

可调谐掺铥光纤激光器线宽压缩及其超光谱吸收应用

陶蒙蒙 陶波 叶景峰 沈炎龙 黄珂 叶锡生 赵军

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

Tao Meng-Meng Tao Bo Ye Jing-Feng Shen Yan-Long Huang Ke Ye Xi-Sheng Zhao Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 034205 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20191515

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191515>

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

基于石墨烯可饱和吸收体的纳秒锁模掺铥光纤激光器

Nanosecond mode-locked Tm-doped fiber laser based on graphene saturable absorber

物理学报. 2017, 66(11): 114209 <https://doi.org/10.7498/aps.66.114209>

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>

基于可调谐半导体激光器吸收光谱的高灵敏度甲烷浓度遥测技术

High sensitive scheme for methane remote sensor based on tunable diode laser absorption spectroscopy

物理学报. 2017, 66(10): 100702 <https://doi.org/10.7498/aps.66.100702>

基于TDLAS技术的水汽低温吸收光谱参数测量

Measuring spectral parameters of water vapor at low temperature based on tunable diode laser absorption spectroscopy

物理学报. 2017, 66(20): 204204 <https://doi.org/10.7498/aps.66.204204>

基于WS₂可饱和吸收体的调Q锁模Tm, Ho: LLF激光器

Passively Q-switched mode-locked Tm, Ho:LLF laser with a WS₂ saturable absorber

物理学报. 2017, 66(11): 114207 <https://doi.org/10.7498/aps.66.114207>

基于可调谐二极管激光技术利用小波去噪在2.008 μm波段对 δ¹³C₂O₂的研究(已撤稿)

The research of δ¹³C₂O₂ by use of wavelet de-noising at 2.008 μm based on tunable diode laser absorption spectroscopy

物理学报. 2017, 66(2): 024202 <https://doi.org/10.7498/aps.66.024202>

可调谐掺铥光纤激光器线宽压缩及其超光谱吸收应用*

陶蒙蒙¹⁾ 陶波^{1)†} 叶景峰¹⁾ 沈炎龙¹⁾ 黄珂¹⁾ 叶锡生²⁾ 赵军¹⁾

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

2) (中国科学院上海光学与精密机械研究所, 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)

(2019年10月8日收到; 2019年11月1日收到修改稿)

可调谐二极管激光吸收光谱技术是一种应用非常广泛的吸收光谱测量技术. 利用宽带可调谐窄线宽光源进行吸收光谱测量的超光谱吸收技术可以在单次扫描中获取一段连续光谱的所有吸收数据, 可大大提高可调谐二极管激光吸收光谱技术的数据信息容量和光谱诊断能力. 分析了在 $2\ \mu\text{m}$ 波段对水进行超光谱吸收测量时对激光器输出线宽的具体要求. 利用掺铥光纤在 $2\ \mu\text{m}$ 波段较宽的发射谱, 采用可调谐法布里-珀罗滤波器和光纤可饱和吸收体相结合的技术方案搭建了一台宽带调谐窄线宽的 $2\ \mu\text{m}$ 光纤激光器. 获得了 $1840\text{--}1900\ \text{nm}$ 约 $60\ \text{nm}$ 范围的调谐光谱输出, 激光器静态线宽仅为 $0.05\ \text{nm}$. 利用该光源对空气中水在 $2\ \mu\text{m}$ 波段的吸收光谱数据进行了超光谱吸收测量, 在 $1856\text{--}1886\ \text{nm}$ 约 $30\ \text{nm}$ 的光谱范围内分辨了 35 条水的吸收谱线. 通过对不同线宽条件下 $1870\text{--}1880\ \text{nm}$ 范围内的理论吸收光谱数据进行对比发现, 测量数据无法有效分辨分别位于 $1873\ \text{nm}$ 和 $1877\ \text{nm}$ 处与强吸收线相邻的两条吸收谱线, 且测量结果与激光线宽在 $0.08\ \text{nm}$ 条件下的 HITRAN2012 光谱数据库最为接近. 这表明, 在动态扫描过程中激光器的线宽得到了展宽.

关键词: 可调谐二极管激光吸收光谱, 光纤可饱和吸收体, 线宽压缩, 超光谱吸收

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

DOI: 10.7498/aps.69.20191515

1 引言

可调谐窄线宽激光器在高精度激光光谱学, 尤其是吸收光谱领域有着十分重要的应用^[1-3]. 激光吸收光谱技术利用气体分子对特定激光谱线的选择性吸收来实现对气体特性的精确测量. 可调谐二极管激光吸收光谱 (tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS) 技术是目前应用最为广泛的吸收光谱测量技术之一. 该技术使用可调谐半导体激光器作为激光光源, 其输出线宽极窄, 可以获得高精度的吸收光谱数据^[4-7]. 但是, 传统的可调

谐半导体激光器的快速调谐范围极其有限, 无法实现对多谱线、多气体组分的测量, 极大地限制了 TDLAS 技术的测量效率^[8].

