

文章编号: 0253-2239(2007)09-1658-5

# 利用倾斜光纤光栅的可开关双波长光纤激光器\*

徐玲玲 金龙 开桂云 张 键 刘艳格 袁树忠 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

**摘要:** 报导了一种在四波混频作用下利用倾斜光纤布拉格光栅进行波长选择的可开关双波长掺铒光纤激光器。通过将倾斜光纤光栅与单模光纤进行横向错位焊接,使光栅的反向  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  两个模式具有相近的有效反射率,从而可以用来进行激光器的双波长选择。接入腔内的一段高非线性光子晶体光纤引入的四波混频效应克服了模式竞争,使得双波长激光在室温下稳定振荡。腔内起偏器和偏振控制器的联合作用可产生依赖于波长的损耗,以补偿光纤光栅两反射峰峰值的大小差异。基于以上原理,通过调节腔内的偏振态,该激光器实现了室温下稳定的双波长输出,也实现了在两波长之间的转换。两波长激光均有超过 45 dB 的信噪比,最大的功率波动为 0.8 dB

**关键词:** 激光器; 掺铒光纤激光器; 四波混频; 倾斜光纤布拉格光栅; 光子晶体光纤

中图分类号: TN248 文献标识码: A

## Switchable Dual-Wavelength Erbium-Doped Fiber Laser with a Tilted Fiber Bragg Grating

Xu Lingling Jin Long Kai Guiyun Zhang Jian Liu Yange Yuan Shuzhong Dong Xiaoyi

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071)

**Abstract:** A four-wave mixing (FWM) assisted dual-wavelength erbium-doped fiber laser with a tilted fiber Bragg grating (TFBG) for wavelength switch is reported. The transverse-offset-spliced tilted fiber grating on single-mode fiber ensures that the two effective reflectivities of the reverse  $LP_{01}$  mode and  $LP_{11}$  mode are close enough to realize the dual-wavelength switch for laser. FWM process induced by high-nonlinearity photonic crystal fiber (HNL-PCF) avoids mode competition and ensures stable dual-wavelength oscillation at room temperature. The conjunction of a polarization controller (PC) and a polarizer introduces wavelength-dependent cavity loss and balances the reflectivity difference of the two wavelengths. By adjusting the intracavity polarization state, the proposed laser can operate in stable dual-wavelength or switch between two wavelengths at room temperature. The two lasing lines have a high signal-noise-ratio (OSNR) more than 45 dB and a maximum power fluctuation of 0.8 dB.

**Key words:** lasers; erbium-doped fiber laser; four-wave mixing; tilted fiber Bragg grating; photonic crystal fiber

### 1 引 言

近年来,多波长掺铒光纤激光器(EDFL)因其在波分复用(WDM)通信系统、光纤传感、光学仪器及系统检测等领域有着广泛的应用前景而备受关注<sup>[1~5]</sup>。在一些诸如传感、仪器测试的应用中,要求激光器能够从一波长调到另一波长,或同时输出多个波长,即激光器具有可开关性能。室温下实现多波长激光稳定运转的关键是设法削弱由铒光纤的均匀展宽引入的模式竞争和模式跳变。Bellemare

等<sup>[1]</sup>在环形腔中引入移频器获得了常温下稳定的多波长激光输出;O. Graydon 等<sup>[2]</sup>用双芯掺铒光纤制成环形腔激光器。此外还有利用偏振烧孔效应和各种非线性效应<sup>[4]</sup>等方法获得室温下稳定的多波长激光器。光纤布拉格光栅(FBG)由于具有很好的波长选择性及光纤兼容性,从而广泛地应用于光纤激光器中以增强模式选择。目前已有多种不同的布拉格光纤光栅用作多波长激光器的选频器件,如级联的布拉格光纤光栅、高双折射光纤光栅以及多模光纤

