

单程高增益 1.9 μm 光纤气体拉曼激光器

王泽锋¹ 于 飞² William J Wadsworth² Jonathan C Knight²

(¹ 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)
² 巴斯大学物理系, 英国 巴斯 BA2 7AY)

摘要 报道了基于空心光子晶体光纤中氢气分子振动受激拉曼散射(SRS)的单程高增益 1.9 μm 光纤气体激光器。用一个线偏振 1064 nm 亚纳秒脉冲微芯激光器抽运一段长 6.5 m、充高压氢气的低损耗负曲率空心光纤,实现了到氢气分子一级振动斯托克斯波 1907 nm 的有效转换。气压为 2.3 MPa 时最大能量转换效率大于 27%,相应的量子转换效率大于 48%,激光平均功率约为 10 mW,峰值功率大于 2000 W。为实现高功率、窄线宽、大范围调谐的紧凑型中红外光纤激光器提供了一条潜在的有效途径。

关键词 激光器;光纤激光器;气体分子激光器;受激拉曼散射;拉曼阈值

中图分类号 TN24 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0814004

Single-Pass High-Gain 1.9 μm Optical Fiber Gas Raman Laser

Wang Zefeng¹ Yu Fei² William J Wadsworth² Jonathan C Knight²

(¹ College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)
² Department of Physics, University of Bath, Bath, BA2 7AY, UK)

Abstract A single-pass high-gain 1.9 μm fiber gas laser, based on vibrational stimulated Raman scattering in a hydrogen-filled hollow core photonic crystal fiber, is reported. Efficient conversion to the first-order vibrational Stokes wave of 1907 nm is obtained in a low loss negative curvature hollow core fiber with a length of 6.5 m, which is filled with high pressure hydrogen pumped with a linearly polarized 1064 nm microchip pulse laser. The maximum power conversion efficiency, which is more than 27% at 2.3 MPa hydrogen pressure, and a quantum conversion efficiency of 48% are achieved. The maximum laser average power is about 10 mW, and the maximum peak power is more than 2000 W. It provides a potentially effective method to obtain broadly tunable mid-IR fiber lasers of high power and narrow linewidth.

Key words lasers; fiber lasers; molecular gas lasers; stimulated Raman scattering; Raman threshold

OCIS codes 140.3070; 140.3550; 060.3510; 140.4130

1 引 言

自 1963 年被首次报道以来^[1],气体受激拉曼散射(SRS)受到了广泛的关注。相对固体和液体,气体分子的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,尤其是在紫外和红外波段^[2-3]。历史上,受有效作用距

离非常短的限制,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,同时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。为了增强抽运光与增益气体的相互作用,曾采用空心毛细玻璃管^[4]和高精度的法布里-珀罗腔^[5],但是有效作用距离非常有限,转换效率仍然很低。空心光子晶体光纤的出现为气体受激拉曼散射

收稿日期: 2014-02-25; 收到修改稿日期: 2014-04-25

基金项目: 国家国际科技合作专项项目(2012DFG11470)、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: 王泽锋(1980—),男,博士,副教授,主要从事光子晶体光纤、光纤气体激光器和光纤传感等方面的研究。

E-mail: hotrosemaths@163.com

提供了近乎理想的环境^[6]。它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,同时作用距离非常长,还可以通过合理设计光纤传输损耗谱控制各拉曼信号的有效增益,使得实现到所需波长的高效率拉曼转换成为可能。自2002年首次报道空心光纤中气体受激拉曼散射实验以来^[7],英国巴斯大学、德国马普量子光学所等单位开展了相关的工作^[8-13]。高效的受激拉曼散射已经在充氢气空心光纤中实现,拉曼阈值远远低于之前的实验^[8,10]。2007年,当Couny等^[9]用高峰值功率的1064 nm脉冲激光器抽运充氢气的Kagome空心光纤时,在输出的频率梳中观察到了1907 nm的拉曼信号。2013年,Trabold等^[13]在充氢气Kagome空心光纤中研究反斯托克斯波产生时,也观测到了一级振动斯托克斯波。但是,这些实验都使用了Kagome光纤,这种光纤主传输带很宽,且目前长波段的损耗较高,因此无法从根本上避免其他拉曼谱线的产生,很难实现到1907 nm的高效转换。最近,巴斯大学首次成功拉制了一种负曲率结构的低损耗空心光纤^[14-15]。这种光纤具有多个传输带,而且传输带的位置和传输损耗控制较为方便,使得高效地产生所需单一波长拉曼信号成为可能,特别适合通过气体分子的大频移拉曼转换实现具有重要应用价值的中红外光纤激光器。

