IDHT20170510)

\* E-mail: zhulianqing@sina.com

接的 PMF<sup>[4]</sup> 等结构。Bianchetti 等<sup>[5]</sup> 提出使用纤芯错位的非零色散位移光纤的方法构成马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构,实现可切换多波长光纤激光器,实验中得到单、双和三波长光纤激光输出,通过调节偏振控制器(PC)的偏振态,得到可切换的波长范围为 1546~1564 nm,单波长和双波长激光的边模抑制比(SMSR)约为 56 dB,三波长的 SMSR 约为 45 dB。Gutierrez-Gutierrez 等<sup>[6]</sup> 报道了一种使用 Fabry-Perot 干涉仪(FPI)和 MZI 装置实现可切换多波长掺铒光纤激光器的方法,在两个单模光纤(SMF)顶端构造两个空气微腔来形成 FPI 并作为反射镜和激光模式发生器;通过在两段单模光纤之间熔接一段光子晶体光纤(PCF)形成 MZI,调节 MZI 的曲率半径实现单、双、三和四波长的激光输出,波长可切换范围为 1525~1534 nm,光信噪比(OSNR)约为 30 dB。郝艳萍等<sup>[7]</sup> 提出一种基于单模-多模-单模光纤构成的滤波器结构,实现了波长可调谐的全光纤结构激光器。通过调节 PC,实现了中心波长 1542~1560 nm 范围的不同激光输出, SMSR 大于 40 dB。进一步调节 PC 和抽运功率,可同时得到双波长和三波长等多波长激光输出。Qi 等<sup>[8]</sup> 构造了一种基于少模光纤结合纤芯偏移的激光器结构,调节 PC 得到可调谐波长范围为 1547.991~1561.192 nm 的可切换多波长激光输出,单波长的 OSNR 小于 55 dB,多波长的 OSNR 小于 50 dB。Sierra-Hernandez 等<sup>[9]</sup> 使用两段单模光纤之间熔接一段光子晶体光纤构成 MZI 结构,通过调

节 MZI 的曲率半径,可实现可调单、双和三波长激光输出,调谐范围为 1526~1550 nm,且在泵浦功率为 120 mW 时, SMSR 约为 30 dB。但是,基于上述结构的可调多波长激光器的波长调节范围较小、SMSR 较低且结构复杂,制造成本较高,这些缺点限制了其应用领域及应用范围。

本文提出了一种基于无芯光纤(NCF)结合 PMF 制成的光纤内 MZI,构成 NCF-PMF-NCF 结构,将该结构作为环形腔可调掺铒光纤激光器的滤波元件。通过调节施加在 MZI 结构上的曲率半径,并结合对 PC 偏振态的调节,引入偏振烧孔(PHB)效应,从而在常温下实现了性能良好的稳定的可切换多波长激光输出。实验中得到的多波长激光输出的最大波长间隔为 40.184 nm, SMSR 大于 50 dB。该系统结构简单,调谐方便,且得到的可调波长范围较大,因此具有广泛的应用前景,如激光传感等方面<sup>[10]</sup>。

## 2 基于 NCF 结合 PMF 的 MZI 结构及原理

NCF 是没有纤芯的高度纯石英光纤,其光纤折射率与标准单模光纤的包层相同,剥除涂覆层后可将自身包层看作纤芯,将空气看作包层。实验中构造的 MZI 结构如图 1 所示,两侧 NCF 长度均为 2.5 cm ( $l_1=2.5$  cm),包层直径为 125  $\mu\text{m}$ , PMF 长度为 4.5 cm ( $l_2=4.5$  cm)。SMF 与 PMF 的纤芯/包层直径均为 9/125  $\mu\text{m}$ , PMF 在 1550 nm 处的拍长为 5 mm。

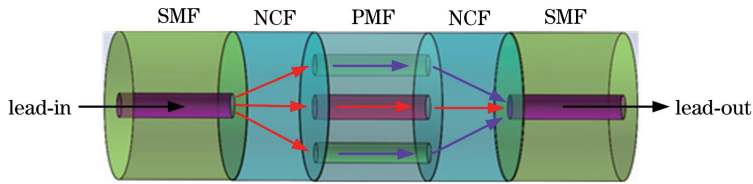


图 1 MZI 滤波器示意图

Fig. 1 Schematic of MZI filter

MZI 结构的滤波原理为基于模场失配原理形成 MZI 结构, SMF 与 NCF 的两个熔接点处相当于两个耦合器。当宽带光源的光通过 SMF 进入左侧 NCF 时,激励起高阶模式,高阶模与纤芯模同时在 PMF 的纤芯和包层中传输,由于 PMF 的双折射特性,将光分为两个正交的偏振模式(快轴和慢轴模式),快轴和慢轴模式的折射率不同,当光通过 PMF 时,快慢轴模式之间产生的相位差( $\Delta\varphi_1$ )为

