



## 基于宽带可调谐、窄线宽掺铥光纤激光器的2 $\mu\text{m}$ 波段水的超光谱吸收测量

陶蒙蒙 王亚民 吴昊龙 李国华 王晟 陶波 叶景峰 冯国斌 叶锡生 陈卫标

### Hyperspectral absorption of water around 2 $\mu\text{m}$ based on a broadband tunable, narrow linewidth Tm-doped fiber laser

Tao Meng-Meng Wang Ya-Min Wu Hao-Long Li Guo-Hua Wang Sheng Tao Bo Ye Jing-Feng  
Feng Guo-Bin Ye Xi-Sheng Chen Wei-Biao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 114203 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212127

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212127>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

可调谐掺铥光纤激光器线宽压缩及其超光谱吸收应用

Linewidth compression of tunable Tm-doped fiber laser and its hyperspectral absorption application

物理学报. 2020, 69(3): 034205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191515>

基于可调谐激光吸收光谱技术的二硫化碳中红外光谱参数测量

Measurement of middle infrared spectroscopic parameters of carbon disulfide based on tunable diode laser absorption spectroscopy

物理学报. 2019, 68(8): 084204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182140>

基于二维纳米材料可饱和吸收体的中红外超快光纤激光器

Two-dimensional material as a saturable absorber for mid-infrared ultrafast fiber laser

物理学报. 2020, 69(18): 188101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200472>

MnPS<sub>3</sub>可饱和吸收体被动锁模掺铒光纤激光器双波长激光

Dual-wavelength self-starting mode-locking Er-doped fiber laser with MnPS<sub>3</sub> saturable absorber

物理学报. 2020, 69(18): 184208 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200342>

530 W全光纤结构连续掺铥光纤激光器

530 W all-fiber continuous-wave Tm-doped fiber laser

物理学报. 2020, 69(18): 184209 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200466>

高损伤阈值可饱和吸收体锁模脉冲光纤激光器的研究进展

Research progress of mode-locked pulsed fiber lasers with high damage threshold saturable absorber

物理学报. 2022, 71(2): 024206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212442>

# 基于宽带可调谐、窄线宽掺铥光纤激光器的 2 $\mu\text{m}$ 波段水的超光谱吸收测量\*

陶蒙蒙<sup>1)2)</sup> 王亚民<sup>2)</sup> 吴昊龙<sup>2)</sup> 李国华<sup>2)</sup> 王晟<sup>2)</sup> 陶波<sup>2)</sup>  
叶景峰<sup>2)†</sup> 冯国斌<sup>2)</sup> 叶锡生<sup>1)</sup> 陈卫标<sup>1)‡</sup>

1) (中国科学院上海光学与精密机械研究所, 王之江激光创新中心, 上海 201800)

2) (西北核技术研究所, 激光与物质相互作用国家重点实验室, 西安 710024)

(2021年11月18日收到; 2022年3月1日收到修改稿)

1.8—2.0  $\mu\text{m}$  波段包含大量水的吸收谱线, 且吸收强度高于传统的 1.3—1.5  $\mu\text{m}$  波段, 在水的吸收光谱测量中具有很大的应用潜力. 超光谱吸收测量技术可以利用宽带范围内的大量吸收谱线来实现物理参数的反演, 与传统的单/双谱线的可调谐二极管吸收光谱技术相比具有更好的稳定性、准确性和更宽的使用范围. 宽带调谐的窄线宽激光光源是实现超光谱吸收测量的关键器件. 利用可调谐法布里-珀罗 (FP) 腔和光纤可饱和吸收体, 搭建了宽带调谐的窄线宽 2  $\mu\text{m}$  光纤激光器. 利用掺铥光纤的再吸收特性, 通过合理设计增益光纤长度, 得到了在 1910—1970 nm 约 60 nm 的光谱范围内连续可调的激光输出, 且激光器静态线宽小于 0.1 nm, 能够满足水的超光谱吸收测量实验的要求. 利用该激光器分别对空气和酒精火焰中水在 2  $\mu\text{m}$  波段的宽带吸收光谱进行了测量. 在常温空气中, 该光源可以在 1910—1965 nm 的光谱范围内有效分辨 40 余条水的吸收谱线; 在酒精火焰中, 该光源可以在 1950—1970 nm 的光谱范围内有效分辨近 50 条水的吸收谱线. 通过与 HITRAN2016 数据库的比对反演得到激光器在动态扫描过程中的线宽约为 0.06 nm, 与静态测试结果相近; 反演得到的空气温度约为 298 K, 空气中水的摩尔分数约为 2%, 与温湿度计测量结果一致; 反演得到的酒精火焰温度约为 1220 K, 与热电偶测量结果较为接近.

**关键词:** 超光谱吸收, 可调谐二极管激光吸收光谱, 光纤可饱和吸收体, 掺铥光纤激光器

**PACS:** 42.62.Fi, 33.20.Ea, 42.55.Wd, 42.68.Ca

**DOI:** 10.7498/aps.71.20212127

## 1 引言

在激光光谱学中, 通过对某一特定分子吸收光谱特性的测量, 可以实现对该分子所处环境参数的有效反演. 由于水分子的吸收谱线强度高、分布广, 因此基于水分子吸收光谱的测量技术得到了广泛应用. 尤其是在燃烧流场中, 由于水和  $\text{CO}_2$  是燃烧的主要产物, 且在传统的通信波段水的吸收强度明

