

文章编号: 0258-7025(2001)04-0313-04

# 一种新颖的多波长环形腔掺铒光纤激光器

黄德修<sup>1</sup> 舒学文<sup>1</sup> 文 韬<sup>2</sup> 江 山<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 华中科技大学光子工程系 武汉 430074; <sup>2</sup> 武汉邮电科学院固体器件所 武汉 430074)

**摘要** 提出了一种结构新颖的多波长环形腔掺铒光纤激光器,在其结构中采用了一种新型梳状滤波器,该滤波器由一个光纤光栅非对称写在一个 Sagnac 环中来实现,具有设计简单、易于制作、成本低和插入损耗小等优点。实验中得到了非常稳定的三波长和双波长激光输出,线宽均小于 0.06 nm,输出波长间隔分别为 0.34 nm 和 0.5 nm,输出功率差异分别在 2 dB 和 0.4 dB 内,消光比分别为 ~40 dB 和 ~50 dB。

**关键词** 掺铒光纤激光器,梳状滤波器,多波长激光

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

## Novel Multi-wavelength Erbium-doped Fiber Ring Laser

HUANG De-xiu<sup>1</sup> SHU Xue-wen<sup>1</sup> WEN Tao<sup>2</sup> JIANG San<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Optoelectronics, Huazhong University of Sciences and Technology, Wuhan 430074)  
(<sup>2</sup> Solid Devices Institute, Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, Wuhan 430074)

**Abstract** A novel multi-wavelength erbium-doped fiber ring laser is presented, which employs a novel comb filter based on a fiber Bragg grating asymmetrically written in a Sagnac interferometer. The filter has advantageous of simple design and fabrication, low cost and low insertion loss. Stable triple-wavelength and dual-wavelength laser operations with wavelength spaces of 0.34 nm and 0.5 nm, respectively, and output power differences of < 2 dB and < 0.4 dB, respectively, have been demonstrated.

**Key words** erbium-doped fiber laser, comb filter, multiple wavelength laser

## 1 引 言

密集波分复用(DWDM)是实现光纤通信系统升级扩容最为经济和有效的途径,目前基于密集波分复用的系统传输容量已经超过 3 Tbit/s<sup>[1]</sup>。多波长激光器可以同时为多个信道提供所需光源,使光发射端的设计更为紧凑、经济,因而在密集波分复用系统中有很重要的用途。多波长激光器既可以用半导体激光器阵列来实现<sup>[2]</sup>,也可以用掺稀土元素的光纤激光器来实现<sup>[3~8]</sup>,其中后者由于是全光纤型器件,在系统中安装非常方便,故近年来引起了人们极大的兴趣。目前已有许多研究者报道了多波长光纤激光器的实现方案,例如 Yimashita 等报道了一种结合布里渊增益和铒离子增益实现多波长振荡的环形腔光纤激光器<sup>[3]</sup>,Park 等报道了一种利用空间烧孔效应和偏振烧孔效应实现 24 波长输出的掺铒光纤激光器<sup>[4]</sup>,此外还有多种办法形成梳状滤波器来实

现多波长的方案,包括采用双折射光纤<sup>[5]</sup>、多模光纤<sup>[6]</sup>以及光纤光栅<sup>[7]</sup>等。

本文报道一种新颖的多波长环形腔掺铒光纤激光器,此结构中包含了一个由 Sagnac 环中非对称地写入单个均匀光栅来实现梳状滤波的新型滤波器,从而可实现多波长激光。所提出的梳状滤波器具有设计简单、易于制作、成本低和插入损耗小等优点。

## 2 梳状滤波器的设计

为了便于理解本文所提出的光纤激光器结构,先来分析其中产生梳状滤波效果的 Sagnac 环结构,如图 1 所示。假定所用均匀光纤光栅的长度为  $L_g$ ,其两端到耦合器中心的长度分别为  $L_1$  和  $L_2$ ,不计耦合器、光纤及其光栅的引入的附加损耗,则可推导出这种环的透射率表达式为

