

连续波 1.7 μm 全光纤气体拉曼激光光源李昊^{1,3}, 黄威^{1,2}, 裴闻喜^{1,3}, 周智越^{1,2}, 崔宇龙^{1,2}, 王蒙^{1,2,3}, 王泽锋^{1,2,3*}¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;²脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410073;³高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

摘要 报道了第一个连续波全光纤气体拉曼激光光源。采用实芯单模光纤与带隙型空芯光纤熔接的方法, 制备了长度为 50 m、充高压氢气的全光纤结构气体腔, 以一个高功率连续波 1540 nm 光纤放大器为泵浦源, 利用氢气分子的纯转动受激拉曼散射有效实现了 1693 nm 斯托克斯连续激光输出。进一步, 通过在气体腔输出端熔接一个中心波长为 1540 nm 的高反射率光纤布拉格光栅, 使得拉曼阈值降低了 38.2%, 斯托克斯光输出功率最大为 2.15 W, 腔内拉曼转换效率为 72.2%, 由于熔接损耗, 相对总泵浦光功率的光光转换效率为 31.7%。该研究结果为实现高效紧凑的高功率 1.7 μm 光纤激光器提供了一条可行的技术方案。

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/AOS202141.0314001

Continuous-Wave 1.7 μm All-Fiber Gas Raman Laser SourceLi Hao^{1,3}, Huang Wei^{1,2}, Pei Wenxi^{1,3}, Zhou Zhiyue^{1,2}, Cui Yulong^{1,2},Wang Meng^{1,2,3}, Wang Zefeng^{1,2,3*}¹College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;²State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China;³Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract We report the first continuous-wave (CW) all-fiber gas Raman laser source. An all-fiber gas cavity with a length of 50 m and filled with high-pressure hydrogen was formed by fusion-splicing solid-core single-mode fiber and photonic band gap hollow-core fiber. A high-power CW 1540 nm fiber amplifier was used as the pump source, and efficient CW 1693 nm Stokes laser was obtained by pure rotational stimulated Raman scattering of hydrogen. Furthermore, by adding a high-reflection fiber Bragg grating with a center wavelength of 1540 nm at the output end of the all-fiber gas cell, the Raman threshold is reduced by 38.2%, the maximum output Stokes power is 2.15 W, and the Raman conversion efficiency inside the gas cell is 72.2%, while the optical-to-optical conversion efficiency in terms of the total pump power is 31.7% due to the relatively high splicing loss. This work provides a feasible way for compact, high-efficiency, and high-power 1.7 μm fiber laser.

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

OCIS codes 140.3510; 140.3550; 290.5910; 060.5295

收稿日期: 2020-08-18; 修回日期: 2020-09-02; 录用日期: 2020-09-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61974427)、湖南省自然科学基金杰出青年科学基金(2019JJ20023)

