

半导体抽运的单程中红外光纤气体激光器

王泽锋¹ 于 飞²

(¹ 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)
² 巴斯大学物理系, 巴斯 英国 BA2 7AY)

摘要 报道了半导体抽运的单程中红外光纤气体激光器。用一个被调制放大的可调谐 1.5 μm 半导体激光器抽运一段长为 2.3 m、充低压乙炔气体的低损耗负曲率空心光子晶体光纤(HC-PCF), 实现了单程有效的中红外(3.1~3.2 μm)激光输出, 气压为 200 Pa 时光-光转换效率大于 14.5%, 100 Pa 时激光阈值小于 100 nJ。为实现高效紧凑的大功率中红外光纤激光器提供了一条可能的技术途径。

关键词 激光器; 光纤激光器; 气体分子激光器; 光子晶体光纤

中图分类号 TN24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1014002

Diode-Pumped Single-Pass Mid-Infrared Fiber Gas Laser

Wang Zefeng¹ Yu Fei²

(¹ School of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)
² Department of Physics, University of Bath, Bath BA2 7AY, UK

Abstract A diode-pumped single-path mid-IR fiber gas laser is reported. 3.1~3.2 μm laser emission is generated in a 2.3 m low-loss negative curvature hollow core photonic crystal fiber (HC-PCF) filled with low pressure acetylene, pumped by a modulated, amplified, tunable 1.5 μm diode laser. The maximum energy conversion efficiency is higher than 14.5% at 200 Pa, and the minimum laser threshold is lower than 100 nJ at 100 Pa. This research potentially provides an effective route to obtain compact, high-power mid-IR fiber gas laser.

Key words lasers; fiber lasers; molecular gas lasers; photonic crystal fiber

OCIS codes 140.3070; 140.4130; 060.5295; 060.3510

1 引 言

光纤激光器具有结构紧凑、转换效率高、光束质量好、热管理方便等优点, 已经被广泛应用于通信、传感、工业加工等领域, 随着技术的不断发展, 目前在许多方面正在逐步取代传统的固态激光器^[1]。其中, 便携紧凑的中红外光纤激光器在国防、环境监测和医疗等方面有重要的应用价值。长期以来, 受玻璃材料红外本征吸收的限制, 传统光纤无法直接用于产生中红外激光。近年来, 随着掺杂光纤工艺水平的不断提升, 基于掺杂光纤的中红外激光器获得了快速发展^[2-6]。但是, 实心掺杂光纤存在损伤阈

值低、激光线宽随着功率提高迅速增加等不足之处, 在大功率情况下性能会受到很大的限制。此外, 用于产生中红外的稀土材料种类较少, 目前主要包括铒和钬两种, 限制了激光输出波长的选择。气体激光器是产生中红外辐射的一种有效手段^[7-13], 但是气体腔中增益介质与抽运光束有效作用距离短、系统体积较大等因素制约了气体激光器的发展与应用。空心光子晶体光纤为气体介质与抽运光的作用提供了近乎理想的环境, 它可以有效地将抽运光约束在微米量级的纤芯中, 大大提高了抽运强度, 同时作用距离可以长达数十米^[14]。自 2002 年首次报道

收稿日期: 2014-05-06; **收到修改稿日期**: 2014-06-02

基金项目: 国家国际科技合作专项(2012DFG11470)、国家自然科学基金面上项目(11274385)、国防科学技术大学青年拔尖人才计划

作者简介: 王泽锋(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光子晶体光纤、光纤气体激光器和光纤传感等方面的研究。

E-mail: hotrosemaths@163.com

空心光纤中气体激光辐射实验以来^[15],英国巴斯大学、德国马克斯-普朗克研究所、美国堪萨斯州立大学和新墨西哥大学等相继开展了相关的研究工作^[16-23]。2011年, Jones等^[19]首次报道了基于空心光纤的中红外气体激光器,利用光学参量振荡器(OPO)抽运一段充乙炔气体的 Kagome 空心光纤,实现了 3.1~3.2 μm 中红外激光输出,但是受光纤传输损耗(激光波长处约为 20 dB/m)的限制,光-光转换效率不到 1%。随后,通过改进光纤结构参数大大降低了传输损耗,量子转换效率接近理论极限^[20-21]。但是,由于 OPO 激光线宽较宽,实际的光-光转换效率小于 10%^[13,20-21],而且 OPO 体积较大,不适用于便携紧凑的中红外激光器。目前, Kagome 空心光纤在中红外波段的传输损耗依然较高(约 5 dB/m)^[20-21],用于产生大功率中红外激光时将会受到很大的限制。2012年,英国 Bath 大学 Yu 等^[24-25]成功拉制了一种负曲率结构的新型空心光子晶体光纤,中红外波段传输损耗最低可达 0.034 dB/m,非常适合发展大功率中红外光纤气体激光器。

