

引用格式: LI Yafan, LIU Kun, LIU Tiegeng, et al. Intracavity Gas Sensing System Based on Thulium Fiber Laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9):0930003

李亚凡,刘琨,刘铁根,等. 基于掺铥光纤激光器的内腔气体传感系统研究[J]. 光子学报, 2021, 50(9):0930003

# 基于掺铥光纤激光器的内腔气体传感系统研究

李亚凡,刘琨,刘铁根,江俊峰,闪霁芳

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘 要:**为拓展可检测范围,利用掺铥光纤激光器产生的  $2\ \mu\text{m}$  波段激光进行呼吸气中水蒸气的内腔气体传感研究。首先,对直接吸收式气体传感技术进行了理论分析。其次,研究了  $1\ 570\ \text{nm}$  激光泵浦下的掺铥光纤特性,其自发辐射谱主要分布在  $1.85\sim 2.05\ \mu\text{m}$  波段;搭建了全光纤掺铥光纤环形激光器,并采用可调谐滤波器实现了  $1\ 927.5\sim 1\ 985\ \text{nm}$  范围内波长输出,激光线宽为  $0.05\ \text{nm}$ ,表现出单纵模窄线宽稳定输出的特点。最后,引入波长扫描技术,实现了对呼吸气中水蒸气在  $1\ 928\sim 1\ 938\ \text{nm}$  范围内光谱扫描,分辨了 8 条吸收谱线,与基于 HITRAN 光谱数据库的仿真光谱一致,波长定位的绝对误差低于  $0.03\ \text{nm}$ 。结果表明该内腔气体传感系统适用于  $2\ \mu\text{m}$  波段气体传感检测。

**关键词:**掺铥光纤激光器;气体传感;调谐;吸收光谱

中图分类号:TN29

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215009.0930003

## Intracavity Gas Sensing System Based on Thulium Fiber Laser

LI Yafan, LIU Kun, LIU Tiegeng, JIANG Junfeng, SHAN Jifang

(Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In order to expand the detection range, the  $2\ \mu\text{m}$  band laser generated by thulium-doped fiber laser is used to conduct intracavity gas sensing of water vapor in human breathing gas. Firstly, the direct absorption gas sensing technology is analyzed theoretically. Secondly, the characteristics of thulium-doped fiber pumped by a  $1\ 570\ \text{nm}$  laser are studied, and the spontaneous emission spectrum is mainly distributed in the band of  $1.85\sim 2.05\ \mu\text{m}$ . Then, an all-fiber thulium-doped fiber ring laser is built, further using a tunable filter, the wavelength output in the range of  $1\ 927.5\sim 1\ 985\ \text{nm}$  is achieved and the laser linewidth of  $0.05\ \text{nm}$  is obtained, which shows the advantages of single longitudinal mode, narrow linewidth and stable output. Finally, combined with wavelength sweep technique, the spectral scanning of water vapor in the range of  $1928\sim 1938\ \text{nm}$  is realized and eight absorption lines are resolved, which are consistent with the simulated spectrum based on the HITRAN spectrum database. The absolute error of wavelength positioning is less than  $0.03\ \text{nm}$ . The results show that the intracavity gas sensing system is suitable for  $2\ \mu\text{m}$  band gas sensing detection.

**Key words:** Thulium-doped fiber laser; Gas sensing; Tunability; Absorption spectrum

**OCIS Codes:** 300.6360; 060.3510; 140.3560; 120.4820; 010.1030

## 0 引言

气体检测对工业生产,环境保护及生命健康等领域具有重要意义。采用近红外气体光谱吸收技术,研

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos.61922061,61775161,61735011),天津市杰出青年科学基金(No.19JCJQC61400),国家重大科学仪器设备开发专项(No.2013YQ030915)

**第一作者(通讯作者):**李亚凡(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤气体传感技术。Email:liyafan@tju.edu.cn

**导师:**刘琨(1981—),男,教授,博士,主要研究方向为光纤传感及光电检测。Email:beiyangkl@tju.edu.cn

**收稿日期:**2021-05-09; **录用日期:**2021-06-11

<http://www.photon.ac.cn>

究人员对乙炔<sup>[1]</sup>、甲烷<sup>[2]</sup>、一氧化碳<sup>[3]</sup>和水蒸气<sup>[4]</sup>等气体进行了检测分析。然而在光纤通讯波段部分气体吸收强度弱使得能够检测的气体种类有限。2 μm 波段激光处于大气传输窗口,在该波段内存在强吸收谱线的气体种类众多,如水蒸气和氨气等。因此,在 2 μm 波段进行气体传感系统研究具有重要意义。

