

基于空芯光纤中氢气级联 SRS 的红绿蓝色激光

顾 博 陈育斌 王泽锋

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 报道了基于充气负曲率空芯光纤的红绿蓝色拉曼激光实验。利用 1064 nm 亚纳秒微片脉冲激光器抽运一段充高压氢气的 Ice-cream 型负曲率空芯光纤,通过氢气分子的级联受激拉曼散射,同时获得了波长分别为 737.6, 564.2, 457.1 nm 的一阶、二阶、三阶振动反斯托克斯激光输出。通过调节抽运激光功率和气体气压,可以控制红、绿、蓝三色激光的相对强度和输出模式。

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

中图分类号 TN24 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0806005

Red, Green and Blue Laser Emissions from H₂-Filled Hollow-Core Fiber by Stimulated Raman Scattering

Gu Bo Chen Yubin Wang Zefeng

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

Abstract The experiment of red, green and blue laser generating simultaneously in gas-filled negative curvature hollow-core fiber is reported. A hydrogen-filled Ice-cream negative curvature hollow-core fiber is pumped with a high peak-power, narrow linewidth, subnanosecond pulsed 1064 nm microchip laser, generating 737.6, 564.2, 457.1 nm pulses corresponding to the first, second and third vibrational anti-Stokes waves by cascaded stimulated Raman scattering of hydrogen molecules. The relative intensities and output modes of red, green and blue laser can be controlled by adjusting the pump power and the pressure of hydrogen filled in the hollow-core fiber.

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

OCIS codes 060.2310; 060.5295; 140.7300; 060.3510; 140.4130; 290.5910

1 引 言

气体受激拉曼散射(SRS)自 1963 年首次报道以来受到了极大的关注^[1],被广泛应用于波长转换、超短脉冲产生、相干反斯托克斯拉曼光谱学以及多倍频程频率梳产生等领域^[2-9]。其中,紫外方向波长拓展和频率梳产生需要高效的反斯托克斯光^[10],完成这一过程的关键是实现抽运光与一阶斯托克斯光以及各阶反斯托克斯光之间的相位匹配^[10-12]。自由空间中气体 SRS 可以利用倾斜光束或者腔内色散补偿镜实现相位匹配^[3,9],但是有效作用距离非常短,抽运功率阈值很高。空芯光纤为激光与气体相互作用提供了理想的环境^[13],可以有效地将抽运光约束在微米量级的纤芯中,极大地提高了抽运强度和作用距离^[14-15],大大地降低了抽运阈值^[4]。在空芯光纤中虽然无法通过倾斜光束实现相位匹配,但是可以通过调节气体压强改变抽运光和反斯托克斯光在不同模式下的有效折射率^[12,16],达到相位匹配条件实现有效反斯托克斯拉曼转换^[17-19]。

本文利用负曲率空芯光纤,开展了基于氢气级联 SRS 同时产生红绿蓝色激光的实验研究。以商用的

收稿日期: 2016-03-08; **收到修改稿日期:** 2016-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(11274385)

作者简介: 顾 博(1990—),男,硕士研究生,主要从事光纤气体激光器方面的研究。E-mail: gubo1120100983@163.com

导师简介: 王泽锋(1980—),男,博士,副教授,主要从事光纤气体激光器和光纤光栅方面的研究。

E-mail: hotrosemaths@163.com(通信联系人)

1064 nm 微片脉冲激光器为抽运源,抽运一段充有高压氢气的 Ice-cream 型负曲率空芯光纤,通过调节氢气压强达到了抽运光、一阶斯托克斯光以及各阶反斯托克斯光在不同模式下的相位匹配条件,实现了波长分别为 737.6,564.2,457.1 nm 的一阶、二阶、三阶振动反斯托克斯光的多种模式输出。