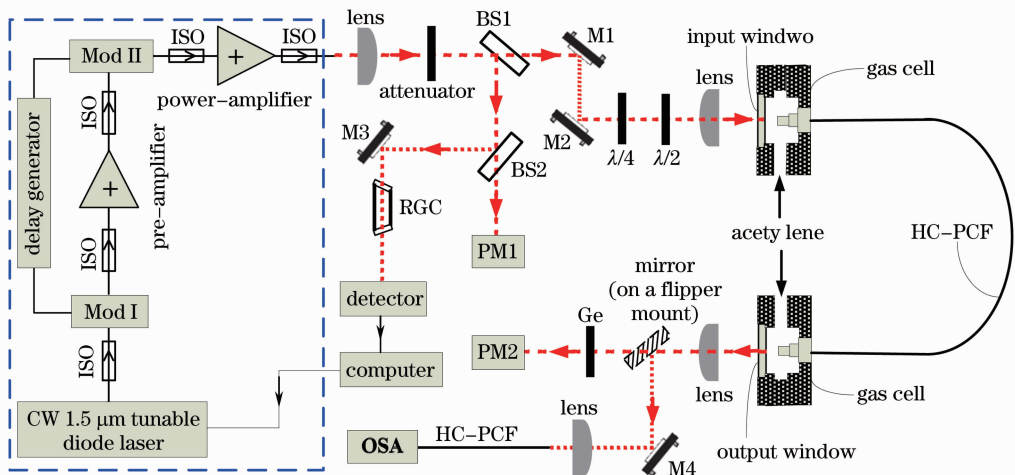
本文利用这种低损耗空心光子晶体光纤,首次实现了半导体抽运的单程中红外光纤气体激光输出。抽运源是一个被调制放大的可调谐 1.5 μm 半导体激光器,光纤长度为 2.3 m。当抽运波长被精确调节到¹²C₂H₂ 分子振动基态到 $\nu_1 + \nu_3$ 激发态共振吸收最强的跃迁谱线 P(9)(对应中心波长为

1530.4172 nm)时,实现了单程有效的 3.12 μm 和 3.16 μm 激光输出,气压为 200 Pa 时总能量转换效率大于 14.5%,100 Pa 时激光阈值小于 100 nJ。这种光纤气体激光器有效地结合了光纤和气体激光器的许多优点,相对实心掺杂光纤在激光输出功率、线宽、波长选择等方面具有更大的潜在优势。

2 实验装置

2.1 光纤气体激光器实验系统

实验系统如图 1 所示,充气光纤为负曲率空心光子晶体光纤,抽运源为调制放大的半导体激光器。抽运光功率通过一个连续可调的衰减器调节,约 3%的能量经两个分束镜片输入到一个功率探测器,监测输入抽运光功率,约 1%的能量经过一个乙炔气体参考腔后输入到一个快速响应的光电探测器,用于乙炔气体吸收线宽和抽运激光线宽测量。由于实验所用负曲率空心光纤的传输损耗具有一定的偏振敏感性,因此让抽运光经过一个 1/4 波片,将掺铟光纤功率放大器输出的椭圆偏振光转换为线偏振光,再通过一个半波片调节偏振方向以达到最佳的传输效率。抽运光先后通过一个焦距为 50 mm 的镀膜玻璃平凸透镜和一个玻璃窗口(镀膜波段均为 1050~1620 nm,1530 nm 处透射率均大于 98%)聚焦耦合到位于输入气体腔内的空心光纤,耦合效率约为 65%。产生的激光和残留的抽运光经输出气



