

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

崔宇龙, 黄威, 周智越, 李智贤, 王泽锋*

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,
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氘气转动受激拉曼散射的单程高效光纤气体激光光源。因空芯光子晶体光纤具有特殊的传输谱, 增益相对较大的振动受激拉曼散射被很好地抑制, 使得泵浦激光能够高效地向转动斯托克斯光转化。采用自行搭建的 1540 nm 纳秒脉冲光纤放大器, 泵浦一段长为 20 m、充高压氘气的空芯光子晶体光纤, 在单程结构中实现了高效的 1645 nm 拉曼激光输出。当气压为 2 MPa 时, 最大平均输出功率约为 0.8 W (单脉冲能量约为 1.6 μJ), 激光光源斜率效率约为 71.4%。研究结果为 1.7 μm 波段光纤激光的实现提供了一条简单有效的新途径。

关键词 激光器; 光纤激光器; 受激拉曼散射; 拉曼激光器; 空芯光子晶体光纤

中图分类号 TN24

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0214001

Single-Pass High-Efficiency Rotational Raman Laser Source Based on Deuterium-Filled Hollow-Core Photonic Crystal Fiber

Cui Yulong, Huang Wei, Zhou Zhiyue, Li Zhixian, Wang Zefeng*

State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract In this study, a high-efficiency fiber gas laser source is developed in a single-pass deuterium-filled hollow-core photonic crystal fiber by rotational stimulated Raman scattering (SRS). The ordinary dominant vibrational SRS with relatively large gain is suppressed because of the special transmission properties of this low-loss hollow-core photonic crystal fiber, permitting its efficient conversion to a rotational Stokes wave. A homemade 1540-nm nanosecond pulsed fiber amplifier is used to pump a hollow-core photonic crystal fiber having a length of 20 m with a high-pressure deuterium gas. Thus, a high-efficiency 1645-nm Raman laser is obtained using a single-pass configuration. A maximum average output power of ~ 0.8 W (single-pulse energy of ~ 1.6 μJ) can be obtained with respect to the 1645-nm Raman laser at a pressure of 2 MPa, and the slope efficiency is observed to be $\sim 71.4\%$. This study introduces a simple and effective way for the realization of 1.7- μm -band fiber lasers.

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

OCIS codes 140.3510; 140.3550; 290.5910; 060.5295

1 引 言

气体受激拉曼散射自 1963 年^[1]被报道以来, 已被证明是拓展激光波长的有效方式。由于气体腔内的有效作用距离很短, 因此气体腔中受激拉曼散射通常需要很高的泵浦功率, 且会不可避免地产生多

阶斯托克斯谱线, 使得预期拉曼谱线的转换效率受限。空芯光纤的出现和快速发展为气体受激拉曼散射开辟了新的前景^[2-8]。自 2002 年首次报道空芯光子晶体光纤中氢气受激拉曼散射实验以来^[9], 大量基于空芯光纤的气体受激拉曼散射实验相继被报道^[10-20]。2004 年, Benabid 等^[10]在光子晶体光纤中

收稿日期: 2019-07-29; 修回日期: 2019-09-09; 录用日期: 2019-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(61705266)、湖南省自然科学基金杰出青年科学基金(2019JJ20023)