基于光纤环腔激光器的气体传感技术适用于高精度的气体检测,基本原理是将待测气体置于激光腔体中,激光形成过程中,会多次经过气体,从而极大地增加了气体的有效吸收光程,提高了检测精度和灵敏度,具有气室体积小的优点。掺铒光纤激光器以掺铒光纤作为增益介质,理论上可以实现 2 μm 波段内数百纳米的激光输出<sup>[5]</sup>,可调谐范围远大于半导体激光器。常见的调谐方法包括基于滤波器,光纤光栅,萨尼亚克环及其他受温度等参数控制的器件的方法,以及调节腔内损耗的方法<sup>[6-11]</sup>。ADITI G 等<sup>[12]</sup>通过引入腔内损耗实现了 1 932~1 968 nm 范围内 8 mW 的激光输出,并未进一步将该光源应用于气体传感。WEI Y 等<sup>[6]</sup>设计了一种全光纤掺铒光纤激光器且通过调节法布里-珀罗滤波器实现了 1 940~2 010 nm 范围内的高信噪比连续光扫描输出。然而为了应用于气体传感,需要进一步研究压窄输出激光线宽机制,常用的方案有光纤光栅窄带滤波器、超短线形腔方法、饱和吸收体和非相干技术等。YANG Changsheng 等<sup>[13]</sup>进一步回顾与总结了掺铒光纤激光器的实验研究进展。在气体传感方面应用方面,RUSSELL J D Y 等<sup>[14]</sup>开发了基于掺铒光纤的激光雷达系统,采用空间脉冲光在 1.941 5~1.943 5 μm 波段对大气层中水蒸气的吸收谱线进行了测量,由于采用空间光路结构,系统存在体积大的缺点。而基于光纤激光器的系统结构会更加紧凑稳定,同时扫描范围可以进一步拓展。STARK A 等<sup>[15]</sup>将多模掺铒光纤激光器产生的 4 nm 宽度的激光发射光谱入射到 88 cm 的内腔吸收光池中,通过旋转分光透镜来实现宽带调谐,该气体传感系统测量了 1.70~1.98 μm 范围内的空气中水的吸收光谱。BREMER K 等<sup>[16]</sup>基于光纤光栅对构建了可调谐的掺铒光纤激光器光源,结合调制技术和锁相检测机制进行气体传感检测,采用长光程气室得到了 1.998 μm 附近高浓度 CO<sub>2</sub> 的吸收谱线。TAO Mengmeng 等<sup>[17, 18]</sup>进行了压窄线宽的实验,通过可调谐掺铒光纤激光器作为窄线宽光源,在 1 856~1 886 nm 范围内扫描了大气中水的吸收谱线。然而长光程气室由于体积大,不利于系统实际应用于气体传感应用场景。因此搭建可调谐窄线宽激光器的内腔气体传感系统具有重要意义。

本文采用基于光栅原理的窄带滤波器进行波长选择与线宽压窄,实现了宽范围的波长调谐,获得了单纵模稳定输出,完成了呼吸气中水的吸收谱线测量。

## 1 气体检测技术原理

微量气体吸收传感的基本原理遵循朗伯-比尔定律,当不同波长的激光经过装有待测气体的气室之后,强度将会产生衰减,透射光强可以表示为<sup>[19]</sup>

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp[-\sigma(\nu)cL] \quad (1)$$

式中, $I_0(\nu)$ 为入射光强, $I(\nu)$ 为透射光强, $\nu$ 为激光频率( $\text{cm}^{-1}$ ), $\sigma(\nu)$ 代表频率 $\nu$ 处气体谱线的吸收截面( $\text{cm}^2 \cdot \text{molecule}^{-1} \cdot \text{atm}$ ), $c$ 是气体分子数密度( $\text{molecule} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{atm}^{-1}$ ), $L$ 为气体与光的相互作用距离即有效吸收光程(cm)。为了表征不同浓度气体的吸收程度,将因气体吸收导致的光强衰减定义吸光度 $K$ ,其表达式为

$$K(\nu) = \ln \left[ \frac{I_0(\nu)}{I(\nu)} \right] = \ln \left( \frac{1}{A} \right) = \sigma(\nu)cL \quad (2)$$

式中, $A$ 是透过率。当待测气体的有效吸收光程一定时,特定波长处的吸光度与气体浓度成正比。因此通过标定吸光度与气体浓度的关系,可以实现对气体的浓度测量。为了进行光谱仿真,需要对 $\sigma$ 做进一步分解,表达式为<sup>[20, 21]</sup>

$$\sigma(\nu) = PS(T)g(\nu, \nu_0) \quad (3)$$

式中, $P$ 是气体压强(atm, 1 atm=101 325 Pa), $\nu_0$ 为吸收谱线的中心频率, $S(T)$ 为气体吸收谱线强度( $\text{cm} \cdot \text{molecule}^{-1}$ ),对于特定波长而言,吸收线的强度仅为温度 $T$ 的函数。 $g(\nu, \nu_0)$ 为线型函数(cm),与压力和温度因素有关,在常温常压下,气体谱线展宽以碰撞展宽为主,通常采用洛伦兹(Lorentzian)线型拟合。采用均方根误差评价拟合曲线与原吸收曲线的一致性,通过对比发现采用下式所示的洛伦兹线型函数 $g_L$ 拟合最贴近实际<sup>[21]</sup>

$$g_L(\nu, \nu_0) = \frac{1}{\pi} \frac{\Delta\nu_L}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu_L)^2} \quad (4)$$

