

文章编号: 0253-2239(2007)10-1802-5

间隔可调多波长光纤激光器的实验研究^{*}

李抒乐¹ 邵加峰¹ 沈启舜¹ 沈立君¹ 曹庄琪¹ 陈劲民² 吴至境³ 桑明煌³

1 上海交通大学物理系, 上海 200240
2 广东海洋大学理学院, 湛江 524088
3 江西师范大学物理与通信电子学院, 南昌 330027

摘要: 半导体光放大器(SOA)的非均匀加宽特性对产生多波长激光非常有利。本文对两段式立奥-萨尼亚克(Lyot-Sagnac)滤波器进行了详细的理论分析,实现了一种基于半导体光放大器的新型多波长光纤激光器。它利用立奥-萨尼亚克滤波器的波长选择性,在室温下得到了约 18 个具有 30 dB 信噪比的多波长激光输出。波长范围 1556~1577 nm。通过调节立奥-萨尼亚克环内的偏振控制器,多波长激光的波长间隔可在两种国际电信联盟(ITU)标准波长间隔(0.4 nm 和 0.8 nm)间选择。这种构型的光纤激光器具有稳定性好、波长间隔可控、信噪比高等优点。

关键词: 激光技术; 光纤激光器; 立奥-萨尼亚克滤波器; 半导体光放大器

中图分类号: TN24 文献标识码: A

Multiwavelength Fiber Ring Laser with Selectable Grid Spacing

Li Shule¹ Shao Jiafeng¹ Shen Qishun¹ Shen Lijun¹ Cao Zhuangqi¹
Chen Jingmin² Wu Zhijing³ Sang Minghuang³

1 Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240
2 College of Science, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088
3 College of Physics and Communication and Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330027

Abstract: The semiconductor optical amplifier has the feature of inhomogeneous broadening, which makes it an ideal gain medium for constructing multiwavelength fiber lasers. A novel multiwavelength fiber laser employing a semiconductor optical amplifier within a fiber ring cavity is proposed on the basis of the theoretical analysis of the Lyot-Sagnac filter with two segments of polarization-maintaining fiber (PMF). This fiber laser can generate 18-wavelength laser output with signal-to-noise ratio (SNR) 30 dB and wavelength through the wavelength selection by the Lyot-Sagnac filter, ranging from 1556 nm to 1577 nm. The grid spacing of the output laser can be selected between ITU grid spacings, 0.4 nm and 0.8 nm, at room temperature by tuning the polarization controller in the Lyot-Sagnac ring. This fiber laser has good tunability and stability with a high signal-to-noise ratio.

Key words: laser technique; fiber laser; Lyot-Sagnac filter; semiconductor optical amplifier

1 引言

多波长光纤激光器在大规模波分复用(WDM)光纤通信中占有重要的地位。目前已提出多种方法以光纤环(或谐振腔)、增益介质和滤波设备为基础

得到密集的多波长激光输出。在使用掺铒光纤为工作介质的研究中,Young-Gen Han 等^[1]使用色散位移光纤中的四波混频效应,得到了可调性能优异的多波长激光输出,他们还以拉曼光纤为增益介质,利

^{*} 上海市科学技术委员会发展基金(05DZ22006)资助课题。

作者简介: 李抒乐(1983-),男,江西南昌人,硕士研究生,主要从事光纤激光器与光纤放大器方面的研究。

E-mail: lslsytu@yahoo.com.cn

导师简介: 沈启舜(1947-),男,上海人,教授,博士生导师,主要从事导波光学和光纤光学方面的研究。

E-mail: qsshens@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2006-12-04; 收到修改稿日期: 2007-02-07

用立奥-萨尼亚克(Lyot-Sagnac)环的滤波特性在布拉格腔内得到了可调的多波长激光^[2]。多波长激光器波形的可调性一直是人们关注的热点。Yong Wook Lee 等^[3,4]以保偏光纤环(PMF)和偏振分束器(PBM)组成滤波光纤环,得到了波长间隔固定,波形连续可调的多波长激光输出。萨尼亚克(Sagnac)环的多波长滤波特性还能被用于选择光纤激光器的输出频率^[5]。早期的光纤激光器多采用掺铒光纤放大器(EDFA)作为增益介质^[6]。由于掺铒光纤放大器本身在常温下的均匀加宽特性,要得到稳定且较大的增益带宽,往往需要一些辅助手段。如低温环境^[7]、加入其他器件^[8,9]、使用特殊的光纤等^[10]。半导体光放大器(SOA)作为多波长激光器的增益介质,它的优势在于其非均匀加宽的特性使它能在常温下简单的光纤环中产生增益带宽较大的激光输出^[11]。使用半导体光放大器作为增益介质构造多波长光纤激光器在近年引起了人们广泛的研究兴趣,例如 Hongxin Chen 等^[12]提出的以法布里-珀罗腔作为滤波器的多波长激光器。通过对半导体光放大器的研究可知,当调节光纤激光器主环损耗,还可以实现多波长激光输出波长范围的整体移动^[13]。