本文在这种负曲率空心光纤中实现了有效的振动受激拉曼转换。利用线偏振1064 nm微芯脉冲激光器抽运一段长6.5 m的充高压氢气的负曲率空心光纤,实现了到氢气分子一级振动斯托克斯波

1907 nm的有效转换,气压为23 MPa时最大能量转换效率大于27%,平均功率约为10 mW,峰值功率大于2000 W。相对传统的2 μm 波段掺稀土光纤激光器^[16-21],该激光器在高功率下获得窄线宽方面具有很大的潜在优势。通过合理设计传输带、选择抽运源和增益气体,利用该类空心光纤可以实现波长范围覆盖紫外到红外、转换效率高、结构紧凑的新型光纤气体拉曼激光器,有效地结合了光纤激光器和气体激光器的许多优点^[22]。

2 实验装置

用于产生单程1.9 μm 光纤气体拉曼激光的实验装置如图1所示,其中插入的图片是实验所用负曲率空心光纤横截面扫描电子显微图(SEM)^[14]。光纤长6.5 m,纤芯直径(定义为圆弧顶之间的距离)约为53 μm ,实验测得的传输损耗谱如图2所示。可以看到氢气一级振动斯托克斯波1907 nm(拉曼频移4155 cm^{-1})在第一个传输带内,传输损耗约为0.35 dB/m,抽运激光波长1064 nm在第二个传输带内,传输损耗约为0.12 dB/m,其他带内主要拉曼谱线对应的传输损耗如表1所示,其中rot-s2和rot-as2分别代表二阶转动斯托克斯和反斯托克斯。抽运源为1064 nm微芯脉冲激光器,线宽约为0.3 nm,脉冲宽度约为0.7 ns,重复频率为7.25 kHz,平均输出功率为65 mW。两个含玻璃窗口的密封空气腔用于对空心光纤充气,输入的抽运光功率通过一个半波片和偏振分束棱镜(PBS)进行调节。由于实验所用空心光纤的传输损耗具有一定的偏振敏感性,

