

# 反共振空芯光纤中氘气受激拉曼散射实验研究

黄威, 李智贤, 崔宇龙, 周智越, 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** 报道了基于反共振空芯光纤的氘气单程和级联受激拉曼散射实验研究, 详细分析了反共振空芯光纤中氘气受激拉曼散射的过程, 研究了输出光谱和拉曼谱线功率随氘气压强和泵浦激光功率的变化规律, 指出降低气压、采用峰值功率相对较低的泵浦脉冲可以有效抑制转动受激拉曼散射, 提高振动受激拉曼散射效率。此外, 通过进一步设计、拉制传输带位置合适、带宽较窄的反共振空芯光纤, 利用 1064 nm 脉冲激光泵浦, 可以实现高效的氘气一阶振动斯托克斯光(1561 nm)和二阶级联振动斯托克斯光(2925 nm)输出。

**关键词** 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/CJL202047.0101001

## Experimental Research on Stimulated Raman Scattering of Deuterium Gas in Anti-Resonance Hollow-Core Fibers

Huang Wei, Li Zhixian, Cui Yulong, Zhou Zhiyue, 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** This paper reports the experimental study of the single-pass and cascaded stimulated Raman scattering (SRS) of deuterium gas in anti-resonance hollow-core fibers (AR-HCFs). The process of SRS of deuterium gas in AR-HCF is analyzed in detail and the variations in the output spectrum and Raman power with the pressure of deuterium gas and the pump laser power are studied as well. It is found that the rotational SRS can be effectively suppressed and the efficiency of vibrational SRS is improved by reducing the pressure and using pump laser pulses with a relatively low peak power. In addition, by further designing and fabricating an AR-HCF with transmission bands in the right position and narrow bandwidths, efficient first-order vibrational Stokes light (1561 nm) and second-order cascaded vibrational Stokes light (2925 nm) can be output via pumping with a 1064 nm pulsed laser.

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

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

## 1 引言

1963 年 Minck 等<sup>[1]</sup>首次报道气体受激拉曼散射, 目前, 它已被证明是一种产生新型波长激光的有效方法, 采用这种方法产生的激光的波长覆盖紫外和红外波段<sup>[2-3]</sup>。然而, 在传统的气体腔中, 由于激光与气体的有效作用距离非常短, 泵浦阈值非常高, 同时容易产生多阶斯托克斯谱线, 因此从泵浦激光向目标拉曼谱线的转化效率通常很低。微结构空芯

光纤的出现为解决上述问题提供了一条有效的技术途径<sup>[4-5]</sup>。在空芯光纤中, 激光可以被约束在微米量级的空芯内传播很长的距离, 大大提高了泵浦强度, 极大地增强了激光与气体的相互作用。此外, 传输带可设计, 空芯光纤具有波长选择特性, 这使得获得特定拉曼谱线的高效转化成为可能<sup>[6-7]</sup>。近年来, 随着反共振空芯光纤的出现和发展<sup>[8-14]</sup>, 基于空芯光纤的气体拉曼激光器受到了研究人员的极大关注<sup>[15-27]</sup>。反共振空芯光纤的传输带灵活可控, 在中

收稿日期: 2019-07-31; 修回日期: 2019-08-23; 录用日期: 2019-09-06

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(2019JJ20023)

\* E-mail: hotrosemaths@163.com

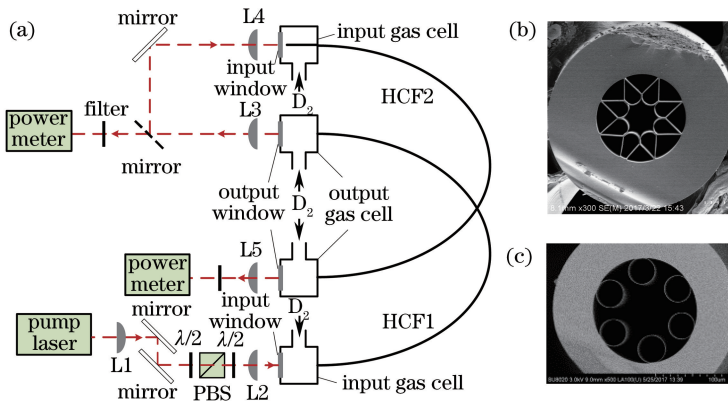
红外波段可以实现很低的传输损耗,大大促进了中红外波段光纤气体拉曼激光器的发展<sup>[23-25,27]</sup>。在前期研究中,本课题组利用反共振空芯光纤,实现了基于乙烷和甲烷气体的高峰值功率、窄线宽的  $1.5\ \mu\text{m}$  光纤气体拉曼激光器<sup>[18-22]</sup>,同时通过级联拉曼的方式实现了  $2.8\ \mu\text{m}$  光纤气体激光输出<sup>[24]</sup>。氙气振动拉曼频移的大小与甲烷和乙烷接近,可以作为实现  $1.5\ \mu\text{m}$  和  $2.8\ \mu\text{m}$  波段光纤气体拉曼激光输出的替换气体<sup>[26]</sup>,同时具有相对简单、更加稳定的分子结构,在高功率输出情况下具有一定的优势。因此,开展反共振空芯光纤中氙气的受激拉曼散射研究十分必要。