式中,  $\Delta\nu_L$  表示 Lorentzian 线型的线宽,  $\nu_0$  表示跃迁谱线的中心频率。通过 HITRAN 光谱数据库查询以上参数<sup>[22-23]</sup>, 可以仿真出特定温度, 压强, 气体浓度及光程下的气体吸收光谱。

## 2 系统设计

基于掺铥光纤环腔激光器的气体传感系统原理如图 1 所示, 实线为光纤连接, 虚线为电路连接。按照功能划分, 该传感系统包括光源模块, 传感模块及探测模块三个部分。其中, 光源模块包括长度为 5 m 的掺铥

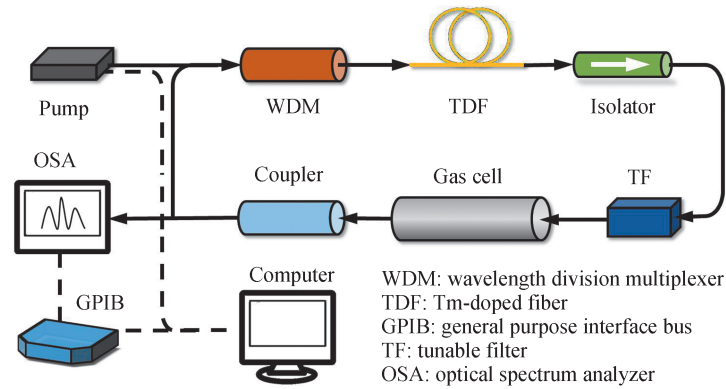


图 1 掺铥光纤激光器内腔气体传感系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of thulium-doped fiber laser intracavity gas sensing system

光纤 (Tm Doped Fiber, TDF), 1 570 nm 泵浦 (Pump), 1 570/2 000 nm 波分复用器 (Wavelength Division Multiplexing, WDM), 可调谐光滤波器 (Tunable Filter, TF), 隔离器 (Isolator) 和 10/90 耦合器 (Coupler, 10% 的输出端连接光谱仪)。传感模块包括气室 (Gas Cell)。探测模块包括光谱仪 (Optical Spectrum Analyzer, OSA), 通用接口总线 (General Purpose Interface Bus, GPIB) 和计算机 (Computer)。其中, 掺铥光纤型号为 Nufern SM-TSF-9/125, 该单模单包层光纤适合 1 570 nm 激光进行纤芯泵浦 (Core pumping)。传

感气室采用 10 cm 长的空心金属管, 两端装配光纤准直器, 通过充气口充入气体。理论上 TDF 形成的放大自发辐射光 (Amplified spontaneous emission, ASE) 的光谱波长覆盖范围 1.6~2.2  $\mu\text{m}$ 。光源模块中的 ASE 光作为形成激光振荡的种子光, 通过可调谐滤波器和谐振腔的选频作用形成激光振荡, 光隔离器可以有效阻隔反向光传输, 保证光信号单向传输, 同时进一步压窄线宽, 以提高掺铥光纤放大器的稳定性。将滤波器置于耦合器之前以优化系统结构, 进而提高系统信噪比<sup>[24]</sup>。图 2 所示为传感系统实物图, 以上器件采用多模-多模模式进行熔接以降低插入损耗。该系统选用 Yokogawa 公司生产的 AQ6375 型号的光谱仪, 实现对输出端 2  $\mu\text{m}$  波段信号的数据采集。由上位机软件对系统进行统一控制。