在较宽的光谱范围内获得连续吸收光谱信息的测量技术称为超光谱吸收测量技术. 与传统的分立谱线吸收技术相比, 超光谱吸收技术可以大大提高吸收光谱的测量效率^[9,10]. 宽带调谐窄线宽激光器是超光谱吸收技术的重要光源.

与传统的 $1.25\text{--}1.65\ \mu\text{m}$ 通信波段相比, $2\ \mu\text{m}$ 波段有着更为丰富且吸收强度更强的水和二氧化碳的吸收峰^[11-14], 这表明 $2\ \mu\text{m}$ 波段在吸收光谱领域有着更大的应用价值, 亟待开发. $2\ \mu\text{m}$ 波段光源

* 国家自然科学基金 (批准号: 91541203, 91641112) 和激光与物质相互作用国家重点实验室基金 (批准号: SKLLIM1709) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: taobo@nint.ac.cn

的研制将大大提高 TDLAS 技术的诊断能力和效率, 拓展其应用范围.

掺铥和铥钬共掺光纤激光器发射谱段覆盖 1.7—2.1 μm ^[15–17], 是水和二氧化碳吸收谱线测量的理想光源. 早在 2003 年, Stark 等^[18]通过在一个多模掺铥光纤激光器系统内使用腔内吸收设计, 在 1.7—1.98 μm 测到了大量的水和二氧化碳的吸收谱线. 2010 年, 美国国家航空航天局兰利研究中心研发了一套掺铥光纤激光器雷达系统来测量地球和火星上的水气分布^[19]. 通过使用光栅和标准具, 该激光器线宽仅为 20 pm. 2013 年, Bremer 等^[20]搭建了一个 1.995 μm 的全光纤掺铥激光器, 对二氧化碳的吸收特性进行了测量. 该激光器线宽为 0.14 nm, 可调谐范围为 5 nm. 但是, 对于超光谱吸收应用而言, 除了要求激光器具有宽调谐、窄线宽特性之外, 还要求激光器能够做到快速调谐, 这就对激光器的研发提出了极大的挑战.

可调谐法布里-珀罗滤波器是实现激光器光谱快速大范围调谐的重要光学器件. 前期的实验中, 使用可调谐法布里-珀罗滤波器对掺铥光纤激光器的波长可调谐特性进行了实验研究, 获得了 1840—1900 nm 的可调谐输出, 调谐光谱范围达 60 nm^[21]. 虽然该激光器输出线宽较窄, 仅约为 0.07 nm, 但仍然无法满足光谱吸收测量技术的要求. 本文使用光纤可饱和吸收体对激光器的输出光谱做了进一步压缩. 压缩后激光器静态输出线宽约为 0.05 nm. 利用该光源对水在 2 μm 波段的吸收谱线开展了超光谱吸收测量, 实验中在 1856—1886 nm 约 30 nm 的光谱范围内测得了 35 条水的吸收谱线, 与 HITRAN2012 光谱数据库相吻合.

2 吸收光谱应用对激光器的线宽要求

水在 2 μm 附近存在密集的吸收线, 所以测量中不可能探测和分析所有的吸收谱线, 而是根据具体的测量需求选择特定的吸收谱线. 图 1 所示为基于 HITRAN2012 光谱数据库作出的常温常压环境下水在 1840—1900 nm 波段的吸收谱线^[11]. 其中设定激光器线宽为 0, 吸收谱线型为 Voigt, 大气压强为 1 atm (1 atm = 1.01×10^5 Pa), 水摩尔分数为 0.1. 可以看出在常压环境下水的吸收谱线基本是相互分立的, 且在 1870 nm 附近集中了大量的较强的吸收谱线.

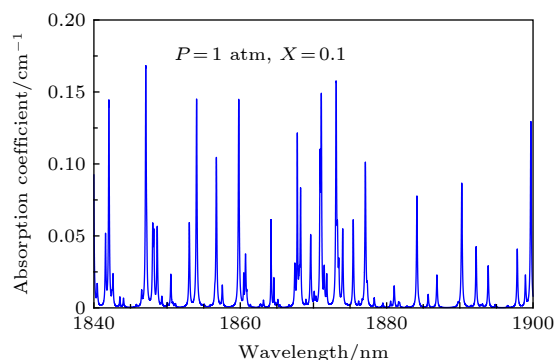


图 1 水在 1840—1900 nm 波段的吸收谱线

Fig. 1. Absorption spectrum of water in the wavelength range of 1840–1900 nm.

激光线宽对水在 1871 nm 附近吸收光谱测量结果的影响如图 2 所示, 其中激光线型采用 Gauss 函数, 吸收谱线线型采用 Voigt 函数. 可以看出激光线宽达到 0.10 nm 时还可以勉强分辨出不同的吸收谱线, 而在达到 0.14 nm 时不同的吸收线之间则开始存在明显的重叠. 鉴于实际应用中存在测量噪声以及激光波长的模式抖动, 所以要求激光器的线宽应小于 0.07 nm, 以达到分辨不同吸收谱线的要求. 因此, 0.07 nm 可认为是该波段的光谱分辨阈值.