本文对反共振空芯光纤中氙气受激拉曼散射的特性进行了研究,首先采用  $1064.6\ \text{nm}$  高峰值功率激光器作为泵浦源,泵浦一段长为  $2\ \text{m}$  的充氙气的冰激凌型空芯光纤,对不同泵浦功率下的输出光谱、不同气压下主要谱线的功率以及脉冲光斑进行测量分析,结果表明:气压较高时有利于多条谱线的产生,气压较低并且泵浦脉冲峰值功率适当时有利于一阶振动斯托克斯谱线( $1561\ \text{nm}$ )输出。随后,将该光纤在  $400\ \text{kPa}$  气压下产生的最大输出拉曼光耦合到另一段  $2.2\ \text{m}$  长的无节点型空芯光纤中,与氙气再次发生受激拉曼散射,通过此级联方式获得了包括  $2.92\ \mu\text{m}$  中红外光在内的拉曼激光输出。

## 2 实验装置

用于研究空芯光纤中氙气受激拉曼散射的级联

结构实验装置如图 1 所示。第一级结构使用一个  $1064.6\ \text{nm}$  的微芯脉冲激光器作为泵浦源,泵浦源的脉冲宽度约为  $1.5\ \text{ns}$ ,重复频率为  $1\ \text{kHz}$ ,平均输出功率约为  $160\ \text{mW}$ 。泵浦激光经由两块平凸透镜和两块镀银反射镜通过空间耦合的方式耦合进入  $2\ \text{m}$  长的空芯光纤(HCF1)中。在进入空芯光纤之前,泵浦激光先后通过一块半波片、一块偏振分光棱镜和另一块半波片。通过旋转第一块半波片可以调节透过偏振分光棱镜的能量,即注入到空芯光纤中的能量;通过旋转第二块半波片即可优化注入光纤的泵浦光的偏振方向。空芯光纤的两端密封于两个气体腔中,经由气体腔即可实现向空芯光纤的中空纤芯内充入氙气。耦合进入空芯光纤的泵浦激光与氙气发生受激拉曼散射,产生的拉曼光和残余泵浦光通过气体腔上的输出窗口后经由一块平凸透镜准直和滤波器滤波,之后进入功率计等探测器件进行测量分析。实验装置的第二级结构与第一级类似,将第一级产生的拉曼光通过两块透镜和镀银反射镜耦合到另一段长  $2.2\ \text{m}$ 、充有氙气的空芯光纤(HCF2)中,再次与氙气发生受激拉曼散射,产生的拉曼光和残余泵浦光再次通过输出窗口和滤波器件进入功率计等探测器件进行测量分析。实验中使用的两根空芯光纤分别为冰激凌型(HCF1,英国 Bath 大学 Jonathan Knight 教授课题组提供)和无节点型(HCF2,北京工业大学汪滢莹博士课题组提供)空芯光纤,光纤的横截面分别如图 1(b)、(c)所示,纤芯直径分别为  $46\ \mu\text{m}$  和  $75\ \mu\text{m}$ 。



L: convex-plane lens; PBS: polarization beam splitter;  $\lambda/2$ : half-wave plate; HCF: hollow-core fiber;  $D_2$ : deuterium

图 1 实验装置。(a) 实验装置示意图;(b)冰激凌型空芯光纤横截面的扫描电镜(SEM)图;  
(c)无节点型空芯光纤横截面的扫描电镜图

Fig. 1 Experimental setup. (a) Schematic of experimental setup; (b) SEM image of cross section of ice-cream type HCF; (c) SEM image of cross section of node-less type HCF

