

文章编号: 0258-702X(2002)01-0001-04

# 环形腔光纤激光器波长选择技术

余有龙<sup>1,2,3</sup>, 谭华耀<sup>3</sup>, 王 骐<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001; <sup>2</sup> 黑龙江大学物理系, 黑龙江 哈尔滨 150080; <sup>3</sup> 香港理工大学电机工程系, 香港)

**提要** 用波分复用(WDM)光栅串作环形腔端镜, 调节 F-P 滤波器透过的共振波长, 实现对对应光栅波长的稳定激光输出, 其斜率效率在 0.09 左右, 实验表明光栅反射率以及所处波长处的增益影响激光阈值的大小。用全反镜替代光栅串, 在 1530~1575 nm 范围内可对输出波长进行连续调节。

**关键词** 光纤激光器, 光纤光栅, 波长可调, 环形腔激光器, 波分复用

**中图分类号** TN 248 **文献标识码** A

## Technique for Wavelength Selectable Fiber Ring-laser

YU You-long<sup>1,2,3</sup>, TAN Hwayaw<sup>3</sup>, WANG Qi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Opto-Electronics of Harbin Institute of Technology, Harbin 150001  
<sup>2</sup> Department of Physics, Heilongjiang University, Harbin 150080  
<sup>3</sup> Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong

**Abstract** By controlling the transmitted resonant wavelength of a Fabry-Perot filter, stable single frequency laser output which corresponding to one of the reflected wavelength of a five fiber Bragg grating wavelength division multiplexing(WDM) array acted as selective reflector was obtained and with slope efficiency of ~0.09. Experiment demonstrated that the lasing threshold is related to the grating's reflectivity and the gain of the erbium-doped fiber at the working wavelength. Continuous tuning within the range of 1530 nm to 1575 nm was achieved with the grating array replaced by a board band reflective mirror.

**Key words** fiber laser, fiber Bragg grating, wavelength tunable, ring-laser, WDM

## 1 引言

光纤激光器尤其是环形腔光纤激光器结构简单, 易于实现, 在光通信和光传感领域广阔的应用前景引起人们的广泛关注。若其输出波长可调, 应用时则更具灵活性。实现可变波长输出的途径总结起来有: 可旋转光栅作端镜<sup>[1]</sup>, 角度可调标准具滤波器<sup>[2]</sup>, 液晶标准具滤波器<sup>[3]</sup>, 声光滤波器<sup>[4]</sup>, F-P 滤波器<sup>[5]</sup>, M-Z 干涉滤波<sup>[6]</sup>以及复合环形共振腔<sup>[7]</sup>等, 这些研究除文献[1]外大多未使用腔镜, 其效率低<sup>[5,6]</sup>或输出功率不高<sup>[1~4,6,7]</sup>, 若用全反镜或布喇格光栅作端镜, 结合适当的滤波技术, 可明显提高激

光输出功率, 因此有必要进行更深入的研究。

本文先后用波分复用(WDM)光栅串和全反镜作环形谐振腔端镜, 通过改变 F-P 腔的光程来选择腔中的共振波长, 对激光输出波长分别进行了分立和连续调节。

## 2 原理

掺铒光纤在 1550 nm 通信窗口处的宽带、高增益特点, 决定其可用作光纤激光器的增益介质。1480 nm 半导体激光器的输出经 WDM 耦合进入环路后(见图 1), 在掺铒光纤中出现放大自发辐射

收稿日期 2000-07-25; 收到修改稿日期 2000-11-28

基金项目: 国家自然科学基金与中国节能投资公司联合资助项目(60177029)及香港研究资助局(RGC)资助项目(Polyu 5123/97E)

作者简介: 余有龙(1965—)男, 安徽人, 哈尔滨工业大学光电子技术研究所博士后, 黑龙江大学光纤技术研究所教授, 主要从事光纤通信与传感网络研究。E-mail: youlongyu@hotmail.com, or youlongyu@263.net

(ASE) 辐射光由耦合器进入光栅串所在的光纤,其中与光栅布喇格波长一致的光波经反射后返回环形腔,并沿顺时针方向穿过可调滤波器和隔离器,经掺铒光纤(EDF)放大后开始第二个循环周期的传播,这样每一次循环过程中光波的能量均得到放大,当增益大于环路中的传输损耗时,耦合器右侧“闲置”端便有激光输出。

$IS_1$  用于规定光在腔中的循环方向, $IS_2$  用来保证腔中振荡免于腔外光束的干扰,从而保证激光工作的稳定性。腔长固定,腔内置有倾角可调介质平行板的光纤 F-P 滤波器,介质板倾角变化将改变腔内光程,从而影响其透过波长。实际上 WDM FBG 端镜与环形光纤回路构成了复合腔,当滤波器透过波长与某一光栅的布喇格波长一致时,腔中便建立与之相应的环形振荡,以致出现该波长的激光输出。全反镜作端镜时,只要抽运光有足够的强度,应该可以对输出波长进行连续调节。