* E-mail: hotrosemaths@163.com

实现了 1064~1135 nm 的超高效率(92%)转化。2007年, Couny 等^[11]首次报道了基于空芯光子晶体光纤内氢气转动拉曼效应的单程连续激光输出。2014年, Wang 等^[12]首次利用反谐振空芯光纤实现了 1064 nm~1.9 μm 的氢气振动受激拉曼散射实验。2016年, Chen 等^[14]首次报道了空芯光纤中乙烷振动拉曼散射实验, 实现了近 400 kW 的峰值功率输出。2018年, Gladyshev 等^[17]在空芯光纤内充入氢气氙气混合气体, 实现了 2.9, 3.3, 3.5 μm 的激光输出。2019年, Astapovich 等^[20]利用可以传输 1.5 μm 和 4 μm 的无节点空芯光纤首次实现了 4.4 μm 受激拉曼散射激光输出^[20]。因其传输窗口具有易于控制和损耗低的特性, 该空芯光纤为气体和激光的相互作用提供了完美的平台。空芯光纤的微结构可使泵浦光和需要的拉曼谱线位于空芯光纤的传输带内, 而使不需要的拉曼谱线位于其阻带内, 从而将需要的拉曼谱线的斯托克斯光转化效率极大地提升^[10, 12, 15, 19]。此外, 在空芯光纤中, 由于基模边沿场强比中心强度小一个数量级以上, 而且模场与包层玻璃材料的重叠区域非常小, 甚至可以忽略不计, 因此理论上空芯光纤比实芯光纤具有高得多的损伤阈值, 在高功率输出方面具有更大的潜在优势^[21]。

1.7 μm 波段的光纤激光在激光医疗、物质检测、材料加工、生物成像, 以及产生中红外激光输出等方面具有重要应用^[22], 受到了国内外研究人员的极大关注。目前, 产生该波段光纤激光输出的途径主要有 3 种: 基于掺铯光纤^[23]、基于特殊离子掺杂光纤^[24], 以及基于拉曼频移等非线性效应^[25]。1.7 μm 波段在铯的增益谱带边缘, 增益较低, 因此产生 1.7 μm 波段近红外光的难度较大。特殊离子掺杂光纤尚处于研制的初步阶段, 工艺还不成熟。选取适当的空芯光纤和增益气体, 利用空芯光纤中的受激拉曼散射产生 1.7 μm 波段近红外光是一种简单的、有效的方式。

本文在空芯光子晶体光纤中利用氙气分子的转动受激拉曼散射实现了从泵浦激光(1540 nm)到一阶转动斯托克斯光(1645 nm)的高效转换。所使用的空芯光子晶体光纤传输带位于 1.45~1.75 μm , 常见的振动拉曼谱线因不在带内而得到了很好的抑制, 从而极大地提升了转动斯托克斯光的转化。利用自行搭建的 1540 nm 纳秒脉冲光纤放大器泵浦一段长约 20 m 的充高压氙气的空芯光子晶体光纤, 当气压为 2 MPa 时, 最大泵浦功率(约 1.8 W)下

得到的最大平均输出功率约为 0.8 W(单脉冲能量约 1.6 μJ), 总的光光转换效率约为 44.4%(相对耦合进空芯光子晶体光纤的泵浦功率约为 61.2%), 激光的斜率效率为 71.4%。通过分析测量得到的泵浦光、拉曼光和残余泵浦光的脉冲波形, 探讨了空芯光子晶体光纤中的受激拉曼散射过程。泵浦光纤放大器的输出光纤通过熔接的方式与空芯光子晶体光纤连接, 大大提高了系统的紧凑性和稳定性, 为下一步实现全光纤结构的高功率 1.7 μm 波段光纤激光光源打下了良好的基础。

2 实验装置及原理

氙气转动拉曼光纤气体激光光源实验装置如图 1(a)所示, 泵浦源为自行搭建的 1540 nm 脉冲光纤放大器, 脉冲宽度约为 12 ns, 重复频率为 500 kHz, 最大平均输出功率约为 1.8 W。放大器的输出端(SMF-28e)与光纤分束器(分束比 99:1)熔接, 其输出端一端通过功率计来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(NKT Photonics, 型号为 HC-1550-02)通过熔接的方式连接^[26]。HC-1550-02 的模场直径和数值孔径都与 SMF-28e 单模光纤接近, 理论上可以获得很高的耦合效率。但是, 实际熔接过程会不可避免地损伤或损坏空芯光子晶体光纤的微结构, 增大插入损耗。为此, 通过不断优化熔接参数、采用小电流多次放电的方式, 可将熔接对光子晶体光纤包层结构的破坏程度降至最低, 实现约 72% 的耦合效率(利用真空情况下空芯光子晶体光纤输出端的泵浦功率和光纤的传输损耗估算得到)。同空间耦合方式相比^[14, 19], 熔接方式使系统更加紧凑稳定, 而且避免了激光打坏光纤端面的情况。当空芯光子晶体光纤的一端与实芯光纤熔接后, 将空芯光子晶体光纤的输出端放置于带有玻璃窗口(Thorlabs WG61050, 对泵浦光和拉曼光的透过率均约为 95%, 用于密封和传输激光)的密封气体腔^[27]中抽真空, 通过腔侧面的管道可以将氙气充入空芯光子晶体光纤的纤芯内(由于激光几乎都在纤芯区域内, 空气孔中充入气体对实验几乎没有影响)。泵浦光进入空芯光子晶体光纤后, 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起始响应波长为 1600 nm 的长波通滤波片(Edmund optics, 通过率 > 90%)输入到光功率计上, 以探测拉曼光功率。

