

基于光纤环形镜的掺磷光纤拉曼激光器

刘鹏 黄朝红 漆伟 罗正钱 许惠英 蔡志平

(厦门大学电子工程系, 厦门 福建 361005)

摘要 报道了一种由宽带光纤环形镜(FLM)作为腔反射元件的法布里-珀罗腔掺磷光纤拉曼激光器(RFL),并与使用窄带光纤布拉格光栅(FBG)作为高反镜的腔结构进行了对比研究。研究表明,使用宽带 FLM 替代 FBG 仍可实现掺磷 RFL 的窄带激光输出,并且可有效避免拉曼激光从高反镜端的泄漏。在相同的输出镜反射率情况下,使用 FLM 作为高反镜比使用 FBG 作为高反镜具有更低的振荡阈值和更高的光-光转换效率。当抽运功率为 9.45 W 时,拉曼激光(1.24 μm)输出功率为 4.31 W,激光器斜效率和光-光转换效率分别为 57.9% 和 45.6%。

关键词 激光器;掺磷光纤拉曼激光器;光纤环形镜;光纤布拉格光栅;光泄漏

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0202005

Phosphosilicate Fiber Raman Laser Based on Fiber Loop Mirror

Liu Peng Huang Chaohong Qi Wei Luo Zhengqian Xu Huiying Cai Zhiping

(Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract A phosphosilicate Raman fiber laser (RFL) with Fabry-Perot cavity consisting of a pair of wide-band fiber loop mirrors (FLM) is proposed. A narrow-band fiber Bragg gratings (FBG) is used as a highly-reflective mirror in the same experimental configuration. The results show that the adoption of phosphosilicate RFL with FLM as a highly-reflective mirror instead of FBG can obtain laser output with narrow bandwidth and decrease the optical leakage from the highly-reflective mirror effectively. With the same output mirror, the laser using FLM as its highly-reflective mirror demonstrates a lower threshold and higher conversion efficiency than the one using FBG as the highly-reflective mirror. The output power of the laser at 1.24 μm is up to 4.31 W while the incident pump power is 9.45 W, the slope efficiency is 57.9% and optical-optical conversion efficiency is 45.6%.

Key words lasers; phosphosilicate Raman fiber laser; fiber loop mirror; fiber Bragg gratings; optical leakage

OCIS codes 140.3410; 140.3550; 140.3510

1 引言

自从 Dianov 等^[1]利用掺磷光纤实现一级和二级拉曼激光输出以来,掺磷光纤拉曼激光器(RFL)以其转换效率高、任意波长激射、多波长输出、光纤兼容性好和设计灵活等优点获得了迅速发展并在光通信、光传感和医疗等诸多领域获得了广泛的应用^[2~8]。光纤布拉格光栅(FBG)由于插入损耗低和良好的波长选择性,被广泛用作掺磷 RFL 谐振腔反馈元件和波长选择元件^[1~3]。然而由于拉曼谐振腔

内的强非线性光学过程特别是四波混频效应导致斯托克斯激光存在明显的频谱展宽现象^[9,10],而常规 FBG 反射带宽较窄(通常小于 1 nm)^[11],导致部分拉曼激光从高反 FBG 端泄漏,这使得掺磷 RFL 转换效率的提高受到限制^[12~14]。使用宽带啁啾 FBG 可降低拉曼激光的泄漏,但也存在包层模损耗和成本高等缺点^[15,16]。另外光纤环形镜(FLM)作为一种具有宽带反射特性的全光纤器件^[17,18],具有损耗低、制作容易和成本低等优势。本文对全部由 FLM

收稿日期: 2011-08-29; 收到修改稿日期: 2011-11-02

基金项目: 福建省青年科技创新基金(2007F3100)资助课题。

作者简介: 刘鹏(1985—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器及其应用等方面的研究。

E-mail: pengliuxmu@163.com

导师简介: 黄朝红(1974—),男,副教授,硕士生导师,主要从事固体激光器和光纤激光器等方面的研究。

E-mail: hch@xmu.edu.cn(通信联系人)