显强于  $\text{CO}_2$ , 因此通过对流场中水分子吸收特性的研究来反演流场参数已成为一种通用手段<sup>[1–3]</sup>. 对于 1—2  $\mu\text{m}$  的近红外波段, 水的吸收谱线主要分布在三个波段, 即 1.11—1.16  $\mu\text{m}$ , 1.3—1.5  $\mu\text{m}$  和 1.8—2.0  $\mu\text{m}$ <sup>[4–6]</sup>. 其中, 1.11—1.16  $\mu\text{m}$  波段由于吸收强度相对较弱, 且范围较窄, 一般很少使用; 1.3—1.5  $\mu\text{m}$  波段处于通信光纤的传输窗口位置, 且相应的光源和探测器件都较为成熟, 因此应用最为普遍<sup>[7]</sup>.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 62105268, 91841303, 52106222) 和激光与物质相互作用国家重点实验室基金 (批准号: SKLLIM2110) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yejingfeng@nint.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: wbchen@siom.ac.cn

基于水在 1.3—1.5  $\mu\text{m}$  波段吸收的可调谐二极管吸收光谱技术 (TDLAS) 已成功应用于不同流场的温度、组分浓度和速度的测量. 水在 1398 nm 处有两条相邻的高温吸收谱线, 可由分布式反馈 (DFB) 激光器通过电流调谐同时扫描覆盖, 简化了系统光源, 因此广泛应用于高温环境下的流场参数测量<sup>[8]</sup>. 2012 年, 张亮等<sup>[9]</sup>利用水在 1398 nm 处的吸收线, 基于多普勒频移效应实现了对高速气流的流速测量. 2014 年, 陶波等<sup>[10]</sup>利用水在 1397.8 nm 附近的吸收线分别建立了基于直接吸收法和二次谐波法的 TDLAS 测量系统, 并对瞬态高温超声速流程和甲烷火焰的温度开展了测量实验. 2015 年, Wang 等<sup>[11]</sup>利用水在 1398 nm 附近的吸收谱线, 通过 24 束吸收路径实现了甲烷火焰中水的温度和浓度的同时二维反演. 低温下, 水在 1370 nm 处有一条相对独立且较强的吸收谱线, 该谱线在低温流场测量中应用较为普遍. 2008 年, Hunsmann 等<sup>[12]</sup>利用水在 1370 nm 处的吸收谱线, 通过 TDLAS 技术对树叶的水蒸发速率进行了精确测量. 2012 年, Witzel 等<sup>[13]</sup>利用水在 1370 nm 附近的吸收线实现了对内燃机中水蒸气浓度的高速测量.

在一些实验中, 为了获取更丰富的吸收光谱信息, 往往还会使用多条吸收谱线进行超光谱测量, 以实现多参数的同时反演. 其中一种方法是使用多个 DFB 激光器通过时分复用在时序上排列, 并依次通过测量区域, 从而获得不同谱线处的吸收信息. 2010 年, Caswell 等<sup>[14]</sup>在 1.32—1.38  $\mu\text{m}$  波长内选择了 10 条水的吸收谱线, 通过时分复用技术实现了高压燃气轮机燃烧室内水的温度和摩尔分数的测量. 2011 年, Li 等<sup>[15]</sup>利用水在 1391.7, 1343.3 nm 附近的三条吸收谱线实现了超燃冲压发动机不同部位的流速、温度和水的分压的测量. 2019 年, 张步强等<sup>[16]</sup>基于水在 1391.7, 1468.9, 1343.3 nm 附近的三条吸收谱线集成测量系统, 通过时分复用和波长调制技术实现了发动机模型喷口温度的精确测量. 另外一种实现超光谱测量的更方便的方法是直接使用宽带扫描光源, 如傅里叶域锁模光纤激光器 (FDML) 等. FDML 是一种基于半导体光放大的环形腔光纤激光器, 其线宽约为 0.1 nm, 光谱连续扫描范围可达 100 nm, 扫描速率高达数百 kHz, 是超光谱吸收应用的理想光源<sup>[17,18]</sup>. 2007 年, Kranendonk 等<sup>[19]</sup>首次报道了基于 FDML 的发动机吸收光谱测量实验, 在 1335—1373 nm

波长内获得了水的连续吸收光谱, 并基于此反演得到了发动机流场温度. 2013 年, Caswell 等<sup>[20]</sup>使用三台 FDML, 通过水的超光谱吸收实现了对脉冲爆震燃烧室不同位置的温度、压力和水的摩尔分数的测量. 同年, 利用相同的测量系统, Ma 等<sup>[21]</sup>对 J85 发动机出口尾焰开展了二维温度分布测量.

事实上, 与目前常用的 1.3—1.5  $\mu\text{m}$  波段相比, 在 1.8—2.0  $\mu\text{m}$  波段, 水的吸收谱线更丰富, 且吸收强度更高, 具有很大的应用潜力. 在单/双谱线 TDLAS 技术方面, 2003 年, Zhou 等<sup>[22]</sup>基于 HITEMP 数据库选出了 10 对水在 1.8  $\mu\text{m}$  附近的吸收谱线, 并基于其中部分吸收线实现了对乙烯火焰温度的测量. 2019 年, 符鹏飞等<sup>[23]</sup>选择 1877 nm 处水的吸收线搭建 TDLAS 测量系统, 实现了对贫燃条件下不同燃烧工况的温度和水分含量的多点分布式测量.

但是, 由于受到光源的限制, 1.8—2.0  $\mu\text{m}$  波段水的超光谱吸收测量鲜有报道. 近年来, 利用可调谐法布里-珀罗 (FP) 腔和光纤可饱和吸收体, 课题组研制了宽带调谐的窄线宽 2  $\mu\text{m}$  波段的光纤激光器, 并初步开展了空气中水的超光谱测量实验研究, 在 1856—1886 nm 约 30 nm 的光谱范围内分辨了 35 条水的吸收谱线, 且测量结果与 HITRAN 数据库相吻合<sup>[24—26]</sup>. 然而, 在该激光器的波长调谐范围内包含大量水的低温吸收谱线, 不利于高温流场的测量. 本文在前期研究工作的基础上, 利用掺铥光纤的再吸收特性, 通过增加增益光纤长度, 使激光器输出波长红移到了 1910—1970 nm 波段; 此外, 利用该激光器在空气和酒精火焰中开展了水的超光谱吸收测量实验, 并通过宽带吸收光谱反演得到了水的温度信息.

