

文章编号: 0258-7025(2003)07-0581-04

# 掺 Yb 相移分布反馈光纤激光器的 后期制作与研究

陈嘉琳<sup>1</sup>, 梁丽萍<sup>2</sup>, 陈 柏<sup>1</sup>, 范 薇<sup>1</sup>, 乔启全<sup>1</sup>, 薛绍林<sup>1</sup>, 林尊琪<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光国家实验室, 上海 201800; <sup>2</sup> 上海理工大学, 上海 200093)

**摘要** 采用二次曝光法先在一根 10 cm 长的掺 Yb 光纤上制作出近似  $\lambda/4$  相移分布反馈(DFB)掺 Yb 光纤激光器, 再利用紫外修整的方法, 同时通过 F-P 扫描干涉仪及示波器实时监控激光运行模式, 获得了阈值低而单纵模运行特性好的  $\lambda/4$  相移 DFB 掺 Yb 光纤激光器。所制作的激光器阈值为 20 mW。当抽运功率为 130 mW 时, 获得了 25 mW 的 1053 nm 单纵模激光。

**关键词** 光电子学; 分布反馈光纤激光器; 二次曝光法; 紫外修整

**中图分类号** TN 248 **文献标识码** A

## Study on Postprocess of $\lambda/4$ -shifted DFB Yb-doped Fiber Laser

CHEN Jia-lin<sup>1</sup>, LIANG Li-ping<sup>2</sup>, CHEN bai<sup>1</sup>,

FAN Wei<sup>1</sup>, QIAO Qi-quan<sup>1</sup>, XUE Shao-lin<sup>1</sup>, LIN Zun-qi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China  
<sup>2</sup>Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, China

**Abstract** An approximative  $\lambda/4$ -shifted DFB Yb-doped fiber laser was made in the length of 10 cm Yb-doped fiber by double exposure method. Then, it was treated with  $\lambda/4$ -shifted Yb-doped DFB fiber laser with UV trimming. The running characteristic of the laser with scanning F-P interferometer and oscilloscope was observed. SLM Yb-doped  $\lambda/4$ -shifted DFB fiber laser was obtained. The threshold is 20 mW. When pump power was 130 mW, 25 mW SLM laser at 1053 nm was got.

**Key words** optoelectronics; DFB fiber laser; double exposure method; UV trimming

## 1 引 言

ICF 激光驱动器前端系统中, 需要使用 1053 nm 单纵模激光。为了克服增益介质的空间烧孔效应而实现光纤激光器的单模运转, 一种方案是用环型光纤激光器<sup>[1,2]</sup>, 其不足之处是因为所用的光纤较长(几米或几十米), 模式间隔小, 常发生模式跳跃(较分布布拉格反射, DFB 光纤激光器严重), 且需要一些价格昂贵的元件, 另一种就是用线型分布反馈, 分布布拉格反馈光纤光栅激光器<sup>[3~5]</sup>, 利用光纤

光栅作选频元件。DFB 光纤激光器优于分布布拉格反射光纤激光器的主要之处是只用一个光栅来实现光反馈和波长选择, 因而频率稳定性更好。在一段掺杂光纤上刻写光栅则获得 DFB 光纤激光器, 但均匀 DFB 光纤激光器的模式是简并的, 因而阈值较高, 且通常是多纵模运行。相移光纤光栅可在反射谱阻带中打开线宽极窄的一个或多个透射窗口, 使得光栅对某一波长或多个波长有更高的选择度, 而且窗口位置可以随相移量的大小发生改变; 窗口的通透率以及线宽也可以随相移点的位置不同而不

收稿日期: 2002-06-14; 收到修改稿日期: 2002-10-09

基金项目: 国家高技术 863-804-2 资助项目。

作者简介: 陈嘉琳(1978. 2—), 女, 广东新会人, 中国科学院上海光学精密机械研究所研究生, 主要从事光纤有源及无源器件的研究。E-mail: chenjialin3@sina.com