* E-mail: zefengwang_nudt@163.com

1 引言

基于空芯光纤(HCF)的气体受激拉曼散射自 2002 年首次报道以来^[1], 由于其在产生可调谐、新波长、高效率的光纤激光输出方面展现出了巨大的潜力, 近年来吸引了越来越多研究者的关注。到目前为止, 光纤气体拉曼激光器已经实现了从紫外到中红外波段的激光输出^[2-11], 但是几乎所有的报道都是通过自由空间耦合将泵浦光注入空芯光纤, 系统稳定性较差, 并且由于拉曼阈值较高, 泵浦光源几乎都是高功率的脉冲激光光源, 大大限制了光纤气体拉曼激光器的应用。因此, 实现全光纤结构的气体拉曼激光器, 并降低其拉曼阈值从而实现连续波激光输出是十分必要的。实现全光纤结构的系统需要制备基于空芯光纤的全光纤气体腔, 根据传光机理, 目前主要使用的空芯光纤可以分两类, 即基于光子带隙原理的带隙型空芯光纤(PBG-HCF)^[12]和基于反共振原理的反共振空心光纤(AR-HCF)^[13]。其中, 反共振空芯光纤的结构相对比较简单, 包层只有一圈毛细管, 且纤芯直径较大, 与实芯光纤的低损耗熔接非常困难^[14]。而带隙型空芯光纤的纤芯直径较小, 且包层含有多层微结构, 熔接过程不会对其性能造成太大影响, 可以通过直接熔接的方式来制备全光纤气体腔。2005 年, Benabid 等^[15]在 Nature 杂志上首次报道了基于带隙型空芯光纤的高压全光纤气体腔, 在制备过程中使用了一种价格昂贵的特殊光纤熔接机(FFS-2000-PM, Vytran, 美国), 该熔接机可以用氩气吹扫熔接区域, 防止水的冷凝和固体物沉积, 还可以防止易燃气体的燃烧。2008 年, 孙青等^[16]采用传统的电弧放电光纤熔接机制备了充入高压氮气、基于带隙型空芯光纤的全光纤气体腔, 并在 2013 年报道了基于带隙型空芯光纤的全光纤氢气拉曼激光器^[17]。采用 1064 nm 脉冲激光泵浦, 实现了 1135 nm 斯托克斯(Stokes)脉冲激光输出, 但是气体腔在泵浦光波段的损耗高达 9 dB, 导致光光转换效率只有约 20%。通常来说, 增加激光与气体的相互作用长度可以有效降低拉曼阈值, 这为实现连续波输出的光纤气体拉曼激光器提供了解决方案。2008 年, Couny 等^[18]通过增加空芯光纤长度的方法来增加相互作用长度, 他们将 1064 nm 连续泵浦光通过自由空间耦合进入一根长度为 30 m 并充入高压氢气的带隙型空芯光纤中, 首次实现了连续波输出的光纤气体拉曼激光器, 拉曼阈值功率为 2.25 W, 光光转换效率约为 50%。此外,

他们还在空芯光纤两端熔接高反射率的光纤布拉格光栅(FBG)构成谐振腔, 通过谐振腔进一步增加激光与气体的相互作用长度, 从而将拉曼阈值功率进一步降至约 600 mW, 但此时输出 Stokes 功率十分微弱, 并且泵浦光也是通过自由空间耦合进入谐振腔。2010 年, Couny 等^[19]使用一个最高输出功率为 92 W、中心波长为 1061 nm 的连续波光栅激光器作为泵浦源, 泵浦一根长为 7 m、充入高压氢气的带隙型空芯光纤, 在 1131 nm 波长实现了 55 W Stokes 连续波激光输出, 但是拉曼阈值功率高达 37 W, 且是通过自由空间耦合泵浦光。到目前为止, 还没有连续波全光纤气体拉曼激光器的报道。

1.7 μm 波段的激光光源在材料加工、中红外激光产生、激光医疗与生物成像方面有着极大的应用价值^[20]。目前, 实现 1.7 μm 光纤激光输出的方法主要可以分为两类, 一类是利用掺杂光纤作为增益介质产生激光^[21-22], 另一类是基于实芯光纤中的非线性效应实现激光频率转换^[23-24]。光纤气体拉曼激光器的出现, 为实现 1.7 μm 波段的光纤激光输出提供了新的解决方案。最近, 我们基于充高压氢气/氙气的带隙型空芯光纤, 以及氢气/氙气的纯转动受激拉曼散射, 实现了 1.7 μm 波段 Stokes 脉冲激光输出^[25-28]。但是, 在这些实验中, 空芯光纤的输出端都被密封在一个特殊设计的气体腔内, 系统相对比较笨重, 不便于应用。因此, 实现系统的全光纤化, 同时获得 Stokes 连续波激光输出, 将会进一步扩展其应用范围。

本文首次报道了一种基于空芯光纤的连续波全光纤氢气拉曼激光光源。使用商用电弧熔接机将实芯单模光纤与带隙型空芯光纤熔接, 制备了长度为 50 m 的全光纤高压氢气气体腔, 并采用一个高功率连续波 1540 nm 光纤放大器作为泵浦源, 利用氢气的纯转动受激拉曼散射实现了 1693 nm Stokes 连续激光输出, 最大功率为 1.95 W, 腔内拉曼转换效率为 67.3%, 由于熔点损耗较大, 相对总泵浦光功率的光光转换效率为 28.6%。进一步, 通过在气体腔输出端熔接一个自行刻写的中心波长为 1540 nm 的高反射率光纤布拉格光栅, 使得拉曼阈值下降了 38.2%, 最大输出 Stokes 功率提高至 2.15 W, 腔内拉曼转换效率提升至 72.2%, 对应的总光光转换效率为 31.7%。