\* 国家 973 计划(2003CB314906)资助课题。

作者简介: 徐玲玲(1982—),女,江苏如东人,硕士研究生,主要从事光纤激光器与放大器等方面的研究。

E-mail: xulingling@mail.nankai.edu.cn

导师简介: 袁树忠(1941—),男,河北人,教授,博士生导师,主要从事光纤激光器,光纤放大器和传感器等方面的研究。

E-mail: szyuan@eyou.com

收稿日期: 2006-11-09; 收到修改稿日期: 2007-04-13



包层模的有效折射率。 $\Lambda_g = \Lambda \cos \theta$ , 其中  $\Lambda$  为光纤轴向的栅格周期。本实验中模板法线于光纤轴向夹角  $\theta$  大约为  $2^\circ$ 。图 2 为此光栅的透射谱。图中透射谱中两个较深谐振峰分别为  $\lambda_1 = 1555.72 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 1559.68 \text{ nm}$ , 谐振深度分别是 2.7 dB 和 3.4 dB, 分别对应后向传输的  $LP_{11}$  和  $LP_{01}$  模式。虽然  $LP_{11}$  的谐振系数很高, 但  $LP_{11}$  不是单模光纤所支持的传导模式, 其绝大部分能量都损失掉了, 所以在反射谱中不是很明显。

通过熔接机调节倾斜光纤光栅与单模光纤之间的横向位移, 改变两个谐振峰间的反射强度分布。定义有效反射率  $R_{\text{eff}}$  为从倾斜光栅二次耦合到单模光纤中的能量与单模光纤中初始能量之比。当横向位移增大时, 后向  $LP_{11}$  有更多的能量耦合到单模光纤中,  $LP_{11}$  与  $LP_{01}$  的有效折射率之比逐渐增加。当两者有效反射率非常接近时, 调节熔接机减少放电强度, 同时增加放电时间减少倾斜光栅与单模光纤的熔接损耗, 相应的反射谱如图 2。图中所见  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的有效反射率差仅为 4.25 dB。实验中将移位熔接的倾斜光栅作为双波长滤波器。

在波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  处的振荡条件为

$$r_i R_{\text{eff},i} l_i V_{p,i} G_{\text{EDF},i} G_{\text{FWM},i} = 1, \quad (i = 1, 2) \quad (3)$$

其中  $r_i$ ,  $l_i$  和  $G_{\text{EDF},i}$  分别为输出耦合器的反射率、往返一周腔内的损耗和两个掺铒光纤放大器所提供的增益; 这些量在  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  处可认为近似相等。在谐振波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  处  $R_{\text{eff}}$  可由图 2 中反射谱获得。 $V_p$  为由腔内的偏振态引起的损耗, 并且通过调节腔内的偏振控制器可以改变。 $G_{\text{FWM}}$  为腔内的四波混频效应引入的增益。当  $V_p$  和  $G_{\text{FWM}}$  调节到最佳值时, 腔内双波长激光可以同时稳定输出。

虽然两个反射峰之间仍存在 4.25 dB 的差异, 但可以通过起偏器和偏振控制器的联合作用产生依赖波长的损耗来补偿光纤光栅两反射峰峰值大小的差异。两个波长的光通过起偏器时可认为是线偏振光且有相同的偏振态。但由于腔内的双折射效应, 两束光在腔内运行一周便产生了不同的衰减。通过调节两个偏振控制器可以控制腔内偏振态的改变量从而平衡两束光的损耗。其原理可简述如下: 设用  $p(\theta)$  表示从起偏器出来的线偏振光, 其中  $\theta$  为该线偏振光相对于某一固定的实验室坐标系  $x$  轴的夹角。由于环形腔内光纤的双折射效应, 该线偏振光在环内传输一圈后再回到起偏器时, 其偏振态不可避免地要发生变化。并且由于光纤中的偏振色散, 不同波长的光在传输一圈后偏振态的变化也不同。当这些

不同偏振态的偏振光再次经过起偏器后, 其所受到的损耗与其偏振方向和起偏器的偏振极化方向之间的夹角有关, 当夹角很小时偏振损耗也越小, 所以不同波长的光在腔内传输一圈所受到的损耗也不同。对某个波长的光来说, 如果这个损耗比较小, 以致这个波长的光在腔内传输一圈时所受到的增益足以弥补其在腔内的损耗时, 它就能在环形腔内维持激光振荡。

