

基于高双折射 Sagnac 环的可调环形腔掺铒光纤 激光器理论与实验研究*

王 静[†] 郑 凯 李 坚 刘利松 陈根祥 简水生

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

(2009 年 1 月 2 日收到, 2009 年 2 月 11 日收到修改稿)

报道了一种利用偏振控制器(PC)和保偏光纤(PMF)组成的高双折射 Sagnac 干涉环实现选频和调谐的环形腔掺铒光纤激光器. 理论模拟了 PMF 和 PC 对波长的控制作用. 实验中调节 PC 得到了单波长、双波长和多波长激光; 并验证了滤波间隔随 PMF 长度的变化规律. 实验中得到了斜率效率 20%、3 dB 线宽 0.016 nm、30 dB 线宽 0.097 nm, 边模抑制比(SMSR)40 dB 左右的稳定激光输出.

关键词: 光纤激光器, Sagnac 干涉环, 环形腔, 掺铒光纤

PACC: 4260, 4281

1. 引 言

C-波段环形腔掺铒光纤激光器与线腔掺铒光纤激光器相比有很多优点^[1-3], 目前对其研究十分广泛. 环形腔掺铒光纤激光器波长选择方法主要包括法布里-珀罗(Fabry-Perot)滤波器^[4]、光纤布拉格光栅^[5]、偏振器件^[6]等. 这些器件都是依靠其滤波特性来实现波长选择作用的. 高双折射的 Sagnac 干涉环也具有滤波特性, 并且相比其他滤波器件, 有结构简单, 调节灵活, 梳状滤波等特点^[7,8]. 近年来, 对 Sagnac 环作为滤波器件的光纤激光器有许多报道^[9-11], 但多是从实验上实现 Sagnac 环的滤波和调谐作用, 理论分析很少. 文献[10]虽然对偏振控制器(PC)作了一些理论分析, 但模型不够直观, 而且没有给出保偏光纤(PMF)对激光器输出特性的影响.

本文采用一种结构简单的环形腔掺铒光纤激光器, 利用由一个 PC 和一段 PMF 组成的高双折射 Sagnac 干涉环作为滤波器件. 用传输矩阵法详细分析了 PC 和 PMF 的波长选择和调谐作用. 在实验中使用了高浓度的掺铒光纤缩短了激光器腔长, 提高了激光输出的稳定性. 观察到在掺铒光纤增益带宽中实现激光的输出, 调节 PC 得到了可调谐的单波长, 双波长和多波长激光并分析其原因, 当改变 PMF 长

度时滤波间隔也随之改变, 这些现象都与理论符合得很好. 实验中得到了斜率效率 20%、3 dB 线宽 0.016 nm、30 dB 线宽 0.097 nm, 边模抑制比(SMSR)40 dB 左右的稳定激光输出.

2. 实验装置

利用 Sagnac 环选频的环形腔掺铒光纤激光器实验装置如图 1 所示. 激光器由一个环形腔和一个高双折射 Sagnac 干涉环构成. 为了减少外界环境变化对激光稳定性的影响, 除了偏振控制器以外的光纤器件都固定在实验平台上. 激光器的增益介质由一段 6 m 长的高掺杂的掺铒光纤构成. 隔离器(ISO)保证光在环形腔内单向传输, 避免了不同方向的光在环腔内产生竞争. 980 nm 半导体激光器(LD)提供

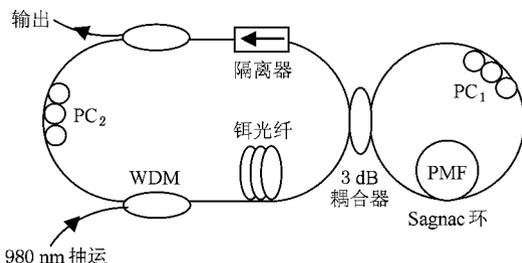


图 1 利用 Sagnac 环选频的环形腔掺铒光纤激光器

* 国家自然科学基金重点项目(批准号:60837002)和北京交通大学校人才基金(批准号:2007RC075)资助的课题.