2 实验装置

图 1(a)为实验装置示意图。所用的空芯光纤为英国巴斯大学拉制的 Ice-cream 型负曲率空芯光纤,其横截面电子扫描显微图如图 1(b)所示,图中光纤截面浅颜色区域为石英结构,深颜色区域为空气孔。纤芯是由 8 个横截面为 Ice-cream 形状的毛细管相互接触形成的边界为负曲率的封闭区域。光纤长度约为 6.6 m,纤芯直径约为 50 μm (定义为纤芯径向正对的两个 Ice-cream 形状圆弧顶之间的距离)。传输损耗测量结果[图 1(c)]表明,该空芯光纤在抽运波长 1064 nm 处具有较低的传输损耗,约为 0.12 dB/m,在其他波长处的传输损耗如表 1 所示,其中绿光 564 nm 和蓝光 457 nm 位于高损耗区。抽运源为 1064 nm 微片脉冲激光器,线宽约为 0.3 nm,脉宽约为 0.7 ns,重复频率为 7.25 kHz,最大平均输出功率为 65 mW。利用一个半波片和偏振分光棱镜调节抽运功率,然后通过一个焦距为 100 mm、C 波段镀增透膜(镀膜波长 1050~1620 nm,透射率在 1064 nm 处大于 98%)的透镜将其聚焦耦合进入空芯光纤。空芯光纤两端密封于气体腔中,光束通过同样 C 波段镀膜的玻璃窗口输入输出。由于实验所用的负曲率空芯光纤具有一定的偏振敏感性,所以在输入端聚焦透镜之前用了另一个半波片来调节抽运激光的偏振方向,以达到最佳的传输效率。输出光束通过透镜准直后进行相关测量。准直光束经过一个棱镜后可将红、绿、蓝色激光和抽运光分开,然后用相机同时记录各光斑图像。

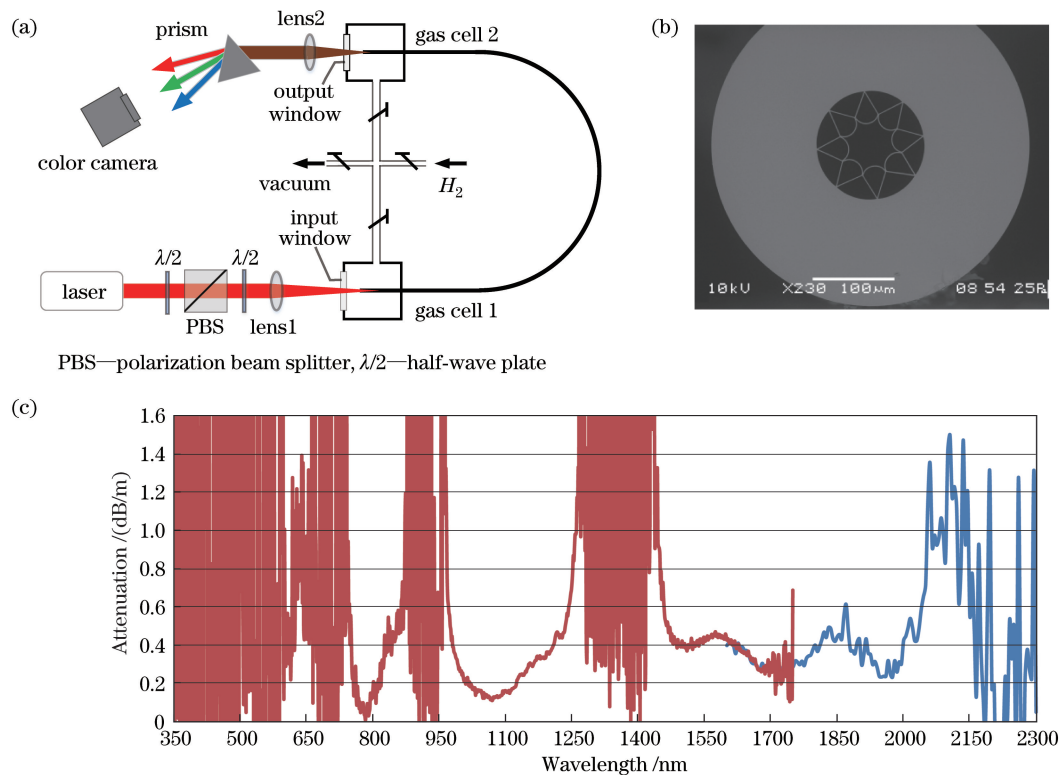


图 1 (a) 实验装置;(b) 空芯光纤横截面的扫描电子显微图;(c) 空芯光纤的传输损耗测量结果

Fig. 1 (a) Experimental setup; (b) scanning electron micrograph of the hollow-core fiber cross section; (c) measured transmission losses of the hollow-core fiber

