

# 基于反共振空芯光纤的 4.3 $\mu\text{m}$ 二氧化碳激光器

崔宇龙<sup>1,2,3</sup>, 周智越<sup>1,2,3</sup>, 黄威<sup>1,2,3</sup>, 李智贤<sup>1,2,3</sup>, 王泽锋<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;

<sup>2</sup>脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410073;

<sup>3</sup>高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

**摘要** 报道了一种基于充有二氧化碳气体反共振空芯光纤的新型中红外光纤激光器。用一个掺铥光纤放大的可调谐 2  $\mu\text{m}$  半导体激光器泵浦一段长为 5 m、充有低压二氧化碳的低损耗反共振空芯光纤, 基于粒子数反转实现了单程结构 4.3  $\mu\text{m}$  光纤激光输出, 这是已经报道的常温下连续波光纤激光输出的最长波长(超连续谱激光除外)。气压为 500 Pa 时, R(30)吸收线对应的最大激光输出功率为 82 mW, 斜率效率约为 6.8% (相对耦合进入空芯光纤的泵浦功率); R(28)吸收线对应的最大输出功率为 63 mW, 斜率效率约为 5%。该研究为实现高效紧凑的 4  $\mu\text{m}$  中红外激光器提供了一条简单可行的技术途径。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 气体分子激光器; 空芯光纤

中图分类号 TN24

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1214002

## Anti-Resonant Hollow-Core Fibers Based 4.3- $\mu\text{m}$ Carbon Dioxide Lasers

Cui Yulong<sup>1,2,3</sup>, Zhou Zhiyue<sup>1,2,3</sup>, Huang Wei<sup>1,2,3</sup>,

Li Zhixian<sup>1,2,3</sup>, Wang Zefeng<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup> College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

<sup>3</sup> Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** A novel mid-infrared fiber laser is reported based on an anti-resonant hollow-core fiber filled with carbon dioxide gas. A tunable 2- $\mu\text{m}$  semiconductor laser amplified using a thulium-doped fiber is used to pump a low-loss anti-resonant hollow-core fiber with a length of 5 m, which is filled with carbon dioxide gas at low pressure. Particle beam inversion is responsible for obtaining the single-pass fiber laser output at 4.3  $\mu\text{m}$ , which is the longest wavelength that has yet been reported for continuous wave fiber lasers at normal temperature, except for supercontinuum lasers. At a pressure of 500 Pa, the maximum laser output power of the R(30) absorption line is 82 mW and the slope efficiency is approximately 6.8% (relatively coupled pump power entering the hollow-core fiber), whereas the maximum laser output power of the R(28) absorption line is 63 mW and the slope efficiency is approximately 5%. This study provides a potentially effective pathway for obtaining compact and efficient 4- $\mu\text{m}$  fiber gas lasers.

**Key words** lasers; fiber lasers; gas molecule lasers; hollow-core fibers

**OCIS codes** 140.3070; 060.3510; 140.4130; 060.5295

## 1 引 言

中红外激光(3~5  $\mu\text{m}$  波段)在空间通信、遥感、光电对抗、医疗、大气监测等众多领域有重要的应用

价值,在过去几十年都是国内外关注的热点<sup>[1-2]</sup>。目前,报道的产生中红外激光的方式主要有气体激光器<sup>[3-5]</sup>、固体激光器<sup>[6]</sup>、量子级联激光器<sup>[7]</sup>、超连续谱激光器<sup>[8]</sup>和掺杂稀土离子的光纤激光器<sup>[9-13]</sup>。其

收稿日期: 2019-07-08; 修回日期: 2019-08-01; 录用日期: 2019-08-13

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

\* E-mail: zefengwang\_nudt@163.com

中,光纤激光器最有希望实现紧凑、稳定、高效的中红外激光输出<sup>[1]</sup>。传统的熔石英光纤在  $2.2\ \mu\text{m}$  以下的近红外波段有着广泛的应用,但是其对波长  $2.2\ \mu\text{m}$  以上的激光具有很强的吸收,损耗急剧增大<sup>[1,3]</sup>。为有效产生波长大于  $2.5\ \mu\text{m}$  的激光,通常采用在中红外波段具有较低传输损耗的氟化物玻璃光纤和硫系玻璃光纤<sup>[1-2,9-13]</sup>。然而这些软玻璃光纤的制备工艺还不成熟,目前损耗还比较高。同时,由于软玻璃的熔点较低,热稳定性差,其在高功率输出方面受到了很大限制。此外,受稀土离子种类的限制,激光输出波长范围非常有限,而且难以超过  $4\ \mu\text{m}$ ,目前报道的最长波长为  $3.92\ \mu\text{m}$ <sup>[13]</sup>。