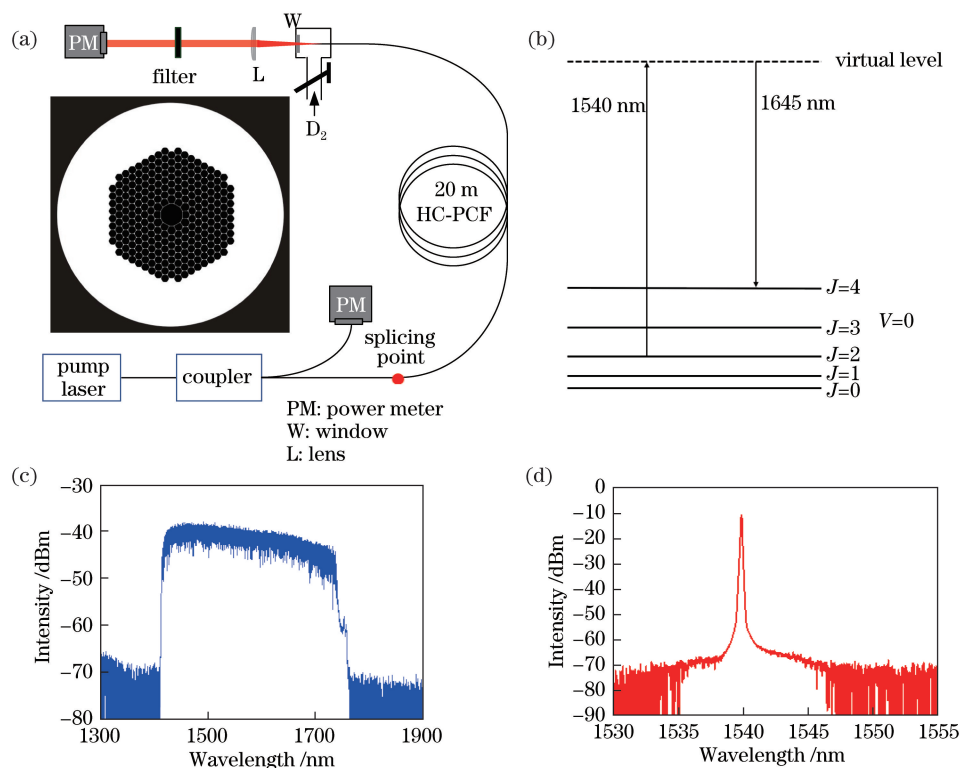


图 1 实验装置及原理图。(a)实验装置示意图,插图为空芯光子晶体光纤截面示意图;(b)氘气一阶转动拉曼能级跃迁示意图;(c)测量得到的空芯光子晶体光纤传输谱;(d)最大输出功率时泵浦激光器的光谱

Fig. 1 Schematics of experimental setup and principle. (a) Experimental setup diagram. Inset is schematic of hollow-core photonic crystal fiber's cross section; (b) schematic of energy level transition of first-order rotating Raman of deuterium gas; (c) measured transmission spectrum of hollow-core photonic crystal fiber; (d) spectrum of pump laser at maximum output power

