

1270 nm 混合级联掺磷光纤拉曼激光器

漆 伟 刘 鹏 卢和林 黄朝红

(厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005)

摘要 报道了一种输出波长在 1270 nm 的混合级联掺磷拉曼激光器。该激光器分别利用掺磷光纤中频移为 1330 cm^{-1} 和 197 cm^{-1} 的拉曼散射, 使 1064 nm 激光两次频移, 实现了 1270 nm 激光输出。对 1270 nm 的二级拉曼光设计了对称和非对称两种腔结构, 并进行了对比实验。结果表明, 非对称结构可有效地避免腔内激光从高反端的泄漏, 降低激光阈值, 提高激光器转换效率。非对称结构激光器的振荡阈值为 3.70 W, 抽运功率为 8.66 W 时, 激光器最大输出总功率为 2.38 W, 从 1064 nm 到 1270 nm 的激光转换效率为 22%。

关键词 激光光学; 掺磷光纤; 拉曼激光器; 光动力疗法

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0302008

1270 nm Hybrid Cascaded Phosphosilicate Fiber Raman Laser

Qi Wei Liu Peng Lu Helin Huang Chaohong

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

Abstract A hybrid cascaded phosphosilicate fiber Raman laser (RFL) with output wavelength of 1270 nm is proposed. By using 1330 cm^{-1} and 197 cm^{-1} Raman shift of phosphosilicate fiber, the laser of 1064 nm is shifted to 1270 nm. Symmetric and asymmetric cavity structure are designed for the second-order Stokes Raman light. The comparative experimental results show that the asymmetric structure can reduce oscillation threshold, improve conversion efficiency and avoid the optical leakage from the cavity in the high reflection end effectively. The oscillation threshold of asymmetric phosphosilicate RFL is 3.70 W, the maximum total output power is 2.38 W with the pump power of 8.66 W, the conversion efficiency from 1064 nm to 1270 nm is 22%.

Key words laser optics; phosphosilicate fiber; Raman laser; photodynamic therapy

OCIS codes 140.3550; 140.3510; 170.5180

1 引 言

作为一种被广泛临床应用和持续发展的无创医疗手段, 光动力疗法(PDT)在恶性肿瘤及其他良性疾病的治疗中取得了令人瞩目的成就^[1~3]。PDT技术的主要原理是通过光照手段在组织内产生大量活性氧(主要为单线态氧), 利用它们的强氧化作用杀死肿瘤细胞或病变组织。单线态氧指处在第一电子激发态的氧分子, 通常标记为 $^1\text{O}_2$ 或 $^1\Delta_g$, 不能稳定存在。传统 PDT 技术通过光敏物质作为媒介, 利用其在病变部位的选择性聚集和在合适光源照射下的

激发和退激发过程, 在组织内激发大量活性氧并杀死病变组织。光敏化方法是目前 PDT 技术产生单线态氧的主要手段, 被广泛临床应用。光敏化 PDT 技术也存在许多不足, 如光敏副作用大、治疗周期长、可临床应用的光敏药物少等。因此, 国际上正在展开无药物光动力治疗技术的前沿研究。无药物 PDT 试图采用 1270 nm 波长附近的激光直接激发组织的氧分子, 将其激发到激发态, 产生光动力治疗效果^[4~7]。利用 1270 nm 激光照射可避免使用光敏药物带来的副作用, 同时由于波长较长和处在生物

收稿日期: 2012-10-08; 收到修改稿日期: 2012-12-13

基金项目: 福建省青年科技创新基金(2007F3100)资助课题。

作者简介: 漆 伟(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器及其应用方面的研究。

E-mail: qiwei861006@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、光纤激光器方面的研究。

E-mail: hch@xmu.edu.cn(通信联系人)

组织的“透明”窗口,可增加治疗深度和减少对其他正常组织的损伤。目前可用于光动力研究和应用的1270 nm激光器并不成熟。由于在光动力治疗领域的应用前景,输出波长在1270 nm附近的激光器特别是光纤激光器近年来受到人们的广泛关注。

2010年Yusupov等^[6]报道了用于光动力疗法的1262 nm级联光纤拉曼激光器,输出功率为5.5 W。同年Anquez等^[7]设计了一个可调谐环形光纤拉曼激光器,波长调谐范围为1240~1289 nm,在1270 nm波长处,在最大抽运功率为7 W的情况下,最大输出功率为2.5 W。2011年Guillemet等^[8]报道了1270 nm的全光纤单级连续波拉曼激光器,输出功率高达20.6 W,转换效率为70%。同年,Bufetov等^[9]利用掺铋光纤得到了输出功率为7 W的1268 nm光纤激光器。国内尚未见这方面的研究和报道。