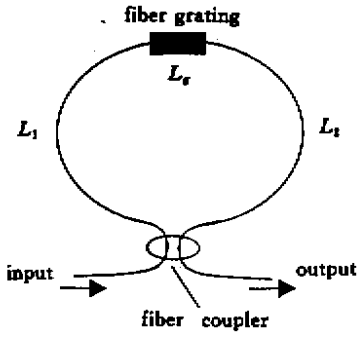


图 1 环中含有光纤光栅的 Sagnac 干涉仪示意图

Fig.1 All fiber Sagnac interferometer with a fiber grating in the loop

$$T = [(1 - 2K)\sqrt{1 - \delta^2/\kappa^2} + 2\sqrt{K(1 - K)} \cdot \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \delta^2}L_g) \cos(\beta\Delta L)]^2 \cdot [\cosh(\sqrt{\kappa^2 - \delta^2}L_g) - \delta^2/\kappa^2]^{-1} \quad (1)$$

这里  $\delta = \beta - \pi/\Lambda$ ,  $\beta$  为光纤中的模式传播常数,  $\Lambda$  为光纤光栅的周期,  $\kappa$  为光纤光栅的耦合系数,  $K$  为光纤耦合器的耦合系数,  $\Delta L = L_1 - L_2$  为两段光纤的长度差。对于使用 3 dB 耦合器的情形, 即  $K = 0.5$ , 可得到

$$T = \frac{\sinh^2(\sqrt{\kappa^2 - \delta^2}L_g)}{\cosh^2(\sqrt{\kappa^2 - \delta^2}L_g) - \delta^2/\kappa^2} \cos^2(\beta\Delta L) \quad (2)$$

由(2)式可见, 如果光纤光栅正好位于环的正中央, 即  $\Delta L = 0$ , 则这种环的透过率正好等于所含光纤光栅的反射率<sup>[9]</sup>, 此时得到一个单通带滤波器, 通常正好位于光纤光栅的反射区; 如果光纤光栅非对称地位于环中, 则相当于光纤光栅的反射谱受到余弦型调制作用, 这可以使原来的单通带分裂为多通带结构, 出现梳状滤波效果。很容易由(2)式推得各通带的间隔为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2n_e\Delta L} \quad (3)$$

$n_e$  为光纤中模式有效折射率。从(3)式看出, 这种梳状滤波器的通道间隔与光纤光栅本身的长度无关, 而与其在环中相对位置紧密相关。图 2 是针对密集波分复用系统设计各种通道间隔的梳状滤波器, 其中图 2(a) 给出了所用光纤光栅的反射谱, 图 2(b)~(d) 的通道间隔分别为 0.8 nm(100 GHz), 0.4 nm(50 GHz) 和 0.2 nm(25 GHz), 设计所用参数分别为  $\Delta L = 1.05$  mm, 2.1 mm 和 4.2 mm, 其他一些相同的参数分别为 折射率调制  $\Delta n = 3.8 \times 10^{-3}$ ,  $L_g$

$= 2$  mm,  $\Lambda = 536$  nm,  $n_e = 1.452$ 。比较图 2(a) 与图 2(b)~(d), 可看到各个通带都严格限制在光纤光栅的反射谱包络内。

