

# 百瓦级全光纤线偏振激光振荡器

黄 龙 史 尘 王 小 林\* 粟 荣 涛 周 朴

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

**摘要** 报道了一种全光纤结构的高消光比(PER)线偏振激光振荡器。该光纤激光振荡器的谐振腔由一段双包层掺镱保偏光纤和一对与增益光纤匹配的光栅组成。弯曲损耗使快轴方向上的偏振模和高阶模受到抑制,实现了消光比优于15 dB的线偏振激光输出。最高输出功率为93.2 W,中心波长为1080 nm,光谱半峰全宽(FWHM)约为1.2 nm。增加抽运功率有望进一步提升功率。

**关键词** 光纤光学; 光纤激光器; 线偏振; 光纤缠绕; 消光比

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0402005

## 100 W Level All-Fiber Linear-Polarization Laser Oscillator

Huang Long Shi Chen Wang Xiaolin Su Rongtao Zhou Pu

College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** An all-fiber linear-polarization laser oscillator of high polarization extinction ratio (PER) is reported. The resonant cavity of the oscillator consists of a Yb-doped polarization-maintaining fiber as well as a pair of FBGs matched with the gain fiber in size. The high-order mode and the polarization mode along the fast axis of the polarization-maintaining fiber is suppressed because of the bend loss, which leads to a linear-polarization laser with high PER of more than 15 dB. The oscillator operates at the center wavelength of 1080 nm with a full width at half maximum (FWHM) about 1.2 nm. The highest output power of 93.2 W is obtained. Increasing pump power may improve output power further.

**Key words** fiber optics; fiber laser; linear-polarization; fiber coiling; polarization extinction ratio

**OCIS codes** 060.2320; 060.2420; 140.3615

## 1 引 言

光纤激光器具有结构紧凑、效率高、光束质量好、稳定性好等优点。双包层大模场面积(LMA)光纤的出现,使高功率光纤激光器迅猛发展,目前已经实现了1~2 kW的近单模输出<sup>[1-4]</sup>。但已有文献报道的大都是随机偏振输出。然而在某些场合,如二次谐波产生(SHG)、光学参量振荡(OPO)等<sup>[5-6]</sup>,对激光的偏振态有较高的要求。迄今为止,有关高功率线偏输出的文献较少。

目前,产生线偏振激光的光纤激光振荡器大致可以分为两类。一类是空间结构的线偏振光纤激光振荡器<sup>[7-9]</sup>,另一类是全光纤结构的线偏振光纤激光振荡器。空间结构的线偏振激光振荡器存在结构复杂、稳定性差、易产生端面损伤等不足,全光纤结构的线偏振激光器有效克服了这些缺点。全光纤结构的线偏振激光振荡器目前有两种实现方式。一种是使两个保偏光栅正交熔接,使其中一对快慢轴的反射峰重叠,另一对快慢轴的反射峰错位,保证仅有一个偏振模振荡<sup>[10-13]</sup>。研究人员相继实现了百毫瓦量级<sup>[10]</sup>到百瓦量级<sup>[13]</sup>的输出,但这种方法要求光栅的参数匹配并且需要严格控制温度对光栅特性的影响。另一种方式是通过弯曲

收稿日期: 2014-10-30; 收到修改稿日期: 2014-12-15

基金项目: 湖南省自然科学基金(14JJ3004), 湖南省教育厅科学研究项目(YB2013B003)

作者简介: 黄 龙(1990—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: longhuang09@163.com

导师简介: 周 朴(1984—),男,博士,研究员,主要从事光纤激光器与光束相干合成等方面的研究。

E-mail: zhoupu203@163.com

\* 通信联系人。E-mail: chinawxllin@163.com

增益光纤抑制高阶模和其中一个偏振模,使激光振荡器实现线偏振单模输出。2014年,德国的 Steffen Belke 等<sup>[14]</sup>利用纤芯直径为 20  $\mu\text{m}$  的大模场保偏掺镱光纤实现了 1 kW 的单模线偏振激光输出。

本文基于弯曲损耗抑制高阶模和快轴偏振模的原理,搭建了一台全光纤结构的线偏振光纤激光振荡器,获得了消光比优于 15 dB 的激光输出,最高输出功率为 93.2 W,为获得高功率线偏振光纤激光提供了一种思路。