Mod: Mach-Zehnder optical intensity modulator; ISO: optical isolator; BS: beam splitter; M: mirror; $\lambda/4$: quarter-wave plate; $\lambda/2$: half-wave plate; PM: thermal powermeter; RGC: reference acetylene cell; Ge: germanium filter; OSA: optical spectrum analyzer

图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

体腔上的未镀膜蓝宝石窗口(抽运光和激光波长处的透射率约为 86%)输出,然后通过一个 3~5 μm 镀膜氟化钙平凸透镜(Thorlab, LA5381-E, 3.1~3.2 μm 透射率大于 97%)准直。准直光束通过一个锗滤波片后输入到光功率计测量激光功率,或通过反射镜和一个氟化钙平凸透镜(与前面的参数相同)聚焦耦合到一小段空心光纤(长约 50 cm,结构参数与充气空心光纤相同)中,然后输入到宽带光谱仪中测量输出光谱。

2.2 负曲率空心光纤

负曲率空心光纤采用堆积-拉制技术制作^[24]。首先,利用芯径较大的薄壁玻璃管(Heraeus, Suprasil)拉制毛细管,再利用堆积后抽取的方式将 8 根相同的毛细管插入一根内径合适的玻璃套管中,毛细管外壁紧贴,然后在拉丝塔上制作预制棒。在光纤拉制过程中,通过控制预制棒进给和光纤拉制速度、炉内温度、纤芯-包层气压差等参数,可以精确调节纤芯大小、壁厚及曲率,从而控制空心光纤的导光特性。实验所用的空心光纤结构如图 2 中的插入图片所示,平均纤芯直径(定义为圆弧顶之间的距离)约为 98 μm 。

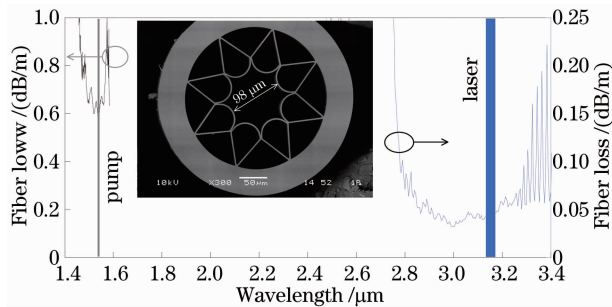


图 2 实验所用负曲率空心光子晶体光纤(HC-PCF)传输损耗的测量结果(插入图片为光纤横截面扫描电子显微镜)

Fig. 2 Measured transmission loss of the negative curvature HC-PCF used in experiments (insert; scanning electron micrographs of the test fiber)

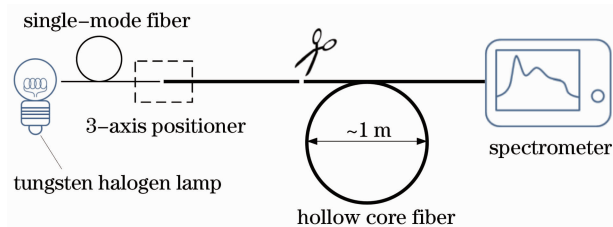


图 3 截断法测量空心光纤传输损耗实验原理图

Fig. 3 Schematic of cut-back measurements for hollow core fiber transmission loss

光纤传输损耗采用截断法测量,实验系统如图 3 所示,光源是一个卤钨灯^[26]。由于空心光纤芯径较大,对弯曲损耗较为敏感,为了减少其对传输损耗测量的影响,盘绕直径约为 1 m。为了减少包层光对短波传输损耗测量的影响,利用一小段(约 0.5 m)单模光纤将光源发出的光耦合进空心光纤。测量长波段时,由于玻璃中的传输损耗很高,不能使用单模光纤,直接让空心光纤对着灯泡耦合。测量所得的传输损耗谱如图 2 所示,可以看到抽运波长 1.53 μm 附近传输损耗约为 0.6 dB/m,激光波长 3.1~3.2 μm 传输损耗约为 0.2 dB/m。