气体激光器早已被证明是产生中红外激光的有效方式<sup>[3-5]</sup>,尤其是近年来被广泛研究的基于空芯光纤的光泵浦气体激光器<sup>[14-20]</sup>。相较于传统的气体腔,空芯光纤可以在很长的一段距离上将增益气体和泵浦光束约束在几微米到几十微米的纤芯区域内,极大地增强了光与气体的相互作用。由于反共振空芯光纤在中红外波段具有较低的传输损耗<sup>[16-17]</sup>,非常有利于产生高效的中红外气体激光输出<sup>[21-32]</sup>。和掺杂稀土离子的光纤激光器相比,空芯光纤气体激光器的增益介质选择灵活,可以实现更多的激光波长输出,而且容易产生  $4\ \mu\text{m}$  以上激光输出。在空芯光纤中,基模边缘场强比中心最高的场强至少低一个数量级,同时纤芯模和包层玻璃材料重叠面积很小甚至可以忽略,因此空芯光纤气体激光器的损伤阈值大大增加,而且气体还可以通过某种方式循环散热,使得光纤气体激光器在高功率输出方面具有极大的潜力<sup>[23]</sup>。此外,由于气体的非线性效应很弱,光纤气体激光器在高功率情况下保持窄线宽激光输出方面相对实芯掺杂光纤有很大的优势。在过去的几年中,基于空芯光纤的中红外气体激光器被广泛研究,实现原理包括气体受激拉曼散射<sup>[21-22,26-29,32]</sup>和粒子数反转<sup>[23-25,30-31]</sup>。由于受激拉曼散射的阈值较高,目前还很难实现连续激光输出。最近报道了一篇基于充有一氧化二氮的 Kagome 空芯光纤的  $4.6\ \mu\text{m}$  脉冲激光器,泵浦源为固体参量振荡器<sup>[32]</sup>。

本文报道了一种半导体泵浦的基于反共振空芯光纤的连续波  $4.3\ \mu\text{m}$  二氧化碳激光器。泵浦源为本课题组自行搭建的掺铒光纤放大的窄线宽可调谐  $2\ \mu\text{m}$  半导体激光器,其波长调谐范围覆盖了  $\text{CO}_2$  分子 R(28)和 R(30)两条吸收谱线,中心波长分别为  $2001.1\ \text{nm}$  和  $2000.6\ \text{nm}$ <sup>[33]</sup>。当  $2\ \mu\text{m}$  泵浦光耦合

进充有二氧化碳气体的空芯光纤中,基态能级粒子吸收能量跃迁至  $2\nu_1 + \nu_3$  的激发态,然后通过激发态  $2\nu_1 + \nu_3$  到  $2\nu_1$  的能级跃迁<sup>[34]</sup>同时产生  $4.3\ \mu\text{m}$  附近的两条激光谱线输出,这是目前已经报道的常温下连续波光纤激光输出的最长波长(超连续谱激光除外)。R(30)泵浦时,最大激光输出功率为  $82\ \text{mW}$ ,相对耦合泵浦光的斜率效率约为  $6.8\%$ ; R(28)泵浦时,最大输出功率约为  $63\ \text{mW}$ ,斜率效率约为  $5\%$ 。

## 2 基本原理

图 1(a)为  $\text{CO}_2$  分子的 3 种简正模式示意图,其中黑色圆圈代表 C 原子,灰色圆圈代表 O 原子,原子之间的横线表示原子之间的相互作用,箭头表示原子之间的相对运动。其中  $\nu_1$  和  $\nu_3$  代表伸缩模式,  $\nu_1$  代表对称的 C—O 键的伸展,  $\nu_3$  则代表了反对称的 C—O 键的伸展<sup>[35]</sup>,  $\nu_2$  代表弯曲模式。

$\text{CO}_2$  分子在  $2\ \mu\text{m}$  附近的吸收对应振动基态能级  $\nu_0$  到振动激发态能级  $2\nu_1 + \nu_3$  之间的跃迁,如图 1(c)所示,吸收谱线如图 1(b)所示(由 HITRAN 数据库计算得到),竖线代表归一化的吸收强度。由图 1(b)可知,  $\text{CO}_2$  气体分子在  $2\ \mu\text{m}$  附近的吸收带有两个分支,即 P 支(长波带)和 R 支(短波带)。限于实验中使用的半导体泵浦激光器波长调谐范围,只用到了 R(28)和 R(30)两条吸收线,具体能级跃迁过程如图 1(c)所示。图中  $J$  表示转动能级量子数,  $\nu_i$  ( $i=0,1,2,3$ ) 表示其振动能级。当  $\text{CO}_2$  分子吸收  $2\ \mu\text{m}$  泵浦光后,粒子由振动基态能级  $\nu_0$  跃迁至激发态能级  $2\nu_1 + \nu_3$ ,由于热平衡状态下处于  $2\nu_1$  能级的粒子数可忽略<sup>[36]</sup>,因此  $2\nu_1 + \nu_3$  能级和  $2\nu_1$  能级之间立刻形成粒子数反转,从而产生激光。以 R(30)吸收线为例,  $\text{CO}_2$  分子吸收  $2000.6\ \text{nm}$  泵浦光,由基态  $J=30$  跃迁到  $2\nu_1 + \nu_3$  能级  $J=31$ 。同时根据转动量子数选择定则  $\Delta J = \pm 1$ ,其中  $\Delta J$  是由高能级的  $2\nu_1 + \nu_3$  振动态的转动量子数减去低能级的  $2\nu_1$  振动态的转动量子数或  $\nu_0$  振动态的转动量子数得到。具体来说,  $\Delta J = +1$  对应 R 支,  $\Delta J = -1$  对应 P 支。由  $2\nu_1 + \nu_3$  能级向  $2\nu_1$  能级跃迁过程中,产生了 R(30)和 P(32)两条激光谱线。