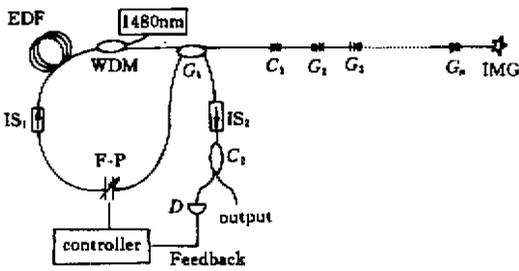


图 1 环形腔光纤激光器实验装置图

$G_i (i = 1, 2, \dots, m)$ : 光栅;  $IS (i = 1, 2)$ : 隔离器;  $C_i (i = 1, 2)$ : 耦合器; EDF: 掺铒光纤;  $D$ : 探测器; IMG: 匹配液

Fig.1 Experimental setup for wavelength selectable fiber ring-laser

$G_i (i = 1, 2, \dots, m)$ : fiber Bragg grating;  $IS (i = 1, 2)$ : isolator;  $C_i (i = 1, 2)$ : coupler; EDF: erbium-doped fiber;  $D$ : detector; IMG: index matched glue

### 3 实验结果

图 1 所示的装置中抽运源 1480 nm 激光器的功率  $I_p$  可达 100 mW,其阈值电流为 38 mA。组成光栅串的 5 个光栅是在载氢了的 Corning SMF 28 光纤上用 ArF 激光器经掩模侧写而成, $G_1$  至  $G_5$  的布喇格波长( $\lambda_{G_i} (i = 1, \dots, 5)$ )依次为 1539.88, 1547.94, 1551.75, 1557.19 以及 1562.19 nm,反射率分别为 89%, 96.7%, 77.6%, 84.5% 以及 78.1%。隔离器的插入损耗均为 0.4 dB,隔离度  $\sim 42$  dB。光路所用

Corning SMF 28 光纤在 1550 nm 附近的损耗低于 0.3 dB/km。铒光纤的长度为 25 m,铒光纤外环形腔的长度为 12 m,3 dB 耦合器  $C_1$  与  $G_1$  间纤长为 1.08 m,自左至右相邻光栅间距分别为 1.10 m, 1.34 m, 0.84 m, 0.55 m。 $C_1$  左侧环路的总衰减量为 37.5 dB,其中铒光纤吸收为 30.3 dB 占主要成分。

#### 3.1 F-P 滤波器透过波长与控制电压间的关系

TB2500 型可调 F-P 滤波器的自由光谱范围为 45 nm,带宽为 0.37 nm,插入损耗小于 3 dB,其可调范围为 1530 ~ 1575 nm。为保证激光器在选定波长处稳定工作,选用分束比为 10:90 的耦合器  $C_2$ ,将其弱光端经  $D$  接收后提供反馈信号给 F-P 控制器。调节 F-P 的控制电压,可观察到透过波长随电压值的增加向长波长方向移动,图 2 为电压由 0 V 增至 12 V 时的两者关系的实验曲线,可见调节控制电压可选择腔中传输光波的波长。

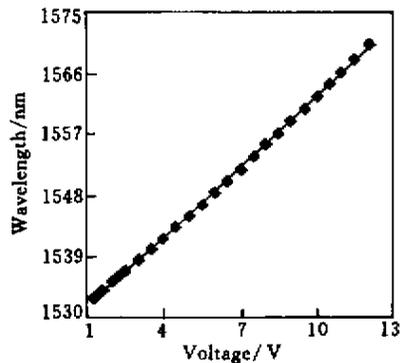


图 2 F-P 滤波器的透过波长与控制电压间的关系

Fig.2 Relationship between the transmitted wavelength of the F-P filter and the applied voltage

#### 3.2 激光波长的分立调节

##### 3.2.1 激光输出与抽运源功率间的关系

用光谱仪观察激光光谱,功率计检测其功率,当 F-P 透过波长远离各光栅的布喇格波长时,增加抽运功率,尽管荧光强度得以增强,但不能得到激光输出(见图 3(a))。调节控制电压至某值(如 6.1 V),使得滤波器透过波长与某一光栅( $G_2$ )布喇格波长一致,增加  $I_p$  开始并没有激光输出,随着荧光谱的加强(见图 3(b)),当  $I_p$  超过阈值(12.6 mW)时,出现 1547.94 nm 的激光输出。