3 结果与分析

当空芯光纤抽真空,耦合至纤芯的抽运功率为 42.6 mW 时,测得输出光谱如图 2(a)所示,只有 1064.6 nm 的抽运波长。向空芯光纤中充入 3.5 MPa 氢气时,输出光谱如图 2(b)所示,除抽运波长外,还观

表 1 负曲率空芯光纤在不同斯托克斯波长处的传输损耗

Table 1 Transmission losses of different Stokes wavelengths in the negative curvature hollow-core fiber

Wavelength /nm	Raman shift /cm ⁻¹	Raman process	Fiber loss /(dB/m)
457	+4155×3	The third order vibrational anti-Stokes	High loss
564	+4155×2	The second order vibrational anti-Stokes	High loss
738	+4155	The first order vibrational anti-Stokes	0.45
1002	+587	The first order rotational anti-Stokes	0.24
1064	0	Pump	0.12
1135	-587	The first order rotational Stokes	0.25
1908	-4155	The first order vibrational Stokes	0.35

测到了一阶、二阶、三阶振动反斯托克斯波,分别对应波长 737.6,564.2,457.1 nm。在 SRS 过程中,反斯托克斯波长的计算公式为

$$\frac{1}{\lambda_{as_i/s_i}} = \left[\frac{1}{\lambda_p} \times 10^9 \pm i \times \Delta\nu \times 100 \right] \times 10^{-9}, \quad (1)$$

式中 λ 代表波长,单位为 nm,下标 as_i 表示第 i 阶反斯托克斯光,下标 s_i 表示第 i 阶斯托克斯光,下标 p 代表抽运光, $\Delta\nu$ 代表拉曼频移系数,单位为 cm^{-1} ,利用(1)式计算反斯托克斯波长时取加号,计算斯托克斯波长时取减号。室温条件下,氢气的振动拉曼频移系数为 4155 cm^{-1} ,将此拉曼频移系数和测得的抽运波长带入(1)式,可以得到理论计算的一阶、二阶、三阶振动反斯托克斯波长分别为 738.1,564.9,457.5 nm,说明实验获得的结果与理论计算值吻合。此外还出现了一阶转动斯托克斯波和对应的反斯托克斯波,波长分别为 1135.4 和 1001.95 nm,与理论计算值吻合。室温下,氢气的转动拉曼频移系数为 587 cm^{-1} ,利用(1)式理论计算的转动斯托克斯波以及反斯托克斯波长分别为 1135.6 和 1001.98 nm。受光谱仪测量范围的限制,一阶振动斯托克斯波(对应波长为 1908 nm)未在图 2(b)显示出来。从输出光谱可以看到,在 3.5 MPa 气压下,抽运光与斯托克斯光以及各阶反斯托克斯光之间实现了很好的相位匹配,737.6 nm 的大部分能量转换到了 564.2 nm,但是其对应的传输损耗很高,功率非常弱,在耦合抽运功率为 42.6 mW 时绿光功率只有几十微瓦,功率计无法准确测量,因此仅用相机记录了棱镜分光后的光斑图像。