[†] E-mail: 07111001@bjtu.edu.cn

抽运源,其中心波长为 976.8 nm,尾纤最大输出功率为 259 mW.抽运光通过一 980/1550 nm 波分复用器(WDM coupler)耦合进辑光纤,腔内的偏振控制器(PC₂)控制腔内整体增益和光的偏振状态.环形腔中的光经过耦合器(3 dB coupler)耦合进 Sagnac 环中,由保偏光纤(PMF)和偏振控制器(PC₁)组成的 Sagnac 环起到波长选择的作用.

3. Sagnac 环选频理论分析

高双折射 Sagnac 干涉环如图 2 所示,它由高双折射保偏光纤(PMF)、偏振控制器(PC)、耦合器(C)和单模光纤连接而成.Sagnac 干涉环的工作过程是当光信号从 1 端口进入耦合器后,可分为从 3 端口出射的 50%的正向传输的和 4 端口出射的 50%的反向传输的两束光,这两束光分别以顺时针和逆时针方向在环中传输.当光经过 PMF 时,其偏振光旋转了一个角度,快慢轴分量的光会出现一个相位延迟,当光经过 PC 时,偏振光又会旋转一个角度.两束光以不同的方向分别经过 PC 和 PMF,最后回到耦合器并实现相干输出.

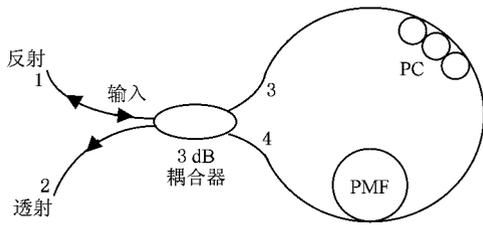


图 2 高双折射 Sagnac 干涉环

本文使用传输矩阵法对 Sagnac 环的输出特性进行了研究分析.在 Sagnac 环中,当光通过耦合器时,根据耦合模理论^[12],其传输特性矩阵为

$$T_C = e^{j\beta l} \begin{bmatrix} \sqrt{\alpha} & j\sqrt{1-\alpha} \\ j\sqrt{1-\alpha} & \sqrt{\alpha} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, α 称为分光比, l 为耦合长度, β 为传播常数.在 Sagnac 环中,当采用 3 dB 耦合器($\alpha = 1/2$)时,光波正向经过耦合器时的传输方程为

$$T_C^{CW} = \frac{\sqrt{2}}{2} e^{j\beta l} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

光波在环中传输一周后反向经过耦合器输出时的传输矩阵可写为其逆矩阵

$$T_C^{CCW} = (T_C^{CW})^{-1}. \quad (3)$$

光场在 PMF 中传输时,光纤的双折射效应应用传输矩阵表示为

$$T_{PMF}^{CW} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{j\frac{2\pi L \Delta n}{\lambda}} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$T_{PMF}^{CCW} = (T_{PMF}^{CW})^{-1}, \quad (5)$$

T_{PMF}^{CW} 和 T_{PMF}^{CCW} 分别表示光场顺时针和逆时针传输时经过 PMF 时的传输矩阵.其中, L 为高双折射光纤的长度, λ 为光波长, $\Delta n = n_e - n_o$ 为双折射光纤快慢轴折射率差.

实验中的 PC 是由三个刚性圆盘构成,普通单模光纤绕在圆盘上使其成为波片,通过缠绕圈数使三个圆盘分别相当于 $\lambda/4$, $\lambda/2$ 和 $\lambda/4$ 波片.这三个圆盘的传输矩阵可写成^[13]

$$T_{1,3} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 + j\cos 2\theta_{1,3} & j\sin 2\theta_{1,3} \\ j\sin 2\theta_{1,3} & 1 - j\cos 2\theta_{1,3} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$T_2 = j \begin{bmatrix} \cos 2\theta_2 & \sin 2\theta_2 \\ \sin 2\theta_2 & -\cos 2\theta_2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 分别表示 PC 的三个圆盘相对水平方向的夹角.在本文中我们用一个数组 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 来表示一种 PC 的状态.则顺时针和逆时针在 Sagnac 环中的传输矩阵分别为