当  $I_p$  大于 14.6 mW 时,调节控制电压,当电压值分别为 3.6, 7.1, 8.7 以及 10.0 V 时,激光器输出端依次出现对应  $G_1, G_3, G_4, G_5$  布喇格波长的激光输出(见图 4),用分辨率为 0.01 nm 的光谱仪测得其

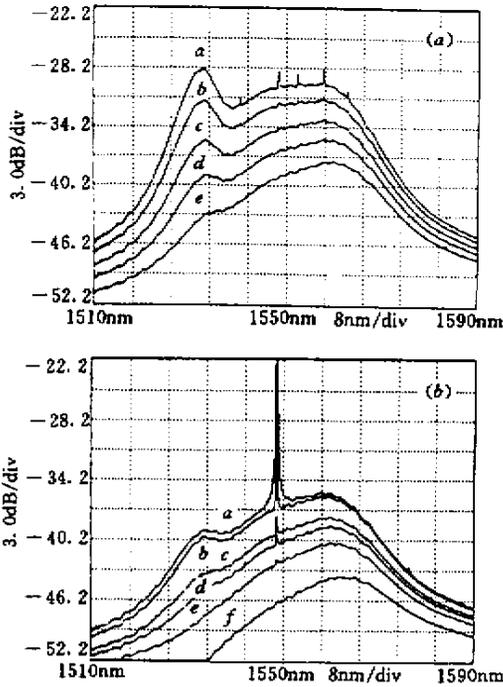


图 3 不同抽运功率下的放大自发辐射谱

- (a) F-P 透过波长远离光栅波长；
- (b) F-P 透过波长与  $G_2$  光栅波长一致

Fig.3 Spectra of amplified spontaneous emission source (ASE) for different pumped power

(a) transmitted wavelength of the F-P filter was far away from the reflected wavelengths of FBGs,  $a : I_p = 17.9 \text{ mW}$ ,  $b : I_p = 16.0 \text{ mW}$ ,  $c : I_p = 14.2 \text{ mW}$ ,  $d : I_p = 13.0 \text{ mW}$ ,  $e : I_p = 11.8 \text{ mW}$ ; (b) transmitted wavelength of the F-P filter coincided with the Bragg wavelength of  $G_2$ ,  $a : I_p = 17.9 \text{ mW}$ ,  $b : I_p = 13.0 \text{ mW}$ ,  $c : I_p = 11.8 \text{ mW}$ ,  $d : I_p = 11.1 \text{ mW}$ ,  $e : I_p = 10.5 \text{ mW}$ ,  $f : I_p = 9.3 \text{ mW}$

线宽  $\sim 0.02 \text{ nm}$ 。各波长处阈值依次为 14.6, 13.4, 12.9 以及 13.7 mW, 可见选用高反射率光栅有利于降低阈值。 $G_1, G_5$  虽然有较高的反射率, 但其布喇格波长处钕光纤的增益相对较小 (见图 3(a)), 总作用决定阈值处于相对较高的水平。

### 3.2.2 斜率效率

各波长处激光输出功率 ( $I_{\text{output}}$ ) 与抽运源功率间的关系见图 5 所示, 可见  $I_p$  高于阈值时两者间呈线性关系, 直线斜率对应激光的斜率效率, 实验值依

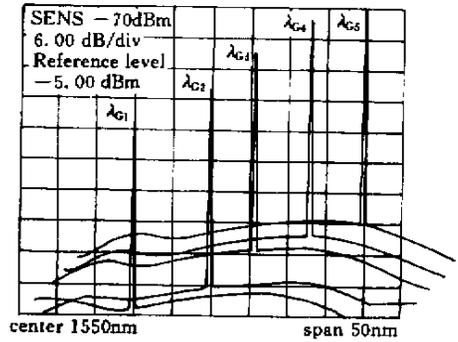


图 4 输出  $I_p = 17.9 \text{ mW}$  时 改变控制电压情况下的 光纤激光谱

Fig.4 Fiber laser spectra for  $I_p = 17.9 \text{ mW}$  at various applied voltages