## 2 宽带可调谐、窄线宽 2 $\mu\text{m}$ 光源

### 2.1 光源波长扫描范围的选择

在本研究组前期的研究中, 利用可调谐 FP 腔和光纤可饱和吸收体获得了 1840—1900 nm 内连续可调的窄线宽激光输出<sup>[26]</sup>. 常温下, 该波段包含大量高强度的水的吸收谱线<sup>[4]</sup>. 但是, 在对高温流场进行测量时, 该波段会受到周围空气吸收的严重干扰, 从而影响温度测量的准确性. 图 1 所示为 1.8—2.0  $\mu\text{m}$  波段在 300 K 和 1500 K 温度下水的吸收线分布, 在 1950 nm 以上区域, 常温下水的吸收相对较弱, 比较适用于高温流场的测量. 同时,

为了兼顾常温下的光路调节需求, 光谱扫描范围应适当覆盖若干低温吸收谱线. 综合考虑, 光谱扫描范围在 1930—1970 nm 比较适宜.

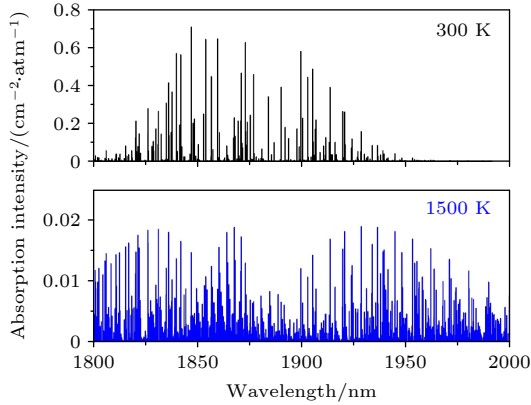


图 1 单位标准大气压下, 1.8—2.0 μm 波段在 300 K 和 1500 K 温度下水的吸收线分布

Fig. 1. Absorption lines of water in the 1.8–2.0 μm range at 300 K and 1500 K for one standard atmosphere pressure.

## 2.2 光源设计

掺铥石英光纤输出波长范围可覆盖 1.7—2.1 μm 波段 [27], 且其发射谱随光纤长度的增加存在明显的红移现象 [28], 因此可以通过调节掺铥光纤的长度实现对光源的输出光谱范围的控制. 图 2 所示为不同掺铥光纤长度下的放大自发辐射 (ASE) 光谱, 光纤长度在 4 m 左右时基本能够满足光谱扫描范围要求.

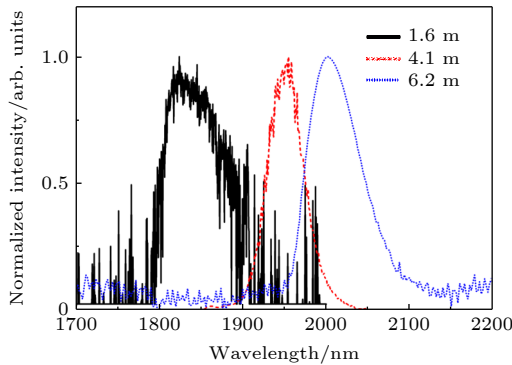


图 2 不同增益光纤长度下掺铥光纤的 ASE 光谱图

Fig. 2. ASE spectra of Tm-doped fibers at different active fiber lengths.

宽带可调谐窄线宽掺铥光纤激光器光路结构如图 3 所示. 激光器整体上采用环形腔结构, 使用 1.6 μm 掺铥光纤激光器作为泵浦源, 泵浦源通过一个波分复用器 (WDM) 耦合进入环形腔对增益光纤进行泵浦. 实验中通过优化, 选择 3.6 m TSF-

9/125 光纤作为增益光纤. 该光纤长度下, 调节光纤 FP 滤波器加载电压, 可以测量得到该滤波器的自由光谱范围 (FSR), 如图 4 所示. 可以看出, 该 FP 滤波器的自由光谱范围约为 97 nm; 在 3.6 m 增益光纤时, FP 滤波器的波长扫描范围理论上可覆盖 1878—1975 nm.

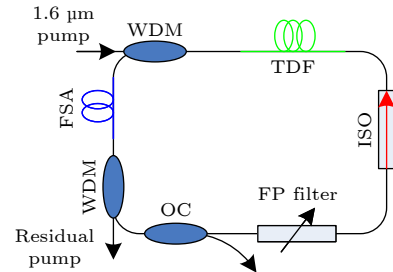


图 3 宽带可调谐窄线宽掺铥光纤激光器光路结构图 WDM, 波分复用器; TDF, 掺铥光纤; ISO, 隔离器; FP filter, 可调谐 FP 滤波器; OC, 输出耦合器; FSA, 光纤可饱和吸收体

Fig. 3. Optical path diagram of the broadband tunable narrow linewidth Tm-doped fiber laser: WDM, wavelength division multiplexer; TDF, Tm-doped fiber; ISO, isolator; FP filter, tunable FP filter; OC, output coupler; FSA, fiber saturable absorber.