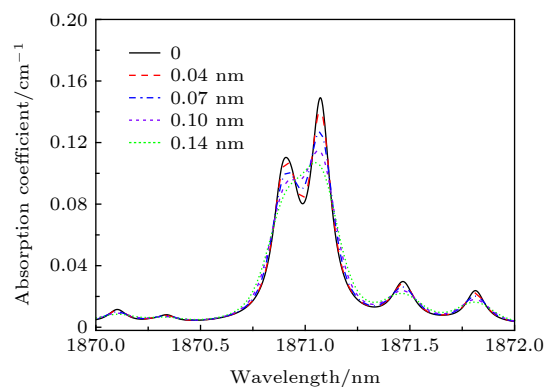


图 2 不同激光线宽对 1870 nm 附近吸收谱线的影响

Fig. 2. Influences of laser linewidth on the detected absorption lines around 1870 nm.

3 宽带调谐、窄线宽 2 μm 光源

在前期实验获得可调谐波长输出的基础上, 设计了如图 3 所示的改进结构. 该结构中通过激光器谐振腔内加入一段铥钬共掺光纤作为可饱和吸收体, 对激光器的输出线宽进行进一步的压缩.

实验中观察到激光器的振荡阈值约为 210 mW, 但是, 在低抽运功率下激光器输出呈脉冲模式, 如

图 4 所示. 图中脉冲序列是在可调谐法布里-珀罗腔重频扫描模式下记录的. 可以看出, 在一个三角波扫描周期中当扫描电压发生非线性变化时, 脉冲强度出现明显的降低.

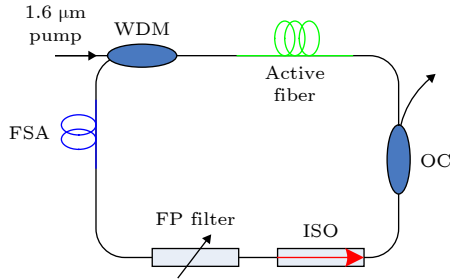


图 3 基于光纤可饱和吸收体的激光器线宽压缩光路设计 (WDM, 反射式波分复用器; OC, 输出耦合器; ISO, 光纤隔离器; FSA, 光纤可饱和吸收体; FP filter, 法布里-珀罗滤波器)

Fig. 3. Linewidth compression design of laser based on fiber saturable absorber (WDM, wavelength division multiplexer; OC, output coupler; ISO, isolator; FSA, fiber saturable absorber; FP filter, Fabry Perot filter).

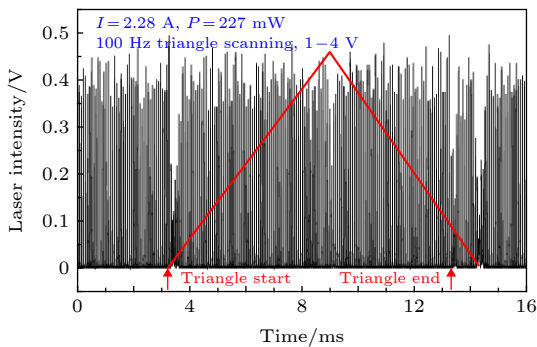


图 4 低抽运功率下激光器脉冲输出序列

Fig. 4. Output pulse train of laser at low pump power.

图 5 为在半个三角波扫描周期内截取的激光器输出脉冲. 从图 5(a) 可见, 各脉冲间隔相等, 对应的脉冲重频 (repeat rate, RR) 约为 11.8 kHz, 但脉冲强度波动较大. 图 5(b) 所示为脉冲序列中的单个脉冲波形, 其脉冲宽度 w 约为 7.5 μ s.

该脉冲输出是由环形腔内的铥钛共掺光纤所导致的. 铥钛共掺光纤作为可饱和吸收体一方面能够实现对激光线宽的压缩, 另一方面也可以实现对激光信号的脉冲调制. 由图 5 所示的脉冲输出特性可见, 该激光器脉冲输出特性 (RR 为 10 kHz 量级, w 为数微秒) 与铥钛共掺光纤可饱和吸收体的脉冲调制特性相近 [22,23].

抽运功率在 300 mW 以上时, 激光器进入连

续运转模式. 在连续运转模式下使用量热型功率计对激光器的长时间输出功率稳定性进行了监测, 测量结果如图 6 所示. 可以看出, 激光器长时间输出功率稳定性较好. 统计分析表明, 10 min 内激光器平均输出功率约为 27.4 mW, 功率均方根 (root mean square, RMS) 不稳定性约为 0.5%.