2.3 调制放大的半导体抽运源

抽运源由一个连续波(CW)可调谐的 1.5 μm 半导体激光器种子源(ID Photonics GmbH, CoBrite DX1,线宽小于 100 kHz,最大输出功率 16 dBm,频率调谐范围 191.35~196.1 THz)、两个 Mach-Zehnder 型强度调制器(Thorlab, LN56S-FC, 10 GHz)和两级掺铒光纤放大器组成,如图 1 虚框所示。其中,前置放大器使用了较短的高掺杂铒纤(Thorlab, ER110-4/125, 60 cm),以达到降低噪声的目的,功率放大器使用了较长的低掺杂铒纤(Thorlab, ER16-8/125, 6 m),以获得较高的输出功率。

气压较低时气体分子的吸收线宽主要由多普勒加宽决定,对于乙炔分子¹²C₂H₂从振动基态到 $\nu_1 + \nu_3$ 振动态的吸收线宽约为 500 MHz^[13,27],随着气压增加碰撞加宽增强,气压引起的吸收谱线加宽系数约 90 kHz/Pa^[28]。由于气体分子的吸收线宽很窄,因此对抽运源的频率稳定性和线宽要求较高。利用图 1 中参考乙炔气体腔(Photonics Technologies,腔长为 50 mm,直径为 10 mm,¹²C₂H₂纯度大于 99.9%,气压为 2666 Pa)测量了 CW 半导体激光器的频率稳定性和乙炔分子的吸收谱线,结果如图 4 所示。图 4(a)中激光频率扫描范围为 195~196.1 THz,间隔为 80 MHz,每隔 5 s 采集一个有效数据点,持续测量时间约为 19 h,可以看到激光器功率非常稳定,5 h 内波动小于 5%;¹²C₂H₂分子吸收最强的谱线为 P(9),对应中心波长约为 1530.4172 nm。CW 半导体激光器频率稳定性测量结果如图 4(b)所示,频率设为 195.8943 THz(1530.4172 nm)。考虑到激光功率波动的影响,10 h 内激光频率漂移小于 100 MHz,因此无需对激光波长进行控制。综合考虑激光脉冲能量和平均功率,调制宽度和频率分别设为 20 ns 和 20 kHz,平均输出功率约为 60 mW,包括自发辐射(ASE)和 CW 1530 nm 功率。

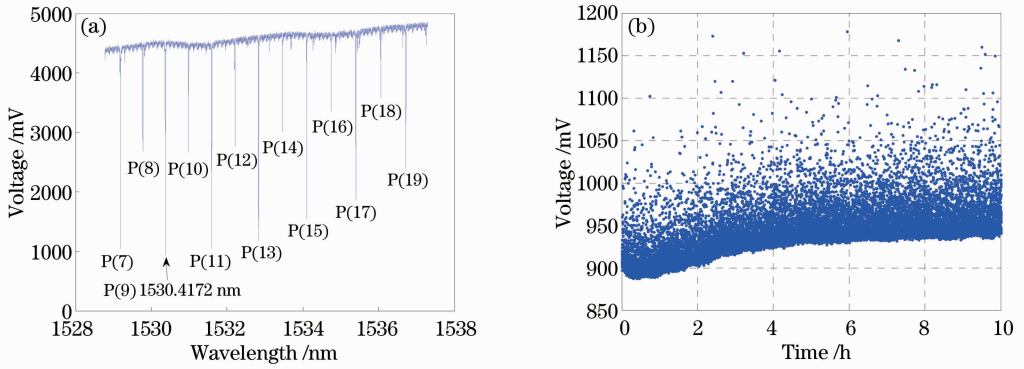


图4 乙炔分子($^{12}\text{C}_2\text{H}_2$)吸收谱线及CW半导体激光器稳定性测量结果。(a)吸收谱线及功率稳定性;(b)频率稳定性

Fig. 4 Measured results of acetylene molecule ($^{12}\text{C}_2\text{H}_2$) absorption lines and CW diode laser stabilities.

