

文章编号: 0258-7025(2005)02-0145-04

## 基于保偏光纤光栅的双波长掺铒光纤激光器

冯新焕, 孙 磊, 刘艳格, 熊凌云, 袁树忠, 开桂云, 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

**摘要** 提出了一种基于保偏光纤(PMF)中布拉格光栅的波长间隔可调的可开关双波长掺铒光纤激光器(EDFL)。由于和光纤布拉格光栅(FBG)两个反射峰对应的不同波长的两纵模在偏振态上是正交的,从而在均匀展宽的掺铒光纤中增强了偏振烧孔(PHB)效应。这种偏振烧孔效应大大减小了不同模式之间的竞争,因此可在室温下得到稳定的双波长振荡。另一方面,通过调整偏振控制器的状态,即改变腔内的双折射状态,光纤光栅的两个反射峰强度会发生变化。基于以上原理,便形成了对激光振荡模式的选择,即通过调整偏振控制器的状态可使激光器工作在稳定的双波长状态或在两波长之间转换。通过改变加在光纤光栅上侧向应力的方向和大小,可有效控制双波长激光的波长间隔,实验中得到了 0.2~1.1 nm 的可调间隔。

**关键词** 激光技术;掺铒光纤激光器;可开关;双波长激光;光纤布拉格光栅;保偏光纤

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## Switchable and Spacing-Tunable Dual-Wavelength Erbium-Doped Fiber Laser Using a PM Fiber Bragg Grating

FENG Xin-huan, SUN Lei, LIU Yan-ge, XIONG Ling-yun,  
YUAN Shu-zhong, KAI Gui-yun, DONG Xiao-yi

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

**Abstract** A switchable and spacing-tunable dual-wavelength linear cavity erbium-doped fiber (EDF) laser based on a polarization-maintaining fiber Bragg grating (PM-FBG) is demonstrated experimentally. Feedback from the FBG results in the laser operating on two longitudinal modes that are separated in both wavelength and polarization. The birefringence induced by the FBG is beneficial to diversify the polarization states of different wavelength in the EDF and enhance the polarization hole burning (PHB) effect. This PHB greatly increased the inhomogeneous gain broadening of EDF and accordingly reduced the wavelength competition. Then, it was possible to achieve stable dual-wavelength oscillations at room temperature. On the other hand, through adjusting the state of the polarization controller (PC), the transmission characteristic of the FBG is changed. When the eigenaxe of one mode is more populated than the other, it will oscillate stably in that mode. Especially, when the eigenaxes of both modes are equally populated, the two modes can co-exist with equal amplitudes. Thus mode selection is achieved in laser oscillation and the laser can be designed to operate in wavelength switching modes, only by simple adjustment of the PC. Applying strain in line with the fast axis reduces the birefringence of the fiber grating and causes the wavelength separation of the two modes to be decreased. On the other hand, strain applied in line with the slow axis increases the birefringence and a concomitant increase in wavelength spacing is produced. Then, transverse strain loading on the FBG allows the wavelength spacing to be controlled and a tunable wavelength separation from 0.2 to 1.1 nm was demonstrated.

**Key words** laser technique; erbium-doped fiber laser; switchable; dual-wavelength lasing; fiber Bragg grating; polarization-maintaining fiber

收稿日期:2003-12-01;收到修改稿日期:2004-01-05

基金项目:国家自然科学基金重点基金(60137010)、天津自然科学基金(013601811)和南开大学个人启动基金资助项目。

作者简介:冯新焕(1974—),女,河北辛集人,南开大学现代光学研究所博士研究生,主要从事光纤激光器及放大器的研究工作。E-mail: xh\_feng@eyou.com

## 1 引 言

多波长掺铒光纤激光器(EDFL)在密集波分复用(DWDM)光纤通信系统、光纤传感以及光学仪器测量等许多方面有着重要应用<sup>[1~10]</sup>。其中波长间隔可调、可在波长之间转换即具有开关特性的多波长激光器则在许多方面有着独特用途。人们已提出多种方法在掺铒光纤激光器中实现可开关多波长激光振荡<sup>[1~8]</sup>。另一方面,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,已有多种不同光纤布拉格光栅插入激光腔内执行滤波功能<sup>[1~7,9]</sup>。一些学者也提出不同方法在掺铒光纤激光器中实现波长间隔可调的多波长激光振荡<sup>[11~13]</sup>,然而系统比较复杂,或需要液氮冷却以降低均匀加宽的宽度<sup>[9,11]</sup>,使其在室温下应用比较困难,且激光输出不具备开关特性。