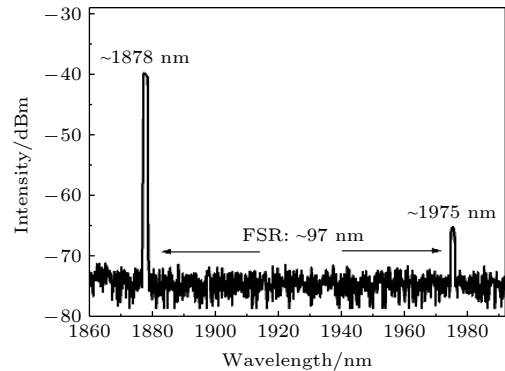


图 4 光纤 FP 滤波器的自由光谱范围

Fig. 4. Free spectral range of the fiber FP filter.

环形腔内的隔离器用于保证信号光在环形腔内的单向传输. 增益光纤中的前向信号光被隔离器阻挡, 后向信号光进入光纤可饱和吸收体. 实验中, 选择 0.3 m 铥钬共掺光纤 (TH512) 作为光纤可饱和吸收体, 实现对腔内信号光线宽的压缩. 腔内与信号光同向传输的泵浦光通过一个 WDM 引出腔外, 30% 的信号光通过一个 7:3 的 OC 输出. 可调谐 FP 滤波器置于 OC 和 ISO 中间, 以降低通过其的信号光功率, 防止损伤. 激光器的输出波长由可调谐 FP 滤波器进行选择, 并通过 FSA 进行线宽压缩.

### 2.3 光源输出特性

3—18 V 扫描电压下, 光源的输出波长在 1910—1970 nm 内约 60 nm 的光谱范围内连续可调. 保持光谱最大值, 持续扫描 2 min, 得到的激光光谱覆盖范围如图 5 所示.

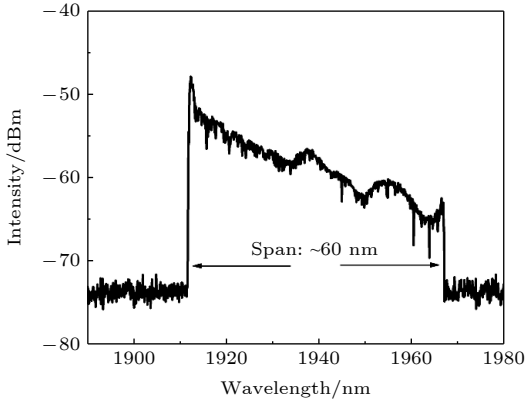


图 5 激光光源输出光谱扫描范围  
Fig. 5. Wavelength scanning range of the laser system.

固定电压条件下的典型输出光谱如图 6 所示. 此时, 激光器输出光谱中心波长为 1931.8 nm, 3 dB 线宽约为 0.07 nm, 能够满足水的吸收光谱的测量需求.

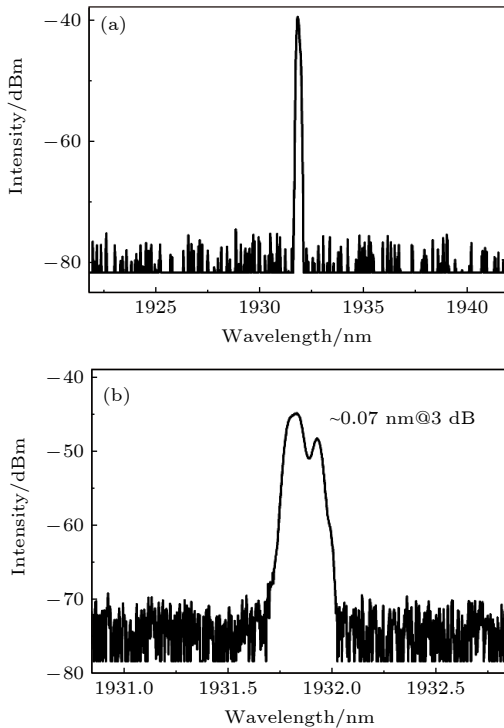


图 6 分辨率不同的光源典型输出光谱 (a) 1.00 nm; (b) 0.05 nm

Fig. 6. Typical spectra of the laser system with different resolution: (a) 1.00 nm; (b) 0.05 nm.

在 1931.8 nm 固定输出波长下, 激光器的功率输出特性如图 7 所示. 由于腔内加入了 FSA, 会引入较大的损耗, 因此该激光器泵浦阈值较高, 约为 430 mW. 激光器整体斜率效率约为 16.6%, 最高输出功率达 60 mW.

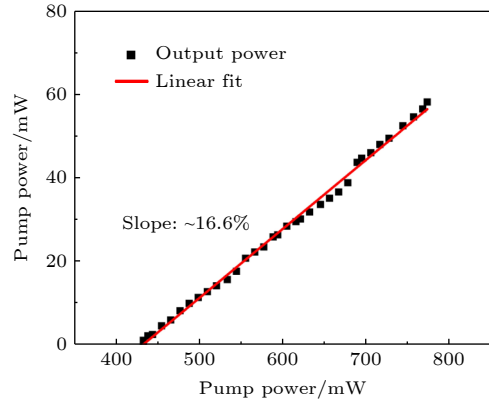


图 7 激光器的输出功率特性  
Fig. 7. Output power of the laser system.

## 3 超光谱吸收应用

### 3.1 常温下空气中水的超光谱吸收

利用所设计的光源对常温下空气中水在 1910—1965 nm 波长内的宽带吸收谱线进行了测量. 测量中光源电压扫描范围为 3—18 V, 扫描频率设定为 20 Hz, 吸收路径长度约为 58 cm. 测得的典型实验结果如图 8 所示. 图 8(a) 给出了重频扫描下的连续测量结果, 图 8(b) 给出了半个周期内波长单次扫描的实验结果. 可以发现, 随着激光器的波长扫描, 其输出功率也会发生变化, 叠加空气流动对光强产生的干扰就形成了扫描过程中的光强基线.