若将光纤环中的保偏光纤分成多段,可以构成立奥-萨尼亚克滤波器。这种滤波器最吸引人的特性为:可分别调节各段保偏光纤环的主轴取向,使整个滤波器的波长选择性发生改变。本文首先介绍立奥-萨尼亚克环的滤波原理,再将这种滤波器用于环形光纤激光器,构成多波长光纤激光器,它可以得到信噪比较高的多波长输出,且通过调节滤波器几何构型,波长间隔可以在国际电信联盟(ITU)标准(0.4 nm和 0.8 nm)间进行选择。

2 多波长滤波器原理

图 1 为立奥-萨尼亚克环的基本构成。取任意两个垂直的方向作为基准坐标系 $x-y$ (图 2),则可用琼斯矢量表示在环内传播的光,用琼斯矩阵表示环中器件对传输光的作用。图 1 中,偏振控制器(PC)可以调节进入保偏光纤环的光的偏振方向。令光通过偏振控制器,偏振方向转过 θ 且保偏光纤环的长度为 L ,则保偏光纤环和偏振控制器的琼斯矩阵可分别写为

$$H = \begin{bmatrix} \exp(i2\pi n_e L/\lambda) & 0 \\ 0 & \exp(i2\pi n_o L/\lambda) \end{bmatrix},$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix},$$

令 L_1, L_2 分别代表图 1 中两段保偏光纤环的长度, θ_1 和 θ_2 分别代表两个偏振控制器的转角。

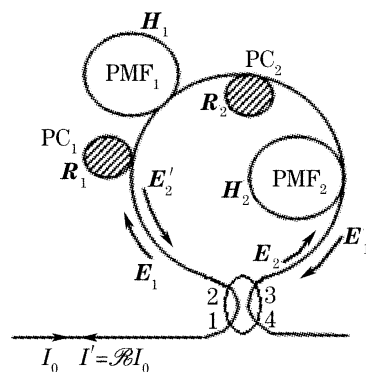


图 1 立奥-萨尼亚克滤波器的原理简图
Fig. 1 Schematic of the Lyot-Sagnac filter

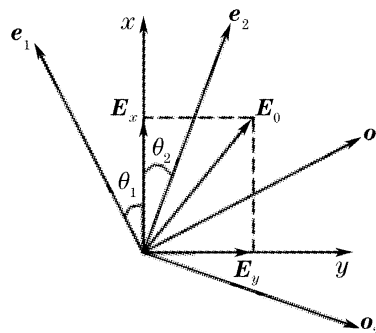


图 2 滤波器中光的电矢量方向与保偏光纤主轴的关系
Fig. 2 Relationship between the electric vector of light and axes of polarization-maintaining fibers inside the filter

当复振幅为 E_0 的光进入 3 dB 耦合器,它将被分解成顺时针和逆时针传播的两束: $E_1 = (\sqrt{2}/2) E_0$, $E_2 = (\sqrt{2}i/2) E_0$ 。 E_1 依次通过 PC_1 , PMF_1 , PC_2 , PMF_2 , 到达端口 3, 再经 3 dB 耦合器从端口 1 出射。逆时针传播经过端口 1, 3, 2, 1。

两束出射光的复振幅可分别写成

$$E'_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} \exp(i\pi/2) E'_1 = \frac{1}{2} \exp(i\pi/2) H_2 R_2 H_1 R_1 E_0,$$

$$E'_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} E'_2 = \frac{1}{2} \exp(i\pi/2) R_1 H_1 R_2 H_2 E_0,$$

故图 1 结构的立奥-萨尼亚克滤波器的光强反射率为

$$\mathcal{R} = \frac{(E'_1 + E'_2)^* (E'_1 + E'_2)}{E_0^* E_0} = \frac{E_0^* (2 + U + U^*) E_0}{4 E_0^* E_0}, \quad (1)$$

其中 $U = R_1^* H_1^* R_2^* H_2^* R_1 H_1 R_2 H_2$, 代入(1)式, 计算得到

$$\mathcal{R} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 + \frac{1}{2} \sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 - \frac{1}{4} \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 \cos \delta_1 + \frac{1}{4} \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 \cos \delta_2 + \frac{1}{2} \cos^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 \cos(\delta_1 - \delta_2) + \frac{1}{2} \sin^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 \cos(\delta_1 + \delta_2), \quad (2)$$