图 1(b)为氘气一阶转动拉曼能级跃迁示意图。当采用 1540 nm 激光泵浦时,氘气分子由基态振动态 $J=2$ 转动能级吸收能量跃迁至虚能级,再由虚能级释放能量到达 $J=4$ 转动能级,从而产生 1645 nm 的激光输出,其拉曼频移为 415.5 cm^{-1} 。实验用的空芯光纤为商用带隙型空芯光子晶体光纤,其横截面示意图如图 1(a)中插图所示。空芯光子晶体光纤通过中间的空芯导光,在纤芯周围周期性地排布着空气孔和硅材料制成的包层区域,其纤芯直径约为 $10 \mu\text{m}$,包层直径约为 $120 \mu\text{m}$,周期性空气孔直径约为 $3.8 \mu\text{m}$,光子晶体带隙区域的直径约为 $70 \mu\text{m}$,实验用的光纤长度为 20 m。用超连续光源作为注入光,测量其传输谱,结果如图 1(c)所示。该空芯光子晶体光纤的传输带为 $1.45 \sim 1.75 \mu\text{m}$,泵浦波长(1540 nm)和氘气的一阶转动斯托克斯波长(1645 nm)都位于该传输带内,传输损耗分别约为 0.016 dB/m 和 0.02 dB/m (来自产品数据手册)。泵浦激光器光谱如图 1(d)所示,在激光放大过程中,自发辐射光放大(ASE)得到了较好的

抑制,信号光与 ASE 的比值在 50 dB 以上。使用 FP 腔(Thorlabs SA210-12B,自由光谱范围 10 GHz)测得其最大泵浦功率下的泵浦线宽为 0.27 GHz。

3 分析与讨论

当氘气压强为 2 MPa 时,最大泵浦功率下光谱仪(Yokogawa AQ6370D)测得的输出光谱如图 2 所示。从图 2 可见,输出光谱非常干净,除了残余泵浦光外,只有一条拉曼谱线为一级转动斯托克斯谱线(拉曼频移为 414.5 cm^{-1}),两者均在图 1(c)所示的传输带内。这主要是由使用的空芯光子晶体光纤的传输损耗特性决定的。增益相对较高的振动受激拉曼散射谱线(2844 nm ,拉曼频移为 2977 cm^{-1}),在高损耗区得到了很好的抑制,使泵浦光能更有效地向转动拉曼转化。图 2 中的插图为由 HgCdTe 红外相机(Xenics MCT-2327)拍摄的泵浦光和拉曼光的光斑图,拉曼光的光斑很接近单模,且其光束质量优于泵浦光的光束质量,由此证明受激拉曼散射对光束质量具有净化作用^[28]。

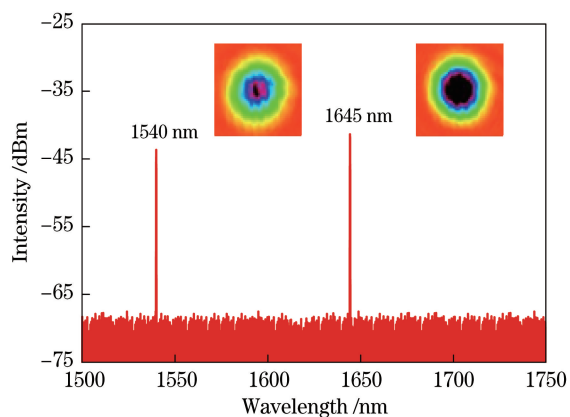


图 2 2 MPa 气压下空芯光子晶体光纤的输出光谱(左侧插图为 1540 nm 泵浦光光斑,右侧插图为 1645 nm 拉曼光光斑)

Fig. 2 Output spectrum at 2 MPa in hollow-core photonic crystal fiber (left inset is near-field spot of 1540-nm pump laser; right inset is near-field spot of 1645-nm Raman laser)