通过快速傅里叶变换 (FFT) 滤波对图 8(b) 中单次扫描获得的吸收光谱数据去除高频噪声, 然后基于文献 [29] 中给出的信号去除法去除吸收信号基线, 得到的吸收光谱信息如图 9 所示. 图中同时给出了基于 HITRAN2016 数据库计算得到的常温、常压下水在 1910—1965 nm 光谱内的理论吸收谱线. 通过对比可以看出, 实测的吸收谱线与理论模拟结果能够实现很好的吻合, 利用所设计的光源可以在 1910—1965 nm 的光谱范围内有效分辨 40 余条水的吸收谱线.

通过寻峰即可得到实测吸收光谱数据中采样点与理论模拟数据中波长之间的峰值对应关系,

如图 10 所示. 可以看出, 激光器扫描波长与采样点之间呈较好的线性关系, 表明该激光器的波长扫描具有很好的线性度. 通过对图 10 中的峰值对应关系进行插值即可实现对实测数据的波长转换.

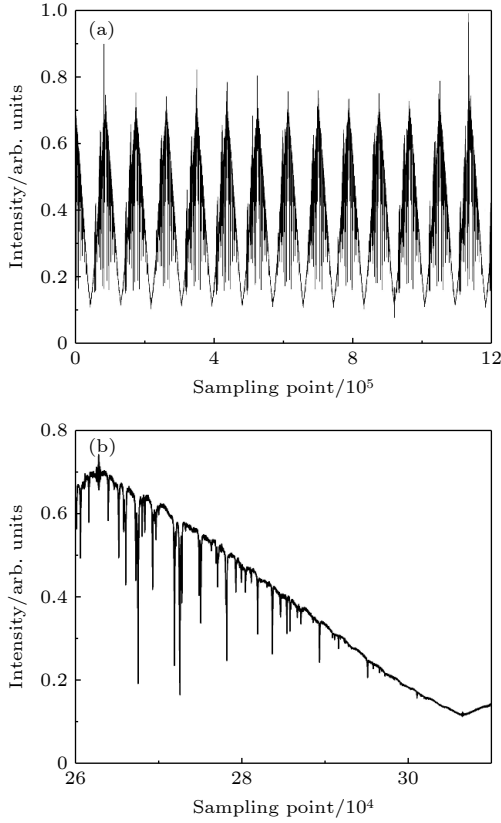


图 8 水的超光谱吸收典型测量结果 (a) 重频扫描; (b) 单次扫描  
Fig. 8. Typical measurements of hyperspectral absorption of water: (a) Repetitive scan; (b) single scan.

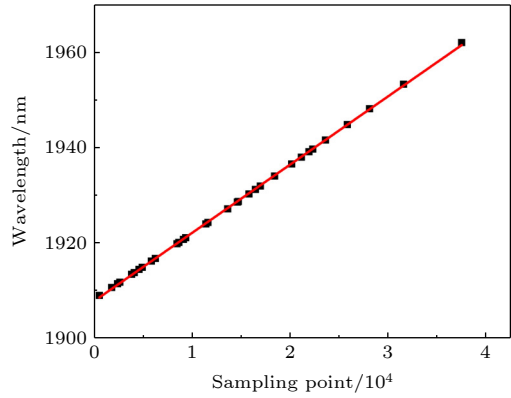


图 10 扫描过程中采样点与激光器输出波长的对应关系  
Fig. 10. Relationship between sampling point and laser wavelength.

由图 9 中可以明显地看出, 常温下, 在 1945 nm 以上的光谱区域, 水的吸收较少, 且吸收强度较低, 较低的信噪比导致该区域吸收光谱本底出现较大幅度的波动. 为了消除这种慢变的本底波动对激光器线宽反演带来的干扰, 测量数据和理论模拟数据均对波长取一阶导数, 然后通过最小残差来判断激光器动态扫描下的激光器线宽.

吸收光谱实测数据一阶导数与不同激光线宽下理论数据一阶导数的对比如图 11 所示. 理论数据根据 HITRAN2016 数据库在常温、常压条件下生成, 并通过插值与实测数据的波长实现一一对应. 对比结果显示, 动态扫描过程中, 激光器线宽约为 0.06 nm, 与图 6 中固定波长条件下的测试结果相当.

在 0.06 nm 激光线宽下, 利用 HITRAN2016 数据库在常压下生成不同温度和摩尔分数的超光谱吸收数据, 并从中找出与实测吸收光谱最接近的一组吸收光谱, 如图 12 所示. 在 298 K 温度、2% 摩尔分数下, 实测数据与理论数据在 1910—1965 nm 范围内吻合较好, 只有在若干强吸收谱线处出现了较大的残差. 由此可以得到环境温度为 298 K, 与温度计实测数据一致; 空气相对湿度为 60%, 与湿度计实测数据一致.

### 3.2 酒精火焰中水的超光谱吸收

利用所设计的光源还对酒精火焰中水在 2 μm 波段的宽带吸收谱线进行了测量. 测量中光源电压扫描范围为 3—10 V, 扫描频率设定为 20 Hz, 测得的典型实验结果如图 13 所示. 图 13(a) 给出了半个周期内波长单次扫描的实验结果. 图 13(b) 给

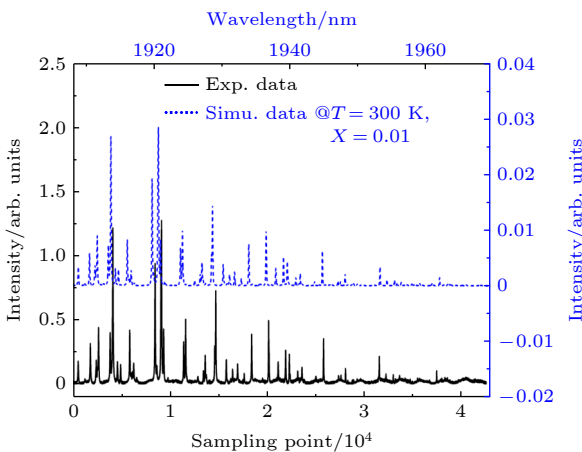


图 9 处理后的吸收光谱实测数据与理论模拟数据对比  
Fig. 9. Comparison between the measured data of processed absorption spectrum and theoretical simulation spectrum.

