

1.5 μm 光纤乙烷气体拉曼激光放大器

陈育斌^{1,2,3}, 王泽锋^{1,2,3*}, 顾 博^{1,2,3}, 陆启生^{1,2,3}

¹国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

²湖南省大功率光纤激光协同创新中心, 湖南 长沙 410073;

³湖南省高能激光技术重点实验室, 湖南 长沙 410073

摘要 报道了基于空芯光纤的 1.5 μm 光纤气体拉曼激光放大器。实验以一个 1.5 μm 波段的可调谐分布式反馈激光器为种子源, 输出的连续波种子激光与 1064 nm 微芯片激光器的输出脉冲抽运激光通过双色镜一起耦合进充乙烷气体的空芯光纤中, 通过乙烷分子的受激拉曼散射实现了高效率的 1553 nm 拉曼激光输出。种子光的注入极大地降低了受激拉曼散射阈值, 从而将拉曼光-光转换效率提高到 47.5%。该研究为实现高效率的光纤气体拉曼激光输出提供了一条有效的技术途径。

关键词 激光器; 空芯光纤; 激光放大器; 气体激光器; 受激拉曼散射

中图分类号 TN24 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0514002

1.5 μm Fiber Ethane Gas Raman Laser Amplifier

Chen Yubin^{1,2,3}, Wang Zefeng^{1,2,3}, Gu Bo^{1,2,3}, Lu Qisheng^{1,2,3}

¹College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

²Collaborative Innovation Center of Hunan Province on High Power Fiber Laser, Changsha, Hunan 410073, China;

³Key Laboratory of Hunan Province on High Energy Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract A 1.5 μm fiber gas Raman laser amplifier based on the hollow core fibers is reported. In the experiments, a 1.5 μm tunable distributed feed back laser is used as a seed. The output continuous wave seed laser, together with the output pulse pump laser of a 1064 nm microchip laser, is coupled into the ethane-filled hollow core fiber by using a dichroic mirror, and then efficiently generated 1553 nm Raman laser by stimulated Raman scattering of ethane gas. With the injected seed laser, the Raman scattering threshold is significantly decreased and the Raman conversion efficiency increases to 47.5%. This study provides an effective technical avenue to achieve the efficient fiber gas Raman laser output.

Key words lasers; hollow-core fiber; laser amplifier; gas laser; stimulated Raman scattering

OCIS codes 140.4130; 290.5910; 060.5295; 140.3280

1 引 言

气体受激拉曼散射具有增益系数高、拉曼频移大、增益介质选择灵活等特点, 已经被证明是一种产生可调谐、窄线宽、新波长激光器的有效手段^[1]。但是, 抽运激光与拉曼增益气体的有效作用距离短, 导致受激拉曼散射阈值很高, 因此, 气体受激拉曼散射一直难以实现高效高功率激光输出; 而且在拉曼转换过程中不可避免地产生高阶拉曼散射和反斯托克斯拉曼散射等多余的谱线, 进一步降低了拉曼转换效率^[1-2]。低传输损

收稿日期: 2016-12-12; 收到修改稿日期: 2017-01-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11274385)

作者简介: 陈育斌(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤气体激光器方面的研究。E-mail: 13677334110@139.com

导师简介: 陆启生(1942—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高能激光技术、激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: luqisheng203@163.com

* 通信联系人。E-mail: zefengwang_nudt@163.com

耗的空芯光子晶体光纤的出现为气体受激拉曼散射提供了近乎理想的环境,因为空芯光纤可以将抽运激光约束在微米量级的纤芯中,抽运强度大大地提高;而且在纤芯中抽运激光与拉曼增益气体的有效相互作用距离很长,进一步降低抽运阈值^[3];此外,通过设计合理的空芯光纤参数来控制光纤的传输谱实现波长选择,减少向高阶拉曼谱线的转换,提高所需拉曼谱线的转换效率^[4]。与固体拉曼介质相比,气体拉曼介质具有损伤阈值高和非线性系数低的优点,有利于产生高峰值功率的激光。因此,基于气体受激拉曼散射的空芯光纤气体激光器同时兼顾了气体激光器和光纤激光器的优点,具有输出高效率、高功率光纤激光的潜力。自2002年英国巴斯大学的 Benabid 等^[5]首次报道在空芯光子晶体光纤中实现氢气的受激拉曼散射以来,基于受激拉曼散射的空芯光纤气体激光器受到了广泛的关注^[6-9]。陈育斌等^[10-11]利用充乙烷气体的反共振空芯光纤实现 1.5 μm 波段的峰值功率为 400 kW、线宽为 6.3 GHz 的激光输出。虽然该实验的激光斜率效率为 61.5%,但是实际的拉曼光-光转换效率只有 38%,主要原因是拉曼阈值过高。