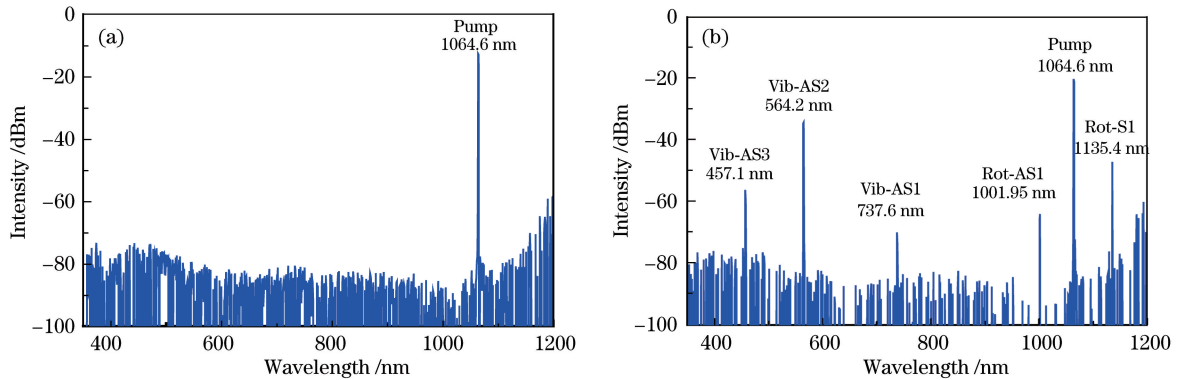


图 2 输出光谱图。(a) 真空中的空心光纤;(b) 氢气压强 3.5 MPa、耦合抽运功率 42.6 mW
Fig. 2 Output spectrum. (a) Hollow-core fiber in vacuum; (b) 3.5 MPa hydrogen pressure and 42.6 mW coupled pump power

实验中发现当氢气压强为 1.5 MPa 时,红、绿、蓝色激光都比较明显。为了研究红、绿、蓝色激光随抽运功率的变化,用彩色 CMOS 相机记录了棱镜分光后输出光斑图样随抽运功率的变化情况,如图 3 所示。从图中可见,随着抽运功率的增加,红、绿、蓝色激光相继出现并逐渐变强,因此可以推测在此气压条件下,一阶、二阶以及三阶振动反斯托克斯波的观测阈值依次增加。从图 3 还可以看出,红、绿、蓝激光光斑均为比较明显的 LP₁₁ 模,可以推测在此气压下,抽运光、一阶斯托克斯光和反斯托克斯光以 LP₁₁ 模实现了相位匹配。

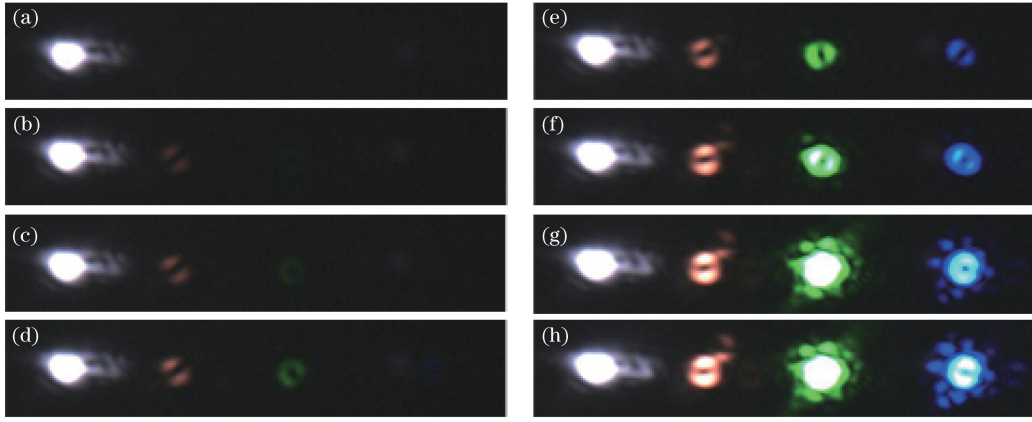


图 3 氢气为 1.5 MPa 时,残余抽运光和红、绿、蓝色拉曼激光近场光斑随耦合抽运功率的变化。

(a) 10.3 mW; (b) 11.8 mW; (c) 12.6 mW; (d) 13.4 mW; (e) 15.8 mW; (f) 23.7 mW; (g) 31.6 mW; (h) 39.5 mW
 Fig. 3 Evolution of near-field images of residual pump and red, green, blue Raman lasers at 1.5 MPa hydrogen pressure with coupled pumped powers. (a) 10.3 mW; (b) 11.8 mW; (c) 12.6 mW; (d) 13.4 mW; (e) 15.8 mW; (f) 23.7 mW; (g) 31.6 mW; (h) 39.5 mW