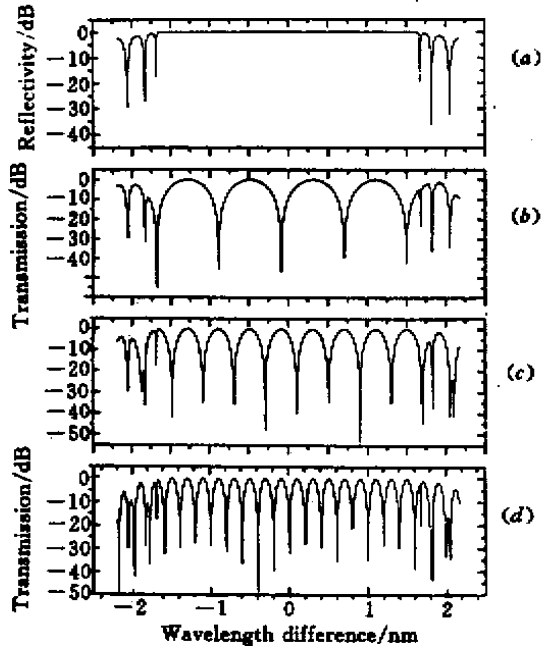


图 2 所设计的具有不同通道间隔的梳状滤波器以及所用的光纤光栅反射谱

Fig.2 Designed comb filters with different channel spaces and the reflection spectrum of the grating (a) reflection spectrum; (b) 0.8 nm; (c) 0.4 nm; (d) 0.2 nm

### 3 实 验

#### 3.1 梳状滤波器的制作

首先用紫外激光(248 nm)通过相位掩模板在一段普通单模光纤上写入长度约 2 mm 的均匀光纤光栅, 制得的光纤光栅峰值反射率接近 100%, 3 dB 带宽约 1.0 nm。然后将其与一个 3 dB 光纤耦合器的两个端口按图 1 的结构焊接起来, 焊接过程中精密控制环的两段光纤长度差  $\Delta L$ 。我们首先制作了一个  $\Delta L$  约为 2.5 mm 的滤波器, 将其应用于环形激光器中, 又用同样的光纤耦合器与光栅重新焊接制作第二个滤波器, 使其  $\Delta L$  约在 1.7 mm。两次制得的滤波器都封装在一个温控盒内防止环境扰动对滤波器可能带来的影响, 所制成的滤波器具有非常稳定的滤波性能。图 3 是用光谱分析仪测得的两个滤波器的透射谱, 为了方便比较, 光纤光栅本身的反射谱也用点划线画出。从图 3(a) 可看到第一个滤波器把光纤光栅的反射带分裂为三个主要通带, 分别位于 1557.38 nm, 1557.72 nm 和 1558.06 nm, 通带间隔相

等为 0.34 nm( 42.5 GHz),它们的峰值差异在 0.5 dB 内,每个通带的 3 dB 宽度约 0.18 nm,滤波器的精细度约为 1.9。从图 3( b)可看到第二个滤波器把光纤光栅的反射带分裂为两个主要通带,分别位于 1557.65 nm 和 1558.15 nm,通带间隔 0.5 nm( 62.5 GHz)峰值差异在 0.2 dB 内,通带的 3 dB 宽度约 0.25 nm,滤波器的精细度约为 2.0。

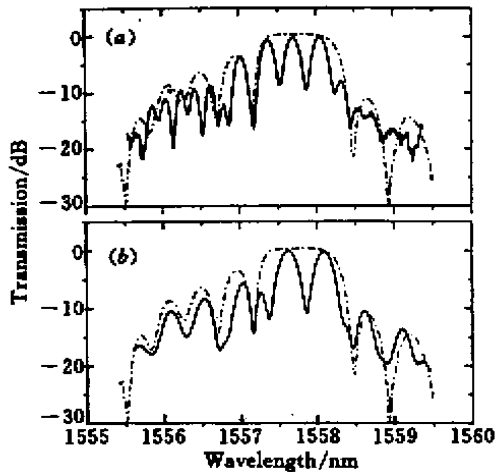


图 3 所测得的两个梳状滤波器的透射谱

Fig.3 Transmission spectra of the two fabricated comb filters  
The dash-dot lines show the reflection spectrum of the grating  
( a )the first comb filter ;( b )the second comb filter

### 3.2 多波长激光器

图 4 是多波长环形腔掺铒光纤激光器的结构示意图,图中所示的含一个光纤光栅(FBG)的 Sagnac 环即为我们所制作的滤波器。环形腔中加入了一个隔离器,保证激光在环中单向绕行,避免增益介质产生空间烧孔效应,同时可消除滤波器一端的反射作用造成的影响。增益介质是一段长 11.5 m 的铝硅掺铒光纤( EDF),所掺铒离子浓度约为  $100 \times 10^{-6}$ ,抽运采用 980 nm 的半导体激光器,抽运功率约 70 mW。环的腔长约 20 m,腔内损耗估计为 4 dB。掺铒光纤被浸放在液氮中( 77 K),这种低温处理是为了减小增益介质的均匀加宽,减少模式竞争,从而可以获得稳定的多波长输出<sup>[8]</sup>。偏振控制器(PC)控制腔内激光的偏振状态,一个分光比为 9:1 的耦合器把激光从腔内输出,同时采用一个分辨率为 0.07 nm 的光谱分析仪监测输出。

