

文章编号: 0258-7025(2007)12-1617-04

# 一种制作掺 Yb 相移光纤光栅激光器的实验方案

王 利, 陈 柏, 陈嘉琳, 常丽萍, 李国扬, 孙 安, 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

**摘要** 采用遮挡法引入相移制作了掺 Yb 相移光纤光栅(PS-FBG)。在制作光栅的过程中,将其作为激光器的谐振腔,通过监测激光器的输出功率来确定相移大小。当激光器的输出功率开始下降时,停止曝光,此时引入的相移为  $\pi/2$ 。为了使光栅的特性尽快稳定下来需要对光栅进行退火,这将导致引入的相移小于  $\pi/2$ 。为了弥补退火过程中引起的相移降低,需要对退火后的光栅进行二次曝光,以使光栅的相移恢复  $\pi/2$ 。利用该方法制作了一只光纤光栅激光器。当抽运功率为 100 mW 时,获得了 25 mW 的输出功率,信噪比(SNR)为 60 dB。在 1 h 内,输出功率波动小于 1%。当光栅的温度在 25~30 °C 之间变化时,激光器单纵模运转。

**关键词** 激光技术;相移光纤光栅;遮挡法;掺 Yb 光纤

**中图分类号** TN 248.1;TN 253 **文献标识码** A

## Fabrication of Yb-Doped Phase-Shifted Fiber Grating Laser

WANG Li, CHEN Bai, CHEN Jia-lin, CHANG Li-ping,  
LI Guo-yang, SUN An, LIN Zun-qi

(Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** Yb-doped phase-shifted fiber Bragg grating (PS-FBG) has been fabricated with phase shift introduced by shielded method. In the fabrication process, the PS-FBG is used as the laser cavity. Whether the introduced phase-shift is  $\pi/2$  or not is determined by the laser output power. As long as the output power of the laser begins to drop down, the exposure is stopped, and the phase shift is  $\pi/2$  then. It is necessary to anneal the PS-FBG to stabilize its characteristics, which will reduce the introduced phase-shift. The second exposure of the PS-FBG is needed to restore the  $\pi/2$  phase shift. A fiber grating laser has been made with the method. When the pump power is 100 mW, the laser output is 25 mW with signal-noise-ratio (SNR) of 60 dB. Within 1 h the output fluctuation of the laser is less than 1%. The laser is always under single-mode operation when the temperature of the fiber grating is tuned between 25 °C and 30 °C.

**Key words** laser technique; phase-shifted fiber grating; shielded method; Yb-doped fiber

## 1 引 言

单频窄线宽光纤激光器近年来得到了广泛研究。其中分布反馈光纤激光器更有一系列独特的优点,因而受到越来越多的重视<sup>[1~3]</sup>,其最重要的元

件是相移光纤光栅(PS-FBG)。相移光纤光栅的制作过程中,相移的引入是一个关键步骤。目前引入相移的方法主要有三种:1)利用带有相移的相位掩模版<sup>[4]</sup>。这种方法的缺点在于相移只能针对某一特定波长和特定的光纤(也就是特定的折射率)而设

收稿日期:2007-03-26;收到修改稿日期:2007-05-28

基金项目:国家 863 计划(842010)资助项目。

作者简介:王 利(1980—),男,河北人,博士研究生,主要研究方向为光纤激光器以及相关技术。

E-mail: lilyhotel910@yahoo.com.cn

导师简介:林尊琪(1942—),男,广东人,研究员,博士生导师,中国科学院院士,目前主要从事激光惯性约束核聚变、高功率激光驱动器和 X 光激光方面的研究。E-mail: zqlin@fudan.sh.cn

计,对于不同的光纤,由于其折射率有差别,利用同一相位掩模版引入的相移难以保证恰好是  $\pi/2$ 。因此采用此种方法引入相移缺乏灵活性。2) 紫外修整法。先制作一根均匀光栅,再对某一区域进行集中曝光,以引入相移<sup>[5~9]</sup>。这种方法的缺点是相移点的选择比较困难,制作均匀光栅的过程中紫外光束均匀性的影响导致相移点的选择并不是任意的。如果选择的相移点并不是理想点,激光器的阈值就会很高。3) 对均匀光栅进行局部升温,以引进相移<sup>[10]</sup>。这种方法的缺陷是相移并不是一直存在的,一旦温差不存在了,相移也就不存在了。为了克服这些问题,在实验中采用遮挡法来引入相移。作为相位掩模法的一种,遮挡法只需要利用普通的均匀相位掩模版就可以制作相移光纤光栅,是一种简单有效的相位掩模法。