2 实验装置

2.1 全光纤气体拉曼激光器实验系统

图 1 为 1.7 μm 全光纤气体拉曼激光器实验系

统示意图。泵浦源是一个高功率连续波 1540 nm 光纤放大器,由种子源与放大级组成。种子源是分布反馈式 (DFB) 半导体激光器 (CobriteDX1, ID Photonics, 德国), 种子光经过自制的掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大后输出。泵浦源的输出尾纤 (SMF-28) 熔接一个光纤分束器 (实测分束比为 92.2 : 7.8), 用于实时监测泵浦源的输出功率。光纤分束器的主输出纤与一个光纤环形器熔接, 环形器用来测量系统的后向回光, 环形器端口 2 的输出光纤与空芯光纤的输入端熔接, 空芯光纤的输出端与另一实芯单模光纤熔接 (具体制备过程见下文), 熔点 1

与熔点 2 的测量损耗分别为 1.4 dB 和 1.9 dB。由于熔点 1 与熔点 2 的实芯光纤端面存在菲涅耳反射, 所以在空芯光纤内形成了一个弱谐振腔, Stokes 光在谐振腔内振荡放大后将两端输出。因此, 分别在气体腔与环形器端口 3 的输出端放置一个平凸透镜, 用来准直前向和后向输出激光。置于翻转架上的滤光片用来滤除泵浦光, 通过翻转滤光片可分别测得拉曼功率与总功率。虚线框中是采用紫外加相位掩模板法自行刻写的光纤布拉格光栅, 中心波长为 1540 nm, 反射率为 99%, 3 dB 带宽是 1.66 nm, 用于提高泵浦光的利用效率。

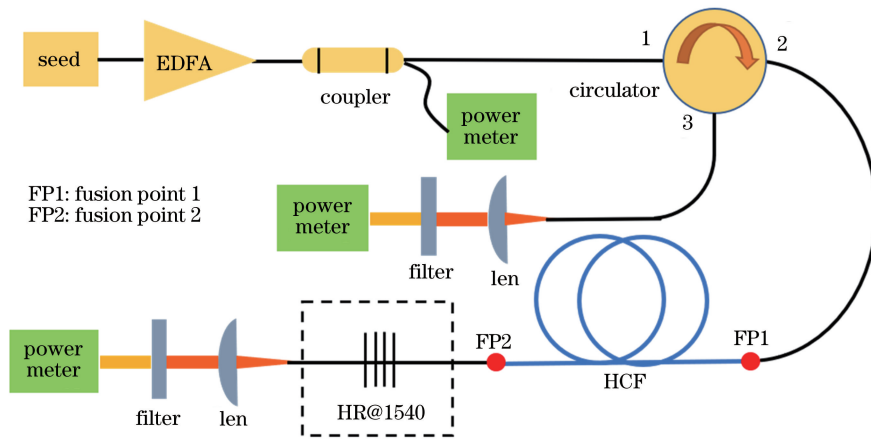


图 1 全光纤结构 1.7 μm 光纤气体拉曼激光实验系统示意图

Fig. 1 Experimental setup of the all-fiber 1.7 μm fiber gas Raman laser

2.2 基于带隙型空芯光纤的全光纤气体腔

图 2(a)所示为测量得到的空芯光纤 (HC-1550-02, NKT Photonics, 丹麦) 的透射谱, 插图为空芯光纤横截面的光学显微镜图。可以看到, 空芯光纤的低损耗透射带大约是 1415~1740 nm。此外, 从产品说明书可得, 空芯光纤在 1540 nm 泵浦光波段与 1693 nm Stokes 光波段的损耗分别约为

0.014 dB/m 与 0.03 dB/m, 其纤芯直径和模场直径分别约为 10 μm 和 9 μm, 与实芯单模光纤 (SMF-28, Corning, 美国) 的模场直径和纤芯直径相近。图 2(b)~(d)所示为全光纤气体腔的制备流程。在图 2(b)中, 使用电弧放电熔接机 (80S, Fujikura, 日本) 将空芯光纤的一端与实芯单模光纤直接熔接。由于放电熔接会使空芯光纤的空气孔塌缩, 导致熔点损

