

# 1653 nm 窄线宽拉曼光纤放大器

徐佳<sup>1</sup> 汪磊<sup>2</sup> 刘江<sup>1</sup> 师红星<sup>1</sup> 高晓明<sup>2</sup> 王璞<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>北京工业大学激光工程研究院 国家产学研激光技术中心, 北京 100124  
<sup>2</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所大气物理化学研究室, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 报道了中心波长为 1653 nm 的窄线宽拉曼光纤放大器。该放大器为全光纤结构, 种子源为平均功率 8 mW、线宽 2 MHz 的分布式反馈(DFB)半导体激光器, 抽运源为中心波长为 1541 nm 的掺铒光纤激光器, 拉曼增益介质为长 500 m 的高非线性光纤(HNLF)。在 3.32 W 抽运功率下, 拉曼光纤放大器输出功率为 260 mW, 放大器增益为 15.1 dB, 斜率效率约为 12%。由于激光器输出波长位于甲烷气体的一个强吸收峰, 可广泛应用于大气环境监测和天然气运输管道泄漏探测等多个领域。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 受激拉曼散射; 甲烷探测

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0602001

## Narrow Line-Width 1653 nm Raman Fiber Amplifiers

Xu Jia<sup>1</sup> Wang Lei<sup>2</sup> Liu Jiang<sup>1</sup> Shi Hongxing<sup>1</sup> Gao Xiaoming<sup>2</sup> Wang Pu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>National Center of Laser Technology, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China  
<sup>2</sup>Laboratory of Atmospheric Physic-Chemistry, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Heifei, Anhui 230031, China)

**Abstract** A 1653 nm Raman fiber amplifier with a narrow line-width output, which adopts the all-fiber configuration is reported. The Raman seeder is a distributed feed back (DFB) diode laser with 8 mW output power and 2 MHz linewidth. The pump source is a 1541 nm Er-doped fiber laser. The Raman gain fiber is 500-m long nonlinear fiber (HNLF). When the pump power is 3.32 W, the output power of the Raman fiber amplifier is 260 mW, corresponding to 15.1 dB gain and 12% slope efficiency. Since the central wavelength of this laser is located at one strong absorption peak of methane molecular, it can be used in many fields, such as the atmosphere monitor and natural gas leak detection system.

**Key words** lasers; fiber lasers; stimulated Raman scattering; methane detection

**OCIS codes** 140.3460; 140.3510; 290.5910

## 1 引言

天然气燃烧后无废渣和废水产生, 相较煤炭和石油等能源具有使用安全、热值高和洁净等优势。随着“西气东输”工程的建立与完善, 天然气进入了千家万户, 这不仅让广大居民免去了烧煤、烧柴和换煤气罐的麻烦, 而且对环境质量的改善意义重大。天然气在生产、储存及运输等过程中的泄漏是不可避免的, 这不仅造成了极大的浪费, 还带来了严重的

安全隐患。现有的检测方法, 如火焰电离检测、声探测、电化学传感、热成像等方法, 存在检测效率低、价格昂贵等缺点, 难以做到快速定位漏源以及远程遥感探测的需求。因此, 近年来便携式、车载激光遥感探测系统的研制备受关注<sup>[1~4]</sup>。2010年, 汪磊等<sup>[3]</sup>报道了基于地形后向散射和谐波探测原理的天然气管道泄漏激光遥感探测系统, 该系统采用了输出功率为 10 mW 的 1653 nm 分布式反馈(DFB)半导体

**收稿日期**: 2013-03-04; **收到修改稿日期**: 2013-04-14

**基金项目**: 国家自然科学基金(61177048)和北京市自然科学基金重点项目(KZ2011100050011)资助课题。

**作者简介**: 徐佳(1988—), 女, 博士研究生, 主要从事超短脉冲掺铒光纤激光器、光纤放大器等方面的研究。

E-mail: xujia@emails.bjut.edu.cn

**导师简介**: 王璞(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤激光器、光纤放大器等方面的研究。

E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn(通信联系人)

激光器作为探测光源,较好地实现了120 m测量距离内的甲烷气体遥感探测。激光探测器接收到的光功率与激光器输出功率、背景散射体反射率和收集透镜半径的平方成正比,与探测距离成反比。在收集透镜半径一定的情况下,增大激光器输出功率可以有效地增加系统的探测距离。目前DFB半导体激光器由于受到制备工艺和技术等方面的限制,输出功率仅有十几毫瓦。因此,高功率、窄线宽的1653 nm激光光源的研制成为了提高甲烷遥感探测系统性能的关键因素。