$$T_{PC}^{CW} = T_1 T_2 T_3, \quad (8)$$

$$T_{PC}^{CCW} = (T_{PC}^{CW})^{-1}. \quad (9)$$

在环形激光器中的光单向运转,所以入射光只从其一端 E_1 入射($E_2 = 0$),本文对这种情况下 Sagnac 环的输出特性进行了模拟,模拟中假设 PMF 快轴为 x 轴.当光从耦合器的 1 端进入,3、4 两端的出射光场可以表示为

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = T_C^{CW} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

光在环内传输一周,分别经过 PMF 和 PC 后再次到达 3、4 端,这时两端光场分别为

$$E'_3 = T_{PC}^{CCW} T_{PMF}^{CCW} E_4, \quad (11)$$

$$E'_4 = T_{PMF}^{CW} T_{PC}^{CW} E_3. \quad (12)$$

最后,光波在耦合器处相干输出

$$\begin{bmatrix} E_{1out} \\ E_{2out} \end{bmatrix} = T_C^{CCW} \begin{bmatrix} E'_3 \\ E'_4 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

则其反射率(R)和透射率(T)分别为

$$R = E_{1out}/E_1, \quad (14)$$

$$T = E_{2out}/E_1. \quad (15)$$

3.1. 入射光偏振方向对滤波特性的影响

在光纤环腔内的光包含各种复杂的偏振状态,

不同偏振态的光都会经过 3 dB 耦合器进 Sagnac 环中.这些光在 Sagnac 环中的演化特性对于其能否作为激光器的滤波器件是十分重要的.取 PC 状态 $(\pi/3, \pi/4, 0)$, PMF3 m, $\Delta n = 5 \times 10^{-4}$, 图 3 的 a, b, c 三条曲线分别给出了入射偏振方向与 x 轴夹角为 $\pi/3, \pi/4$ 和 $\pi/5$ 的透射谱.看到图中三条曲线完全符合, 可见 Sagnac 环的滤波特性是与入射光的偏振方向无关的, Sagnac 环的这种偏振无关特性使其可以作为光纤激光器中的滤波器件.

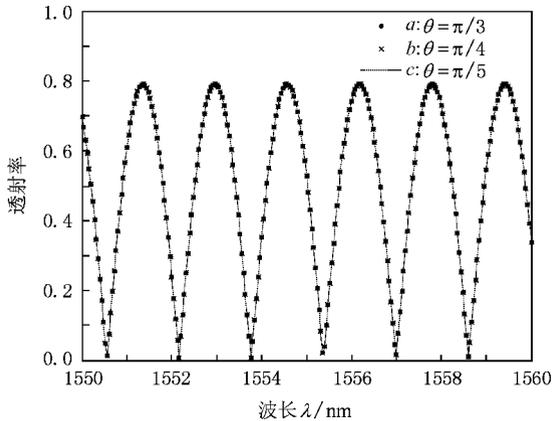


图 3 入射偏振态不同时 Sagnac 环透射谱

3.2. 偏振控制器对滤波特性的影响

取入射光偏振方向与 x 轴夹角 $\theta = \pi/3$, PMF3 m, $\Delta n = 5 \times 10^{-4}$. 图 4 的 a, b, c 三条曲线分别表示 PC 状态为 $(\pi/3, \pi/4, 0)$, $(\pi/3, \pi/12, \pi/2)$ 和 $(\pi/3, \pi/12, \pi/4)$ 时的透射谱. 三条曲线显示出透射率大小和峰值波长位置随 PC 状态的变化结果, 同时看到这三条曲线的输出波长间隔没有变化. 由此可以看出当调节 PC 的状态时, 既可以实现对腔内增益的控制, 又可以实现对输出波长的选择. PC 是连续可调的, 在光纤激光器中每一个 PC 态 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 都对应着某种谐振状态, 也就是对应着某种特定的激光输出, 这一理论就是 PC 作为激光调谐器件的原理, 这在后面的实验中得以验证.