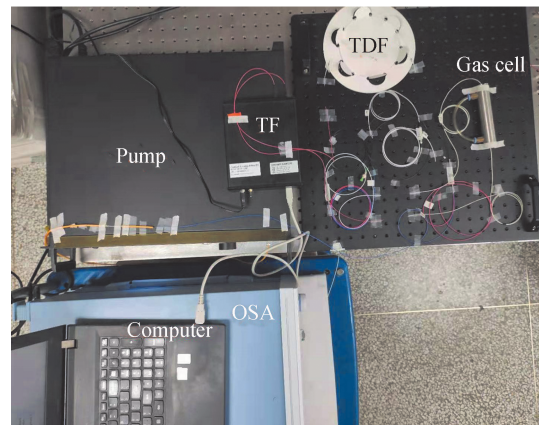


图 2 掺铥光纤激光器内腔气体传感系统实物图

Fig. 2 Physical map of thulium-doped fiber laser intracavity gas sensing system

## 3 实验与讨论

### 3.1 掺铥光纤激光器光谱特性

ASE 可以表征掺杂光纤放大器可放大信号光的波长范围, 其产生于自发辐射过程, 即从激发态自发跃迁到低能态而释放光子的过程。根据理论模型分析, 当采用 1 570 nm 的激光进行泵浦时, 掺铥光纤可以产生 1.6~2.2  $\mu\text{m}$  的宽带 ASE。为研究掺铥光纤的 ASE 特性, 基于 OptiSystem 设计了线形结构仿真系统, 采用

功率为1 W、波长为1 570 nm的Pump Laser,对长度为5 m的Tm Doped Fiber进行泵浦,通过OSA检测得到图3(a)所示的ASE光谱。通过仿真研究掺铥光纤的ASE光谱,发现在1 570 nm泵浦下,ASE的谱线范围主要分布在1.75~2.05  $\mu\text{m}$ 。这是由于在该波长激励下,掺铥光纤中的 $\text{Tm}^{3+}$ 从基态 $^3\text{H}_6$ 激发跃迁至激发态 $^3\text{F}_4$ 能级, $^3\text{H}_6$ - $^3\text{F}_4$ 能级间的辐射跃迁在2  $\mu\text{m}$ 波段产生了很宽的发射截面。实验中采用1 570 nm泵浦对5 m的TDF进行前向泵浦,图3(b)为光谱仪检测得到的ASE光谱,主要分布在1.85~2.05  $\mu\text{m}$ 之间。对比分析波形发现,曲线均呈现出非对称坡状趋势,长波部分基本吻合,实际系统在短波部分比仿真结果相比不理想,这是因为2  $\mu\text{m}$ 无源器件在2 000 nm附近损耗最小,而对低波长的损耗大。因此,实验结果与理论仿真的ASE光谱相符,说明该仿真模型能够较好体现掺铥光纤系统的特性。通过上述分析,掺铥光纤激光器具有1.85~2.05  $\mu\text{m}$ 宽波段内的波长选择能力。

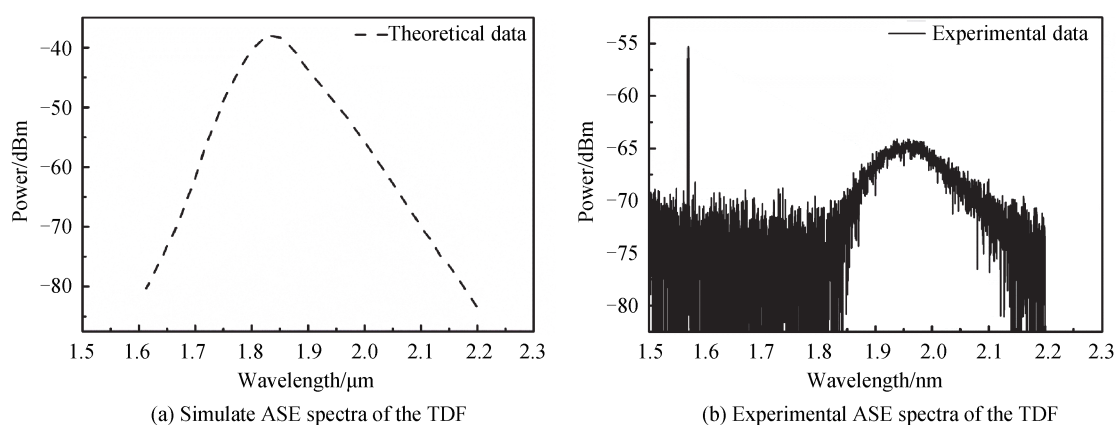


图3 掺铥光纤自发辐射谱仿真图与实验图  
Fig. 3 Simulate and experimental ASE spectra of the TDF

在系统不包含滤波器和气室的情况下,将光谱仪的采样间隔设置为0.4 nm,研究了100~700 mW泵浦下的激光输出,如图4所示。当泵浦功率低于300 mW时,系统输出中心波长在1 970 nm附近的宽带ASE,随着功率提高,光谱的3 dB带宽逐渐变小,300 mW时降至35.78 nm,且光谱的整体功率逐渐提高。当功率为400 mW时,系统输出3 dB带宽为2.00 nm的窄带激光。进一步探究,发现掺铥光纤激光器泵浦功率阈值为320 mW,当泵浦功率超过阈值时出现起振激光。随着泵浦功率的提高,输出激光峰值功率逐步提高,当泵浦功率为700 mW时,峰值功率为5.31 dBm,由于采用10/90耦合器,环路中的最大光强为14.86 dBm,通过局部放大图发现,起振波长稳定在1 965 nm处。将光谱仪分辨率设为0.05 nm,进一步观察到图5所示的