$$\Delta\varphi_1 = 2\pi B l_2 / \lambda, \quad (1)$$

式中,  $B = n_s - n_f$  为 PMF 快慢轴之间的双折射,  $n_s$

和  $n_f$  分别为 PMF 慢轴和快轴的有效折射率,  $\lambda$  为传输光的波长。

PMF 中的纤芯和包层的折射率不同,高阶模与纤芯基模在光纤中的传播常数不同,使不同模式的光具有不同的光程,因此在 PMF 纤芯和包层之间传输的光也具有光程差,从而高阶模式和纤芯基模之间产生的相位差( $\Delta\varphi_2$ )为

$$\Delta\varphi_2 = 2\pi l_2 \Delta n / \lambda, \quad (2)$$

式中,  $\Delta n = n_{\text{core}} - n_{\text{high}}$ ,  $n_{\text{core}}$  和  $n_{\text{high}}$  分别为纤芯基模和高阶模式的有效折射率。

不同模式的光传播到右侧 NCF 与 SMF 的熔接点时,会重新耦合到 SMF 纤芯内部,两种相位差的存在使不同模式的光发生干涉,从而得到干涉光谱<sup>[11-12]</sup>。当弯曲曲率  $C$  和 PC 作用于该结构时,会对两种模式相位差之和( $\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2$ )产生影响,使干涉光谱发生明显变化,从而使输出波长的可调节性能对弯曲和 PC 敏感。该滤波器结构的透射光谱由光谱分析仪 (OSA, AQ6370D, 横河 YOKOGAWA, 日本)记录,分辨率为 0.02 nm, MZI 的透射光谱如图 2 所示。

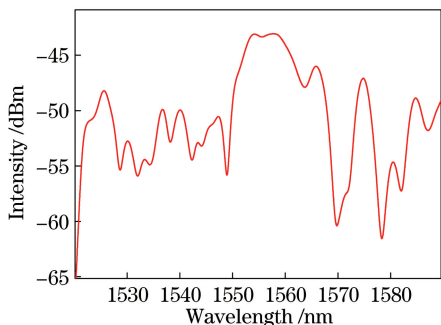


图 2 所提出滤波器结构的透射光谱

Fig. 2 Transmission spectrum of proposed filter

### 3 可切换多波长光纤激光器的实验装置及原理

基于 NCF 结合 PMF 的可切换多波长掺铒光纤 (EDFC) 激光器原理图如图 3 所示。使用环形腔结构,泵浦光由峰值波长为 976 nm 的半导体激光器 (LD) 提供,并通过 980/1550 nm 的波分复用器 (WDM) 耦合到掺铒光纤 (EDFC) 中。EDFC 的输出光通过 90% 耦合器耦合到 OSA 进行监测,10% 的光返回谐振腔内继续参与激光振荡。改变 MZI 结构的弯曲曲率,结合 PC 来调节输出波长。

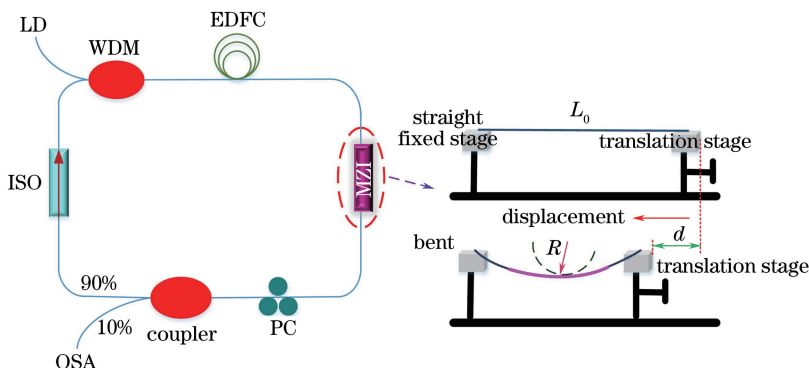


图 3 可调多波长光纤激光器的实验原理图

Fig. 3 Experimental schematic of tunable multi-wavelength fiber laser

实现稳定可切换多波长光纤激光器的主要工作原理是基于 PHB 效应。当环形腔内波长的增益与损耗相比占优势时,可以发射形成激光。利用在环形腔内掺铒光纤的放大自发辐射光 (ASE) 的非平坦