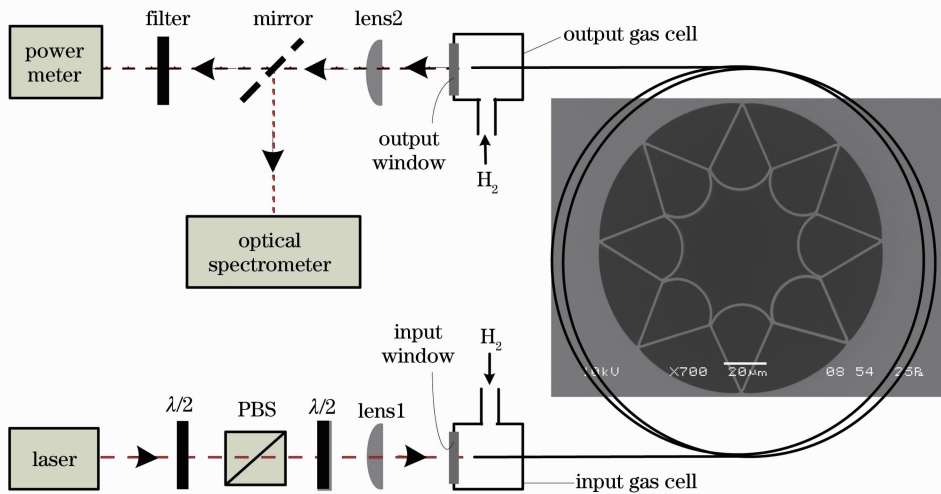


图1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

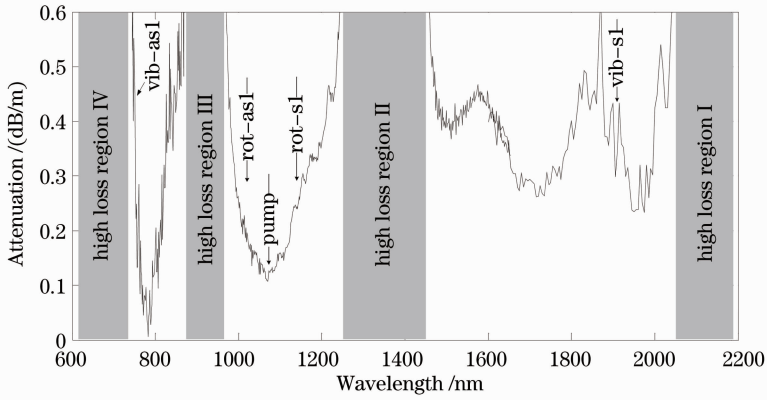


图 2 实验用空心光纤传输损耗的测量结果。vib-s1:一级振动斯托克斯谱线 1907 nm; vib-as1:一级振动反斯托克斯谱线 738 nm; rot-s1:一级转动斯托克斯谱线 1135 nm; rot-as1:一级转动反斯托克斯谱线 1001 nm

Fig. 2 Measured transmission losses of the tested hollow fiber. vib-s1: first-order vibrational Stokes 1907 nm; vib-as1: first-order vibrational anti-Stokes 738 nm; rot-s1: first-order rotational Stokes 1135 nm; rot-as1: first-order rotational anti-Stokes 1001 nm

表 1 氢气分子受激拉曼散射谱线的带内传输损耗

Table 1 Transmission losses of stimulated Raman scattering lines of H_2 within bands

Wavelength /nm	Frequency shift / cm^{-1}	Raman process	Fiber loss / (dB/m)
738	+4155	vib-as1	0.45
946	+587 \times 2	rot-as2	0.60
1001	+587	rot-as1	0.24
1064	0	pump	0.12
1135	-587	rot-s1	0.25
1215	-587 \times 2	rot-s2	0.46
1907	-4155	vib-s1	0.35

因此在分束棱镜之后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。抽运光通过一个焦距为 50 mm、1050~1620 nm 镀增透膜的平凸透镜(lens1,1064 nm 处透射率大于 98%, 1907 nm 处透射率大于 95%)和 1050~1620 nm 镀增透膜的输入玻璃窗口(抽运光透射率大于 98%)聚焦耦合到位于输入密封腔内的空心光纤,最大耦合效率约为 65%。产生的激光和残留的抽运光经输出密封腔上的未镀膜玻璃窗口(抽运光和激光波长处的透射率均约为 90%)输出,然后通过一个平凸透镜(lens2,与 lens1 参数相同)准直。准直光束通过一个中心波长为 2000 nm 的带通滤波片输入到光功率计探测激光功率,或通过一个可以转动的镀银反射镜输入到宽带光谱仪中测量输出光谱。

3 实验结果与分析

实验中对拉曼阈值、输出光谱、输出光功率及转换效率在不同气压下随输入抽运光功率的变化进行了测量,结果如图 3~5 所示。对于短脉冲激光抽运

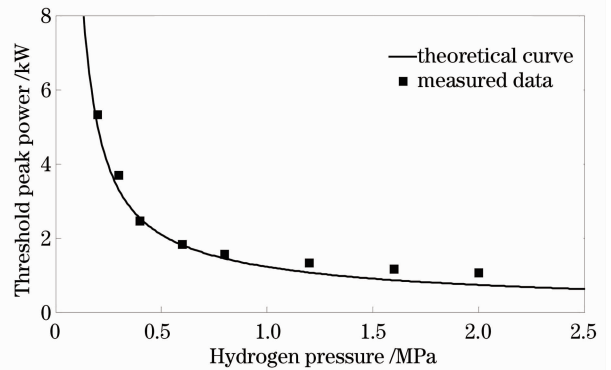


图 3 氢气分子一级振动受激拉曼散射阈值随气压的变化

Fig. 3 Evolution of vibrational SRS threshold for 6.5 m fiber with the H_2 pressure