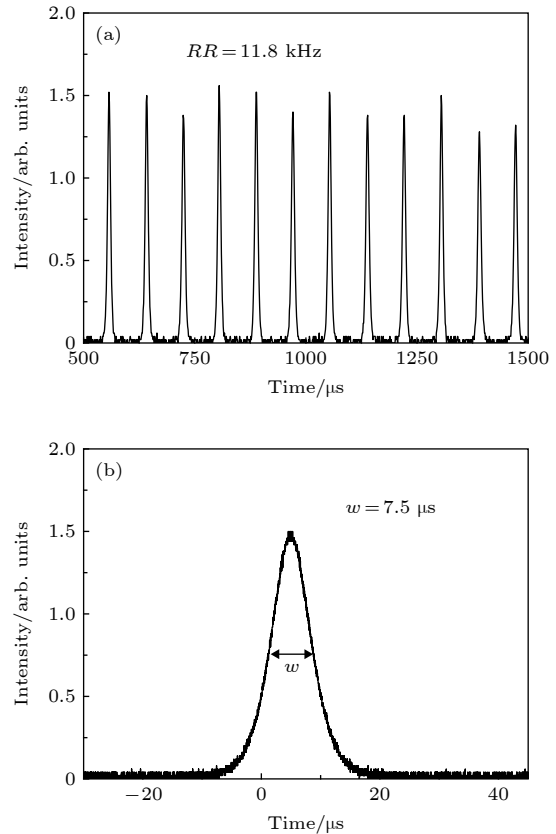


图 5 低抽运功率下半个扫描周期内的输出脉冲 (a) 脉冲序列; (b) 单个脉冲

Fig. 5. Output pulses in a half scanning period at low pump power: (a) Pulse train; (b) a single pulse.

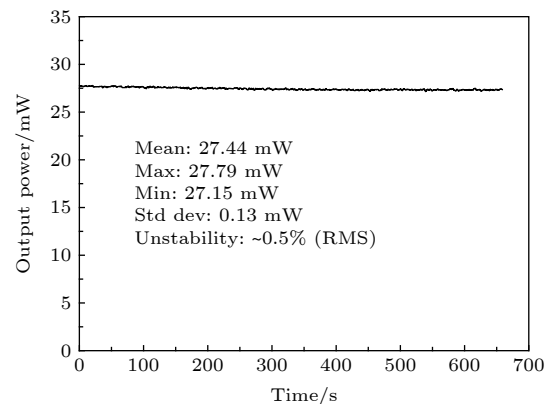


图 6 连续运转模式下激光器的长时间输出功率监测

Fig. 6. Long-time output power record of laser at continuous wave operation.

为了进一步测量激光器输出功率的瞬时稳定性,使用光电探测器对激光器在波长扫描连续运转模式下的瞬时输出功率进行了监测,测量结果如图 7 所示.可以看出,在三角波扫描的过程中,当扫描电压发生转折时,光强会出现较大的噪声,因此,在吸收光谱测量应用中应尽量避免这些区域.但是,由于该噪声持续时间极短,量热型功率计无法分辨,因此图 6 中并未发现明显的功率抖动现象.

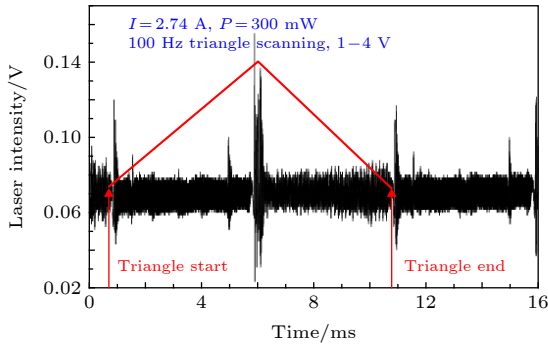


图 7 连续运转模式下激光器的瞬时输出功率监测
Fig. 7. Instantaneous output power of laser at continuous wave operation.

激光器扫描波长范围与文献 [21] 中的测量结果一致,均为 1840—1900 nm.在固定波长条件下激光器的典型输出光谱如图 8 所示.与文献 [21] 中的实验结果对比可以看出,插入光纤可饱和吸收体后激光器输出光谱宽度得到了明显压缩.受限于光谱仪的分辨率 (0.06 nm),实际测到的光谱线宽约为 0.05 nm,能够满足吸收光谱测量的线宽要求.

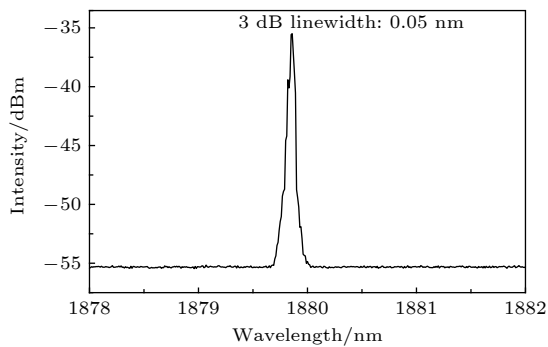


图 8 加入光纤可饱和吸收体后激光器典型输出光谱
Fig. 8. Typical output spectrum of laser with fiber saturable absorber.

使用法布里-珀罗干涉仪对激光器的输出线宽进行了扫描测试.法布里-珀罗干涉仪自由光谱范围为 10 GHz,设定扫描频率为 10 Hz,典型的扫描结果如图 9 所示.可以看出,激光器为多纵模输出.