如果用  $M(\lambda)$  来表示环形腔内光纤的双折射效应, 则腔内激光的谐振条件可表示为

$$|P^*(\theta)M(\lambda)P(\theta)| \exp[G(\lambda)L]T_{\text{eff}} = 1, \quad (4)$$

其中  $P^*(\theta)$  为  $P(\theta)$  的哈密顿共轭函数,  $G(\lambda)$  为波长为  $\lambda$  的光在腔内的增益系数,  $L$  是腔内增益介质的长度,  $T_{\text{eff}}$  是腔内器件总的光透射率。由方程(4)可以看出, 通过调整腔内的偏振控制器的状态, 使腔内的双折射发生改变, 即使  $M(\lambda)$  发生变化, 可以达到波长调谐的目的。这就是调节偏振控制器实现开关模式的基础。

当腔内的偏振态满足  $r_1 R_{\text{eff},1} l_1 V_{p,1} G_{\text{EDF},1} \approx r_2 R_{\text{eff},2} l_2 V_{p,2} G_{\text{EDF},2}$  时便可得到稳定的双波长激光输出。其原理可以解释如下: 高非线性光子晶体光纤在 1550 nm 附近有平坦且接近零的色散, 满足了四波混频的相位匹配条件。两波长激光对应频率分别为  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ , 当两波长激光进入高非线性光子晶体光纤时, 因简并的四波混频效应, 两个频率为  $\omega_1$  的光子消逝, 同时伴随着频率分别为  $\omega_0$ 、 $\omega_2$  的两个新光子的产生。它们的频率满足关系式  $2\omega_1 = \omega_0 + \omega_2$ 。同时, 两个频率为  $\omega_2$  的光子消逝, 两个频率为  $\omega_1$ 、 $\omega_3$  的新光子产生, 且  $2\omega_2 = \omega_1 + \omega_3$ 。因此, 在两波长间产生能量的转移。由于能量转移的多少与光功率大小有关, 对于  $\omega_1$  和  $\omega_2$ , 能量在两个波长间转移, 直到两激光功率相同为止。上述过程能够保证双、多波长激光的稳定输出, 且两波长激光幅度均衡。当两激光的偏振态相同时, 四波混频效应可达到最大值; 当两激光的偏振态正交时, 不会产生四波混频。因此通过调整腔内偏振态, 可以对高非线性光子晶体光纤的能量补偿能力进行调节。当某个波长的  $V_p$  即由偏振态引起的损耗很大时, 只有另一个波长的激光可以起振。因此通过调整偏振控制器的状态可以简单的实现单双波长之间的切换。

### 3 实验结果及讨论

当 EDFA<sub>2</sub> 的输出功率为 500 mW 时, 通过调节腔内的偏振态, 可以观察到稳定的双波长输出; 当

其输出功率大于 300 mW 时,可以明显地观察到四波混频产生的两个闲频波信号。图 3 是 16 次重复扫描的结果,每次扫描间隔为 30 s。输出的激光功率为 18.6 mW,最大的功率波动为 0.8 dB,且至少可稳定 0.5 h。由图 3 可看出,室温下双波长输出稳定性以及振幅均衡性都很好。EDFA<sub>2</sub> 输出功率为 2 W 时,将耦合器换成 4:6 且在透镜耦合系统与高非线性光子晶体光纤之间以 40% 输出,得到了最大的激光输出为 314 mW。通过调整偏振控制器的状态,分别得到两个稳定的单波长输出如图 4 所示。所有的激光输出都可得到超过 45 dB 的信噪比。