## 2 实验原理

基于弯曲损耗的线偏振激光振荡器的实验结构如图 1 所示。整个实验系统采用全光纤保偏结构,由两个波长为 976 nm 的带尾纤半导体激光二极管(LD)抽运。高反光栅(HR FBG)的反射中心波长为 1080.08 nm,反射率为 99.7%,3 dB 带宽为 3.2 nm。输出耦合光栅(OC FBG)的反射中心波长为 1080.04 nm,反射率为 9.4%,3 dB 带宽为 1.3 nm。熔接时采取平行熔接方式,慢轴对慢轴,快轴对快轴。增益光纤采用内包层直径为 15  $\mu\text{m}$ ,外包层直径为 130  $\mu\text{m}$  的掺镱熊猫型保偏光纤,长度为 6 m。高反光栅、输出耦合光栅和增益光纤一起构成该振荡器的谐振腔。输出耦合光栅后熔接了 1 m 长的传能光纤,并在熔接处做了包层光滤除处理,用于滤除没有吸收完全的抽运光和包层信号光。合束器的信号臂与振荡器输出端切成 8° 斜角,以避免反射回光进入振荡器。合束器、高反光栅、输出耦合光栅以及传能光纤都采用熊猫型保偏光纤,且内外包层直径均与增益光纤匹配。

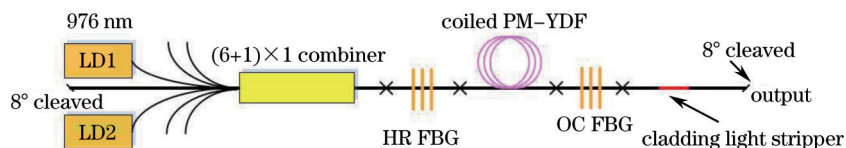


图 1 实验原理图

Fig.1 Experimental scheme

在增益光纤中,快轴方向上偏振模的有效折射率比慢轴方向上偏振模的有效折射率低,所以快轴方向的偏振模对弯曲更加敏感。在弯曲半径相同的情况下,快轴方向的偏振模比慢轴方向的偏振模具有更高的弯曲损耗。此外,高阶模的损耗比低阶模的弯曲损耗大。实验所用光纤的参数为  $NA=0.08$ ,  $\Delta B=2 \times 10^{-4}$ 。图 2 是计算得到的实验所用光纤中  $LP_{01}$  模和  $LP_{11}$  模的弯曲损耗曲线图。从图中可以看出,通过缠绕增益光纤可以抑制或者减小高阶模和  $LP_{01}$  模快轴方向的偏振模,而保持  $LP_{01}$  模慢轴方向的偏振模的强度优势,使振荡器输出高消光比的单模线偏光。

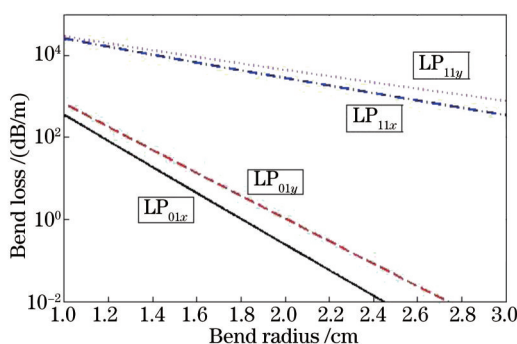


图 2 实验所用光纤中  $LP_{01}$  模和  $LP_{11}$  模的损耗曲线图

Fig.2 Bend loss of  $LP_{01}$  mode and  $LP_{11}$  mode for fiber used in experiment

## 3 实验结果与分析

实验测试了不同抽运功率时输出激光的功率、消光比和光谱特性。图 3(a) 是不同抽运功率下的输出功率和光光转换效率。从图中可以看出,输出功率随抽运功率的提高呈线性增长,光光转换效率稳定。在最大抽运功率为 182.1 W 时,振荡器输出功率为 93.2 W,光光转换效率为 51.2%。实验得到的激光效率较一般振荡器的光光转换效率稍低,主要原因在于光纤弯曲本身会导致一定程度的损耗,使得振荡器效率偏低,这