根据各模式之间的时间关系,计算可得多纵模输出下激光器线宽约为 3.4 GHz,即 0.04 nm,与图 8 中光谱仪的测量结果基本一致.

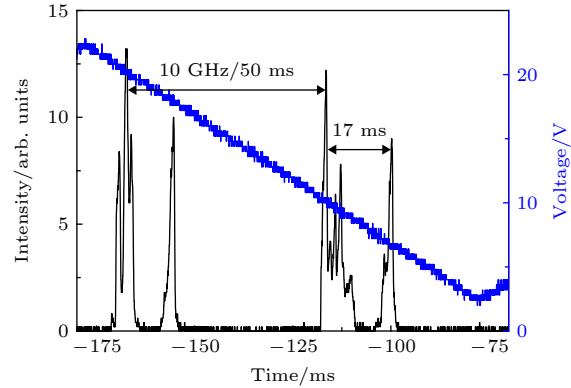


图 9 法布里-珀罗干涉仪扫描得到的激光器线宽特性
Fig. 9. Laser linewidth measured with a scanning Fabry-Perot interferometer.

为了进一步优化激光器的输出线宽,在腔内引入了偏振控制,通过对环形腔内光纤施加应力,改变激光器的输出纵模特性.不同应力下的激光器输出线宽扫描结果如图 10 所示.图 10(a) 所示为激

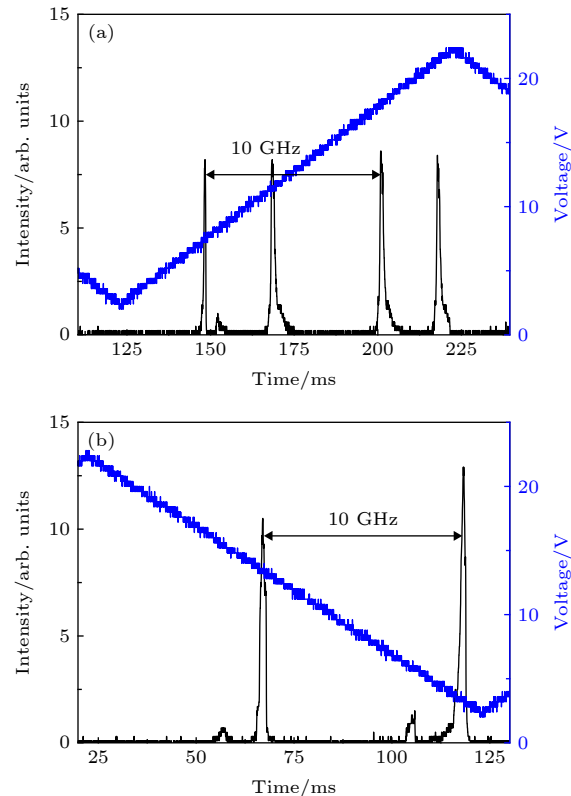


图 10 偏振控制条件下激光器输出纵模特性 (a) 双纵模; (b) 单纵模
Fig. 10. Oscillating laser modes measured with polarization control: (a) Dual modes; (b) single mode.

光器双纵模输出时的测量结果, 计算可得两个纵模之间的间隔约为 4 GHz (47 pm), 单个纵模线宽约为 0.20 GHz (2.4 pm). 通过调节偏振控制器, 抑制了双纵模中其中一个纵模的振荡输出, 得到了如图 10(b) 所示的单纵模输出, 计算可得此时的激光线宽约为 0.33 GHz (3.9 pm).

4 超光谱吸收测量实验

无偏振控制状态下, 利用上述宽带调谐、窄线宽为 2 μm 激光光源对室温下大气中水的吸收谱线进行了超光谱吸收测量. 测量中, 法布里-珀罗腔通过一个 50 Hz 的三角波进行驱动, 扫描电压范围为 0—10 V, 此时激光器覆盖 1856—1886 nm 约 30 nm 的光谱范围. 激光光束传输通过约 50 cm 长的大气后进入探测器直接进行吸收光谱探测.

实验中使用了两种探测器对吸收谱线进行测量, 分别是 HgCdTe 探测器和带放大电路的扩展型 InGaAs (InGaAs PDA) 探测器. 两种探测器测得的吸收数据如图 11 所示. 图 11(a) 为 HgCdTe 探测器的测量数据, 图 11(b) 为 InGaAs PDA 探测器的测量数据. 通过对比可知, InGaAs PDA 探测器的信号经放大后在幅度上要高于 HgCdTe 探测器, 但是 HgCdTe 探测器得到的吸收谱线强度和信噪比要明显高于 InGaAs PDA 探测器, 因此实验数据处理中使用 HgCdTe 探测器的测量数据.