(WDM) 耦合到谐振腔中。将 6 m 长的掺铒光纤作为增益介质,为激光器运行提供增益。工作波长为 1550 nm 的光纤隔离器 (ISO) 主要用来确保环形腔中光的单向运行。由于 MZI 滤波器具有波长选择特性,通过调节二维位移平台的位移来调节 MZI 结构的曲率半径  $R$ ,即改变弯曲曲率  $C$ ,从而影响高阶包层模和纤芯模之间的耦合作用,使 MZI 的传输光谱发生变化。并通过 PC 来控制激光腔内光传播的偏振态,改变腔内双折射,使  $\Delta\varphi_1$  发生变化,引入 PHB 效应,具有平衡腔内增益和损耗的作用,从而实现多波长稳定输出。分光比为 10:90 的耦合器将 10% 的输出光送入 OSA 中进行监测记录,90% 的光返回谐振腔内继续参与激光振荡。改变 MZI 结构的弯曲曲率,结合 PC 来调节输出波长。

当使用二维位移平台使 MZI 弯曲时, MZI 结构的曲率半径  $R$  及弯曲曲率  $C$  可表示为<sup>[13]</sup>

$$R \cong \sqrt{\frac{L_0^3}{24d}}, \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{R}, \quad (4)$$

式中,  $L_0$  表示两夹具夹持的原始光纤结构总长度,  $d$  表示位移平台移动的距离。

当 MZI 结构弯曲时,包层中的部分导模转化为辐射模,外侧光纤拉伸,内侧光纤压缩。根据光弹效应,外侧光纤的有效折射率增加,内侧光纤的有效折射率降低,使得  $\Delta n$  发生变化。从而  $\Delta\varphi_2$  改变,引起 MZI 干涉峰峰值波长的移动,实现对输出激光波长的调节。

特性,对该滤波器进行调制。输出激光的波长数量取决于 ASE 的光谱特性、增益和损耗的平衡状态及滤波器的光谱特性<sup>[8]</sup>。掺铒光纤为均匀加宽的工作物质,PC 状态的改变将使得掺铒光纤中不同波长的

偏振态具有多样性<sup>[14]</sup>,从而导致光的偏振方向发生变化,连续调节 PC 改变双折射来平衡腔内与波长相关的增益和损耗,降低了掺铒光纤的均匀展宽,削弱了不同波长的光对反转粒子数的竞争,从而抑制了模式之间的竞争,有利于得到稳定且可调谐的多波长激光输出。调节 MZI 的曲率半径使光纤对应的有效折射率发生变化<sup>[15]</sup>,可改变光在光纤中的有效传输路径长度,改变不同模式之间的光程差。当光纤弯曲时,光纤内各模式的传播常数会发生变化,且模场分布和传播特性与曲率半径有关<sup>[16]</sup>,因此,模场和其他模式都随光纤的弯曲而发生变化(这样降低了其他模式与单模光纤中基本模式的重叠)<sup>[13]</sup>,同样各模式的光程差也发生变化。不同的导模在包层中的倏逝场衰减不同,而弯曲损耗也与导模阶数有关,高阶模弯曲损耗大,低阶模弯曲损耗小,从而对 MZI 干涉光谱贡献的大小也将产生变化,因此调节 MZI 的曲率半径将导致其干涉光谱发生变化,激光波长的数量和位置也会改变,结合 PC

引入的 PHB 效应,可实现稳定可调节的多波长光纤激光输出。

#### 4 实验结果及讨论

实验中设置 LD 的输出功率为 110 mW。将 MZI 两端固定在二维位移平台上,两端的原始间隔为 21 cm( $L_0=21$  cm),调节平台的位移来改变施加在 MZI 上的弯曲曲率  $C$ ,且结合 PC 的调节,改变 MZI 的干涉谱,得到最大波长间隔为 40.184 nm 的可调谐多波长光纤激光输出,即调节  $C$  的大小和 PC 状态可得到稳定可切换的多波长激光输出。调节 PC 及曲率  $C$ ,直到  $C=0.227$   $m^{-1}$  时,可得到单波长激光输出,如图 4(a) 所示;保持 PC 不变,改变弯曲曲率  $C$  可得到其他波长组合。当  $C=0.880$   $m^{-1}$  时,得到双波长输出,如图 4(b) 所示;当  $C=1.910$   $m^{-1}$  时,得到三波长激光输出,如图 4(c) 所示;调节  $C$ ,直到  $C=2.430$   $m^{-1}$  时,得到四波长激光输出,如图 4(d) 所示。