由于1653 nm属于特殊波长,不能采用掺杂离子受激放大的方式获得,而基于受激拉曼散射(SRS)效应的拉曼光纤放大器可以对其进行有效的放大。随着高非线性光纤、光子晶体光纤等新型光纤的发展,更高效以及更低噪声的特殊波长拉曼光纤放大器的研制有了新的进展。拉曼光纤放大器具有结构紧凑、稳定性高和光束质量好等特点,其最大优势在于输出波长的灵活性:通过对抽运光波长、拉曼增益介质的选择,再结合级联技术,可以得到稀土离子掺杂光纤难以获得的输出波长,极大地满足了探测、传感、生物及医学等领域对特殊波段光源的需求。

近年来,以激光钠导星为应用背景的1178 nm波段是拉曼光纤激光器的研究热点<sup>[5~7]</sup>,但应用于甲烷探测的1653 nm拉曼光纤激光器的报道很少。文献[8]报道了输出功率约为70 mW的1.65 μm波段拉曼光纤放大器,该激光器采用长约7.2 km的拉曼增益光纤,抽运源为中心波长为1.533 μm的二阶拉曼光纤激光器。该激光器采用的光纤太长,且输出功率较小,不能很好地满足甲烷探测系统对光源的需求。

本文报道了全光纤结构的1653 nm窄线宽、高功率拉曼光纤放大器的研制。该激光器采用主振荡功率放大(MOPA)结构,种子源为平均功率8 mW的DFB半导体激光器,拉曼增益介质为长约500 m的高非线性光纤。在功率为3.32 W的1541 nm掺铒光纤激光器抽运下,拉曼光纤放大器最高输出功率为260 mW,斜率效率约为12%。根据理论计算,若将此拉曼光纤放大器应用于天然气管道泄漏激光遥感探测系统中,可使探测距离扩大到600 m,为原来系统的5倍。

## 2 实验装置

该实验装置主要包含1541 nm连续波(CW)掺铒光纤激光器、掺铒光纤放大器和1653 nm拉曼光

纤放大器三个部分,以下分别介绍每个部分的光路设计及元器件参数。

图1为CW掺铒光纤激光器装置图。激光器采用了环形腔结构,抽运源为中心波长为974 nm,最大输出功率为500 mW的半导体激光器,增益介质为长约3 m的单包层掺铒光纤。腔内激光通过输出耦合器的90%端输出。窄带滤波器的中心波长为1541 nm,光谱带宽为1.5 nm。

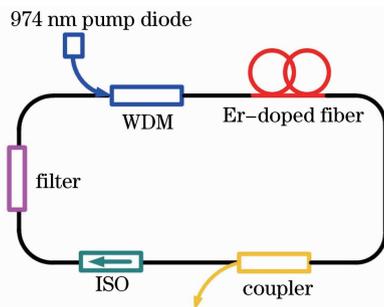


图1 掺铒连续光纤激光器装置图

Fig. 1 Schematic setup of the Er-doped CW fiber laser

图2为掺铒光纤放大器装置图。放大器采用正向抽运方式,抽运光通过(2+1)×1的合束器耦合入双包层铒镱共掺光纤(EYDF)中。激光器中熔入一段单模光纤(Corning SM28)进行抽运光剥离,偏振无关光隔离器用于抑制端面反馈对激光器稳定性产生的影响。

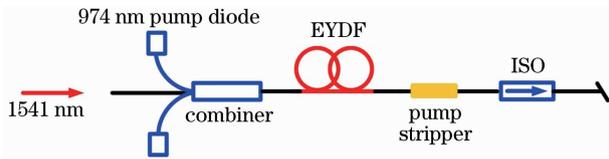


图2 掺铒光纤放大器装置图

Fig. 2 Schematic setup of the Er-doped fiber amplifier

图3为拉曼光纤放大器装置图。放大器采用反向抽运方式。拉曼激光器种子源为中心波长为1653 nm的DFB半导体激光器,激光器线宽为2 MHz,最大输出功率为8 mW。其中,1650 nm偏振无关光隔离器用于保护半导体激光器。第一个1550/1650 nm波分复用耦合器(WDM)用于输出未吸收的1541 nm激