图 11(a) 中包含 5 个扫描周期的吸收测量信号, 可以看出, 吸收信号表现出较好的周期性. 可见, 虽然激光器不是单纵模输出, 但依然可以满足超光谱吸收测量的应用要求. 图 12 为减去基线后典型的单个扫描周期内测量的直接吸收光谱, 可以看出前半扫描周期和后半扫描周期获得直接吸收光谱存在很好的对称性, 表明激光器在三角波的上升沿和下降沿扫描过程中有着良好的波长稳定性和重复性. 图 12 内插图为例部的吸收光谱放大图, 可以看出每个吸收峰其实是由多条吸收谱线构成的.

对数据做匀化处理, 得到的半个扫描周期内水的吸收谱线如图 13 所示. 同时, 图 13 给出了根据 HITRAN2012 光谱数据库计算得出的理论吸收谱线. 可以看出, 在 1856—1886 nm 约 30 nm 的光谱范围内, 水的吸收谱线主要集中在 1870 nm 附近. 实验中共测量并分辨了 35 条水的吸收谱线. 必须

指出的是, 计算中设定激光线宽约为 0.08 nm, 此时, 理论吸收谱线与实测数据吻合较好. 可见, 与静态线宽相比, 激光器在动态扫描下线宽出现了一定的展宽.

为了检验实验所测吸收光谱数据的分辨率,

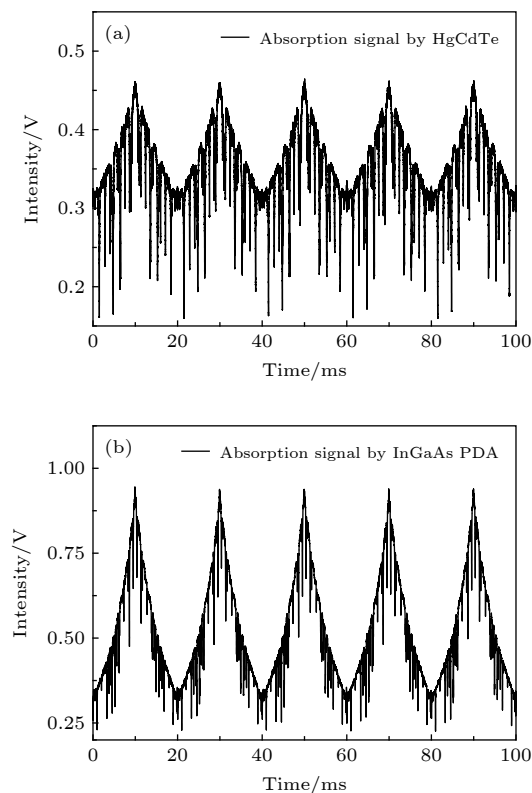


图 11 实验测得的吸收信号: (a) HgCdTe 探测器; (b) InGaAs PDA 探测器

Fig. 11. Measured absorption signal: (a) HgCdTe detector; (b) InGaAs PDA detector.

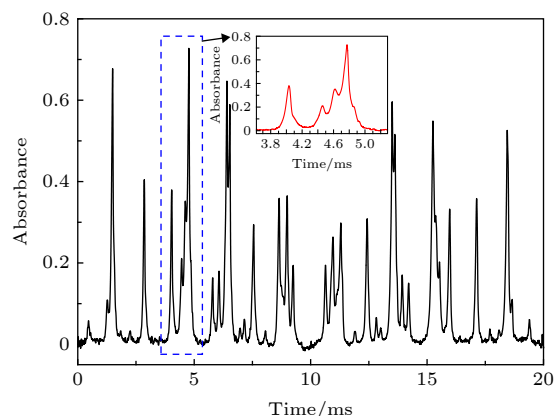


图 12 典型的单个激光器扫描周期内测量的直接吸收光谱 (内插图为例部的吸收光谱放大图)

Fig. 12. Typical direct absorption spectrum in a single scanning period. The insert is the enlarged local absorption spectrum.

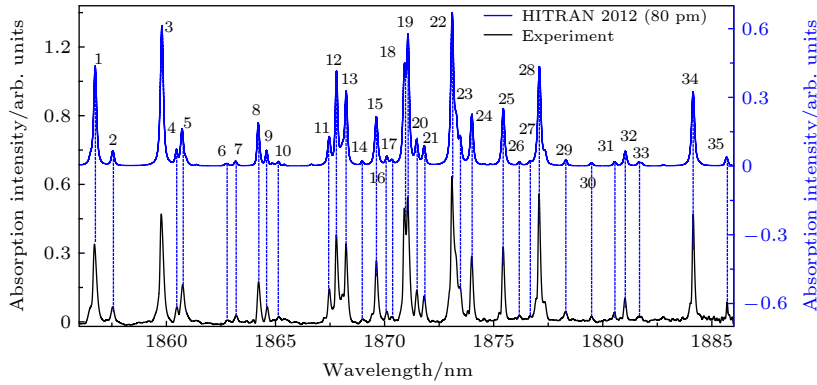


图 13 1856—1886 nm 范围内水的吸收光谱数据

Fig. 13. Absorption spectra of water from 1856 nm to 1886 nm.