### 3 分析与讨论

图 2(a)显示了气压为 400 kPa 和 800 kPa 时不同泵浦功率下光谱仪 (Yokogawa AQ6370D, AQ6375B) 测量得到的实验装置的第一级输出光谱, 以及 HCF1 的传输损耗谱。图中 vib-S 和 vib-AS 分别代表振动斯托克斯和振动反斯托克斯, rot1-S、rot2-S 和 rot3-S 分别代表三种转动态的转动斯托克斯, rot1-AS 表示转动反斯托克斯。1200 nm 处噪声基底的变化是由光谱仪更换引起

的。在图 1(a)中可以明显地看到: 只有空芯光纤传输带区域内才有拉曼谱线出现, 传输带外的谱线由于损耗太高而无法产生; 在 400 kPa 气压下, 随着耦合泵浦功率增大, 在近红外波段只有一阶振动斯托克斯谱线(1560.9 nm)产生; 在 800 kPa 气压下, 随着泵浦功率增大, 氙气的受激拉曼散射产生了大量谱线, 包括泵浦光本身的振动线(1560.9 nm 和 807.5 nm, 频移为  $2988\text{ cm}^{-1}$ )和转动线(1113.6 nm 和 1019.4 nm, 频移为  $415\text{ cm}^{-1}$ ), 以及以这些谱线作为新的泵浦波长而产生的多阶级联振动线和转动