为了降低拉曼阈值,提高拉曼光-光转换效率,本文引入种子激光开展了基于空芯光纤的 1.5 μm 乙烷气体拉曼激光放大器的实验研究。通过将 C 波段的可调谐连续单频分布式反馈(DFB)种子激光与高峰值脉冲 1064 nm 的抽运激光同时注入到充入乙烷气体的反共振空芯光纤中,将种子激光波长精确调谐到乙烷气体分子的斯托克斯波长 1553 nm,利用受激拉曼散射效应实现对种子激光的放大。种子激光的注入明显地降低了受激拉曼散射阈值,并将拉曼光-光转换效率提高到 47.5%,相应的量子效率达到 70%。

2 实验装置

乙烷气体拉曼激光放大器的实验装置是在文献[10-11]的基础上,利用短波通双色镜(截止波长为 1180 nm,波长为 1064 nm 时透过率为 98%,波长为 1553 nm 时反射率为 99%)将 1.5 μm 的种子激光和 1064 nm 的抽运激光同时耦合到空芯光纤中,如图 1 所示,插图图为实验光纤横截面的扫描电子显微图。种子激光为 C 波段可调谐的连续单频 DFB 半导体激光,中心波长在 1.529~1.568 μm 之间连续可调,线宽小于 100 kHz,输出功率在 6~16 dBm 之间连续可调,实验中种子激光的中心波长精确地调节至乙烷气体一阶振动拉曼斯托克斯谱线的波长 1553 nm。实验所用的空芯光纤长度约为 8.7 m,纤芯直径约为 46 μm ,实际测得该空芯光纤在 1064 nm 的抽运波长和 1553 nm 的乙烷分子振动拉曼波长处的传输损耗分别为 0.10 dB/m 和 0.05 dB/m。实验中平凸透镜 L_1 和 L_2 组成的缩束系统是为了提高抽运耦合效率,实现自由空间抽运激光模场与空芯光纤纤芯波导结构中激发传输的抽运基模模场之间的模式匹配。根据实验经验,并利用多物理场软件 Comsol 的有限元法对空芯光纤纤芯模场进行模拟仿真得出结论,纤芯中激发的抽运基模模场直径大约等于纤芯直径乘以比例因子 0.75,即纤芯中激发的抽运基模模场直径约为 34.5 μm ;平凸透镜 L_1 和

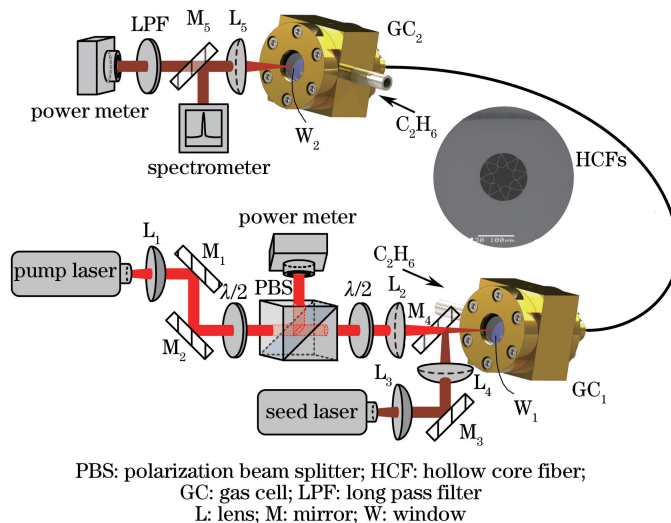


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

L_2 组成的缩束系统将腰斑直径为 $236 \mu\text{m}$ 的抽运基模高斯光束在空芯光纤芯端面处缩束为腰斑直径为 $35 \mu\text{m}$ 的基模高斯光束,刚好与纤芯中激发的抽运基模模场匹配,抽运耦合效率达到 86% 。与此类似,种子激光采用了由平凸透镜 L_3 和 L_4 组成的扩束系统来提高种子光的耦合效率,实际的耦合效率为 37% 。

