

# 基于空芯光纤中氢气受激拉曼散射的 1.7 $\mu\text{m}$ 光纤激光光源研究

黄威<sup>1,2</sup>, 崔宇龙<sup>1,2</sup>, 李智贤<sup>1,2</sup>, 周智越<sup>1,2</sup>, 王泽锋<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>国防科技大学前沿交叉学科学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410073;

<sup>2</sup>国防科技大学前沿交叉学科学院高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

**摘要** 报道了一种基于空芯光子晶体光纤中氢气受激拉曼散射的新型 1.7  $\mu\text{m}$  光纤激光光源。建立了仅包含泵浦光和一阶斯托克斯光的简单稳态耦合波方程, 并进行了仿真计算。采用自制的 1550 nm 纳秒脉冲光纤放大器, 泵浦一段长约 3 m、充高压氢气的商用空芯光子晶体光纤, 利用氢气分子的转动受激拉曼散射实现了 1705 nm 斯托克斯波的有效转换。气压为 1.2 MPa 时, 最大平均输出功率约 0.5 W (单脉冲能量约为 2.5  $\mu\text{J}$ ), 最大光光转换效率约为 32% (相对总的泵浦功率)。研究结果为实现高功率 1.7  $\mu\text{m}$  波段近红外激光输出提供了一条有效的新途径。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 受激拉曼散射; 拉曼激光器; 空芯光纤

中图分类号 TN24

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0514001

## Research on 1.7 $\mu\text{m}$ Fiber Laser Source Based on Stimulated Raman Scattering of Hydrogen in Hollow-core Fiber

Huang Wei<sup>1,2</sup>, Cui Yulong<sup>1,2</sup>, Li Zhixian<sup>1,2</sup>, Zhou Zhiyue<sup>1,2</sup>, Wang Zefeng<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

<sup>2</sup>Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** A new 1.7  $\mu\text{m}$  fiber laser source based on stimulated Raman scattering of hydrogen in hollow photonic crystal fiber is reported. Simple steady-state coupled wave equations containing only pump light and first-order Stokes light are established and simulated. A homemade 1550 nm nanosecond pulse fiber amplifier is used to pump a commercial hollow photonic crystal fiber about 3 m long and filled with high-pressure hydrogen. The rotational stimulated Raman scattering of hydrogen molecules is used to realize the efficient conversion of Stokes waves at 1705 nm. When the air pressure is 1.2 MPa, the maximum average output power is about 0.5 W (the monopulse energy is about 2.5  $\mu\text{J}$ ), and the maximum optic-to-optic conversion efficiency is about 32% (relative to the total pump power). Research results provide an effective new way to realize the output of high-power 1.7  $\mu\text{m}$ -band near-infrared laser.

**Key words** lasers; fiber lasers; stimulated Raman scattering; Raman lasers; hollow-core fibers

**OCIS codes** 140.3510; 140.3550; 290.5910; 060.5295

## 1 引 言

1.7  $\mu\text{m}$  波段激光由于其独特的光谱特性, 受到了国内外广泛的关注。由于脂肪等含水量较少的生物组织对 1.7  $\mu\text{m}$  波段激光存在较强的吸收, 该波段激光在生物组织和生物材料中有着较大的穿透深

度, 因此该波段激光光源在光学相干层析成像 (OCT)、光声成像 (PAI) 中有着重要的应用<sup>[1-2]</sup>。因为 C—H 键的吸收峰位于 1.7  $\mu\text{m}$  波段, 所以该波段光源也被广泛应用于富含 C—H 键的材料加工和物质检测领域<sup>[3-4]</sup>。同时, 1.7  $\mu\text{m}$  波段激光是镉离子的吸收线之一, 所以该波段激光也被用于泵浦掺镉

收稿日期: 2019-09-25; 修回日期: 2019-10-16; 录用日期: 2019-11-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11974427)、湖南省自然科学基金杰出青年科学基金项目(2019JJ20023)