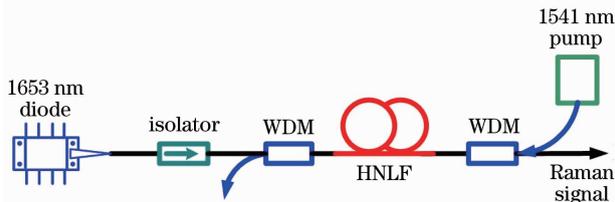


图3 拉曼光纤放大器装置图

Fig. 3 Schematic setup of the Raman fiber amplifier

光。拉曼增益光纤为商用的高非线性光纤(HNLF),该光纤长为 500 m,数值孔径为 0.35,在 1550 nm 处的模场直径为  $3.09 \mu\text{m}$ ,非线性系数为  $10 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,色散为  $1.4 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,损耗为  $0.88 \text{ dB/km}$ 。为了观察输出光谱是否产生高阶拉曼现象,在输出端接入了分束比为 95/5 的耦合器。

### 3 实验结果及分析

在 974 nm 半导体激光器的抽运功率为 480 mW 时,掺铒光纤激光器获得平均功率为 90 mW 的稳定的 CW 激光输出。图 4 为采用分辨率为 0.02 nm 的光谱仪(Yokogawa, AQ6370B)测得的掺铒光纤激光器的光谱图,其中心波长为 1541.62 nm,光谱带宽为 0.23 nm。

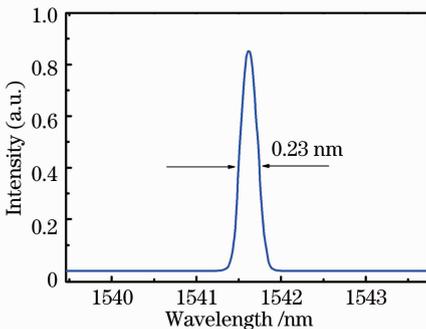


图 4 掺铒光纤激光器的光谱

Fig. 4 Optical spectrum of the Er-doped fiber laser

为了给拉曼放大器提供足够的抽运功率,实验中通过包层抽运掺铒光纤放大器对 1541 nm 种子光源进行一级放大。放大器采用正向抽运方式,放大后的激光通过一段单模光纤实现抽运剥离。图 5 为掺铒光纤放大器输出功率随抽运功率的变化曲线。当抽运功率为 11.57 W 时,掺铒光纤放大器输出功率为 3.32 W,斜率效率约为 34.6%。从图中可以看出,掺铒光纤放大器尚未达到饱和,其输出功

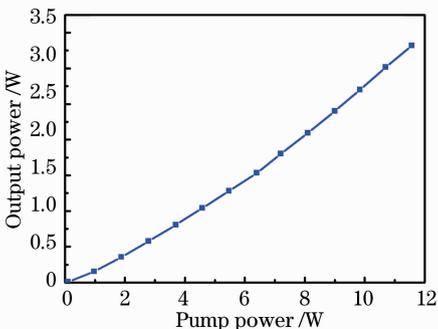


图 5 掺铒光纤放大器输出功率随抽运功率的变化

Fig. 5 Output power versus pump power of the Er-doped fiber amplifier

率还有继续上升的空间。但由于拉曼光纤放大器中的 WDM 能够承受的功率有限,没有继续增加其输出功率。

实验中所采用的高非线性光纤为石英光纤,其在  $13.2 \text{ THz}$  ( $440 \text{ cm}^{-1}$ ) 附近有一个较宽的增益峰。DFB 半导体激光器的中心波长为 1653 nm,为了使得拉曼放大器性能达到最佳,故选用 1541 nm 的抽运光。虽然正向抽运的效率远高于反向抽运,但正向抽运会将抽运光强度与偏振的不稳定性引入信号光中,带来噪声,同时会使种子源的光谱展宽<sup>[9,10]</sup>,故实验中采用反向抽运方式。

如图 6 中圆点轨迹所示,当抽运功率大于 1.5 W 时,拉曼放大器输出功率开始呈线性增加。当抽运功率为 3.32 W 时,拉曼光纤放大器获得的输出功率为 260 mW,此时通过 WDM 的  $1.5 \mu\text{m}$  端口输出的剩余抽运光功率为 1.037 W。通过对 5% 拉曼信号输出端的监测,放大过程中没有出现高阶拉曼现象,且通过示波器可观察到激光器运转在稳定的 CW 模式。图 7 为拉曼放大器输出功率为 260 mW 时的光谱,其中心波长为 1653.9 nm,带宽为 0.0259 nm。由于光谱仪分辨率仅为 0.02 nm,所测光谱带宽并不准确,实际带宽应远远小于 0.02 nm。但受限于现有实验条件,未能给出其精确的线宽参数。