分别测量不同气压下输出信号功率、转化效率和残余泵浦光功率随泵浦光功率的变化,结果如图 3(a)~(c)所示。由图 3(a)、(b)可见,拉曼阈值

约为 700 mW。随着氩气气压增大,可以观察到泵浦功率阈值在下降。这是因为气压越大,拉曼增益越高,受激拉曼散射的阈值越低。在阈值过后,拉曼光随泵浦光几乎呈线性增长,拉曼的转化效率也逐渐升高。当气压为 2 MPa 时,空芯光纤输出的拉曼光的转化效率最大,相对总的泵浦光功率约为 44.4%(相对耦合的泵浦光约为 61.2%),对应的最大平均输出功率约为 0.8 W(单脉冲能量约为 1.6 μ J)。图 3(c)为残余泵浦光随泵浦功率的变化,可以看出,残余泵浦光功率在达到阈值后增长的趋势迅速减缓,之后随着泵浦功率的增加而逐渐下降。这是由于一阶转动斯托克斯光的产生使泵浦光向拉曼光转化,从而导致残余泵浦光减少。图 3(d)为 2 MPa 气压时的拉曼功率曲线,虚线为拟合效率曲线,斜率效率为 71.4%,由此证明本实验系统可以实现高效的拉曼转化。

图 4(a)为最大泵浦功率下由快速光电探测器(EOT ET5000)和宽带示波器(Tektronix MDO3104)测得的泵浦光、拉曼光和残余泵浦光的波形。从图 4(a)中可以清晰地看出,残余泵浦光波形中部存