3.3. 保偏光纤对滤波特性的影响

PMF 的主要参数有长度 l 和双折射参数 B , B 的大小是与 Δn 有关的. 下面分别研究 l 和 Δn 对滤波特性的影响. 取入射光偏振方向与 x 轴夹角 $\theta = \pi/3$, PC 状态 $(\pi/3, \pi/4, 0)$, 图 5 表示 $\Delta n = 5 \times 10^{-4}$ 时不同 l 的透射谱, 图 6 则表示 PMF3 m 时不同 Δn 的

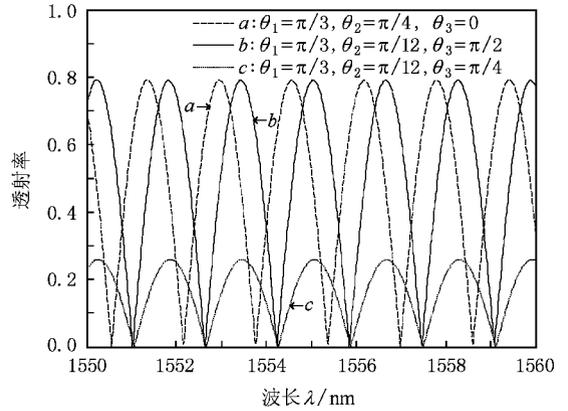


图 4 偏振控制器不同状态时 Sagnac 环透射谱

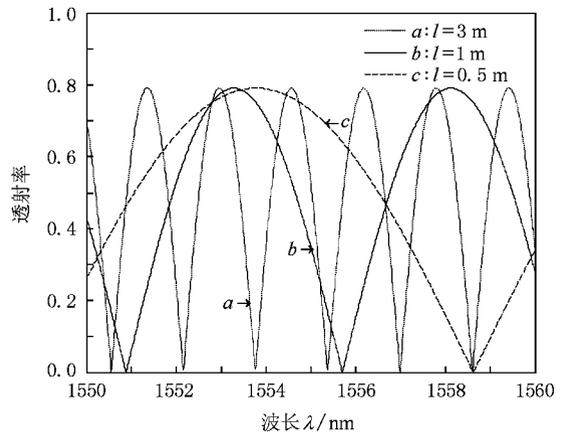


图 5 保偏光纤长度不同时 Sagnac 环透射谱

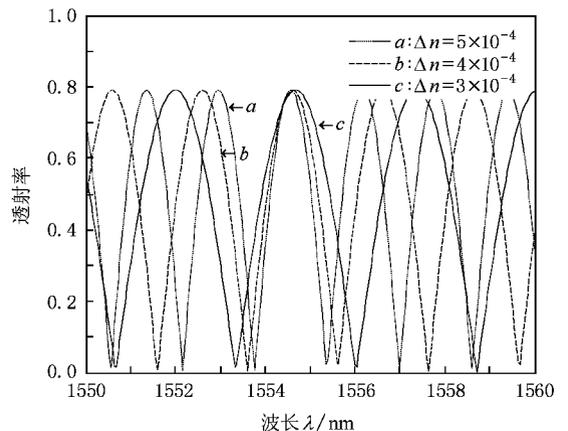


图 6 保偏光纤 Δn 不同时 Sagnac 环透射谱

透射谱. 图中看到 Sagnac 环输出波长间隔的疏密程度既与 l 有关又与 Δn 有关. l 越长则波长间隔越密, Δn 越大波长间隔越密. 这一结论也可以由 (4) 式来分析 (4) 式中可以认为 PMF 光纤在快慢轴产

生的相位差是由 Δn 在 l 上积累的. 因此对于有不同要求的光纤激光器可以选用合适参数的 PMF 来控制滤波间隔.