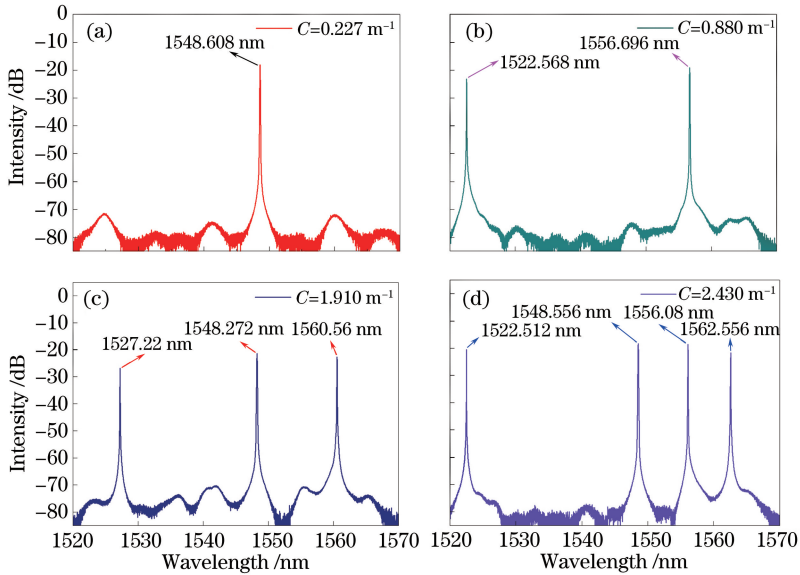


图 4 输出的可切换多波长激光。(a)单波长;(b)双波长;(c)三波长;(d)四波长

Fig. 4 Output switchable multi-wavelength fiber laser. (a) Single wavelength; (b) dual-wavelength; (c) triple-wavelength; (d) quad-wavelength

改变曲率  $C$  得到的激光波长、波长数目及其对应的 SMSR 如表 1 所示。

调节 MZI 的弯曲曲率  $C$  和 PC 偏振态,会使腔内不同波长对应的增益和损耗及干涉光谱发生变化,从而得到不同波长处的激光激励,并形成多种形式的波长组合,如图 5 所示。改变 PC 及  $C$ ,当  $C=1.600$   $m^{-1}$  时,可得单波长激光输出,如图 5(a) 所示;当  $C=1.680$   $m^{-1}$  时,可得到双波长激光输出,如

图 5(b) 所示;当  $C=1.764$   $m^{-1}$  时,得到三波长激光输出,如图 5(c) 所示;当  $C=2.596$   $m^{-1}$  时,在仔细调节 PC 的过程中,可得到一组四波长激光输出,如图 5(d) 所示。由实验结果可知,当  $C$  由 2.430  $m^{-1}$  变化到 2.596  $m^{-1}$  时,四波长具有连续调节特性,且各波长可调谐的最大波长范围为 0.144 nm,如图 4(d) 和 5(d) 所示。

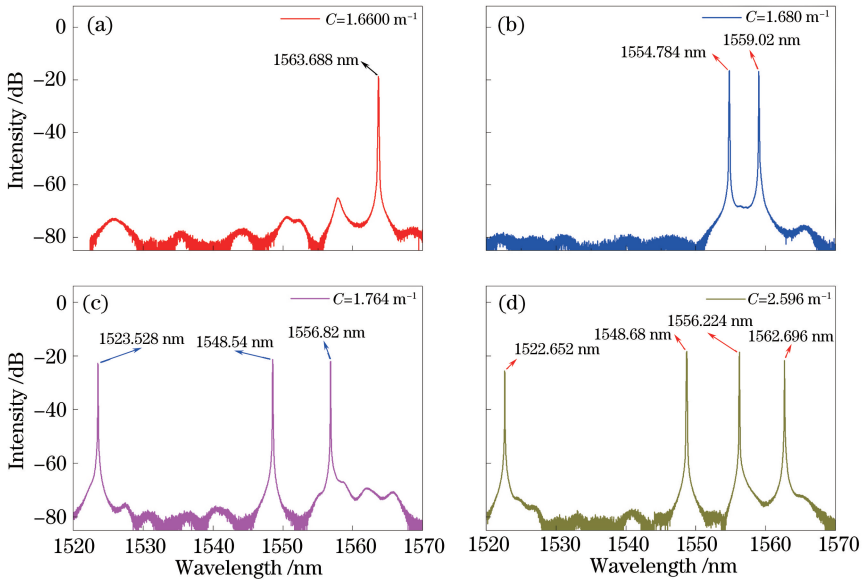


图 5 不同曲率下的波长输出。(a)单波长;(b)双波长;(c)三波长;(d)四波长

Fig. 5 Output wavelength under different curvatures. (a) Single wavelength; (b) dual-wavelength; (c) triple-wavelength; (d) quad-wavelength