是由本方案自身特点决定的。目前,输出功率的提升主要受到抽运功率的限制。

图 3(b)是消光比随不同输出功率变化的曲线。从图中可以看出,输出激光的消光比始终优于 15.3 dB,最高达到 19.2 dB,随着功率提升,消光比趋于稳定。由于快轴方向偏振模的输出功率存在一定程度上的不稳定,消光比存在一定程度的不稳定现象。造成这种情况的原因在于实验中未缠绕的光纤受到外界扰动(比如实验室水冷机振动、风机导致光纤抖动等),导致快轴方向偏振模的损耗存在一定的随机起伏,从而引起输出功率的随机起伏。对输出激光消光比不稳定的问题,可以通过改善实验条件和改进缠绕工艺实现高稳定的消光比输出。

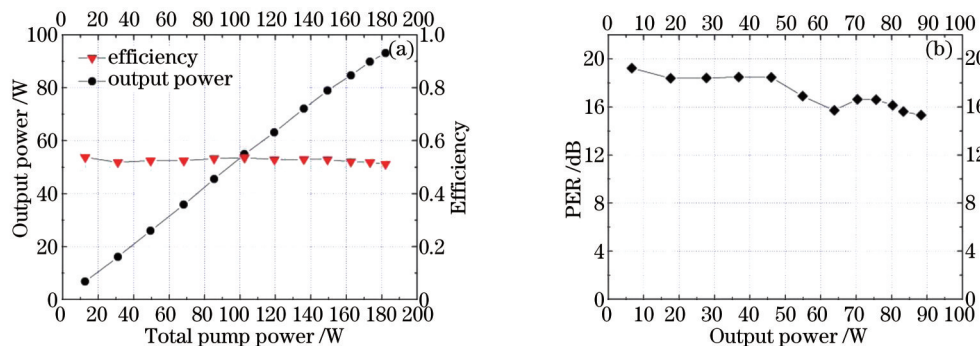


图 3 (a) 输出功率随抽运功率的变化; (b) 消光比随输出功率的变化

Fig.3 (a) Output power with different pump power; (b) PER of different output power

图 4(a)是最高输出功率下的输出光谱。从图中可以看出,输出激光中不存在任何抽运光和自发辐射(ASE),光谱的半峰全宽(FWHM)约为 1.2 nm。图 4(b)是最高输出功率下的时域图像,从图中可以看出,输出激光是稳定的连续输出,没有脉冲出现。

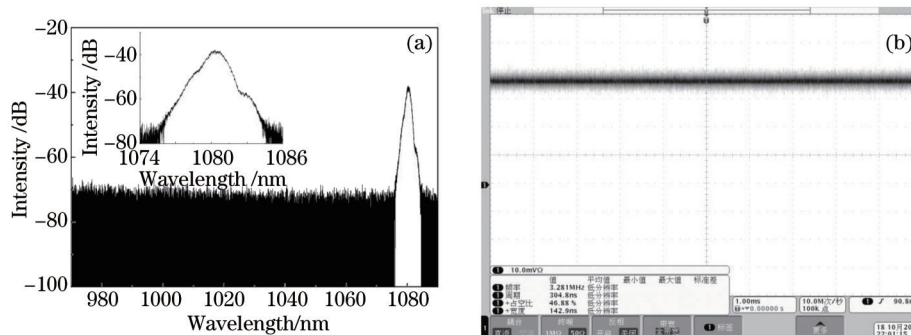


图 4 (a) 最高输出功率下的输出光谱; (b) 最高输出功率下的时域图像

Fig.4 (a) Output spectra of maximum output power; (b) time-domain figure of maximum output power

计算增益光纤的归一化频率:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA = \frac{2\pi \times (15/2) \times 1000}{1080} \times 0.08 = 3.491,$$

式中  $a=(15/2) \mu\text{m}$  是增益光纤纤芯直径,  $\lambda=1080 \text{ nm}$  是振荡器工作中心波长,  $NA=0.08$  是增益光纤数值孔径。根据归一化频率与光纤导模数目的关系可知,当  $2.405 < V < 3.832$  时,增益光纤支持  $LP_{01}$  模和  $LP_{11}$  模两个模式,计算结果  $V=3.491$  满足条件。但由于弯曲损耗,  $LP_{11}$  模和  $LP_{01}$  模快轴方向的偏振模被抑制掉,所以振荡器