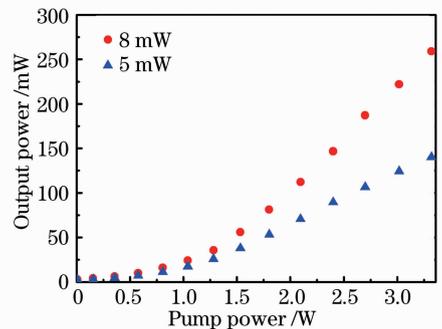


图 6 种子源功率不同时拉曼光纤放大器的输出功率随抽运功率的变化

Fig. 6 Output power of Raman fiber amplifier versus pump power at different seed powers

为了研究了 DFB 半导体激光器输出功率对拉曼光纤放大器输出特性的影响,本文进行了一组对比实验,该实验选用了相同的抽运源和相同的拉曼光纤。图 6 是种子功率分别为 5 mW 和 8 mW 时的输出功率随抽运功率的变化曲线。在相同条件下(最高抽运功率为 3.32 W,高非线性光纤长为 500 m),当种子源功率为 5 mW 时,拉曼信号光可放大到 140 mW,剩余抽运光功率为 907 mW,放大器增益为

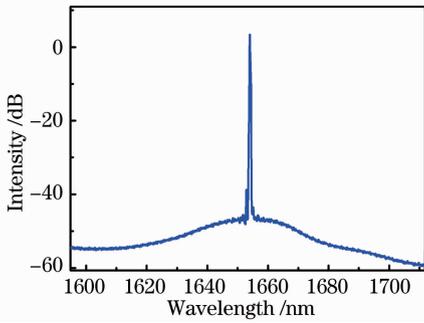


图 7 拉曼光纤放大器的光谱

Fig. 7 Optical spectrum of the Raman fiber amplifier 14.5 dB,斜率效率为 5.7%。当种子源功率为 8 mW 时,拉曼信号光可放大到 260 mW,剩余抽运光为 1037 mW,放大器增益为 15.1 dB,斜率效率为 12%。在未达到增益饱和时,注入光信号功率越大,输出功率越大,斜率效率越高。因此,通过选择更高功率的 DFB 半导体激光器以及减小系统的损耗(如优化高非线性光纤的熔接效率)可进一步提高输出功率。

同时,实验中还测量了不同长度的高非线性光纤对拉曼光纤放大器输出特性的影响,如图 8 所示,当种子源功率为 8 mW 时,分别选取了长度为 500、1000、1500 m 的高非线性光纤进行对比实验。图 9 为采用不同长度的高非线性光纤时,拉曼信号光和剩余抽运光随输入抽运功率的变化。在相同条件下(最高抽运功率 3.32 W,拉曼种子光功率 8 mW),当高非线性光纤长度分别为 500、1000、1500 m 时,可分别将拉曼信号光放大到 260、292、305 mW,此时的剩余抽运光功率分别为 1037、184、76 mW。当高非线性光纤长度为 500 m 时,所提供的拉曼增益较小,拉曼放大器的阈值较高。当高非线性光纤长度为 1000 m 和 1500 m 时,所提供的拉曼增益较大,拉曼激光器阈值较低,当抽运功率大于 1.25 W

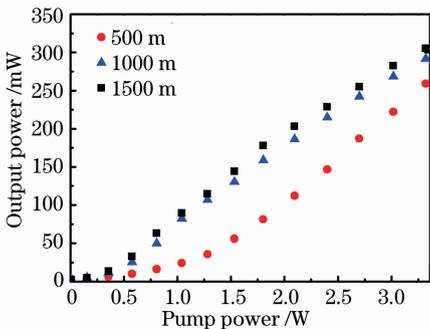


图 8 不同拉曼光纤长度下,输出功率随抽运功率的变化  
Fig. 8 Output power versus pump power at different lengths of Raman fiber

