

# 1.5 $\mu\text{m}$ 光纤气体拉曼激光光源

陈育斌 顾 博 王泽锋\* 陆启生

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

**摘要** 报道了基于空芯光纤中气体受激拉曼散射效应的 1.5  $\mu\text{m}$  波段光纤激光实验。利用高峰值功率、窄线宽、亚纳秒量级的 1064 nm 微芯激光抽运一段充高压乙烷气体的空芯光纤。通过乙烷气体分子的受激拉曼散射, 获得了 1553 nm 的激光输出, 峰值功率达到 16.6 kW, 线宽小于 0.2 nm, 脉宽约为 435 ps。该功率水平是目前在掺铒光纤中获得的最高峰值功率的 4 倍以上。该研究为同时实现高峰值功率和窄线宽的 1.5  $\mu\text{m}$  波段光纤激光提供了一条新的技术途径。

**关键词** 光纤光学; 空芯光纤; 光纤激光器; 气体激光器; 受激拉曼散射

**中图分类号** TN248.2 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0506002

## 1.5 $\mu\text{m}$ Fiber Gas Raman Laser Source

Chen Yubin Gu Bo Wang Zefeng Lu Qisheng

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

**Abstract** A 1.5  $\mu\text{m}$  fiber laser generation experiment in gas-filled hollow-core fiber by stimulated Raman scattering is reported. A high pressure ethane-filled hollow-core fiber is pumped with a high peak-power, narrow linewidth, subnanosecond pulsed 1064 nm microchip laser. The 1553 nm pulse with peak power of 16.6 kW is generated via stimulated Raman scattering of ethane. The linewidth is less than 0.2 nm and the pulse duration is about 435 ps. To the best of our knowledge, the peak power obtained here is more than four times of the highest value reported for erbium-doped fibers. The study provides a technical pathway for 1.5  $\mu\text{m}$  fiber laser with both high peak-power and narrow linewidth.

**Key words** fiber optics; hollow-core fiber; fiber laser; gas laser; stimulated Raman scattering

**OCIS codes** 060.2320; 060.5295; 140.3510; 140.4130; 290.5910

## 1 引 言

人眼安全的 1.5  $\mu\text{m}$  波段光纤激光在光纤通讯、传感、医疗、激光雷达、科学研究等领域有着广泛的应用, 一直以来都是国际研究的热点<sup>[1-3]</sup>。目前 1.5  $\mu\text{m}$  波段光纤激光主要在掺铒或铒镱共掺光纤中产生, 受吸收截面、转换效率、掺杂浓度、非线性效应等因素的影响, 遇到功率提升的瓶颈问题<sup>[1,4-8]</sup>。2007年, Jeong等<sup>[4]</sup>利用铒镱共掺双包层大模场光纤实现了 1.5  $\mu\text{m}$  波段 297 W 功率输出, 为目前报道的连续波最高功率水平<sup>[4]</sup>。2015年, Kotov等<sup>[6]</sup>实现了峰值功率为 4 kW 的单频单模 1.5  $\mu\text{m}$  波段激光输出, 为目前报道的最高脉冲功率水平, 功率的进一步提高主要受限于受激布里渊散射等非线性效应。虽然通过锁模、调 Q 等技术手段可以获得高峰值功率的 1.5  $\mu\text{m}$  波段激光输出<sup>[9-11]</sup>, 但是高峰值功率激光在实芯光纤中传输引起的非线性效应会导致光谱严重展宽, 难以实现窄线宽输出。因此传统的掺稀土离子实心玻璃光纤很难同时实现高峰值功率和窄线宽的激光输出, 无法满足超快激光、中红外参量放大等应用的需求。气体受激拉曼散射是一

收稿日期: 2015-12-14; 收到修改稿日期: 2016-01-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11274385)、国防科学技术大学青年拔尖人才计划

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: luqisheng@public.cs.bn.cn

\* 通信联系人。E-mail: zefengwang\_nudt@163.com

种产生窄线宽、新波长激光的有效途径<sup>[12-15]</sup>。由于有效作用距离非常短,在自由空间中观测气体分子受激拉曼散射需要很高的阈值抽运功率,还会产生许多不需要的谱线,使得到所需波长的转换效率非常低<sup>[13]</sup>。空芯光纤的出现为气体受激拉曼散射提供了近乎理想的环境<sup>[12]</sup>。空芯光纤可以有效地将抽运光约束在微米量级的纤芯中,大大提高了抽运强度,且作用距离非常长,可以通过合理设计,控制空芯光纤的传输损耗谱,从而控制各拉曼信号的有效增益,实现抽运激光向所需波长的高效拉曼转换<sup>[13-15]</sup>。