实验测得的残余抽运光和各拉曼激光成分相对输出功率和近场光斑图样随氢气气压的变化分别如图 4 和图 5 所示,对应的耦合抽运功率为 42.6 mW。图 4 中,由于红、绿、蓝色激光平均脉冲功率很低,约为几十微瓦,无法用功率计准确测量,实验中用快速响应的光电探测器分别记录脉冲形状,通过脉冲峰值来确定红、绿、蓝色激光输出功率的相对大小,一阶振动斯托克斯波(1908 nm)和残余抽运光的功率用热敏型功率计测量。为便于分析,各曲线都相对其本身的最大值进行了归一化,因此图中各曲线之间的能量没有可比性,只有每条曲线的相对值有意义。从图 4 可以看出,随着气压的增大,输出的残余抽运光功率呈下降趋势,说明气压越高抽运光到斯托克斯光以及反斯托克斯光的转化效率越高。各阶反斯托克斯光出现了明显的气压选择性,在特定气压值附近产生较强功率输出。其中,一阶振动反斯托克斯光(737.6 nm)在 0.6 MPa 和 5.3 MPa 附近输出功率较强,二阶振动反斯托克斯光(564.2 nm)在 1.5 MPa 和 3.5 MPa 附近输出较强,此时三阶振动反斯托克斯光(457.1 nm)的输出也相对较强。而一阶振动斯托克斯光(1908 nm)不需要相位匹配,因此没有压强选择现象,在较大气压范围内均有较强功率输出,在 2.3 MPa 附近输出功率达到最大,此时对应的拉曼增益最大。

在产生反斯托克斯光的过程中,波矢失配因子为^[17]

$$\Delta\beta = [\beta_{mn}(\lambda_p) - \beta_{mn}(\lambda_s)] - [\beta_{mn}(\lambda_{as}) - \beta_{mn}(\lambda_p)], \quad (2)$$

式中 β_{mn} 为模式传播常数,下标 m 和 n 分别为角向和径向的模阶数, λ_p 、 λ_s 和 λ_{as} 分别为抽运波长、斯托克斯波长以及反斯托克斯波长。其中特定波长的模式传播常数为^[12,16]

$$\beta_{mn}(\lambda) = n_{mn}(\lambda) \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (3)$$

式中 n_{mn} 为空芯光纤中特定波长下 LP_{mn} 模的有效折射率,其公式为^[16]

$$n_{mn}(\lambda) = \sqrt{n_{\text{gas}}^2(\lambda) - \left(\frac{\lambda u_{mn}}{2\pi a}\right)^2}, \quad (4)$$

式中 n_{gas} 为空芯光纤中特定波长下气体的折射率,其大小可以通过气压来控制。 u_{mn} 为 m 阶贝塞尔函数的第 n 个根, a 为空芯光纤纤芯的有效半径。产生有效的反斯托克斯光,需要波矢失配因子 $\Delta\beta=0$,也即要实现相位匹配。由(2)~(4)式可知,在特定纤芯有效半径条件下,空芯光纤中氢气的气压一定时,各阶斯托克斯波只能在特定模式下实现相位匹配,从图 3 中 1.5 MPa 气压条件下的光斑图样可以看出这一点。当气压变化时,各阶反斯托克斯波实现相位匹配时的模式分布也相应变化。从图 5 光斑图像变化中可以看到这种明显的模式以及气压选择性,例如,1.0,2.5,2.75 MPa 时,分别如图 5(b)、(e)、(f)所示,一阶反斯托克斯光为较明显的基模,而 0.5 和 2.0 MPa 时,分别如图 5(a)和(d)所示,一阶反斯托克斯光则为明显的 LP₁₁ 模;1.5 和 2.0 MPa 时,分别如图 5(c)和(d)所示,二阶反斯托克斯光为 LP₁₁ 模,而在 2.5 和 3.5 MPa 时,分别如图 5(e)

