

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0033-04

高功率 1.48 μm 国产掺磷光纤级联拉曼激光器

黄朝红 魏 栋 林佳丽 王晓忠 黄文财 许惠英 蔡志平

(厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005)

摘要 使用 20 W/1.06 μm 掺镱双包层光纤激光器作为抽运源, 抽运由 300 m 国产掺磷光纤和光纤光栅构成的级联拉曼谐振腔, 进行了高功率 1.48 μm 级联拉曼光纤激光器的实验研究。实验研究了不同反射率的输出光纤光栅对拉曼激光阈值和激光效率的影响。结果表明激光阈值随输出光纤光栅反射率的增加而减小。当使用 25.7% 的输出光纤光栅时, 激光器具有最大的转换效率, 在入腔抽运功率为 12.1 W 时, 获得了最大 2.8 W/1.48 μm 连续波激光输出, 相应的激光斜率效率和转换效率分别为 31.3% 和 23.1%。通过监测 1.48 μm 激光的最大输出功率, 2 h 内的功率波动小于 5%。

关键词 激光器; 拉曼激光器; 国产掺磷光纤; 高功率; 掺镱双包层光纤激光器

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0033

High Power 1.48 μm Home-Made Phosphosilicate Fiber Cascaded Raman Laser

Huang Chaohong Wei Dong Lin Jiali Wang Xiaozhong

Huang Wencai Xu Huiying Cai Zhiping

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

Abstract A high power home-made phosphosilicate fiber cascaded Raman laser pumped by 20 W/1.06 μm Yb-doped double-clad fiber laser is reported. The effect of reflectivity of output couplers on the laser threshold and efficiency are investigated experimentally. The laser threshold decreases with increasing the reflectivity of output FBG. The maximum continuous-wave output power of 2.8 W is obtained by 25.7% output coupler while the launched pump power is 12.1 W. The corresponding slope efficiency and the conversion efficiency are about 31.3% and 23.1%, respectively. At the maximum output power, the power fluctuation at 1.48 μm in two hour is observed to be less than 5%.

Key words lasers; Raman laser; home-made phosphosilicate fiber; high power; Yb-doped double-clad fiber laser

1 引 言

自从 1997 年俄罗斯 E. M. Dianov 等^[1]首次利用掺磷光纤实现约 1 W/1484 nm 二级级联拉曼激光输出以来, 以掺磷光纤为增益介质的拉曼光纤激光器(RFL)日益受到人们的重视。特别是随着近年来高功率掺镱双包层光纤激光器(Yb-DCFL)、低损耗掺磷光纤和高反射率光纤光栅(FBG)技术的进步, 使掺磷拉曼光纤激光器获得了长足的发展^[2~5]。同掺锗光纤(拉曼频移约为 440 cm^{-1})相比, 掺磷光纤的主要优点是具有更大的拉曼频移(约 1330 cm^{-1}), 在相同波长激光的抽运下仅需更少级次级联就可获

得所需波长的激光输出, 激光器结构相对简单, 激光转换效率更高。掺磷光纤的另一个优点是使用成熟的 1 μm 钕离子或镱离子激光抽运, 通过联合利用 1330 cm^{-1} 和 440 cm^{-1} 的拉曼频移, 可在整个通信波段实现单波长和多波长激光输出^[6~8]。由于具有全光纤结构和设计灵活的优点, 拉曼光纤激光器已成为光通信、光传感等领域的重要相干光源。目前国际上主要有俄罗斯科学院光纤研究中心(FORC)能提供高增益和低损耗的掺磷光纤, 国内制造掺磷光纤的单位主要有电子科技集团第四十六研究所。相对国外产掺磷光纤, 国产掺磷光纤的光学质量仍

基金项目: 福建省科技重点基金(2002F011)和青年科技创新基金(2007F3100)资助项目。

作者简介: 黄朝红(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光和光电子器件方面的研究。E-mail: hch@xmu.edu.cn