## 3 实验装置

### 3.1 光纤气体激光器实验系统

如图 2 所示,  $2\ \mu\text{m}$  可调谐泵浦光纤激光先后通过一个显微物镜(放大倍率 20,  $2\ \mu\text{m}$  波段的透过

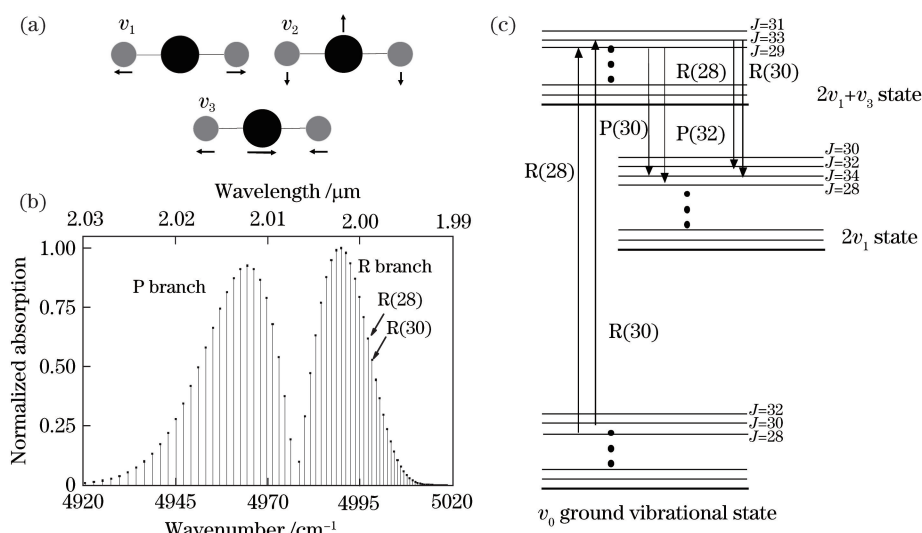


图 1 CO<sub>2</sub> 分子的特性。(a) CO<sub>2</sub> 分子的三种简正振动模式；(b) CO<sub>2</sub> 分子在 2 μm 波段的吸收线谱；  
(c) 2 μm 泵浦产生 4.3 μm 输出的 CO<sub>2</sub> 分子能级跃迁示意图

Fig. 1 Characteristics of CO<sub>2</sub>. (a) Three normal vibration modes of CO<sub>2</sub>; (b) absorption line spectrum of CO<sub>2</sub> around 2 μm;  
(c) diagram of CO<sub>2</sub> molecular energy level transition of 4.3 μm emission pumped at 2 μm

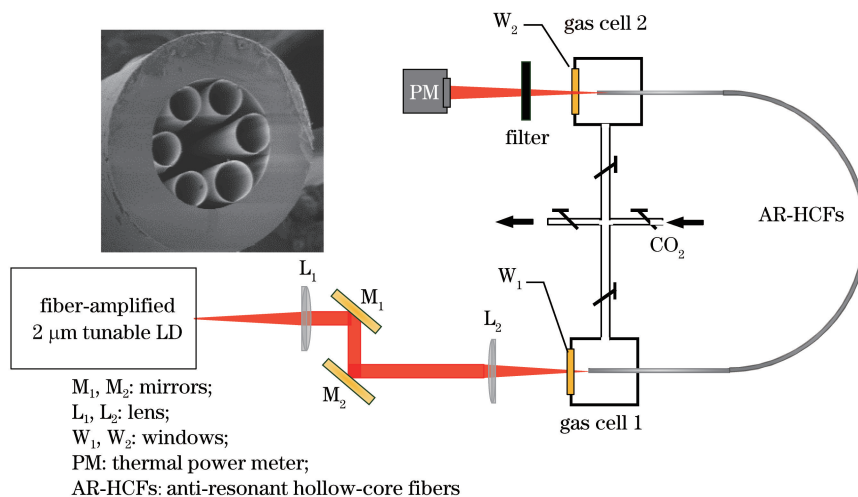


图 2 实验装置。插入图片为实验空芯光纤的横截面扫描电镜图  
Fig. 2 Experimental setup. Inset is cross-sectional scanning electron micrograph of experimental hollow-core fiber

率为 80%)、两片镀银反射镜(2 μm 波段的反射率为 98%)、C 波段镀膜平凸透镜(焦距为 50 mm, 2 μm 波段的透过率为 95%)和镀膜蓝宝石玻璃窗口(Thorlabs WG31050-D, 2 μm 波段的透过率为 94%),实现了泵浦光束的准直聚焦并耦合进入空芯光纤纤芯,最大耦合效率约为 87%(由真空下空芯光纤输出的泵浦激光功率和光纤传输损耗估算得到)。空芯光纤长度为 5 m,两端分别置于两个密封性能良好的气体腔中,可以实现对空芯光纤抽真空和充高压气体。产生的激光和残留的泵浦光经输出气体腔上的蓝宝石玻璃窗口(Thorlabs