本文结合掺磷光纤的拉曼增益谱,设计并实现了一种输出波长为1270 nm的混合级联掺磷光纤拉曼激光器。1270 nm激光输出的振荡阈值为3.70 W,在抽运功率为8.66 W时,最大总输出功率为2.38 W,从1064 nm到1270 nm的光光转换效率为22%。

2 实验装置与结构

自从俄罗斯的Dianov等^[10]利用掺磷光纤实现拉曼一级和二级激光输出以来,掺磷光纤已成为在近红外波段产生激光输出的重要增益介质。掺磷光纤的拉曼增益谱具有1330 cm⁻¹、440 cm⁻¹、490 cm⁻¹等多个增益峰,这些拉曼峰的一次散射、级联散射及不同增益峰的混合级联散射被广泛用于产生新波长的激光^[11~16]。实际上,掺磷光纤中除了这

些强拉曼增益峰外,在50~600 cm⁻¹非常宽的范围内均存在较强的拉曼增益^[10]。利用这些增益带产生拉曼激光的相关报道较少,仅见于2003年Huang等^[17]利用600 cm⁻¹的一次拉曼频移实现1178 nm激光输出。设计的一种输出波长为1270 nm的混合级联拉曼激光器将1064 nm激光通过1330 cm⁻¹的拉曼峰频移到1239 nm,然后利用掺磷光纤中约197 cm⁻¹频移的拉曼散射,将其进一步频移至1270 nm。由于197 cm⁻¹频移处的拉曼增益系数相对较低,为提高级联拉曼激光器的效率,设计了一种反射带宽非对称的级联腔来避免腔内激光从非输出端口泄漏,这种宽带反射拉曼腔的防泄漏效果在一级拉曼激光器中已被证实^[16,18]。

图1是设计的实验装置图,连接虚线框内下面的光栅为基于光纤布拉格光栅(FBG)的对称级联拉曼腔结构,连接虚线框内上面的光纤环形镜(FLM)为基于FLM的非对称级联拉曼腔结构。激光器采用传统的线性腔级联拉曼激光器结构,一级(1239 nm)拉曼腔由一对反射率大于99.8%的高反(HR)布拉格光栅构成,二级(1270 nm)斯托克斯拉曼光的谐振腔的输出FBG反射率为28.4%,另一端的高反镜分别使用反射率大于99.8%的高反FBG(以下称为对称结构)和3 dB FLM(以下称为非对称结构)进行了实验。抽运源为IPG公司生产的波长为1.06 μm掺铋双包层光纤激光器,最大输出功率为20 W。抽运光通过一个焦距为10 mm,数值孔径为0.25的物镜聚焦后注入到一个1:99的光纤耦合器。1%端口用于检测抽运功率,99%端口通过一个1270 nm/1064 nm波分复用器(WDM)将抽运光注入到谐振腔。实验使用的掺磷光纤由俄罗斯生产,长度为1 km。

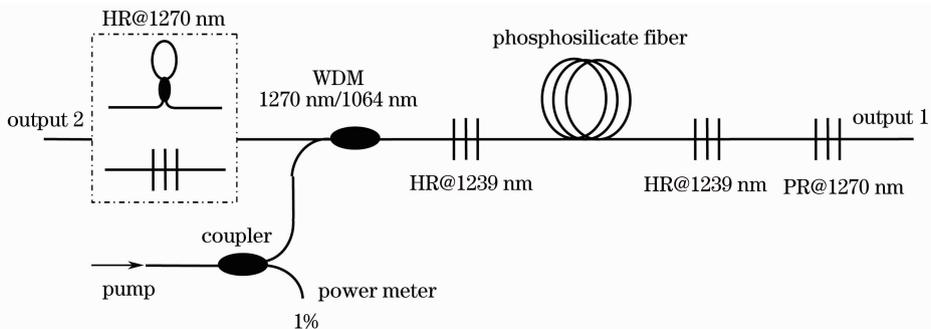


图1 对称和非对称结构1270nm混合级联掺磷拉曼光纤激光器

Fig. 1 Symmetric and asymmetric structure of hybrid cascaded phosphosilicate doped fiber Raman laser with wavelength of 1270 nm