\* E-mail: hotrosemaths@163.com

光纤以产生中红外激光<sup>[5-6]</sup>。目前,产生该波段光纤激光输出的途径主要有三种<sup>[7]</sup>:掺铥或者铥钕共掺光纤,掺铋光纤,以及常规光纤级联受激拉曼散射。铥的增益谱带范围较宽(1600~2200 nm),但由于其在1.7 μm波段的增益较低,因此产生1.7 μm波段近红外光的难度较大<sup>[8-9]</sup>。掺铋光纤能够有效产生1.7 μm波段激光,但这种光纤制备工艺尚未成熟,成本昂贵<sup>[7,10]</sup>。在1.5 μm波段激光的泵浦下,通过常规光纤的受激拉曼散射能够实现往长波方向的波长频移,但是一般需要两级级联的结构才能实现1.7 μm附近波段的激光输出<sup>[11]</sup>,结构相对比较复杂。近年来受到广泛关注的光纤气体拉曼激光器为实现1.7 μm波段光纤激光输出提供了一种全新的思路。

基于空芯光纤的气体受激拉曼散射<sup>[12]</sup>已经被证明是产生新波长激光输出的有效手段,得到了国内外广泛研究<sup>[12-22]</sup>。光纤气体拉曼激光器能够有效结合气体激光器的输出波长范围广和光纤激光器的输出光束质量好、效率高、热管理方便等优势,通过设计具有合适传输带的空芯光纤,充入合适的气体增益介质,能够有效实现从紫外到红外波段激光输出。目前,采用氢气作为增益介质,已经实现了1 μm波段<sup>[13-14]</sup>、2 μm波段<sup>[15]</sup>和4 μm波段<sup>[22]</sup>的光纤气体拉曼激光输出。Benabid等<sup>[13]</sup>利用1064 nm激光泵浦充氢气的空芯光纤,实现了量子效率高达92%的1135 nm激光输出。本课题组利用氢气的振动受激拉曼散射在空芯光纤中实现了1064 nm向1907 nm激光的转化,量子效率约为48%<sup>[15]</sup>。Astapovich等<sup>[22]</sup>在充氢气的空芯光纤内实现了1.56 μm向4.42 μm波段的激光转化,拉曼激光输出功率达1.4 W。采用甲烷作为增益介质,已经实现了1.5 μm波段<sup>[16,18]</sup>和3 μm波段<sup>[20-21]</sup>的激光输出。本课题组利用种子光注入,在充甲烷的空芯光纤内实现了光光转化效率高达66.4%的1.54 μm激光输出<sup>[16]</sup>。本课题组还采用级联结构,在两段充甲烷的空芯光纤内实现了1 μm向2.8 μm激光的转化,总量子效率为65%<sup>[21]</sup>。

本文在商用空芯光子晶体光纤中,利用氢气分子的受激转动拉曼散射实现了从1550 nm泵浦波长到1705 nm一阶转动斯托克斯波长的有效转换,最大光光转换效率约为32%,平均输出功率约为0.5 W,对应的脉冲能量约为2.5 μJ。泵浦源为自制的脉冲光纤放大器,其输出光纤通过熔接的方式与空芯光子晶体光纤连接,相比于之前报道

的空间结构光纤气体激光器,系统的稳定性得到大大提高,为下一步实现系统的全光纤化打下了很好的基础。

## 2 理论分析与仿真

通常空芯光纤中气体受激拉曼散射过程非常复杂,特别是短脉冲激光泵浦的情况。由于使用的空芯光子晶体光纤传输损耗谱的特殊性,高阶斯托克斯光和反斯托克斯光均位于传输带外,本文仅需考虑一阶斯托克斯光的产生。同时,本文使用的泵浦激光脉冲宽度(约为10 ns)远大于氢气分子的退相时间(小于1 ns)<sup>[23]</sup>,属于稳态受激拉曼散射。因此,理论模型可以大大简化,受激拉曼散射过程可由下述耦合波方程给出:

$$\frac{dI_s}{dz} = g_r I_s I_p - \alpha_s I_s, \quad (1)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -\frac{\nu_p}{\nu_s} g_r I_s I_p - \alpha_p I_p, \quad (2)$$

式中: $I_s$ 和 $I_p$ 分别为斯托克斯光和泵浦光的光强; $z$ 为光沿光纤方向传输的位置; $\alpha_s$ 和 $\alpha_p$ 分别为斯托克斯光和泵浦光的损耗; $\nu_s$ 和 $\nu_p$ 分别为斯托克斯光和泵浦光的频率; $g_r$ 为稳态拉曼增益系数<sup>[24]</sup>,可由下式给出:

$$g_r = \frac{2\lambda_s^2}{h\nu_s} \frac{\Delta N}{\pi\Delta\nu} \frac{\partial\sigma}{\partial\Omega}, \quad (3)$$