WG31050, 2 μm 波段的透过率为 87%, 4.3 μm 波段的透过率为 80%)输出,然后通过一个带通滤波器(Thorlabs FB4250-500, 4 μm 波段的透过率为 80%, 2 μm 波段的透过率小于 0.1%)滤除 2 μm 的残余泵浦光,输入到功率计用于激光功率的探测。本实验中使用的空芯光纤为无节点型反共振空芯光纤(由北京工业大学提供),结构如图 2 中插入图片所示。可以看到,纤芯由环绕的 6 个空芯微管构成,纤芯直径约为 86 μm,微管尺寸不是非常均匀,平均内径约为 21 μm,平均壁厚约为 660 nm。理论计算结果表明,2 μm 泵浦波长和

4.3  $\mu\text{m}$ 激光波长均在空芯光纤的主传输带内。受限于实验条件,没能测量整个传输谱,利用截断法仅测量了 2  $\mu\text{m}$  和 4.3  $\mu\text{m}$  处的传输损耗,其中 4.3  $\mu\text{m}$ 光源为固体光学参量振荡器。实验测得的 2  $\mu\text{m}$  处传输损耗约为 0.7 dB/m,4  $\mu\text{m}$ 处传输损耗约为 1.2 dB/m。

### 3.2 可调谐窄线宽 2 $\mu\text{m}$ 泵浦源

实验中用于产生  $\text{CO}_2$  激光输出的泵浦源为一个掺铥光纤放大的可调谐 2  $\mu\text{m}$  半导体激光器,如图 3 所示,系统由 2  $\mu\text{m}$  可调谐窄线宽种子源(Eblana Photonics, 线宽小于 2 MHz, 波长调谐范围为 1999.6~2001.5 nm)、793 nm LD 泵浦源(BWT,

最大功率为 27 W)、793 nm/2000 nm 波分复用器和一段掺铥光纤组成。2  $\mu\text{m}$  种子源有 4 个引脚,其中  $V_{\text{cc}}$  为固定偏压(一般为 5 V),Gnd 为接地, $V_{\text{Tec}}$  为温控电压(调谐范围为 0.1~3 V), $V_{\text{bias}}$  为偏置电压(调节范围为 0~1.2 V)。通过调节温控电压  $V_{\text{Tec}}$  和偏置电压  $V_{\text{bias}}$  均可改变激光器的输出波长,但是调节  $V_{\text{bias}}$  会同时改变激光器输出功率,而调节  $V_{\text{Tec}}$  则不会,因此实验中将  $V_{\text{bias}}$  设置为常压(一般设为 1.2 V),通过一个高精度的直流电源(ITECH, IT6122B, 其电压分辨率为 0.1 mV, 精度为  $-3 \sim 9$  mV)来控制  $V_{\text{Tec}}$ ,从而精确地调节激光波长,使之与二氧化碳吸收谱线中心波长匹配。

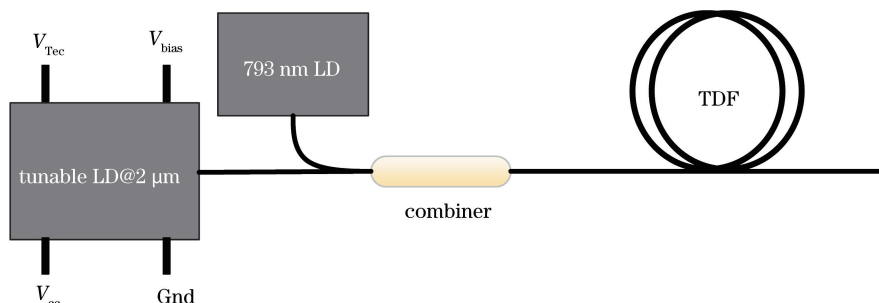


图 3 掺铥光纤放大的可调谐 2  $\mu\text{m}$  半导体激光器结构示意图

Fig. 3 Diagram of thulium-doped fiber amplified tunable 2  $\mu\text{m}$  laser diode

图 4(a)为实验测得的 2  $\mu\text{m}$  种子源输出波长随调制电压  $V_{\text{Tec}}$  的变化,可以看出二者呈很好的线性关系,调谐范围为 1999.6~2001.5 nm,涵盖了  $\text{CO}_2$  气体分子 R 支的两条吸收线 R(28)和 R(30)。图 4(b)为 2  $\mu\text{m}$  输出功率随 793 nm LD 泵浦功率的变化,当泵浦功率为 14 W 时输出功率最大,为 2.2 W。图 4(c)~(f)为分别将种子波长调谐到吸收线 R(28)(中心波长 2001.1 nm)和 R(30)(中心波长 2000.6 nm)时,输出光谱随 793 nm LD 泵浦功率的变化,其中图 4(d)和(f)分别为两个波长对应的谱型细节图。由图 4(c)和(e)可知,放大过程中随着泵浦功率的增加放大自发辐射(ASE)逐渐增强。当 793 nm LD 泵浦功率为 14 W 时,信号光强度与 ASE 最高点相差大约 40 dB,此时可以忽略 ASE 对二氧化碳吸收的影响。

实验中,采用 F-P(Fabry-Perot)干涉腔(Thorlabs SA210-18C,自由光谱范围为 10 GHz,精度为 67 MHz)对输出的 2  $\mu\text{m}$  激光线宽进行了测量<sup>[37]</sup>,激光功率为 2.2 W 时线宽约为 200 MHz。同时,采用与之前测量乙炔气体吸收线宽类似的方法<sup>[24]</sup>,对  $\text{CO}_2$  气体吸收谱线 R(30)的线宽进行了测量。通过调节 2  $\mu\text{m}$  种子 LD 激光波长,使其完整扫过吸收线