4. 实验结果与讨论

采用图 1 的光纤环形腔结构, 在实验中我们使用了 ANDO 公司生产的测量范围为 600—1700 nm 的 AQ6317 光谱分析仪, 取精度 0.01 nm 对输出进行了测量. 将 PC_1 置于 $(\pi/2, \pi/4, 0)$, 此时的透射率最大, PMF 长 10 m. 增大抽运功率在 1558 nm 附近首先出现激光输出, 图 7 是光谱仪测得的激光光谱, 图中看到滤波间隔不到 0.7 nm. 固定 PC 状态, 图 9 显示减小 PMF 的长度到 6 m 时的激光输出, 扫描范围仍为 4 nm. 此时滤波间隔在 1 nm 左右, 与图 7 比较, 可以看出减小 PMF 的长度使波长间隔变疏, 这个实验结果与理论分析完全符合.

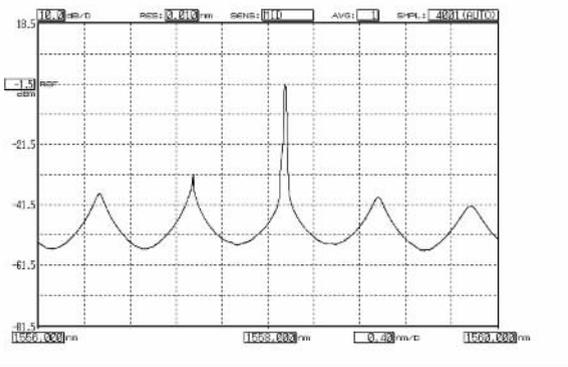


图 7 10 m PMF 的激光输出

实验对激光的特性作了分析. 采用 6 m PMF 光纤, 由于实验中 PMF 的熔接损耗比较大, 导致腔内损耗增大, 激光器的阈值比较高, 当抽运功率当达到 89 mW 时, 中心波长 1558.198 nm 处首先有激光输出. 如果在实验中采用保偏光纤熔接机可以大大降低插入损耗, 获得更高功率的输出. 图 8 为抽运光与激光输出功率关系图, 输出功率随抽运功率近似呈线性变化, 斜率效率为 20% 左右. 光谱仪测得的激光输出如图 9(a) 所示, 激光的边模抑制比 (SMSR) 达 40 dB 左右, 3 dB 和 30 dB 线宽分别为 0.016 nm 和 0.097 nm. 图 9(b) 表示激光输出随时间的演化, 实验中对输出激光进行了 16 次扫描, 每次扫描间隔 2 min, 观察到 30 min 激光中心波长只飘移了 0.1 nm, 在此期间激光的 3 dB, 30 dB 线宽, SMSR 均无明显变化.