其中 $\delta_1 = 2\pi(n_o - n_e)L_1/\lambda$, $\delta_2 = 2\pi(n_o - n_e)L_2/\lambda$ 。

若令 L_{eff} 为等效长度:

$$L_{\text{eff}} = \begin{cases} L_1 - L_2, & \theta_1 = 0, \theta_2 = \pi/2 \\ L_1 + L_2, & \theta_1 = \pi/2, \theta_2 = 0 \end{cases}$$

则有

$$\mathcal{R} = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(\delta_1 - \delta_2) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left[\frac{2\pi(n_o - n_e)(L_1 - L_2)}{\lambda}\right], & \theta_1 = 0, \theta_2 = \pi/2 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(\delta_1 + \delta_2) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left[\frac{2\pi(n_o - n_e)(L_1 + L_2)}{\lambda}\right], & \theta_1 = \pi/2, \theta_2 = 0 \end{cases}$$

$$= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left[\frac{2\pi(n_o - n_e)L_{\text{eff}}}{\lambda}\right],$$

使反射率为 1 的那些波长的间隔为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{|n_o - n_e| L_{\text{eff}}} = \frac{\lambda^2}{BL_{\text{eff}}}, \quad (3)$$

式中 B 为保偏光纤的模式双折射系数。

使用半峰全宽(FWHM) $\delta\lambda$ 描述多波长激光输出中每个波长的宽度,则有 $\delta\lambda \cdot d[2\pi BL_{\text{eff}}/\lambda]/d\lambda = \pi$ 。于是得到

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2BL_{\text{eff}}} = \frac{\Delta\lambda}{2}, \quad (4)$$

(4)式说明半峰全宽是波长间隔的一半。如果波长间隔调为原来的两倍,则每个峰的宽度亦翻倍。同时在增益带宽内得到的波长数将减为原来的一半。

(3)式和(4)式是描述这种滤波器最基本的公式。

3 基于半导体光放大器的多波长光纤激光器

多波长激光器实验装置如图 3 所示。环形激光器的增益介质使用半导体光放大器。用 9:1 的耦合器从振荡的光信号中抽出一部分进行探测。探测装置为光谱分析仪(OSA),其波长分辨力为 0.1 nm/D。滤波器使用环路器接入可以提高整体波形的信噪比。

使用图 3 所示装置,最初只能得到波长间隔不均匀的多波长输出。这可以由(2)式说明。只有调节两个偏振控制器的转角到有效长度等于两段保偏光纤环的长度和或长度差的状态,才能得到波长间隔均匀的滤波波形。为了得到国际电信联盟标准的波长间隔,必须确定两段保偏光纤环的长度。实验使用的保偏光纤环在室温下,在波长 1550 nm 附近的单位长度折射率差由实验测定为: $B = 0.00134$ 。

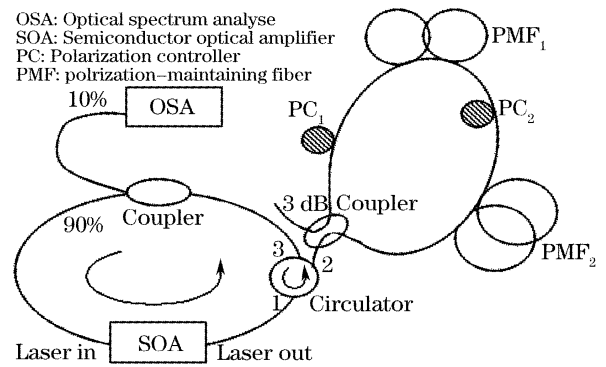


图 3 间隔可调多波长半导体光放大器光纤激光器实验装置

Fig. 3 Experimental scheme of the SOA-based multiwavelength fiber ring laser with selectable grid spacing Lyot-Sagnac filter

可以根据(3)式计算滤波器中保偏光纤环所需的长度。由计算,当波长间隔为 0.4 nm, $L = 22.80$ m。若要得到波长间隔为 $\Delta\lambda$ 和 $2\Delta\lambda$ 的间隔可调多波长输出,则需取 $L_1 = (3/4)L$, $L_2 = (1/4)L$ 。也即 $L_1 = 17.10$ m, $L_2 = 5.70$ m。调节偏振控制器,得到约 18 个多波长激光的输出信号[图 4(a)]。间隔 0.8 nm。仔细调节两个偏振控制器的角度,又可得到 0.4 nm 波长间隔的多波长激光输出。两种波长的输出激光比较见图 4(b)。两种波长间隔的多波长激光中,每个波长的半峰全宽分别为 0.2 nm 和 0.4 nm。半导体光放大器光纤激光器的输出波长范围约在 1555 nm 到 1575 nm 之间。这个范围小于不加立奥-萨尼亚克滤波器时半导体光放大器的增益范围。同时已有的理论表明,此范围会因为主环内对 1550 nm 附近波长的激光的损耗改变而发生移动。这是半导体光放大器固有的性质^[11]。