## 2 实验原理

在利用遮挡法引入相移的过程中并不需要事先制作一根均匀光栅,而是一次性获得相移光栅。实验原理如图 1 所示。AB 是一段光纤。在刻写过程中,CD 段将被遮挡,以引入相移。



图 1 遮挡法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of shielded method

设 CD 段的长度为  $l$ ,光栅的总长度为  $L$ ,遮挡部分的有效折射率与未遮挡部分的有效折射率的差为  $n$ ,则被遮挡的 CD 段引入的相移量可以表示为

$$\phi = 2\pi nl/\lambda_B.$$

当引入的相移量恰好为  $\pi/2$  时,光栅的折射率变化与遮挡区的长度变化关系满足  $nl = \lambda_B/4$ 。当光栅的折射率增量在  $5 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-4}$  之间变化时,对应的遮挡区的长度约在  $0.26 \sim 2.1$  mm 之间变化。

遮挡法引入相移使得相移点的选择具有随意性:可以在光栅上随便选择相移点的位置。但通常情况下,为了获得较大的单端输出功率,相移点一般略偏移光栅长度中点。同时,采用不同的光纤制作相移光栅时,只要变化遮挡区的长度,就可以在光栅中引入  $\pi/2$  相移,因此解决了相移相位掩模法缺乏灵活性的问题。此外,只要曝光量足够强,通常 20 mJ 以上的能量就可以实现相移的永久引入。

## 3 实验过程

实验装置的示意图如图 2 所示。实验中采用 LamdaPhysics 公司生产的 Complex102 型准分子激光器,产生 193 nm 的紫外(UV)激光。其输出光束经扩束、准直之后照射在相位掩模版上。来自于宽带光源(BBS)的 1053 nm 附近的荧光经波分复用器(WDM)耦合进待刻写的光纤,同时一个抽运源(半导体激光器(LD))也通过这个波分复用器耦合进待刻写的光纤。从光栅中出来的光经过一个隔离器输入到光谱分析仪(OSA)中,以监测光栅在刻写过程中的生长情况。图中的一个小区域在刻写过程中被遮挡起来,不受紫外光照射,就是相移区。

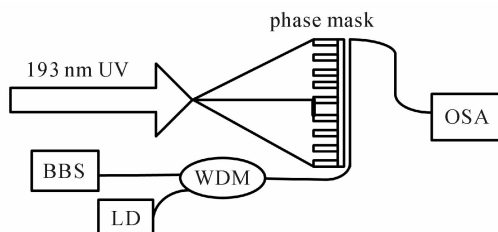


图 2 光栅刻写以及监控的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fiber grating fabrication and monitoring

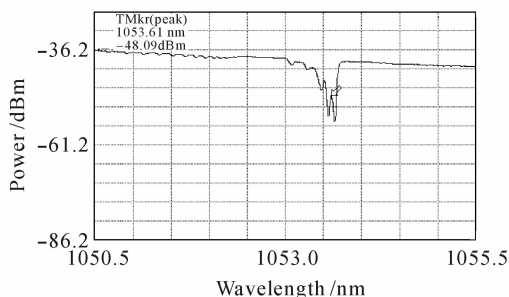


图 3 2000 个准分子激光脉冲之后的光栅光谱

Fig. 3 Fiber Bragg grating transmission spectrum after 2000 pulses from excimer laser

在 10 Hz 的工作频率下,将激光器的单脉冲能量设定为 20 mJ 对光栅进行曝光。2000 个脉冲过后,获得的光栅光谱如图 3 所示。此时光栅的最高反射率为 15.7 dB,中心波长位于 1053.61 nm。在中心波长处,光栅的透射谱中出现了很窄的透射峰,这就是相移点。

测试此时由光栅构成的激光器,当抽运功率为 80 mW 时,没有获得激光输出。这说明,相移量还远远没有达到  $\pi/2$ ,因此激光器的阈值还很高。继续对光栅进行曝光,又 2000 个脉冲过后,激光器开始起振。这说明相移量正逐渐接近  $\pi/2$ ,激光器的

阈值也因此逐渐降低。持续对光栅进行曝光,在线监测激光器的功率输出,当激光器的输出功率从极大值开始下降时,停止曝光。此时引入的相移量是  $\pi/2$ 。

再次测试光栅的透射谱,得到了如图 4 所示的光谱曲线。从图中可以看到,相移点的波长已经向长波移动,达到 1053.64 nm。这是因为光栅的有效折射率随着曝光时间的增加而增加;光栅的最大反射率也增加到了 22.3 dB;相移点两侧的光谱形状和反射率大小都很对称。这说明曝光过程中紫外光束的均匀性比较好。