作为腔反馈元件的掺磷 RFL 进行了实验研究。实验结果表明,尽管 FLM 的波长选择性差,但由于掺磷光纤的 1330 cm^{-1} 拉曼频移峰较其他频移峰强且带宽窄,仍然可获得窄带的拉曼激光输出。与使用窄带 FBG 作为谐振腔高反镜的情况进行对比实验表明,FLM 作为高反腔镜可有效避免拉曼激光的泄漏问题,从而降低激光阈值并提高激光效率。

2 实验原理与装置

RFL 是基于抽运光在拉曼增益光纤中的受激拉曼散射过程产生新波长激光输出的器件。对掺磷光纤,其拉曼增益主峰位于 1330 cm^{-1} 。通常的掺磷 RFL 采用一对或两对 FBG 作为腔镜实现一级或二级拉曼激光输出。通过对掺磷光纤的拉曼增益谱^[1]的仔细分析可以发现, 1330 cm^{-1} 频移处的增益峰明显强于其他拉曼增益峰,且其带宽较窄。基于掺磷光纤增益谱的这种特点,设计了一种由宽带 FLM 作为腔反射元件的法布里-珀罗(F-P)腔掺磷 RFL。激光器的结构如图 1(a)所示。相对于通常由一对 FBG 构成的 F-P 腔,图 1(a)采用一对 FLM 替代 FBG 作为谐振腔反射镜。众所周知,通过将光纤定向耦合器的两输出端熔接起来可构成 FLM,在线性近似下其反射率 R 可由耦合器的分光比 α 来计算^[18]:

$$R = 4\alpha(1 - \alpha), \quad (1)$$

当 α 为不同值时,可得到不同反射率的反射镜。与 FBG 的窄带反射特性不同,FLM 的反射带宽可达几十纳米。图 1(a)中左端的 FLM 0 对一级拉曼光为全反镜($\alpha=0.5$)。右端 FLM 为 $\alpha \neq 0.5$ 的部分反射镜。为显示 FLM 作为谐振腔高反射镜的优势,将图 1(a)中的 FLM 0 换成窄带 FBG 进行了对比实验,如图 1(b)所示。

实验使用的掺磷光纤由电子科技集团第四十六研究所控制,其在 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.24\text{ }\mu\text{m}$ 波长处的损耗分别为 3.04 dB/km 和 1.93 dB/km 。在 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 激光抽运下, 1330 cm^{-1} 频移峰的峰值增益系数为 $1.31 \times 10^{-3}/(\text{W} \cdot \text{m})$ 。实验所采用的抽运源为 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 掺镱双包层光纤激光器,最大输出功率为 20 W 。为避免光纤反射镜对抽运光的反射,抽运光通过一个 $1.24/1.06\text{ }\mu\text{m}$ 的波分复用器(WDM)耦合到谐振腔内。由于实验采用的掺磷光纤较短(300 m),为充分利用抽运光,在掺磷光纤后面接入对 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 光有高反射率的 FBG 形成双程抽运结构。在抽运光耦合到腔内之前通过一个 1:99 的光

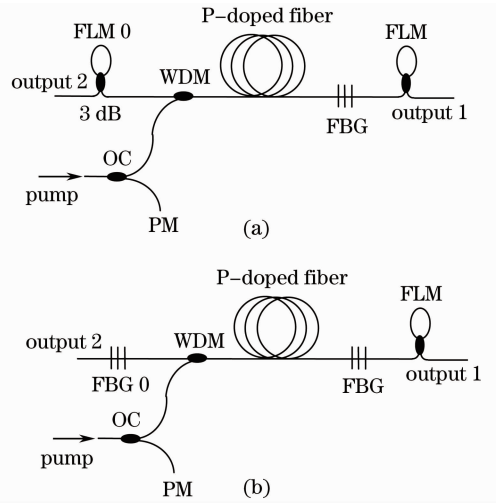


图 1 掺磷 RFL 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of phosphosilicate RFL