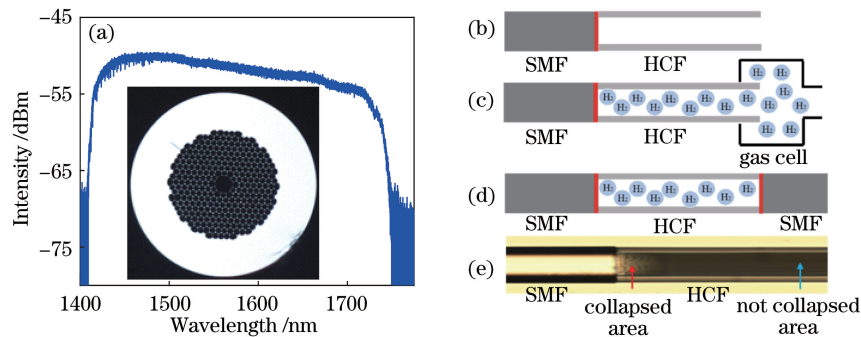


图 2 实验结果。(a)测量得到的空芯光纤传输谱, 插图为空芯光纤横截面的光学显微镜图;

(b)~(d)全光纤气体腔制备流程示意图; (e)熔点 1 处的光学显微镜图

Fig. 2 Experimental results. (a) Measured transmission spectrum of the hollow-core fibers, insert is the micrograph of the hollow-core fibers' cross section; (b)-(d) schematic of the all-fiber gas cell preparation process; (e) micrograph of fusion point 1

耗增大,所以需要调整放电强度与放电时间来尽可能减小对空芯光纤微结构的破坏。经过不断测试,从实芯光纤到空芯光纤的最低熔接损耗约为 1.4 dB,接近直接熔接的理论最小值^[29]。在图 2(c)中,将空芯光纤的另一端密封至气体腔内,通过气体腔对空芯光纤抽真空并充入氢气至 30 bar,充气后需要静置一段时间等待气体平衡。在图 2(d)中,将空芯光纤的充气端从气体腔取出,并迅速地与另一根实芯单模光纤熔接,完成全光纤气体腔制备。需要注意的是,放电电极需要稍微偏离熔接点中心,使放电位置更接近于实芯光纤。这样既可以减小放电对空芯光纤微结构的破坏,也可以避免放电可能引起的氢气燃烧。经测量,从空芯光纤到实芯光纤的损耗约为 1.9 dB。通过计算气体泄漏量^[17]并结合气体腔的拉曼阈值测量结果分析,可以判断空芯光纤内的拉曼增益在熔接前后基本不变,说明气体腔内依然保持高压状态。图 2(e)所示为熔点 1 处

的光学显微镜图,图中深色箭头标注的区域即为空气孔塌缩区,其颜色深度与浅色箭头标注的未塌缩区明显不同。

3 实验结果与分析

用光谱仪(AQ6370D, Yokogawa, 日本)测量最大泵浦功率时的前向和后向输出光谱,如图 3 所示。图 3(a)和图 3(b)分别为无光纤光栅时的前向和后向输出光谱。从图 3(a)中可以看到,泵浦光的波长为 1540 nm,泵浦光与放大自发辐射光(ASE)的比值大于 30 dB, ASE 得到了很好的抑制。还可以看到,除了泵浦谱线,输出光谱只有一条 1693 nm 的 Stokes 谱线,对应氢气一阶转动拉曼频移系数为 587 cm^{-1} 。泵浦光波长与受激拉曼散射产生的 Stokes 光波长之间的关系表示为

$$\Delta\left(\frac{1}{\lambda}\right) = \frac{1}{\lambda_p} - \frac{1}{\lambda_s}, \quad (1)$$