3 实验结果与分析

为准确测量注入拉曼腔的实际抽运功率大小,对 1:99 耦合器的分光比进行了标定。通过拟合,耦合器的实际分光比为 1.5:98.5。通过观察激光器的输出光谱,分别记录了使用两种腔结构时的激光振荡情况。当抽运功率约为 0.45 W 时,两种腔结构均能看到 1239 nm 的激光激射。因此二级拉曼腔的对称和非对称结构对一级拉曼激光的振荡阈值影响不大。

对于对称结构,抽运功率达到 4.47 W 时 1270 nm 激光开始产生。抽运功率为 5.40 W 时激光器的输出光谱图如图 2 所示。继续增加抽运功率,可以看到 1270 nm 激光峰逐渐超过 1239 nm 激光峰。图 3 记录了不同抽运功率下 1270 nm 峰和 1239 nm 峰的强度对比。抽运功率为 7.69 W 时,光强比 $I_{1270}/I_{1239} > 4$ 。

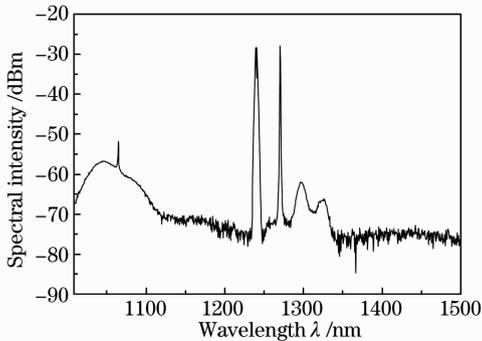


图 2 抽运功率为 5.40 W 时的光谱图

Fig. 2 Spectra with pump power of 5.40 W

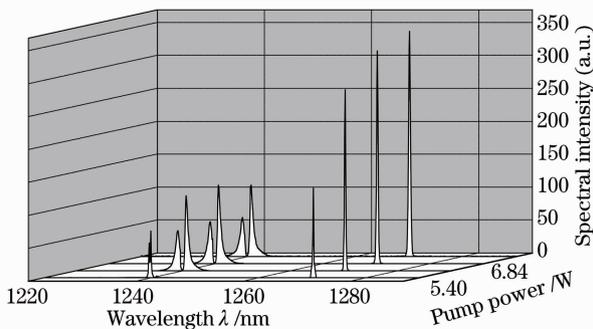


图 3 对称腔结构下输出光谱随抽运功率的变化

Fig. 3 Spectra changes with pump power of symmetric cavity structure

对于非对称结构,实验观察二级拉曼的振荡阈值为 3.70 W,比对称结构略低。随着抽运功率的增加,很快出现由 440 cm^{-1} 和 490 cm^{-1} 频移引起的 1310 nm 和 1320 nm 的激光振荡。由于它们和 1270 nm 的激光均从一级拉曼光处获得增益,导致 1270 nm 激光输出受到抑制,甚至消失。这可能与

光纤反射镜的宽带反射特性有关。为避免这一不利情况,在激光输出口 1 加接了一个 8° 的光纤头,结果表明在实验所使用的功率范围内没有观察到 1310 nm 和 1320 nm 的寄生激光振荡。非对称腔结构下输出光谱随抽运功率的变化如图 4 所示。可以看到与对称结构相比,没有明显的不同。对激光器的输出功率测量表明,非对称结构的激光器输出功率明显高于对称结构。图 5 和图 6 显示了两种结构下激光器的功率输入输出关系。抽运光功率为 8.66 W 时,对称结构的输出功率为 1.75 W,而非对称结构的输出功率为 2.38 W。扣除 1239 nm 激光成分后,二者的光-光转换效率保守估算分别为 16% 和 22%。