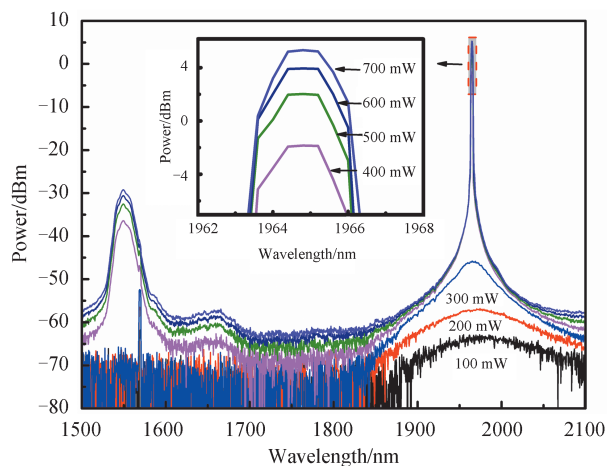


图4 不同功率泵浦下掺铥光纤激光器输出光谱图  
Fig. 4 Output spectrum of thulium-doped fiber lasers at different pump powers

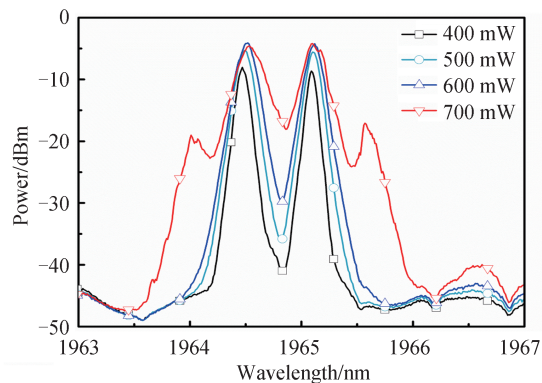


图5 不同功率泵浦下掺铥光纤激光器输出激光精细光谱图  
Fig. 5 Detailed spectrum of output laser from thulium-doped fiber lasers at different pump powers

400~700 mW 泵浦下系统输出的精细光谱,在 1 965 nm 附近出现双纵模输出,随着激发强度的进一步提高,出现了四个振荡模式。这是因为在该谐振腔内有多个模式落在增益曲线上从而引发的模式竞争现象,在下述的实验过程中通过引入滤波器可实现单纵模输出。

### 3.2 可调谐掺铥光纤激光器调谐特性

进一步引入波长扫描技术,将滤波器加入到前述的激光器系统中,以实现输出激光的波长调谐。将滤波器放在耦合器之前,虽然会降低输出功率,但是可以抑制带外 ASE,提高输出信号的信噪比,提高后续气体检测的精度。本文选用的 2  $\mu\text{m}$  滤波器的调谐范围覆盖 1 927.5~2 053.2 nm,调谐范围宽达 125 nm,单程采集点数为 31 000,3 dB 带宽约 0.4 nm。对于该掺铥光纤可调谐激光器系统,使用 1 000 mW 功率泵浦以测试调谐特性,通过 OSA 记录激光器输出光谱。图 6 中展现了 1 927.5~1 985 nm 范围内的输出光谱,实现了约 58 nm 的宽调谐范围,在 1 927.5~1 970 nm 范围内输出功率波动幅度最大约为 3 dB,光谱的平坦特性好,有利于降低因光源不平坦导致的气体传感误差。激光器最大输出功率出现在 1 950 nm 附近,与无滤波器的激光器自激振荡波长一致,这是由于掺铥光纤对该波段的增益最大。短波部分由于滤波器的限制,最短波长为 1 927.5 nm;随着泵浦功率的提高,长波部分逐渐向更长波长移动。为了表征系统稳定性,利用 0.05 nm 分辨率的光谱仪测试了 60 min 内 1 945 nm 激光的稳定性。1 945 nm 激光位于平坦区域的中间位置,能够较好地反映出整体区域的光谱特性。如图 7 所示,输出激光保持单纵模稳定输出,波长的最大偏移量和输出功率的最大波动量分别为 0.015 nm 和 0.63 dB,波长稳定性有利于气体谱线的精准识别。经过滤波器后系统输出激光得到明显压窄,线宽约为 0.05 nm,基本满足气体传感中谱线测量要求。