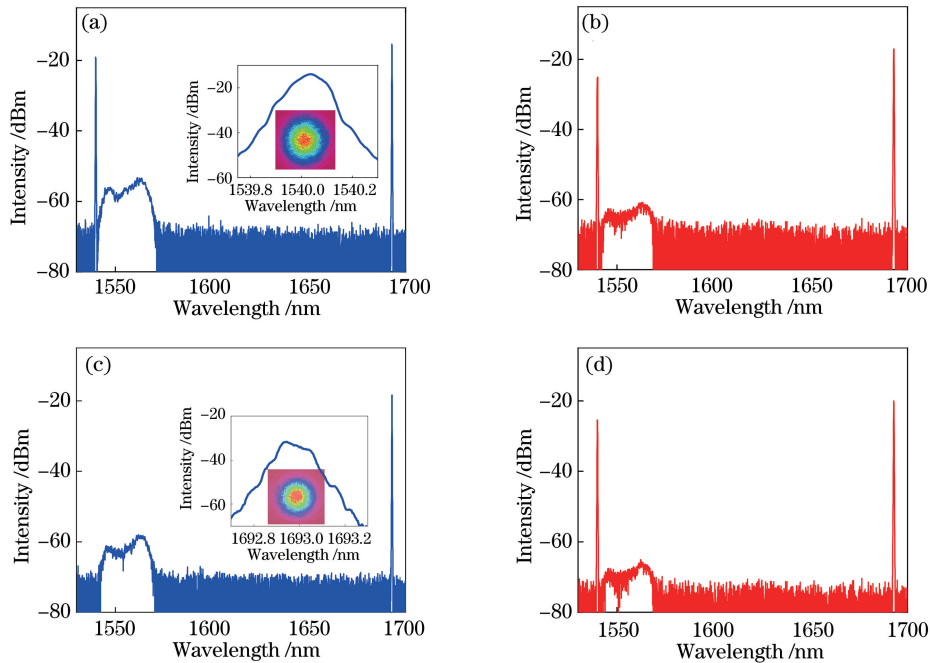


图 3 最大泵浦功率下,前后向输出光谱图。(a)无光纤光栅时前向输出光谱,插图为 1540 nm 泵浦光的精细光谱与近场光斑;(b)无光纤光栅时后向输出光谱;(c)有光纤光栅时前向输出光谱,插图为 1693 nm Stokes 光的精细光谱与近场光斑;(d)有光纤光栅时后向输出光谱

Fig. 3 Forward and backward output spectra at the maximum pump power. (a) Forward output spectrum without FBG, insert is the fine spectrum and the near-field pattern of 1540 nm pump light; (b) backward output spectrum without FBG; (c) forward output spectrum when adding FBG, insert is the fine spectrum and the near-field pattern of 1693 nm Stokes light; (d) backward output spectrum when adding FBG

式中: λ_s 为一阶 Stokes 光波长; λ_p 为泵浦光波长; $\Delta(1/\lambda)$ 为拉曼频移系数。由于其他的 Stokes 谱线位于空芯光纤的传输带外,比如振动 Stokes 谱线(拉曼频移为 4155 cm^{-1} , 波长为 4275 nm),其传输

损耗很高而被抑制产生,这有效提高了 1693 nm Stokes 谱线的转换效率。图 3(a)中的插图为泵浦谱线的精细光谱(光谱仪的扫描精度为 0.05 nm),并展示了用 HgCdTe 红外相机(MCT-2327,

Xenics, 比利时) 拍摄的泵浦光近场光斑, 泵浦光呈现出良好的基模特性。可以看到, 在图 3(b) 中的后向输出光谱上也出现了相同波长的泵浦谱线和 Stokes 谱线, 并且 ASE 也被熔点 1 的端面反射回来。图 3(c) 和图 3(d) 分别为加入光纤光栅后的前向与后向输出光谱。从图 3(c) 中可以看到, 由于前向输出端的残余泵浦光被反射回空芯光纤中, 光谱中没有了 1540 nm 的泵浦谱线, 只剩下 ASE 光谱与 Stokes 谱线。图 3(c) 的插图 of Stokes 谱线的精细光谱(光谱仪的扫描精度为 0.05 nm), 并展示了 Stokes 光的近场光斑, Stokes 光同样呈现良好的基模特性。图 3(d) 的后向输出光谱中则依旧出现了泵浦谱线和 Stokes 谱线。