存在一定的差距。2005年,南开大学冯鸣等^[9]使用1 km 国产掺磷光纤,实现了最大输出功率为2 W的1495 nm 二级拉曼激光输出。然而,由于掺磷光纤相对高的光学损耗和较低的拉曼增益以及腔参数未被优化,激光斜率效率(23.5%)和转换效率(15.9%)均较低,同时激光器阈值也较高(4.33 W)。本文使用损耗较低的国产掺磷光纤,采用优化的光纤长度和腔反射率,研究了掺磷光纤的级联拉曼输出特性,获得了2.8 W 连续波1.48 μm 激光输出,激光斜率效率和转换效率分别为31.3%和23.1%。

2 实 验

图1是掺磷光纤级联拉曼激光器的实验装置示意图。拉曼增益光纤由电子科技集团第四十六研究所控制。光纤在1060 nm,1240 nm 和1480 nm 的损耗系数分别为3.04 dB/km,1.93 dB/km 和1.95 dB/km。FBG1 和FBG4,FBG2 和FBG3 分别构成一级和二级斯托克斯光的谐振腔。通过使用对抽运光高反的光纤光栅FBG0 将剩余抽运光反射回拉曼腔,形成双通道抽运构型。按照理论分析^[10],在双通道抽运构型情况下,最佳光纤长度比单通道抽运要短,因此实验选择的光纤长度为300 m。所有高反射率光纤光栅在相应布拉格中心波长(FBG0 在1064 nm,FBG3 在1484 nm,FBG1 和FBG4 在1239 nm)的反射率均大于99%。FBG2 作为二级拉曼光的耦合输出光纤光栅,在1484 nm 处为部分反射,其反射率值可通过理论和实验进行优化。本文对三个不同反射率的输出FBG 进行了实验。为减少腔损耗,所有熔接点的熔接损耗控制在0.02 dB 以下。实验所使用的抽运源为一台20 W/1064 nm 掺镱双包层光纤激光器。抽运激光束通过一个放大倍数为10,数值孔径为0.25 的物镜耦合进拉曼腔。在抽运光进入拉曼腔之前,通过一个99:1 的耦合器

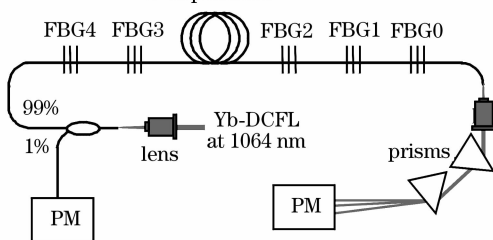


图1 级联掺磷拉曼光纤激光器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the cascaded phosphosilicate Raman fiber laser

来监测实际的入腔功率。通过仔细调节,实际入腔耦合效率可稳定控制在60%以上,这对拉曼激光器的输出稳定性非常重要。

3 结果和讨论

图2显示了在最大抽运功率时,由ADVANTEST Q8384 光谱分析仪测量的拉曼光纤激光器的输出光谱。由图2可以看出,输出激光束实际上由残余抽运光、泄漏一级斯托克斯光和二级斯托克斯激光组成。由于在输出端使用了对抽运光高反射率的光纤光栅,残余抽运功率非常小。图3是残余抽运光的输出谱,可看出大部分抽运光都被反射回谐振腔。尽管拉曼腔对一级斯托克斯光为高反,但仍然可测量到比较大的一级斯托克斯光输出。图4显示了一级斯托克斯光的典型输出光谱,可以看到其带宽比光纤光栅的反射带宽宽,导致布拉格波长两侧的一级斯托克斯光泄漏出谐振腔。拉曼激光器中的光谱展宽导致的光泄漏是影响激光效率的关键因素。近年来,光谱展宽效应得到了相关学者的广泛研究^[11~13],其产生的物理机制与腔内大量纵模间的四波混频效应密切相关^[14,15]。图5为最大输出功率时测得的二级拉曼激光的输出光谱,其3 dB 带宽约为0.21 nm。