和(g)所示,二阶反斯托克斯光为明显的基模;对于三阶反斯托克斯光来说,在不同气压下也会出现不同的模式分布。

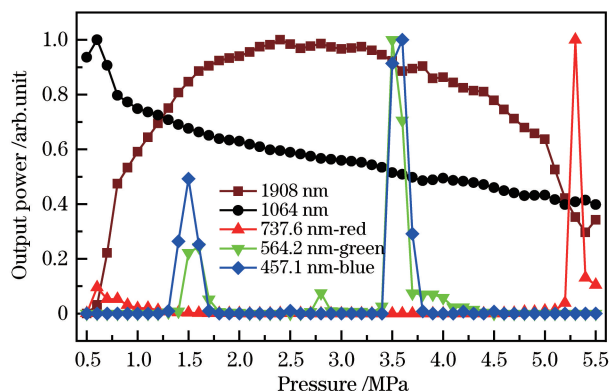


图 4 耦合抽运功率为 42.6 mW,残余抽运光和各拉曼激光成分相对输出功率随氢气气压的变化
Fig. 4 Evolution of relative intensities of the residual pump and Raman lines with hydrogen pressures at 42.6 mW coupled pump power

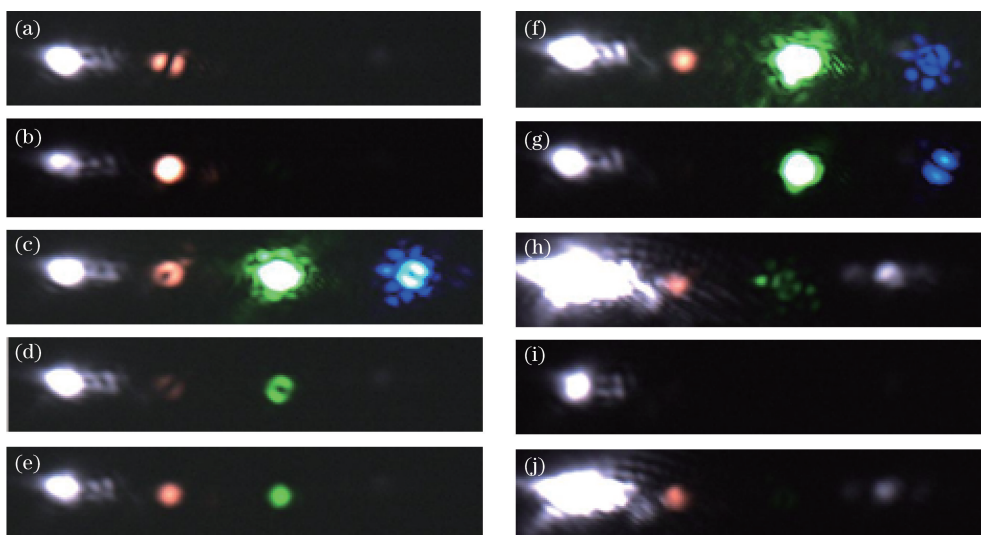


图 5 耦合抽运功率为 42.6 mW,抽运光和红、绿、蓝色拉曼激光近场光斑随氢气气压变化情况。
(a) 0.5 MPa;(b) 1.0 MPa;(c) 1.5 MPa;(d) 2.0 MPa;(e) 2.5 MPa;(f) 2.75 MPa;
(g) 3.5 MPa;(h) 4.0 MPa;(i) 4.5 MPa;(j) 5.0 MPa

Fig. 5 Evolution of near-field images of pump and red, green, blue Raman lasers with hydrogen pressures at 42.6 mW coupled pump power. (a) 0.5 MPa; (b) 1.0 MPa; (c) 1.5 MPa; (d) 2.0 MPa; (e) 2.5 MPa; (f) 2.75 MPa; (g) 3.5 MPa; (h) 4.0 MPa; (i) 4.5 MPa; (j) 5.0 MPa