同,因而可以根据不同的需要设计具有不同反射谱的相移光栅<sup>[6]</sup>。在光纤光栅 DFB 激光器中引入  $\lambda/4$  相移后可消除模式简并使该激光器的阈值降低<sup>[7]</sup>,功率增大,同时也有利于单纵模的运行。制作相移光纤光栅的方法有许多种,用得最多的还是二次曝光法和遮挡法。但是在实际制作过程中,难以制作出严格的  $\lambda/4$  相移,这使相移 DFB 光纤激光器的性能受到了很大的影响。

紫外修整作为一种调节光纤光栅参数的方法,可灵活地运用于光栅的制作过程中。G. E. Kohnke 等在 1999 年证实了:长周期光栅刻写后,经过紫外修整,可以调节光栅的共振峰强度和波长<sup>[8]</sup>。我们通过大量实验把这种方法应用在相移光纤光栅的制作上,发现通过紫外修整可以得到较好的  $\lambda/4$  相移。在相移 DFB 光纤激光器的后期制作

过程中可用此方法使该激光器的性能得到大大的提高。

## 2 实验装置和过程

实验中采用了如图 1 所示的装置。LD<sub>1</sub> 抽运光(980 nm)经过 WDM<sub>1</sub> 后,接一段掺 Yb 光纤可提供一个荧光光源,隔离器是为了防止荧光源出现激光振荡,而 LD<sub>2</sub> (980 nm)经 WDM<sub>2</sub> 后接一根相移光纤光栅构成 DFB 激光器。光谱仪是用来在线观测的。一般的实验在光谱仪中只能看激光或只能看荧光,而该装置实现了激光和荧光同时测量。打开 LD<sub>1</sub>, 关闭 LD<sub>2</sub> 可观测到荧光光谱;打开 LD<sub>2</sub>, 关闭 LD<sub>1</sub> 可观察到激光光谱,这样操作简便,而且便于在线对相移的紫外修整。

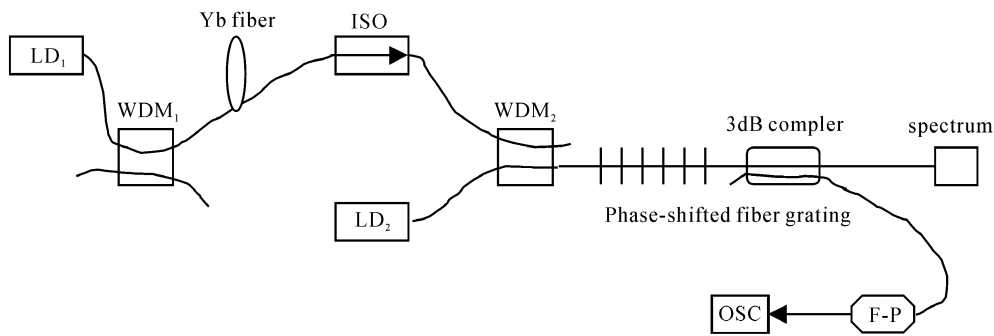


图 1 实验装置图  
Fig.1 Experiment setup

实验步骤如下:

1) 图 2 是用二次曝光制作出来的相移光纤光栅光谱图,由于不是严格的  $\lambda/4$  相移,因此在做激光实验时尚未看到激光的产生;2) 同时打开 LD<sub>1</sub> 及 LD<sub>2</sub>,用准分子激光器对该光栅进行紫外修整,经过一段时间后,发现在 1052.886 nm 处出现激光;3) 图 3 为在此过程中记录的相移光纤光栅透射谱及激

光谱。继续对其进行紫外修整,发现激光不断变大;4) 之后一边通过扫描 F-P 干涉仪监控,一边进一步进行紫外修整,直到观察到良好的单纵模运行(如图 7 所示);5) 最后扫描出该相移光纤光栅的光谱图(图 4 所示),发现相移图比以前有较大的改善。透射窗口向长波漂移了 0.11 nm。