(a) Absorption lines and power stability; (b) frequency stability

分别利用CW和调制放大的脉冲半导体激光器对 $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ 分子吸收谱线P(9)的线宽进行了测量,半导体激光器中心频率设为195.8943 THz,实验结果如图5所示,其中离散点为实验测量结果,实线为对应的平滑拟合曲线。脉冲激光的透射率利用一个快速响应的光电探测器(Thorlab, DET01CFC, 1.2 GHz, InGaAs, 800~1700 nm)探测脉冲波形后估算脉冲能量得到。可以看到,乙炔参考腔的CW(星号)和脉冲激光(方块)透过曲线基本相同,线宽约为780 MHz,与多普勒和气压碰撞加宽决定的理论值750 MHz基本吻合,吸收系数约为80%。2.3 m光纤中气压为200 Pa时,吸收线宽约为600 MHz(圆圈),吸收系数大于95%。气压引起的中心频率漂移非常小,漂移率为 $-2.18 \text{ kHz/Pa}^{[28]}$,因此可以看到3种情况下中心波长基本相同。从图5的实验结果可以推断,调制放大的半导体激光器线宽小于100 MHz,远远大于CW半导体激光线宽,主要由光纤中的非线性展宽引起。

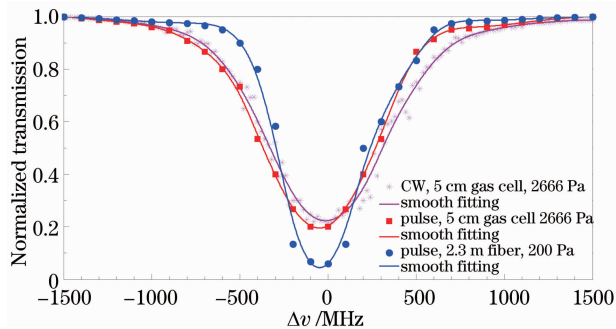


图5 乙炔分子($^{12}\text{C}_2\text{H}_2$)吸收线宽测量结果

Fig. 5 Measured results of acetylene molecule ($^{12}\text{C}_2\text{H}_2$) absorption linewidth

3 实验结果与讨论

输出光谱如图6(a)所示,可以看到两条很强的激光谱线,分别位于 $3.12 \mu\text{m}$ 和 $3.16 \mu\text{m}$ (光谱仪扫描精度为5 nm),这与 $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ 分子从 $\nu_1 + \nu_3$ 振动态到 ν_1 振动态的两条跃迁谱线R(7)和P(9)完全吻合,如图6(b)所示。抽运脉冲将乙炔分子 $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ 从振动基态的 $j=9$ 转动态激发到 $\nu_1 + \nu_3$ 振动态的 $j=8$ 转动态。处于激发态的 $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ 将通过辐射跃迁的方式到达 ν_1 振动态,根据跃迁选择定律,可能的跃迁能级为 $j=7$ 和 $j=9$,分别对应R(7)和P(9)。由于分子间以及分子与光纤壁面之间的碰撞, $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ 还可能以无辐射跃迁的方式跃迁到 ν_1 振动态或回到振动基态,这些过程将降低激光效率。当气压大于267 Pa时,乙炔分子的平均自由程小于 $20 \mu\text{m}^{[19]}$,比空心光纤的芯径小得多,壁面碰撞引起的无辐射跃迁可以忽略,激发态的平均寿命主要由分子间的碰撞决定。由于跃迁到 ν_1 振动态的 $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ 无法通过自发辐射的方式回到振动基态,随着受激跃迁的进行,最终处于 $\nu_1 + \nu_3$ 和 ν_1 振动态的粒子数将达到动态平衡,受激辐射将终止 $^{[19]}$ 。因此,抽运源必须为脉冲激光器,而且脉冲间隔要足够大,使得处于 ν_1 振动态的粒子有充分的时间回到基态。通过加入缓冲气体,乙炔气体激光器可以工作在连续模式。

实验中对输出激光脉冲能量及转换效率随气压和输入抽运光能量的变化进行了测量,结果如图7所示。光纤长度为2.3 m,总输入抽运光功率约为53.5 mW(输入窗口之前),耦合进入空心光纤的最大功率约为33 mW,对应脉冲能量约为 $1.65 \mu\text{J}$ 。输出的激光脉冲能量利用一个锗滤波片(Thorlab, WG91050, $3.1 \sim 3.2 \mu\text{m}$ 透射率约为48%,对抽运