时,剩余抽运光功率开始下降。

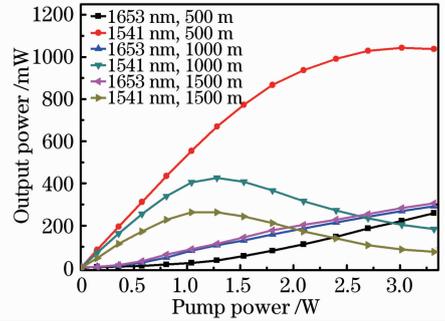


图 9 不同拉曼光纤长度下,拉曼信号光和剩余抽运光随抽运功率的变化  
Fig. 9 Signal power and residual pump power versus pump power at different lengths of Raman fiber

实验结果表明在拉曼光纤放大器未达到增益饱和时,相同的抽运功率下,种子信号光功率越高,光纤拉曼放大器效率越高。较长的拉曼增益光纤,可以为激光器提供更高的增益,降低拉曼光纤放大器的阈值。但是,过长的光纤也将引入更大的噪声。在将其应用于甲烷探测系统时,必须综合考虑整个激光器的价格、重量、信噪比和稳定性等多个因素。因此,在输出功率满足探测需求的条件下,应尽可能缩短拉曼光纤长度,减小放大器的噪声、体积和重量。

## 4 结 论

报道了一种小型化、全光纤结构的窄线宽 1653 nm 拉曼放大器。种子源为平均功率为 8 mW 的 DFB 半导体激光器,抽运源为中心波长为 1541 nm 的掺铒光纤激光器,拉曼增益介质为长约 500 m 的高非线性光纤。在 3.32 W 抽运功率下,拉曼光纤激光器最高输出功率为 260 mW,斜率效率约为 12%。同时,还研究了拉曼信号光功率和拉曼光纤长度对该激光器输出特性的影响。

## 参 考 文 献

- Li Jingsong, Gao Xiaoming, Li Weizhen *et al.*. Near-infrared diode laser wavelength modulation-based photoacoustic spectrometer[J]. *Spectrochimica Acta Part A*, 2006, **64**(2): 338~342
- Wang Lei, Tan Tu, Cao Zhensong *et al.*. Research on vehicle-based remote sensing of natural gas pipeline leakage [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(8): 2192~2195  
汪磊,谈图,曹振松等. 车载天然气管道泄漏遥感探测技术的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(8): 2192~2195
- Wang Lei, Tan Tu, Wang Guishi *et al.*. Natural gas pipeline leak detection system for laser remote sensing and calibration[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2912~2917

- 汪 磊,谈 图,王贵师 等. 天然气管道泄漏激光遥感探测系统的研制及标定方法[J]. 中国激光, 2010, **37**(11): 2912~2917
- 4 Wang Guishi, Cai Tingdong, Wang Lei *et al.*. Application of digital frequency locking techniques in real-time measurement of methane in atmosphere[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1008002
- 王贵师,蔡廷栋,汪 磊 等. 基于数字频率锁定技术实时探测实际大气中甲烷浓度[J]. 中国激光, 2011, **38**(10): 1008002
- 5 Luke R. Taylor, Yan Feng, Domenico Bonaccini Calia. 50 W CW visible laser source at 589 nm obtained via frequency doubling of three coherently combined narrow-band Raman fibre amplifiers [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(8): 8540~8555
- 6 Christopher Vergien, Iyad Dajani, Craig Robin. 18 W single-stage single-frequency acoustically tailored Raman fiber amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(10): 1766~1768
- 7 Xu Jiangming, Leng Jinyong, Han Kai *et al.*. Experimental research on single-frequency fiber Raman amplifier [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(7): 074204
- 许将明,冷进勇,韩 凯 等. 单频光纤拉曼放大器的实验研究[J]. 物理学报, 2012, **61**(7): 074204
- 8 A. S. Kurkov, V. M. Paramonov, O. N. Egorova *et al.*. A 1.65- $\mu\text{m}$  fiber Raman amplifier[J]. *Quantum Electron.*, 2002, **32**(8): 747~750
- 9 Chen Jian, Zhang Jin, Peng Jiande *et al.*. Fiber Raman amplifier's gain coefficient and noise figure [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **28**(11): 1021~1023
- 陈 健,张 晋,彭江得 等. 光纤拉曼放大器增益系数与噪声系统的实验研究[J]. 中国激光, 2001, **28**(11): 1021~1023
- 10 Jia Dongfang, Li Shichen, Song Lijun. Optimized design of fiber Raman amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(7): 808~811
- 贾东方,李世忱,宋立军. 光纤拉曼放大器的优化设计问题[J]. 光学学报, 2001, **21**(7): 808~811

栏目编辑: 张 腾