3 结果与分析

8.7 m 长的空芯光纤中充入 0.14 MPa 的乙烷气体,耦合进空芯光纤的种子光功率为 1.3 mW,抽运光功率约为 90 mW 时,输出端测得的光谱如图 2 所示。图 2(a)、(b)分别为使用光谱范围为 350~1200 nm 以及 1200~2400 nm 的光谱仪测得的光谱图,插图分别为在抽运波长以及斯托克斯波长精扫的光谱图。种子注入放大实验中观察到抽运波长为 1064.4 nm 的谱线与 2128.8 nm 的二阶衍射谱线,以及波长为 1553 nm 的斯托克斯谱线和波长为 809.7 nm 的反斯托克斯谱线。与文献[10-11]的实验相比,种子注入放大实验增加了 809.7 nm 的反斯托克斯谱线,这是由于种子光的存在明显地降低了斯托克斯受激拉曼散射的阈值从而提高了受激光声子的水平,而受激光声子水平的提高使得反斯托克斯受激拉曼散射的阈值降低,所以观察到了反斯托克斯谱线;而在文献[10-11]的实验中反斯托克斯拉曼阈值较高,因此实验难以观察到反斯托克斯谱线。同时,反斯托克斯的波长位于空芯光纤传输谱的高损耗区域,空芯光纤在反斯托克斯谱线中传输损耗高,所以文献[10-11]的实验没有观察到反斯托克斯波长的功率输出。

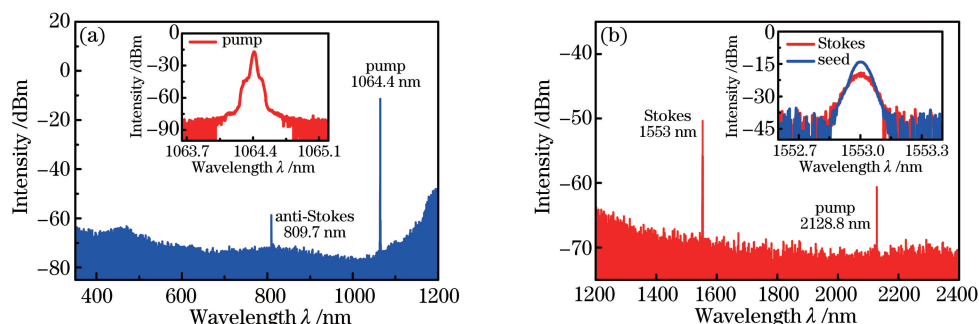


图 2 0.14 MPa 乙烷气压,耦合的种子光功率和抽运功率分别为 1.3 mW 和 90 mW 时测得的输出光谱

(a) 350~1200 nm 光谱仪测得的光谱;(b) 1200~2400 nm 光谱仪测得光谱

Fig. 2 Measured spectrums when ethane gas pressure is 0.14 MPa, coupled seed power is 1.3 mW and coupled pump power is 90 mW. (a) Measured spectrum with 350-1200 nm spectrograph;

(b) measured spectrum with 1200-2400 nm spectrograph

在相同的光纤长度和气压下,注入不同的种子光功率,实验测得的输出功率、效率曲线如图 3 所示。从图 3(a)可看出,种子光的注入降低了受激拉曼阈值并将拉曼阈值从 24 mW 降为 12.5 mW,阈值下降了 50%;同时残余抽运光向受激拉曼散射光转化,抽运残余率下降,拉曼光-光转换效率得到提高,拉曼光-光转

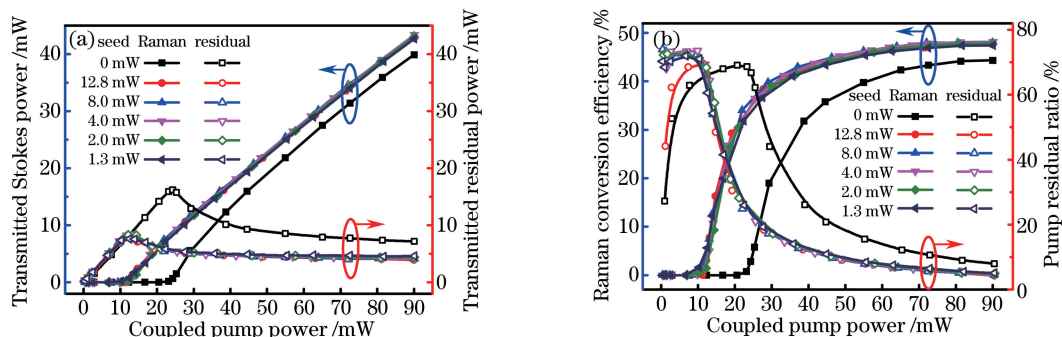


图 3 不同的注入种子功率情况下,(a)斯托克斯光功率和残余抽运光功率随耦合抽运功率的变化;