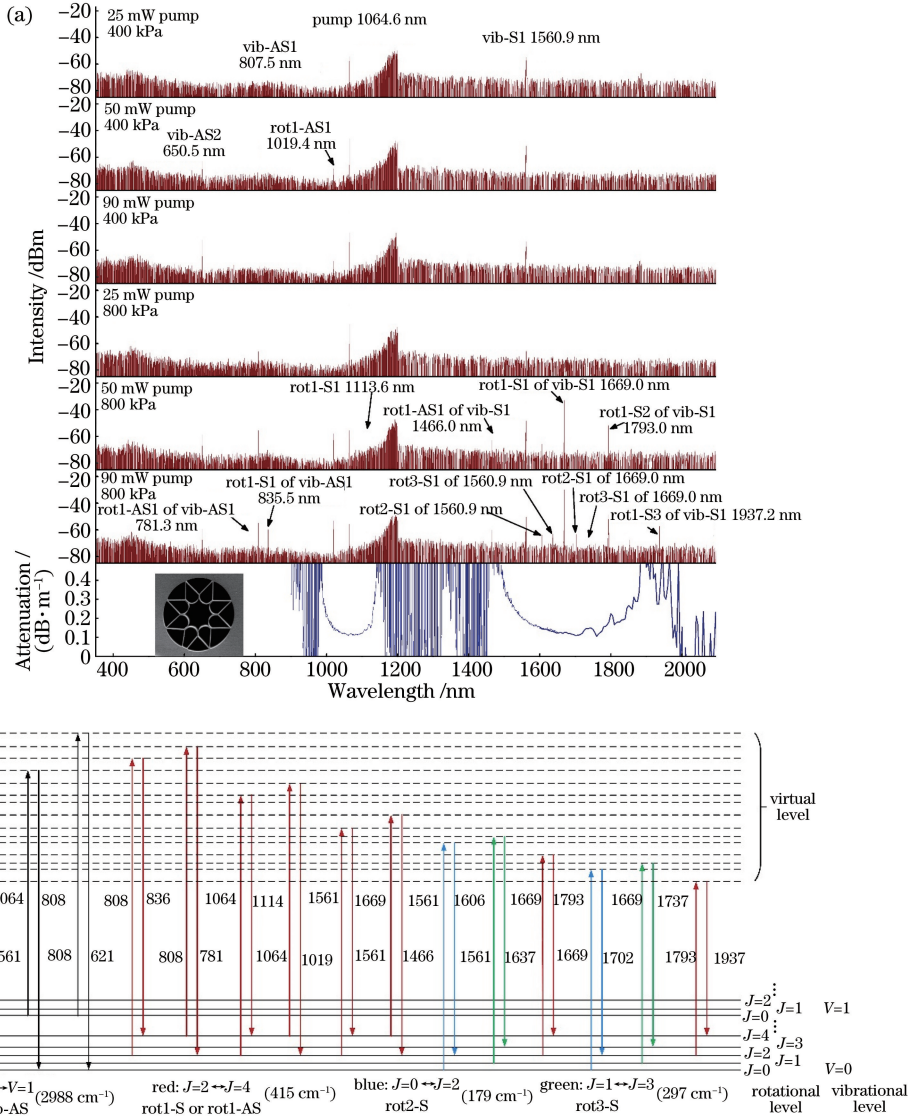


图 2 HCF1 的输出光谱、测量损耗谱及输出光谱的能级跃迁图。(a) 400 kPa 和 800 kPa 气压下泵浦功率分别为 25, 50, 90 mW 时 HCF1 输出光谱和测量损耗谱; (b) 800 kPa 气压下泵浦功率为 90 mW 时 HCF1 输出光谱的能级跃迁图(括号内的是相应的拉曼频移)

Fig. 2 Output spectra, measured loss spectrum, and energy level transition diagram of output spectrum of HCF1. (a) Output spectra and measured loss spectrum of HCF1 at pressures of 400 kPa and 800 kPa under pump powers of 25, 50, and 90 mW; (b) energy level transition diagram of output spectrum of HCF1 at pressure of 800 kPa under pump power of 90 mW (corresponding Raman frequency shifts are shown within brackets)

线(650.5, 781.3, 835.5, 1466.0, 1669.0, 1793.0, 1937.2 nm),涵盖了从 0.6  $\mu\text{m}$  到 2  $\mu\text{m}$  的可见光到近红外范围。此外,在 800 kPa 气压下,当泵浦功率为 90 mW 时,从测量输出光谱中还可以观察到氙气的另外两种转动谱线:1605.7 nm 和 1702.4 nm (频移 179  $\text{cm}^{-1}$ )以及 1636.9 nm 和 1737.2 nm (频移 297  $\text{cm}^{-1}$ )。图 2(b)所示的能级跃迁图详细地展示了这些谱线的能级跃迁过程。对于氙气的振动受激拉曼散射,氙气分子吸收泵浦光子能量,从能级  $V=0$  的基态(或  $V=1$  的振动态)跃迁到虚能级,而后再跃迁回到  $V=1$  的振动态(或  $V=0$  的基态),发射一个斯托克斯(或反斯托克斯)光子,此过程中基态与振动态的能级差对应受激拉曼散射的振动频移为 2988  $\text{cm}^{-1}$ 。对于转动受激拉曼散射,氙气的跃迁方式与振动受激拉曼散射一致,但本实验中的氙气分子存在三种能态的跃迁方式: $J=2 \rightarrow J=4$ ,  $J=0 \rightarrow J=2$ ,  $J=1 \rightarrow J=3$ , 分别对应 415, 179, 297  $\text{cm}^{-1}$  的频移系数( $J$  为转动能级)。高气压、最高功率泵浦下才出现的后两种转动能态跃迁的实验现象表明, $J=2 \rightarrow J=4$  能态跃迁的拉曼增益较高,比较容易在实验中观察到<sup>[25-26]</sup>,而  $J=0 \rightarrow J=2$  和  $J=1 \rightarrow J=3$  能态跃迁的拉曼增益较低,不容易产生。

图 2 显示的氙气受激拉曼散射产生的众多谱线的结果与本课题组以前报道的空芯光纤中氢气和甲烷、乙烷的受激拉曼散射结果有很大差别。氢气的振动频移系数(4155  $\text{cm}^{-1}$ )和转动频移系数(587  $\text{cm}^{-1}$ )较大,且位于空芯光纤传输带内的谱线较少,因而实际产生的谱线并不多<sup>[15-17]</sup>。甲烷由于自身高度对称的分子结构的缘故,只有振动谱线产生<sup>[28]</sup>,因此实际输出的谱线比较干净<sup>[18-24]</sup>。本实验的氙气受激拉曼散射谱线众多的原因是:氙气的振动和转动频移系数相对于氢气的较小,因而位于 HCF1 的传输带范围内的拉曼谱线数目较多。因此,如果要在空芯光纤中利用氙气受激拉曼散射获得高效的 1.56  $\mu\text{m}$  斯托克斯光输出,就必须要在低气压条件下进行实验,或选用传输带更窄的空芯光纤作为实验光纤(使高阶拉曼谱线位于传输带外),或使用合适峰值功率的脉冲泵浦,以抑制高阶拉曼谱线的产生。在图 2 的众多谱线中,功率占比较大的主要谱线有一阶振动斯托克斯线(1560.9 nm),以及以该谱线作为泵浦线的一阶转动斯托克斯线(1669.0 nm)、二阶级联转动斯托克斯线(1793.0 nm)和三阶级联转动斯托克斯线(1937.2 nm)。