表 1 不同曲率下的输出波长、波长数目及对应的 SMSR  
Table 1 Output wavelength, wavelength number, and corresponding SMSR under different curvatures

$C / m^{-1}$	Output wavelength number	Output wavelength /nm	SMSR /dB
0.227	1	1548.608	60.80
0.880	2	1522.568	53.60
		1556.696	56.80
1.910	3	1527.220	51.10
		1548.272	54.80
		1560.560	51.80
2.430	4	1522.512	55.40
		1548.556	59.60
		1556.080	59.34
		1562.556	53.22

调节曲率  $C$  得到的具体输出波长和波长数目及对应的 SMSR 如表 2 所示。

为测试输出激光的波长稳定性,对输出光谱进行 1 h 的重复扫描,扫描间隔为 6 min。调节 MZI 的曲率半径及 PC 的偏振状态,当  $C=0$ ,即光纤处于平直状态时,得到单波长为 1552.66 nm, SMSR 为 60.5 dB,图 6 所示为输出单波长激光的稳定性测试结果,单波长的最大中心波长漂移量小于 0.02 nm。当  $C=0.94 m^{-1}$  时,同时调节 PC,可得到的双波长为 1553.524 nm 和 1559.48 nm,对应的 SMSR 分别为 62.2 dB 和 54.55 dB,双波长的最大中心波长漂移量小于 0.05 nm,如图 7 所示。当  $C=$

$1.998 m^{-1}$  时,得到的三波长为 1525.2, 1547.532, 1559.252 nm,对应的 SMSR 分别为 55.42 dB, 52.8 dB, 50.2 dB,三波长的最大中心波长漂移量小于 0.06 nm,如图 8 所示。当  $C=2.66 m^{-1}$  时,得到的四波长激光为 1524.38, 1554.192, 1560.404, 1561.66 nm,对应的 SMSR 分别为 54 dB, 54.6 dB, 52.9 dB, 51.5 dB, 1 h 内重复扫描 10 次输出光谱,得到四波长的最大波长漂移量小于 0.06 nm,如图 9 所示。稳定性测试结果表明,该激光器具有较好的稳定性,可归因于 PC 引入的 PHB 效应有效抑制了由掺铒光纤均匀展宽引起的模式竞争。

表 2 不同曲率下的输出波长、波长数目及对应的 SMSR  
Table 2 Output wavelength, wavelength number, and corresponding SMSR under different curvatures

$C / m^{-1}$	Output wavelength number	Output wavelength /nm	SMSR /dB
1.600	1	1563.688	56.7
		1554.784	51.3
1.680	2	1559.020	51.5
		1523.528	54.1
1.764	3	1548.540	58.4
		1556.820	57.4
		1522.650	50.0
2.596	4	1548.680	59.8
		1556.224	55.7
		1562.696	52.4
		1522.652	53.2