式中: $\Delta N$ 为振转能态之间的粒子数差值; $\Delta\nu$ 为拉曼线宽; $\partial\sigma/\partial\Omega$ 为拉曼微分散射截面; $\lambda_s$ 为斯托克斯光的波长; $h$ 为普朗克常数。

利用上述理论模型,对空芯光纤长度和气体拉曼增益系数这两个影响气体拉曼激光输出的重要参数进行了仿真。仿真计算时,泵浦光边界条件设为耦合进空芯光纤的泵浦光强(脉冲功率与模场面积之比),斯托克斯光边界条件设为一个噪声光子的光强(光子能量与退相时间、模场面积的比值)。其中退相时间根据文献<sup>[23]</sup>计算,模场面积为光纤相关参数。 $\alpha_s$ 和 $\alpha_p$ 分别为0.65 dB·m<sup>-1</sup>和0.15 dB·m<sup>-1</sup>,泵浦波长和拉曼波长分别为1550 nm和1705 nm时,仿真结果如图1所示。从图1(a)可以看到,随着光纤距离的增长,功率阈值逐渐下降,这表明光纤越长,气体受激拉曼散射越容易发生。但是光纤越长,传播损耗也越大,使得输出拉曼功率反而下降,因此存在一个最佳长度,使得最终拉曼输出功率最大。从图1(a)可以看到,在其他参数不变的条件下,最佳长度与最大

泵浦功率有关。从图1(b)可以看到,随着拉曼增益(气压)的增加,空芯光纤内受激拉曼散射的阈值逐渐下降,输出的拉曼光功率逐渐上升,因此提高气压有利于拉曼转化。但是,随着气压的进一

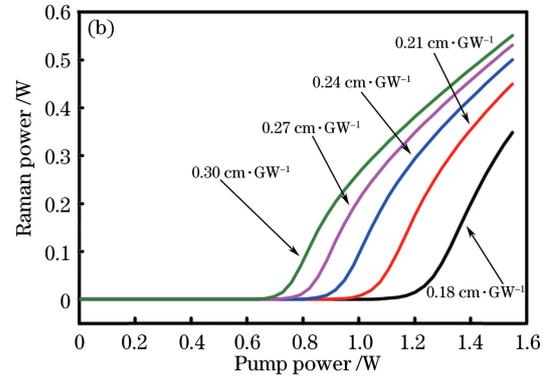
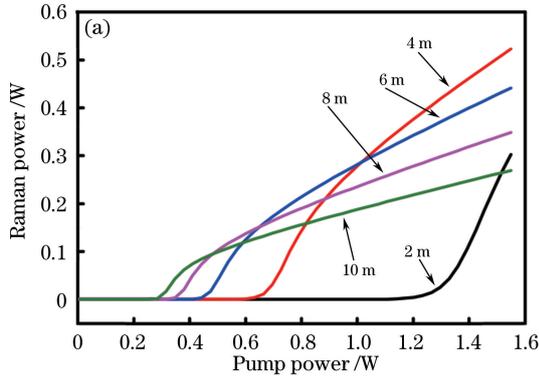


图1 仿真结果。(a)不同光纤长度下的功率曲线图(拉曼增益  $0.26 \text{ cm} \cdot \text{GW}^{-1}$ );(b)不同拉曼增益下的功率曲线图(光纤长度为  $3.2 \text{ m}$ )

Fig. 1 Simulation results. (a) Power curves under different fiber lengths (Raman gain is  $0.26 \text{ cm} \cdot \text{GW}^{-1}$ ); (b) power curves under different Raman gains (fiber length is  $3.2 \text{ m}$ )

### 3 实验装置

用于产生单程  $1.7 \mu\text{m}$  激光输出的光纤气体拉曼激光器实验装置如图2所示,泵浦源为自行搭建的  $1550 \text{ nm}$  脉冲光纤放大器,脉冲宽度约为  $12 \text{ ns}$ ,重复频率为  $200 \text{ kHz}$ ,最大平均输出功率约为  $1.5 \text{ W}$ 。放大器的输出光纤为单模光纤,与光纤分束器(实测分束比为  $99.16:0.84$ )熔接在一起以实时监测泵浦源的输出功率。分束器的主纤与空芯光子晶体光纤通过熔接的方式连接<sup>[25]</sup>,耦合效率约为  $70\%$ (利用真空条件下输出泵浦功率和光纤传输损耗计算得到)。熔接的方式大大提高了系统的稳定性,并且避免了空间光路耦合方式下激光打坏光纤端面的情况。空芯光纤的输出端密封于带有玻璃窗口(对泵浦光和激光的透过率均约为  $95\%$ )的气体腔中,气体腔体的一侧伸出一根导管分成三路,分别连接着气压计,高压气瓶和真空抽气泵。充气前先利用气泵对系统抽真空(长于  $10 \text{ h}$ ),之后通过缓慢调节阀门充入高压气体,静置一晚待气压平衡后开始实验,实验充入的拉曼增益气体为氢气。泵浦光进入空芯光纤后,受激拉曼散射产生的激光和残留的泵浦光经气体腔的输出窗口输出,然后通过一个平凸透镜准直。准直光束通过一个安装在翻转架上的中心波长为  $1550 \text{ nm}$ 的带通滤波片(通过率约为  $67\%$ )输入到光功率计中以探测激光功率,或通过一个可以翻