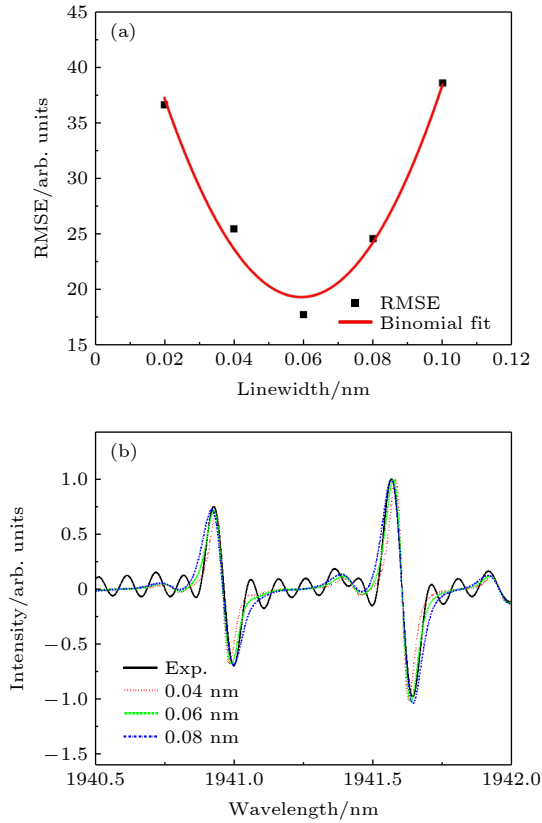


图 11 吸收光谱实验数据一阶导数与不同激光线宽下的理论模拟数据一阶导数对比 (a) 不同激光线宽下的均方根残差分布; (b) 1941 nm 附近的实测数据对比  
 Fig. 11. Comparison between first derivatives of the measured and theoretical absorption spectra under different laser linewidths: (a) RMSE distribution at different laser linewidths; (b) comparison of measured data around 1941 nm.

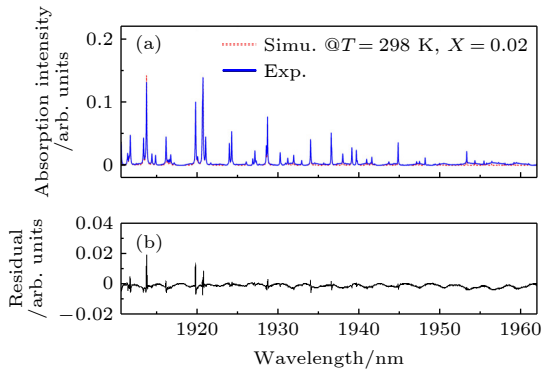


图 12 空气中水的实测吸收光谱与理论吸收光谱对比 (a) 实测数据与理论数据; (b) 残差  
 Fig. 12. Comparison between measured and theoretical absorption spectra of water in air: (a) Measured and theoretical absorption spectra; (b) residual.

出了经滤波、去基线处理后的实测数据与 1000 K 温度下理论模拟数据的对比。可以看出, 在高温下, 1950—1970 nm 范围内包含大量水的吸收谱线; 实

测高温吸收谱线与理论模拟结果能够实现很好的吻合, 利用所设计的光源在高温下可以在 1950—1970 nm 的光谱范围内有效分辨近 50 条水的吸收谱线。

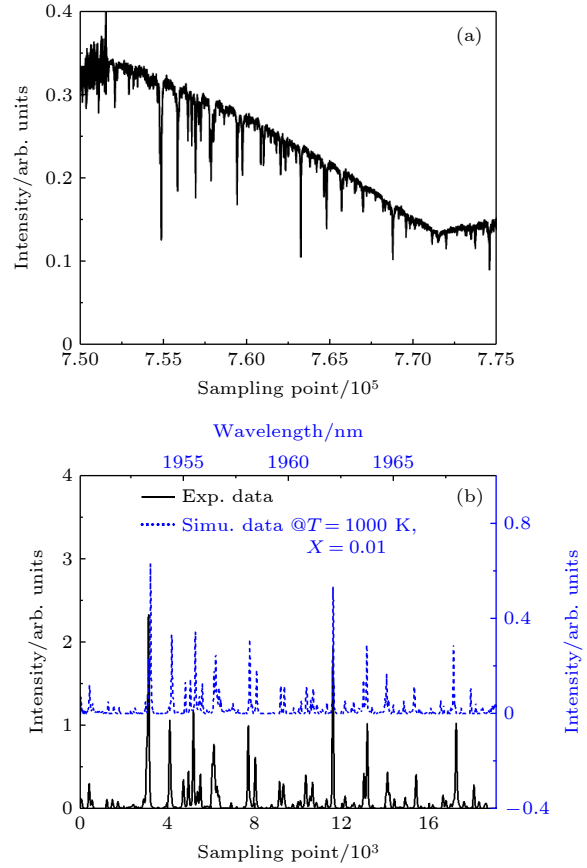


图 13 酒精火焰中水的超光谱吸收典型测量结果 (a) 单次扫描; (b) 实测数据与理论数据的对比  
 Fig. 13. Typical hyperspectral absorption spectrum of water in alcohol flame: (a) Single scan; (b) comparison between measured and theoretical spectra.