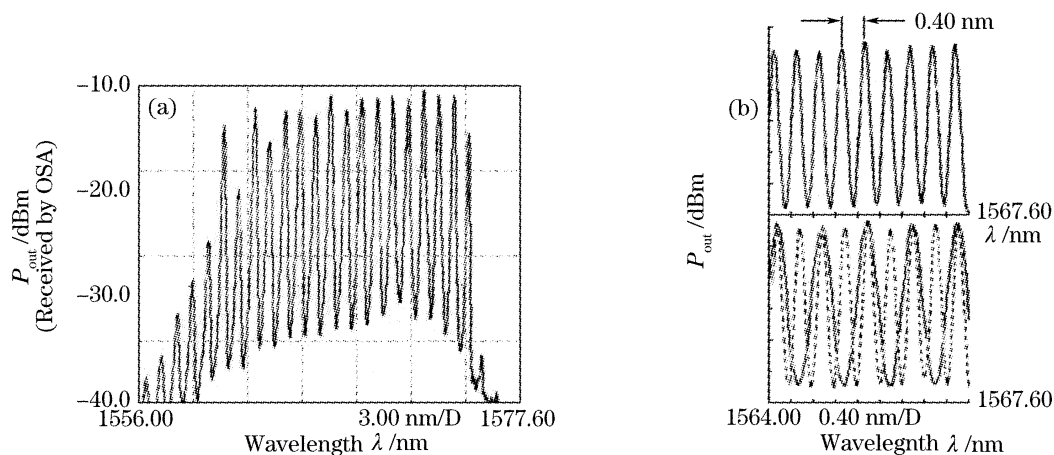


图 4 多波长光纤激光器的输出。(a) 0.8 nm 多波长激光输出,激光波长范围为 1560 nm 至 1575 nm, (b) 间隔为 0.4 nm, 0.8 nm 的多波长激光输出波形比较

Fig. 4 Output of the multiwavelength fiber laser. (a) Output of multiwavelength laser with 0.8 nm grid spacing, with wavelength ranging from 1560 nm to 1575 nm, (b) comparison of the multiwavelength laser output with 0.4 nm and 0.8 nm grid spacing

在使用环路器作为接入器件后,理论信噪比(SNR)可以达到很高,因为光强反射率对某些波长为 1,而对其他波长迅速下降(半峰全宽只有 0.2 nm)。造成信噪比低于预期值的因素很多,其中最主要的影响来自 3 dB 耦合器的不准确。对于一个耦合比为 k 的耦合器,其光强反射率可以写成: $\mathcal{R} = 4k(1-k)\mathcal{R}$,其中 \mathcal{R} 由(2)式给出。衬比度在 $k=0.5$ 时达到最大。当 k 偏离 0.5,衬比度也相应下降。另外,在立奥-萨尼亚克环内并不仅有通过各个元件的透射。在各段光纤的接合处 E_1 和 E_2 有一部分被反射,还有一部分被光纤吸收、散射等损耗掉。这造成多波长激光输出峰值的下降。另外,接点反射光和光纤内固有的后向散射光回到 3 dB 耦合器后将进入主环。这部分光互相没有相位联系,且因为没有通过选择机制,其波长分布是连续的。这在输出波形中造成一个连续波长的“背景”。显然,立奥-萨尼亚克环内光纤接合损耗越大,此背景噪声也越大,信噪比也就越低。

实验中另一个重要的指标是长度允许的误差。将(3)式微分,得到

$$\frac{\Delta(\Delta\lambda)}{\Delta\lambda} = \frac{\Delta L}{L},$$

这表明,当长度选取误差为 ΔL 时得到的多波长输出光的波长间隔将与预期值偏离 $\Delta(\Delta\lambda)$ 。如果取 0.01 nm 为希望的波长间隔允许误差(这个精度要求已经超过了光谱分析仪的分辨力 0.1 nm/D),则在量取 L 时可以允许约 1 cm 的误差。这一精度要求可以通过控制保偏光纤环的截取过程和实验温度得到满足。保偏光纤环的长度以及双折射因子 B