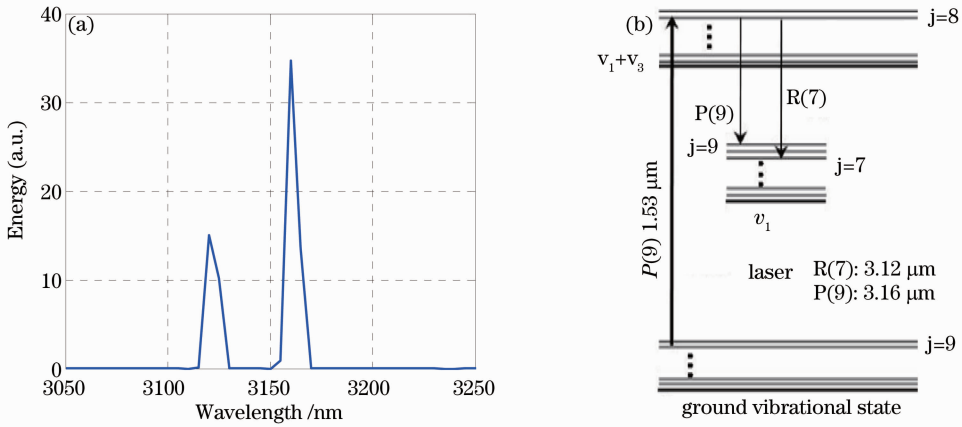


图 6 (a)输出光谱:光谱仪精度为 5 nm,光纤长度为 2.3 m,乙炔气压为 200 Pa,耦合输入的抽运脉冲能量为 1.65 μJ ;
(b) $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ 对应的抽运和激光能级跃迁图

Fig. 6 (a) Measured output optical spectrum (resolution 5 nm) at 200 Pa $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ pressure, 2.3 m length, and 1.65 μJ coupled pump pulse energy; (b) simple energy levels diagram of $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ showing the pump and laser transitions

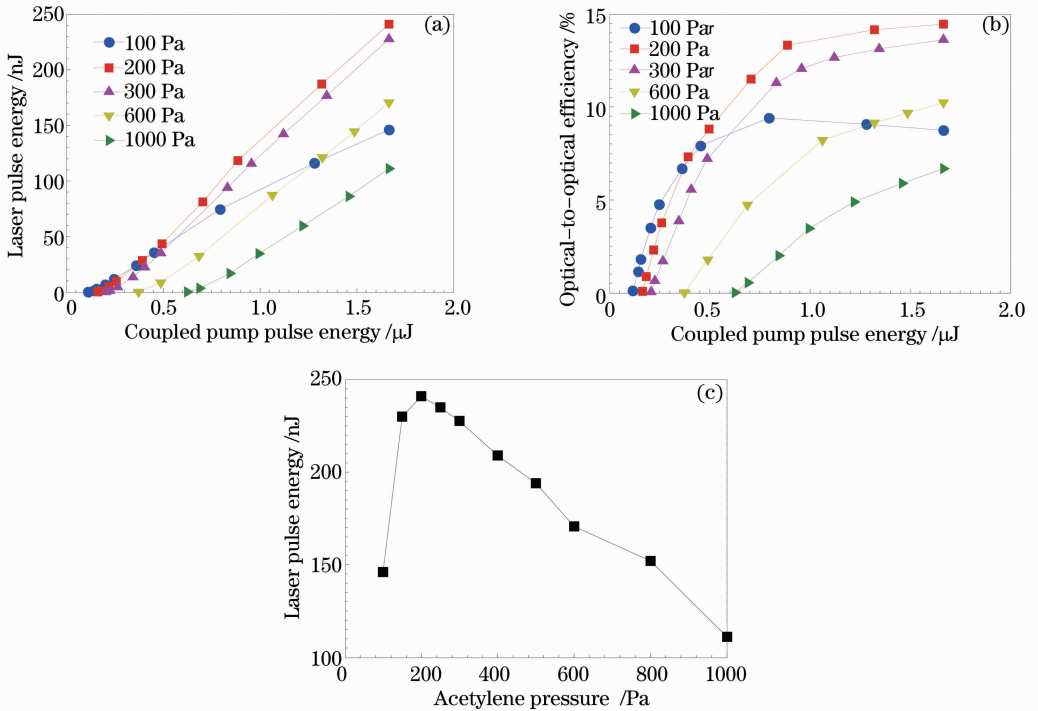


图 7 输出激光随抽运脉冲能量和气压的变化。(a)不同气压下激光脉冲能量随耦合的抽运脉冲能量的变化;
(b)不同气压下激光能量转换效率随耦合抽运脉冲能量的变化

Fig. 7 Laser output change with coupled pump pulse energy and acetylene pressure. (a) Laser pulse energy with coupled pump energy at different acetylene pressure; (b) Power efficiency with coupled pump pulse energy at different acetylene pressure; (c) output laser pulse energy with acetylene pressure