R(30)的带宽范围,在较低功率情况下(低于激光产生阈值)记录每个波长对应的空芯光纤输出端功率,则可以得到吸收谱线形状,从而得到吸收谱线宽度。实验测得 500 Pa 下二氧化碳分子吸收线宽约为 225 MHz,略高于 2  $\mu\text{m}$  泵浦源的线宽 200 MHz,因此结合图 4 所示 ASE 情况,在一定气压下泵浦激光功率几乎可以被完全吸收(实验中气压为 2000 Pa 时,注入泵浦光功率最大时残余泵浦光功率小于 5 mW)。

## 4 实验结果与分析

采用波长计(Bristol 771,波长测量精度优于  $\pm 1$  pm)测量了  $\text{CO}_2$  激光的输出光谱,结果如图 5 所示。从图中可以看到,每一条吸收谱线对应两条激射谱线,即 R(28)吸收谱线(中心波长 2001.1 nm)对应 R(28)和 P(30)两条激射谱线,R(30)吸收谱线(中心波长 2000.6 nm)对应 R(30)和 P(32)两条激射谱线,与图 1(c)能级跃迁示意图预测的结果一致。由光谱可以看出 P 支的强度总是大于 R 支,这是因为在跃迁至上能级时,P 支与 R 支共用一个上能级,而 P 支的发射截面大于 R 支,因此 P 支的增益高于 R 支<sup>[31,38]</sup>。实验中并未观察到脉冲泵浦情况下的激光上能级弛豫现象<sup>[23]</sup>。