步增加,可能会产生高阶斯托克斯光或反斯托克斯光,使得一阶斯托克斯光输出功率下降。因此,为获得一阶斯托克斯光的最大输出功率,气压也存在一个最佳值。

转的镀银反射镜输入到光谱仪中以测量输出光谱。探测功率时,翻转带通滤波片,输出光束直接进入光功率计,即可测量总输出功率;翻转带通滤波片,输出光束透过滤波片进入光功率计,即可测量残余泵浦功率;总输出功率和残余泵浦功率相减,即可得到拉曼激光功率。

实验用的空芯光纤为商用带隙型空芯光子晶体光纤(HC-PCF, HC-1550-02 NKT Photonics, 丹麦),其横截面示意图如图2所示。纤芯直径约为  $10 \mu\text{m}$ ,包层直径约为  $120 \mu\text{m}$ ,模场直径约为  $9 \mu\text{m}$ ,实验用的光纤长度为  $3.2 \text{ m}$ 。采用标准的截断法测量了其传输损耗谱,结果如图3所示。可以看到,该空芯光子晶体光纤的传输带为  $1.5 \sim 1.7 \mu\text{m}$ ,泵浦光波长  $1550 \text{ nm}$  和氢气的一阶转动斯托克斯波长  $1705 \text{ nm}$  都位于该传输带内,传输损耗值较大,分别约为  $0.3 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$  和  $0.4 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ (由于该产品是8年前购买的,损耗比产品提供的值要高,并且存在损耗非均匀分布的可能性)。

### 4 实验结果分析与讨论

实验中测量了单程  $1.7 \mu\text{m}$  光纤气体拉曼激光输出光谱,输出光的时域特性及不同氢气压下总输出激光功率、拉曼激光功率、残余泵浦光功率和拉曼转化效率随总的泵浦光功率的变化,结果如图4~6所示,其中拉曼转化效率定义为拉曼光功率与总泵浦光功率的比值。