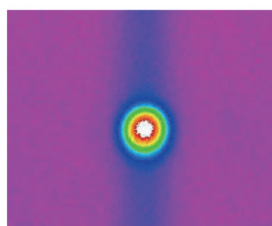


图 5 最高输出功率下的光斑形状

Fig.5 Shape of light spot of maximum output power

输出的是LP<sub>01</sub>模慢轴方向的线偏光。通过测量输出激光的光斑形状,证明了该激光器输出的是稳定的单横模激光。输出激光的光斑形状如图5所示。

## 4 结 论

搭建了一台基于弯曲损耗抑制高阶模和快轴偏振模的全光纤结构的高消光比线偏振激光振荡器。在最高抽运功率为182.1 W时,输出激光功率为92.3 W,半峰全宽约为1.2 nm,消光比优于15 dB。目前功率提升主要受到抽运功率的限制。这种激光振荡器为获得线偏振激光提供了一种简单、稳定的实现方案。

## 参 考 文 献

- 1 Duan Kailiang, Zhao Baoyin, Zhao Wei, *et al.*. 1000 W all-fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2009, 12: 3219.  
段开棕, 赵保银, 赵 卫, 等. 1000 W 全光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, 12: 3219.
- 2 Yan Ping, Xiao Qirong, Fu Chen, *et al.*. 1.6 kW all-fiber Yb-doped laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 218.  
闫 平, 肖起榕, 付 晨, 等. 1.6 kW 全光纤掺镱激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 218.
- 3 Liu Zejin, Leng Jinyong, Guo Shaofeng, *et al.*. All-fiber 2 kW nearly single transverse mode fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 9: 0908003.  
刘泽金, 冷进勇, 郭少锋, 等. 全光纤结构2 kW 准单模光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 9: 0908003.
- 4 Dai Shoujun, He Bing, Zhou Jun, *et al.*. 1.5 kW nearly single transverse mode all-fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0702001.  
代守军, 何 兵, 周 军, 等. 1.5 kW 近单模全光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702001.
- 5 Shirakawa A, Hiwada K, Hasegawa S, *et al.*. All-fiber linearly-polarized Yb-doped fiber laser yielding 2.2-W green second harmonics[C]. CLEO/Pacific Rim, 2005. 410-411.
- 6 Khitrov V, Samson B, Manyam U, *et al.*. Linearly polarized high-power fiber lasers with monolithic PM-LMA-fiber and LMA-grating based cavities and their use for nonlinear wavelength conversion[C]. SPIE, 2005, 5709: 53-58.
- 7 Manyam U H, Samson B, Khitrov V, *et al.*. Laser fibers designed for single polarization output[C]. ASSP, 2004. MA6.
- 8 Wikszak E, Thomas J, Klingebiel S, *et al.*. Linearly polarized ytterbium fiber laser based on intracore femtosecond-written fiber Bragg gratings[J]. Optics Letters, 2007, 32(18): 2756-2758.
- 9 Geiger J, Fitzau O, Zintzen B, *et al.*. Single-mode, highly polarized Yb-doped fiber laser with 850 W output power[C]. ASSP, 2008. WA7.
- 10 Mo S, Xu S, Huang X, *et al.*. A 1014 nm linearly polarized low noise narrow-linewidth single-frequency fiber laser[J]. Optics Express, 2013, 21(10): 12419-12423.
- 11 Willis C C C, Mckee E, Bwetter P, *et al.*. Highly polarized all-fiber thulium laser with femtosecond-laser-written fiber Bragg gratings[J]. Optics Express, 2013, 21(9): 10467-10474.
- 12 El-Damak A R, Jianhua C, Jian S, *et al.*. Dual-wavelength, linearly polarized all-fiber laser with high extinction ratio[J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(4): 1501406.
- 13 Wang J, Hu J, Zhang L, *et al.*. A 100 W all-fiber linearly-polarized Yb-doped single-mode fiber laser at 1120 nm[J]. Optics Express, 2012, 20(27): 28373-28378.
- 14 Belke S, Becker F, Neumann B, *et al.*. Completely monolithic linearly polarized high-power fiber laser oscillator[C]. SPIE, 2014, 8961: 896124.

栏目编辑: 胡 冰