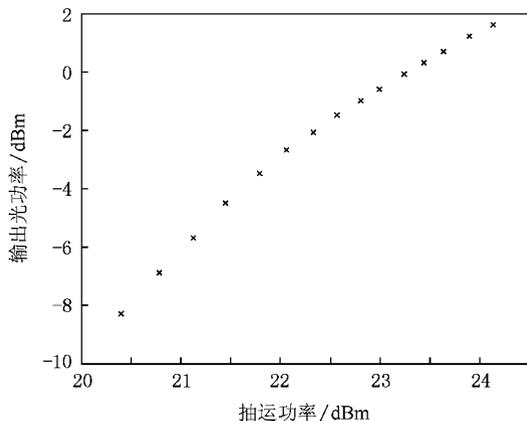


图 8 抽运光与激光输出功率关系

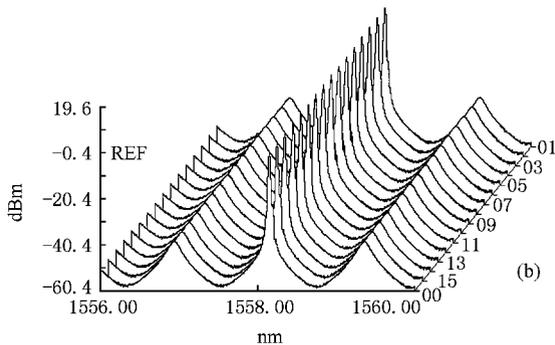
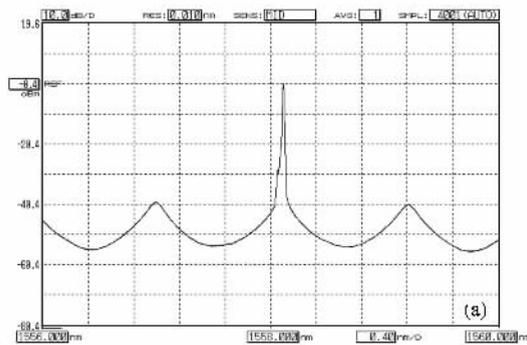


图 9 1558.198 nm 激光输出图

当调节偏振控制器 PC_1 的三个圆盘, 改变 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 观察到激光波长在一定范围内是可以调谐的. 图 10 显示 1555 nm 至 1560 nm 波长之间不同 PC_1 状态下激光输出图, 在 5 nm 范围内有 5 个可调激光输出, 波长间隔约 1 nm 左右, 实验中观察到输出激光的稳定性很好, 并且 3 dB 线宽和 30 dB 线宽均分别小于 0.02 nm 和 0.1 nm. 同时观察到了图 11 中调整 PC_1 分别得到了双波长、三波长和四波长的激光输出. 激光稳定性会随振荡模式数增加而下降, 当超

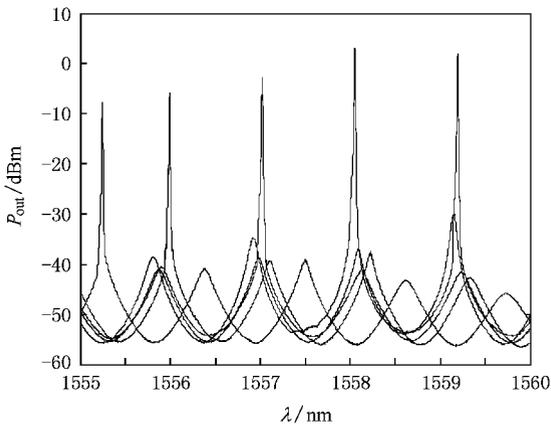


图 10 调节 PC 激光输出图

过四个波长时会出现不稳定激光输出. 图 11(a) , (b) 显示了不同 PC_1 状态下的两种双波长激光输出 , (a) 中两激光中心波长分别为 1557.8560 nm 和 1558.9730 nm. (b) 中两激光中心波长为 1557.0020 nm 和 1559.2260 nm. 这说明调节 PC_1 也可以达到对多波长的调谐. (c) (d) 中三波长和四波长的激光波长间隔也在 1 nm 左右 , 这与图 10 中波长调谐间隔

相同 , 也与 6 m PMF 的滤波间隔相一致 , 与理论

实验中还观察到不稳定的激光输出 , 不稳定的激光在光谱仪上表现为不同波长的激光起伏很大 , 此消彼长 , 这是一种模式竞争现象 . 考虑到室温下掺铒光纤均匀加宽的宽度相对较大而且实验中腔长较长 , 工作在室温下的掺铒光纤激光器中存在着模式竞争现象 . 模式竞争的结果是很多模式被抑制 , 只有那些增益优势的模式获得稳定振荡 . 稳定振荡的模式数目取决于激光器的具体结构参数和运转条件 , 诸如掺铒浓度 , 腔长 , 增益等 , 本实验中有 4 个波长的激光稳定振荡 . 利用偏振烧孔效应^[14] , 用液氮对 EDF 光纤进行冷却处理^[15] 等方法都可以减小 EDF 均匀展宽 , 获得更多波长的稳定激光输出 . PC_1 的波长调谐主要体现在对腔内增益的控制和对输出波长的选择 , Sagnac 环的梳状滤波特性导致会有峰值波长的光落在增益谱范围内 , 每一种 PC_1 态 ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) 对应着某种特定的激光输出 , 当调节 PC_1 使某个波长的增益大于损耗并且在竞争中占有优势时就形成激光 .