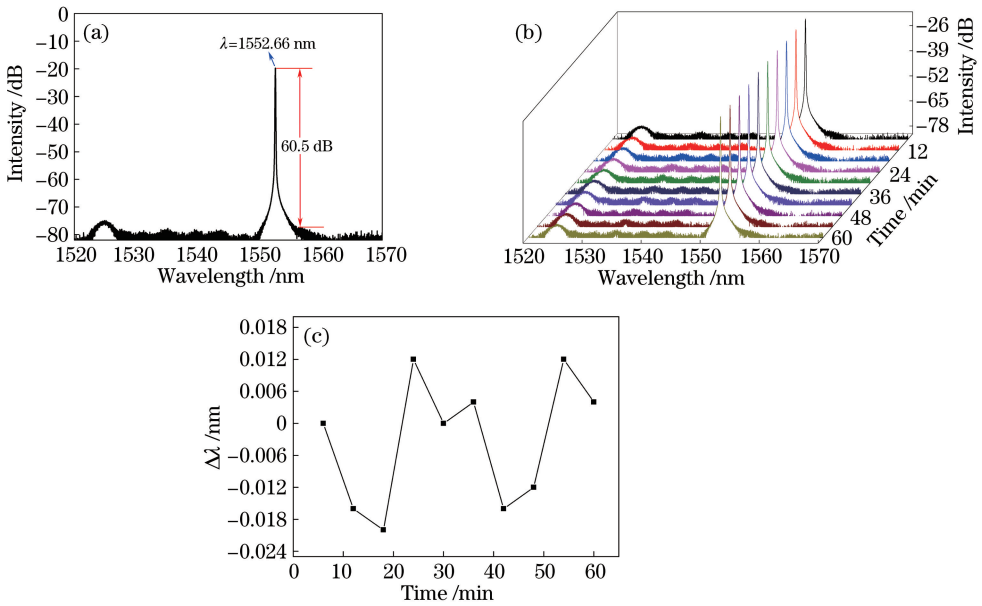


图 6 输出的单波长激光光谱及其 1 h 内的稳定性测试结果。(a)输出的单波长激光光谱；(b)间隔 6 min 重复扫描 1 h 后的输出光谱；(c)单波长 1552.66 nm 激光的波长漂移

Fig. 6 Laser spectra of output single wavelength and its stability test results in 1 h. (a) Laser spectrum of output single wavelength; (b) output spectra after repeated scanning for 1 h with 6 min interval; (c) wavelength shift of 1552.66 nm single wavelength fiber laser

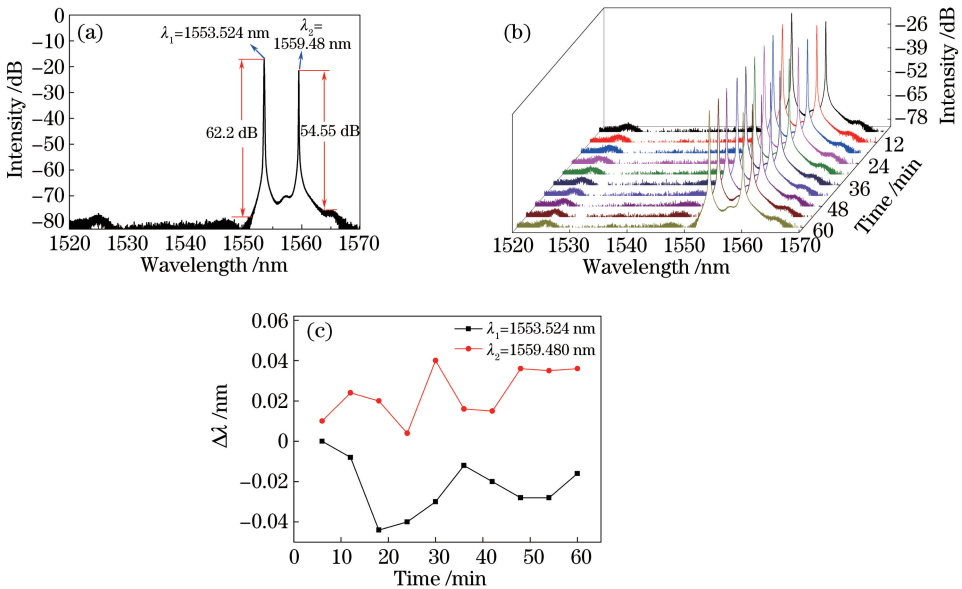


图 7 输出的双波长激光光谱及其 1 h 内的稳定性测试结果。(a)输出的双波长激光光谱；(b) 1 h 内重复扫描 10 次后的输出光谱；(c)双波长激光的波长变化

Fig. 7 Output spectra of dual-wavelength fiber laser and its stability test results in 1 h. (a) Output spectrum of dual-wavelength fiber laser; (b) output spectra after scanning 10 times in 1 h; (c) wavelength shift of dual-wavelength fiber laser

由以上实验可以看出,通过调节 MZI 的弯曲速率  $C$  和 PC 偏振态,可得到激光的多种波长输出。而稳定性测试中波长出现漂移的部分原因是外界环境对 MZI 滤波器滤波特性的影响及各模式之间的相互竞争。由图 6 到图 9 的稳定性测试实验结果可

知,输出激光的最大波长漂移量小于 0.06 nm,且随着输出波长数目的增多,波长的漂移量有增加的趋势,这个现象出现的原因是发射波长数目越多,对腔内增益和损耗的平衡控制难度越大,导致波长之间的增益竞争变大<sup>[8]</sup>。