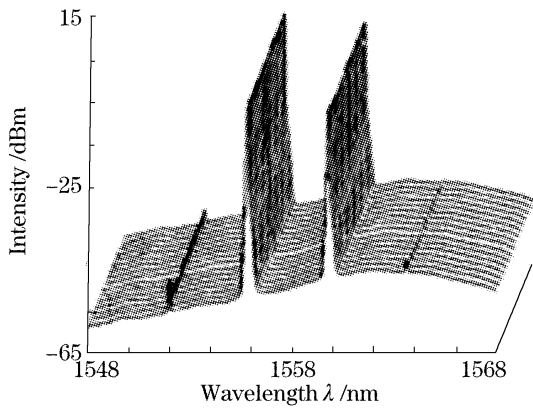


图 3 双波长激光输出重复扫描

Fig. 3 Repeated scanning of the dual-wavelength output laser

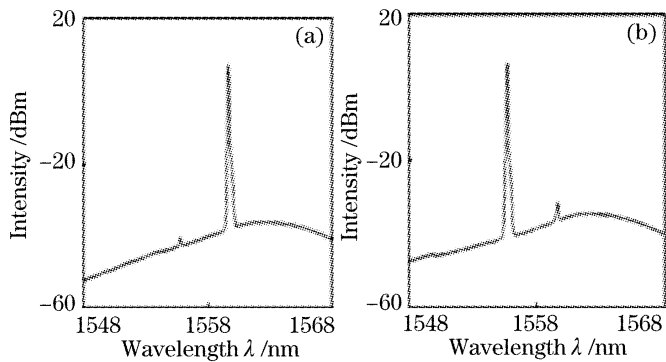


图 4 单波长激光输出

Fig. 4 Single-wavelength operation of the laser

两束激光间的稳定性和均衡性与光子晶体光纤的长度、非线性系数以及输入的功率有关<sup>[4]</sup>。当两反射峰之间峰值差异达到 7dB 时,由于光子晶体光纤的长度及非线性系数的条件限制,使得腔内的非线性效应不足以平衡两个波长间的差异,仅有一个波长的激光起振。如果腔内没有起偏器和偏振控制器的联合作用,腔内的非线性效应不足以平衡两个波长间反射峰峰值差异,因此只有 1562. 22 nm 的激光输出;如果腔内没有引入高非线性光子晶体光纤,掺铒光纤自身的均匀展宽引起的模式竞争使得双波长激光极不稳定。这两个结果也证明起偏器、

偏振控制器和高非线性光子晶体光纤的作用。

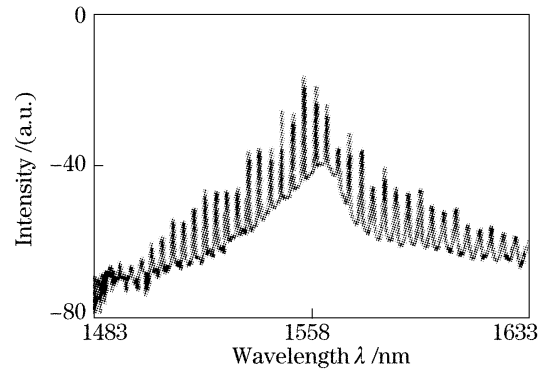


图 5 四波混频效应最大时可得到 30 多个不稳的闲频波  
Fig. 5 Over 30 unstable idle waves induced by HNL-PCF when FMW efficiency reaches its maximum

调整偏振控制器 1 的状态使四波混频效应达到最大时,在大约 120 nm 范围内出现了超过 30 个闲频波如图 5 所示,但由于光子晶体光纤主要在闲频波之间进行能量交换使得激光输出非常不稳定;当调整偏振控制器 1 的状态大大降低四波混频效应时,两激光之间无法继续通过能量互补维持稳定的输出。因此,PC<sub>1</sub> 必须调节到合适的位置以确保双波长激光稳定输出。

### 4 结 论

提出一种基于倾斜光纤光栅的可开关双波长掺铒光纤激光器,其中倾斜光栅用来选频,高非线性光子晶体光纤用来维持稳定的双波长输出,其波长间距为 3.96 nm,最大输出功率为 314 mW。在起偏器和两个偏振控制器的联合作用下,通过简单的调整偏振控制器的状态,便可以获得不同的单、双波长输出模式。值得注意的是,通过设计光栅的倾斜角度和光敏光纤的折射率分布等参数,可以获得间距更窄的双波长激光输出。进一步优化高非线性光子晶体光纤的长度以及非线性系数可获得更稳定的激光输出,从而更好地应用于光通信系统。