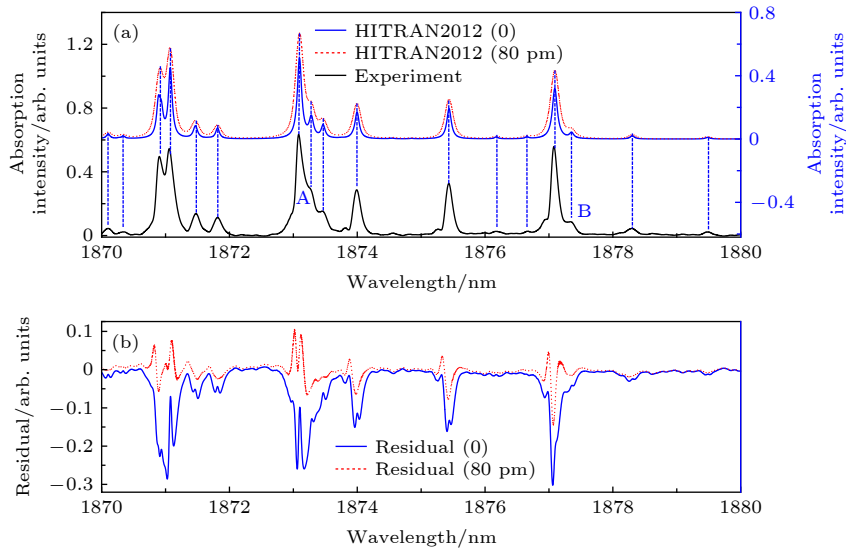


图 14 1870—1880 nm 范围内吸收谱线及残差 (a) 吸收谱线; (b) 残差

Fig. 14. Absorption lines and corresponding residuals of water in 1870—1880 nm wavelength range: (a) Absorption lines; (b) residuals.

对 1870—1880 nm 范围内的吸收谱线进行放大, 如图 14 所示. 图 14(a) 同时给出了理想激光线宽下的理论吸收谱线. 通过对比可以发现, 理想线宽下, 在 1870—1880 nm 范围内, 水存在约 17 条吸收谱线, 而实测吸收谱线和激光线宽为 0.08 nm 的理论计算谱线均无法有效分辨图中标注的 A 和 B 两条吸收线. 这是由于 A 和 B 处两套吸收线与相邻的吸收线距离较近, 而激光器在动态扫描过程中线宽展宽使得无法有效分辨相邻的吸收谱线.

图 14(b) 所示为实测吸收谱与两种不同激光线宽下计算得到的理论吸收谱之间的残差. 对比可见, 实测吸收谱与 0.08 nm 激光线宽下的理论吸收谱较为吻合, 验证了大范围扫描时激光线宽的展宽, 可见大范围快速扫描条件下激光器的线宽特性

还有待进一步提高.

5 结 论

本文搭建了一台基于法布里-珀罗腔的窄线宽可调谐掺铒光纤激光器, 并使用铒钛共掺光纤作为可饱和吸收体对掺铒光纤激光器进行了线宽压缩. 静态测量中, 激光线宽约为 0.05 nm, 且通过偏振控制可实现单纵模输出. 利用该光源对水在 2 μm 波段的超光谱吸收数据进行了测量, 测量结果与 HITRAN2012 光谱数据库相吻合. 但通过与理论计算吸收数据对比发现, 动态扫描中激光线宽出现了展宽. 后续可通过在腔内引入光纤环滤波器的方法对激光器输出线宽做进一步压缩. 另外, 通过适当的设计, 该光源还有望覆盖二氧化碳在 2 μm 波

段的部分吸收谱线, 实现对二氧化碳的吸收光谱的测量.