的受激拉曼散射过程,群速度失配是限制抽运光与增益介质作用时间的重要因素,通常用走离长度 L_w 来衡量,其定义为^[23]

$$L_w = \tau / (v_{gp}^{-1} - v_{gs}^{-1}), \quad (1)$$

式中 τ 为抽运光脉冲长度, v_{gp} 和 v_{gs} 分别为光纤中抽运光和斯托克斯波的群速度。实验中,抽运光脉冲长

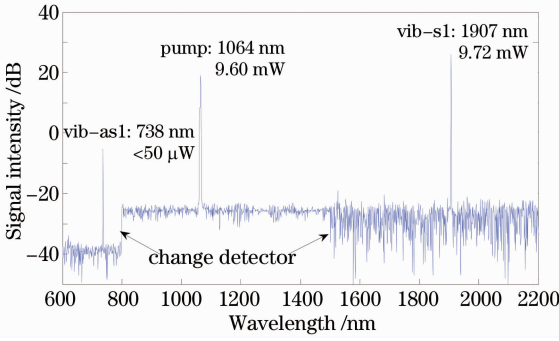


图 4 气压为 2.3 MPa, 耦合抽运功率为 36 mW 时的输出光谱

Fig. 4 Transmitted optical spectrum at the pressure of 2.3 MPa, and the coupled pump power of 36 mW

度约为 0.7 ns, 仿真结果表明抽运光波长 1064 nm 和一级振动斯托克斯波 1907 nm 的群折射率差小于 0.001, 由(1)式可以计算得到走离长度 L_w 约为 210 m, 远远大于实验所用光纤长度 6.5 m, 因此群速度色散效应可以忽略。

这里, 拉曼阈值定义为输出端斯托克斯波强度探测阈值 I_s 对应的抽运光功率, 即

$$I_s^{\text{th}} = I_{s0} \exp(G_{\text{th}}), \quad (2)$$

式中 G_{th} 为阈值净增益因子, 与探测水平相关; $I_{s0} = \Gamma/2$ 为自发斯托克斯波强度, 2Γ 为拉曼线宽^[24], Bischel 等^[25]通过大量的实验数据给出了一个经验公式为

$$2\Gamma = (309/\rho)(T/298)^{0.92} + [51.8 + 0.152(T - 298) + 4.85 \times 10^{-4}(T - 298)^2]\rho, \quad (3)$$

式中, 2Γ 单位为 MHz, 其中 T 为环境温度, 单位为 K; ρ 是粒子束密度, 单位为 Amagats (1 Amagats = 44.615 mol/m³), 室温下 (298 K) 一个大气压对应 0.92 Amagats。

当抽运光为矩形脉冲时, 瞬态 ($\Gamma\tau \ll 1, \gamma_g I_p z \Gamma\tau \gg 1$) 受激拉曼散射强度为^[24]

$$I_s(z, \tau) \propto \frac{\exp[2(2\gamma_g I_p z \Gamma\tau)^{1/2}]}{8\pi\tau}, \quad (4)$$

稳态 ($\Gamma\tau \gg 1, \gamma_g I_p z \gg 1$) 受激拉曼散射强度为^[24]

$$I_s(z, \tau) \propto \frac{\Gamma}{2(\pi\gamma_g I_p z)^{1/2}} \exp(\gamma_g I_p z), \quad (5)$$

式中 z 为作用距离, τ 为抽运光脉冲长度, I_p 为抽运激光强度, γ_g 为氢气分子一级振动受激拉曼散射稳态峰值增益系数, Bischel 等^[25]给出的经验公式为

$$\gamma_g = 9.37 \times 10^6 (52\rho/2\Gamma)(K_B/0.658)(v_p - 4155) \times (7.19 \times 10^9 - v_p^2)^{-2}, \quad (6)$$