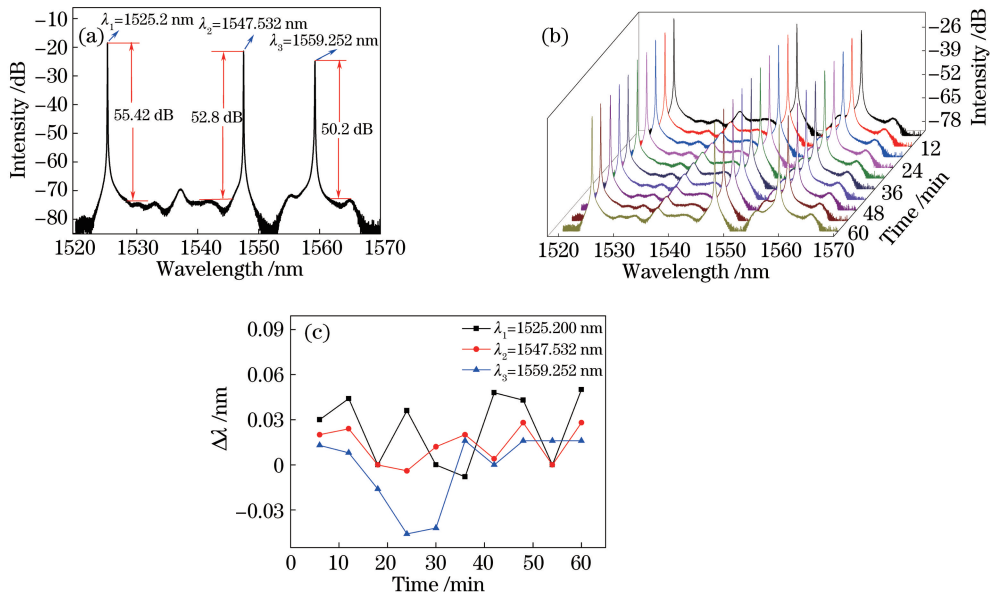


图 8 输出的三波长激光光谱及 1 h 内的稳定性测试结果。(a)输出的三波长激光光谱；  
(b)1 h 内重复扫描 10 次后的输出光谱；(c)三波长激光的中心波长变化

Fig. 8 Output spectra of triple-wavelength fiber laser and its stability test results in 1 h. (a) Output spectrum of triple-wavelength fiber laser; (b) output spectra after scanning 10 times in 1 h; (c) central wavelength shift of triple-wavelength fiber laser

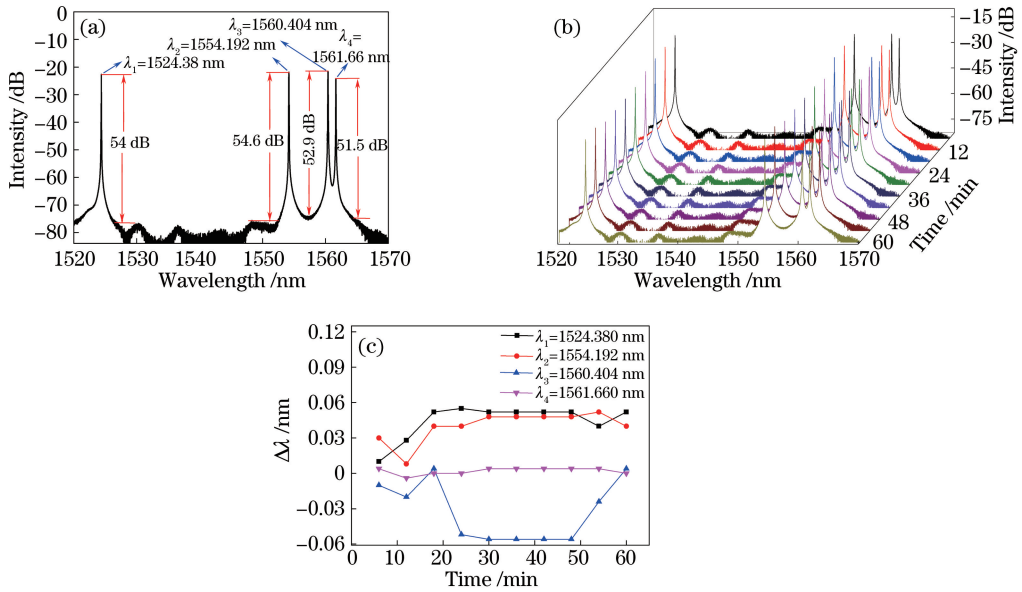


图 9 输出的四波长激光光谱及其 1 h 内的稳定性测试结果。(a)输出的四波长激光光谱；  
(b)1 h 内重复扫描 10 次后的输出光谱；(c)四波长激光的波长变化

Fig. 9 Output spectra of quad-wavelength fiber laser and its stability test results in 1 h. (a) Output spectrum of quad-wavelength fiber laser; (b) output spectra after scanning 10 times in 1 h; (c) wavelength shift of quad-wavelength fiber laser