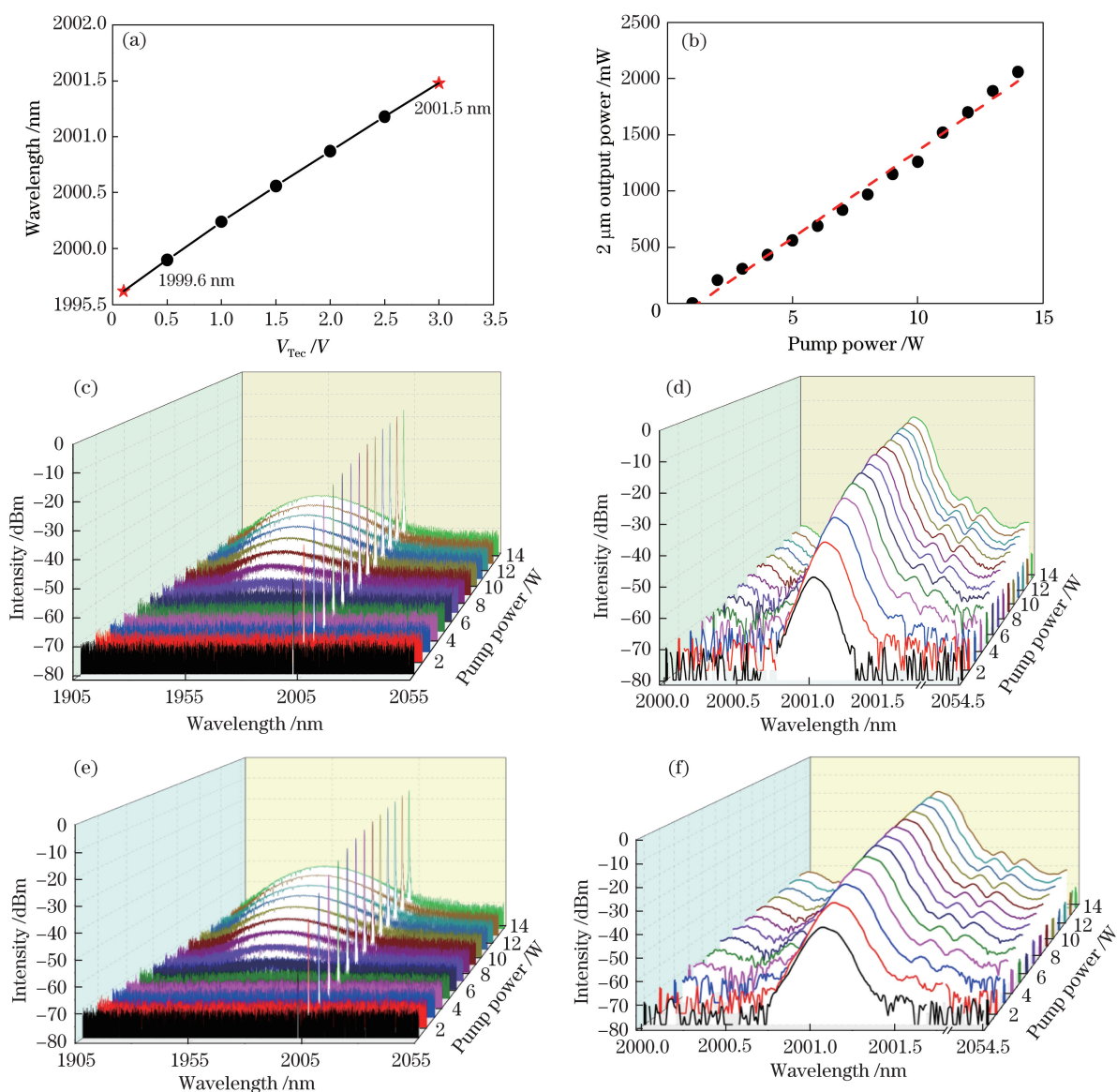


图 4  $2\ \mu\text{m}$  可调谐光纤放大器特性图。(a) 种子激光波长随温控电压  $V_{Tec}$  的变化 ( $V_{bias}$  为 1.2 V, 红星表示可调谐的范围); (b) 掺铊光纤输出的  $2\ \mu\text{m}$  激光功率随 793 nm 泵浦功率的变化曲线; (c) 中心波长为 2000.6 nm (对应吸收谱线 R(30)) 时输出光谱随 793 nm LD 泵浦功率变化; (d) 中心波长 2000.6 nm 附近的精细光谱; (e) 中心波长 2001.1 nm (对应吸收谱线 R(28)) 时输出光谱随 793 nm LD 泵浦功率变化; (f) 中心波长 2001.1 nm 附近的精细光谱

Fig. 4 Characteristic diagrams of  $2\ \mu\text{m}$  tunable fiber amplifier. (a) Seed laser wavelength varies with temperature control voltage  $V_{Tec}$  ( $V_{bias}$  is 1.2 V, and red star indicates tunable range); (b) thulium-doped fiber output power of  $2\ \mu\text{m}$  laser varies with 793 nm pump power; (c) output spectrum varies with 793 nm LD pump power at a center wavelength of 2000.6 nm (corresponding to the absorption line R(30)); (d) fine spectrum near the center wavelength of 2000.6 nm; (e) output spectrum varies with 793 nm LD pump power at a center wavelength of 2001.1 nm (corresponding to the absorption line R(28)); (f) fine spectrum near the center wavelength of 2001.1 nm

分别测量了两条吸收谱线 R(30) 和 R(28) 对应的  $\text{CO}_2$  激光输出功率随耦合的泵浦光功率的变化情况, 结果如图 6 所示。图 6 显示了两条吸收线输出的  $4\ \mu\text{m}$  激光输出功率和光-光转化效率随耦合功率的变化, 其中图 6(a)、(b) 为 R(30) 吸收线的情况, 6(c)、(d) 为 R(28) 吸收线的情况。由图 6(a) 和

(c) 所示, 在耦合功率变化时激光器出现了明显的阈值现象, 且空芯光纤内气压越低, 阈值也相对越低。在阈值过后, 输出的功率基本随耦合功率呈线性变化, 直至达到吸收饱和。在 500 Pa 气压下, 得到了两条吸收线的最大输出功率分别为 82 mW 和 63 mW。图 6(b)、(d) 所示为光-光转化效率图, 在

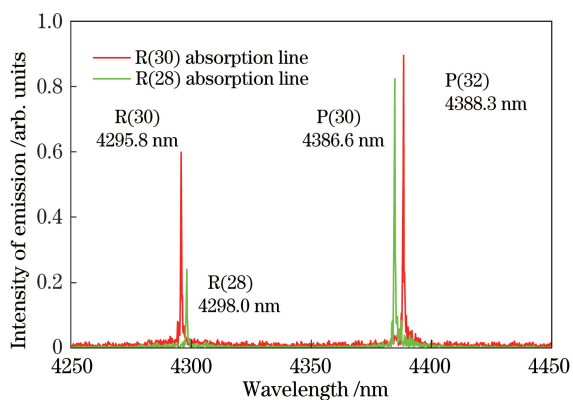


图 5 两条吸收线下的光谱图

Fig. 5 Measured output optical spectra corresponding to two absorption lines

阈值附近,由于刚刚产生激光,效率较低,随着输出功率的逐渐升高,效率也在逐渐提高,后由于当前气

压下残余泵浦光变多,最终效率略有降低。光纤损耗较大,且目前输出功率还比较低,导致光-光转化效率很难得到进一步提高,目前最高的光-光转化效率约为 6.8%。

图 7(a)为不同气压下两条吸收线在 5 m 长空芯光纤传输后的最大输出功率曲线。低气压情况下阈值相对较低,但是激光输出较弱,根据不同气压下最高输出功率,得出 500 Pa 为其当前测试条件下输出功率最高的气压,最大传输功率为 63 mW。图 7(b)为两条吸收线在 5 m 长光纤,500 Pa 气压下输出功率随耦合泵浦功率的变化,R(30)吸收线对应的光-光转化效率为 6.8%,R(28)吸收线对应的光-光转化效率为 5%。目前,限制此系统效率提升的主要因素为光纤损耗,如果能够显著降低光纤损耗,效率将得到进一步提升。