图 4 为输出功率/转换效率随注入泵浦功率的

变化, 图中注入泵浦功率为环形器端口 2 的输出功率。图 4(a) 为前向输出的残余泵浦光功率和 Stokes 光功率随注入泵浦功率的变化。通过对比前向残余泵浦光功率的变化曲线, 可以看到, 无光纤光栅时, 拉曼阈值功率约为 3.4 W。当注入泵浦功率超过拉曼阈值后, 前向残余泵浦光功率迅速下降, 但是在最大注入泵浦功率时, 前向残余泵浦光依然还有约 400 mW。在加入光纤光栅后, 最大注入泵浦功率下的前向残余泵浦光功率只有约 20 mW, 从图 3(c) 中可以看到, 这是 ASE 的功率。通过对比前向 Stokes 光功率的变化曲线可以看到, 加入光纤光栅后, 由于前向残余泵浦光被反射回空芯光纤后继续与氢气分子发生相互作用, 等效于两者的相互作用距离增大, 所以拉曼阈值减小至 2.1 W, 下降了 38.2%。

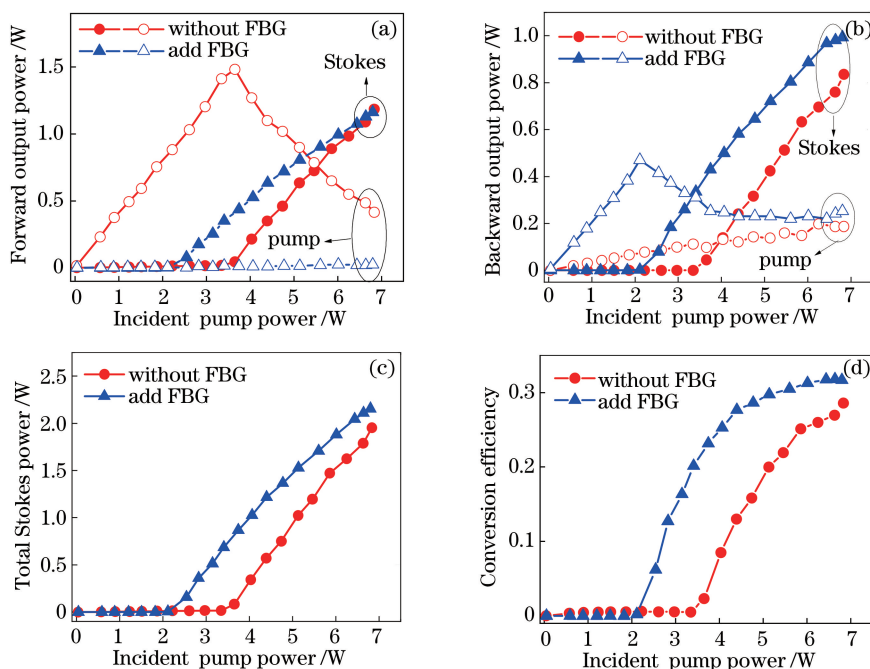


图 4 输出功率和转换效率随注入泵浦功率的变化。(a)前向输出的残余泵浦光与 Stokes 光功率;

(b)后向输出的泵浦光与 Stokes 光功率;(c)总的 Stokes 光功率;(d)总的光光转换效率

Fig. 4 Evolution of output powers and conversion efficiency with the incident pump power. (a) Forward output residual pump light and Stokes light powers; (b) backward output pump light and Stokes light powers; (c) total Stokes light power; (d) total optical-to-optical conversion efficiency

图 4(b) 为后向输出的泵浦光功率与 Stokes 光功率随注入泵浦功率的变化。通过对比后向泵浦光功率的变化曲线可以看到, 无光纤光栅时, 后向泵浦光功率随注入泵浦功率的增加近似为线性变化, 大约为注入泵浦功率的 3.3%。根据菲涅耳反射率计算公式 $R = [(1-n)/(1+n)]^2$, R 为菲涅耳反射率, n 为实芯光纤的纤芯折射率, 计算得到实芯光纤端面的菲涅耳反射率约为 3.5%。根据测量结果推

测熔点 1 的实际反射率略小于理论值, 主要是由于熔接过程使实芯光纤端面出现了一定的形变, 并不是完全的镜面反射。因此, 可以认为后向泵浦光主要来自熔点 1 的端面反射。在加入光纤光栅后, 后向泵浦光功率明显增加, 同样地, 在注入泵浦功率超过拉曼阈值后, 后向泵浦光功率开始逐渐减小, 并且在最大注入泵浦功率下接近无光纤光栅时的后向泵浦光功率, 这说明由光纤光栅反射回来的泵浦光大