图 3 给出在不同气压下主要谱线的功率随泵浦功率的变化曲线图,以及最高泵浦功率下的输出光谱图,其中 1561 nm 功率由带通滤波片(Thorlabs FB1550-40)测量得到,1793 nm 和 1937 nm 功率由带通滤波片(Thorlabs FB2000-500)测量得到,而 1669 nm 光由透过长波通滤波片(Thorlabs FEL1100)的功率减去以上两种功率得到。可以看到,各谱线的阈值随着气压的增大而降低,这是因为拉曼增益随着气压的增大而增大。另外,在气压大于 400 kPa 的情况下,1561 nm 光功率增长曲线存在明显的饱和现象,这是因为产生了高阶转动谱线,消耗了 1561 nm 光能量,进而抑制了其功率的增长。在气压为 400 kPa 的情况下,由于气压低阈值高,高阶拉曼转化并未出现,光谱中只有一条拉曼谱线。因此,在 400 kPa 气压下,本实验在 2 m 空芯光纤中获得了最大功率为 27 mW 的 1561 nm 激光输出,对应的峰值功率约为 19 kW,脉冲能量约为 27  $\mu\text{J}$ 。从图 4(c)、(e)、(g)可以看到,以 1561 nm 光作为泵浦光,产生的一阶、二阶和三阶转动斯托克斯线的功率几乎同时增大,这可以认为是高阶转动线的增益十分接近,因而发生拉曼转化时,各阶谱线一起产生。另外,当气压为 1000 kPa 时,二阶和三阶转动斯托克斯光功率甚至超过了一阶转动斯托克斯光功率,这是因为气压升高而阈值降低导致更多的一阶转动斯托克斯光转化成了二阶和三阶转动斯托克斯光,此时二阶和三阶转动斯托克斯光功率的最高值为 13 mW。

图 4 显示了红外相机(Xenics MCT-2327)测量得到的光斑图,其中出现的干涉型线条为相机伪影<sup>[7]</sup>。可以看到,泵浦源的输出光为良好的基模,通过空芯光纤传输后,泵浦光仍保持基模模式不变,表明泵浦光以基模模式发生受激拉曼散射。发生拉曼转化而产生的一阶振动斯托克斯光的模式也为基模,这表明该空芯光纤中的受激拉曼散射没有出现高阶模,而同为基模的泵浦光和斯托克斯光有着最大的交叠面积,这有助于高效率的拉曼转化。

在氙气和氙气级联的实验研究中,将第一级结构处于 400 kPa 气压下产生的最大功率拉曼光耦合到充有 1400 kPa 氙气的无节点型空芯光纤中去,利用光谱仪(Yokogawa AQ6376D)测量光纤的输出光谱。图 5(a)显示了测量光谱和 HCF2 的传输损耗谱。可以看到,空芯光纤的传输带范围比较广,几乎包含了 1500~3000 nm 范围里的所有区域。在该传输带范围内,主要产生了 1561 nm 的一阶、二阶