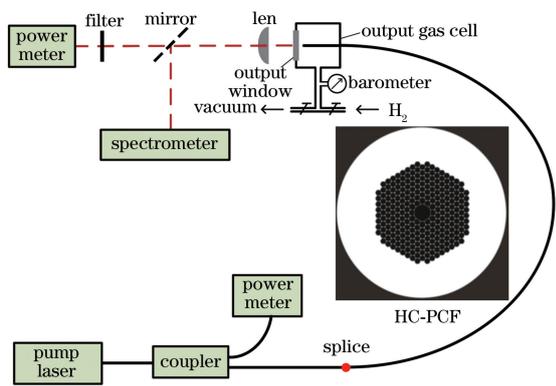


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Experimental setup

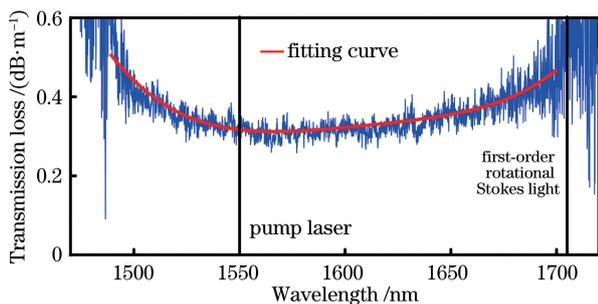


图 3 实验用空芯光纤传输损耗的测量结果

Fig. 3 Measured transmission losses of hollow-core fiber

图 4(a)是气压为 0.6 MPa 时光谱仪测量的输出光谱。可以看到,在空芯光子晶体光纤内发生的氢气受激拉曼散射的光谱十分干净,只有一条拉曼谱线,为一级转动斯托克斯 1705 nm (频移  $587\text{ cm}^{-1}$ ),这是由空芯光纤的传输特性决定的。该空芯光子晶体光纤的传输带较窄,仅有 1550 nm 的泵浦光谱线和 1705 nm 的一级转动斯托克斯谱线位于传输带内,因此 1705 nm 拉曼谱线损耗很低,氢气的其他拉曼谱线的损耗很高,故在一定峰值功率泵浦光的作用下,该空芯光子晶体光纤仅产生 1705 nm 拉曼激光,而不产生其他拉曼谱线的激光,这极大地提高了目标波段的氢气受激拉曼散射的效率。图 4(b)、(c)分别是 1550 nm 泵浦激光和 1705 nm 拉曼激光的光谱图(光谱仪扫描精度设为 0.05 nm)。

利用快速光电探测器和宽带示波器对拉曼激光和残余泵浦光的时域特性进行了测量,结果如图 5 所示。其中,图 5(a)显示拉曼激光脉冲的重复频率与泵浦光的重复频率一致,均为 200 kHz。发生受激拉曼散射后,输出的拉曼光和残余泵浦光的脉冲形状如图 5(b)所示,可以明显地看到,泵浦脉

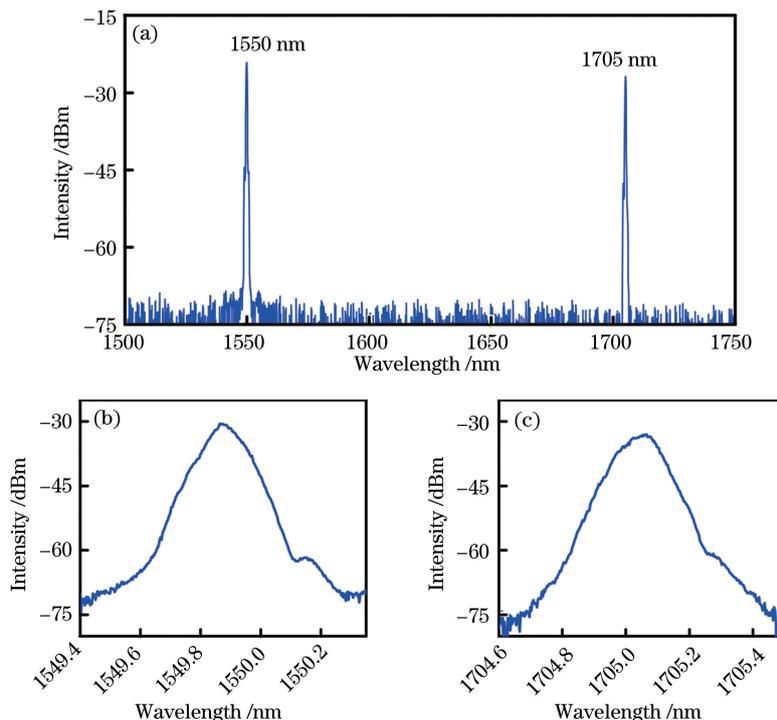


图 4 光谱图。(a) 0.6 MPa 气压下 HC-PCF 输出光谱图; (b) 1550 nm 泵浦光和 (c) 1705 nm 拉曼光的精细光谱

Fig. 4 Spectra. (a) Output spectrum of HC-PCF at 0.6 MPa pressure; fine spectra of (b) 1550 nm pump laser and (c) 1705 nm Raman laser