### 参 考 文 献

- 1 Antoine Bellemare, Miroslav Karasek, Martin Rochette *et al.*. Room-temperature multi frequency erbium-doped fiber lasers anchored on the ITU frequency grid[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(6): 825~829
- 2 O. Graydon, W. H. Loh, R. I. Laming *et al.*. Triple-frequency operation of an Er-doped twincore fiber loop laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(1): 63~65
- 3 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

- 4 Xueming Liu, Xiufeng Yang, Fuyun Lü *et al.*. Stable and uniform dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on fiber Bragg gratings and photonic crystal fiber[J]. *Opt. Exp.*, 2005, **13**(1): 142~147
- 5 Xinhuan Feng, Tam Hwa-Yaw, P. K. A. Wai. Stable and uniform multiwavelength erbium-doped fiber laser using nonlinear polarization rotation[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(18): 8205~8210
- 6 T. Erdogan, J. E. Sipe. Tilted fiber phase gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(2): 296~313
- 7 S. J. Hewlett, J. D. Love, G. Meltz *et al.*. Coupling characteristics of photo-induced Bragg gratings in depressed- and matched cladding fibre[J]. *Opt. and Quant. Electron.*, 1996, **28**: 1641~1654
- 8 Sung Chul Kang, Se Yoon Kim, Sang Bae Lee *et al.*. Temperature-independent strain sensor system using a tilted fiber Bragg grating demodulator[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(10): 1461~1463
- 9 P. S. Westbrook, T. A. Strasser, T. Erdogan. In-line polarimeter using blazed fiber gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(10): 1352~1354
- 10 C. Caucheteur, P. Megret. Demodulation technique for weakly tilted fiber Bragg grating refractometer [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(12): 2703~2705
- 11 Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(1): 57~66 (in Chinese)  
王清月,胡明列,柴路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 57~66

## 中国科学院上海光学精密机械研究所光学设计高级讲习班教材征订

中国科学院上海光学精密机械研究所光学设计高级讲习班于2006年10月27日胜利闭幕。现有少量讲习班辅导教材征订,数量有限,欲购从速。四本教材主要内容包括:

### 1) 王之江院士、徐文东研究员主讲光学系统设计

光学设计中的基本概念和问题:光学系统的基本要求及指标、高斯光学、像差理论、成像质量和发展各种不同结构的光学系统的意义等的阐述,结合现在流行的光学软件设计的基本功能进行介绍,立足于当前具有代表性的产品设计进行实例的分析和讲解。

### 2) 朱健强研究员主讲光机系统设计和光学加工

本课程的内容涵盖了光机设计的原理、设计方法及常规内容。介绍各类光学元件加工的各个环节及其相关测控技术,培养光学工程师所需掌握的必要光学加工工艺知识。平面、球面、透镜、棱镜等光学加工技术、非球面加工技术,特种光学元件加工技术,光学检测技术。

### 3) 范正修研究员主讲光学薄膜

从光学薄膜的一般性质出发,讲述光学薄膜在激光系统,光通信系统,显示系统中的应用,介绍极紫外和软X射线薄膜,功能性光学薄膜。分析激光对光学薄膜的破坏过程。

### 教材目录:

《光学加工与检测技术》、《光学机械设计》、《光学设计》、《光学薄膜及其应用》。

### 征订形式:

- 1) 全套教材或电子版: 400 元
- 2) 全套教材+电子版: 500 元
- 3) 单本教材+电子版: 150 元

### 优惠办法:

中国光学期刊网会员购买全套教材赠送价值100元的期刊阅读卡一张。

### 征订办法:

联系人: 高老师 电话: 021-69918253 邮箱: gfhai@siom.ac.cn

### 邮购方法:

请直接汇款到以下地址:

邮编: 201800 地址: 上海市嘉定区清河路390号 收款人: 光学期刊联合编辑部