纤耦合器进行功率监测。为了准确地测量激光阈值和输入输出关系,对 1:99 的耦合器在实验抽运功率范围内进行了分光比标定,通过拟合可得耦合器的实际分光比为 1.5:98.5。

3 结果与讨论

分别测试了反射率为 5.8%, 11%, 15%, 26% 和 36% 的 5 种 FLM 用作激光输出镜的情形。结果表明在实验所使用的抽运范围内(小于 9.45 W),只观测到 1330 cm^{-1} 频移峰引起的一级拉曼激光。当抽运功率超过 6 W 时,使用上述几种输出镜情况下的斯托克斯激光的功率都比剩余抽运功率大 15 dB 以上。图 2 是由高反射率 FLM 和反射率为 11% 的 FLM 构成谐振腔时的典型输出光谱(抽运功率为 6 W)。对波长 $1.24\text{ }\mu\text{m}$ 附近输出谱的精确测量(分辨率为 0.01 nm)表明以 FLM 作为高反镜时的输出谱只是比 FBG 作为高反镜时的输出谱稍宽,且两者的峰值波长略有差异。图 3 为典型 $1.24\text{ }\mu\text{m}$ 波长处的激光输出谱(输出镜反射率为 15%、抽运功率为 8 W)。由图可见 FBG 作高反镜情况下的中心波长和带宽分别为 1239.66 nm 和 0.5 nm ,这与所使用的 FBG 光谱参数基本一致。而在宽带 FLM 作高反镜情况下,振荡的中心波长和带宽主要取决于掺磷光纤拉曼增益谱,可以看到斯托克斯光的中心波长与 FBG 作高反镜时略有不同(约为 1239.34 nm),且带宽略宽一些(约宽 1 nm),但仍然是比较理想的窄带激光输出。

图 4 为由光谱仪观测到的使用不同反射率输出镜情况下的激光振荡阈值。可以看到激光振荡阈值

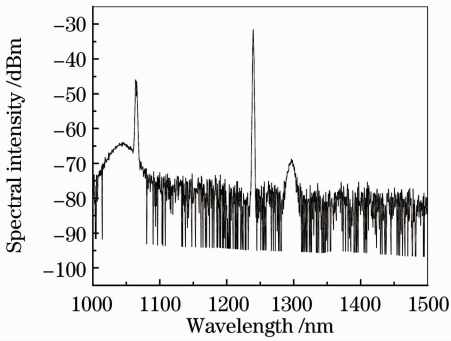


图 2 抽运功率为 6 W 时的典型输出光谱
Fig. 2 Output spectrum with 6 W pump power

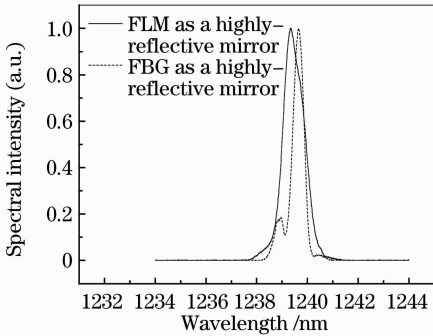


图 3 输出镜反射率和抽运功率分别为 15% 和 8 W 时激光器的典型输出光谱

Fig. 3 Typical output spectrum with 15% reflectivity of output mirror and 8 W pump power

随输出镜反射率增加而降低,这与理论估计一致。然而,在使用反射率相同的输出镜的情况下,使用 FLM 作为高反镜时的振荡阈值要明显低于 FBG 作为高反镜的情形。图 5 为输出镜反射率为 15% 时的激光器输入输出关系,可以看出使用 FLM 作为高反镜比使用 FBG 作为高反镜具有更高的斜效率和转换效率。对使用 FLM 和 FBG 作为高反镜的情形,通过计算可得激光器的斜效率分别约为 57.9% 和 51.6%。在最大抽运功率(9.45 W)下,两