冲的一部分完全转化成了拉曼脉冲,只留下脉冲前沿的小部分未发生转化。这是由于泵浦脉冲前沿的

部分能量并未达到受激拉曼散射的阈值,因此并没有发生转化。但泵浦脉冲的后沿完全发生受激拉曼

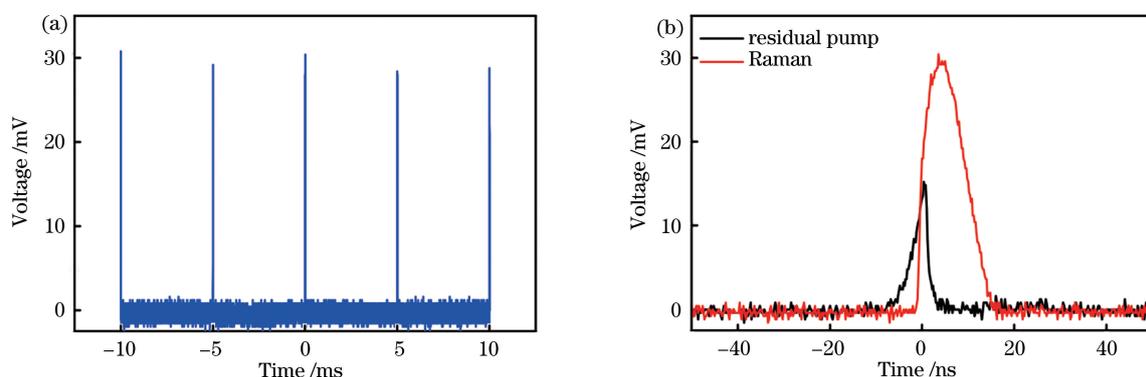


图 5 输出信号时域图。(a) 1.2 MPa 气压下拉曼信号重复频率特性;(b) 1.2 MPa 气压下最大功率输出时拉曼光和残余泵浦光脉冲形状

Fig. 5 Time domain diagram of output signal. (a) Repetition frequency of Raman signal at 1.2 MPa pressure; (b) pulse shapes of Raman signal and residual pump light at 1.2 MPa pressure under maximum power output

散射转化,原因是氢气分子的转动态与基态的能态变化存在一定的弛豫时间,因此泵浦脉冲后沿的能量能够完全转化为拉曼光能量。

不同气压下输出信号随泵浦光功率的变化如图 6 所示。可以看到,当泵浦光功率达到阈值以后,由于受激拉曼散射,泵浦光逐步消耗,拉曼光开始产生,并且功率随着泵浦光功率的增加而呈近似线性增长。另外,与第 2 节的数值仿真结果相类似,氢气

气压的增大引起了拉曼增益的提高,导致受激拉曼散射的阈值下降,因此可以明显观察到泵浦功率阈值下降。受激拉曼散射阈值的下降导致泵浦光脉冲中低于阈值部分的功率下降,如图 6(b)所示,因此可以观察到随着气压的增大,残余泵浦光的功率不断下降。当气压为 1.2 MPa 时,空芯光纤输出的拉曼光转化效率最大,约为 32%,对应最大输出功率约为 0.5 W,脉冲能量约为 2.5  $\mu$ J。在 1.2 MPa

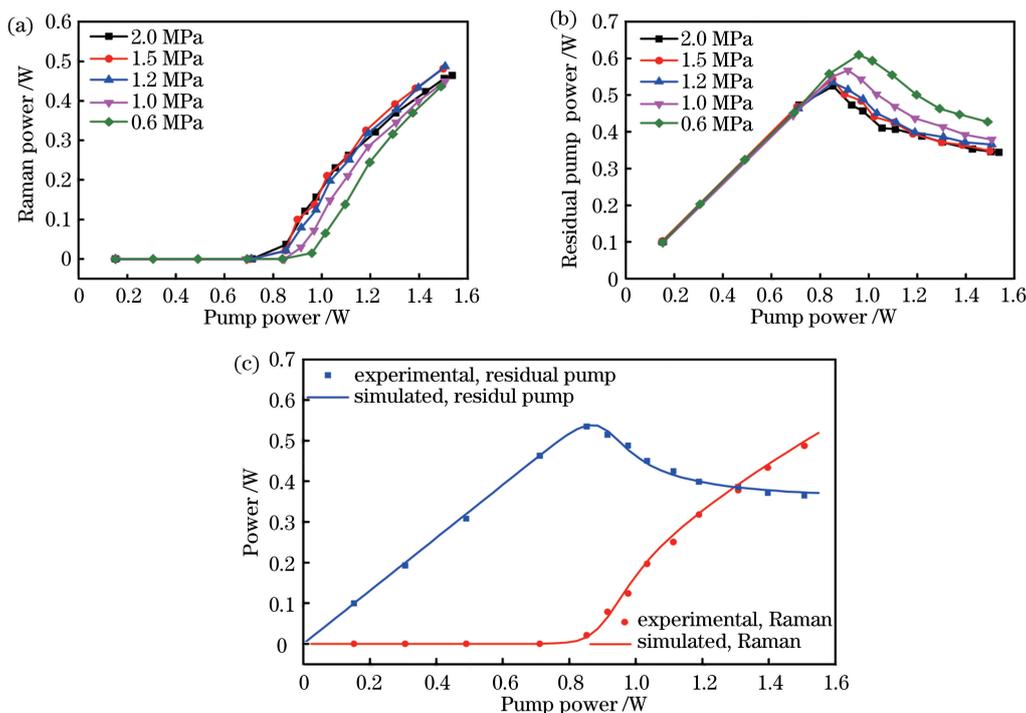


图 6 输出信号功率随泵浦光功率和氢气压强的变化曲线图。(a)不同气压下拉曼光功率随泵浦光功率的变化;(b)不同气压下残余泵浦光功率随泵浦光功率的变化;(c) 1.2 MPa 气压下,拉曼光功率和残余泵浦光功率随泵浦功率的变化