本文利用英国 Bath 大学拉制的负曲率空芯光纤(HCF),开展了基于气体分子受激拉曼散射效应的 1.5  $\mu\text{m}$  波段光纤激光实验。以商用 1064 nm 微芯脉冲激光器为抽运源,抽运一段长约为 3 m 的空芯光纤,空芯光纤中充有 2.84 MPa 乙烷( $^{12}\text{C}_2\text{H}_6$ )气体,利用乙烷气体分子的受激拉曼散射效应实现了 1553 nm 的激光输出,峰值功率约为 16.6 kW,线宽小于 0.2 nm,脉宽约为 435 ps。

## 2 实验装置

图 1 所示为用于产生 1.5  $\mu\text{m}$  光纤气体拉曼激光的实验装置示意图。所用的空芯光纤为英国 Bath 大学拉制的负曲率空芯光纤,光纤长度约为 3 m,纤芯直径约为 50  $\mu\text{m}$ ,图 1 中的插入图片为横截面扫描电子显微镜(SEM)图像。实验测得抽运激光波长为 1064 nm,对应的乙烷分子的振动斯托克斯散射波长为 1553 nm(拉曼频移为  $2954\text{ cm}^{-1}$ ),分别落在空芯光纤的第二传输带和第一传输带内,传输损耗分别为 0.12 dB/m 和 0.42 dB/m<sup>[11]</sup>。抽运源采用立陶宛 Standa 公司生产的高峰值功率、窄线宽 1064 nm 微芯脉冲激光器(STA-01-8),输出激光脉宽约为 400 ps,重复频率为 1 kHz,峰值功率大于 100 kW。抽运激光通过两个高反镜进行光路准直之后,通过半波片和偏振分光棱镜实现功率调节,再通过一个焦距为 50 mm、C 波段镀膜增透膜(镀膜波长为 1050~1620 nm,波长为 1064 nm 时透射率大于 98%,波长为 1553 nm 时透射率大于 99%)的平凸透镜和相同 C 波段镀膜的输入玻璃窗口聚焦耦合到位于密封腔内的空芯光纤纤芯中。由于空芯光纤的传输损耗具有一定的偏振敏感性,因此在透镜之前使用了另一个半波片,用于调节抽运光的偏振方向以达到最佳的传输效率。产生的激光和残留的抽运光经输出密封腔上的 C 波段镀膜玻璃窗口输出,再通过另一个相同的平凸透镜准直。准直光束通过截止波长为 1220 nm(波长为 1553 nm 时透射率大于 90%,波长为 1064 nm 时损耗大于 30 dB)的长波通滤波片输入到光功率计探测激光功率,或输入到宽带光谱仪中测量输出光谱。

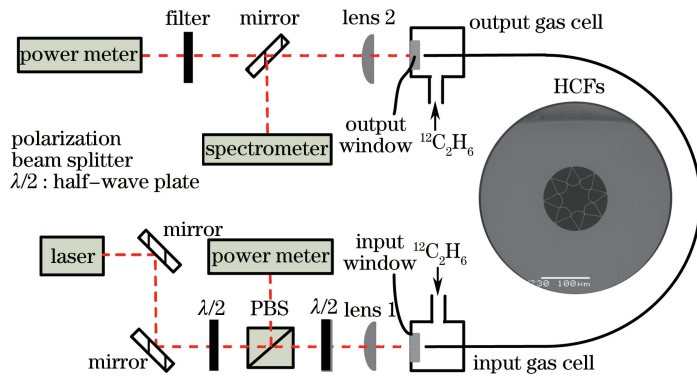


图 1 实验装置,插入图片为实验所用光纤横截面的 SEM 图像

Fig. 1 Experimental setup, the inset is the SEM image of the fiber cross section in the experiment

## 3 结果与分析

在长为 3 m 的空芯光纤中充入 2.84 MPa 的乙烷气体,当耦合进入纤芯的抽运功率为 54 mW 时,测得的输出光谱如图 2(a)所示。图中可见两条明显的谱线,其中 1064.6 nm 谱线对应抽运波长,受激拉曼散射产生的斯托克斯波长为 1552.7 nm,与理论计算值吻合(室温下 $^{12}\text{C}_2\text{H}_6$ 的拉曼频移系数为  $2954\text{ cm}^{-1}$ ,理论计算的斯托克斯波长为 1553.0 nm)。在光谱仪最高分辨率为 0.02 nm 条件下测得的 1552.7 nm 激光谱线线宽小于 0.2 nm,如图 2(b)所示。实验中没有观察到其他拉曼谱线,包括处于空芯光纤第二传输带内的斯托克