本文提出了一种基于保偏光纤中光纤布拉格光栅的波长间隔可调的可开关双波长掺铒光纤激光器。和其他方法相比,具有结构简单、输出稳定、易于控制等优点。

## 2 实验装置及原理

实验装置如图 1 所示,线性谐振腔由一基于 3 dB 耦合器的 Sagnac 光纤环镜(SFLM),980 nm/1550 nm 波分复用(WDM)耦合器,一段掺铒光纤,一偏振控制器(PC),以及一位于应力调节架中的保偏光纤光栅(PM-FBG)构成。Sagnac 光纤环镜作信号光的宽带全反射镜。掺铒光纤作为放大介质,长约 15 m,掺杂浓度  $500 \times 10^{-6}$ ,由 980 nm 激光二极管(LD)进行抽运,抽运功率约 80 mW。偏振控制器用来连续调节腔内的双折射状态。保偏光纤光栅被置于两片有机玻璃中间,可通过拧紧一螺钉将侧向应力加在光栅上。为保所加应力为垂直方向的,另一段剥去包层的同样型号的裸纤平行于光栅置于

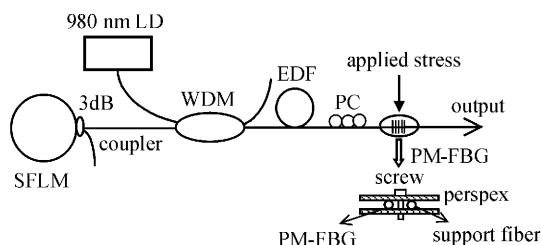


图 1 掺铒光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the proposed laser

螺钉另一侧。保偏光纤光栅两反射峰对应最大反射率均约 40%,光栅既用作选频器件,也用做输出耦合器,用最小分辨率 0.1 nm 的 Q8383 光谱仪观察激光输出的光谱特性。

利用保偏光纤制作光纤光栅时,由于保偏光纤的高双折射特性,光纤光栅会存在两个反射峰,这两个布拉格反射的波长间隔由以下两式来确定

$$L_B = \frac{\lambda}{n_{\text{eff}x} - n_{\text{eff}y}}, \quad (1)$$

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}, \quad (2)$$

其中  $L_B$  为保偏光纤的拍长, $\lambda$  为工作波长, $n_{\text{eff}x}$ ,  $n_{\text{eff}y}$  分别代表保偏光纤慢轴及快轴方向的有效折射率, $\Delta\lambda_B$  为光栅反射的两个布拉格波长之间的差异, $\Delta$  为光栅的周期。该激光器即利用了布拉格反射波长的不同来实现双波长振荡。这两个纵模不仅在波长上分开,而且在偏振态上是正交的<sup>[5]</sup>。

激光器波长间隔调谐原理如下:

由式(1),(2)可看出,当沿快轴方向施加应力时,会减小光纤的双折射,从而会使两模式之间的波长间隔减小。相反地,当沿慢轴方向施加应力时,会增加光纤的双折射,从而会使两模式之间的波长间隔增大。所以,通过改变加在光纤光栅上侧向应力的大小和方向,可有效控制双波长激光的波长间隔。

激光器波长开关原理<sup>[5]</sup>为:光纤光栅引入的双折射有助于分开掺铒光纤中不同波长的偏振状态,从而在均匀展宽的掺铒光纤中增强了偏振烧孔(PHB)效应。这种偏振烧孔效应大大增强了掺铒光纤的非均匀增益展宽,从而减小了不同模式之间的竞争。因此,可在室温下得到稳定的双波长振荡。另一方面,通过调整偏振控制器的状态,即改变腔内的双折射状态,光纤光栅的反射特性会发生变化,当一个模式所对应的增益粒子数比另一个多时,就会在相应波长处形成稳定的单波长振荡。特别是当两个模式对应的增益粒子数几乎相同时,两个模式会同时稳定振荡,且通过仔细调节偏振控制器的状态,可使两波长对应的振幅几乎相等。基于以上原理,可通过调整偏振控制器的状态使激光器工作在稳定的双波长状态或在两波长之间转换。

## 3 实验结果及讨论

实验中所用保偏光纤的拍长为 3.1 mm,所对应光栅反射的两正交偏振模式的波长间隔约为 0.52 nm。保偏光纤为熊猫光纤,在 12159 kPa 下进

行载氢 7 天,随后在其上用模板法写制光纤光栅。光纤光栅具有两个反射峰,分别位于 1556.66 nm 和 1557.18 nm 处,波长间隔 0.52 nm,反射率 40% 左右。图 2 给出了对光纤光栅不同方向施加不同大小应力时得到的几个典型谱图。当没有外加应力时,得到的激光输出光谱如图 2(a)所示,此时所对应的波长间隔为 0.52 nm,输出功率 1.62 mW。图