多已经在空芯光纤内完全转换,后向泵浦光依然主要来自熔点 1 的反射。通过对比后向 Stokes 功率的变化曲线,可以看到,在加入光纤光栅后,由于反射回空芯光纤内的残余泵浦光转换生成了更多后向 Stokes 光,所以后向 Stokes 光功率明显增加。此外,还可以看到,当注入泵浦功率最大时,后向 Stokes 光功率小于图 4(a)中前向 Stokes 光功率,这是因为空芯光纤中氢气的后向拉曼增益一般小于前向拉曼增益^[30]。

图 4(c)为总 Stokes 光功率(前向和后向输出 Stokes 光功率之和)随注入泵浦功率的变化。可以看到,在加入光纤光栅后,总 Stokes 光功率的最大值从 1.95 W 提升至 2.15 W。相对注入泵浦功率的总光光转换效率随注入泵浦功率的变化如图 4(d)所示,在加入光纤光栅后,总光光转换效率的最大值从 28.6%提升至 31.7%。总光光转换效率相对较低主要是由熔点 1 与熔点 2 的损耗造成的。在不考虑熔点损耗的情况下,光纤光栅加入前后空芯光纤内的拉曼转换效率分别为 67.3%和 72.2%。实际上,随着注入泵浦功率的进一步增加,图 4(c)中的两条总 Stokes 光功率曲线将趋于重合。这是因为在图 4(a)中,无光纤光栅时的前向残余泵浦光功率会随注入泵浦功率的增大而减小,直到注入泵浦功率增大到某一值时,前向输出的残余泵浦光功率接近于零,此时光纤光栅将不再起作用,也不再提高泵浦光的利用率。

4 结 论

本文首次报道了基于空芯光纤的连续波全光纤气体拉曼激光光源。采用一个高功率连续波 1540 nm 光纤放大器作为泵浦源,泵浦一根长度为 50 m 且充入高压氢气的全光纤气体腔,利用氢气分子的纯转动受激拉曼散射实现了 1693 nm Stokes 光连续激光输出。通过在气体腔输出端熔接一个中心波长为 1540 nm 的高反光纤光栅,使拉曼阈值降低了 38.2%,最大 Stokes 输出功率为 2.15 W,腔内拉曼转换效率为 72.2%,但是由于熔接损耗使得相对总注入的泵浦光功率的转换效率为 31.7%。下一步,通过改进熔接工艺进一步降低空芯光纤与实芯光纤的熔接损耗,同时使用波长可调谐的泵浦源,可实现高功率、高效率、可调谐的全光纤 1.7 μm 波段气体拉曼激光器。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Wang Z F, Yu F, 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, William J Wadsworth, 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.
- [4] Chen Y B, Gu B, Wang Z F, 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.
- [5] Gu B, Chen Y B, Wang Z F. Red, green and blue laser emissions from H₂-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.
- [6] Chen Y B, Wang Z F, Gu B, et al. 1.5 μm 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 μm 光纤乙烷气体拉曼激光放大器[J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 0514002.
- [7] Gladyshev A V, Kosolapov A F, Khudyakov M M, et al. 2.9, 3.3, and 3.5 μm Raman lasers based on revolver hollow-core silica fiber filled by H₂/D₂ gas mixture[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 1-8.
- [8] Cao L, Gao S F, Peng Z G, et al. High peak power 2.8 μm Raman laser in a methane-filled negative-curvature fiber[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5609.
- [9] 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 μm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(19): 4671-4674.
- [10] Astapovich M S, Gladyshev A V, Khudyakov M M, et al. Watt-level nanosecond 4.42- μm Raman laser based on silica fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(1): 78-81.
- [11] Mridha M K, Hosseini P, Novoa D, et al.