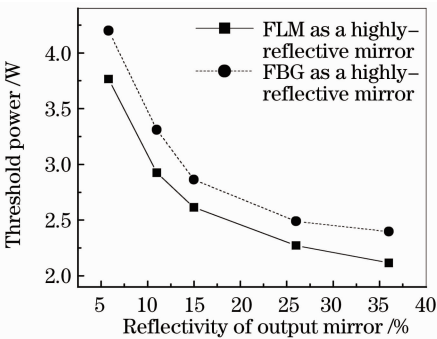


图 4 使用不同反射率输出镜情况下的激光振荡阈值
Fig. 4 Laser threshold with different reflectivities of output mirrors

者的转换效率分别为 45.6% 和 38.8%,输出功率分别为 4.31 W 和 3.67 W。

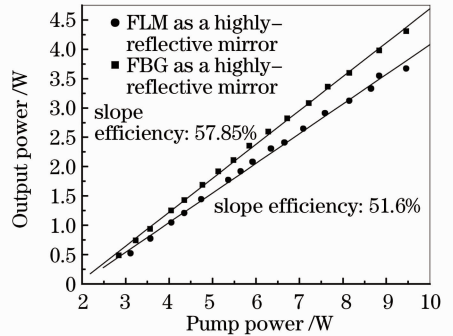


图 5 输出镜反射率为 15% 时激光输出功率与抽运功率的关系

Fig. 5 Laser output power versus pump power with 15% reflectivity of output mirror

通过对高反射镜端(图 1 中 output 2)的泄漏功率进行测量可以发现,使用 FLM 作为高反镜时的效率更高,这主要因为腔内斯托克斯功率几乎不从高反端泄漏。在使用 FLM 作为高反镜的情况下,高反端的泄漏功率始终为几十毫瓦的量级。而在使用 FBG 作为高反镜时,存在明显的光泄漏,如图 6 所示。可看到此时的泄漏光功率随抽运功率的增加而迅速增加,并且输出反射率越高,腔内反向传播的斯托克斯激光越强,光泄漏也越显著。因此使用宽带 FLM 作为高反镜可有效避免光泄漏,提高激光器光-光转换效率,特别是在输出镜反射率较高的情况下。

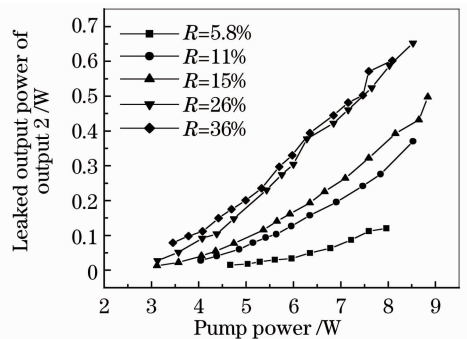


图 6 使用 FBG 作为高反镜情况下端口 2 泄漏的光功率同抽运功率的关系

Fig. 6 Leaked output power of output 2 versus pump power when FBG is adopted as a highly reflective mirror

4 结 论

研究了使用一对 FLM 作为腔反馈元件的国产掺磷 RFL,并与使用窄带 FBG 作为谐振腔高反镜的同种结构激光器进行了对比,对两者的振荡阈值、

光光转换效率、斜效率、输出线宽和光泄漏等参数进行了详细测量。实验结果表明对掺磷光纤的 1330 cm^{-1} 频移峰,使用 FLM 作为腔反馈元件时仍然能实现窄带(约 1 nm)的斯托克斯激光输出。相比通常以使用 FBG 作为高反镜的 F-P 腔,使用宽带 FLM 作为高反镜可有效避免腔内激光的泄漏,降低激光器振荡阈值和提高光-光转换效率。实验在抽运功率 9.45 W 下获得了 4.31 W 的 $1.24\text{ }\mu\text{m}$ 一级拉曼激光输出,光-光转换效率达到 45.6% 。目前国内的 FBG 生产水平相比国外还有一定的差距,对于一些特殊波长的 FBG 还需要从国外购买,不仅费用昂贵,而且周期较长。所以,使用 FLM 代替 FBG 不但可以提高转换效率,而且经济、制作简单,这对 RFL 的设计和具有很大的帮助。