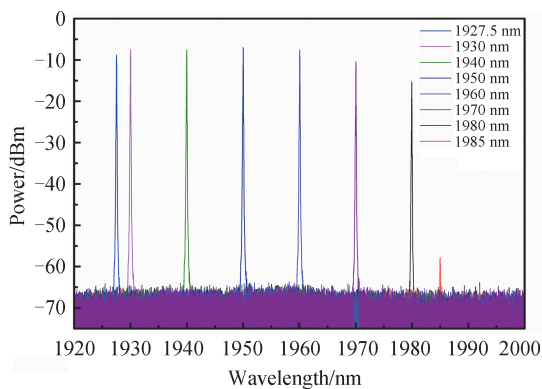


图 6 1 000 mW 泵浦下含有滤波器的掺铥光纤激光器输出光谱图

Fig. 6 The output spectrum of thulium-doped fiber laser at 1 000 mW pump power with filter

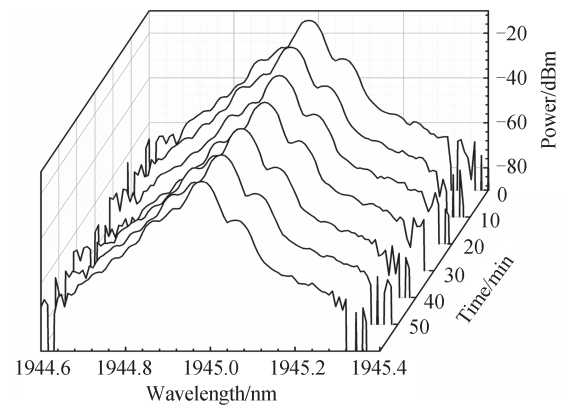


图 7 60 min 内光谱仪检测到 1 945 nm 附近的输出光谱图

Fig. 7 Output spectra measured by OSA over 60 min with 10 min interval near 1 945 nm

为了实现气体传感检测,将气室加入到上述的可调谐激光器系统中。图 8 中展示了该传感系统在 1 000 mW

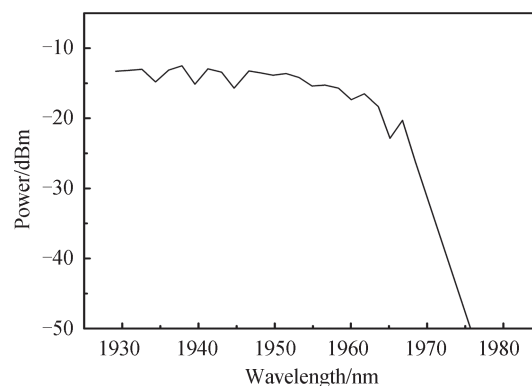


图 8 1 000 mW 泵浦下内腔气体传感系统的调谐范围

Fig. 8 Tunable range of thulium-doped fiber laser intracavity gas sensing system at 1 000 mW pump power

下的扫描输出光谱,实现了1 925~1 970 nm范围的可调谐激光输出,表明该传感系统可以对该波段内的气体谱线进行测量。相比于未加气室前,调谐范围变小且功率降低,这是由于气室增加了谐振腔的损耗,从而使使得粒子数反转水平降低,因此可以通过提高泵浦功率以扩大调谐范围和提高输出功率。

### 3.3 内腔气体传感系统测量实验

基于内腔气体传感系统对人呼吸气中水蒸气的吸收谱线进行吸收测量。通过查询HITRAN2016光谱数据库可以发现,水在2  $\mu\text{m}$ 波段具有丰富的吸收谱线<sup>[22]</sup>。考虑到呼吸气中其他气体对水分子吸收的干扰,选择水在1 928~1 938 nm波段的吸收光谱作为分析对象。根据前述理论部分中的式(1)~(3),采用式(4)的洛伦兹线型拟合方式,调用HITRAN中提供的光谱参数数据,包括吸收谱线中心频率、谱线强度、线宽等数据,设定296 K温度以及1 atm(1 atm=101 325 Pa)压强的条件,气室长度为60 cm,进行2%浓度水的吸收光谱计算<sup>[22-23]</sup>,最终得到1 928~1 938 nm波长范围内水的仿真吸收光谱,如图9所示。实验中,调节泵浦功率至1 300 mW,将光谱仪的分辨率设置为0.05 nm进行测量。在气室充入约2%水含量的呼吸气后,通过上位机驱动滤波器进行1 928~1 938 nm波段内间隔为0.014 nm的扫描,并控制光谱仪采集系统输出激光数据。在实际应用中,由于掺铒光纤激光器的增益不平坦特性导致的光源输出光强分布起伏,吸收谱线叠加在光源光谱上,会产生畸变,且系统噪声及环境噪声等因素会引起光谱信号信噪比降低,影响气体吸收谱线检测。因此需要对采集到的光谱作进一步处理,包括光谱去噪、基线提取、寻峰定位与谱线拟合。首先采用去噪方法滤除噪声以提高检测精度,采用哈尔小波变换对原始光谱进行降噪处理。随后进行基线提取,采用窗口为3的相邻平均法进行光谱平滑,设置阈值为0.1,进行非吸收区识别,吸收区使用线性内插法拟合基线。在提取基线后,得到图9中的实验吸收光谱,水的吸收峰较为明显,在非吸收区存在噪声引发的毛刺。接着利用窗口为2的局部极大值法定位吸收峰的粗略位置,当设置阈值20%时,在光谱范围内识别到8个峰。随后选择洛伦兹线型进行自动多峰拟合,得到图9中的洛伦兹拟合吸收光谱,拟合后的光谱取得了良好的近似效果,同时消除了非吸收区的噪声干扰。通过对比发现,实验得到的洛伦兹拟合后吸收谱线与理论吸收谱线吻合度高。吸收峰定位的最大绝对误差低于0.03 nm,远小于大多数相邻吸收峰的间隔,表明该传感系统可以实现对气体吸收峰的精确定位,误差来源于光谱仪分辨率限制以及线型拟合。同时由于气体分子的能级结构决定了气体谱线的吸收波长,对于特定的气体,吸收谱线具有特异性,因此,该系统可以进一步实现气体种类识别。对于低吸收强度的谱线,可利用波长扫描技术进行多次扫描以降低系统及环境噪声误差,结合改进的谱线提取算法进一步进行识别提取。