图 5 是采用第一个滤波器得到的激光输出光谱。可看到此时输出了三个波长间隔相等的激光,其中心分别位于 1557.38 nm,1557.72 nm 和 1558.06 nm,与滤波器通带位置完全吻合,输出峰值功率较

为接近,差别在 2 dB 内,激光的线宽均小于 0.06 nm (限于光谱仪的分辨率),消光比约 40 dB。三个波长的激光输出都很稳定,图 5( b)对激光输出进行多次扫描的结果表明了这一点。

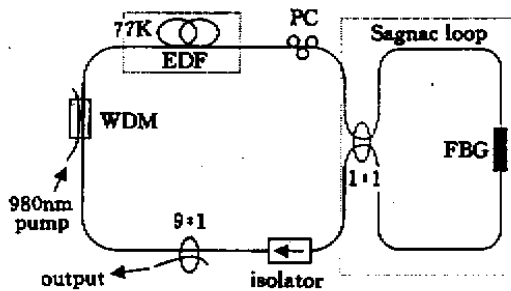


图 4 多波长环形腔掺铒光纤激光器示意图

Fig.4 Multiwavelength erbium doped fiber ring laser employing a fiber Bragg grating ( FBG ) Sagnac loop as comb filter

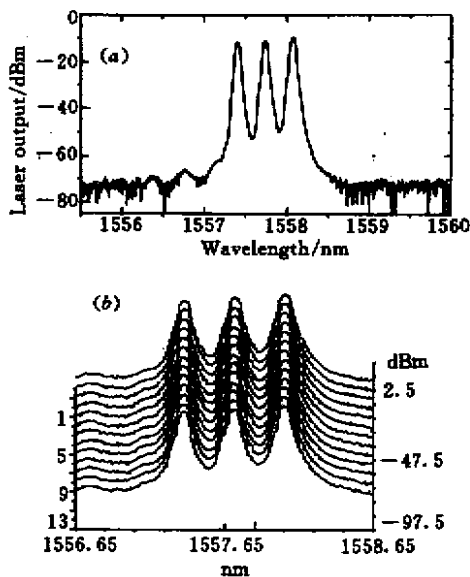


图 5 用第一个滤波器时所得到的激光输出光谱

Fig.5 Output optical spectrum of the ring laser using the first comb filter

( a )single scan ;( b )repeated scans

图 6 是采用第二个滤波器得到的激光输出光谱。可看到此时得到了双波长激光输出,其中心分别位于 1557.65 nm 和 1558.15 nm,与滤波器通带位置完全吻合,输出峰值功率很接近,差别约 0.4 dB,激光的线宽均小于 0.06 nm(限于光谱仪的分辨率),消光比约 50 dB。两个波长的激光输出都很稳定,图 6( b)对激光输出进行多次扫描的结果表明了这一点。

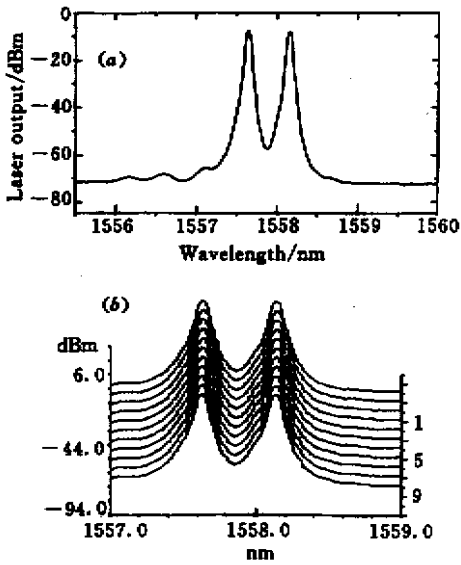


图6 用第二个滤波器时所得到的激光输出光谱  
Fig.6 Output optical spectrum of the ring laser using  
the second comb filter  
(a) single scan ; (b) repeated scans