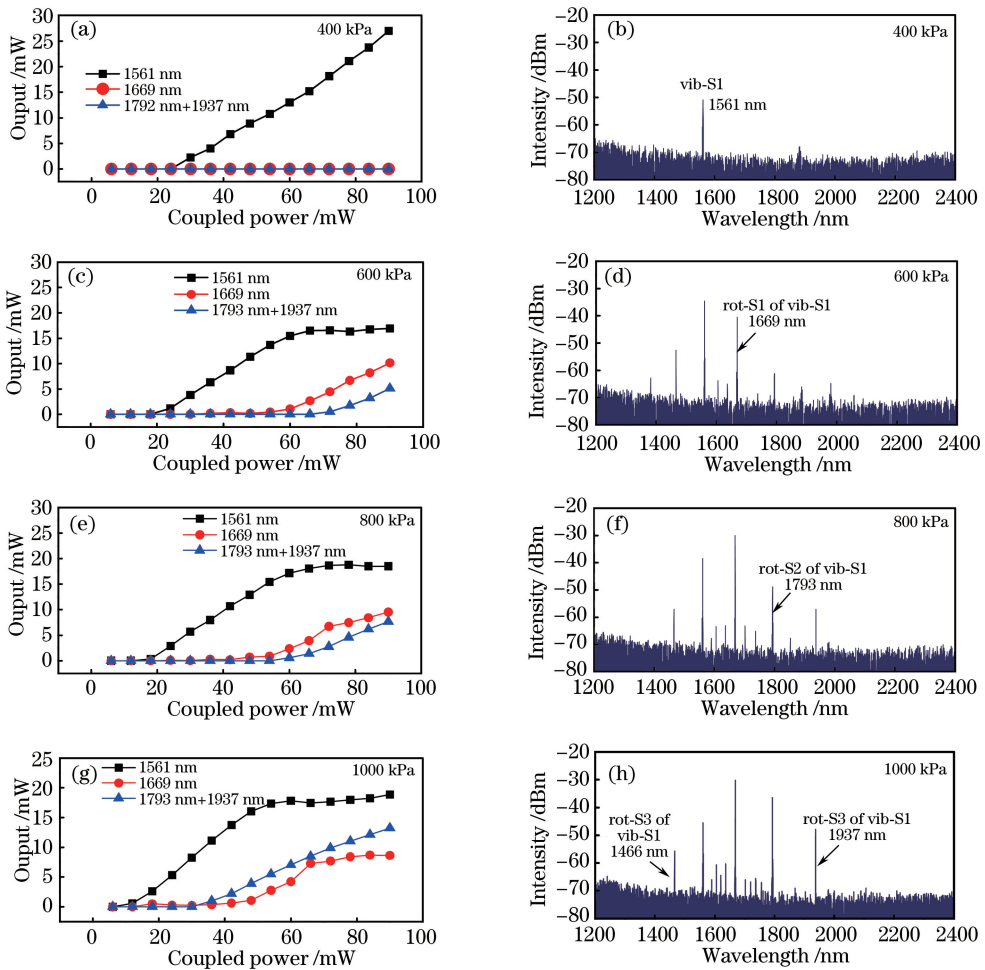


图 3 不同气压下,拉曼光功率随耦合泵浦光功率变化的曲线及最大耦合功率泵浦下空芯光纤的输出光谱。(a)(b) 400 kPa;(c)(d) 600 kPa;(e)(f) 800 kPa;(g)(h) 1000 kPa

Fig. 3 Raman light power as a function of coupled pump power and output spectra of HCF under maximum coupled pump power at different pressures. (a)(b) 400 kPa; (c)(d) 600 kPa; (e)(f) 800 kPa; (g)(h) 1000 kPa

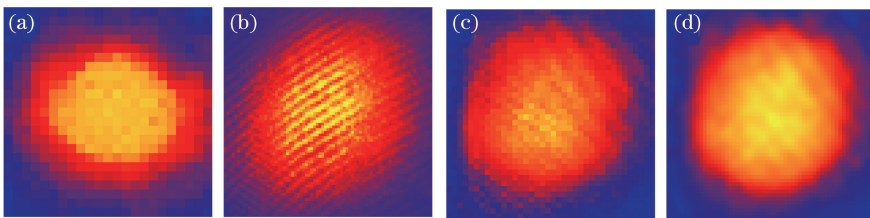


图 4 光斑图。(a)泵浦源输出的泵浦光;(b)空芯光纤输出端的泵浦光;  
(c)低功率下 1561 nm 拉曼光;(d)高功率下 1561 nm 拉曼光

Fig. 4 Measured patterns. (a) Pump light from pump source; (b) pump light at output end of HCF; (c) 1561-nm Raman light under low power; (d) 1561-nm Raman light under high power

转动斯托克斯谱线和一阶振动斯托克斯谱线 (2924.9 nm),插图显示了 2924.9 nm 斯托克斯光的精细谱。图 5(b)显示了输出谱线对应的能级跃迁图。与图 2(b)类似,在高峰值功率的 1561 nm 光的泵浦下,HCF2 中的氙气也发生了  $V=0 \rightarrow V=1$  振动能态的跃迁,以及  $J=2 \rightarrow J=4$ 、 $J=0 \rightarrow J=2$ 、 $J=$