斯 1189.7 nm 谱线(室温下拉曼频移系数为  $993 \text{ cm}^{-1}$ , 传输损耗约为  $0.34 \text{ dB/m}$ )。主要原因在于  $1552.7 \text{ nm}$  的斯托克斯谱线对应的拉曼增益系数至少比  $1189.7 \text{ nm}$  谱线大一个数量级以上, 而其他受激拉曼散射谱线则不在空芯光纤的传输带内, 传输损耗非常高, 实际抽运功率未能达到这些谱线的观察阈值。

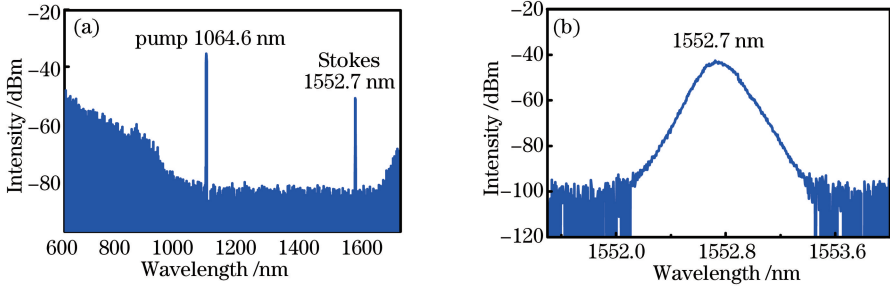


图 2 (a) 测得的输出光谱图; (b) 测得的拉曼散射光的精细光谱图

Fig. 2 (a) Measured output optical spectrum; (b) measured fine spectrum of Raman Scattering light

使用快速响应的 InGaSe 光电探测器 (DET08CFC, Thorlabs 公司, 美国, 波长响应范围为  $850 \sim 1700 \text{ nm}$ , 带宽为  $5 \text{ GHz}$ , 响应时间小于  $70 \text{ ps}$ ) 和宽带示波器 (Keysight DSO-X 6004A, 带宽为  $4 \text{ GHz}$ , 采样率为  $20 \text{ GS/s}$ ) 测量抽运脉冲以及拉曼信号的脉冲形状。结果表明抽运脉冲和斯托克斯脉冲均为类高斯分布, 其半峰全宽的脉宽分别为  $396.5 \text{ ps}$  和  $434.5 \text{ ps}$ , 如图 3 所示。

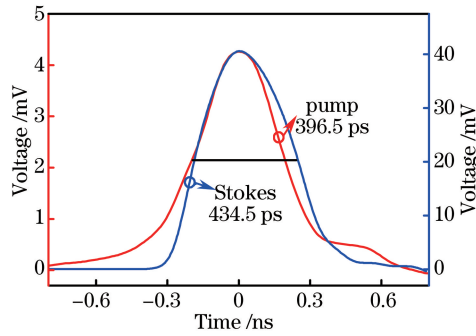


图 3 测得的抽运激光和  $1552.7 \text{ nm}$  斯托克斯信号的脉冲形状

Fig. 3 Measured pump laser and  $1552.7 \text{ nm}$  Stokes pulse shape

测量了在不同抽运耦合功率  $P_c$  下, 残余抽运功率  $P_r$  和斯托克斯信号输出功率  $P_s$  的变化, 如图 4(a) 所示, 光纤长为  $3 \text{ m}$ , 填充  $2.84 \text{ MPa}$  的乙烷气体。在抽运功率达到拉曼阈值之前, 几乎观测不到斯托克斯信号, 输出端的抽运光功率随着输出耦合功率的提高而快速增加。耦合输入的抽运功率达到拉曼阈值之后,  $1552.7 \text{ nm}$  激光功率随着抽运功率的增加而急剧上升, 此时注入的抽运能量快速向斯托克斯信号转换。随着抽运功率的进一步增加,  $1552.7 \text{ nm}$  激光功率增加速度变缓, 最后趋于线性增加, 此时拉曼转换效率趋向于

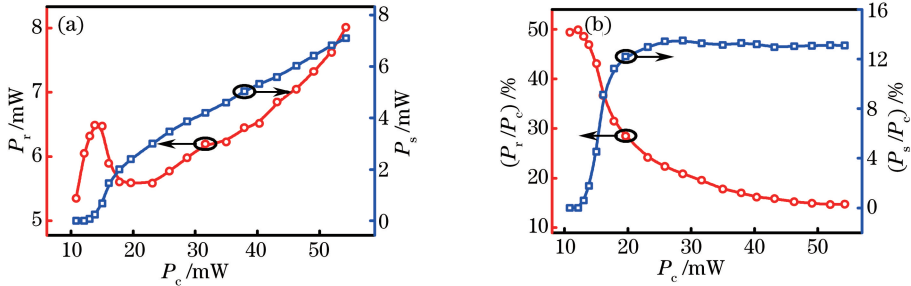


图 4 (a) 不同抽运耦合功率  $P_c$  下的输出斯托克斯功率  $P_s$  和残余抽运功率  $P_r$ ;

(b) 不同抽运耦合功率  $P_c$  下的拉曼转换效率  $P_s/P_c$  和抽运残余率  $P_r/P_c$ 。

Fig. 4 (a) Evolution of output Stokes power  $P_s$  and residual pumped power  $P_r$  with coupled pump power  $P_c$ ; (b) evolution of Raman power conversion efficiency  $P_s/P_c$  and residual pumped power efficiency  $P_r/P_c$  with coupled pump power  $P_c$ .