2(b)和(c)分别给出了应力沿快轴方向、螺钉旋转角度为 0.7 rad 以及应力沿慢轴方向、螺钉旋转角度为 0.3 rad 时的输出光谱图,所对应的波长间隔及输出功率分别为 0.2 nm,0.68 nm 和 1.86 mW,1.48 mW。值得一提的是,图 2(c)是 16 次重复扫描的结果,每次扫描间隔 30 s,由图可看出,室温下双波长输出的稳定性及振幅均衡性都很好。

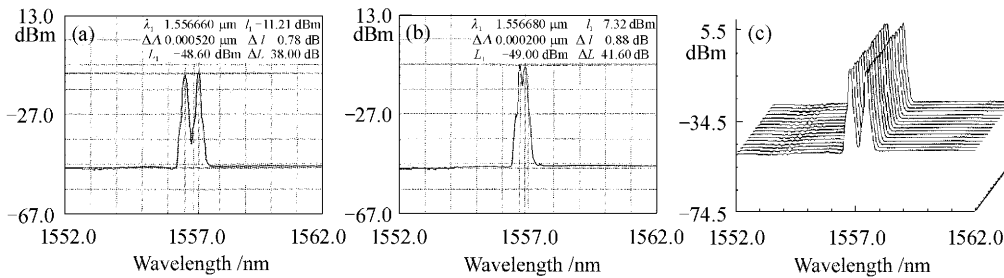


图 2 对光纤光栅不同方向施加不同大小应力时得到的典型谱图

(a) 0 rad; (b) 0.7 rad, 应力沿快轴方向; (c) 0.3 rad, 应力沿慢轴方向

Fig. 2 Measured spectra from the laser for various screwed angle

(a) 0 rad; (b) 0.7 rad, strain in line with the fast axis; (c) 0.3 rad, strain in line with the slow axis

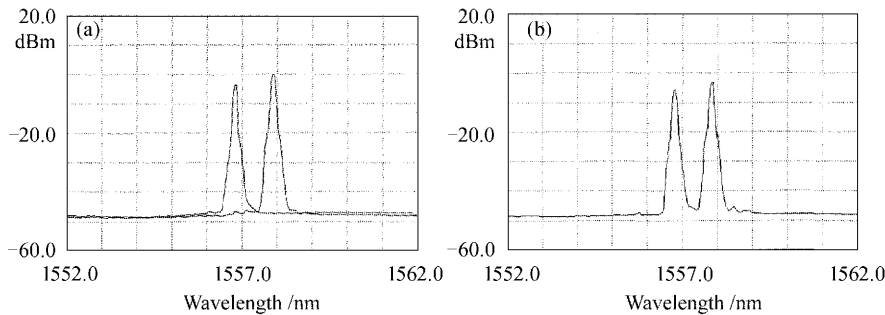


图 3 激光器工作于开关状态时典型的输出谱图

(a) 单波长运转(1556.78 nm,1557.88 nm);(b) 双波长运转

Fig. 3 Typical output spectra of the laser operating in switching mode when the strain is in line with the slow axis with a 1.0 rad screwed angle

(a) single-wavelength operation (1556.78 nm, 1557.88 nm); (b) dual-wavelength operation

通过调整偏振控制器的状态,激光输出可在两波长间转换,或工作于双波长状态。图 3 给出了应力沿慢轴方向、螺钉旋转角度为 1.0 rad 时输出光谱随偏振控制器状态变化的情况。图 3(a)所示为激光器单波长运转,激光波长分别为 1556.78 nm 和 1557.88 nm 的谱图,此时波长间隔 1.1 nm,所对应输出功率分别为 1.78 mW 和 1.95 mW。在施加同样外力的情况下对应的双波长输出谱如图 3(b)所示,对应输出功率为 2.13 mW。如上所述,每个状态均可通过仅仅调节偏振控制器的状态而得到。

图 4 给出了双波长输出时输出功率与波长间隔的关系。整体看来,功率随波长间隔的改变变化并

不太大,但仍可看出一点规律:距自然状态(光栅不受力,波长间隔 0.52 nm)较近时,功率起伏较小;光栅受力较大时,无论波长间隔变大或变小,输出功率都越来越大。这主要是光栅受力较大时,会由于受力的不均匀性而更容易产生一定的啁啾,啁啾的引入使光栅反射峰带宽加宽,反射率变小,在光栅同时作为输出耦合器的情况下,就会使输出耦合变大,从而使输出功率增加。光栅作为输出耦合器,用等强度梁或简支梁进行波长调谐时会存在相同的现象。