4 结 论

通过 1064 nm 微片脉冲激光器抽运充高压氢气的 Ice-cream 型负曲率空芯光纤,利用氢气分子的级联振动受激拉曼散射实现了波长分别为 737.6,564.2,457.1 nm 的一阶、二阶、三阶振动反斯托克斯激光输出。实验结果表明,通过调节氢气气压,可以实现不同模式的抽运光和各级反斯托克斯光之间的相位匹配。下一步通过反馈控制,让某一颜色的光得到增强放大,则可实现有效的红、绿、蓝色激光输出。此结果为实现可见光甚至紫外光纤激光器提供了一条全新的技术途径。

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 H₂,

- D₂, and CH₄ [J]. Applied Physics Letter, 1963, 3(10): 181-184.
- 2 Loree T R, Cantrell C D, Barker D L. Stimulated Raman emission at 9.2 μm from hydrogen gas [J]. Optics Communications, 1976, 17(2): 160-162.
- 3 Begley R F, Harvey A B, Byer R L. Coherent anti-Stokes Raman spectroscopy [J]. Applied Physics Letters, 1974, 25(7): 387-390.
- 4 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.
- 5 Wang Zefeng, Yu Fei. 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. 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.
- 6 Couny F, Benabid F, Roberts P J, *et al.* Generation and photonic guidance of multi-octave optical-frequency combs [J]. Science, 2007, 318(5853): 1118-1121.
- 7 Tani F, Belli F, Abdolvand A, *et al.* Generation of three-octave-spanning transient Raman comb in H₂-filled hollow-core PCF [J]. Optics Letters, 2015, 40(6): 1026-1029.
- 8 Benoît A, Beaudou B, Alharbi M, *et al.* Over-five octaves wide Raman combs in high-power picosecond-laser pumped H₂-filled inhibited coupling Kagome fiber [J]. Optics Express, 2015, 23(11): 14002-14009.
- 9 Zaitsev S I, Imasaka T. Phase-matched generation of high-order continuous-wave coherent Raman sidebands [J]. Optics Communications, 2012, 285(3): 347-351.
- 10 Nazarkin A, Abdolvand A, Russell P St J. Optimizing anti-Stokes Raman scattering in gas-filled hollow-core photonic crystal fibers [J]. Physical Review A, 2009, 79(3): 031805.
- 11 Butylkin V S, Venkin V G, Protasov V P, *et al.* Effect of phase locking on the dynamics of the anti-Stokes component of stimulated Raman scattering [J]. Journal of Experimental & Theoretical Physics, 1976, 43(3): 430-435.
- 12 Nold J, Hölzer P, Joly N Y, *et al.* Pressure-controlled phase matching to third harmonic in Ar-filled hollow-core photonic crystal fiber [J]. Optics Letters, 2010, 35(17): 2922-2924.
- 13 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.
- 14 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.
- 15 Chen Yubin, Gu Bo, Wang Zefeng, *et al.* 1.5 μm fiber gas Raman laser source [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 36(5): 0506002.
陈育斌, 顾 博, 王泽锋. 1.5 μm 光纤气体拉曼激光光源 [J]. 光学学报, 2015, 36(5): 0506002.
- 16 Marcatili E A J, Schmeltzer R A. Hollowmetallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and lasers [J]. Bell Labs Technical Journal, 1964, 43(4): 1783-1809.
- 17 Trabold B M, Abdolvand A, Euser T G, *et al.* Efficient anti-Stokes generation via intermodal stimulated Raman scattering in gas-filled hollow-core PCF [J]. Optics Express, 2013, 21(24): 29711-29718.
- 18 Ziemieniczuk M, Walser A M, Abdolvand A, *et al.* Intermodal stimulated Raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2012, 29(7): 1563-1568.
- 19 Trabold B M, Abdolvand A, Euser T G, *et al.* Amplification of higher-order modes by stimulated Raman scattering in H₂-filled hollow-core photonic crystal fiber [J]. Optics Letters, 2013, 38(5): 600-602.