Fig. 6 Output powers under different pump powers and hydrogen pressures. (a) Raman light power versus pump power at different pressures; (b) residual pump power versus pump power at different pressures; (c) Raman power and residual pump power versus pump power under 1.2 MPa pressure

气压下,实验测量和使用(1)、(2)式数值计算得到的功率曲线图如图 6(c)所示。其中,仿真公式中的泵浦和拉曼光损耗分别为  $0.15 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$  和  $0.65 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ ,考虑到光纤损耗的非均匀性,此处作了适当调整。拉曼增益在参考文献[26]中给出。可以看到,实验产生  $1.7 \mu\text{m}$  激光的阈值比较高(约为  $0.8 \text{ W}$ ),使得残余泵浦光功率较高,极大地影响了拉曼转化效率,这主要由较短的光纤长度和较大的光纤损耗所导致。根据数值计算可知,实验的最佳长度为  $3 \sim 4 \text{ m}$ ,因此改变长度对输出功率影响不大;但是如果选用损耗较低的光纤,可以减少拉曼光损耗,进而提高拉曼光功率和拉曼转化效率。

## 5 结 论

利用充氢气的商用空芯光子晶体光纤实现了高效的  $1.7 \mu\text{m}$  单程激光输出。泵浦源为自制的  $1550 \text{ nm}$  纳秒脉冲光纤放大器,利用一段  $3.2 \text{ m}$  长的空芯光纤中的高压氢气分子的转动受激拉曼散射,得到了  $1705 \text{ nm}$  斯托克斯光输出,最大输出功率约为  $0.5 \text{ W}$ (单脉冲能量约为  $2.5 \mu\text{J}$ ),对应的最大光光转化效率约为  $32\%$ (相对总的泵浦功率)。泵浦源的输出光纤和空芯光子晶体光纤通过熔接的方式连接在一起,能够有效提高系统的稳定性,为下一步实现系统的全光纤化打下了很好的基础。研究结果为实现  $1.7 \mu\text{m}$  波段光纤激光输出提供了一种简单有效的新方式。

## 参 考 文 献

- [1] Jung E J, Lee J H, Rho B S, et al. Spectrally sampled OCT imaging based on  $1.7\text{-}\mu\text{m}$  continuous-wave supercontinuum source [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2012, 18(3): 1200-1208.
- [2] Bashkatov A N, Genina É A, Kochubey V I, et al. Optical properties of the subcutaneous adipose tissue in the spectral range  $400\text{-}2500 \text{ nm}$  [J]. Optics and Spectroscopy, 2005, 99(5): 836-842.
- [3] Vaidyanathan M, Killinger D K. Tunable  $1.7\text{-}\mu\text{m}$  laser spectrometer for optical absorption measurements of  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ , and high-temperature  $\text{HCl}$ [J]. Applied Optics, 1993, 32(6): 847-856.
- [4] Mingareev I, Weirauch F, Olowinsky A, et al. Welding of polymers using a  $2 \mu\text{m}$  thulium fiber laser [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(7): 2095-2099.
- [5] Majewski M R, Woodward R I, Jackson S D. Dysprosium-doped ZBLAN fiber laser tunable from  $2.8 \mu\text{m}$  to  $3.4 \mu\text{m}$ , pumped at  $1.7 \mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2018, 43(5): 971-974.
- [6] Majewski M R, Woodward R I, Carreé J Y, et al. Emission beyond  $4 \mu\text{m}$  and mid-infrared lasing in a dysprosium-doped indium fluoride ( $\text{InF}_3$ ) fiber [J]. Optics Letters, 2018, 43(8): 1926-1929.
- [7] Zhang Y, Zhang P, Liu P, et al. Fiber light source at  $1.7 \mu\text{m}$  waveband and its applications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(9): 090002. 张岩, 张鹏, 刘鹏, 等.  $1.7 \mu\text{m}$  波段光纤光源研究进展及其应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 090002.
- [8] Daniel J M O, Simakov N, Tokurakawa M, et al. Ultra-short wavelength operation of a thulium fibre laser in the  $1660\text{-}1750 \text{ nm}$  wavelength band [J]. Optics Express, 2015, 23(14): 18269-18276.
- [9] Agger S, Povlsen J H, Varming P. Single-frequency thulium-doped distributed-feedback fiber laser [J]. Optics Letters, 2004, 29(13): 1503-1505.
- [10] Zhang P, Wu D, Du Q L, et al.  $1.7 \mu\text{m}$  band narrow-linewidth tunable Raman fiber lasers pumped by spectrum-sliced amplified spontaneous emission [J]. Applied Optics, 2017, 56(35): 9742-9748.
- [11] Alexander V V, Ke K, Xu Z, et al. Photothermolysis of sebaceous glands in human skin *ex vivo* with a  $1708 \text{ nm}$  Raman fiber laser and contact cooling [J]. Lasers in Surgery and Medicine, 2011, 43(6): 470-480.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Couny F, Benabid F, Light P S. Subwatt threshold CW Raman fiber-gas laser based on  $\text{H}_2$ -filled hollow-core photonic crystal fiber [J]. Physical Review Letters, 2007, 99(14): 143903.
- [15] Wang Z F, Yu F, Wadsworth W J, et al. 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, Wadsworth W J, 等. 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.
- [16] Chen Y B, Gu B, Wang Z F, et al.  $1.5 \mu\text{m}$  fiber gas Raman laser source [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36