γ_g 单位为 cm/W, 其中 $K_B = 0.658 \times (298/T)$, 是玻尔兹曼粒子数因子, T 为温度, 单位为 K; v_p 为抽运

光频率, 单位为 cm^{-1} 。

利用(2)、(4)、(5)式可以得到一个通用的受激拉曼阈值表达式

$$P_{\text{th}} = \frac{G'_{\text{th}} A_{\text{eff}}}{\gamma_g L_{\text{eff}}}, \quad (7)$$

式中 $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha_p L)]/\alpha_p$, 为有效光纤长度, L 为实际光纤长度, α_p 为光纤中抽运光的传输损耗, A_{eff} 为有效光纤基模面积。稳态时 $G'_{\text{th}} = G_{\text{th}} + \alpha$, 其中 α 为常数, 一般情况下比 G_{th} 小得多; 瞬态时 $G'_{\text{th}} = [\ln(4\pi\Gamma\tau) + G_{\text{th}}]^2 / (8\Gamma\tau)$, 与气压有关。

实验中, 拉曼阈值用一个快速响应的 InGaAs 探测器 (Thorlabs PDA10D, 波长响应范围为 1.2 ~ 2.6 μm , 带宽为 15 MHz) 测量输出脉冲峰值电压实现。为了尽可能消除残留抽运光对拉曼阈值测量的影响, 输出光束经过了两个光学滤波器 (Thorlabs FB2000-500 带通滤波器, 对抽运光的衰减大于 30 dB; Semrock Razor 1064 nm 高通滤波器, 对抽运光的衰减大于 30 dB), 然后利用一段标准多模光纤 (Thorlabs GIF50C, 芯径为 50 μm , 数值孔径 NA 约为 0.2) 输入到光电探测器中, 再将转换的电压信号传输到示波器进行观测。1907 nm 拉曼信号从空心光纤输出端到探测器的总传输系数大于 50%, 残留抽运光的衰减系数大于 60 dB。拉曼阈值测量结果如图 3 所示, 其中实心小方块标注的离散点为实验测量结果, 对应示波器显示电压约为 20 mV (自定义的阈值标准), 噪声约为 ± 5 mV, 实线为理论曲线, 对应的阈值净增益因子 G_{th} 为 6。可以看到, 当气压小于 1 MPa 时实验和理论结果非常吻合, 当气压大于 1 MPa 时, 测量结果略高于理论值, 且随着气压的增加差别呈递增趋势。这是由于气压较低时, 抽运激光脉冲长度 τ (0.7 ns) 小于氢气分子的失相时间 T_2 (约为 $1/\pi\Gamma$), 受激拉曼散射为瞬态过程; 随着气压的增加, T_2 逐渐变小, 受激拉曼散射过程慢慢由瞬态向稳态过度, 因此偏差逐渐变大。

图 4 是气压为 2.3 MPa、耦合抽运功率为 36 mW 时宽带光谱仪测量的输出光谱, 图中 800 nm 和 1500 nm 处噪声水平的变化是由光谱仪内部自动更换探测器引起的, 由于不同探测器的灵敏度不同, 图中的相对强度只能作为参考。从图中可以看到一级振动斯托克斯谱线 1907 nm 非常强, 相应的反斯托克斯谱线 738 nm 也清晰可见, 但实际的信号强度非常弱。尽管一阶和二阶转动受激拉曼谱线都在空心光纤传输带内, 但是实验中并没有观测到振动受激拉曼现象, 与文献[7]中的实验结果类似。这并不奇怪, 振