(b)拉曼转换效率和抽运残余率随耦合抽运功率的变化

Fig. 3 (a) Evolution of the transmitted Stokes power and residual pump power as coupled pump power; (b) evolution of the Raman conversion efficiency and pump residual ratio as coupled pump power at different coupled seed powers

换效率提高到 47.5%，如图 3(b)所示，相应的量子效率达到 70%。所以种子光起到降低了受激拉曼阈值并提高拉曼转换效率的作用。此外，从图 3 可以看到，种子光功率对拉曼放大器的功率输出特性影响很小，这主要是因为种子光只是起到由自发辐射放大向受激辐射放大转化的作用，而受激辐射放大只需要微弱的相干种子光便可以发生，所以不同种子光功率对拉曼放大器的功率输出特性影响不大。

4 结 论

报道了基于空芯光纤的 1.5 μm 光纤乙烷气体拉曼激光放大器，将 1.5 μm 的可调谐连续单频 DFB 激光注入到充乙烷气体的空芯光纤中作为种子光，种子光的引入明显提高了受激光声子的水平并降低了受激拉曼散射阈值，同时实验观测到斯托克斯光功率不受注入的种子光功率的影响，得到拉曼光-光转换效率的最大值为 47.5%，相应的量子效率为 70%。该研究为同时实现高效率、低阈值的 1.5 μm 波段光纤激光提供了一条有效的技术途径。

致谢 感谢英国巴斯大学 Jonathan Knight 教授课题组为本论文提供了实验所需的空芯光纤。

参 考 文 献

- [1] Wang Zefeng, Yu Fei, Wadsworth W J, *et al.* Single-pass high-gain 1.9 μm optical fiber gas Raman laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0814004.
王泽锋, 于 飞, Wadsworth W J, 等. 单程高增益 1.9 μm 光纤气体拉曼激光器[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0814004.
- [2] Wang Zefeng, Yu Fei, Wadsworth W J, *et al.* Efficient 1.9 μm emission in H_2 -filled hollow core fiber by pure stimulated vibrational Raman scattering[J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(10): 105807.
- [3] Nampoothiri A V, Jones A M, Fourcade-Dutin C, *et al.* Hollow-core Optical Fiber Gas Lasers (HOFGLAS): a review [J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(7): 948-961.
- [4] Yu Fei, Knight J C. Spectral attenuation limits of silica hollow core negative curvature fiber[J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21466-21471.
- [5] Benabid F, Knight J C, Antonopoulos G, *et al.* Stimulated Raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Science*, 2002, 298(5592): 399-402.
- [6] Benabid F, Bouwmans G, Knight J C, *et al.* Ultrahigh efficiency laser wavelength conversion in a gas-filled hollow core photonic crystal fiber by pure stimulated rotational Raman scattering in molecular hydrogen [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(12): 123903.
- [7] Benabid F, Antonopoulos G, Knight J C, *et al.* Stokes amplification regimes in quasi-cw pumped hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95(21): 213903.
- [8] Couny F, Benabid F, Carraz O. Enhanced SRS in H_2 filled hollow core photonic crystal fibre by use of fibre Bragg grating[J]. *Journal of Optics: A Pure and Applied Optics*. 2007, 9(2): 156-159.
- [9] Couny F, Benabid F, Light P S. Subwatt threshold cw Raman fiber-gas laser based on H_2 -filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 99(14): 1-2.
- [10] Chen Yubin, Gu Bo, Wang Zefeng, *et al.* 1.5 μm fiber gas Raman laser source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0506002.
陈育斌, 顾 博, 王泽锋, 等. 1.5 μm 光纤气体拉曼激光光源[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0506002.
- [11] Chen Y, Wang Z, Gu B, *et al.* Achieving a 1.5 μm fiber gas Raman laser source with about 400 kW of peak power and a 6.3 GHz linewidth[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 5118-5121.