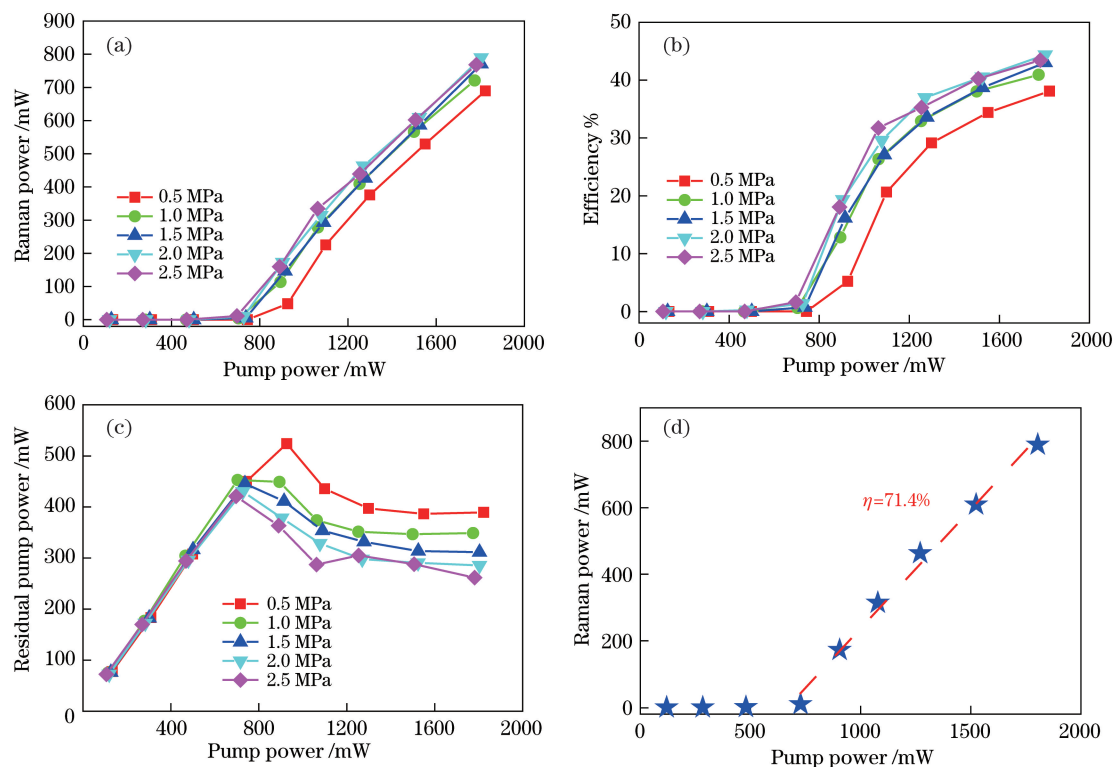


图 3 输出功率特性。(a)不同气压下拉曼光功率随泵浦光功率的变化;(b)不同气压下最大拉曼转化效率(拉曼光功率/总泵浦光功率)随泵浦光功率的变化;(c)残余泵浦功率随泵浦功率的变化;(d) 2 MPa 气压下的拉曼功率曲线

Fig. 3 Characteristics of output power. (a) Raman power as a function of pump power at different gas pressures; (b) maximum Raman conversion efficiency (Raman power/total pump power) as a function of pump power at different gas pressures; (c) residual pump power as a function of pump power; (d) Raman power curve at 2-MPa gas pressure

在明显的凹陷。这是由于达到阈值后,中间部分泵浦光已转化为拉曼光,而拉曼光的波形边缘形状与泵浦光的形状不同,存在一个较陡的上升沿和下降沿,即只有中间部分的泵浦光发生了转化,产生了拉曼光。根据拉曼光与残余泵浦光的脉冲波形,可以认为只有功率超过阈值的部分发生了受激拉曼散射,且超过阈值部分的泵浦光几乎可以全部转化为拉曼光。

对图 4(a)中的泵浦脉冲和拉曼脉冲的脉冲宽度进行测量,其中,泵浦脉冲的脉冲宽度为 12 ns,而拉曼激光的脉冲宽度为 11.2 ns,即产生的拉曼光的脉冲宽度要小于泵浦光的。图 4(b)显示了拉曼光

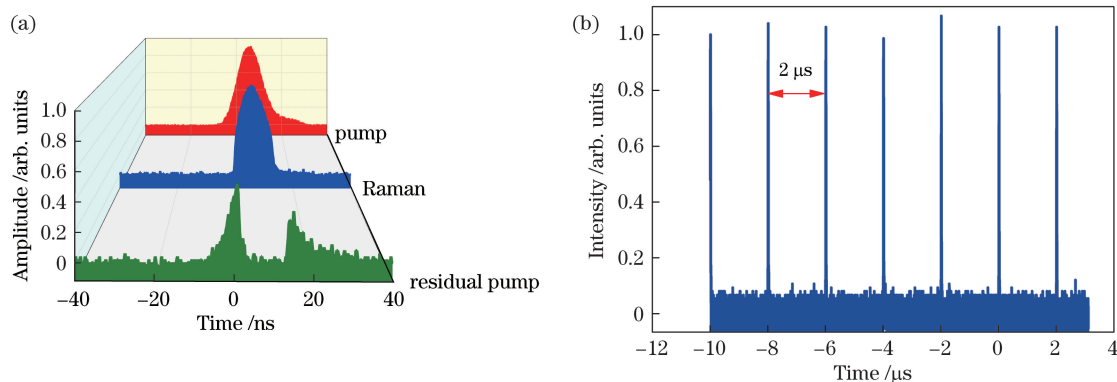


图 4 脉冲及时域特性图。(a)最大泵浦功率下泵浦光、拉曼光和残余泵浦光的波形;(b)拉曼光重复频率的测量结果

Fig. 4 Pulse and its time-domain characteristics. (a) Pulse shapes of pump laser, Raman laser, and residual pump laser at maximum pump power; (b) measurement of repetition rate of Raman laser