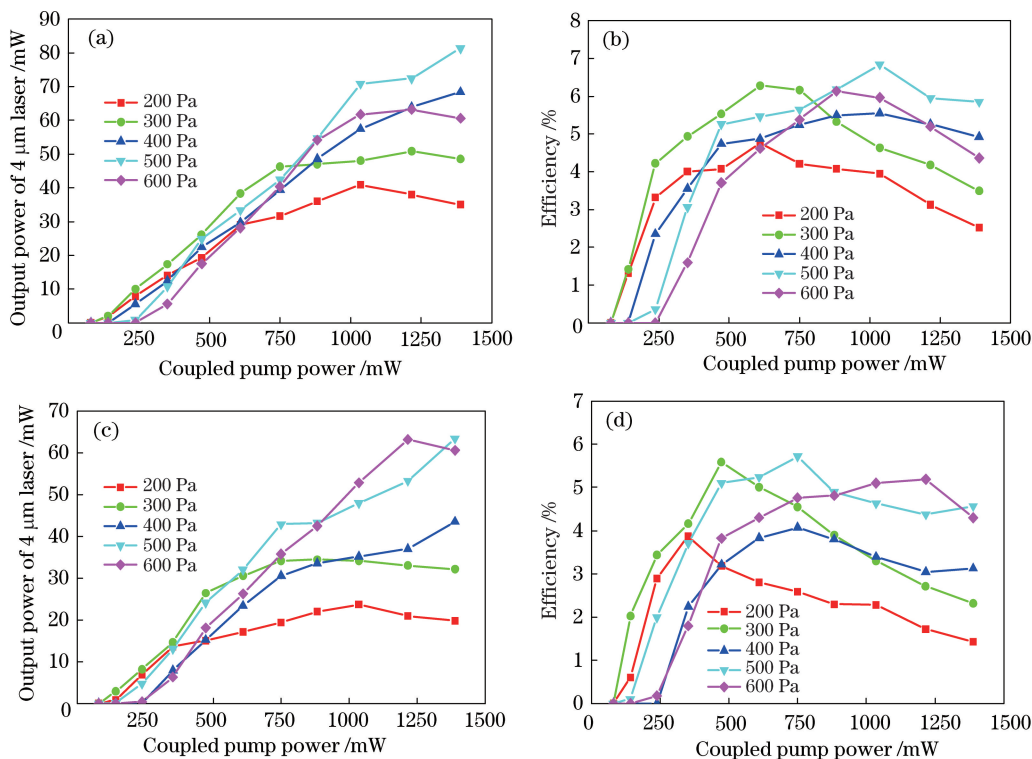


图 6 两条吸收线输出的 4 μm 激光输出功率和光-光转化效率随耦合功率的变化。(a) R(30)吸收线时,不同气压下 4 μm 输出功率随耦合功率的变化;(b) R(30)吸收线时,不同气压下光-光转化效率随耦合功率的变化;(c) R(28)吸收线时,不同气压下 4 μm 输出功率随耦合功率的变化;(d) R(28)吸收线时,不同气压下光-光转化效率随耦合功率的变化

Fig. 6 4 μm laser output power and optical-optical conversion efficiency of the two absorption lines versus coupling power. (a) Measured 4 μm laser output power varies with coupled pump power under various CO<sub>2</sub> pressures at R(30) absorption line; (b) optical-optical conversion efficiency varies with coupled pump power under various CO<sub>2</sub> pressures at R(30) absorption line; (c) measured 4 μm laser output power varies with coupled pump power under various CO<sub>2</sub> pressures at R(28) absorption line; (d) optical-optical conversion efficiency varies with coupled pump power under various CO<sub>2</sub> pressures at R(28) absorption line

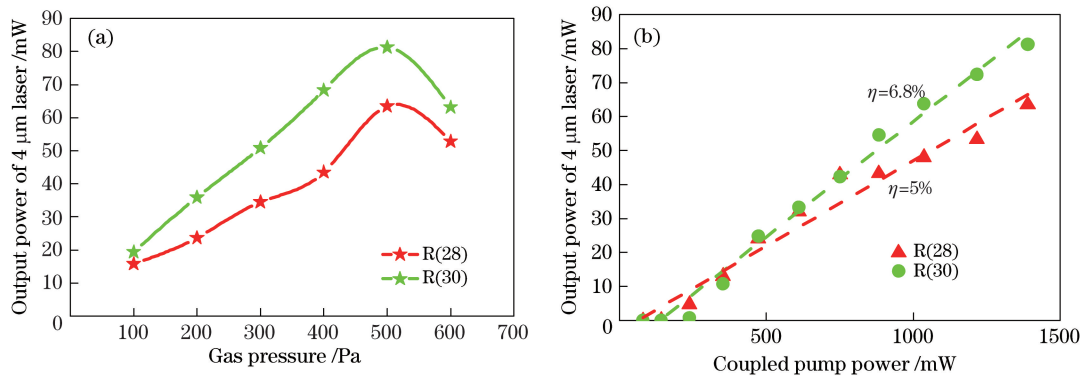


图 7 两条吸收线下的功率特性的比较。(a) 5 m 长光纤中两条吸收线在不同气压下的最大功率；  
(b) 500 Pa 气压下两条吸收线的输出功率随泵浦功率的变化

Fig. 7 Comparison of power characteristics of two absorption lines. (a) Maximum output powers of two absorption lines under different CO<sub>2</sub> pressures through 5 m hollow-core fiber; (b) measured 4 μm output power as a function of coupled pump power under 500 Pa CO<sub>2</sub> gas pressure at two absorption lines