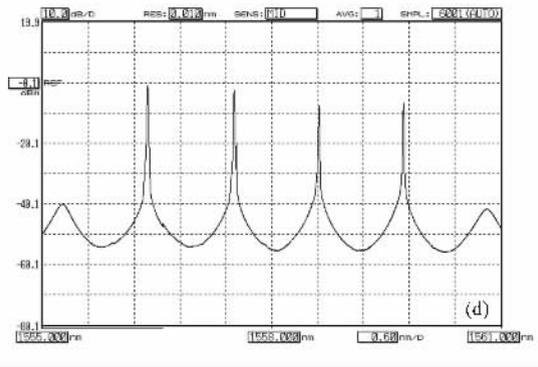
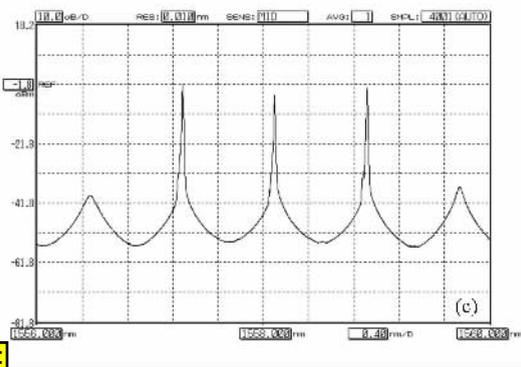
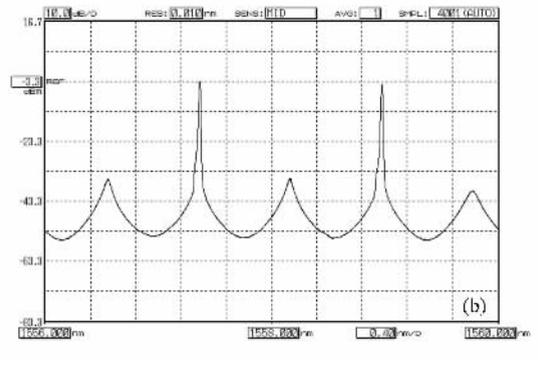
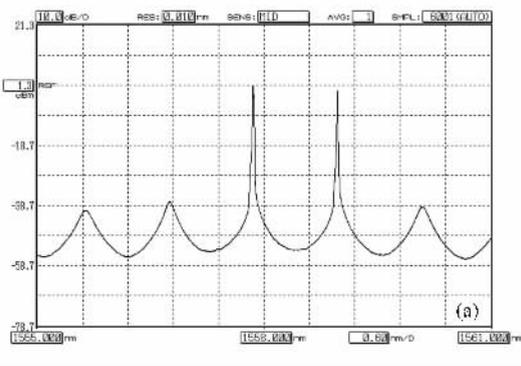


图 11 激光多波长输出

5. 结 论

本文提出一种结构简单的利用高双折射 Sagnac 干涉环选频和调谐的环形腔掺铒光纤激光器. 用传输矩阵法详细分析了 Sagnac 环中的 PC_1 和 PMF 的波长选择和调谐作用. 在实验中观察到在铒光纤增

益带宽中实现激光的输出, PC_1 对腔内增益和输出波长进行控制和选择, 通过调节 PC_1 实现波长的可调谐, 得到了可调谐的单波长、双波长和多波长激光. 当改变 PMF 长度时波长间隔也随之改变, 这些现象都与理论符合得很好. 实验中得到了斜率效率 20%, 3 dB 线宽 0.016 nm, 30 dB 线宽 0.097 nm, 边模抑制比 (SMSR) 40 dB 左右的稳定激光输出.