利用图 13(b) 中的采样点与波长对应关系即可实现对测量信号的波长转换。为了屏蔽低温吸收线的干扰, 选取实测吸收光谱中的长波段数据与不同温度下的理论模拟数据库进行比对, 并从中找出与实测吸收光谱最接近的一组吸收光谱, 如图 14 所示。在 1220 K 温度、8% 摩尔分数下, 实测数据与理论数据吻合较好, 由此可以得到酒精火焰的温度约为 1220 K, 与热电偶实测数据相仿。另外, 在 1962 nm 附近有一条吸收谱线与理论模拟结果相差较大。这是由于该吸收线虽然属于高温线, 但是在常温下也存在较强的吸收 (见图 9)。因此, 在整个吸收路径上进行测量时, 由于整体积分温度低于火焰温度, 因此该谱线吸收强度会低于理论模拟值。

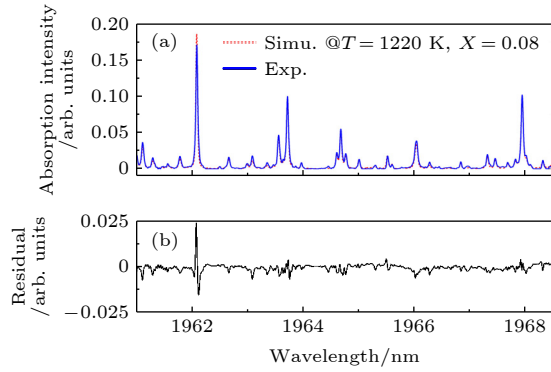


图 14 酒精火焰中水的实测吸收光谱与理论吸收光谱对比 (a) 实测数据与理论数据; (b) 残差

Fig. 14. Comparison between measured and theoretical absorption spectra of water in alcohol flame: (a) Measured and theoretical absorption spectra; (b) residual.

## 4 结 论

利用掺铈光纤的波长红移特性, 针对高温流场测量需求, 研制了在 1910—1970 nm 光谱内连续可调的窄线宽掺铈光纤激光器. 利用该光源对空气和酒精火焰中水的超光谱吸收开展了实验测量, 并通过与 HITRAN2016 数据库的比对反演了空气和酒精火焰的温度信息及其中水的摩尔分数, 验证了 2  $\mu\text{m}$  波段宽带可调谐光源在流场参数测量中的应用可行性. 事实上, 在 1950—1970 nm 光谱范围内还存在着大量  $\text{CO}_2$  的吸收谱线, 但是, 由于在实验环境中  $\text{CO}_2$  浓度相对较低, 因此测量中并未发现明显的  $\text{CO}_2$  吸收信号. 后续可考虑通过实验设计, 利用所设计的光源实现对  $\text{CO}_2$  的超光谱吸收测量.

## 参考文献

- [1] Goldenstein C S, Spearrin R M, Jeffries J B, Hanson R K 2017 *Prog. Energ. Combust. Sci.* **60** 132
- [2] Bolshov M A, Kuritsyn Y A, Romanovskii Y V 2015 *Spectrochim. Acta B* **106** 45
- [3] Hanson R K, Davidson D F 2014 *Prog. Energ. Combust. Sci.* **44** 103
- [4] Gordon I E, Rothman L S, Hill C, et al. 2017 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **203** 3
- [5] Regalia L, Oudot C, Mikhailenko S, Wang L, Thomas X, Jenouvrier A, Von der Heyden P 2014 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **136** 119
- [6] Barber R J, Tennyson J, Harris G J, Tolchenov R N 2006 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **368** 1087
- [7] Liu X, Zhou X, Jeffries J B, Hanson R K 2007 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **103** 565
- [8] Xu Z Y, Liu W Q, Liu J G, He J F, Yao L, Ruan J, Chen J Y, Li H, Yuan S, Geng H, Kan R F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 234204 (in Chinese) [许振宇, 刘文清, 刘建国, 何俊峰, 姚路, 阮俊, 陈玖英, 李哈, 袁松, 耿辉, 阚瑞峰 2012 物理学报 **61** 234204]
- [9] Zhang L, Liu J G, Kan R F, Liu W Q, Zhang Y J, Xu Z Y, Chen J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 034214 (in Chinese) [张亮, 刘建国, 阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧, 许振宇, 陈军 2012 物理学报 **61** 034214]
- [10] Tao B, Hu Z Y, Wang S, Ye J F, Zhao X Y, Ye X S 2014 *J. Eng. Thermophys.* **35** 4 (in Chinese) [陶波, 胡志云, 王晟, 叶景峰, 赵新艳, 叶锡生 2014 工程热物理学报 **35** 4]
- [11] Wang F, Wu Q, Huang Q, Zhang H, Yan J, Cen K 2015 *Opt. Commun.* **346** 53
- [12] Hunsmann S, Wunderle K, Wagner S, Rascher U, Schurr U, Ebert V 2008 *Appl. Phys. B* **92** 393
- [13] Witzel O, Klein A, Wagner S, Meffert C, Schulz C, Ebert V 2012 *Appl. Phys. B* **109** 521
- [14] Caswell A W, Kraetschmer T, Rein K, Sanders S T, Roy S, Shouse D T, Gord J R 2010 *Appl. Opt.* **49** 4963
- [15] Li F, Yu X, Gu H, Li Z, Zhao Y, Ma L, Chen L, Chang X 2011 *Appl. Opt.* **50** 6697
- [16] Zhang B Q, Xu Z Y, Liu J G, Yao L, Ruan J, Hu J Y, Xia H H, Nie W, Yuan F, Kan R F 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 233301 (in Chinese) [张步强, 徐振宇, 刘建国, 姚路, 阮俊, 胡佳屹, 夏晖晖, 聂伟, 袁峰, 阚瑞峰 2019 物理学报 **68** 233301]
- [17] Huber R, Wojtkowski M, Taira K, Fujimoto J G 2005 *Opt. Express* **13** 3513
- [18] Huber R, Wojtkowski M, and Fujimoto J G 2006 *Opt. Express* **14** 3225
- [19] Kranendonk L A, An X, Caswell A W, Herold R E, Sanders S T, Huber R, Fujimoto J G, Okura Y, Urata Y 2007 *Opt. Express* **15** 15115
- [20] Caswell A W, Roy S, An X, Sanders S T, Schauer F R, Gord J R 2013 *Appl. Opt.* **52** 2893
- [21] Ma L, Li X, Sanders S T, Caswell A W, Roy S R, Plemmons D H, Gord J R 2013 *Opt. Express* **21** 1152
- [22] Zhou X, Liu X, Jeffries J B, Hanson R K 2003 *Meas. Sci. Technol.* **14** 1459
- [23] Fu P F, Chao X, Hou L Y, Wang Z H, Meng Q H 2019 *J. Eng. Thermophys.* **40** 2176 (in Chinese) [符鹏飞, 超星, 侯凌云, 王振海, 孟庆慧 2019 工程热物理学报 **40** 2176]
- [24] Tao M M, Tao B, Yu T, Wang Z B, Feng G B, Ye X S 2016 *Infrar. Laser Eng.* **45** 1205002 (in Chinese) [陶蒙蒙, 陶波, 余婷, 王振宝, 冯国斌, 叶锡生 2016 红外与激光工程 **45** 1205002]
- [25] Tao M, Tao B, Hu Z, Feng G, Ye X, Zhao J 2017 *Opt. Express* **25** 32386
- [26] Tao M M, Tao B, Ye J F, Shen Y L, Huang K, Ye X S, Zhao J 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 034205 (in Chinese) [陶蒙蒙, 陶波, 叶景峰, 沈炎龙, 黄珂, 叶锡生, 赵军 2020 物理学报 **69** 034205]
- [27] Jackson S D, King T A 1999 *J. Lightwave Technol.* **17** 948
- [28] Jackson S D, King T A 1998 *Opt. Lett.* **23** 1462
- [29] Schulze G, Jirasek A, Yu M M L, Lim A, Turner R F B, Blades M W 2005 *Appl. Spectrosc.* **59** 545