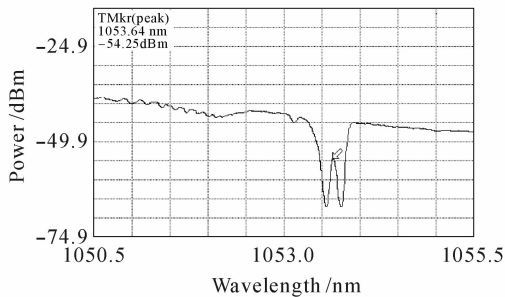


图 4 最终的光栅透射光谱

Fig. 4 Final transmission spectrum of the FBG

通常刻写完毕的光栅都会不同程度地存在退化现象。为了使光栅的特性在短时间内稳定下来,需要将刻写好的光栅进行退火。退火过程会使光栅的折射率变化量有所降低,从而导致光栅的相移量也有所降低。为了使光栅的相移量重新达到  $\pi/2$ ,需要对退火之后的光栅相移区以外的部分进行适量的二次曝光,同时监测激光器的输出情况,使最终引入的相移量达到  $\pi/2$ 。为了使二次曝光时不偏离相移区,需要在第一次曝光结束时对相移区加以标记。

## 4 结果与讨论

采用制备的光栅制作了一台光纤光栅激光器。激光器的抽运源是一个峰值波长为 974 nm,最大输出功率为 250 mW 的 GaAs 半导体激光器(LD)。抽运功率经一个 980 nm/1053 nm 的波分复用器(WDM)耦合进激光腔——相移光纤光栅(PS-FBG)。为了抑制任何不必要的背向反射,激光经隔离器(ISO)输出。相移光栅的另一端浸入匹配液(IMG)中以防止因菲涅耳端面反射引起的输出不稳定。激光从波分复用器的 1053 nm 端输出,送入光谱分析仪(OSA)或法布里-珀罗(F-P)干涉仪(FPI)进行分析。测试采用的实验装置如图 5 所示。

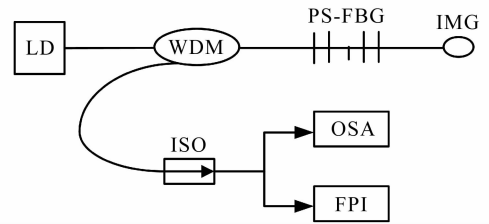


图 5 激光器输出性能测试采用的实验结构

Fig. 5 Experimental layout to measure laser output characteristics

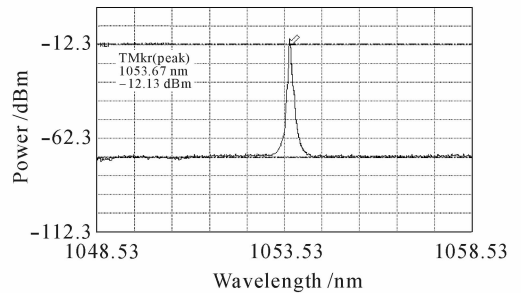


图 6 激光器输出光谱

Fig. 6 Output spectrum of the laser

光栅长度为 10 cm,所采用的光纤的  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂离子浓度为  $1.2 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ 。当抽运源的输出功率增加至 2 mW 时,激光器开始有激光输出。当抽运功率增加至 100 mW 时,激光器的输出功率为 25 mW,激光器的输出光谱如图 6 所示,此时激光的信噪比为 60 dB。光谱图中显示出的激光功率水平与实际测量值的差别是由激光输入光谱仪之前加入了衰减所致。

在增加抽运功率的过程中,激光器的输出功率被分成相等的两个部分。一部分用来监控输出功率大小变化和激光光谱的变化,另一部分用来监控激光器的模式变化情况。利用固定的法布里-珀罗干涉仪,发现在抽运功率增加的整个过程中,激光器一直是单纵模运行的,如图 7 所示。利用功率计监控激光器的输出功率,在 1 h 内,激光器的输出波动小

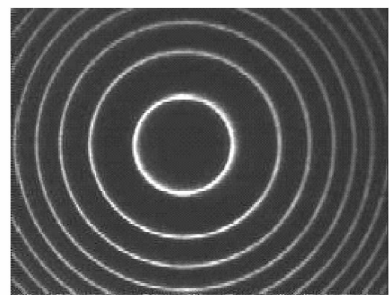


图 7 法布里-珀罗干涉仪的干涉图样

Fig. 7 Interference pattern from F-P interferometer

于 1%。

光栅温度的改变往往会影响激光器的输出模式。为了监控温度对激光器输出模式的影响,将光栅置于温控仪上,改变温度并观察激光器的输出模式变化。当光栅的温度在 25~30 °C 之间变化时,激光器一直是单纵模输出的,没有观察到模式跳变。