也随环境温度而改变。但已有实验表明,10 K 左右的温度改变只会使波形整体产生几个纳米的漂移,而不对波长间隔产生影响。

4 结 论

介绍了一种以半导体光放大器为增益介质的间隔可调多波长光纤激光器。这一多波长激光器在室温下可得到约 18 个具有 30 dB 信噪比,波长范围在 1556~1577 nm 的多波长激光输出。通过调节立奥-萨尼亚克滤波器中的偏振控制器,进一步实现了波长间隔在国际电信联盟标准波长间隔(0.4 nm, 0.8 nm)间的选择。这种多波长激光器具有信噪比高,波长间隔可通过调节等效长度精确控制等优点。多波长光纤激光器的可调性研究仍在进行。通过改变长度因子实现波长间隔可调是最直观的方法。若将保偏光纤环内保偏光纤环的段数扩大为 N 段,则通过调节中间的 N 个偏振控制器,最多可以得到 2^{N-1} 个波长的激光输出。但此时对 N 个偏振控制器的控制需要极高的精度,实验较难实现。另外 N 较大时,对保偏光纤环长度的控制和实验温度的要求都非常苛刻。对多波长光纤激光器的探索,在如何进一步提高可调性能(包括波长间隔可调,波形可调,频段可调)和可调范围,并同时降低多波长光纤激光器对环境的依赖^[14]等方面仍有巨大的研究潜力。

参 考 文 献

- 1 Young-Geun Han, Sang Bae Lee. Flexibly tunable multiwavelength erbium-doped fiber laser based on four-wave mixing effect in dispersion-shifted fibers [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(25): 10134~10139

- 2 Y.-G. Han, J. H. Lee, S. H. Kim *et al.*. Tunable multi-wavelength Raman fibre laser based on fibre Bragg grating cavity with PMF Lyot-Sagnac filter[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(23): 1475~1476
- 3 Yong Wook Lee, Jaehoon Jung, Byoung-ho Lee *et al.*. Multiwavelength-switchable SOA-fiber ring laser based on polarization-maintaining fiber loop mirror and polarization beam splitter[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(1): 54~56
- 4 Ilyong Yoon, Yong Wook Lee, Jaehoon Jung *et al.*. Tunable multiwavelength fiber laser employing a comb filter based on a polarization-diversity loop configuration [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(4): 1805~1811
- 5 Xiaofeng Jin, Kejiang Zhou. Tunable fiber ring laser employing a Sagnac interferometric filter[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(10): 600~602
- 6 Alistair J. Poustie, Neil Finlayson. Multiwavelength fiber laser using a spatial mode beating filter [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(10): 716~718
- 7 Li Jiafang, Feng Ming, Li Yigang *et al.*. 48-line linear cavity multi-wavelength Er-doped fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 485~488 (in Chinese)
李家方,冯 鸣,李乙钢 等. 48 波长线形腔多波长掺铒光纤激光器[J]. *光子学报*, 2005, **34**(4): 485~488
- 8 Sun Guoyong, Qu Ronghui, Yang Jing *et al.*. Study on stable multi-wavelength erbium-doped fiber laser at room temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 821~824 (in Chinese)
孙国勇,瞿荣辉,杨 敬 等. 室温下稳定的多波长掺铒光纤激光器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 821~824
- 9 Sun Guoyong, Qu Ronghui, Fang Zujie *et al.*. Study on multiwavelength erbium-doped fiber laser with sinusoidal phase modulation[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1293~1295 (in Chinese)
孙国勇,瞿荣辉,方祖捷 等. 正弦相位调制下多波长掺铒光纤激光器的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(11): 1293~1295
- 10 Tian Dawei, Dong Bo, Hu Shuyang *et al.*. Review on methods to generate multi-wavelength oscillations in EDFL [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(9): 6~10 (in Chinese)
田大伟,董 波,胡曙阳 等. 多波长掺铒光纤激光器技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(9): 6~10
- 11 Michael J. Connelly. Wideband semiconductor optical amplifier steady-state numerical model[J]. *J. Quant. Electron.*, 2001, **23**(3): 439~447
- 12 Hongxin Chen. Multiwavelength fiber ring lasing by use of a semiconductor optical amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(6): 619~621
- 13 F. W. Tong, W. Jin, D. N. Wang *et al.*. Multiwavelength fibre laser with wavelength selectable from 1590 to 1645 nm [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(10): 594~595
- 14 Do-Hyun Kim, Jin U. Kang. Sagnac loop interferometer based on polarization maintaining photonic crystal fiber with reduced temperature sensitivity [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(19): 4490~4495