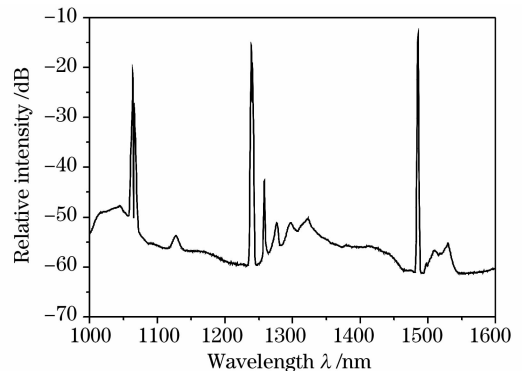


图2 级联掺磷拉曼光纤激光器的输出光谱

Fig. 2 Output spectrum of the cascaded phosphosilicate Raman fiber laser

由于输出激光束中包含剩余抽运光、泄漏一级斯托克斯光和二级斯托克斯激光,要准确测量1.48 μm 激光的输出功率,必须扣除前二者。通常有两种方式来测量二级拉曼光的输出功率。一种方法通过对输出光谱进行积分,获得抽运、一级和二级斯托克斯光所占的比例,来估算二级拉曼激光的实际输出功率。由于测量光谱前必须对光束进行衰减,而不同波长处的衰减量实际上是不同的,导致估

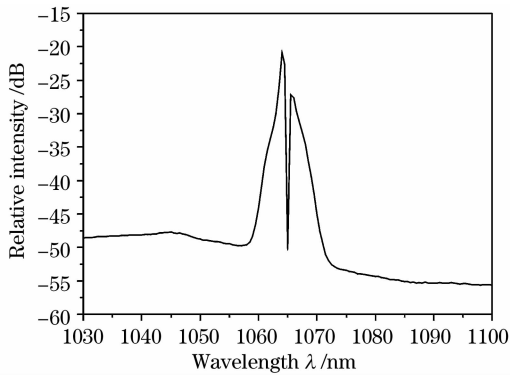


图 3 残余抽运光的输出光谱

Fig. 3 Output spectrum of the residual pump radiation

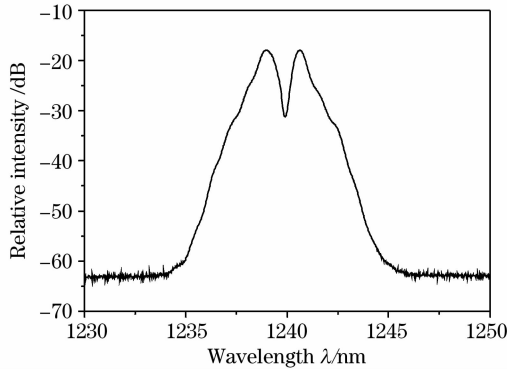


图 4 泄漏一级斯托克斯光的输出光谱

Fig. 4 Output spectrum of the first-order Stokes radiation

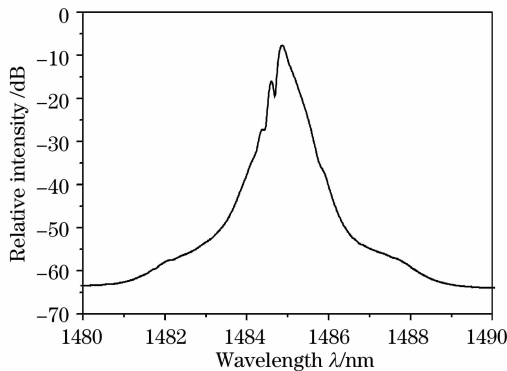


图 5 二级斯托克斯光的输出光谱

Fig. 5 Output spectrum of the second-order Stokes radiation

算出的二级拉曼激光输出功率往往存在较大的误差。另一种方法是通过棱镜色散将不同波长的光分开,分别测量,这样测量的输出功率较为直接和准确。本文采用棱镜色散法测量激光器的输出功率。图 6 显示了扣除棱镜损耗后二级拉曼激光输出功率同入腔抽运功率的依赖关系。阈值抽运功率随输出耦合反射率的增加而减小。当使用 43.6% 的输出 FBG 时,激光阈值最小(为 2.48 W),然而激光斜率

效率仅为 12%。当使用 25.7% 的 FBG 时,激光斜率效率最大,约为 31.3%。当实际入腔功率为 12.1 W 时,获得了最大 2.8 W 的 1.48 μm 激光输出,相应的转换效率为 23.1%。通过功率计监测,2 h 内 1.48 μm 激光的输出功率波动小于 5%。