# Hyperspectral absorption of water around 2 $\mu\text{m}$ based on a broadband tunable, narrow linewidth Tm-doped fiber laser\*

Tao Meng-Meng<sup>1)2)</sup> Wang Ya-Min<sup>2)</sup> Wu Hao-Long<sup>2)</sup> Li Guo-Hua<sup>2)</sup>  
Wang Sheng<sup>2)</sup> Tao Bo<sup>2)</sup> Ye Jing-Feng<sup>2)†</sup> Feng Guo-Bin<sup>2)</sup>  
Ye Xi-Sheng<sup>1)</sup> Chen Wei-Biao<sup>1)‡</sup>

1) (*Wang Zhijiang Laser Innovation Center, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

2) (*State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

( Received 18 November 2021; revised manuscript received 1 March 2022 )

## Abstract

The 1.8–2.0  $\mu\text{m}$  waveband contains abundant absorption lines of water, which are much stronger than those in the traditional 1.3–1.5  $\mu\text{m}$  waveband, exhibiting huge potentials for absorption spectrum applications of water. In the hyperspectral absorption spectrum, physical parameters of the target molecule can be derived from lots of absorption lines within a broadband scanning range, achieving the results more robust, accurate and versatile than the results from the conventional tunable diode laser absorption spectrum in which only one or two absorption lines are used. The key to hyperspectral absorption is the development of broadband tunable, narrow linewidth laser sources emitting in the wavelength range of interest. With a tunable fiber FP filter and a fiber saturable absorber, a Tm-doped fiber laser is established, featuring broadband tunability and narrow linewidth. Taking advantage of the re-absorption characteristics of Tm-doped silica fibers, a wavelength tuning range covering 60 nm from 1910–1970 nm is obtained through the appropriately designing of the active fiber length. The measured laser linewidth at steady state is smaller than 0.1 nm, which is suitable for water absorption spectrum. Hyperspectral absorption measurements of water in air and alcohol flame are conducted. In room-temperature air, more than 40 absorption lines are recognized within a tuning range of 1910–1965 nm, while, in alcohol flame, the number of detected lines reaches about 50. Comparison with the HITRAN2016 database gives a laser linewidth of about 0.06 nm which is very close to the static linewidth measured by an OSA. The temperature of the air is derived to be 298 K with a water mole fraction of about 2%, which is consistent with the measurement of the hygromograph. And the calculation indicates an alcohol flame temperature of about 1220 K, which is very close to the measurement result of the thermocouple.

**Keywords:** hyperspectral absorption, tunable diode laser absorption spectroscopy, fiber saturable absorber, Tm-doped fiber laser

**PACS:** 42.62.Fi, 33.20.Ea, 42.55.Wd, 42.68.Ca

**DOI:** 10.7498/aps.71.20212127

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62105268, 91841303, 52106222) and the State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, China (Grant No. SKLLIM2110).

† Corresponding author. E-mail: [yejingfeng@nint.ac.cn](mailto:yejingfeng@nint.ac.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [wchen@siom.ac.cn](mailto:wchen@siom.ac.cn)