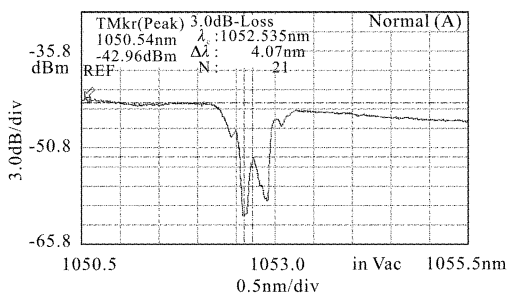


图 2 原始相移光谱图

Fig.2 Primitive phase-shifted fiber grating spectrum

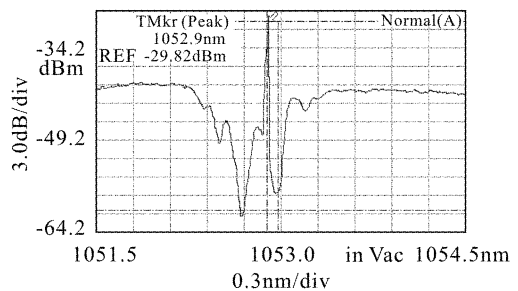


图 3 激光和荧光光谱图

Fig.3 Laser and fluorescent spectrum

### 3 实验结果与分析

为获得单纵模输出需要在均匀 DFB 结构中间产生  $\lambda/4$  相移, 此时阈值增益满足方程<sup>[7]</sup>

$$\left[ -\gamma_- \coth \gamma_- \frac{L}{2} + (\alpha - j\delta_-) \right] \times \left[ -\gamma_+ \coth \gamma_+ \frac{L}{2} + (\alpha - j\delta_+) \right] = |\kappa_+|^2 \quad (1)$$

由公式(1)可得各阶激光本征模的阈值如图 5 所示。由图 5 可见在布拉格反射中心波长处为 1 阶本征模, 它是非简并的, 且阈值比相邻高阶模低约 10 dB<sup>[7]</sup>。因此, 理想的  $\lambda/4$  相移 DFB 结构能够实现稳定的单纵模输出。

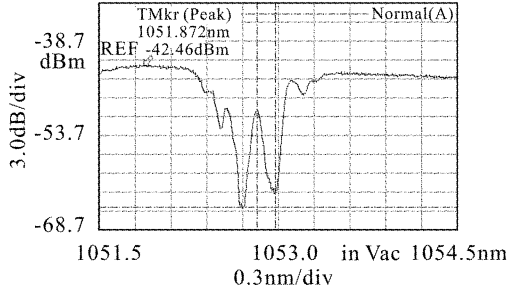


图 4 紫外修整后的相移光谱图

Fig. 4 Phase-shifted fiber grating spectrum after UV trimming

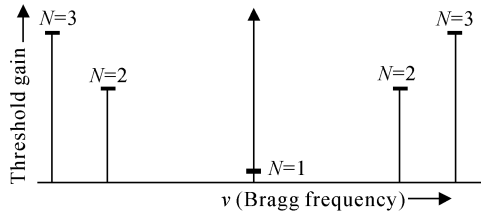


图 5 含有  $\lambda/4$  相移 DFB 光纤激光器的阈值模谱图

Fig. 5 Diagram illustrating the mode spectrum and required threshold gains for an phase-shift DFB laser

以下分析  $\lambda/4$  相移 DFB 及近似  $\lambda/4$  相移 DFB 结构的光谱特性。若设光纤光栅的总长为  $L$ , 它的光学矩阵应该是<sup>[9]</sup>

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

矩阵元分别是

$$S_{11} = (1 - \gamma^2)^{-1} \left[ \exp\left(\frac{iqL}{2}\right) - \gamma^2 \exp\left(-\frac{iqL}{2}\right) \right]$$

$$S_{22} = (1 - \gamma^2)^{-1} \left[ \exp\left(-\frac{iqL}{2}\right) - \gamma^2 \exp\left(\frac{iqL}{2}\right) \right]$$

$$S_{21} = -S_{12} = (1 - \gamma^2)^{-1} \gamma \left[ \exp\left(\frac{iqL}{2}\right) - \right]$$

$$\exp\left(-\frac{iqL}{2}\right) \right] \quad (3)$$

其中,  $q = \pm i[k^2 - (\delta\beta)^2]^{1/2}$ ,  $r = (q - \delta\beta)/k$ ,  $k = \pi\delta n/\lambda_B$  为光栅的耦合系数,  $\delta\beta = 2\pi(\lambda^{-1} - \lambda_B^{-1})$ ,  $\lambda_B$  为布拉格波长。