$1 \rightarrow J=3$  转动能态的跃迁,并且在  $J=2 \rightarrow J=4$  的能态跃迁上产生了二阶斯托克斯光。使用带通滤光片(Thorlabs FB2750-500)和热功率计测量 2.92  $\mu\text{m}$  拉曼光的功率,结果小于 0.5 mW,对应的转化量子效率小于 5%。此结果远远小于之前报道的甲烷-甲烷级联<sup>[24]</sup>和氙气-甲烷级联<sup>[26]</sup>第二级的实验结

果,原因在于相比于甲烷来说,氙气的转动受激拉曼散射更容易发生,因而甲烷作为级联结构中第二级的增益气体,其产生的谱线十分干净,仅有二阶振动拉曼谱线(相比于最初的 1064 nm 泵浦线);但氙气作为级联结构中第二级的增益气体,容易产生振动谱线和转动谱线,谱线竞争导致一阶振动斯托克斯

光的输出效率很低。因此如果要利用氙气实现 2.9  $\mu\text{m}$  中红外激光高效输出,则需要将第二级的空芯光纤更换为传输带只包括一阶振动斯托克斯谱线和二阶振动斯托克斯谱线的空芯光纤,使转动谱线位于传输带外,以抑制转动谱线的产生,如此一来拉曼光的效率将会大大提升。

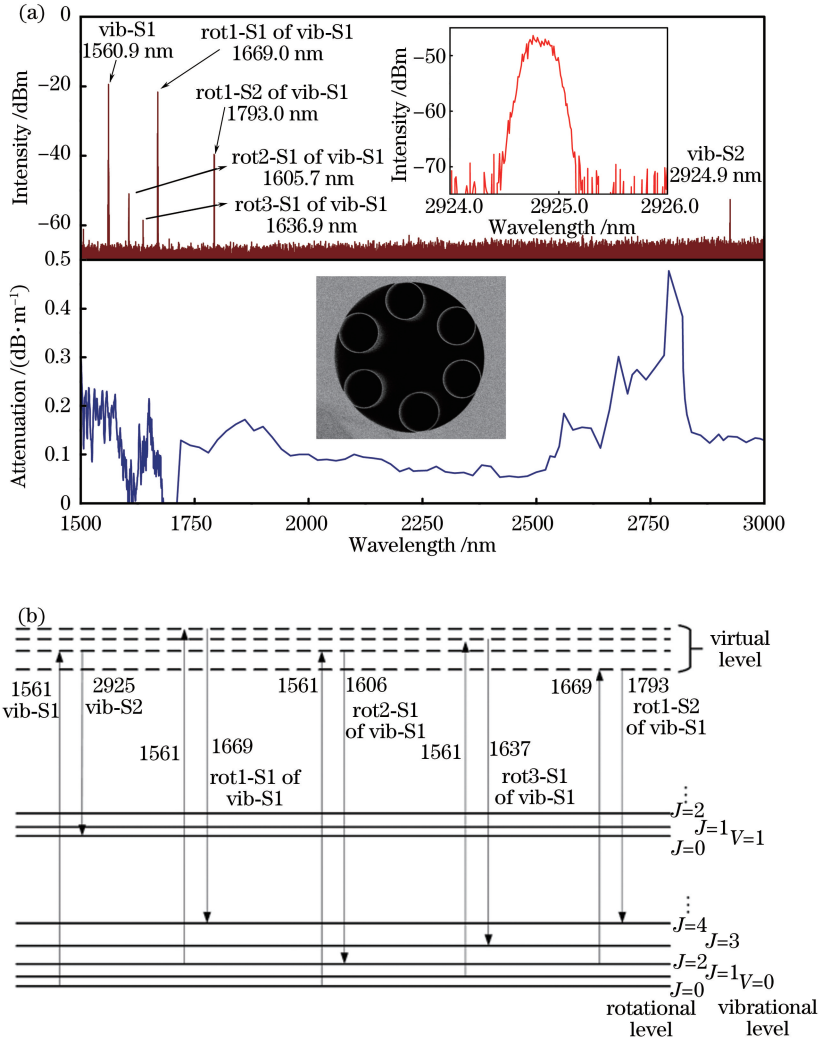


图 5 HCF2 输出光谱、测量损耗谱及输出光谱的能级跃迁图。(a) 1400 kPa 气压下的输出光谱及 HCF2 的测量损耗谱,图中 S1 和 S2 分别代表一阶和二阶斯托克斯,插入图片是在 0.02 nm 精度下 2924.9 nm 的精细谱;(b) 1400 kPa 气压下输出光谱的能级跃迁图