4 结 论

利用空芯光子晶体光纤中氙气的转动受激拉曼散射,实现了 1540 nm 泵浦激光到 1645 nm 一阶斯托克斯光的高效转换。泵浦源为自行搭建的 1540 nm 纳秒脉冲光纤放大器,泵浦一段长度为 20 m、充高压氙气的空芯光子晶体光纤,获得了最大平均功率约为 0.8 W(单脉冲能量约为 1.6 μ J)的 1645 nm 拉曼激光输出,最大光光转化效率约为 61.2%(相对耦合泵浦功率)。通过减小输入端熔接损耗、缩短光纤长度、优化光纤放大器性能,可以进一步提高拉曼激光光源的转化效率和输出功率。研究结果为实现 1.7 μ m 波段光纤激光的输出提供了一种简单有效的新方式。

参 考 文 献

- [1] Minck R W, Terhune R W, Rado W G. Laser-stimulated Raman effect and resonant four-photon interactions in gases H_2 , D_2 , and CH_4 [J]. Applied Physics Letters, 1963, 3(10): 181-184.
- [2] Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, et al. Single-mode photonic band gap guidance of light in air [J]. Science, 1999, 285(5433): 1537-1539.
- [3] Couny F, Benabid F, Light P S. Large-pitch kagome-structured hollow-core photonic crystal fiber [J]. Optics Letters, 2006, 31(24): 3574-3576.
- [4] Pryamikov A D, Biriukov A S, Kosolapov A F, et al. Demonstration of a waveguide regime for a silica hollow-core microstructured optical fiber with a negative curvature of the core boundary in the spectral region $>3.5 \mu\text{m}$ [J]. Optics Express, 2011, 19(2): 1441-1448.
- [5] Yu F, Wadsworth W J, Knight J C. Low loss silica hollow core fibers for 3-4 μm spectral region [J]. Optics Express, 2012, 20(10): 11153-11158.
- [6] Yu F, Knight J C. Negative curvature hollow-core optical fiber [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016, 22(2): 146-155.
- [7] Gao S F, Wang Y Y, Ding W, et al. Hollow-core conjoined-tube negative-curvature fibre with ultralow loss [J]. Nature Communications, 2018, 9: 2828.
- [8] Habib M S, Antonio-Lopez J E, Markos C, et al.

- Single-mode, low loss hollow-core anti-resonant fiber designs[J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 3824-3836.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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*, 2007, 99(14): 143903.
- [12] Wang Z F, Yu F, Wadsworth W J, et al. Efficient 1.9 μm emission in H₂-filled hollow core fiber by pure stimulated vibrational Raman scattering[J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(10): 105807.
- [13] Gladyshev A V, Kolyadin A N, Kosolapov A F, et al. Efficient 1.9-μm Raman generation in a hydrogen-filled hollow-core fibre[J]. *Quantum Electronics*, 2015, 45(9): 807-812.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Wang Z F, Gu B, Chen Y B, et al. Demonstration of a 150-kW-peak-power, 2-GHz-linewidth, 1.9-μm fiber gas Raman source[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(27): 7657-7661.
- [17] 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 ¹H₂/D₂ gas mixture[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 0903008.
- [18] 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): 5609-5615.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Nampoothiri A V V, Jones A M, Fourcade-Dutin C, et al. Hollow-core optical fiber gas lasers (HOFGLAS): a review [invited] [J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(7): 948-961.
- [22] 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.
- [23] Daniel J M O, 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.
- [24] Firstov S V, Alyshev S V, Riumkin K E, et al. Watt-level, continuous-wave bismuth-doped all-fiber laser operating at 1.7 μm[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(18): 4360-4363.
- [25] Zhang P, Wu D, Du Q L, et al. 1.7 μm band narrow-linewidth tunable Raman fiber lasers pumped by spectrum-sliced amplified spontaneous emission[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(35): 9742-9748.
- [26] 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.
- [27] Chen Y B. Research on 1.5 μm hollow-core fiber gas Raman laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
陈育斌. 1.5 μm 波段空芯光纤气体 Raman 激光研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
- [28] Terry N B, Alley T G, Russell T H. An explanation of SRS beam cleanup in graded-index fibers and the absence of SRS beam cleanup in step-index fibers[J]. *Optics Express*, 2007, 15(26): 17509-17519.