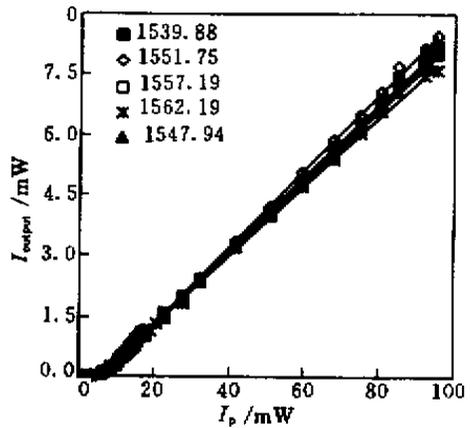


图 5 各波长处激光功率与抽运功率间的关系

Fig.5 Fiber laser output against pumped power at different lasing wavelengths

次为 0.0904, 0.0896, 0.0944, 0.0888 以及 0.0857。

选用高反射率光栅作“端镜”, 进一步降低腔中损耗, 优化钕光纤的长度以及耦合器的分束比均有利于提高激光器效率。激光腔的损耗包含光纤间熔接损耗、隔离器和滤波器的插入损耗、耦合器的损耗以及光纤的传输损耗等。选用  $C_1$  有两种极端情况: 1) 耦合输出率接近 0%, 此时阈值虽低, 腔内振荡强度很大, 但耦合率低以致无激光输出; 2) 若一味增加耦合输出, 使得循环时几乎所有能量均被输出腔外, 增加的阈值超过抽运源功率时, 腔内振荡消失, 使得激光输出实际上也接近 0, 因此  $C_1$  选用 3 dB 耦合器比较合适。

### 3.3 激光波长的连续调节

用反射率为 90% 的全反镜替代图 1 中的 WDM 光栅串,  $I_p > 15.6 \text{ mW}$  时上述激光装置的输出波长

在 1530 ~ 1575 nm 范围内连续可调(见图 6)。由于环形腔中共振波长取决于 F-P 的透过波长,因此激光波长与控制电压间也遵从图 2 所示的规律。不同波长处铒光纤增益差异决定了阈值也不同,实验证实  $\lambda = 1558.46$  nm 时,有最小阈值为 10.8 mW 而  $\lambda = 1575$  nm 时,有最大阈值为 15.6 mW,其他波长处的阈值处于 10.8 ~ 15.6 mW 之间。

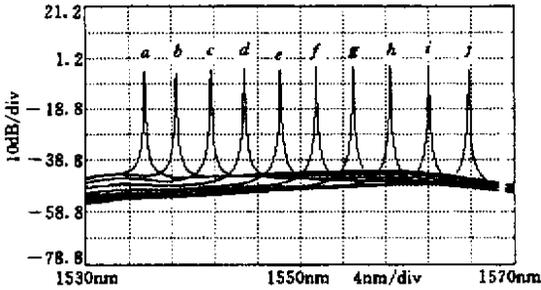


图 6 调节 F-P 滤波器得到的激光输出谱  
( $I_p = 31.4$  mW)

Fig.6 Laser output spectra for  $I_p = 31.4$  mW when the F-P filter was tuned

a. 2.0 V, b. 3.0 V, c. 4.0 V, d. 4.9 V, e. 5.9 V,  
f. 6.9 V, g. 7.9 V, h. 8.9 V, i. 9.9 V, j. 10.9 V

## 4 结 论

用波分复用光栅串作端镜,借助电压控制 F-P 滤波器的透过波长,成功地实现了环形腔激光器波长选择输出。改用全反镜作端镜,在 1530 ~ 1575 nm 范围内对波长进行了连续调节。激光器阈值取决于端镜的反射率的高低、所处波长处铒光纤的增益大小,还与腔内损耗有关。这项研究为该类激光器的实际应用提供了依据。当端镜光栅充当传感元时,该技术为有源 FBG 网络化传感寻址提供了新的途径,因而具有实际使用价值。

## 参 考 文 献

- 1 C. R. ÓCochlain, R. J. Mears. Broadband tunable single frequency diode-pumped erbium doped fiber laser [ J ]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**( 2 ):124 ~ 126
- 2 C. Y. Chen, M. M. Choy, M. J. Andrejco *et al.*. A widely tunable erbium-doped fiber laser pumped at 532 nm [ J ]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**( 1 ):18 ~ 20
- 3 M. W. Maeda, J. S. Patel, D. A. Smith *et al.*. An electronically tunable fiber laser with a liquid-crystal etalon filter as the wavelength-tuning element [ J ]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**( 11 ):787 ~ 789
- 4 D. A. Smith, M. W. Maeda, J. J. Johnson *et al.*. Acoustically tuned erbium-doped fiber ring laser [ J ]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**( 6 ):387 ~ 389
- 5 N. Park, J. W. Dawson, K. J. Vahala. All fiber, low threshold widely tunable single-frequency, erbium-doped fiber ring laser with a tandem fiber Fabry-Perot filter [ J ]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**( 19 ):2369 ~ 2371
- 6 Y. T. Chieng, R. A. Minasian. Tunable erbium-doped fiber laser with a reflection Mach-Zehnder interferometer [ J ]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**( 2 ):153 ~ 156
- 7 J. Zhang, J. W. Y. Lit. Erbium-doped fiber compound-ring laser with a ring filter [ J ]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**( 5 ):588 ~ 590