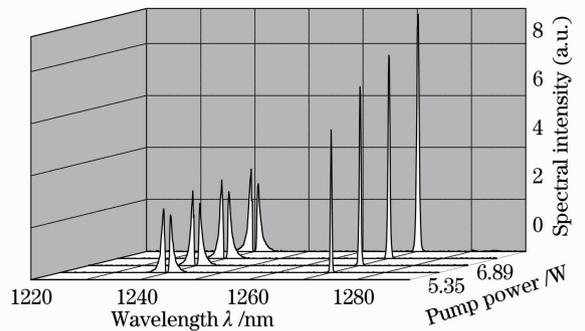


图 4 非对称腔结构下输出光谱随抽运功率的变化

Fig. 4 Output spectra changes with pump power of asymmetrical cavity structure

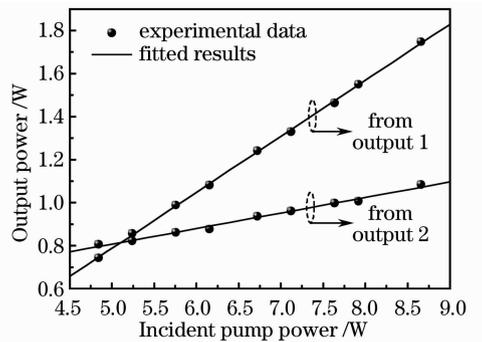


图 5 对称结构情况下两个端口输出功率与抽运功率的关系

Fig. 5 Relationship between output power and pump power of two ports under symmetric structure

对激光器的端口 2 也进行了功率测量。实验发现对称结构端口 2 存在严重的光功率泄漏。图 5 可以看到抽运功率为 8.66 W 时,泄漏的功率可达 1 W。图 7 为抽运功率为 5.98 W 时测得的端口 2 在一级(见图 7 中的插图)和二级拉曼波长附近的输出光谱图,可看出一级和二级拉曼光均存在明显的泄漏。对非对称结构,将窄带的高反 FBG 换成了宽

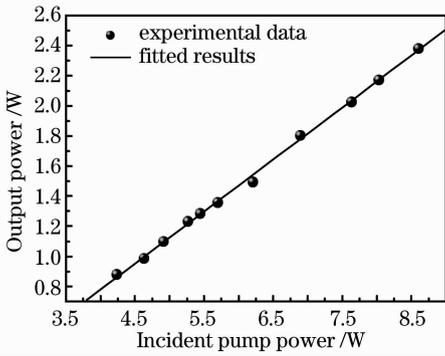


图 6 非对称结构情况下激光器输出功率与抽运功率的关系

Fig. 6 Relationship between output power and pump power of laser under symmetric structure

带反射的 FLM,起到了很好的防功率泄漏作用,实验观察端口 2 的输出功率始终只有十几毫瓦。此外对两种腔结构情况下 1270 nm 附近的输出谱进行了细致的测量,光谱仪的分辨率为 0.01 nm,在对称和非对称结构中 1270 nm 激光的光谱半峰全宽分别为 0.5 nm 和 0.612 nm(图 8)。结果表明非对称结构,尽管使用了宽带的高反镜,其输出光谱仅比对称结构略宽。从图 8 也可以看出 1270 nm 输出谱呈中间凹陷的双峰结构,这可能是使用的输出 FBG 反射率过高所致,下一步的工作可对激光器的输出反射率和光纤长度等参数进行优化。

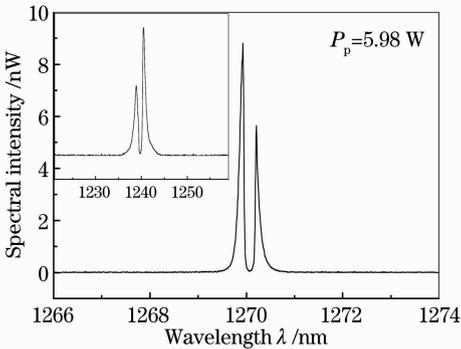


图 7 对称结构从输出端口 2 泄漏光的光谱
Fig. 7 Spectrum of leaked light of output port 2 under symmetric structure

4 结 论

基于掺磷光纤的拉曼增益谱,设计并实现了一种输出波长在 1270 nm 的混合级联拉曼激光器。该激光器将 1064 nm 激光通过 1330 cm^{-1} 的拉曼峰频移到 1239 nm,再利用掺磷光纤中约 197 cm^{-1} 频移的拉曼散射,实现 1270 nm 的激光输出。设计了两种拉曼腔结构并进行了对比实验。结果表明,非

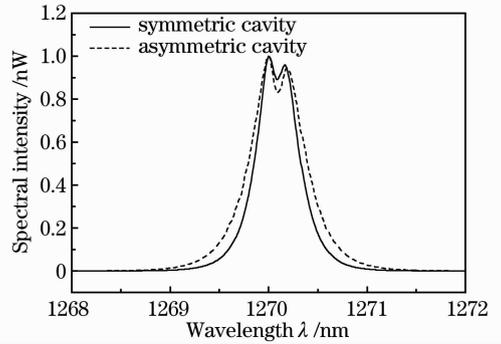


图 8 对称和非对称结构在 1270 nm 附近的输出谱 (抽运功率为 5.98 W)