动受激拉曼散射比转动受激拉曼散射具有更高的增益系数。由(6)式可得室温下(298 K),当抽运源为 1064 nm 线偏振激光、气压为 2.3 MPa 时,氢气分子一级振动受激拉曼散射峰值增益系数约为 0.96 cm/GW。抽运光为圆偏振时一级转动受激拉曼散射(对应斯托克斯波 1135 nm,拉曼频移 587 cm^{-1})峰值拉曼增益系数约为 0.6 cm/GW^[12],是线偏振光抽运时的 1.5 倍^[8]。实验中使用的抽运源为线偏振,而且所用空心光纤由于芯径较大具有较好的偏振保持特性,因此振动拉曼增益系数约为转动拉曼的 2.5 倍。在光纤的初始段,由于拉曼信号的传输损耗远低于拉曼增益 $g = \gamma_g I_p$,自发振动和转动拉曼散射强度会随着抽运光强度线性增加^[19]。但是,由于振动拉曼散射具有更高的增益系数,随着作用距离的增加自发振动拉曼散射首先转换到受激拉曼散射,信号强度随光纤长度呈指数增长,越来越多的抽运光能量转换为一级振动斯托克斯信号,使得转动拉曼散射过程受到极大的压制^[24]。此外,低气压(小于 1 MPa)更有利于转动受

激拉曼散射^[7],实验中使用的高气压(2.3 MPa)则更有利于振动受激拉曼散射。

不同气压下输出信号随抽运光功率 P_C 变化的测量结果如图 5 所示。由于 738 nm 的反斯托克斯波功率(利用一个中心波长为 740 nm 的窄带滤波器测量)远远小于 1907 nm 的斯托克斯波和残留抽运光功率,因此可以忽略。1907 nm 信号功率 P_S 利用一个中心波长为 2000 nm、带宽为 500 nm 的带通滤波器(Thorlab FB2000-500, 1907 nm 信号的透射率测量值约为 78%,带外透射率小于 1%,对抽运光的衰减大于 40 dB)测量,残留抽运光功率 P_R 利用总的输出光功率减去 1907 nm 信号功率得到。从图 5(a)、(b)可以看到,当抽运光功率达到拉曼阈值后,1907 nm 信号出现并快速增长,随着抽运光功率的进一步增加转换效率趋于饱和;当抽运光功率一定时,1907 nm 信号功率随着气压的增加而增加,气压达到一定值后趋于饱和。耦合抽运光功率为 36 mW、气压为 2.3 MPa 时,最大功率转换效率约为 27%^[见图 5(a)左侧纵坐标],相应量子转换效率