如果引入相移, 且设相移量为  $\varphi$ , 则相移区的传输矩阵为  $\exp(\pm i\varphi)$  的对角矩阵, 这样, 光通过此相移光栅遵循下式

$$\begin{pmatrix} A_{\text{out}} \\ B_{\text{out}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \exp(i\varphi) & 0 \\ 0 & \exp(-i\varphi) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{\text{in}} \\ B_{\text{in}} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$A, B$  分别表示前向与后向传播的复振幅, 考虑边界条件  $B_{\text{out}}(L) = 0$ , 就可以得到反射率  $R$

$$R = \left| \frac{B_{\text{in}}}{A_{\text{in}}} \right|^2 = \left| \frac{S_{21}S_{11}e^{i\varphi} + S_{22}S_{21}e^{-i\varphi}}{S_{21}S_{12}e^{i\varphi} + S_{22}^2e^{-i\varphi}} \right|^2 \quad (5)$$

为了比较直观地看到相移光栅的反射谱, 把系列中的参数取为具体值:  $kL = 4.0$ ,  $\delta n = 2.0 \times 10^{-3}$ ,  $\lambda_B = 1053 \text{ nm}$ , 将  $\varphi$  取不同值以  $\delta\varphi L$  为横轴, 纵轴为反射率  $R$ 。

由图 6(a)可见,  $\lambda/4$  即  $\pi/2$  相移透射峰在反射峰中心。而由图 6(b)可见相移大于  $\pi/2$  时, 相移透射峰偏离反射峰中心向短波方向漂移; 图 6(c)则描述了相移小于  $\pi/2$  时, 相移透射峰偏离反射峰中心向长波方向漂移。

为了得到理想的  $\lambda/4$  相移结构, 通常需对光栅进行紫外修整。利用二次曝光法在均匀光纤光栅中产生相移时, 相移量可由下式决定<sup>[10]</sup>

$$\varphi = \frac{2\pi}{\Lambda} \cdot \frac{\Delta n_2}{n_{\text{eff}} + \Delta n_1} L_2 \quad (6)$$

其中,  $\Lambda$  为光栅的周期,  $L_2$  为相移的长度,  $\Delta n_1$  为第一次曝光时整个光纤光栅有效折射率比原来改变了的量;  $\Delta n_2$  为对相移区  $L_2$  进行曝光后, 相移区的折射率改变量。  $n_{\text{eff}}$  为有效折射率。在曝光量未饱和时,  $n_{\text{eff}}$  随曝光量增加而增加<sup>[11]</sup>。据公式(6), 对相移大于  $\lambda/4$  的情况(图 6(b)), 对非相移部分予以紫外曝光以增大其有效折射率  $n_{\text{eff}}$ , 使  $\varphi$  减小至  $\pi/2$ 。对相移小于  $\lambda/4$  的情况(图 6(c)), 对相移部分曝光, 增大  $\Delta n_2$  使  $\varphi$  增大至  $\pi/2$ 。

所制作的激光器阈值为 20 mW, 当抽运功率为 130 mW 时, 获得了 25 mW 的 1053 nm 单纵模激光。单纵模激光功率涨落小于 2%。所使用的扫描 F-P 的自由光谱范围约为 1300 MHz, 每次扫程约扫过 4 个自由光谱范围。图 7 为一次扫程所记录的