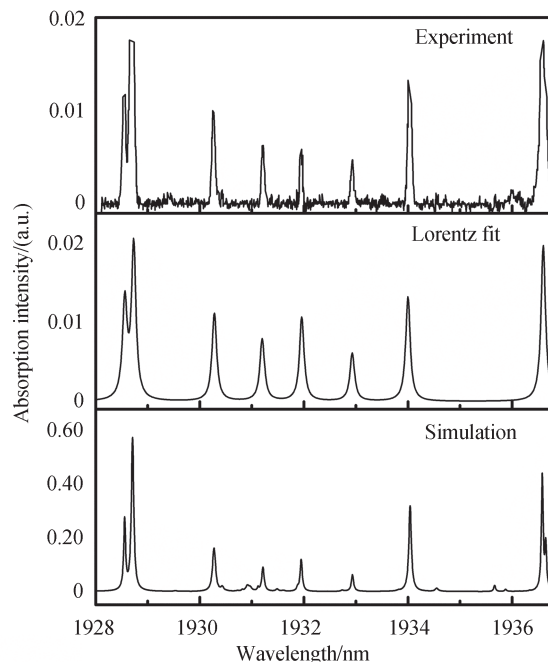


图9 H<sub>2</sub>O在1 928~1 938 nm波段的实验以及洛伦兹拟合吸收谱线与仿真吸收谱线

Fig. 9 Experimental, Lorentz fitting and simulate absorption spectrum of H<sub>2</sub>O in the wavelength range of 1 928~1 938 nm

## 4 结论

本文搭建了一套基于掺铥光纤激光器的有源内腔气体传感系统,引入滤波器实现了宽波段单纵模的稳定激光输出,激光线宽约为0.05 nm。加入气室后结合波长扫描技术,完成了1 928~1 938 nm波段范围内呼吸气中水的谱线扫描,经过基线处理与洛伦兹线型拟合后得到的吸收谱线与仿真光谱基本一致,波长定位最大绝对误差低于0.03 nm。对于较弱的吸收线,后续可通过使用探测器或改进算法来进一步测量。测试结果显示,该内腔气体传感系统气室体积小,调谐范围宽,系统稳定性好,可用于2  $\mu\text{m}$ 波段内的气体传感应用研究。未来可通过建立谱线峰值吸光度与气体浓度之间的关系进行浓度标定与反演,实现对气体浓度的定量分析研究。