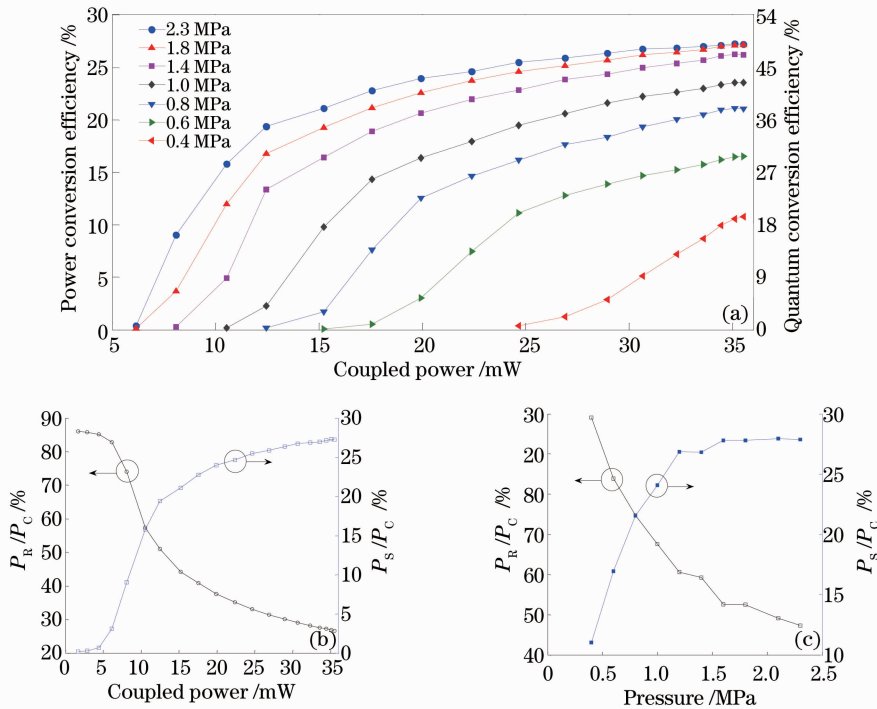


图 5 输出信号随抽运光功率和氢气压强的变化。(a)一级振动斯托克斯波 1907 nm 转换效率在不同气压下随耦合抽运光功率的变化;(b) 气压为 2.3 MPa 时残留抽运光和一级振动斯托克斯波功率随耦合抽运光功率的变化;(c) 耦合抽运功率为 36 mW 时残留抽运光和一级振动斯托克斯波功率随气压的变化

Fig. 5 Output power with pump power and hydrogen pressure. (a) Conversion efficiency of 1907 nm versus the coupled power at different hydrogen pressures; (b) evolution of the residual pump and the Stokes with coupled pump power at 2.3 MPa; (c) evolution of the residual pump and the Stokes with gas pressure for 36 mW coupled pump power

为 48% [见图 5(a) 右侧纵坐标]。实验中, 利用一个红外相机观测抽运光输出的远场光斑, 发现抽运光在空心光纤中是多模传输, 很大程度上限制了转换效率^[12-13], 这也是输出端还有不少残留抽运光的主要原因。考虑到残留的抽运光和光纤传输损耗, 实际的量子转换效率要高于测量结果。当耦合的抽运光功率为 36 mW 时, 输出信号随气压的变化如图 5(c) 所示, 可以看到气压低于 1.2 MPa 时转换效率随气压的增加快速增加, 当气压高于 1.5 MPa 后趋于饱和。

4 结 论

在负曲率空心光纤中利用气体分子的受激振动拉曼散射实现了从抽运波长 1064 nm 到斯托克斯波长 1907 nm 的有效转换, 最大能量转换效率大于 27%, 平均功率约为 10 mW, 峰值功率大于 2000 W。由于负曲率空心光纤芯径大、损伤阈值高、非线性效应引起的激光谱线展宽小、氢气分子的振动拉曼频移大, 通过有效设计空心光纤的传输带、合理选择可调谐的窄线宽高功率抽运源, 并结合光子晶体光纤的后处理技术, 可以实现高功率、窄线宽、大范围调谐的紧凑型中红外光纤激光器, 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

- 1 R W Minck, R W Terhune, W G Rado. Laser-stimulated Raman effect and resonant four-photon interactions in gases H₂, D₂, and CH₄ [J]. Appl Phys Lett, 1963, 3(10): 181-183.
- 2 D J Brink, D Proch. Efficient tunable ultraviolet source based on stimulated Raman scattering of an excimer-pumped dye laser [J]. Opt Lett, 1982, 7(10): 494-496.
- 3 T R Loree, C D Cantrell, D L Barker. Stimulated Raman emission at 9.2 μm from hydrogen gas [J]. Opt Comm, 1976, 17(2): 160-162.
- 4 P Rabinowitz, A Kaldor, R Brickman, *et al.*. Waveguide H₂ Raman laser [J]. Appl Opt, 1976, 15(9): 2005-2006.
- 5 L S Meng, K S Repasky, P A Roos, *et al.*. Widely tunable continuous-wave Raman laser in diatomic hydrogen pumped by an external-cavity diode laser [J]. Opt Lett, 2000, 25(7): 472-474.
- 6 R F Cregan, B J Mangan, J C Knight, *et al.*. Single-mode photonic band gap guidance of light in air [J]. Science, 1999, 285(5433): 1537-1539.
- 7 F Benabid, J C Knight, G Antonopoulos, *et al.*. Stimulated Raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber [J]. Science, 2002, 298(5592): 399-402.
- 8 F Benabid, G Bouwmans, J C Knight, *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]. Phys Rev Lett, 2004, 93(12): 123903.
- 9 F Couny, F Benabid, P J Roberts, *et al.*. Generation and photonic guidance of multi-octave optical-frequency combs [J].