## 5 结 论

利用掺铊光纤放大的 2 μm 可调谐窄线宽半导体激光器泵浦一段充有 CO<sub>2</sub> 气体的反共振空芯光纤, 实现了 4.3 μm 波段的中红外激光输出, 为目前报道的常温下连续波光纤激光最长波长(超连续谱激光除外)。当选择 R(30) 吸收线泵浦时, 获得的最大激光功率约为 82 mW, 相对耦合泵浦功率的激光斜效率约为 6.8%。通过进一步改进空芯光纤结构参数和拉制工艺, 降低光纤的传输损耗, 同时优化光纤长度和气压, 有望大幅提升激光效率和输出功率。本文为实现 4 μm 以上中红外光纤激光器提供了一条简单有效的新途径。

### 参 考 文 献

- [1] Jackson S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 423-431.
- [2] Zhou P, Wang X, Ma Y, *et al.* Review on recent progress on mid-infrared fiber lasers[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(11): 1744-1751.
- [3] Chang T, Wood O. An optically pumped CO<sub>2</sub> laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1972, 8(6): 598.
- [4] Miller H C, Radzykewycz D T, Hager G. An optically pumped mid-infrared HBr laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1994, 30(10): 2395-2400.
- [5] Nampoothiri A V V, Ratanavis A, Campbell N, *et al.* Molecular C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> and HCN lasers pumped by an optical parametric oscillator in the 1.5-μm band[J]. *Optics Express*, 2010, 18(3): 1946-1951.
- [6] Fedorov V V, Mirov S B, Gallian A, *et al.* 3.77-5.05-μm tunable solid-state lasers based on Fe<sup>2+</sup>-doped ZnSe crystals operating at low and room temperatures[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2006, 42(9): 907-917.
- [7] Vurgaftman I, Meyer J R. Analysis of limitations to wallplug efficiency and output power for quantum cascade lasers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(12): 123108.
- [8] Jiang X, Joly N Y, Finger M A, *et al.* Deep-ultraviolet to mid-infrared supercontinuum generated in solid-core ZBLAN photonic crystal fibre[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(2): 133-139.
- [9] Fortin V, Bernier M, Bah S T, *et al.* 30 W fluoride glass all-fiber laser at 2.94 μm[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(12): 2882-2885.
- [10] Woodward R I, Majewski M R, Bharathan G, *et al.* Watt-level dysprosium fiber laser at 3.15 μm with 73% slope efficiency[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1471-1474.
- [11] Maes F, Fortin V, Bernier M, *et al.* 5.6 W monolithic fiber laser at 3.55 μm[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(11): 2054-2057.
- [12] Henderson-Sapir O, Jackson S D, Ottaway D J. Versatile and widely tunable mid-infrared erbium doped ZBLAN fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1676-1679.
- [13] Maes F, Fortin V, Poulain S, *et al.* Room-temperature fiber laser at 3.92 μm[J]. *Optica*, 2018, 5(7): 761-764.
- [14] 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.
- [15] Couny F, Benabid F, Light P S. Large-pitch kagome-

- structured hollow-core photonic crystal fiber[J]. Optics Letters, 2006, 31(24): 3574-3576.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Astapovich M S, Gladyshev A V, Khudyakov M M, *et al.* Watt-level nanosecond  $4.42\text{-}\mu\text{m}$  Raman laser based on silica fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(1): 78-81.
- [23] 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.
- [24] Wang Z F, Belardi W, Yu F, *et al.* Efficient diode-pumped mid-infrared emission from acetylene-filled hollow-core fiber[J]. Optics Express, 2014, 22(18): 21872-21878.
- [25] Hassan M R A, Yu F, Wadsworth W J, *et al.* Cavity-based mid-IR fiber gas laser pumped by a diode laser[J]. Optica, 2016, 3(3): 218-221.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Gu B, Chen Y B, Wang Z F. Red, green and blue laser emissions from  $\text{H}_2$ -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.
- [29] 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.
- [30] Xu M R, Yu F, Knight J. Mid-infrared 1 W hollow-core fiber gas laser source[J]. Optics Letters, 2017, 42(20): 4055-4058.
- [31] Zhou Z Y, Tang N, Li Z X, *et al.* High-power tunable mid-infrared fiber gas laser source by acetylene-filled hollow-core fibers[J]. Optics Express, 2018, 26(15): 19144-19153.
- [32] Aghbolagh F B A, Nampoothiri V, Debord B, *et al.* Mid IR hollow core fiber gas laser emitting at  $4.6 \mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2019, 44(2): 383-386.
- [33] The HITRAN database [DB/OL]. [2019-07-07]. <http://hitran.org/>.
- [34] Yi H M, Liu Q N, Gameson L, *et al.* High-accuracy  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$  line intensities in the  $2 \mu\text{m}$  wavelength region measured by frequency-stabilized cavity ring-down spectroscopy[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2018, 206: 367-377.
- [35] Herzberg G, Spinks J W T. Molecular spectra and molecular structure: diatomic molecules[M]. New York: Prentice-Hall, 1939.
- [36] Jones A M, Fourcade-Dutin C, Mao C, *et al.* Characterization of mid-infrared emissions from  $\text{C}_2\text{H}_2$ , CO,  $\text{CO}_2$ , and HCN-filled hollow fiber lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8237: 82373Y.
- [37] Gu B, Chen Y B, Wang Z F. Characteristics of  $1.9\text{-}\mu\text{m}$  laser emission from hydrogen-filled hollow-core fiber by vibrational stimulated Raman scattering [J]. Optical Engineering, 2016, 55(12): 126114.
- [38] Siegman A E. Lasers [M]. California: University Science Books, 1986.