- [1] Dong Y X, Zhao C L, Guan B O, Tan H Y, Yuan S Z, Kai G Y, Dong X Y 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2750 (in Chinese) [董新永、赵春柳、关柏鸥、谭华耀、袁树忠、开桂云、董孝义 2002 物理学报 **51** 2750]
- [2] Th. Pfeiffer, H. Schmuck, H. Bilow 1992 *IEEE Photonics Technology Letters* **4** 847
- [3] Roger Ibrahim, Yaneck Gottesman, Badr-Eddine Benkelfat, Qin Zou 2007 *Journal of Lightwave Technology* **25** 1819
- [4] Cai Z P, Zeng L Z, Ge C F et al 2005 *J. Optoelectronics · Laser* **16** 429 (in Chinese) [蔡治平、曾丽珠、葛春风 等 2005 光电子·激光 **16** 429]
- [5] Pan J J, Shi Y A 1995 *Electronics Letters* **31** 1164
- [6] He H C, Yang L Z, Wang Y C 2006 *Chin. J. Laser* **33** 1597 (in Chinese) [贺虎成、杨玲珍、王云才 2006 中国激光 **33** 1597]
- [7] Mohammad Aleem Mirza, George Stewart 2008 *Applied Optics* **47** 5242
- [8] Wu J F, Chen G X 2006 *Laser & Optoelectronics Progress* **43** 63 (in Chinese) [武建芬、陈根祥 2006 激光与光电子学进展 **43** 63]
- [9] Hu S, Zhan L, Song Y J, Li W, Luo S Y, Xia Y X 2005 *IEEE Photonics Technology Letters* **17** 1387
- [10] Sheu F W, Chiou C Y, Yang S C 2008 *Optics Communications* **281** 4719
- [11] Chang C H, Lin H M, Huang Y S, Tong S H 2007 *Optics Express* **15** 12450
- [12] Wu C Q 2000 *Guangbodaolilun* (Version II) (Beijing : Tsinghua University Press) p139 (in Chinese) [吴重庆 2000 光波导理论 (第 2 版) (北京 : 清华大学出版社) 190 页]
- [13] Feng S J, Shang L, Mao Q H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4677 (in Chinese) [冯素娟、尚亮、毛庆和 2007 物理学报 **56** 4677]
- [14] Sun J Q, Qiu J L, Huang D X 2000 *Science in China (Series E)* **30** 5 (in Chinese) [孙军强、丘军林、黄德修 2000 中国科学 (E 辑) **30** 5]
- [15] Zhao D H, Liu Y Q, Dong X Y, Yuan S Z 2000 *Acta Optica Sinica* **20** 201 (in Chinese) [赵东晖、刘云启、董孝义、袁树忠 2000 光学学报 **20** 201]

Research on tunable erbium-doped ring fiber laser based on a high-birefringence Sagnac loop : theory and experiment *

Wang Jing[†] Zheng Kai Li Jian Liu Li-Song Chen Gen-Xiang Jian Shui-Sheng

(*Institute of Lightwave Technology , Beijing Jiaotong University , Beijing 100044 ,China*)

(Received 2 January 2009 ; revised manuscript received 11 February 2009)

Abstract

A simple erbium-doped ring fiber laser based on a high-birefringence Sagnac loop filter is proposed. The Sagnac is composed of a polarization controller (PC) and a polarization-maintaining fiber (PMF). The effect of PC and PMF on tunable laser is analyzed in theory. In experiment , the single , double and multiple wavelength lasers are obtained by adjusting the PC. The interval of wavelength varies with the length of PMF. The experimental results are in good agreement with the theoretical analysis. In experiment the stable laser output with 20% slope efficiency , 0.016 nm 3 dB line-width , 0.097 nm 30 dB line-width and 40 dB SMSR was obtained.

Keywords : fiber laser , Sagnac loop filter , ring cavity , erbium-doped optical fiber

PACC : 4260 , 4281

* Project supported by the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60837002) and Beijing Jiaotong University Foundation for Fostering Talents (Project No. 2007RC075).

[†] E-mail : 07111001@bjtu.edu.cn