由制作的光纤光栅激光器性能可知,遮挡法是一种简单有效的引入相移的方法。作为一种相位掩模法的变形,遮挡法避免采用了价格比较昂贵并且不灵活的相移掩模版,是一种可以随意选择相位点位置的方法。但是由于光栅刻写之后的退火,导致了刻写过程中引入的相移降低。结果需要对光栅进行再次遮挡修整,以使光栅中引入的相移恢复为  $\pi/2$ 。实际上在相移略偏移  $\pi/2$  时,激光器的阈值增益并不会显著提高<sup>[11,12]</sup>。

## 5 结 论

利用遮挡法制作了一根相移光纤光栅,克服了传统方法中引入相移过程中存在的问题和不便。利用该相移光纤光栅,制作了一只单纵模运转的光纤光栅激光器。当光栅的温度在 25~30 °C 之间调谐变化时,激光器没有跳模现象。激光器的阈值为 2 mW,当抽运功率增加至 100 mW 时,激光器的输出功率为 25 mW。在 1 h 内,激光器输出功率的波动小于 1%。

## 参 考 文 献

- Liu Haitao, Chen Jianping, Chen Xiangfei *et al.*. Fabrication of distributed feedback Bragg fiber laser on regular Er-doped fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):873~876  
刘海涛,陈建平,陈向飞等. 低掺杂钕纤上分布反馈布拉格光纤激光器的制作[J]. 中国激光, 2006, **33**(7):873~876
- Wu Bo, Liu Yongzhi, Zhang Qianshu *et al.*. High efficient narrow linewidth fiber laser based on fiber grating Fabry-Perot cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3):350~353  
伍波,刘永智,张谦述等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔的高效窄线宽光纤激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(3):350~353
- Xu Tuanwei, Li Fang, Liu Yuliang *et al.*. Characteristic mode analysis of distributed feedback fiber lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10):1358~1362  
徐团伟,李芳,刘育梁等. 分布反馈光纤激光器模式特性分析[J]. 中国激光, 2007, **34**(10):1358~1362
- R. Kashyap, P. F. McKee, D. Armes *et al.*. UV written reflection grating structures in photosensitive optical fibres using phase-shifted phase masks [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(23):1977~1978
- J. Canning, M. G. Sceats.  $\pi$ -phase-shifted periodic distributed structures in optical fibres by UV post-processing [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(16):1344~1345
- Chen Jialin, Chen Bai, Qiao Qiquan *et al.*. Study about making of Yb-doped phase-shifted fiber Bragg-grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6):541~544  
陈嘉琳,陈柏,乔启全等. 掺 Yb 相移光纤光栅形成过程的分析[J]. 中国激光, 2003, **30**(6):541~544
- Fan Wei, Chen Bai, Li Xuechun *et al.*. Stress-induced single polarization phase-shifted DFB fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(5):568~571  
范薇,陈柏,李学春等. 应力所致单偏振相移分布反馈光纤激光器[J]. 光学学报, 2002, **22**(5):568~571
- Fan Wei, Chen Bai, Chen Jialin *et al.*. Bidirectional output wavelength characteristics of asymmetric phase-shifted distributed feedback fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7):828~833  
范薇,陈柏,陈嘉琳等. 非对称相移分布反馈光纤激光器的双向输出波长特性[J]. 光学学报, 2003, **23**(7):828~833
- Chen Jialin, Liang Liping, Chen Bai *et al.*. Study on postprocess of  $\lambda/4$ -shifted DFB Yb-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7):581~584  
陈嘉琳,梁丽萍,陈柏等. 掺 Yb 相移分布反馈光纤激光器的后期制作与研究[J]. 中国激光, 2003, **30**(7):581~584
- D. Uttamchandani, A. Othonos. Phase-shifted Bragg gratings formed in optical fibers by post-fabrication thermal processing [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **127**:200~204
- Fan Wei, Li Xuechun, Chen Bai *et al.*. Theoretical analysis of Yb-doped DFB fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6):709~712  
范薇,李学春,陈柏等. 掺 Yb 相移分布反馈光纤激光器的理论分析[J]. 光学学报, 2002, **22**(6):709~712
- Wei Fan, Bai Chen, Xuechun Li *et al.*. Yb<sup>3+</sup>-doped non- $\pi$ -phase-shifted distributed feedback fiber lasers [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2002, **19**(8):1108~1111