一个稳定值,约为 13%,如图 4(b)所示。实验获得 1552.7 nm 激光输出的最大平均功率为 7.1 mW,根据脉宽和重复频率可以计算得到峰值功率约为 16.6 kW。

## 4 结 论

通过商用 1064 nm 微芯脉冲激光器抽运充高压乙烷气体的空芯光纤,利用乙烷气体分子的受激拉曼散射实现了峰值功率约为 16.6 kW、线宽小于 0.2 nm 的 1.5  $\mu\text{m}$  波段亚纳秒脉冲激光输出。充高压气体的空芯光纤克服了传统掺铒或掺镱共掺光纤中非线性效应过强等功率提升的瓶颈问题,为同时实现高峰值功率和窄线宽的 1.5  $\mu\text{m}$  波段光纤激光输出提供了一种可行、有效的技术途径。进一步地,如果采用可调谐的 1  $\mu\text{m}$  波段抽运源,就可以获得 1.5  $\mu\text{m}$  波段的宽调谐激光输出,而 1.5  $\mu\text{m}$  可调谐激光器在国防、环境监测和医疗等领域具有广泛的应用前景。

## 参 考 文 献

- Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: Current status and future perspectives[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.
- Gupta S, Engin D, Puffenberger K, *et al.*. Fiber laser systems for space lasercom and remote sensing[C]. SPIE, 2013, 8876: 88760E.
- Zhang X, Diao W, Liu Y, *et al.*. Single-frequency polarized eye-safe all-fiber laser with peak power over kilowatt[J]. Applied Physics B, 2014, 115(1): 123-127.
- Jeong Y, Yoo S, Codemard C, *et al.*. Erbium: Ytterbium codoped large-core fiber laser with 297-W continuous-wave output power[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 573-579.
- Pavlov I, Ilbey E, Dülgergil E, *et al.*. High-power high-repetition-rate single-mode Er-Yb-doped fiber laser system[J]. Optics Express, 2012, 20(9): 9471-9475.
- Kotov L V, Likhachev M E, Bubnov M M, *et al.*. Record peak power single frequency erbium-doped fiber amplifiers [C]. SPIE, 2015, 9344: 934408.
- Guo K, Wang X, Zhou P, *et al.*. 4 kW peak power, eye-safe all-fiber master-oscillator power amplifier employing Yb-free Er-doped fiber[J]. Applied Optics, 2015, 54(3): 504-508.
- Meng Y, Salhi M, Niang A, *et al.*. Mode-locked Er: Yb-doped double-clad fiber laser with 75-nm tuning range[J]. Optics Letters, 2015, 40(7): 1153-1156.
- Lü Xiaoying, Han Qun, Liu Tiegeng. Theoretical investigation of high-power pulse-pumped Er-Yb codoped fiber amplifier [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0602003.  
吕晓英, 韩 群, 刘铁根. 高功率脉冲抽运 Er-Yb 共掺光纤放大器的理论研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0602003.
- Feng Suchun, Peng Jian, Peng Wanjing, *et al.*. Single-polarization, single-longitudinal-mode erbium-doped fiber laser based on twisting of polarization-maintaining fiber Bragg gratings[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(1): 0102002.  
冯素春, 彭 健, 彭万敬, 等. 基于扭绞保偏光纤光栅的单纵模单偏振掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0102002.
- Jin Dongchen, Sun Ruoyu, Wei Shouyu, *et al.*. 1570 nm nanosecond pulse generation from Er/Yb co-doped all-fiber dual-cavity laser with fiber-based passive Q-switched[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(10): 1002006.  
金东臣, 孙若愚, 魏守宇, 等. 基于光纤被动调 Q 的 1570 nm 纳秒脉冲掺铒双掺全光纤双腔激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1002006.
- 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.
- 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.
- Wang Zefeng, Yu Fei. Single-pass high-gain 1.9  $\mu\text{m}$  optical fiber gas Raman laser[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0814004.  
王泽锋, 于 飞. 单程高增益 1.9  $\mu\text{m}$  光纤气体拉曼激光器[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0814004.
- Wang Zefeng, Yu Fei. Diode-pumped single-pass mid-infrared fiber gas laser[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1014002.  
王泽锋, 于 飞. 半导体抽运的单程中红外光纤气体激光器[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1014002.