Fig. 8 Output spectrum of symmetric and asymmetric structure near wavelength of 1270 nm with pump power of 5.98 W

对称结构可有效地防止腔内激光从高反端的泄漏,降低激光阈值,提高激光器转换效率。激光器的振荡阈值为 3.70 W,在抽运功率为 8.66 W 时,激光器最大输出总功率为 2.38 W,激光器的光光转换效率约为 22%。此 1270 nm 光纤拉曼激光器可作为单线态氧直接激发和光动力作用研究的理想光源。

参 考 文 献

- 1 T. J. Dougherty. Photodynamic therapy [J]. *Photochemistry and Photobiology*, 1993, **58**(6): 895~900
- 2 D. I. Rosenthal, E. Glatstein. Clinical applications of photodynamic therapy[J]. *Ann. Med.*, 1994, **26**(6): 405~409
- 3 M. Ochsner. Photodynamic therapy: the clinical perspective-review on applications for control of diverse tumorous and non-tumorous diseases [J]. *Arzneim.-Forsch.*, 1997, **47**(11): 1185~1194
- 4 F. Anquez, I. El Yazidi-Belkoura, S. Randoux *et al.*. Cancerous cell death from sensitizer free photoactivation of singlet oxygen [J]. *Photochem. Photobiol.*, 2012, **88**(1): 167~174
- 5 M. R. Detty. Direct 1270 nm irradiation as an alternative to photosensitized generation of singlet oxygen to induce cell death [J]. *Photochem. Photobiol.*, 2012, **88**(1): 2~4
- 6 A. S. Yusupov, S. E. Goncharov, I. D. Zarevskiu *et al.*. Raman fiber laser for drug-free photodynamic therapy[J]. *Laser Physics*, 2010, **20**(2): 357~359
- 7 F. Anquez, E. Courtade, A. Sivery *et al.*. A high-power tunable Raman fiber ring laser for the investigation singlet oxygen production from direct laser excitation around 1270 nm[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(22): 22928~22936
- 8 S. Guillemet, D. Kinet, F. Narbonneau *et al.*. High power all-in-fibre contiuous wave Raman laser based on phosphosilicate fibre[C]. *Laser and Electro-Optics Europe, 2011 Conference on and 12th European Quantum Electronics Conference, 2011. CJ_P8*
- 9 I. A. Bufetov, A. V. Shubin, S. V. Firstov *et al.*. High-power CW 1.27 μm Bi-doped fiber laser[C]. *Laser and Electro-Optics Europe, 2011 Conference on and 12th European Quantum Electronics Conference, 2011. CJ8_2*
- 10 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 fiber [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(18):

- 1542~1544
- 11 Zhengqian Luo, Zhiping Cai, Jiafu Huang *et al.*. Stable and spacing-adjustable multiwavelength Raman fiber laser based on mixed-cascaded phosphosilicate fiber Raman linear cavity [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(14): 1602~1604
- 12 M. D. Mermelstein, C. Headley, J.-C. Bouteiller *et al.*. Configurable three-wavelength Raman fiber laser for Raman amplification and dynamic gain flattening [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(12): 1286~1288
- 13 Z. Xiong, N. Moore, Z. G. Li. 10 W Raman fiber lasers at 1248 nm using phosphosilicate fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(10): 2377~2381
- 14 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
- 15 Huang Chaohong, Wei Dong, Lin Jiali *et al.*. High power 1.48 μm 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 μm 国产掺磷光纤级联拉曼激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s2): 33~36
- 16 Liu Peng, Huang Chaohong, Qi Wei *et al.*. Phosphosilicate fiber Raman laser based on fiber loop mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0202005
- 刘 鹏, 黄朝红, 漆 伟等. 基于光纤环形镜的掺磷光纤拉曼激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0202005
- 17 Shenghong Huang, Yan Feng, Akira Shirakawa *et al.*. Generation of 10.5 W, 1178 nm laser based on phosphosilicate Raman fiber laser [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2003, **42**: L1439~L1441
- 18 Yan Feng, Luke R. Taylor, Domenico Bonaccini Calia *et al.*. 150 W highly-efficient Raman fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(26): 23678~23683

栏目编辑: 宋梅梅