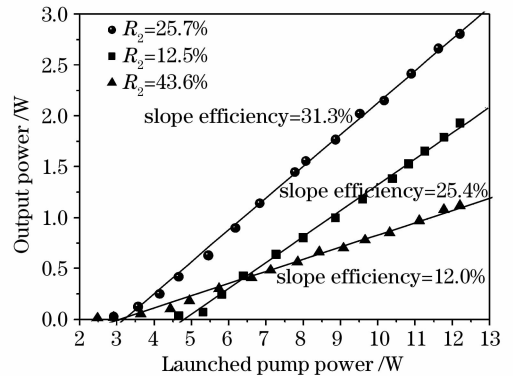


图 6 二级斯托克斯光的输出功率与抽运功率的关系(散点:实验值;直线:线性拟合)

Fig. 6 Output power at 1484 nm versus launched pump power (scatter: experimental data; line: linearly fit curves)

4 结 论

本文主要进行了高功率 1.48 μm 级联拉曼光纤激光器的实验研究。实验使用 20 W/1.06 μm 掺镱双包层光纤激光器作为抽运源,抽运由 300 m 国产掺磷光纤和光纤光栅构成的级联拉曼谐振腔。通过对二级拉曼输出光纤光栅反射率的实验优化,获得了最大 2.8 W/1.48 μm 连续波激光输出,相应的激光斜率效率和转换效率分别为 31.3% 和 23.1%。通过监测 1.48 μm 激光的最大输出功率,2 h 内的功率波动小于 5%。

参 考 文 献

- 1 E. M. Dianov, M. V. Grekov, I. A. Bufetov *et al.*. CW high power 1.24 μm and 1.48 μm Raman lasers based on low loss phosphosilicate fibre[J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(18):1542~1544
- 2 V. I. Karpov, E. M. Dianov, V. M. Paramonov *et al.*. Laser-diode-pumped phosphosilicate-fiber Raman laser with an output power of 1 W at 1.48 μm[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(13):887~889
- 3 N. S. Kim, M. Prabhu, C. Li *et al.*. 1239/1484 nm cascaded phosphosilicate Raman fiber laser with CW output power of 1.36 W at 1484 nm pumped by CW Yb-doped double-clad fiber laser at 1064 nm and spectral continuum generation[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **176**(1~3):219~222
- 4 Z. Xiong, N. Moore, Z. G. Li *et al.*. Experimental optimization of high power Raman fiber lasers at 1495 nm using phosphosilicate fibers[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **239**(1~3):137~145
- 5 S. K. Sim, H. C. Lim, L. W. Lee *et al.*. High-power

- cascaded Raman fibre laser using phosphosilicate fibre [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(12):738~739
- 6 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
- 7 E. M. Dianov, A. M. Prokhorov. Medium-power CW Raman fiber lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2000, **6**(6):1022~1028
- 8 Z. Xiong, T. Chen. Multi-wavelength Raman fiber laser with 2- and 3-stage cavities in a phosphosilicate fiber[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2007, **13**(1):81~84
- 9 M. Feng, Y. G. Li, J. F. Li *et al.*. High power one- and two-order cascaded Raman lasers based on home-made phosphosilicate fibre[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(5):1137~1139
- 10 Huang Chaohong, Cai Zhiping, Ye Chenchun *et al.*. Analytic optimization of P-doped cascaded Raman fiber lasers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(8):1384~1388
- 黄朝红, 蔡志平, 叶陈春 等. 级联掺磷光纤拉曼激光器的解析优化[J]. *光子学报*, 2007, **36**(8):1384~1388
- 11 P. Suret, S. Randoux. Influence of spectral broadening on steady characteristics of Raman fiber lasers: from experiments to questions about validity of usual models[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **237**(1~3):201~212
- 12 J. C. Bouteiller. Spectral modeling of Raman fiber lasers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(12):1698~1700
- 13 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
- 14 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
- 15 S. A. Babin, D. V. Churkin, A. E. Ismagulov *et al.*. Turbulence-induced square-root broadening of the Raman fiber laser output spectrum[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(6):633~635