## 5 结 论

提出了一种通过简单方式实现稳定可调谐的多波长掺铒光纤激光器。基于模场失配原理,将 NCF 两端熔接 PMF 构成 NCF-PMF-NCF 结构,形成光纤内的 MZI,通过调节 MZI 结构的曲率半径结合

PC 实现了多种稳定可调节多波长光纤激光输出,输出激光的最大波长间隔为 40.184 nm,各波长的 SMSR 均大于 50 dB。在 1 h 的稳定性测试中,测得所有波长的最大波长漂移量小于 0.06 nm,输出激光较为稳定。该光纤激光器具有结构简单易于实现、成本低、可调节波长范围大、输出的 SMSR 较高

及输出稳定等优点,在密集波分复用系统及多参量光纤传感等领域中具有重要应用。

## 参 考 文 献

- [1] Liu X S, Zhan L, Luo S Y, *et al.* Individually switchable and widely tunable multiwavelength erbium-doped fiber laser based on cascaded mismatching long-period fiber gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(21): 3319-3326.
- [2] Cheng J Q, Zhang L L, Ma Z J, *et al.* Tunable and switchable dual-wavelength Er-doped fiber ring laser using ASEs[J]. *Optics Communications*, 2014, 324: 202-204.
- [3] Cao Z G, Zhang Z, Shui T, *et al.* Switchable dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser with tunable wavelength spacing based on a compact fiber filter [J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 56: 137-141.
- [4] Ding Z M, Wang Z K, Zhao C L, *et al.* Tunable erbium-doped fiber laser based on optical fiber Sagnac interference loop with angle shift spliced polarization maintaining fibers [J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 42: 1-5.
- [5] Bianchetti M, Sierra-Hernandez J M, Mata-Chavez R I, *et al.* Switchable multi-wavelength laser based on a core-offset Mach-Zehnder interferometer with non-zero dispersion-shifted fiber [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 104: 49-55.
- [6] Gutierrez-Gutierrez J, Rojas-Laguna R, Estudillo-Ayala J M, *et al.* Switchable and multi-wavelength linear fiber laser based on Fabry-Perot and Mach-Zehnder interferometers [J]. *Optics Communications*, 2016, 374: 39-44.
- [7] Hao Y P, Zhang S M, Wang X Z, *et al.* Tunable erbium-doped fiber laser based on multi-mode fiber filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0814006.  
郝艳萍, 张书敏, 王新占, 等. 基于多模光纤滤波器的可调谐掺铒光纤激光器[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0814006.
- [8] Qi Y H, Kang Z X, Sun J, *et al.* Wavelength-switchable fiber laser based on few-mode fiber filter with core-offset structure [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 81: 26-32.
- [9] Sierra-Hernandez J M, Rojas-Laguna R, Vargas-Rodriguez E, *et al.* A tunable multi-wavelength erbium doped fiber laser based on a Mach-Zehnder interferometer and photonic crystal fiber [J]. *Laser Physics*, 2013, 23: 125103.
- [10] Zhao X L, Zhang Y M, Yang R T, *et al.* High-temperature fiber laser sensing combining with low-reflectivity regenerated fiber Bragg grating and saturable absorber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(06): 060605.  
赵小丽, 张钰民, 杨润涛, 等. 基于再生低反射率光纤光栅和饱和吸收体的高温光纤激光传感研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(06): 060605.
- [11] Cai L, Zhao Y, Li X G. A fiber ring cavity laser sensor for refractive index and temperature measurement with core-offset modal interferometer as tunable filter [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 242: 673-678.
- [12] Liu J X, Wang M G, Liang X, *et al.* Erbium-doped fiber ring laser based on few-mode-singlemode-few-mode fiber structure for refractive index measurement [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 93: 74-78.
- [13] Wu Y, Pei L, Jin W X, *et al.* Highly sensitive curvature sensor based on asymmetrical twin core fiber and multimode fiber [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 92: 74-79.
- [14] Feng S C, Xu O, Lu S H, *et al.* Switchable multi-wavelength erbium-doped fiber lasers based on a Mach-Zehnder interferometer using a twin-core fiber [J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(6): 064208.
- [15] Nagano K, Kawakami S, Nishida S. Change of the refractive index in an optical fiber due to external forces [J]. *Applied Optics*, 1978, 17(13): 2080-2085.
- [16] Schermer R T. Mode scalability in bent optical fibers [J]. *Optics Express*, 2007, 15(24): 15674-15701.