- Science, 2007, 318(5853): 1118-1121.
- 10 F Couny, F Benabid, P S Light. Subwatt threshold CW Raman fiber-gas laser based on H₂-filled hollow core photonic crystal fiber [J]. Phys Rev Lett, 2007, 99(14): 143903.
- 11 B Beaudou, F Couny, Y Y Wang, *et al.*. Matched cascade of bandgap-shift and frequency-conversion using stimulated Raman scattering in a tapered hollow-core photonic crystal fibre [J]. Opt Express, 2010, 18(12): 12381-12390.
- 12 B M Trabold, A Abdolvand, T G Euser, *et al.*. Amplification of higher-order modes by stimulated Raman scattering in H₂-filled hollow-core photonic crystal fiber [J]. Opt Lett, 2013, 38(5): 600-602.
- 13 B M Trabold, A Abdolvand, T G Euser, *et al.*. Efficient anti-Stokes generation via intermodal stimulated Raman scattering in gas-filled hollow core PCF [J]. Opt Express, 2013, 21(24): 29711-29717.
- 14 Fei Yu, William J Wadsworth, Jonathan C Knight. Low loss silica hollow core fibers for 3~4 μm spectral region [J]. Opt Express, 2012, 20(10): 11153-11158.
- 15 Fei Yu, Jonathan C Knight. Spectral attenuation limits of silica hollow core negative curvature fiber [J]. Opt Express, 2013, 21(18): 21466-21471.
- 16 Q Fang, W Shi, K Kieu, *et al.*. High power and high energy monolithic single frequency 2 μm nanosecond pulsed fiber laser by using large core Tm-doped germanate fibers: experiment and modeling [J]. Opt Express, 2012, 20(15): 16410-16420.
- 17 Liu Jiang, Xu Jia, Wang Qian, *et al.*. High-pulse-energy passively mode-locked 2.0 μm thulium-doped ultrafast all-fiber laser [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0602009.
刘江, 徐佳, 王潜, 等. 高能量全光纤结构被动锁模 2.0 μm 掺钪超短脉冲光纤激光器 [J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602009.
- 18 Zhu Yadong, Zhou Pu, Zhang Hanwei, *et al.*. Analysis of maximum extractable power of 2 μm holmium-doped silica fiber lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0614004.
朱亚东, 周朴, 张汉伟, 等. 2 μm 硅基掺钪光纤激光器极限功率分析 [J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0614004.
- 19 Wang Pu, Liu Jiang. Progress and prospect on ultrafast Tm-doped fiber lasers at 2 μm wavelength [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0601002.
王璞, 刘江. 2.0 μm 掺钪超短脉冲光纤激光器研究进展及展望 [J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0601002.
- 20 Liu Jiang, Wang Pu. High-power narrow-bandwidth continuous wave thulium-doped all-fiber laser [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0102001.
刘江, 王璞. 高功率窄线宽全光纤结构掺钪连续光纤激光器 [J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102001.
- 21 Song Rui, Hou Jing, Wang Yanbin, *et al.*. Ytterbium-doped fiber laser passively mode-locked by a semiconductor saturable absorber mirror in linear cavity [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0102007.
宋锐, 侯静, 王彦斌, 等. 线形腔半导体可饱和吸收镜被动锁模掺镱光纤激光器 [J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0102007.
- 22 A V Vasudevan Nampoothiri, Andrew M Jones, C Fourcade-Dutin, *et al.*. Hollow-core optical fiber gas lasers (HOFGLAS): a review (invited) [J]. Opt Materials Express, 2012, 2(7): 948-961.
- 23 G P Agrawal. Nonlinear Fiber Optics [M]. Amsterdam: Elsevier Inc, 2009, 8.
- 24 M G Raymer, J Mostowski. Stimulated Raman scattering: unified treatment of spontaneous initiation and spatial propagation [J]. Phys Rev A, 1981, 24(4): 1980-1993.
- 25 W K Bischel, M J Dyer. Wavelength dependence of the absolute Raman gain coefficient for Q(1) transition in hydrogen [J]. J Opt Soc Am B, 1986, 3(5): 677-682.