- (5): 0506002.  
 陈育斌, 顾博, 王泽锋, 等. 1.5  $\mu\text{m}$  光纤气体拉曼激光光源[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0506002.
- [17] Gu B, Chen Y B, Wang Z F. Red, green and blue laser emissions from  $\text{H}_2$ -filled hollow-core fiber by stimulated Raman scattering[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0806005.  
 顾博, 陈育斌, 王泽锋. 基于空芯光纤中氢气级联 SRS 的红绿蓝色激光[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0806005.
- [18] Chen Y B, Wang Z F, Gu B, et al. 1.5  $\mu\text{m}$  fiber ethane gas Raman laser amplifier [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0514002.  
 陈育斌, 王泽锋, 顾博, 等. 1.5  $\mu\text{m}$  光纤乙烷气体拉曼激光放大器 [J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0514002.
- [19] Gladyshev A V, Kosolapov A F, Khudyakov M M, et al. 2.9, 3.3, and 3.5  $\mu\text{m}$  Raman lasers based on revolver hollow-core silica fiber filled by  $^1\text{H}_2/\text{D}_2$  gas mixture [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(3): 0903008.
- [20] Cao L, Gao S F, Peng Z G, et al. High peak power 2.8  $\mu\text{m}$  Raman laser in a methane-filled negative-curvature fiber [J]. Optics Express, 2018, 26(5): 5609-5615.
- [21] Li Z X, Huang W, Cui Y L, et al. Efficient mid-infrared cascade Raman source in methane-filled hollow-core fibers operating at 2.8  $\mu\text{m}$  [J]. Optics Letters, 2018, 43(19): 4671-4674.
- [22] Astapovich M S, Gladyshev A V, Khudyakov M M, et al. Watt-level nanosecond 4.42- $\mu\text{m}$  Raman laser based on silica fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(1): 78-81.
- [23] Herring G C, Dyer M J, Bischel W K. Temperature and density dependence of the linewidths and line shifts of the rotational Raman lines in  $\text{N}_2$  and  $\text{H}_2$  [J]. Physical Review A, 1986, 34(3): 1944-1951.
- [24] Bischel W K, Dyer M J. Wavelength dependence of the absolute Raman gain coefficient for the Q(1) transition in  $\text{H}_2$  [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1986, 3(5): 677-682.
- [25] Li X Q, Gao S F, Wang Y Y, et al. Fusion splice technique of hollow-core photonic crystal fiber [J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(6): 102-106.  
 李晓倩, 高寿飞, 汪滢莹, 等. 空芯光子晶体光纤熔接技术研究[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(6): 102-106.
- [26] Tsunemi A, Nagasaka K, Tashiro H. Precise measurement of the rotational Raman gain coefficient in para-hydrogen by the large-signal method [J]. Applied Optics, 1992, 31(21): 4165-4171.