### 参考文献

- [1] LOHDEN B, KUZNETSOVA S, SENGSTOCK K, et al. Fiber laser intracavity absorption spectroscopy for in situ multicomponent gas analysis in the atmosphere and combustion environments[J]. Applied Physics B, 2011, 102(2): 331-344.
- [2] DONG Lulu, YAO Yongping, ZHAO Yuqing, et al. A high-sensitive methane measuring telemetry system based on a direct optical absorption technique[J]. Laser Physics, 2020, 30(12):126201.
- [3] XIA Hua, DONG Fengzhong, TU Guojie, et al. High sensitive detection of Carbon Monoxide based on novel multipass cell[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9):2596-2601.  
夏滑, 董凤忠, 涂郭结, 等. 基于新型长光程多次反射池的CO高灵敏度检测[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2596-2601.
- [4] MORITA S, HATTORI E, KITAGAWA K. Two-dimensional imaging of water vapor by near-infrared laser absorption spectroscopy[J]. Applied Spectroscopy, 2008, 62(11):1216-1220.
- [5] JACKSON S D, KING T A. Theoretical modeling of Tm-doped silica fiber lasers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(5):948-956.
- [6] WEI Y, HU K, SUN B, et al. All-fiber widely wavelength-tunable thulium-doped fiber ring laser incorporating a Fabry-Perot filter[J]. Laser Physics, 2012, 22(4):770-773.
- [7] HANNA D C, JAUNCEY I M, PERCIVAL R M, et al. Continuous-wave oscillation of a monomode thulium-doped fibre laser[J]. Electronics Letters, 1988, 24(19):1222-1223.
- [8] ZHANG Luna, YAN Fengping, FENG Ting, et al. Wavelength-tunable thulium-doped fiber laser with sampled fiber Bragg gratings[J]. Optics and Laser Technology, 2019, 120:105707.
- [9] SHUBOCHKIN R L, KOZLOV V A. Tunable thulium-doped all-fiber laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(7):944-945.
- [10] ZHANG Yan, WANG Tianshu, ZHANG Peng, et al. 2 $\mu\text{m}$  dual-wavelength tunable spacing all fiber thulium-doped fiber laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(3): 0314008.  
张岩, 王天枢, 张鹏, 等. 2  $\mu\text{m}$ 波段双波长间隔可调谐光纤激光器[J]. 光子学报, 2016, 45(3): 0314008.
- [11] TIAN Jiajun, YAO Yong, XIAO Junjun, et al. Tunable multiwavelength erbium-doped fiber laser based on intensity-dependent loss and intra-cavity loss modulation[J]. Optics Communications, 2012, 285(9):2426-2429.
- [12] ADITI G, ARPITA S R, SOURAV D C, et al. All-fiber tunable ring laser source near 2  $\mu\text{m}$  designed for CO<sub>2</sub> sensing [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, B235(11): 547-553.
- [13] YANG Changsheng, CHEN Dan, ZHAO Qilai, et al. Research progress of 2.0  $\mu\text{m}$ -band Tm-doped continuous wave single-frequency fiber lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2):0201006.  
杨昌盛, 陈丹, 赵齐来, 等. 2.0  $\mu\text{m}$ 波段掺铥连续单频光纤激光器的研究进展[J]. 中国激光, 2017, 44(2):0201006.
- [14] RUSSELL J D Y, NORMAN P B. Profiling atmospheric water vapor using a fiber laser lidar system[J]. Applied Optics, 2010, 49:562-567.
- [15] STARK A, CORREIA L, TEICHMANN M, et al. Intracavity absorption spectroscopy with thulium-doped fibre laser [J]. Optics Communications, 2002, 215(1-3):113-123.
- [16] BREMER K, PAL A, YAO S, et al. Sensitive detection of CO<sub>2</sub> implementing tunable thulium-doped all-fiber laser[J]. Applied Optics, 2013, 52(17):3957-3963.
- [17] TAO Mengmeng, TAO Bo, YE Jingfeng, et al. Linewidth compression of tunable Tm-doped fiber laser and its hyper-spectral absorption application[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(3): 034205.  
陶蒙蒙, 陶波, 叶景峰, 等. 可调谐掺铥光纤激光器线宽压缩及其超光谱吸收应用[J]. 物理学报, 2020, 69(3): 034205.
- [18] TAO Mengmeng, TAO Bo, YU Ting, et al. Output characteristics of tunable Tm-doped fiber lasers[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(12): 37-41.  
陶蒙蒙, 陶波, 余婷, 等. 掺铥光纤激光器波长可调谐输出特性[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 37-41.

- 
- [19] REID J, LABRIE D. Second-harmonic detection with tunable diode lasers – Comparison of experiment and theory [J]. *Applied Physics B*, 1981, 26(3): 203 – 210.
- [20] PANG Tao, WANG Yu, XIA Hua, et al. Full scale methane sensor based on TDLAS technology [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(9): 0912003.  
庞涛, 王煜, 夏滑, 等. 基于 TDLAS 技术的全量程激光甲烷传感器 [J]. *光子学报*, 2016, 45(9): 0912003.
- [21] QI Rubin, HE Shukai, LI Xintian, et al. Simulation of TDLAS direct absorption based on HITRAN database [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(1):172-177.  
齐汝宾, 赫树开, 李新田, 等. 基于 HITRAN 光谱数据库的 TDLAS 直接吸收信号仿真研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(1):172-177.
- [22] The HITRAN 2016 molecular spectroscopic database [DB]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017: S0022407317301073.
- [23] KOCHANOV R V, GORDON I E, ROTHMAN L S, et al. HITRAN Application Programming Interface (HAPI): A comprehensive approach to working with spectroscopic data [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2016, 177:15-30.
- [24] LI Z, ALAM S U, JUNG Y, et al. All-fiber, ultra-wideband tunable laser at 2  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4739-4742.