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] Ding W W, Sun L Q, Yi L Y 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 100702 (in Chinese) [丁武文, 孙利群, 衣路英 2017 物理学报 **66** 100702]
- [4] Wu Q, Wang F, Li M, Yan J 2017 *Combust. Sci. Technol.* **189** 1571
- [5] Sur R, Sun K, Jeffries J B, Socha J G, Hanson R K 2015 *Fuel* **150** 102
- [6] Tao B, Hu Z Y, Fan W, Wang S, Ye J F, Zhang Z R 2017 *Opt. Express* **25** A762
- [7] Witzel O, Klein A, Wagner S, Meffert C, Schulz C, Ebert V 2012 *Appl. Phys. B* **109** 521
- [8] Wang F, Wu Q, Huang Q, Zhang H, Yan J, Cen K 2015 *Opt. Commun.* **346** 53
- [9] Kranendonk L A, Caswell A W, Hagen C L, Neuroth C T, Shouse D T, Gord J R, Sanders S T 2009 *J. Propul. Power* **25** 859
- [10] Ma L, Cai W, Caswell A W, Kraetschmer T, Sanders S T, Roy S, Gord J R 2009 *Opt. Express* **17** 8602
- [11] Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, Barbe A, Chris Benner D, Bernath P F, Birk M, Bizzocchi L, Boudon V, Brown L R, Campargue A, Chance K, Cohen E A, Coudert L H, Devi V M, Drouin B J, Fayt A, Flaud J M, Gamache R R, Harrison J J, Hartmann J M, Hill C, Hodges J T, Jacquemart D, Jolly A, Lamouroux J, Le Roy R J, Li G, Long D A, Lyulin O M, Mackie C J, Massie S T, Mikhailenko S, Müller H S P, Naumenko O V, Nikitin A V, Orphal J, Perevalov V, Perrin A, Polovt-seva E R, Richard C, Smith M A H, Starikova E, Sung K, Tashkun S, Tennyson J, Toon G C, Tyuterev V G, Wagner G 2013 *J. Quant. Spectrosc. Ra.* **130** 4
- [12] Nie W, Kan R F, Xu Z Y, Yao L, Xia H H, Peng Y Q, Zhang B Q, He Y B 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 204204 (in Chinese) [聂伟, 阚瑞峰, 许振宇, 姚路, 夏晖晖, 彭于权, 张步强, 何亚柏 2017 物理学报 **66** 204204]
- [13] Refaat T F, Singh U N, Yu J, Petros M, Ismail S, Kavaya M J, Davis K J 2015 *Appl. Opt.* **54** 1387
- [14] Gibert F, Flamant P H, Bruneau D, Loth C 2006 *Appl. Opt.* **45** 4448
- [15] Jackson S D, King T A 1999 *J. Lightwave Technol.* **17** 948
- [16] Jackson S D 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 1885
- [17] Jackson S D 2009 *Laser Photon. Rev.* **3** 466
- [18] Stark A, Correia L, Teichmann M, Salewski S, Larsen C, Baev V M, Toschek P E 2003 *Opt. Commun.* **215** 113
- [19] Young R J De, Barnes N P 2010 *Appl. Opt.* **49** 562
- [20] Bremer K, Pal A, Yao S, Lewis E Sen R, Sun T, Grattan K T V 2013 *Appl. Opt.* **52** 3957
- [21] 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]
- [22] Tao M M, Feng G B, Yu T, Ye X S, Wang Z B, Shen Y L, Zhao J 2018 *Opt. Laser Technol.* **100** 176
- [23] Tao M M, Yu T, Chen H W, Shen Y L, Ye X S, Zhao J 2018 *Laser Phys.* **28** 115108

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

Tao Meng-Meng¹⁾ Tao Bo^{1)†} Ye Jing-Feng¹⁾ Shen Yan-Long¹⁾
Huang Ke¹⁾ Ye Xi-Sheng²⁾ Zhao Jun¹⁾

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

2) (*Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

(Received 8 October 2019; revised manuscript received 1 November 2019)

Abstract

Tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) is a widely used technology for measuring absorption spectrum. However, the measurement efficiency of TDLAS is greatly limited by the narrow tuning range of conventional tunable laser diode. Exploiting a wideband, narrow linewidth tuning laser source, hyperspectral absorption spectroscopy possesses the ability to provide the overall absorption information over a continuous waveband in a single scan, which would significantly improve the data volume and diagnostic capability of TDLAS. With profound and strong absorption lines of water and carbon dioxide, the 2 μm waveband is an ideal candidate for water and carbon dioxide related absorption spectrum. An absorption line recognition threshold of 0.07 nm is derived for the absorption spectrum measurement of water around 2 μm through theoretical analysis. Utilizing the wideband emission spectrum of Tm-doped fiber, a wideband tunable, narrow linewidth fiber laser operating at 2 μm is built by combining a tunable FP filter with a fiber saturable absorber. The tunable FP filter is responsible for the wavelength control of the laser system, with which a 60 nm wideband tuning range from 1840 nm to 1900 nm is achieved. With a section of Tm-Ho codoped fiber as the fiber saturable absorber which is used for linewidth compression, a static linewidth of 0.05 nm is attained. This wideband tunable, narrow linewidth fiber laser is tested for the hyperspectral absorption spectrum measurement of water around 2 μm . Driven with a 0–10 V triangle wave at a repetition rate of 50 Hz, the output spectrum of the laser spans over a wavelength range of about 30 nm from 1856 nm to 1886 nm. The laser beam propagates about 50 cm through an open air, and then enters into the detectors for direct measurement. The 35 absorption lines of water are recognized after processing the data. Within the 1870–1880 nm range, comparisons with the theoretical absorption spectra at different laser linewidths, derived from the HITRAN2012 absorption database, show that the measured data cannot effectively distinguish two absorption lines adjacent to the strong absorption line at 1873 nm and 1877 nm. And, the measured results can be best fitted to a laser linewidth of about 0.08 nm, demonstrating that in the dynamic scanning process, the linewidth of the laser is expanded beyond the absorption line recognition threshold. Thus, when operating in a fast wideband scanning mode, the laser system should further compress its linewidth.

Keywords: tunable diode laser absorption spectroscopy, fiber saturable absorber, linewidth compression, hyperspectral absorption

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

DOI: 10.7498/aps.69.20191515

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 91541203, 91641112) and the Fund of the State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, China (Grant No. SKLLIM1709).

† Corresponding author. E-mail: taobo@nint.ac.cn