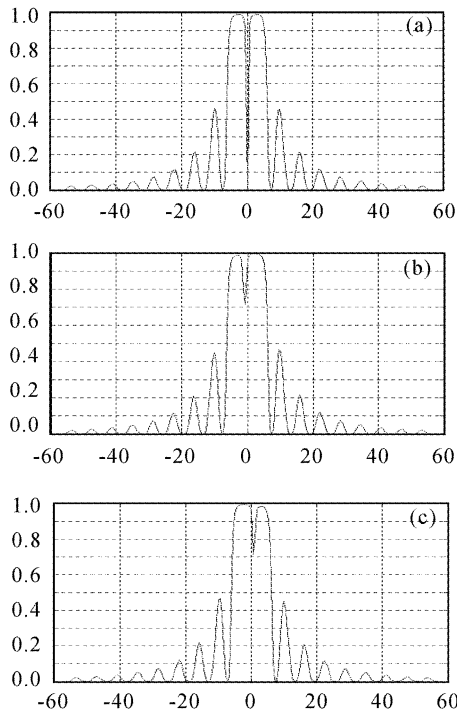


图 6 相移模拟图

Fig. 6 Phase-shift located at the center of the fiber grating

(a)  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ; (b)  $\varphi = \frac{\pi}{2} - \left(-\frac{\pi}{16}\right)$ ; (c)  $\varphi = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{16}$

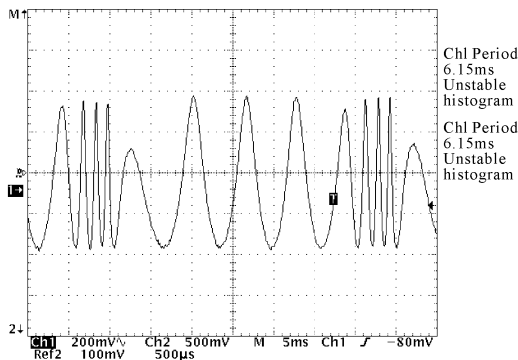


图 7 单纵模运行图

Fig. 7 Wave shape of single mode lasing in Yb-doped F-P cavity fiber laser recorded by scanning F-P interferometer and oscilloscope

单纵模光谱图。如有竞争模将会在单纵模光谱峰值旁有另一套峰出现。因此,通过紫外修整的方法,制作出了性能优良的单纵模相移 DFB 光纤激光器。

## 参 考 文 献

- 1 K. Iwatsuki, H. Okamura, M. Saruwatari. Wavelength-tunable single-frequency and single-frequency and single-polarisation Er-doped fibre ring laser with 1.4 kHz linewidth [J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(21):2033~2035
- 2 A. Gloag, N. Langford, K. McCallion *et al.*. Continuously tunable single-frequency erbium ring fiber laser [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(5):921~925
- 3 G. A. Ball, W. H. Glenn. Design of a single-mode linear-cavity erbium fiber laser utilizing Bragg reflectors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(10):1338~1343
- 4 M. Sejka, P. Varming, J. Hubner *et al.*. Distributed feedback Er<sup>3+</sup>-doped fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(17):1445~1446
- 5 W. H. Loh, P. I. Laming. 1.55  $\mu\text{m}$  phase-shifted distributed feedback fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(17):1440~1442
- 6 Zhao Donghui, Yang Xiufeng, Liu Zhiguo *et al.*. Analyses for characteristics of the phase-shifted fibre grating [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* (光电子 • 激光), 1998, **9**(3):177~180 (in Chinese)
- 7 H. A. Hauns, C. V. Shank. Antisymmetric taper of distributed feedback lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1976, **QE-12**(9):532~539
- 8 G. E. Kohnke, *et al.*. Photosensitization of optical fiber by UV exposure of hydrogen loaded fiber [C]. OFC'1999 Technical Digest, PD20-1(1999)
- 9 G. P. Agrawal, S. Radic. Phase-shifted fiber gratings and their application for wavelength demultiplexing [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(8):995~997
- 10 Chen Jialin, Chen Bai, Qiao Qiquan *et al.*. Study about making of Yb-doped phase-shift fiber Bragg-grating [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2003, **30**(6):541~544 (in Chinese)
- 11 Qin Yuwen, Chen Genxiang, Zhao Yucheng *et al.*. Fiber Bragg gratings fabrication and its temperature stability investigation [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* (光电子 • 激光), 1998, **9**(3):173~176 (in Chinese)