- Thresholdless deep and vacuum ultraviolet Raman frequency conversion in H₂-filled photonic crystal fiber[J]. *Optica*, 2019, 6(6): 731-734.
- [12] Gao S F, Wang Y Y, Wang P. Research progress on hollow-core anti-resonant fiber and gas Raman laser technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508014.
高寿飞, 汪滢莹, 王璞. 反谐振空芯光纤及气体拉曼激光技术的研究进展[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0508014.
- [13] Russell P S J, Hölzer P, Chang W, et al. Hollow-core photonic crystal fibres for gas-based nonlinear optics[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(4): 278-286.
- [14] Li X Q, Gao S F, Wang Y Y, et al. Low-loss fusion splice of hollow-core anti-resonant fiber and single mode fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(10): 1006002.
李晓倩, 高寿飞, 汪滢莹, 等. 空芯反谐振光纤与单模光纤的低损耗熔接研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(10): 1006002.
- [15] Benabid F, Couny F, Knight J C, et al. Compact, stable and efficient all-fibre gas cells using hollow-core photonic crystal fibres[J]. *Nature*, 2005, 434(7032): 488-491.
- [16] Sun Q, Liu E M, Qin F H, et al. All-fiber high-pressure gas cell based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(7): 1029-1034.
孙青, 刘二明, 秦丰华, 等. 全光纤型空芯光子晶体光纤高压气体腔[J]. *中国激光*, 2008, 35(7): 1029-1034.
- [17] Chen X D, Sun Q, Li H, et al. Compact all-fiber gas Raman light source based on hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber pumped with single-mode Q-switched fiber laser[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19(5): 486-489.
- [18] Couny F, Benabid F, Light P S. Subwatt threshold CW Raman fiber-gas laser based on H₂-filled hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 99(14): 1-2.
- [19] Couny F, Mangan B J, Sokolov A V, et al. High power 55 watts CW Raman fiber-gas-laser [C] // *Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS)*, 2010 Conference on. IEEE, 2010.
- [20] Zhang Y, Zhang P, Liu P, et al. Fiber light source at 1.7 μm waveband and its applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(9): 090002.
张岩, 张鹏, 刘鹏, 等. 1.7 μm 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.
- [21] Daniel J M, Simakov N, Tokurakawa M, et al. Ultra-short wavelength operation of a thulium fibre laser in the 1660-1750 nm wavelength band [J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18269-18276.
- [22] Khegai A, Melkumov M, Riumkin K, et al. NALM-based bismuth-doped fiber laser at 1.7 μm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 1127-1130.
- [23] Zhang P, Wu D, Du Q, et al. 1.7 μm band narrowlinewidth tunable Raman fiber lasers pumped by spectrum-sliced amplified spontaneous emission [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(35): 9742-9748.
- [24] Kawagoe H, Ishida S, Aramaki M, et al. Development of a high power supercontinuum source in the 1.7 μm wavelength region for highly penetrative ultrahigh-resolution optical coherence tomography[J]. *Biomed Opt Express*, 2014, 5(3): 932-943.
- [25] Cui Y L, Huang W, Li Z X, et al. High-efficiency laser wavelength conversion in deuterium-filled hollow-core photonic crystal fiber by rotational stimulated Raman scattering [J]. *Optics Express*, 2019, 27(21): 30396-30404.
- [26] Huang W, Li Z X, Cui Y L, et al. Efficient, watt-level, tunable 1.7 μm fiber Raman laser in H₂-filled hollow-core fibers[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(2): 475-478.
- [27] Cui Y L, Huang W, Zhou Z Y, et al. Single-pass high-efficiency rotational Raman laser source based on deuterium-filled hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0214001.
崔宇龙, 黄威, 周智越, 等. 基于空芯光子晶体光纤的单程高效氘气转动拉曼激光光源[J]. *光学学报*, 2020, 40(2): 0214001.
- [28] Huang W, Cui Y L, Li Z X, et al. Research on 1.7 μm fiber laser source based on stimulated Raman scattering of hydrogen in hollow-core fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0514001.
黄威, 崔宇龙, 李智贤, 等. 基于空芯光纤中氢气受激拉曼散射的 1.7 μm 光纤激光光源研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0514001.
- [29] Aghaie K Z, Dignonnet M J, Fan S. Optimization of the splice loss between photonic-bandgap fibers and conventional single-mode fibers[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(12): 1938-1940.
- [30] Mridha M K, Novoa D, Russell P J. Dominance of backward stimulated Raman scattering in gas-filled hollow-core photonic crystal fibers[J]. *Optica*, 2018, 5(5): 570-576.