## 4 讨论

虽然我们提出的是低精细度的滤波器,在实验中仍然得到了线宽很窄的激光输出,本文报道的结果在线宽和消光比等方面,甚至比采用其他一些高精度的、基于光纤光栅的梳状滤波器所报道的结果更好一些<sup>[7]</sup>。与宽带啁啾光栅型 Fabry-Perot 梳状滤波器、取样光栅型滤波器相比<sup>[7]</sup>,本文提出的滤波器在实现的技术难度、成本以及插入损耗等方面也有明显的优势。例如啁啾光栅型 Fabry-Perot 梳状滤波器在环形激光器中应用时还需加入一个宽带滤波器消除反射带外的激射,取样光栅型梳状滤波器在环形激光器中应用时需要一个光环行器降低损耗<sup>[7]</sup>。本文的滤波器是一种低插入损耗的器件,很容易将损耗控制在 1 dB 以内。

本文的实验虽然仅演示了三波长激射和双波长激射,更多波长的激射可通过增加梳状滤波器可用通带的个数来实现,当然这需要带宽更宽的光纤光栅。此外,在设计制作光纤光栅时,如果采用适当的

变迹(Apodization)技术进一步提高光纤光栅的边模抑制比<sup>[9]</sup>,则可望得到更理想的激光输出。

## 5 结论

提出了一种新颖的多波长掺铒光纤激光器,其结构中采用了一个非对称内置的光纤光栅所构成的 Sagnac 环,实现了梳状滤波,从而实现了多波长激射。实验中得到了非常稳定的三波长和双波长激光输出,输出波长间隔分别为 0.34 nm 和 0.5 nm,输出功率差异分别在 2 dB 和 0.4 dB 内,消光比分别为 40 dB 和 50 dB。所提出的梳状滤波器具有设计简单、易于制作和实现、成本低以及插入损耗低等优点。

## 参考文献

- 1 C. Scheerer, C. Glingener, A. Farbert *et al.*. 3.2 Tbit/s (80 × 40 Gbit/s) bidirectional WDM/ETDM transmission over 40km standard singlemode fibre. *Electron. Lett.*, 1999, **35** (20):1752 ~ 1753
- 2 M. C. Farries, A. C. Carter, G. G. Jones *et al.*. Tuneable multiwavelength semiconductor laser with single fiber output. *Electron. Lett.*, 1991, **27** (17):1498 ~ 1499
- 3 S. Yamashita, G. J. Cowle. Bidirectional 10-GHz optical comb generation with an intracavity fiber DFB pumped Brillouin/erbium fiber laser. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10** (6):796 ~ 798
- 4 N. Park, P. F. Wysocki. 24-line multiwavelength operation of erbium-doped fiber-ring laser. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8** (11):1459 ~ 1461
- 5 U. Ghera, N. Friedman, M. Tur. A fiber laser with a comb-like spectrum. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5** (10):1159 ~ 1161
- 6 A. J. Poustie, N. Finlayson, P. Harper. Multiwavelength fiber laser using a spatial mode beating filter. *Opt. Lett.*, 1994, **19** (10):716 ~ 718
- 7 J. Chow, G. Town, B. Eggleton *et al.*. Multiwavelength generation in an erbium-doped fiber laser using in-fiber comb filters. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8** (1):60 ~ 62
- 8 S. Yamashita, K. Hotate. Multiwavelength erbium-doped fiber laser using intracavity etalon and cooled by liquid nitrogen. *Electron. Lett.*, 1996, **32** (14):1298 ~ 1299
- 9 T. Erdogan. Fiber grating spectra. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15** (8):1277 ~ 1294