实验中得到的波长间隔调谐范围为 0.2~1.1 nm,受光谱仪分辨率的限制,间隔再小时不能非常确切地分辨,而且在应用上没有太大意义,而受光栅

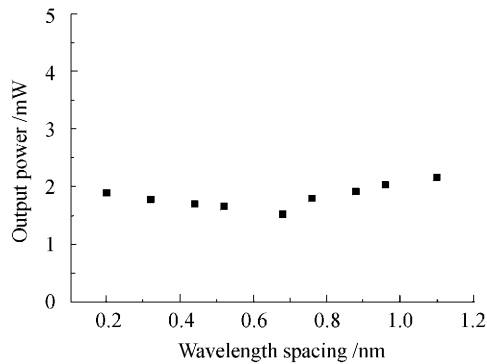


图 4 双波长输出时输出功率与波长间隔的关系

Fig. 4 Dependence of output power upon the wavelength spacing

强度的限制,波长间隔最大为 1.1 nm,受力再大时光栅会被压断。在整个实验过程中,室温下双波长输出极为稳定,这主要是因为偏振烧孔效应大大增强了掺铒光纤的非均匀增益展宽,从而减小了不同模式之间的竞争。扭曲光纤即改变腔内双折射状态会导致输出光谱特性的改变。当没有外界干扰时,输出状态比较稳定,这也从另一方面说明了这种激光器的工作原理。另外需要提出的一点是,可通过提高抽运功率来增加输出功率。在给定一种输出状态时,增加或减小抽运功率仅仅造成输出功率大小的变化,并不影响输出光谱的波长特性。

## 4 结 论

提出了一种基于保偏光纤中光纤布拉格光栅的波长间隔可调的可开关双波长掺铒光纤激光器。光纤光栅引入的双折射有助于分开掺铒光纤中不同波长的偏振状态,从而在均匀展宽的掺铒光纤中增强了偏振烧孔效应。这种偏振烧孔效应大大增强了掺铒光纤的非均匀增益展宽,从而减小了不同模式之间的竞争,可在室温下得到稳定的双波长振荡。另一方面,通过调整偏振控制器的状态,即改变腔内的双折射状态,光纤光栅的反射特性会发生变化,当一个模式所对应的增益粒子数比另一个多时,就会在此相应波长处形成稳定的单波长振荡。由此便形成了对激光振荡模式的选择,即通过调整偏振控制器的状态可使激光器工作在稳定的双波长状态或在两

波长之间转换。通过改变加在光纤光栅上侧向应力的大小和方向,就改变了保偏光纤光栅的双折射特性,从而可有效控制双波长激光的波长间隔,实验中得到了 0.2~1.1 nm 的可调间隔。和其他方法相比,具有结构简单、输出稳定、易于控制等优点。

## 参 考 文 献

- 1 Qinghe Mao, John W. Y. Lit. Switchable multiwavelength erbium-doped fiber laser with cascaded fiber grating cavities [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(5):612~614
- 2 Y. Z. Xu, H. Y. Tam, W. C. Du *et al.*. Tunable dual-wavelength-switching fiber grating laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(3):334~336
- 3 L. Talaverano, S. Abad, S. Jarabo *et al.*. Multiwavelength fiber laser sources with Bragg-grating sensor multiplexing capability [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(4):553~558
- 4 Yong Wook Lee, Byoung-ho Lee. Wavelength-switchable erbium-doped fiber ring laser using spectral polarization-dependent loss element [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(6):795~797
- 5 J. Hernandez-Cordero, V. A. Kozlov, A. L. G. Carter *et al.*. Fiber laser polarization tuning using a Bragg grating in a Hi-Bi fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(7):941~943
- 6 Bong-Ahn Yu, Jaejoong Kwon, Seunghwan Chuang *et al.*. Multiwavelength-switchable SOA-fibre ring laser using sampled Hi-Bi fibre grating [J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(8):649~650
- 7 Donghui Zhao, Kam Tai Chan, Y. Liu *et al.*. Wavelength-switched optical pulse generation in a fiber ring laser with a Fabry-Perot semiconductor modulator and a sampled fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(3):191~193
- 8 Junqiang Sun, Junlin Qiu, Dexiu Huang. Multiwavelength erbium-doped fiber lasers exploiting polarization hole burning [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **182**(8):193~197
- 9 Huang Dexiu, Shu Xuewen, Wen Tao *et al.*. Novel multi-wavelength erbium-doped fiber ring laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(4):313~316  
黄德修,舒学文,文韬等.一种新颖的多波长环形腔掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(4):313~316
- 10 Sun Junqiang, Liu Deming, Huang Dexiu *et al.*. Multiwavelength Er-doped fiber lasers with narrow linewidth [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(9):773~776  
孙军强,刘德明,黄德修等.窄线宽多波长掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(9):773~776
- 11 Raymond M. Sova, Chang-Seok Kim, Jin U. Kang. Tunable dual-wavelength all-PM fiber ring laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(3):287~289
- 12 S. Yamashita, T. Baba. Spacing-tunable multiwavelength fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(16):1015~1016
- 13 Jianliang Yang. Tunable multi-wavelength combined linear-cavity fiber laser source with equally changed wavelength spacing [J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, **34**(8):599~604