光的衰减大于 30 dB)和热探测器测量。从图 7(a)可见,激光阈值随着气压升高而增加,100 Pa 时小于 100 nJ,1000 Pa 时约为 750 nJ。这主要是由于随着气压的增加,分子间的碰撞几率加大,使得激光上能级($v_1 + v_3$ 振动态)的平均寿命减少,必须通过提高抽运强度将粒子以更快的速率从基态抽运到激发

态。除 100 Pa 存在吸收饱和现象,输出激光脉冲能量随输入抽运光能量近似成线性关系,气压为 100 Pa,抽运脉冲能量为 1.65 μJ 时,最大输出脉冲能量为 0.24 μJ 。从图 7(b)可见,达到抽运阈值后,转换效率随着抽运光能量增加迅速上升,随着抽运光能量的进一步增加,气压较低时开始出现饱和现象,如

图7中气压为100 Pa时在 $0.7\ \mu\text{m}$ 处转换效率由于饱和效应开始下降。气压为200 Pa时,处于饱和临界状态,转换效率达到最大值,约为14.5%。根据前述分析可以知道,若忽略无辐射跃迁和光纤的传输损耗,乙炔气体激光器的极限量子效率为66.7%,极限能量转换效率约为33%^[21]。通过降低光纤传输损耗和抽运激光线宽、减少抽运光中CW和ASE能量、优化光纤长度和气压等参数,可以进一步提高激光转换效率。输出脉冲激光能量随气压的变换如图7(c)所示,其中耦合的抽运脉冲能量为 $1.65\ \mu\text{J}$ 。可以看到,与理论预期一致,当光纤长度和输入抽运光能量一定时,存在一个最佳的气压^[19],实验中最佳气压约为200 Pa。

4 结 论

基于充乙炔气体的低损耗负曲率空心光纤,首次实现了 $1.5\ \mu\text{m}$ 纳秒脉冲半导体抽运的单程 $3.1\sim 3.2\ \mu\text{m}$ 光纤气体激光输出,光-光转换效率大于14.5%,激光阈值小于100 nJ,均优于之前报道的类似结果。充分利用负曲率空心光纤传输谱设计灵活、中红外传输损耗低、芯径大、损伤阈值高、非线性效应小、气体更换方便等特点,通过合理设计光纤结构尺寸、选择合适的抽运源和增益气体、增加光纤长度和气体压强,有望实现转换效率高、结构紧凑、激光线宽窄、输出功率高、波长选择灵活的中红外光纤气体激光器,具有广泛的应用前景和重要的应用价值。

参 考 文 献

- 1 Y Kalisky, O Kalisky. The status of high-power lasers and their applications in the battlefield [J]. *Opt Eng*, 2010, 49(9): 091003.
- 2 Jianfeng Li, Darren D Hudson, Stuart D Jackson. High-power diode-pumped fiber operating at $3\ \mu\text{m}$ [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(18): 3642–3644.
- 3 Stuart D Jackson. Towards high-power mid-infrared emission from a fiber laser [J]. *Nature Photonics*, 2012, 16(6): 423–431.
- 4 M Bernier, V Fortin, N Caron, *et al.*. Mid-infrared chalcogenide glass Raman fiber laser [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(2): 127–129.
- 5 Ori Henderson-Sapir, J Munch, D J Ottaway. Mid-infrared fiber laser at and beyond $3.5\ \mu\text{m}$ using dual-wavelength pumping [J]. *Opt Lett*, 2014, 39(3): 493–496.
- 6 M Bernier, V Fortin, M El-Amraoui, *et al.*. $3.77\ \mu\text{m}$ fiber laser based on cascaded Raman gain in a chalcogenide glass fiber [J]. *Opt Lett*, 2014, 39(7): 2052–2055.
- 7 T Y Chang, O R Wood. An optically pumped CO_2 laser [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1972, 8(6): 598–599.
- 8 H R Schlossberg, H R Fetterman. Optically pumped vibrational transition laser in OCS [J]. *Appl Phys Lett*, 1975, 26(6): 316–318.
- 9 H C Miller, D T Radzykewycz, G Hager. An optically pumped