Fig. 5 Output spectra, measured loss spectrum, and energy level transition diagram of output spectrum of HCF2. (a) Output spectrum and measured loss spectrum of HCF2 at pressure of 1400 kPa, where S1 and S2 represent first- and second-order Stokes respectively and inset shows fine spectrum near 2924.9 nm with resolution of 0.02 nm; (b) energy level transition diagram of output spectrum of HCF2 at pressure of 1400 kPa

## 4 结 论

本文在由两段充有氙气的不同类型的反共振空芯光纤构成的级联结构实验系统中开展了氙气受激拉曼散射研究。结果表明:相比于氢气和甲烷、乙

烷,氙气的受激拉曼散射容易产生三种小频移系数的转动谱线,因此实验结构的第一级在高气压、高功率泵浦下获得了 0.6~2  $\mu\text{m}$  空芯光纤传输带范围内的众多拉曼谱线。为获得有效的一阶振动斯托克斯 1.5  $\mu\text{m}$  输出,降低气压、选取传输带范围更窄的空

芯光纤或者选择峰值功率相对较小的泵浦脉冲是有效的方式。第二级在第一级输出光的泵浦下,产生了相对于 1064 nm 最初泵浦线的二阶振动斯托克斯谱线(2925 nm),但是由于同时产生了转动谱线,2925 nm 激光的输出效率很低。如果使用传输带只含 1.5  $\mu\text{m}$  和 2.9  $\mu\text{m}$  的空芯光纤,则将有望提高 2.9  $\mu\text{m}$  的拉曼转化效率。氙气相对于甲烷具有更加简单和稳定的分子结构,在高功率下具有一定优势。本文为下一步开展高效、高功率的氙气振动拉曼激光器的研究打下了良好的基础。

## 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  $\text{H}_2$ ,  $\text{D}_2$ , and  $\text{CH}_4$  [J]. *Applied Physics Letters*, 1963, 3(10): 181-184.
- [2] Brink D J, Proch D. Efficient tunable ultraviolet source based on stimulated Raman scattering of an excimer-pumped dye laser[J]. *Optics Letters*, 1982, 7(10): 494-496.
- [3] Loree T R, Cantrell C D, Barker D L. Stimulated Raman emission at 9.2  $\mu\text{m}$  from hydrogen gas[J]. *Optics Communications*, 1976, 17(2): 160-162.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Couny F, Benabid F, Light P S. Large-pitch Kagome-structured hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(24): 3574-3576.
- [9] 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.
- [10] Yu F, Wadsworth W J, Knight J C. Low loss silica hollow core fibers for 3-4  $\mu\text{m}$  spectral region [J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 11153-11158.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Wang Z F, Yu F, Wadsworth W J, et al. Efficient 1.9  $\mu\text{m}$  emission in  $\text{H}_2$ -filled hollow core fiber by pure stimulated vibrational Raman scattering [J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(10): 105807.
- [16] 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.
- [17] Li Z X, Huang W, Cui Y L, et al. Efficient high power, narrow linewidth 1.9  $\mu\text{m}$  fiber hydrogen Raman amplifier[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(14): 3902-3906.
- [18] 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.
- [19] Chen Y B, Wang Z F, Gu B, et al. Achieving a 1.5  $\mu\text{m}$  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.
- [20] 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.
- [21] Chen Y B, Wang Z F, Li Z X, et al. Ultra-efficient Raman amplifier in methane-filled hollow-core fiber

- operating at 1.5  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20944-20949.
- [22] Li Z X, Huang W, Cui Y L, et al. 0.83 W, single-pass, 1.54  $\mu\text{m}$  gas Raman source generated in a  $\text{CH}_4$ -filled hollow-core fiber operating at atmospheric pressure [J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 12522-12529.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Huang W, Cui Y L, Li Z X, et al. 1.56  $\mu\text{m}$  and 2.86  $\mu\text{m}$  Raman lasers based on gas-filled anti-resonance hollow-core fiber [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(7): 071406.
- [27] 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.
- [28] Thomas M A, Welsh H L. The Raman spectrum of methane [J]. *Canadian Journal of Physics*, 1960, 38(10): 1291-1303.