参 考 文 献

- 1 E. M. Dianov, M. V. Grekov, I. A. Bufetov *et al.*. CW high power $1.24\text{ }\mu\text{m}$ and $1.48\text{ }\mu\text{m}$ Raman lasers based on low loss phosphosilicate fibre [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(18): 1542~1544
- 2 E. M. Dianov, I. A. Bufetov, M. M. Bubnov *et al.*. Three-cascaded 1407-nm Raman laser based on phosphorus-doped silica fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(6): 402~404
- 3 Qin Zujun, Zhou Xiaojun, Wu Haocheng. Experimental investigation on multiwavelength Raman fiber laser at 1550 nm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(s1): s100207
秦祖军, 周晓军, 伍浩成. 1550 nm 波段多波长拉曼光纤激光器实验研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(s1): s100207
- 4 E. Bélanger, M. Bernier, D. Faucher *et al.*. High-power and widely tunable all-fiber Raman laser[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(12): 1696~1701
- 5 P. C. Peng, H. Y. Tseng, S. Chi. Long-distance FBG sensor system using a linear-cavity fiber Raman laser scheme[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2): 575~577
- 6 F. Anquez, E. Courtade, A. Sivery *et al.*. A high-power tunable Raman fiber ring laser for the investigation of singlet oxygen production from direct laser excitation around 1270 nm [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(22): 22928~22936
- 7 M. Feng, Y. Li, J. Li *et al.*. High power one- and two-order cascades Raman lasers based on home-made phosphosilicate fibre [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(5): 1137~1139
- 8 Yang Xiaotao, Wang Ying, Zhang Minming. Numerical modeling and experiment of P-doped Raman fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(5): 45~47
杨晓涛, 王 英, 张敏明. 掺磷光纤拉曼激光器数值模型和实验 [J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **41**(5): 45~47
- 9 S. A. Babin, D. V. Churkin, A. E. Ismagulov *et al.*. Spectral broadening in Raman fiber lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(20): 3007~3009
- 10 S. A. Babin, D. V. Churkin, A. E. Ismagulov *et al.*. Four-wave-mixing-induced turbulent spectral broadening in a long Raman fiber laser[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(8): 1729~1738
- 11 Jiang Weiwei, Zhao Ruifeng, Wei Yan *et al.*. Spectral characteristics of Bragg fiber grating based on fused taper fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2565~2569
江微微, 赵瑞峰, 卫 延等. 基于熔融拉锥光纤布拉格光栅的光谱特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2565~2569
- 12 Y. Feng, L. R. Taylor, D. Bonaccini Calia. 150 W highly-efficient Raman fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(26): 23678~23683
- 13 I. A. Bufetov, M. M. Bubnov, Y. V. Larionov *et al.*. Highly efficient one- and two-cascade Raman lasers based on phosphosilicate fibers[J]. *Laser Physics*, 2003, **13**(2): 234~239
- 14 Huang Chaohong, Wei Dong, Lin Jiali *et al.*. High power $1.48\text{ }\mu\text{m}$ home-made phosphosilicate fiber cascaded Raman laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s2): 33~36
黄朝红, 魏 栋, 林佳丽等. 高功率 $1.48\text{ }\mu\text{m}$ 国产掺磷光纤级联拉曼激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s2): 33~36
- 15 R. Vallée, E. Bélanger, B. Déry *et al.*. Highly efficient and high-kpower Raman fiber laser based on broadband chirped fiber Bragg gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 5039~5043
- 16 Fan Hongjian, Zhang Weigang, Yan Aidong *et al.*. Spectrum analysis for non-uniform ultra-long-period fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1547~1552
范弘建, 张伟刚, 颜爱东等. 非均匀超长周期光纤光栅的频谱分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1547~1552
- 17 N. J. Doran, D. Wood. Nonlinear-optical loop mirror[J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(1): 56~58
- 18 David B. Mortmore. Fiber loop reflector [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(7): 1217~1224

栏目编辑:宋梅梅