- mid-infrared HBr laser [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1994, 30(10): 2395–2400.
- 10 J E McCord, H C Miller, G Hager, *et al.*. Experimental investigation of an optically pumped mid-infrared carbon monoxide laser [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1999, 35(11): 1602–1612.
- 11 C S Kletecka, N Campbell, C R Jones, *et al.*. Cascade lasing of molecular HBr in the four micron region pumped by a Nd:YAG laser [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2004, 40(10): 1471–1477.
- 12 T Ehrenreich, B Zhdanov, T Takekoshi, *et al.*. Diode pumped cesium laser [J]. *Electron Lett*, 2005, 41(7): 415–416.
- 13 A V V Nampoothiri, A Ratanavis, N Campbell, *et al.*. Molecular C_2H_2 and HCN lasers pumped by an optical parametric oscillator in the $1.5\text{-}\mu\text{m}$ band [J]. *Opt Express*, 2010, 18(3): 1946–1951.
- 14 R F Cregan, B J Mangan, J C Knight, *et al.*. Single-mode photonic band gap guidance of light in air [J]. *Science*, 1999, 285(5433): 1537–1539.
- 15 F Benabid, J C Knight, G Antonopoulos, *et al.*. Stimulated Raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Science*, 2002, 298(5592): 399–402.
- 16 F Benabid, G Bouwmans, J C Knight, *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]. *Phys Rev Lett*, 2004, 93(12): 123903.
- 17 F Couny, F Benabid, P J Roberts, *et al.*. Generation and photonic guidance of multi-octave optical-frequency combs [J]. *Science*, 2007, 318(5853): 1118–1121.
- 18 B Beaudou, F Couny, Y Y Wang, *et al.*. Matched cascade of bandgap-shift and frequency-conversion using stimulated Raman scattering in a tapered hollow-core photonic crystal fibre [J]. *Opt Express*, 2010, 18(12): 12381–12390.
- 19 A M Jones, A V V Nampoothiri, A Ratanavis, *et al.*. Mid-infrared gas filled photonic crystal fiber laser based on population inversion [J]. *Opt Express*, 2011, 19(3): 2309–2316.
- 20 A M Jones, C Fourcade-Dutin, C Mao, *et al.*. Characterization of mid-infrared emissions from C_2H_2 , CO , CO_2 , and HCN-filled hollow fiber lasers [C]. *SPIE*, 2012, 8237: 82373Y.
- 21 A V Vasudevan Nampoothiri, Andrew M Jones, C Fourcade-Dutin, *et al.*. Hollow-core optical fiber gas lasers (HOFGLAS): A review (Invited) [J]. *Opt Materials Express*, 2012, 2(7): 948–961.
- 22 B M Trabold, A Abdolvand, T G Euser, *et al.*. Efficient anti-Stokes generation via intermodal stimulated Raman scattering in gas-filled hollow core PCF [J]. *Opt Express*, 2013, 21(24): 29711–29717.
- 23 Zefeng Wang, Fei Yu, William Wadsworth, *et al.*. $1.9\ \mu\text{m}$ coherent source generation in hydrogen-filled hollow core fiber by stimulated Raman scattering [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2014.
- 24 Fei Yu, William J Wadsworth, Jonathan C Knight. Low loss silica hollow core fibers for $3\sim 4\ \mu\text{m}$ spectral region [J]. *Opt Express*, 2012, 20(10): 11153–11158.
- 25 Fei Yu, Jonathan C Knight. Spectral attenuation limits of silica hollow core negative curvature fiber [J]. *Opt Express*, 2013, 21(18): 21466–21471.
- 26 Fei Yu. Hollow Core Negative Curvature Optical Fibers [D]. Bath: University of Bath, 2014. 76–88.
- 27 Anthony E Siegman. *Lasers* [M]. Sausalito: University Science Books, 1986. 157–167.
- 28 W C Swann, S L Gilbert. Pressure-induced shift and broadening of $1510\sim 1540\ \text{nm}$ acetylene wavelength calibration lines [J]. *J Opt Soc Am B*, 2000, 17(7): 1263–1270.